УДК 662.9(083)
ББК 31.391
Г 67

Г 67 Горелочные устройства промышленных печей и топок (конструкции и технические характеристики): Справочник /А А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, В.Л. Гусовский, Т.В. Калинова. — М.: "Интермет Инжиниринг", 1999. — 560 с.
ISBN 5-89594-029-3

Даны основные положения разработки систем отопления промышленных печей, классификация, терминология и общие требования к горелочным устройствам. Приведены различные типы горелок, форсунок, радиационных труб, запальных устройств и огнеупорных горелочных блоков к ним. Описаны конструкции горелок и характеристики создаваемых ими факелов. Изложены принципы изготовления и испытания горелок, а также диагностика характеристик их факелов.

Рассчитан на инженерно-технических работников проектных, исследовательских и наладочных организаций, металлургических, машиностроительных и других предприятий, где применяют горелочные устройства. Может быть полезен преподавателям и студентам вузов и техникумов соответствующей специализации. Ил. 272. Табл. 87. Библиогр. список: 44 назв.

Работа представлена в авторской редакции.

УДК 662.91(083)
ББК 31 39

ISBN 5-89594-029-3

© Винтовкин А.А , Ладыгичев М.Г.,
Гусовский В Л , Калинова Т В.,
"Интермет Инжиниринг", 1999 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 7

Глава 1. Общие принципы разработки системы отопления 10

1.1. Основные положения 10

1.2. Шахтные печи 13

1.3. Воздухонагреватели 15

1.4. Горны агломерационных конвейерных машин 17

1.5. Горны обжиговых машин для производства окатышей 18

1.6. Трубчатые вращающиеся печи 20

1.7. Плавильные печи 23

1.8. Нагревательные колодцы 24

1.9. Высокотемпературные нагревательные проходные печи 25

1.10. Проходные и протяжные печи для термической обработки 27

1.11. Садочные печи для термической обработки 30

1.12. Печи и устройства для сушки изделий и материалов 32

Глава 2. Нормативные требования к горелкам и документации 34

2.1 Терминология 34

2.2 Классификация 42

2.3. Общие технические требования 45

Глава 3. Диффузионные горелки 59

3.1. Основные закономерности струйных течений и свободных диффузионных факелов 59

3.1.1. Свободные изотермические струи 59

3.1.2 Горящие струи газа 62

3.1.3. Горящие струи при частичном ограничении потока смесительным устройством 68

3.2 Горелка регулируемая диффузионная 74

3.3. Вихревая реверсивная горелка 76

3.4. Газовые горелки ВостИО 78

3.5. Горелки для шахтных печей обжига извести 81

3.6. Горелки для сжигания газа в слое окатышей 83

Глава 4. Горелки без предварительного смешения 85

4.1. Расчет основных размеров горелок 86

4.2. Горелки типа «труба в трубе» 89

4.3. Выбор горелок типа «труба в трубе» 94

4.4. Харахтеристики факела горелок ДВБ и ДВС 100

4.5. Горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха ДШ 106

4.6. Характеристики факела горелок типа ДШ 110

4.7. Длиннопламенные горелки ВНИИМТ-Д 111

4.8. Инжекционные горелки горнов обжиговых машин 120

4.9. Горелки вращающихся печей для боковой компоновки 123

4.10. Газокислородная горелка для местного нагрева 128

Глава 5. Горелки газовые с улучшенным смешением 130

5.1. Газовоздушная фурма доменной печи 131

5.2. Двухпроводные горелки доменных воздухонагревателей 132

5.3 Керамические горелки воздухонагревателей 137

5.4. Форкамерная горелка бесшахтного воздухонагревателя ВНИИТМ 139

5.5. Горелки нагревательных колодцев 141

5.6. Вихревые горелки ВНИИТМ-Уралмаш для газов с низкой теплотой сгорания 141

5.7. Горелки турбулентные ГТН 147

5.8. Горелки для природного газа типа ГНП 150
5.9. Горелка с рециркуляционной вставкой 156
5.10. Горелки дутьевые унифицированные ГДУВ 157
5.11. Горелки радиационные типа ГР и ГРВ 159
5.12. Плоскопламенные горелки типа ГПП 167
5.13. Горелки с излучающей чашей типа ГВИЧ 170
5.14. Скоростные горелки ОАО «Уралмаш» 173
5.15. Скоростная горелка Теплопроекта ЗСВ-24-120 175
5.16. Скоростная горелка СВП 177
5.17. Горелки с переменным избытком воздуха типа ПИВ 178
5.18. Горелки скоростные типа ПИВС 181
5.19. Горелки ГА 183
5.20 Горелки типа Г (Г-0,4; Г-1,0) 186
5.21. Горелки типа ГГВ 188
5.22. Горелки с переменным избытком воздуха ГТПЦ 189
5.23. Горелка со струйной стабилизацией ГГС 191
5.24 Вихревые газовые горелки «ЮМАС» 195
5.25. Циклонная горелка ВНИИМТ 198
5.26 Система сжигания газа с регенеративными горелками 200
5.27 Рекуперативная горелка 204
Глава 6. **Горелки с регулируемым смешением** 206
6.1. Горелка ВНИИМТ-Р с регулируемой длиной и формой факела 206
6.2. Горелки ВНИИМТ с регулируемой длиной факела 212
6.3 Горелка ГТГ ВостИО с регулируемой длиной факела 214
6.4 Горелка с регулируемой длиной факела КПТИ и ВНИИпромгаза 216
6.5 Горелка типа ГРФ с регулируемой длиной факела 218
6.6 Горелка ГРДФ-8 ВНИИМТ с регулируемой длиной факела 219
6.7. Горелки типа ГРБ для сжигания природного газа с забалластированным воздухом 221
6.8. Горелка ГСТ с регулируемой длиной факела 227
6.9. Горелка для совместного сжигания природного и ферросплавного газов в трубчатых печах 229
6.10. Горелка для сжигания природного и ферросплавного газов в топках котлов 232
6.11. Горелка с регулируемой длиной факела ГПГ НПО Промгаз 235
6.12. Горелка типа «Гриф» 237
6.13 Горелка для сжигания природного газа при распыливании в факеле воды 239
6.14 Горелка для сушки и разогрева футеровки ковше 241
6.15. Комбинированная инжекционная горелка для сушки футеровки ковшей 243
Глава 7. **Горелки с предварительным смешением** 246
7.1. Расчет инжекционных горелок 248
7.2 Выбор и перерасчет нормализованных горелок 259
7.3. Инжекционные горелки типа Н 261
7.4 Инжекционные горелки типа П 267
7.5 *Инжекционные горелки типа В и ВП* 272
7.6 *Инжекционные горелки типа ИУ* 280
7.7 Беспламенные панельные горелки типа ГБПш 285
7.8 Инжекционно-атмосферные горелки типа ИА 287
7.9 Двухпроводные инжекционные смесители 290
7.10. Скоростные горелки типа ГВ 293
7.11 Горелка полного предварительного смешения для

безокислительного нагрева ... 296
7.12 Дутьевые горелки типа ДИС с инжекционным смесителем ... 297
7.13. Скоростные горелки для безокислительного нагрева ГГПС ... 299
7.14. Горелки типа ГВН для внепечного нагрева ... 302
7.15. Газовая горелка предварительного смешения ... 304
7.16 Блочные инжекционные горелки БИГ и БИГ-М ... 305
7.17. Газовый смеситель ВНИИМТ ... 309
7.18. Горелочный блок патентировочной печи ... 310
7.19 Горелка для камер скоростного нагрева ленты ... 311
7.20 Струйно-факельный нагреватель СФН ... 312
7.21 Горелочное устройство ГМП-200 печи скоростного струйного нагрева 314
Глава 8. Форсунки для распыливания жидкого топлива ... 317
8.1. Общие положения ... 317
8.2. Расчет форсунок высокого давления ... 319
8.3. Форсунки высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД 324
8.4 Пневматическая форсунка УПИ-К ... 328
8.5 Короткофакельные форсунки системы Карабина типа ФК ... 329
8.6. Пневматическая форсунка ВНИИТМ ... 331
8.7. Форсунки низкого давления конструкции Стальпроекта ... 334
8.8. Расчет акустических форсунок ... 337
8.9. Механические форсунки ... 339
8.9.1. Форсунки типа ОН-521 и ОН-547 ... 339
8.9.2 Механические форсунки с обратным сливом топлива ... 340
8.10. Паромеханические форсунки ... 342
Глава 9. Газомазутные горелки ... 345
9.1 Горелки нагревательных печей завода «Серп и молот» ... 346
9.2. Горелки типа ГКВГ ... 347
9.3. Горелка типа КГМГ-А ... 350
9.4. Комбинированная горелка ГКНД ... 354
9.5. Комбинированные горелки ВНИИМТ ... 356
9.6. Газомазутные горелки ГМР ... 359
9.7. Низкотемпературные газомазутные горелки ВНИИМТ ... 361
9.8. Горелка газомазутная акустическая ГКА-100 ... 363
9.9. Горелка Теплопроекта ГМП ... 365
9.10. Вихревые газомазутные горелки ВНИИМТ-ОАО Уралмаш ... 366
9.11. Мазутная горелка ОАО Уралмаш-ВНИИМТ ... 369
9.12. Газомазутные горелки ВостИО ... 373
9.13. Газомазутные горелки УГТУ-НПФ «Горелочный центр» ... 374
9.14. Газомазутная горелка ВНИИМТ для отражательной печи ... 375
9.15. Горелки ГМТм ... 377
9.16. Газомазутные горелки ГМГБ ... 379
9.17. Газомазутная горелка ДКЗ ... 381
9.18. Горелки ГМ и ГМП ... 383
9.19. Форкамерные газомазутные горелки ВНИИМТ ... 386
Глава 10. Рекуперационные трубы ... 388
10.1. Тупиковые радиационные трубы типа ТРТ ... 388
10.2. Тупиковые радиационные трубы типа ТРР ... 395
10.3. Тупиковая радиационная труба ТРН ... 399
10.4. U-образные радиационные трубы с горелкой ВНИИМТ-Стальпроект 401
10.5. U-образные радиационные трубы типа ТРУ ... 406
10.6. U-образные радиационные трубы типа ТРУН ... 408
10.7. U-образная радиационная труба низкого давления РТН ... 409
10.8. W-образная радиационная труба ... 410

Глава 11. Теплогенераторы, газовые обогреватели ... 412
11.1. Газовый воздухонагреватель ГЦ-70 ... 412
11.2 Газовый воздухонагреватель ГЦ-100 ... 414
11.3. Теплогенераторы типа ТЛ ... 415
11.4. Горелочный блок ГБТ-2000 ... 417
11.5. Теплогенератор ВостИО ... 421
11.6 Газовоздушный каяорифер ГВК-0,3 ... 422
11.7. Газовоздушный кадорифер ГВК-10 ... 424
11.8. Теплогенератор с жидкотопливной горелкой ТГ-0,8дт ... 426
11.9. Газовый обогреватель ... 428
11.10. Горелочное устройство для тепловых завес ... 429
11.11 Теплогератор для сжигания коксового газа ... 431
11.12. Теплогенераторы «ЮМАС» ... 433
Глава 12. Системы зажигания и контроля пламени горелок ... 435
12.1. Переносные запальники конструкции Ленгипроинжпроекта ... 435
12.2. Переносные инжекционные запальники типа ИПЗ конструкции Мосгазпроекта ... 438
12.3. Пилотно-запаяьное устройство типа ПЗУ-I ... 439
12.4. Пилотно-защитиое устройство типа РЗУ ... 440
12.5. Запально-зашитные устройства тнпа ЗЗУ завода «Ильмарине» ... 441
12.6. Комплект приборов завода «Старорусспрнбор» ... 447
12.7. Двухпроводный запальник ВНИИМТ ... 450
12.8. Горелка запаяьно-защитная ЗЗГ ... 452
12.9. Запально-сигнализирующие устройства типа ЗСУ-П ... 453
12.10. Электрогазовый инжекционный запальник ... 455
12.11. Плазменный западьник конструкции НИИТяжмаша ОАО «Уралмаш» ... 457
12.12. Средства контроля пламени ... 459
Глава 13. Огнеупорные горелочные туннели ... 462
13.1. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВБ и ДНБ ... 463
13.2. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВС и ДНС ... 466
13.3. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГНП ... 467
13.4. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГР и ГРВ ... 467
13.5. Отиеупорные горелочные блоки для горелок типа ГПП ... 470
13.6. Горелочный туннель для инжекционных горелок ... 470
13.7. Огнеупорные горелочные блоки для инжекционных горелок с диаметром носика до 100 мм ... 472
13.8. Огнеупорные горелочные блóки для крупных инжекционных горелок нагревательных печей ... 472
13.9. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ИА ... 474
Глава 14. Принципы испытаний горелочных устройств ... 475
14.1. Основные положения ... 475
14.2. Испытания газовых горелок ... 477
14.3. Особенности испытаний газовых и газомазутных горелок ... 491
14.4. Особенности испытаний радиационных труб ... 494
14.5. Особенности испытаний газовых воздухонагревателей ... 497
14.6. Особенности испытаний горелок инфракрасного излучения ... 499
14.7. Особенности испытаний горелок плавильных печей ... 500
Глава 15. Принципы изготоолеиия горелочных устройств ... 504
Приложение I ... 509
Приложение II ... 547
Приложение III ... 548
Библиографический список ... 550

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных систем теплового агрегата является система отопления, правильность выбора которой в значительной степени определяет соблюдение технологии, удобство эксплуатации, безопасность, экономичность работы агрегата и сохранение чистоты воздушного бассейна. Основной элемент системы отопления — горелочные устройства.

В настоящее время накоплен значительный опыт разработки и эксплуатации горелочных устройств. Разработкой конструкции горелок занимаются многие организации, вследствие чего появилось большое количество горелок для различных целей и условий работы. Разнообразие горелочных устройств дает возможность при проектировании тепловых агрегатов выбрать наиболее предпочтительный вариант горелок. Качество горелочных устройств определяется их испытаниями на соответствие стандартам и техническим требованиям. Испытания выполняются независимыми испытательными центрами, аттестованными Госстандартом РФ.

В Справочнике представлены данные о горелочных устройств, разработанных специалистами СНГ. Представленные типы горелок подвергались стендовым испытаниям или проверке их технических характеристик в промышленных условиях, на что указывают соответствующие ссылки.

Кроме горелок, разработанных специально для металлургических агрегатов, в Справочнике приведены описания горелок, разработанных для других отраслей промышленности, но успешно применяемых в металлургии.

Несмотря на то, что горелочное устройство является одним из основных элементов системы отопления, нельзя отожествлять выбор горелочного устройства и разработку системы отопления. При разработке системы отопления необходимо решить комплекс вопросов, касающихся практически всех сторон работы теплового агрегата. В зависимости от решения этого комплекса задач может оказаться, что для агрегатов аналогичного назначения будет оптимальным применение различных горелочных устройств, а для существенно различных агрегатов — одинаковых.

Поэтому в гл. 1 Справочника даны общие принципы разработки систем отопления Этот материал необходим для ориентировочного выбора горелочных устройств и нагревателей. Более подробное рассмотрение систем отопления печей дано в специальной литературе.

В настоящее время существует ряд классификаций горелочных устройств, основанный на различных принципах работы. Для облегчения выбора типа горелочных устройств, наиболее полно соответствующих требованиям технологии, следует предпочесть классификацию, основанную на степени развития в устройстве процесса смешения топлива и воздуха для горения. В гл. 2 дана такая классификация, в этой же главе изложены общие

требования к конструкциям горелочных устройств.

Данные о конструкции, основных размерах, характеристиках, методике расчета или выбора и области применения газовых и газомазутных горелок, форсунок и радиационных труб приведены в 3—11 главах. Методики расчетов горелочных устройств иллюстрированы примерами, охватывающими все наиболее часто встречающиеся на практике случаи.

Дополнительным элементам горелочных устройств (система зажигания, контроля пламени и горелочные туннели) посвящены главы 12 и 13.

В главах 14 и 15 изложены принципы испытания, изготовления горелок и исследования характеристик их факелов.

В Приложениях даны основные характеристики и графики сгорания газообразного и жидкого топлива, что существенно сокращают трудоемкость расчетов. Там же приведены необходимые при выборе горелочных устройств данные, характеризующие горение газообразного топлива.

Основные разделы Справочника составлены по результатам работ институтов Стальпроект и ВНИИМТ в области конструирования и испытания горелочных устройств, а также по данным государственных испытаний горелочных устройств, опубликованным в сборниках ВНИИЭгазпром в серии «Использование газа в народном хозяйстве».

При подготовке Справочника использованы результаты государственных испытаний горелок, выполненных в Уральском испытательном центре промышленных горелочных устройств под руководством Г. М. Дружинина, В. Л. Каратаева, Б. Б. Вегнера.

К сожалению, авторы не смогли представить в Справочнике все многообразие горелочных устройств и надеются на снисходительность читателя, если он не найдет в нем какие-то интересные конструкции.

Авторы считают своим долгом выразить большую благодарность за помощь в подготовке справочника сотрудникам ВНИИМТ, УПИ-УГТУ, ВостИО, НИИТяжмаша и других организаций, совместно с которыми написано несколько разделов: А. В. Бакову (§ 5.14; 11.9; 11,10); И. И. Власову, Г. В. Воронову (§ 3.1; 8.4; 9.13); И. М. Дистергефту (§ 5.26; 10.4); Г. М. Дружинину (§ 5.11); Г. К. Кобакову (§ 6.2); Я. П. Калугину (§ 1.3; 5.2—5.4); В. Л. Каратаеву (§ 4.10; 7.11; 7.12; 7.17; 11.4; 14.1); В. К. Карпушину (§ 14.7); Д. Л. Лобанову (§ 5.27; 7.18—7.20); Г. К. Маликову (§ 5.27; 7.18—7.20); Ю. К. Маликову (§ 5.27); Л. М. Мелентьеву (§ 12.11), А. Н. Павлеченко (§ 7.16); С. В. Румянцеву (§ 6.9; 9.14), В. Т. Рязановым (§ 5.25; 6.1; 6.14; 7.12; 9.19; 11.3); Ю. Г. Сотникову и Ю. А.Спиридонову (г. Казань § 5.24); В. В.Стрекотину (§ 3.4; 6.3; 9.12; 11.5); Е. М. Шлеймовичу (§ 5.27; 7.19; 7.20).

Особую благодарность авторы выражают В. В. Деньгубу, чью помощь в выполнении испытаний горелок и обработке экспериментальных данных трудно переоценить; В. В. Татарникову и В. А. Хохлову, участвовавшим в разработке многих конструкций горелок, приведенных в Справочнике и А. И. Новикову (ОЭМК), оказавшему большую помощь в анализе работы горелок на промышленных печах.

УСПОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

c — теплоемкость, Дж/(м^3 · К) [Дж/(кг · К)];
d — диаметр, мм;
E (i) — энергия (теплосодержание), Дж/кг,
F — площадь, мм^2;
L_0 — стехиометрическое количество воздуха, м^3/м^3 (м^3/кг);
$L = \alpha L$ — действительное количество воздуха, м^3/м^3 (м^3/кг);
P — абсолютное давление, Па;
p — избыточное давление, Па;
$Q_н^P$ — низшая теплота сгорания, Дж/м^3 (Дж/кг);
t — температура, °С;
T — температура. К;
$V(G)$ — количество (пропускная способность), м^3/с (кг/с);
ω — скорость, м/с;
α — коэффициент расхода воздуха;
ξ — коэффициент сопротивления;
$\varphi(\mu)$ — коэффициент истечения;
ρ — плотность, кг/м^3,
m — объемная кратность инжекции;
n — массовая кратность инжекции.

ИНДЕКСЫ

в — воздух;
г — газ;
см (с) — смесь;
0 — при температуре 0 °С и давлении 101,4 кПа.

Глава 1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Системой отопления печей является совокупность горелочных устройств или нагревателей, устройств для подачи топлива и воздуха для горения, эвакуации продуктов сгорания и утилизации их тепла.

Цель разработки системы отопления печи — обеспечить осуществление теплового, температурного и аэродинамического режимов, необходимых для оптимального проведения технологического процесса, для которого предназначена печь, а также максимальную экономичность работы агрегата и удобство его эксплуатации.

При разработке системы отопления печи необходимо опираться на целый ряд исходных положений и удовлетворить специальным требованиям, предъявляемым к системе отопления.

При этом необходимо выбрать и рассчитать:

- тип, характеристику, число и расположение в печи горелочных устройств или нагревателей;
- характер движения продуктов сгорания или атмосфер контролируемого состава в рабочем пространстве печи и в случае необходимости устройства для организации циркуляции этих газовых сред;
- способ подачи воздуха для горения и уборки продуктов сгорания, схемы разводки топлива и воздуха для горения;
- температуры подогрева топлива и воздуха для горения;
- тип, размеры и характеристику теплоутилизационных устройств (рекуператоров или регенераторов).

Решения всех этих вопросов тесно взаимосвязаны. Например, при применении инжекционных горелок с инжекцией воздуха газом необходима установка блочного керамического рекуператора для подогрева воздуха для горения. Это диктуется тем, что такой рекуператор имеет самое низкое сопротивление по воздушному пути и поэтому чрезмерного повышения давления газа перед горелкой не потребуется. В связи с этим система отопления печи может быть правильно сконструирована только при комплексном подходе к ее разработке.

Тип и конструкция печи в значительной мере определяют схему системы отопления. Садочные печи, устанавливаемые в отделении в количестве нескольких десятков (например, нагревательные колодцы), предпочтительно отапливать одной мощной горелкой со сравнительно широкими пределами регулирования. Это позволит ограничиться установкой небольшого числа горелок, что облегчит эксплуатацию отделения. Горелка с широкими пределами регулирования необходима для проведения садочного

режима нагрева со значительным сокращением подачи топлива к концу цикла. В печах проходного и протяжного типа необходим распределенный подвод тепла по длине печи многочисленными горелками сравнительно небольшой мощности. Ввиду постоянства во времени теплового режима этих печей на них можно применять горелки со сравнительно узкими пределами регулирования. При большом числе горелок на печи при конструировании разводки топлива и воздуха необходимо принимать меры для равномерного распределения компонентов горения между всеми горелками зоны регулирования.

В зависимости от вида и характеристики нагреваемых изделий или заготовок даже для одного типа печей могут потребоваться разные системы отопления. Например, в колпаковой печи для отжига рулонов в отличие от такой же печи для отжига стоп листов необходима искусственная циркуляция атмосферы контролируемого состава под муфелем.

Одним из наиболее значительных факторов, определяющих выбор системы отопления печи, является проводимый в ней технологический процесс. При нагреве в атмосфере контролируемого состава необходимо применять радиационные трубы или электрические нагреватели сопротивления. Если технологией предусмотрена выдержка нагреваемого изделия при заданных температурах, то в печах непрерывного действия предусматриваются камеры выдержки. Система отопления этих камер должна компенсировать потери тепла и обеспечивать высокую равномерность нагрева. Необходимость работы при повышенных скоростях нагрева заставляет применять печи с высокой температурой рабочего пространства даже при умеренных температурах нагрева металла. Для обеспечения повышающихся требований к равномерности нагрева заготовок перед прокаткой в проходных нагревательных печах отказываются от торцевого отопления и переходят к отоплению многочисленными сводовыми горелками.

При организации системы отопления печей для термообработки железорудных материалов необходимо учитывать физико-химические процессы, происходящие в плотном пересыпающемся или подвижном слое. Особое внимание необходимо уделять газовыделениям из слоя и дожиганию горючих компонентов в пределах печи.

Температурный режим печи чрезвычайно сильно влияет на выбор системы отопления. Высоко- или среднетемпературный нагрев можно организовать, используя в основном теплопередачу излучением. В этом случае применяют нагрев открытым пламенем или с помощью радиационных труб. Сложнее организовать нагрев до 400—500 °С и ниже. В таких печах применяют выносные топки или сжигание с высокими коэффициентами расхода воздуха.

Организация струйного нагрева или интенсивной принудительной циркуляции газов в рабочем пространстве обеспечивает конвективный нагрев заготовок или изделий. При низкотемпературном нагреве необходимо принимать специальные меры для надежного зажигания топлива и контроля горения.

Особенно сложно выбрать систему отопления, если в печи должны проводиться операции при различных температурах (например, нормали-

зация и отпуск). В отдельных случаях при разных режимах нагреваемые изделия проходят через печь в противоположных направлениях. Система отопления таких печей должна строиться с применением групп горелок, отключающихся автоматически, или горелок с широким диапазоном расхода воздуха.

Пропускную способность системы отопления печи по топливу, воздуху и продуктам сгорания принимают соответствующей тепловой мощности печи. Тепловую мощность рассчитывают, исходя из максимальной производительности при наиболее высокотемпературном режиме. Однако при разработке системы отопления следует иметь в виду, что значительную часть времени печь работает с меньшим расходом топлива. Это имеет место при работе станов на трудоемких профилях, переходе на нагрев изделий иных размеров и иного качества, изменении технологического режима и в других случаях. Для обеспечения нормальной работы печи при пониженных расходах топлива необходимо выбирать горелки с соответствующими пределами регулирования и предусматривать автоматическое отключение части горелок. Система автоматического регулирования теплового режима должна быть работоспособна и при низких расходах. При выборе мер защиты рекуператоров и решении задачи вторичного использования тепла отходящих продуктов сгорания следует учитывать возможность длительной работы печи при пониженном расходе топлива.

Одной из задач, которую нужно решать при разработке системы отопления, является организация аэродинамического режима рабочего пространства. Горелочные устройства должны быть расположены так, чтобы по длине печи не было значительного изменения давления. Давление в рабочем пространстве должно быть таким, чтобы подсосы воздуха в печь и выбивание продуктов сгорания из печи были минимальными. Соответствующее расположение горелок позволяет создать циркуляцию или рециркуляцию продуктов сгорания в рабочем пространстве, что повышает равномерность и сокращает длительность нагрева заготовок или изделия. В печах с атмосферой контролируемого состава для этой цели разрабатываются системы отопления с применением циркуляционных вентиляторов, которые радикально интенсифицируют теплообмен в рабочем пространстве печи.

Существенными факторами, определяющими выбор системы отопления печи, являются вид и характеристика топлива. Если заготовки приходится нагревать до высокой температуры газом с низкой теплотой сгорания, то необходим либо высокотемпературный нагрев компонентов горения, либо сочетание горелок предварительного смешения и умеренного подогрева компонентов горения. Не все горелочные устройства настолько универсальны, чтобы успешно работать на разных газах, поэтому вид топлива часто определяет выбор горелочного устройства. Особенно сложны случаи комбинированного отопления двумя газами, или, что еще сложнее, газом и мазутом. Основная трудность состоит в том, что сжигание жидкого и газообразного топлива следует организовывать по-разному. Различие во времени, необходимом для сгорания, влияет на характеристику факела. Это затрудняет создание горелочного устройства, равно удовлетворяющего требованиям технологии при сжигании как газа, так и мазута. В ряде случаев

приходится одновременно устанавливать на печи два комплекта горелочных устройств раздельно для каждого вида топлива. Естественно, что при комбинированном отоплении существенно усложняются разводки топлива и воздуха для горения, а также система автоматического регулирования теплового режима печи.

Обязательным условием успешного решения системы отопления печи является комплексная ее разработка совместно со схемой автоматического регулирования теплового режима печи. Применение двухпозиционного, ступенчатого или пропорционального регулирования подачи топлива, автоматического отключения групп горелок, автоматическое изменение коэффициента расхода воздуха и другие возможности автоматики позволяют достаточно просто создавать системы отопления даже в чрезвычайно сложных случаях.

Системы отопления печей, безусловно, должны разрабатываться с соблюдением всех правил техники безопасности. Кроме того, они должны быть удобны в эксплуатации и обслуживании. Следует стремиться полностью исключить надобность ручного вмешательства в работу системы отопления в процессе эксплуатации. Все элементы системы должны быть легко доступны для наблюдения за их работой, обслуживания и ремонта.

При разработке системы отопления необходимо предусматривать меры по сокращению вредных выбросов в воздушный бассейн. Подавляющее большинство металлургических печей отапливаются газом, основной вредной составляющей продуктов сгорания которого являются оксиды азота. Для снижения содержания оксидов азота следует стремиться к рассредоточению подвода тепла в рабочее пространство печи, рециркуляции продуктов сгорания, уменьшению времени пребывания газов в области высоких температур, а также, по возможности, осуществлять двухстадийное сжигание топлива и подачу вторичного воздуха в зону горения.

Системы отопления печей должны разрабатываться с учетом экономических факторов, в первую очередь с целью сокращения расходов топлива. Обязательным элементом системы отопления должны быть рекуператоры или регенераторы подогрева компонентов горения. На основании экономического анализа в ряде случаев может оказаться эффективным энерготехнологический агрегат, в котором печь объединяется с паропроизводящей установкой и рекуператором для подогрева воздуха. Следует стремиться к минимально необходимому коэффициенту расхода воздуха, сокращению подсосов в печь воздуха и выбивания из нее продуктов сгорания, а также устранению разбавления воздухом продуктов сгорания по тракту к теплоутилизационным устройствам. Практическое применение перечисленных принципов разработки систем отопления иллюстрируют схемы систем отопления основных типов печей черной металлургии.

1.2. ШАХТНЫЕ ПЕЧИ

В металлургическом производстве применяются несколько типов шахтных печей, отличающихся технологическим назначением, формой рабо-

чего пространства, видом применяемого топлива. Во всех случаях обрабатываемый материал загружается сверху, а готовый продукт выдается снизу. Газообразные продукты сгорания топлива движутся навстречу спускающемуся материалу.

В доменных печах в качестве основного топлива используется кокс, в качестве окислителя — воздух, нагреваемый в воздухонагревателях. Устройствами для ввода воздуха являются воздушные фурмы, расположенные по периметру горнового пространства. В качестве дополнительного топлива используется природный газ или мазут, вводимые через фурмы. Таким образом, воздушные фурмы являются, по существу, специальными горелочными устройствами.

Особенностями работы таких устройств являются: высокая температура в рабочем пространстве печи (до 1700 °С); высокая температура подогрева воздуха (900–1300 °С); наличие высокого противодавления в рабочем объеме (до 0,3 МПа). Система отопления строится в основном из условия равномерного распределения воздуха по фурмам и ввода газа в фурмы при распределении его по всему сечению последией (рис. 1.1, *а*).

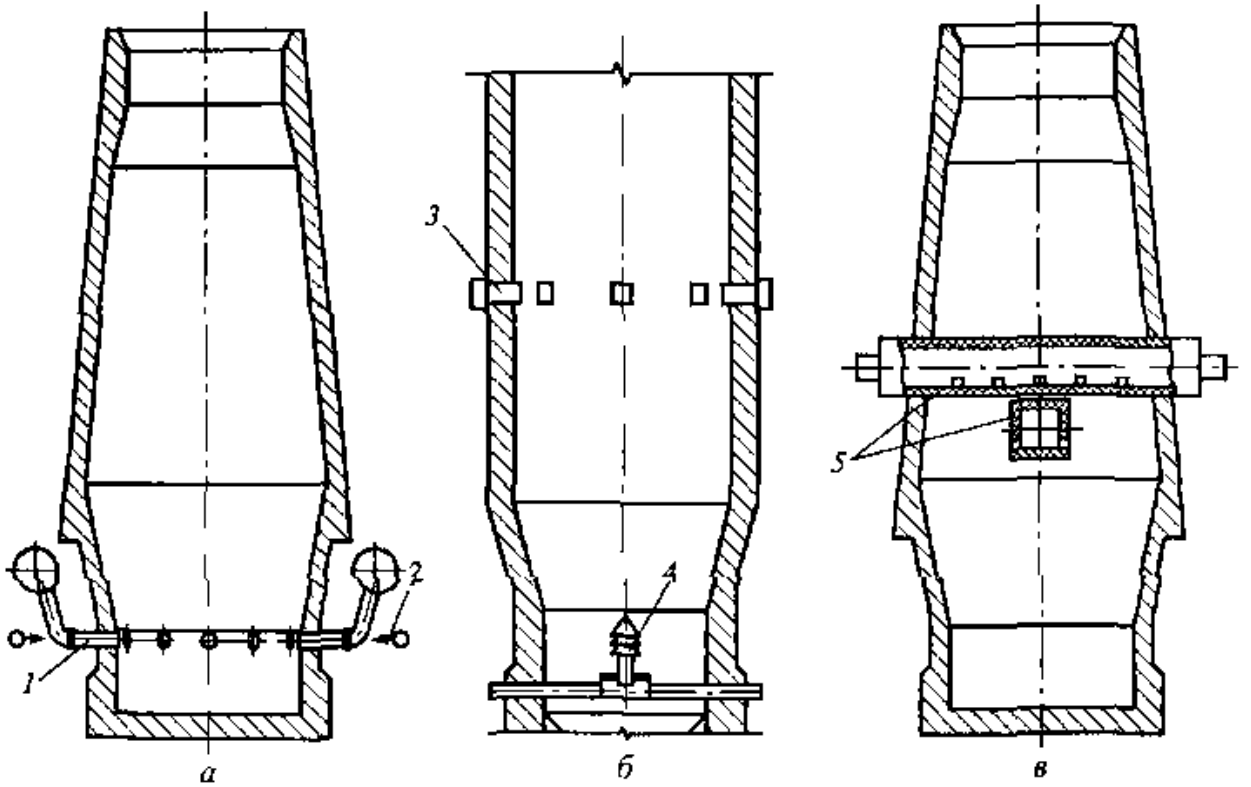


Рис. 1.1 Схемы отопления шахтных печей:
а — доменная печь, *б* — печь для обжига известняка; *в* — печь со встроенными топками; *1* — воздушные фурмы; *2* — подвод газа; *3* — боковые горелки; *4* — подовая горелка, *5* — керны

Система отопления печей для плавки чугуна в литейных печах (в вагранках) аналогична системе отопления доменных печей, но в ней практически не используется подогретый воздух. В вагранках применяется дополнительный обогрев камер-копильников, в которые стекает расплавленный металл.

Шахтные печи для обжига огнеупорного сырья или известняка также работают по принципу противотока. Выгружаемый обожженный материал отдает тепло воздуху, всасываемому в печь через разгрузочные отверстия печи. По мере продвижения воздуха снизу вверх температура воздуха повышается. В поток воздуха через специальное центрвльное устройство, установленное в месте разгрузки материала, вводится также газ. Газовоздушная смесь после прогрева до температуры воспламенения загорается и сгорает в слое подогреваемого материала, производя его обжиг. Поднимаясь двлее вверх, продукты сгорания отдают тепло порциям загружаемой шихты.

Особенностью такой системы сжигания является практическая невозможность контроля процесса горения газа в слое. Качество сжигания газа и обжига зависит не только от качества смешения газа с воздухом, но и от фракционного состава загружаемого материала и равномерности его распределения по сечению печи.

Для компенсации неравномерности отжига, создаваемой центральной горелкой, применяют дополнительный ввод топлива через периферийные горелки няи газовоздушные сопла (рис. 1.1, *б*).

Лучшая равномерность обжига в шахтных печах достигается при наличии в них специальных кернов, в которых выполнены канвлы для равномерного распределения продуктов сгорания в слое. Продукты сгорания получают при помощи горелочных устройств, устанавливаемых за пределами печи (рис. 1.1, *в*).

1.3. ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛИ

Для подогрева воздуха, используемого в качестве дутья в доменных печах, применяют специальные регенеративные нагревательные устройства, так называемые воздухонагреватели. Общий вид современного воздухонагревателя приведен на рис. 1.2. Основными элементами воздухонагревателя являются насадка из огнеупорного кирпича и камера сгорания, выполненные под одним кожухом.

Отопление воздухонагревателей осуществляется природным, доменным, коксовым газами и их смесями при помощи горелочных устройств, устанавливаемых на входе в камеру горения. Типы горелочных устройств зависят от конструкции камер горения. В выносных и встроенных камерах горения примеияют металлические горелки (см. рис. 1.2) или керамические. В бесшахтных воздухонагревателях примеияют кольцевые горелки, расположенные под куполом.

Воздухонагреватели работают циклически, чередуя режимы нагрева насадки и ее охлаждения. При работе в режиме нагрева включается вентилятор, открывается отсекающий дроссель и в горелку подается газ. Сжигание газа происходит в длинном факеле, растянутом на всю высоту камеры горения. Под куполом воздухонагревателя продукты сгорания входят в огнеупорную насадку, нагревают ее и после охлаждения через дымовой клапан удаляются в боров.

При работе воздухонагревателя в режиме дутья (отключается подача

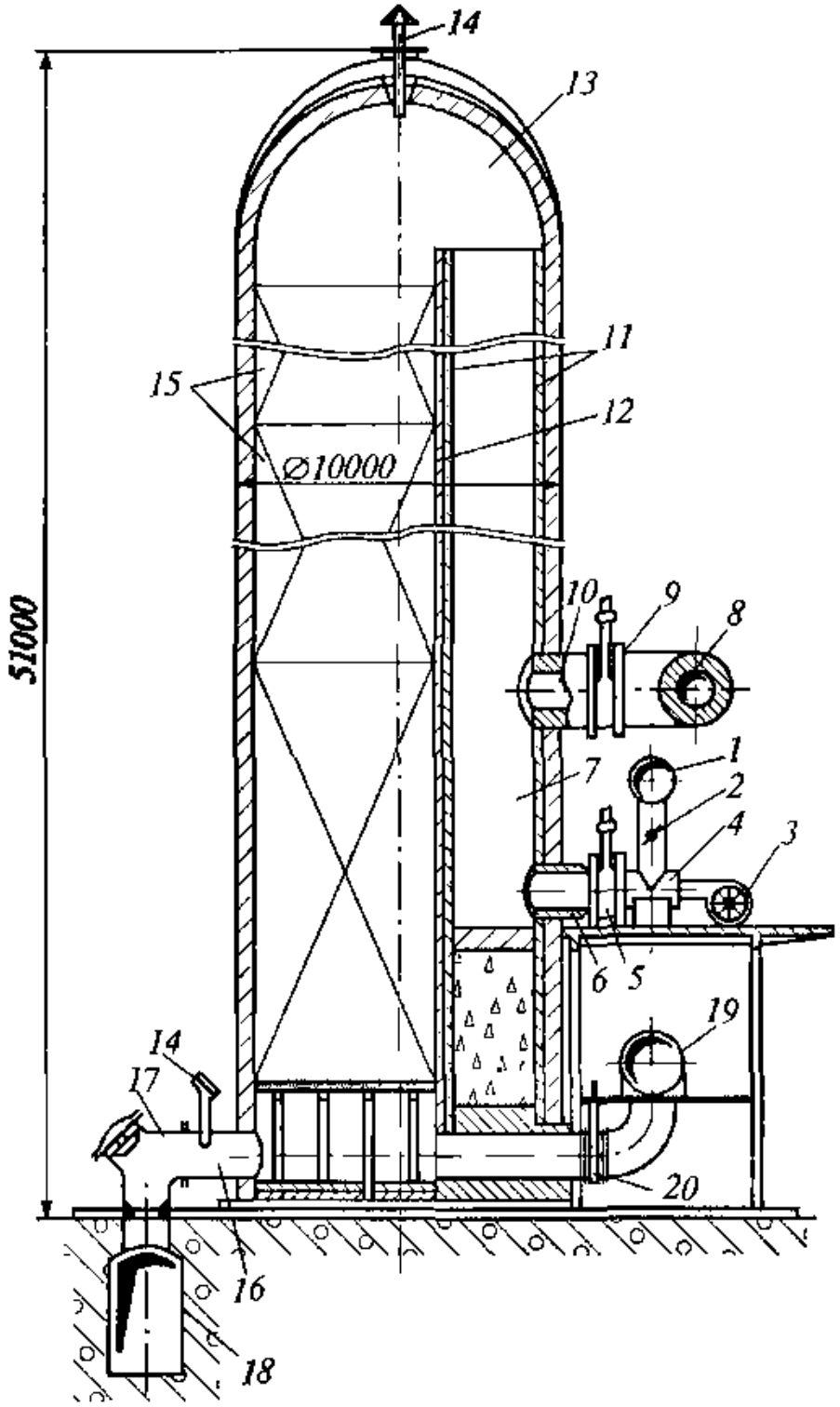


Рис. 1.2. Общий вид воздухонагревателя с внутренней камерой горения:
1 — газопровод; *2* — газовый дроссель; *3* — вентилятор; *4* — горелка, *5* — отсекающий дроссель; *6* — штуцер горелки; *7* — камера горения; *8* — трубопровод горячего дутья; *9* — отделительный клапан горячего дутья, *10* — штуцер горячего дутья, *11* — внутренняя стена камеры горения; *12* — разделительная стена камеры горения, *13* — купол, *14* — термопара, *15* — насадка с зонами из разного огнеупора; *16* — дымовой патрубок; *17* — дымовой клапан, *18* — боров; *19* — трубопровод холодного дутья; *20* — шибер холодного дутья

газа и воздуха) закрываются отсекающий клапан после горелки и дымовой клапан, открывается шибер холодного и клапан горячего дутья. В этом режиме осуществляется нагрев воздуха в насадке и нагнетание его в тракт горячего дутья.

Для непрерывного снабжения доменной печи воздухом каждая печь имеет блок из 3-4 аппаратов. При сохранении цикличности работы каждого аппарата (дутье—нагрев) режим работы блока воздухонагревателей может быть различным. При последовательном режиме воздухонагреватели поочередно ставятся на дутье. При попарно-параллельном режиме включение "горячего" и отключение "холодного" воздухонагревателей происходят в середине периода "теплого" аппарата Применяют различные комбинации режимов, подробно описанные в [1].

В соответствии с режимом работы блока воздухонагревателей, строится и система его отопления. Но во всех случаях к конструкциям и режимам работы горелок предъявляются специфические требования, вызванные условиями эксплуатации. Горелки должны обеспечивать сгорание газа до входа продуктов сгорания в насадку, исключать локальные перегревы кладки камеры горения, вызывающие ее выпучивание, трещины, наклоны и обрушения.

1.4. ГОРНЫ АГЛОМЕРАЦИОННЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ МАШИН

Система отопления горнов агломерационных машин определяется технологическими требованиями к процессу агломерации и видом применяемого топлива. В связи с тем, что по мере продвижения шихты в подвижном слое происходят последовательно сушка, прогрев, плавление, кристаллизация расплава и охлаждение спека, различные требования предъявляются и к параметрам теплоносителя, фильтруемого через слой.

Наибольшее распространение получил комбинированный нагрев шихты с использованием твердого топлива, подаваемого в слой, и газообразного или жидкого топлива, сжигаемого над слоем в горне при помощи горелок.

В горне, расположенном в головной части машины, осуществляется начальная стадия обработки слоя: сушка, прогрев и зажигание твердого топлива в верхней части слоя. В связи с этим различные требования предъявляются и к горелкам В зоне сушки температура теплоносителя в зависимости от вида шихты может быть на уровне 400—900 °С. После удаления влаги слой перемещается в зону интенсивного нагрева, где верхняя его часть нагревается до 1250—1300 °С. В этой зоне начинается воспламенение твердого топлива в шихте и в слое формируется зона активного горения. В этой части горна горелки должны работать с избытком воздуха, обеспечивающим и горение газа или мазута над слоем, и горение твердого топлива в слое. Зона активного горения перемещается вниз по ходу движения теплоносителя, и в ней при температурах 1200—1500 °С начинаются процессы плавления и спекания частиц шихты. По мере перемещения зоны активного горения вниз в верхних слоях начинается кристаллизация расплава и

постепенное охлаждение слоя. Теплоноситель, просасываемый через верхние слои, нагревается в них и участвует в горении топлива, расположенного в нижних горизонтах.

Таким образом, по мере продвижения слоя шихты на тележках агломашины через рабочее пространство горна изменяются требования к температурам и составу теплоносителя, формируемого горелочными устройствами.

Применяют различную компоновку горелок в горне: на боковых стенах, на торцевых, на своде или комбинации этих способов. Каждая схема компоновки имеет свои преимущества и недостатки.

Наиболее удобным является расположение горелок на боковых стенах горна (рис. 1 3). В этом случае наиболее просто обеспечивается переменный уровень температур и концентраций газов над слоем по длине горна. Но при этом значительно сложнее обеспечить равномерность прогрева слоя и его зажигания по ширине горна, особенно при наличии неорганизованного присоса воздуха в горн через борта тележек.

При торцевом расположении горелок равномерность параметров по ширине слоя обеспечивается легче, но возникают сложности с обеспечением переменных и контролируемых параметров газов над слоем по длине горна. Кроме того, возникают сложности с размещением горелок из-за наличия на входном торце горна устройства для загрузки и укладки шихты и необходимости его обслуживания.

При сводовом расположении горелок вопросы обеспечения теплового режима горна решаются проще, но существенно усложняются условия работы горелок и их обслуживания.

Во всех случаях при отоплении горнов применяют короткофакельные вихревые горелки. Воздух может использоваться либо холодный, либо нагретый до 300—400 °С в охладителе агломерата.

1.5. ГОРНЫ ОБЖИГОВЫХ МАШИН ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОКАТЫШЕЙ

В отечественной промышленности эксплуатируются обжиговые конвейерные машины, тепловые схемы которых можно разделить на три класса: машины без переточного коллектора; машины с переточным коллектором; машины, у которых переточный коллектор совмещен с горном.

Во всех случаях горелочные устройства устанавливаются на боковых стенах горна по его длине. Режим работы горелок зависит от места их установки, так как уровень температуры по длине горна изменяется от 200—300 °С до 1200—1350 °С. Тепловые схемы машин отличаются в основном полнотой рекуперации тепла окатышей, нагретых в зоне обжига.

Это различие является принципиальным в организации системы отопления горна. В горнах без переточного коллектора в зоне охлаждения воздух нагревается не выше 400 °С. При этом в основном весь воздух подается в горелочные устройства, а часть его сбрасывается в колпак зоны сушки. Для обеспечения низких температур в зонах сушки и подогрева устанавливают специальные короткофакельные горелки, работающие с высокими коэффициентами расхода воздуха. По мере приближения к зоне обжига

коэффициент расхода воздуха снижается. Горелки на стенах горна устанавливаются так же, как в горнах агломашин при их боковом расположении (см. рис. 1.3).

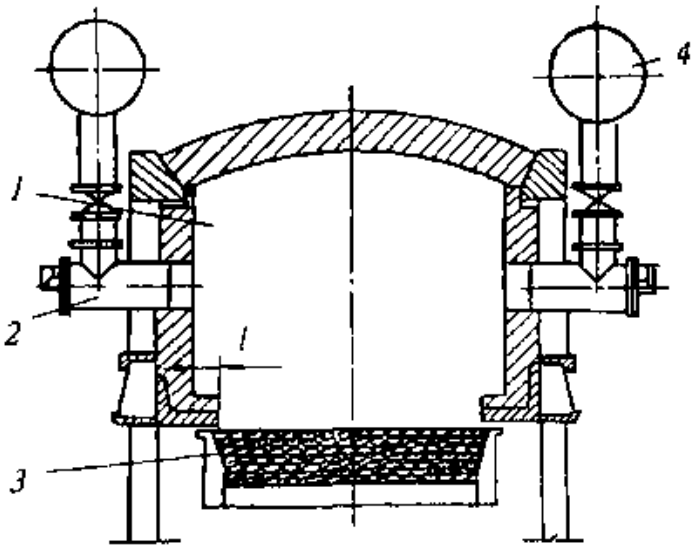
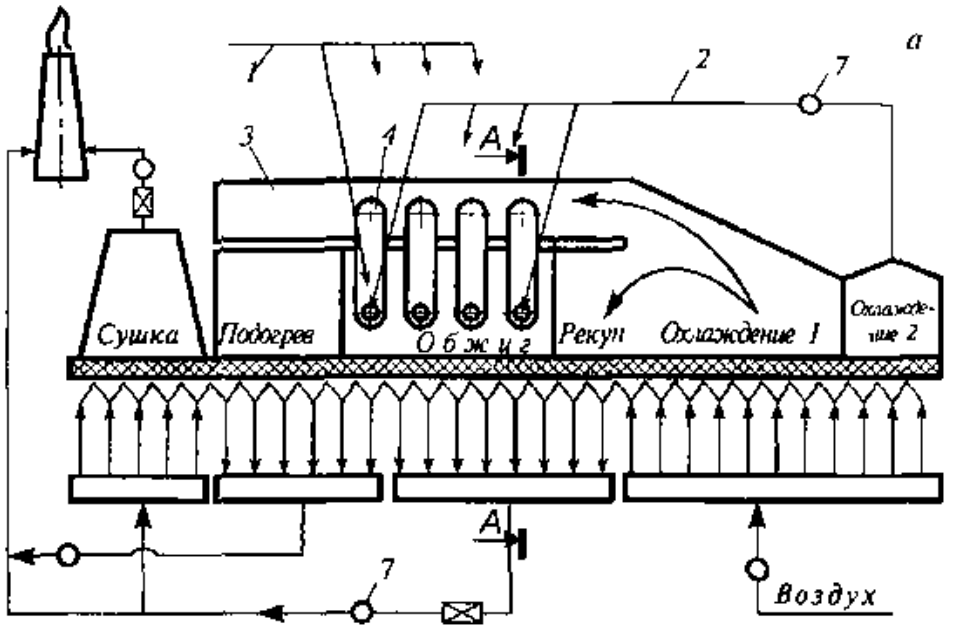


Рис. 1.3. Схема бокового расположения горелок на стенке зажигательного горна агломерационной конвейерной машины:
1 – рабочее пространство горна; *2* – горелка; *3* – слой агломерата; *4* – воздушный коллектор

Машины с переточным коллектором имеют как минимум две зоны охлаждения (рис. 1.4). В первой зоне охлаждения воздух, пропускаемый через слой окатышей, нагревается от 800 до 1100 °С. Этот воздух за счет разности давлений над слоем в зонах охлаждения и обжига в 15–20 Па через переточный коллектор перетекает в зоны обжига и подогрева. Выход воздуха осуществляется через опускные воздуховоды и форкамеры, на торцевых стенках которых устанавливаются горелочные устройства. В горелках сжигается природный газ или мазут. Применяются различные типы горелок, конструкция которых тесно связана с особенностью тепловой схемы. Общим, характерным требованием для всех горелок является необходимость завершения горения основной массы топлива в пределах форкамеры и максимального вовлечения в процесс горения высокотемпературного и низкоскоростного потока переточного воздуха.

Расход природного газа на одну горелку, установленную в форкамере, на современных машинах изменяется в пределах от 300 до 900 м^3/ч. При работе вихревых горелок в качестве первичного воздуха, подаваемого через горелку в форкамеру, используется воздух, нагретый в зоне охлаждения до 360–400 °С. Горелки обеспечивают качественное перемешивание потоков и полное сжигание топлива, но на отдельных режимах может наблюдаться заброс факела в опускной воздуховод и даже в переточный коллектор.

Применяются также прямоструйные инжекционные горелки, выполненные из коаксиальных газовоздушных сопел. Причем в качестве первичного воздуха используется холодный вентиляторный воздух.



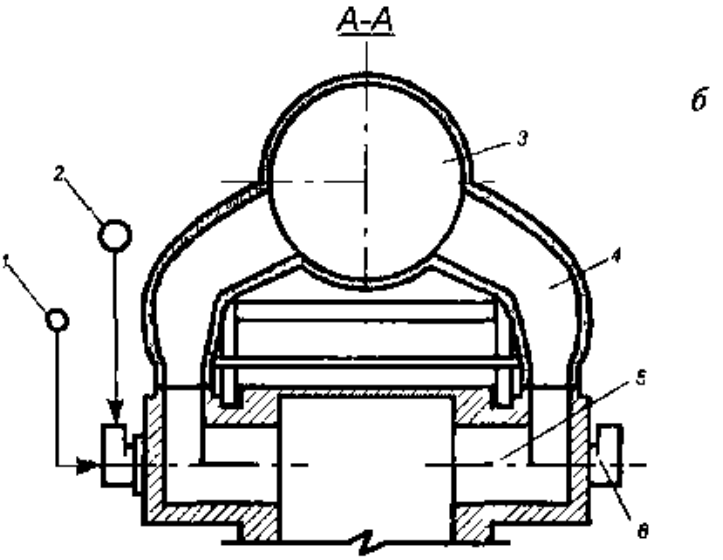


Рис. 1 4. Схема отопления горна обжиговой конвейерной машины с переточным коллектором для обжига окатышей:
а – схема газотоков, *б* – поперечный разрез горна; *1* – газопровод, *2* – коллектор первичного воздуха; *3* – то же, вторичного; *4* – опускной воздуховод; *5* – форкамера, *6* – горелка; *7* – вентилятор (дымосос)

В некоторых схемах обжиговых машин в переточный коллектор подается смесь подогретого воздуха и отработанных продуктов сгорания. Для экранирования начвльного участка факела форкамерной горелки от подмешивания в него воздуха с низкой концентрацией кислорода его располагают в специальной жаровой трубе. Однако стойкость этой трубы невелика, что требует частой ее замены.

В горнах, у которых коллектор совмещен с зонами подогрева и обжига, то есть имеется прямой переток между зонами охлаждения и обжига, наблюдается влияние на факел сносящего потока. Причем это влияние тем выше, чем ближе к зоне оклаждения установлена горелка.

1.6. ТРУБЧАТЫЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ ПЕЧИ

В трубчатых вращающихся печах осуществляют сушку и подогрев различных рудных и нерудных материлов, прокаливание, обжиг. Различия в

технологических процессах определили и существенное различие в конструкциях печей, и прежде всего в организации системы отопления.

Известны три принципиально различные схемы отопления таких агрегатов: с помощью выносных или встроенных топок; торцевых горелок, установленных в загрузочной или разгрузочной головке печи; горелок, смонтированных непосредственно на корпусе печи и вращающихся вместе с ней (рис. 1.5).

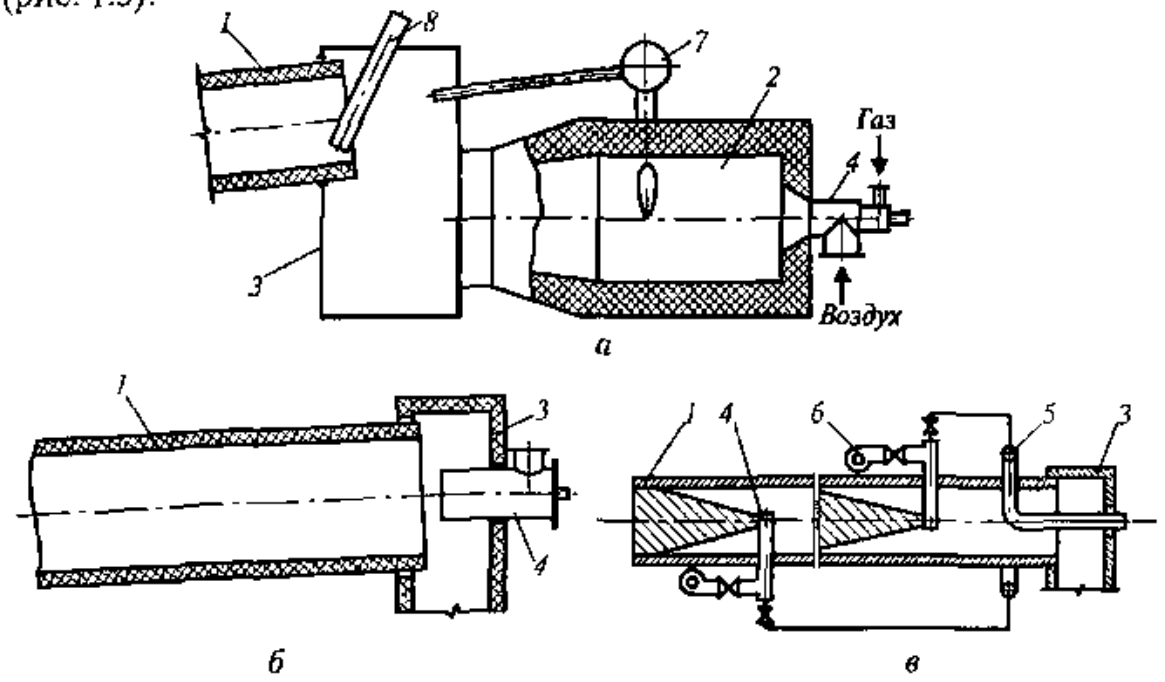


Рис. 1.5. Схема отопления вращающихся трубчатых печей:
а — с выносной топкой; *б* — с торцевой горелкой; *в* — с горелками на корпусе печи; *1* — трубчатая печь; *2* — топка; *3* — головка печи; *4* — горелка; *5* — газовый коллектор; *6* — вентилятор; *7* — коллектор вторичного воздуха, *8* — загрузочная течка

Выносные и встроенные топки применяют в основном для сушки известняка, бентонита, руд и концентратов. Топки представляют собой футерованные камеры сгорания, различные по конструкции и размерам. Как правило, каждый агрегат оснащен индивидуальной топкой, но имеются топки, которые обеспечивают теплоносителем несколько агрегатов. Регулирование температуры теплоносителя осуществляют двумя способами: либо за счет установки специальных горелок, работающих с повышенными коэффициентами расхода воздуха, либо за счет подачи в топку, минуя горелку, воздуха или рециркулирующих продуктов сгорания.

Основные требования к горелкам — полное сгорание топлива, широкий диапазон регулирования, минимальные вредные выбросы и низкие скорости истечения продуктов сгорания при входе в печь. Последнее обстоятельство вызвано обеспечением минимального уноса пыли при обработке тонкодисперсного материала.

В некоторых технологиях при обработке сыпучего материала недопустим контакт его с продуктами сгорания топлива. В этом случае продукты сгорания от горелочных устройств направляются в специальные каналы,

выполненные в огнеупорных блоках, из которых изготовлена футеровка печи. Если по условиям технологии температура обрабатываемого материала не превышает 500—600 °С, то топки устанавливают на корпусе печи. В этом случае осуществляется наружный обогрев барабана и важным вопросом работы системы отопления и выбора горелок является исключение местного перегрева корпуса печи.

Вращающиеся трубчатые печи, применяемые в черной и цветной металлургии, в основном аналогичны печам, применяемым в цементной и огнеупорной промышленности. Печь представляет собой футерованный цилиндрический корпус, установленный на поддерживающих роликах под углом к горизонту и вращающийся относительно продольной оси. С входной стороны имеются питатели для загрузки обрабатываемых материалов и с выходной стороны — холодильник или промежуточный бункер для готового продукта.

В зависимости от особенностей обжига и размеров печей применяют различные схемы подвода топлива. Для целей сушки и прокаливания концентрата, а также окислительного обжига окатышей используются относительно короткие печи. Все топливо и воздух вводятся через торцевые горелочные устройства.

При восстановительном обжиге во вращающуюся печь загружают твердый восстановитель в смеси с шихтой или организуют вдувание восстановительных газов. Во всех случаях является существенным равномерное распределение топлива по длине печи и дожигание горючих компонентов в уходящих газах над слоем материала. Поэтому в этих печах применяют рассредоточенный ввод восстановителя, топлива и воздуха.

Широкое распространение получили печи с распределенным подводом газа по длине корпуса. Газ по центральному каналу вводится в одну из торцевых частей печи, проходит через кожух на поверхность и поступает в коллектор (рис. 1.5, *в*). От коллектора вдоль печи проложены трубы, по которым газ подводится в нужное место.

Торцевая подача газа на печь отличается высокой герметичностью, но не всегда является надежной, особенно для печей, у которых в месте ввода центрального газопровода необходимо иметь высокую температуру печных газов. Последнее обстоятельство приводит к отложению в газопроводе сажи или прогару его стенок.

Существуют различные схемы использования газа, поданного на вращающийся корпус печи. Газ может подаваться рассредоточенно по длине печи вместе с воздухом через периферийные горелки. В этом случае сжигание топлива производится в надслоевом пространстве печи. Известны вращающиеся печи, в которых углеводородный газ подается непосредственно в слой восстанавливаемого материала, где происходит разложение газа, взаимодействие продуктов разложения с материалом слоя и последующее дожигание. Предложены различные схемы компоновки продувочных фурм. Фурмы можно размещать в шахматном порядке с переменным шагом, увеличивающимся в сторону разгрузки в зависимости от степени заполнения печи. Для повышения стойкости футеровки требуются специальные панели

и форсуночные блоки. В слой газ может подаваться не только в чистом виде, но и в смеси с воздухом при полном или частичном предварительном перемешивании.

Наряду с общими требованиями к горелкам вращающихся печей такого класса предъявляется ряд специфических. Прежде всего, горелки должны обеспечивать состав и температуру газовой среды в объеме печи, необходимые по условию протекания процесса в слое.

При торцевом отоплении печей горелки в основном должны обеспечивать максимально возможную длину факела. При этом факел в отдельных случаях не должен касаться футеровки печи и обрабатываемого материала для исключения его спекания.

В том случае, если горелки расположены на вращающемся корпусе и формируют факел внутри рабочего объема печи, требования к горелкам могут быть различные в зависимости от места их установки и режима работы. Например, если в печь для металлизации загружаются неподогретые окатыши и уголь, то на начальном участке печи необходимо осуществить интенсивный нагрев шихты до температур, при которых начинается восстановление. Факел горелок, работающих на этом участке печи, может касаться футеровки и материалов без опасности появления спеков. По мере подогрева шихты до температур около 1000 °С появляется возможность образования спеков. В этих участках факел должен располагаться ближе к оси печи и иметь равномерное поле температур.

Горелочные устройства должны позволять регулировать характеристики факела: длину, форму, положение в печи и тому подобное.

Для торцевого отопления печей нашли применение горелки типа ГДГ, ГРД, ВРГ, ГВП, используемые в печах для производства цемента. Это однопроводные горелки с подводом газа при различной интенсивности его закрутки. Воздух для горения поступает в печь через охладитель и неплотности торцевой головки, и при работе горелки он практически не регулируется.

Для расширения возможности регулирования факела применяют двухпроводные горелки, в которых предусмотрено изменение степени смешения топлива и воздуха.

1.7. ПЛАВИЛЬНЫЕ ПЕЧИ

К этому классу печей в настоящем разделе условно отнесены: мартеновские сталеплавильные, стекловаренные, отражательные печи; электросталеплавильные и ферросплавные печи, печи для плавки синтетического шлака и другие. В этих печах в различной степени применяются системы сжигания топлива.

В печах типа мартеновских эта система является основной. Газомазутные высокоскоростные реверсивно работающие горелки формируют высокотемпературный светящийся факел, который должен покрывать ванну, не касаясь стен и свода печи.

Дуговые электросталеплавильные печи также имеют систему газового отопления. Основная задача этой системы — осуществление начального пе-

риода нагрева металлолома, в котором неэффективно применение электроэнергии. Поэтому эта система работает в основном в период завалки лома и его прогрева. В качестве горелок применяются высокоскоростные газокислородные горелки, установленные по периметру печи.

Систему газового обогрева имеют и печи для плавки синтетического шлака, применяемого при выплавке высоколегированных марок стали в мартеновских печах. Горелочные устройства располагаются по периметру печи и работают во время загрузки шихтовых материалов до включения напряжения на электроды. После завершения процесса плавления в зависимости от режима работы мартеновских печей не всегда бывает потребность в непременном использовании шлака. В этом случае печь работает в режиме ожидания и потребности в тепле ограничиваются только компенсацией тепловых потерь. Эту компенсацию экономически целесообразно также восполнять за счет работы газовых горелок.

Потребность в работе системы газового отопления имеется и на электропечах для выплавки ферросплавов. В начальный период работы печи при ее завалке периферийно установленные газовые горелки осуществляют нагрев загружаемой шихты, что позволяет снизить электрическую нагрузку на электропечь. В период интенсивного плавления шихты выделяющиеся газы, содержащие до 20 % CO и H_2, являются ценным топливом и либо собираются и отводятся по специальному тракту в газовую магистраль, либо сжигаются непосредственно под сводом печи. Сжигание этого газа производится при работе периферийных горелок, которые переводятся в режим эксплуатации с большими избытками воздуха.

1.8. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ КОЛОДЦЫ

Нагревательные колодцы — это высокотемпературные камерные печи для нагрева слитков большой массы. Конструкция всех элементов колодцев должна отличаться простотой и надежностью работы по условиям воздействия высоких температур и значительных механических усилий.

Современными типами колодцев являются колодцы с отоплением из центра подины (КЦП) и наиболее совершенные — с отоплением одной верхней горелкой (КВГ) (рис. 1.6). Тепловая мощность КЦП не менее 5,8 МВт, КВГ 11,6 МВт.

При подаче топлива через одну горелку ограничивается длина факела: в КЦП из условия стойкости крышки она должна быть не более 3 м. В КВГ длина факела ограничивается расстоянием до торцевой стены, то есть должна быть не более 7—9 м. В противном случае будет высока неравномерность нагрева слитков, стоящих на разных расстояниях от горелок. Поэтому в колодцах применяют простейшую горелку с улучшенным смешением: газ подается несколькими струями.

Вследствие высокой температуры продуктов сгорания в нагревательных колодцах применяют керамические рекуператоры, конструктивно объединенные с рабочим пространством. В КЦП воздух к горелке через рекуператор подают вентилятором. В результате этого между воздушной и дымо-

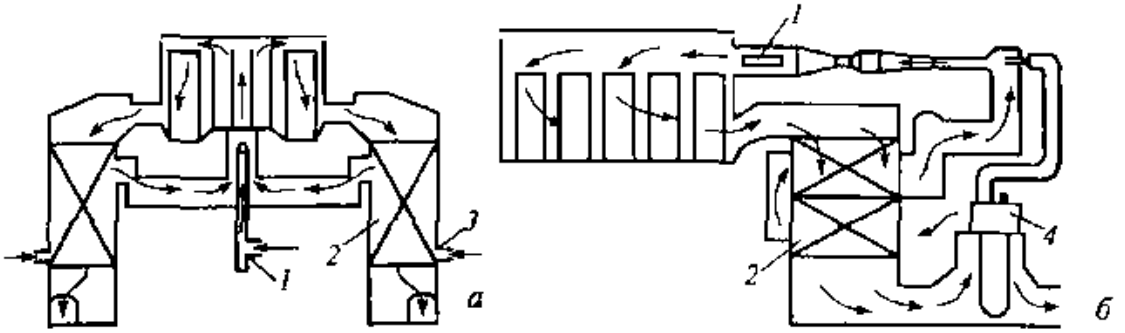


Рис 1.6 Схемы нагревательных колодцев:
а – с отоплением у центра подины (КЦП); *б* – с отоплением одной верхней горелкой (КВГ); *1* – подвод газа; *2* – керамический рекуператор; *3* – подвод воздуха; *4* – металлический рекуператор для нагрева инжектирующего воздуха

вой сторонами рекуператора возникает перепад давления, приводящий к попаданию воздуха в продукты сгорания. В КВГ воздух просасывается через рекуператор и подается в горелку с помощью инжектора, работающего на компрессорном воздухе.

За керамическими рекуператорами возможна установка металлических рекуператоров для подогрева газа.

Топливом для колодцев является газ с теплотой сгорания 5,45–5,85 МДж/м^3 и выше.

1.9. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПРОХОДНЫЕ ПЕЧИ

Толкательные методические печи (МП), печи с шагающим подом (ПШП) и с шагающими балками (ПШБ), кольцевые (КП) печи работают при противоточном движении металла и продуктов сгорания в рабочем пространстве. Тепловая мощность крупных печей составляет 30 МВт и выше.

Существующие МП отапливают с помощью торцевых горелок (рис. 1.7), расположенных на одном, трех, четырех или пяти горелочных торцах верхнего и нижнего обогревов.

В нижнем подогреве ПШБ (рис. 1.8) в большинстве случаев установке горелок препятствует наличие большого числа стоек стационарных и подвиж-

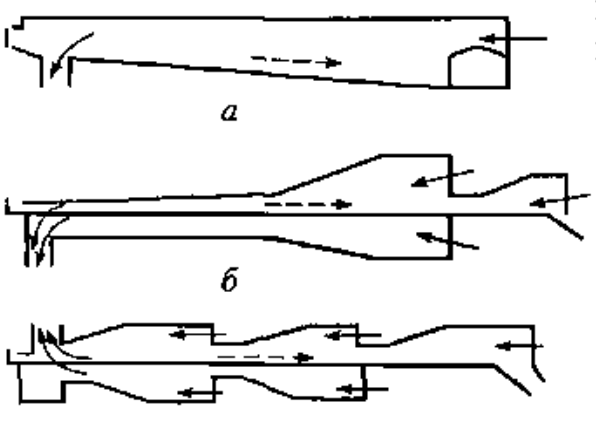


Рис. 1.7. Схема толкательных методических печей (МП):
а – однозонная; *б* – трехзонная, *в* – пятизонная

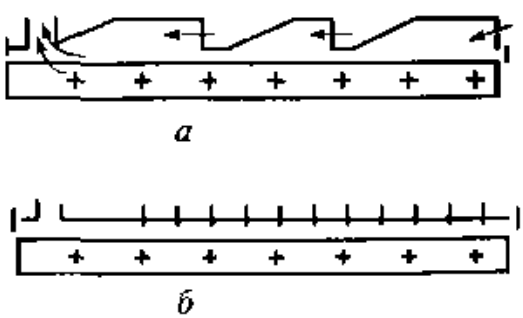


Рис. 1.8. Схема печей с шагающими балками (ПШБ):
а – с торцевым отоплением верхнего обогрева, *б* – со сводовым отоплением верхнего обогрева

ных балок. Поэтому здесь применяют горелки, установленные на продольных стенах. Эти горелки первоначально делали с постоянной длиной факела, чтобы обеспечить равномерность температур по ширине печи при изменении расхода топлива. Однако практика показала, что это излишне усложняет конструкцию, так как удовлетворительная равномерность достигается и при обычной конструкции горелки.

В зонах верхнего обогрева могут быть установлены торцевые горелки (рис. 1.8, *а*) и сводовые плоскопламенные горелки по всей длине печи (рис. 1.8, *б*) или в отдельных зонах, чаще всего в томильной

Расположение горелок на ПШП аналогично их расположению в верхнем обогреве ПШБ.

В КП при ширине пода до 3,5 м горелки устанавливают только на наружной стене. Горелки располагают тангенциально, так, чтобы факелы были направлены навстречу движению металла. При ширине пода 4,5 м и более горелки устанавливают на наружной и внутренней стенах радиально. На КП возможно также применение сводовых плоскопламенных горелок.

Высокотемпературные нагревательные проходные печи отапливают газом с различной теплотой сгорания, мазутом или комбинированно — газом и мазутом.

В связи с тем, что в этих печах необходима высокая калориметрическая температура сгорания (приблизительно 2000 °С), схемы их отопления сильно зависят от вида и характеристики топлива или, наоборот, для определенного типа или конструкции печи требуется определенное топливо.

Если для отопления печи должен быть применен доменный газ или смесь коксового и доменного газов с $Q_н^р \leq 5{,}85$ МДж/м^3, система отопления может быть решена на основе применения инжекционных горелок полного предварительного смешения в сочетании с высокотемпературным подогревом компонентов сгорания. Воздух следует подогревать в керамическом блочном рекуператоре до 500–600 °С, газ — в металлическом трубчатом рекуператоре до 250–300 °С. При работе инжекционных горелок с $\alpha = 1{,}00–1{,}05$ при этих условиях удается достичь высоких температур вблизи горелок и обеспечить нагрев металла до температуры прокатки.

Для работы на смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р = 6{,}25–7{,}55$ МДж/м^3 при установке инжекционных горелок достаточно подогревать только воздух в керамическом рекуператоре до 500–550 °С. Для экономии топлива можно подогревать газ до 250–350 °С или установить за печью котел-утилизатор.

Следует отметить, что МП с инжекционными горелками и керамическим рекуператором получаются весьма громоздкими и дорогими. Такую конструкцию следует применять только при отсутствии более богатого топлива. С ПШБ, ПШП и КП керамические блочные рекуператоры скомпоновать очень трудно, а поэтому для указанных печей такая схема отопления практически неприемлема.

Отопление высокотемпературных проходных печей смесью коксового и доменного газов с $Q_н^р = 7{,}55–10{,}00$ МДж/м^3 или смесью природного и доменного газов с $Q_н^р < 18{,}75$ МДж/м^3 нежелательно. При применении та-

ких смесей резко возрастает опасность проскока (смесь коксового и доменного газов) и уменьшается теплопроизводительность инжекционных горелок. Горелки без предварительного смешения типа "труба в трубе" могут обеспечить необходимую температуру в печи только при достаточно высокой степени подогрева воздуха.

Оптимальным топливом для рассматриваемых печей являются природный газ и смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р > 10{,}00$ МДж/м^3 и природного и доменного газов с $Q_н^р > 18{,}75$ МДж/м^3. Для отопления этими газами можно применять горелки типа "труба в трубе" (для торцевого отопления) или сводовые плоскопламенные горелки. Для сокращения расхода топлива воздух следует подогревать в металлических рекуператорах до 400 °С. В данном случае конструкция печи получается наиболее простой, компактной, а стоимость сооружения печи — наименьшей.

В черной металлургии мазут для отопления нагревательных печей используют весьма редко. Гораздо чаще применяют комбинированное газомазутное отопление с раздельным или совместным сжиганием газа с высокой теплотой сгорания и мазута.

Осуществление совместного сжигания газа и мазута наиболее сложно. В этом случае значительно усложняется система автоматического регулирования теплового режима печи. Кроме того, газ, сгорая быстрее, потребляет кислород воздуха для горения в первую очередь. В результате горение мазута затягивается и образуются продукты химического и механического недожога, в том числе сажистый углерод. Поэтому, как правило, газ и мазут сжигают раздельно, причем мазут является резервным топливом.

При газомазутном отоплении чаще всего применяют горелочные устройства, представляющие собой горелку без предварительного смешения типа "труба в трубе" со встраиваемой в газовое сопло форсункой высокого давления или специальные газомазутные горелки. Воздух для горения подогревают в металлическом рекуператоре до 400 °С.

В случае отопления рассматриваемых печей мазутом на них устанавливают форсунки высокого давления с двойным распыливанием. Воздух также подогревают до 400 °С.

1.10. ПРОХОДНЫЕ И ПРОТЯЖНЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

При термической обработке подвод тепла должен быть рассредоточен по длине рабочего пространства.

В печах этого типа нагреваемые изделия транспортируют с помощью печных рольгангов, шагающих балок и пода, печных конвейеров различных типов или проталкивают по направляющим, а полосу протягивают через печь по приводным роликам.

Длина печей этого типа может достигать 100 м и более, а тепловая мощность — 100 МВт.

При нагреве изделий до 700 °С и выше камеры нагрева этих печей оснащают горелками, обычно расположенными с обеих сторон нагревае-

мого изделия (сверху и снизу) а если это невозможно, — только сверху. При термической обработке в атмосфере контролируемого состава таким же образом располагают радиационные трубы. В вертикальных протяжных печах горелочные устройства или радиационные трубы располагают с обеих сторон ветви полосы.

В большинстве случаев для проходных и протяжных печей целесообразно применять инжекционные горелки с инжекцией воздуха газом. При постоянном во времени тепловом режиме ограниченные пределы регулирования инжекционных горелок приемлемы. При большом, а часто огромном числе горелок весьма желательно избежать системы трубопроводов для разводки воздуха, которые чрезмерно осложняют конструкцию печи и затрудняют ее обслуживание.

Горелки работают обычно на холодном газе, так как разводка подогретого газа — сложная задача. Кроме того, сеть газопроводов подобных печей чрезвычайно разветвлена, и при прохождении через нее подогретый газ сильно остывает. В связи с тем, что обычно устанавливают горелки малых размеров, внутренняя изоляция газопроводов к ним невозможна. Внешняя их изоляция недопустима по правилам техники безопасности.

Радиационные трубы обычно конструируют со встроенным рекуператором для подогрева воздуха. Если требуется высокая равномерность и интенсивность нагрева изделий, то прибегают к циркуляции среды в рабочем пространстве.

На рис. 1.9 показана схема поперечного сечения печи с шагающими балками для нагрева изделий на поддонах до 900—950 °С. Двухпроходные горелки расположены попеременно выше и ниже уровня пода. Нижняя горелка соединена каналом, расположенным в кладке продольных стен, с верхней частью рабочего пространства, а верхняя горелка — с нижней частью рабочего пространства. Через эти каналы к корню факела подсасываются продукты сгорания из рабочего пространства. В результате в печи создана система интенсивной рециркуляции продуктов сгорания. Это обеспечивает высокую равномерность распределения температур в поперечном сечении печи.

В печи с роликовым подом для светлого отжига тяжелых бунтов проволоки (нагрев до 770—810 °С) для интенсификации и повышения равномерности нагрева применены циркуляционные вентиляторы (рис. 1.10).

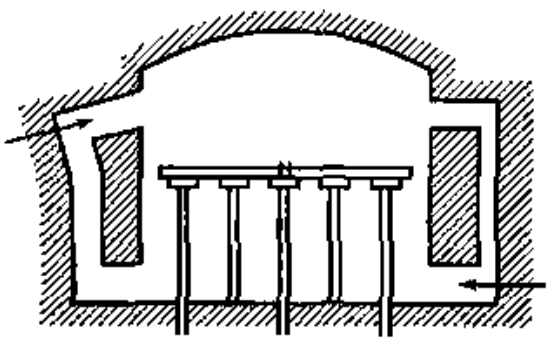


Рис. 1.9. Схема печи с шагающими балками и с рециркуляцией продуктов сгорания

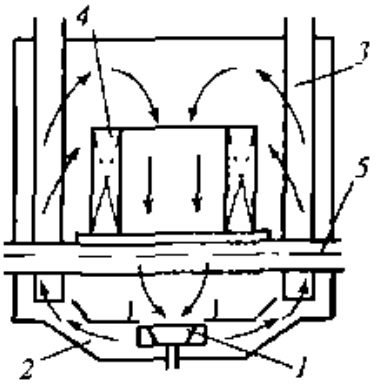


Рис. 1.10. Схема печи с роликовым подом для отжига тяжелых бунтов проволоки

Циркуляционный вентилятор *1*, установленный на поду печи, отсасывает атмосферу контролируемого состава из рабочего пространства. Поток атмосферы из направляющего аппарата *2* омывает тупиковые радиационные трубы *3*, расположенные вертикально у продольных стен печи. Нагретая атмосфера омывает бунты *4*, транспортируемые на роликах *5* печного рольганга.

При нагреве до низких температур (200–600 °С) наиболее предпочтительна система отопления с интенсивным теплообменом конвекцией.

На рис. 1.11 показана схема поперечного разреза печи с шагающими балками для нагрева до 400–630 °С тяжелых алюминиевых слябов. Циркуляционный вентилятор *1*, расположенный на боковой стене печи, подсасывает газовую среду из рабочего пространства и подает ее в продольный канал *2*. В этом канале установлены горелки *3*, позволяющие получить низкотемпературные продукты сгорания. Затем смесь газов через канал *4* поступает в короб *5*. Из коробов через большое число сопел горячий газ направляется с большой скоростью на верхнюю и нижнюю поверхности слябов. Избыточное количество продуктов сгорания сбрасывают через дымопровод *6*. При организованном таким образом струйном нагреве удается достичь высокой равномерности и скорости нагрева.

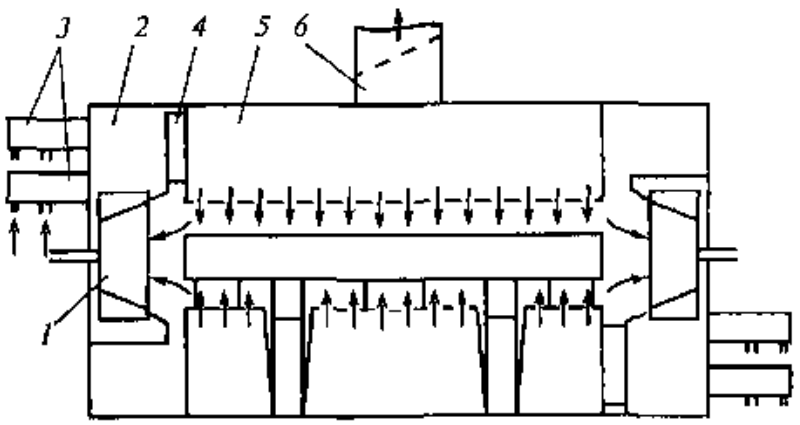


Рис. 1.11. Схема печи струйного нагрева алюминиевых слябов

Иной способ решения системы отопления печи для низкотемпературного нагрева представлен на рис. 1.12. Здесь схематически показан поперечный разрез печи с шагающими балками для нагрева до 250–350 °С (отпуск) пакетов прутков. Продукты сгорания, смешанные с воздухом, с помощью дымососов отсасываются из рабочего пространства печи. От дымососов смесь поступает в коллектор *1*, а из него в патрубки *2*. В патрубках встроены горелки, где газ сгорает в рециркуляте; образуются низкотемпературные продукты сгорания, которые подаются в продольный короб *3*, а из него в ряд труб *4*. Продукты сгорания из труб выходят в рабочее пространство и нагревают пакеты прутков. Эта печь предназначена для работы садками, но такая система отопления вполне применима и для непрерывных проходных печей.

В обоих случаях (см. рис. 1.11 и 1.12) рецир-

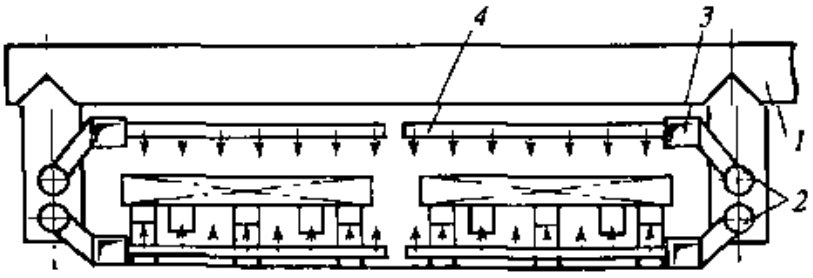


Рис. 1.12. Схема конвективной печи для нагрева пакетов прутков

куляционные контуры разбиты по длине печи на несколько одинаковых секций. При проектировании низкотемпературных печей совершенно необходимо предусматривать специальные меры по обеспечению взрывобезопасности при эксплуатации: запальные горелки, устройства контроля пламени и тому подобное.

Если в печи должны проводиться две операции с существенно разными температурами нагрева (например, отпуск и нормализация), то систему ее отопления предпочтительно решать с применением горелок с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха. Благодаря возможности работы этих горелок с большими пределами регулирования расходов топлива и высокими коэффициентами расхода воздуха переход от одного режима к другому может проводиться без отключения части горелок. Если же заданные режимы окажутся неосуществимыми по характеристике этих горелок, то необходима система отопления, предусматривающая отключение части горелок.

Неудобством этой системы является то, что отключать и включать горелки приходится вручную. Для обеспечения безопасности эксплуатации печи при 500–600 °С и менее необходимо конструктивно выделить группы горелок, работающих при этом режиме. Эта группа горелок должна быть оснащена устройствами контроля пламени, автоматической отсечкой зоны при погасании горелки и другими устройствами, обеспечивающими взрывобезопасность низкотемпературных печей.

При значительной ширине печи равномерность нагрева изделий может быть обеспечена путем применения отопления сводовыми горелками. Тип горелок должен выбираться в зависимости от технологического режима работы печей.

В современных агрегатах непрерывного горячего цинкования в камере скоростного нагрева необходимо проведение безокислительного нагрева открытым пламенем. С этой целью камеру скоростного нагрева отапливают с помощью горелок, которые обеспечивают сжигание газа с коэффициентом расхода воздуха несколько меньше единицы и практически с полным выгоранием кислорода воздуха.

Для проходных и протяжных печей часто применяют горелочные устройства, снабженные запальными горелками. При разработке системы отопления в этих случаях необходимо предусматривать питание запальных горелок газом и воздухом таким образом, чтобы при изменении расхода компонентов сжигания на основные горелки их расходы на запальные горелки оставались постоянными.

1.11. САДОЧНЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Садочные печи характеризуются переменным по времени температурным режимом и необходимостью достижения возможно большей равномерности распределения температур по объему рабочего пространства в каждый период цикла. В связи с этим количества тепла, подаваемого в различные периоды цикла, различаются в 10–15 раз.

Простейшие типы садочных печей (камерные со стационарным или выдвижным подом, с внешней механизацией) в настоящее время в прокатных цехах металлургических предприятий применяются крайне редко. Получают распространение садочные печи, в которых загружают, разгружают и передают изделия из камеры в камеру с помощью печного рольганга или шагающих балок. Для таких печей системы отопления решаются аналогично системам отопления проходных и протяжных печей (примером может служить печь, схема которой показана на рис. 1.12) Разумеется, для садочных печей специально должна быть проработана возможность широких пределов изменения подвода тепла. Для обеспечения высокой равномерности температур по объему рабочего пространства целесообразно организовать рециркуляцию среды за счет энергии факелов горелок или с помощью циркуляционных вентиляторов.

Своеобразна система отопления колпаковых печей для отжига рулонов полосы — одного из самых распространенных типов садочных печей. В этих печах стопу рулонов накрывают металлическим муфелем, а затем нагревательным колпаком, в котором расположены горелочные устройства. Продукты сгорания из-под нагревательного колпака удаляют с помощью воздушного эжектора. Подача тепла в течение цикла нагрева должна колебаться в пределах 1:12—1:15.

В колпаковых печах, построенных по первоначальным проектам, на нагревательном колпаке установлены радиально инжекционные горелки в специальных топках, экранированных от муфеля корундовыми плитками. Однако необходимые высокие пределы регулирования недостижимы при инжекционных горелках. Поэтому применено позиционное регулирование. В начале цикла нагрева подачу топлива регулируют двухпозиционно: тепловая мощность колпака или 10—15 % тепловой мощности. При достижении заданной температуры в месте установки стендовой термопары закрываются дроссели на газопроводе и воздухопроводе. В результате максимальное количество тепла, которое можно подать в печь, сокращается до 50 % тепловой мощности. С этого момента регулирование ведется двухпозиционно: 50 % или 10—15 % тепловой мощности. Минимальное количество газа поступает через байпас вокруг регулирующего дросселя. Подача эжектирующего воздуха в эжектор настроена так, чтобы при минимальном расходе газа разрежение под колпаком повышалось. В результате горелки работают с повышенным коэффициентом расхода воздуха, что исключает опасность проскока пламени в горелку.

Такая система успешно работает на смеси коксового и доменного газов. При работе же на природном газе возникли трудности. Топка разогревалась до 1500—1600 °С, а при минимальном расходе газа быстро охлаждалась воздухом, подсасываемым через горелку. В результате наблюдались местные перегревы садки против топок, топки быстро разрушались. При больших расходах газа в холодные топки происходили хлопки. Это положение было исправлено переделкой горелок на работу с $\alpha = 1{,}3$ и подачей минимального количества газа не через горелку, а через специальную трубку в нижней части топки. Топки стали меньше перегреваться, а при минимальных рас-

ходах меньше остывать, так как подаваемый через трубку газ сгорал с воздухом, подсасываемым через горелку Эти осложнения привели к решению применять для колпаковых печей инжекционно-атмосферные горелки частичного предварительного смешения, установленные в два ряда по высоте тангенциально. Нагрев стал мягче, а стойкость кладки повысилась. Однако подсос вторичного воздуха под действием разрежения в колпаке приводит к значительному и трудноуправляемому повышению коэффициента расхода воздуха. Это, естественно, вызывает некоторое повышение удельного расхода топлива.

Оптимальным решением системы отопления колпаковых печей является применение горелок с принудительной подачей воздуха, имеющих широкий диапазон регулирования коэффициента расхода воздуха, а также рекуперация тепла уходящих продуктов сгорания для подогрева воздуха горения. В этом случае представляется возможным добиться повышения качества нагрева, стойкости печи и снижения расхода топлива.

Этот пример иллюстрирует процесс разработки системы отопления, необходимость комплексного решения при выборе горелочных устройств и схемы регулирования тепловой работы печи, важность учета технологических, эксплуатационных и экономических факторов.

1.12. ПЕЧИ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ СУШКИ ИЗДЕЛИЙ И МАТЕРИАЛОВ

Установки для сушки материалов и изделий отличаются большим разнообразием, определяемым разнообразием высушиваемых материалов.

При сушке формовочных сыпучих материалов применяют в основном сушильные вращающиеся барабаны. Теплоноситель для сушки получают в выносных топках при сжигании топлива с избытками воздуха, позволяющими осуществлять полное сгорание. При этом специальные требования к горелочным устройствам не предъявляются. Необходимую температуру теплоносителя, определяемую из условий обеспечения эффективности сушки, получают путем смешивания продуктов сгорания с воздухом или уже отработанными газами. покидающими рабочее пространство Количество воздуха или рециркулята, добавляемых к первичным продуктам сгорания, определяют из баланса тепла в топке.

При сушке формованных изделий в случае мелкосерийного производства применяют либо камерные печи, либо специальные установки, работающие периодически. При серийном производстве изделий сушку осуществляют в агрегатах непрерывного действия.

В соответствии с типом агрегатов и особенностями технологии сушки решаются вопросы компоновки рабочего пространства, организации движения газов и температурного режима. Горелочные устройства, как правило, размещают в выносных камерах сгорания, поэтому обычно применяют горелки общего назначения. Продукты сгорания, покидающие рабочее пространство, возвращают в камеру сгорания при помощи рециркуляционного вентилятора Ввод теплоносителя из топки в рабочий объем осуществляют через систему отверстий в ее стенах.

Важными технологическими операциями при работе печных агрегатов являются сушка и разогрев огнеупорной футеровки рабочего пространства и газоходов. Несмотря на то, что эти операции являются вспомогательными, важность их очевидна, так как качественная сушка и разогрев кладки в значительной степени определяют стойкость футеровки в процессе технологической эксплуатации.

Как правило, основные технологические горелки и система отопления печей в целом не приспособлены к обеспечению графика сушки при широком и постоянно изменяющемся температурно-временном режиме работы. Поэтому в ряде случаев для сушки футеровки печей проектируется специальная система отопления с получением низкотемпературного теплоносителя в выносных топках. Для улучшения газодинамики рабочего пространства, в котором осуществляется сушка футеровки, иногда предусматривается отдельный газоотводящий тракт для эвакуации насыщенного влагой теплоносителя.

Иногда для осуществления начального периода сушки приходится демонтировать несколько технологических горелок и на их место устанавливать временные горелки меньшей тепловой мощности и с более широким диапазоном регулирования.

Если по условиям работы агрегата предусмотрен переход режима сушки в разогрев и выход на нормальный технологический режим, то постепенно включают в работу основные горелочные устройства и демонтируют вспомогательные.

Имеется особый класс печного оборудования, у которого режим сушки и разогрева футеровки является основным технологическим циклом. К этому классу агрегатов относятся сталеразливочные ковши. Ковши имеют сложную многослойную футеровку, сушка и разогрев которой ведутся на специальных стендах при горизонтальном или вертикальном расположении ковша.

Особые сложности возникают при совмещении сушки и разогрева футеровки до 1000—1200 °С. Причем подогрев футеровки осуществляется перед каждым наливом металла. Высокий подогрев футеровки и увеличение времени выдержки дают возможность снижения потерь тепла стали при ее обработке в ковше и разливке. Кроме того, это позволяет снизить температуру перегрева стали при ее выпуске из сталеплавильного агрегата.

Система отопления таких ковшей строится с использованием одной высокоскоростной горелки с широкими пределами регулирования, установленной на неподвижной крышке, под которую заезжает ковш. Система отопления должна иметь программное устройство, обеспечивающее автоматическое регулирование расхода топлива и соотношения "топливо—воздух" в соответствии с графиком сушки и разогрева. Эвакуация продуктов сгорания осуществляется в зазор между крышкой-сводом и ковшом. Наиболее экономичными являются системы отопления с использованием рекуператоров или регенераторов.

Глава 2. НОРМАТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ГОРЕЛКАМ И ДОКУМЕНТАЦИИ

2.1. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Топливосжигающее устройство, как один из основных элементов печного оборудования, в значительной степени определяет всю тепловую работу агрегата. Конструктивные особенности горелок непосредственно влияют на схему подвода топлива и воздуха к агрегату, схему смешения компонентов, интенсивность горения топлива и состав продуктов горения, аэродинамическую структуру факела. Работа горелочных устройств непосредственно связана с безопасностью эксплуатации теплового агрегата, особенно в периоды его пуска и выключения.

Для однозначного толкования всех сторон горелочной техники стандартами предусмотрены единая терминология и определения, которые необходимо применять в научно-технической, учебной и справочной литературе [1, 2].

Ниже приводятся стандартизированные и общепринятые термины.

Низшая теплота сгорания топлива	Количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы объема или массы топлива при условии, что вода, образующаяся при сгорании, находится в парообразном состоянии
Высшая теплота сгорания топлива	Количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы объема или массы топлива при условии, что вода, образующаяся при сгорании, находится в жидком состоянии
Относительная плотность газа	Отношение плотности газа к плотности воздуха
Низшее число Воббе	Отношение объемной низшей теплоты сгорания газа к квадратному корню из относительной плотности газа
Влажные продукты сгорания	Продукты сгорания, содержащие водяной пар, подведенный с топливом и воздухом для горения или возникший в процессе сгорания
Сухие продукты сгорания	Продукты сгорания, не содержащие водяного пара
Корневая зона факела	Совокупность точек факела, наименее удаленных от выходных отверстий смесителя горелки

Фронт пламени	Слой, в котором в данный момент происходит цепная реакция горения
Скорость горения	Скорость, с которой элемент фронта пламени распространяется относительно свежей смеси
Стабильность пламени	Установившееся состояние пламени, при котором оно занимает неизменное положение по отношению к выходному отверстию горелки
Проскок пламени	Перемещение корневой зоны факела навстречу вытекающей смеси
Отрыв пламени	Перемещение корневой зоны факела от выходного отверстия горелки по направлению течения газа или смеси
Частичный отрыв пламени	Перемещение корневой зоны факела от выходного отверстия горелки по направлению течения газа или смеси не по всему сечению отверстия
Срыв пламени	Отрыв пламени, сопровождающийся его погасанием
Погасание пламени	Прекращение горения по любым причинам
Пульсация пламени	Чередующееся изменение параметров факела и локализации его корневой зоны
Вибрационное горение	Горение, сопровождающееся интенсивными колебаниями, которые возникают в результате взаимодействия механизмов гидромеханики течения, смесеобразования и собственно горения
Вспышка	Быстрое сгорание горючей смеси, происходящее от источника зажигания, не приводящее к устойчивому горению
Воспламенение	Зажигание горючей смеси, при котором возникает устойчивое пламенное горение
Нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения)	Минимальное или максимальное содержание горючего в смеси "горючее вещество – окислительная среда", при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания
Минимальная энергия зажигания	Наименьшее значение энергии электрического разряда, способной воспламенить смесь топлива с воздухом
Первичный воздух	Воздух для горения, подаваемый через горелку для предварительного смешения с топливом

Вторичный воздух	Часть воздуха для горения, подаваемого через горелку или непосредственно в камеру сгорания
Третичный воздух	Часть воздуха, подаваемого через горелку или непосредственно в камеру сгорания для разбавления продуктов сгорания и понижения их температуры. В качестве третичного воздуха могут использоваться продукты сгорания, покидающие рабочий объем теплового агрегата
Стехиометрический объем воздуха	Количество воздуха, необходимого для полного сгорания единицы объема или массы топлива, вычисляемое по химическому составу газа
Фактический объем воздуха для горения	Количество воздуха, фактически израсходованного для сжигания единицы объема или массы топлива
Коэффициент расхода воздуха	Отношение фактического объема воздуха к стехиометрическому объему воздуха
Минимальный коэффициент расхода воздуха	Минимальный коэффициент расхода воздуха, установленный при химической неполноте сгорания, не превышающей норму
Полное сгорание топлива	Сгорание топлива, в процессе которого доля горючих компонентов в продуктах сгорания не превышает допустимых значений
Продукты сгорания	Вещества, образующиеся в результате реакции взаимодействия топлива и окислителя
Разбавленные продукты сгорания	Продукты сгорания, разбавленные избыточным воздухом или рециркулирующими газами
Стехиометрический объем продуктов сгорания	Количество сухих продуктов сгорания, образующихся при полном сгорании единицы объема или массы топлива со стехиометрическим объемом воздуха
Фактический объем продуктов сгорания	Количество сухих продуктов сгорания, образующихся при сжигании единицы объема или массы топлива при данном коэффициенте расхода воздуха
Коэффициент разбавления продуктов сгорания	Отношение фактического объема продуктов сгорания к стехиометрическому объему продуктов сгорания
Присоединительное давление газа	Статическое давление газа в газопроводе непосредственно перед основным запорным органом горелки

Присоединительное давление воздуха	Статическое давление воздуха в воздухопроводе непосредственно перед регулирующим органом горелки
Максимальное (номинальное, минимальное рабочее, минимальное) давление газа перед горелкой	Максимальное давление газа (номинальное, минимальное рабочее, минимальное), измеренное после последнего по ходу регулирующего или запорного органа горелки и соответствующее максимальной (номинальной, минимальной рабочей или минимальной) тепловой мощности горелки
Максимальное (номинальное, минимальное рабочее, минимальное) давление воздуха перед горелкой	Максимальное давление воздуха (номинальное, минимальное рабочее, минимальное), измеренное после последнего по ходу регулирующего или запорного органа горелки и соответствующее максимальной (номинальной, минимальной рабочей или минимальной) тепловой мощности горелки
Горелка	Устройство, обеспечивающее устойчивое сгорание топлива и возможность регулирования горения
Камера горения	Часть горелки или теплового агрегата, в которой происходит горение
Диффузионная горелка	Горелка, в которой топливо и воздух смешиваются только при горении
Инжекционная горелка	Газовая горелка с предварительным смешением газа с воздухом, у которой одна из сред, необходимых для горения, подсасывается в камеру горения другой средой (синоним — эжекционная горелка)
Горелка с принудительной подачей воздуха	Горелка, в которую воздух подают дутьевым устройством
Горелка без принудительного смешения	Горелка, у которой смешение топлива с воздухом происходит за выходными отверстиями горелки
Горелка с частичным предварительным смешением	Горелка, у которой топливо смешивается с частью воздуха (первичным воздухом), необходимого для горения, перед выходными отверстиями
Горелка с полным предварительным смешением	Горелка, в которой газ смешивается с полным объемом воздуха перед выходными отверстиями
Горелка с неполным предварительным смешением	Горелка, в которой газ не полностью смешивается с воздухом перед выходными отверстиями

Атмосферная газовая горелка	Инжекционная газовая горелка с частичным предварительным смешением газа с воздухом, использующая вторичный воздух среды, окружающей факел
Горелка общего назначения	Горелка с нерегулируемым факелом, обеспечивающая полное сжигание топлива при минимальном коэффициенте расхода воздуха
Горелка специального назначения	Горелка, принцип действия и конструкцию которой определяет тип теплового агрегата или особенности технологического процесса
Излучающая горелка	Горелка, у которой основная доля тепла, выделяющегося при горении, передается излучением от насадки или прилегающих участков кладки теплового агрегата
Рекуперативная горелка	Горелка, снабженная рекуператором для подогрева газа или воздуха
Регенеративная горелка	Горелка, снабженная регенератором для подогрева газа или воздуха
Скоростная горелка	Горелка, на выходе из которой обеспечивается высокоскоростной поток продуктов горения
Испарительная горелка	Горелка, в которой жидкое топливо испаряется без дополнительного источника тепла и в виде пара смешивается с воздухом до начала процесса горения
Сопло горелки	Элемент горелки, через который происходит истечение струй газообразного топлива или воздуха
Подогреватель топлива	Устройство для подогрева жидкого топлива
Форсунка	Устройство для распыливания жидкого топлива
Комбинированная горелка	Горелка, предназначенная для раздельного или совместного сжигания газообразных, жидких или твердых видов топлив
Горелка с ручным управлением	Горелка, розжиг, изменение режима работы и наблюдение за работой которой выполняет оператор
Полуавтоматическая горелка	Горелка, оборудованная устройством розжига и контроля пламени
Автоматическая горелка	Горелка, оборудованная автоматическими устройствами: дистанционным запальным, контроля пламени, контроля давления топлива и воздуха, запорными клапанами и средствами управления, регулирования и сигнализации

Блочная газовая горелка	Газовая горелка, скомпонованная с вентилятором в единый блок, оборудованная средствами автоматического управления и регулирования
Блочная мазутная горелка	Мазутнал автоматическая горелка, состоящая из одной или нескольких форсунок, запального устройства, вентилятора, приводного двигателя, топливного насоса, мазутоподогревателя и автоматики, соединенных в одном блоке
Блочная газомазутная горелка	Горелка, оснащенная, как блочная газовая и мазутная горелки, в которой обеспечивается раздельное сжигание газообразного или жидкого топлива
Основная горелка	Горелка, обеспечивающая сгорание всего или основной части поступающего топлива
Турбинная горелка	Газовая горелка, в которой энергия вытекающих струй газа используется для привода встроенного вентилятора, нагнетающего воздух в горелку
Подощелевая горелка	Газовая горелка, выполненная в виде труб, перфорированных газовыпускными отверстиями, и встроенная в щелевой канал для подачи воздуха, расположенный в поду топочной камеры
Беспламенная горелка	Горелка предварительного смешения, в которой сжигание топлива происходит в микрофакелах без видимого пламени
Запальное устройство	Устройство, предназначенное для розжига горелки
Запальная горелка	Вспомогательная горелка, служашая для розжига основной горелки
Стационарная запальная горелка	Запальная горелка, жестко соединенная с основной горелкой
Переносная запвльная горелка	Запальная горелка, предназначенная для поочередного розжига нескольких горелок
Запальная горелка непрерывного действия	Запальная горелка, не выключаемая в течение всего времени работы основной горелки
Пилотная горелка	Стационарная запальная горелка, снабженная устройством контроля пламени
Выходиое отверстие горелки	Отверстие, через которое вытекает из горелки топливовоздушная смесь
Туннель горелки	Канал в выходной части горелки, стенки которого изготовлены из огнеупорного материала (горелочный камень)

Основной запорный орган горелки	Орган, перекрывающий подачу топлива в горелку и управляемый вручную
Запорный клапан	Клапан для перекрытия потока рабочей среды
Пропорционизатор	Автоматически действующее устройство, обеспечивающее поддержание заданного состава газовоздушной смеси в условиях измеияющейся тепловой мощности горелки
Обратный клапан горелки	Клапан для автоматического предотвращения обратного потока рабочей среды
Заяальное отверстие горелки	Отверстие для ввода в горелку переносного запального устройства
Смотровое отверстие	Отверстие для наблюдения за факелом горелки
Автоматика горелки	Комплекс элементов, обеспечивающих пуск, автоматическое регулирование и контроль безопасности горелки
Система контроля пламени	Система, включающая в себя устройство контроля пламени и управляемый этим устройством запорный клапан
Устройство контроля пламени	Устройство, реагирующее на пламя контролируемой им горелки, на выходе которого возникают сигналы, показывающие на наличие или отсутствие пламени
Автоматическое устройство контроля герметичности запорного клапана	Устройство, предотвращающее пуск горелки при недостаточной герметичности запорного газового клапана
Автоматический клапая утечки газа	Устройство, предназначенное для связи газового тракта горелки с атмосферой в нерабочем состоянии и продувки газового тракта перед пуском горелки
Тепловая мощность горелки	Количество тепла, образующегося в результате сжигания топлива, подводимого к горелке в единицу времени
Максимальная тепловая мощность горелки	Мощность, равная 0,9 мощности, соответствующей верхнему пределу устойчивой работы горелки
Номинальная тепловая мощность горелки	Максимальная мощность, достигаемая за время длительной работы горелки, при которой показатели работы горелки соответствуют установленным нормам
Минимальная рабочая теаловая мощность горелки	Минимальнал мощность горелки, при которой показатели ее работы соответствуют установленным нормам
Минимальная тепловая мощность горелки	Мощность, равная 1,1 от мощности, соответствующей нижнему пределу устойчивой работы горелки

Пусковая мощность	Минимальная тепловая мощность горелки, при которой обеспечивается устойчивое воспламенение топливовоздушной смеси
Коэффициент предельного регулирования горелки	Отношение максимальной тепловой мощности горелки к ее минимальной тепловой мощности
Коэффициент рабочего регулирования горелки	Отношение номинальной тепловой мощности горелки к минимальной рабочей тепловой мощности
Диапазон регулирования тепловой мощности горелки	Диапазон изменения тепловой мощности горелки во время ее эксплуатации
Ступенчатое регулирование	Регулирование, при котором допускается несколько положений регулятора расхода топлива между максимальным и минимальным рабочим положениями
Плавное регулирование	Регулирование, при котором регулятор расхода топлива может быть установлен в любое положение между максимальным и минимальным рабочим положениями, при этом расход воздуха для горения пропорционален соответствующему расходу топлива
Предельное состояние горелки	Состояние, при котором происходит отклонение параметров от установленных пределов или нарушение безопасной работы горелки
Предельный режим горелки	Режим горелки, при котором еще не возникает ее предельное состояние
Отключенное состояние горелки	Состояние горелки, при котором основной запорный орган закрыт и отключено электропитание
Пуск горелки	Перевод горелки из отключенного состояния в состояние готовности к работе или рабочее состояние
Состояние готовности горелки	Состояние горелки, при котором основной запорный орган открыт, электроэнергия подведена, пилотная горелка (при ее наличии) работает
Рабочее состояние горелки	Состояние горелки, при котором все ее элементы функционируют в соответствии с их назначением
Повторный розжиг	Процесс, при котором после погасания пламени в рабочем состоянии горелки включается запальное устройство без перерыва в подаче топлива. Если воспламенение не произошло, то горелка

	выключается по истечении времени защитного отключения подачи топлива при погасании пламени
Повторный пуск	Процесс, при котором после погасания пламени в рабочем состоянии горелки выключается подача топлива и производится пуск горелки при выполнении программы пуска
Рабочее отключение подачи топлива	Автоматическое отключение подачи топлива, вызванное сигналом автоматических управляющих устройств при отклонении параметров горелки от допускаемых пределов
Защитное выключение горелки	Автоматическое выключение горелки, вызванное действием датчиков безопасности горелки или теплового агрегата, вследствие недопустимого отклонения какого-либо из контролируемых параметров
Время продувки горелки	Интервал времени перед розжигом горелки, в течение которого при закрытой подаче газа производят продувку воздухом топки, дымоходов и дымовой трубы для вывода из них горючих газов
Время розжига горелки	Интервал времени от момента подачи топлива до его воспламенения
Время защитного отключения подачи топлива при розжиге горелки	Интервал времени от момента начала подачи топлива в горелку до прекращения подачи топлива при отсутствии воспламенения
Время защитного отключения подачи топлива при погасании пламени	Интервал времени от момента погасания пламени до полного прекращения подачи топлива в горелку
Время срабатывания устройства контроля пламени	Интервал времени от момента погасания пламени до момента появления соответствующего сигнала на выходе устройства контроля пламени
Время выхода горелки на режим	Интервал времени от момента пуска горелки до достижения заданных эксплуатационных параметров

2.2. КЛАССИФИКАЦИЯ

Для подготовки и осуществления сжигания топлива горелочное устройство выполняет следующие функции:

- подготавливает топливо и воздух для горения, придавая им требуемые направления и скорости движения (в некоторых случаях в горелке происходит предварительный подогрев газа или воздуха);
- подготавливает горючую смесь (смешивает газовое топливо и

воздух или распыляет жидкое топливо и смешивает его с воздухом, в ряде случаев подогревает топливовоздушную смесь до температуры воспламенения и сжигает ее);

- стабилизирует горение;
- осуществляет подачу подготовленной горючей смеси или продуктов сгорания в рабочее пространство или топку.

В зависимости от типа устройства оно может предназначаться для выполнения только части перечисленных функций.

Процесс сжигания топлива можно условно разделить на три основные стадии: смешение топлива с воздухом для горения, подогрев топливовоздушной смеси до температуры воспламенения и собственно процесс сжигания. Процесс сжигания, т.е. реакция окисления компонентов топлива кислородом воздуха, протекает практически мгновенно. Первые же две стадии требуют значительно большего времени. По этой причине организация смешения определяет весь процесс сжигания, характеристики факела, а следовательно, распределение температур в рабочем пространстве печи и соответствие его технологическим требованиям к агрегату.

При разработке систем отопления печей следует отдавать предпочтение требованиям технологии, а поэтому в основу классификации горелочных устройств положены степень развития в них процесса смешения топлива с воздухом для горения, способы подачи топлива и воздуха, характер истекающих потоков и другие технологические особенности. Классификационные признаки горелок и их характеристики, регламентированные стандартом [3], приведены в табл. 2.1.

В зависимости от технологических особенностей и с использованием классификационных признаков горелочные устройства можно разделить на несколько типов: диффузионные горелки без предварительного смешения, горелки с улучшенным смешением, горелки с регулируемым смешением и горелки с полным предварительным смещением.

К диффузионным горелкам относятся устройства, предназначенные только для подачи в топочный объем газообразного топлива. Подача воздуха осуществляется либо за счет свободной конвекции, либо за счет разрежения в рабочем пространстве агрегата. Причем подсос воздуха происходит, как правило, не через горелочный туннель, а через технологические люки, разгрузочные отверстия или неплотные сочленения элементов печного оборудования. По такому принципу работают торцевые диффузионные горелки вращающихся трубчатых печей. Горелки устанавливают на торцевых стенках разгрузочных или загрузочных головок, и через них подается только газ либо мазут и распылитель. Основной поток воздуха подсасывается в печь через разгрузочную течку или неплотности между вращающимся барабаном печи и головкой. Подсасываемый холодный воздух в основном сосредоточен в нижней части печи. Это создает сложиость для организованного смешения газа и воздуха.

В горелках без предварительного смешения топливо и воздух подаются непосредственно в горелки. Но в самом устройстве потоки подаваемых сред не контактируют, а только приобретают необходимые скорости и направ-

Таблица 2.1

Классификационный признак	Характеристика классификационного признака
Способ подачи компонентов	Подача воздуха за счет свободной конвекции
	Подача воздуха за счет разрежения в рабочем пространстве
	Инжекция воздуха газом
	Принудительная подача воздуха от постороннего источника
	Принудительная подача воздуха от встроенного вентилятора (блочные горелки)
	Принудительная подача воздуха за счет давления газа (турбинные горелки)
	Инжекция газа воздухом (принудительная подача воздуха, инжектирующего газ)
	Принудительная подача газовоздушной смеси от постороннего источника
Степень подготовки горючей смеси	Без предварительного смешения
	С частичной подачей первичного воздуха
	С неполным предварительным смешением
	С полным предварительным смешением
Скорость истечения продуктов сгорания, м/с	До 20 (низкая)
	Свыше 20 до 70 (средняя)
	Свыше 70 (высокая, скоростные горелки)
Характер потока, истекающего из горелки	Прямоточный
	Закрученный неразомкнутый
	Закрученный разомкнутый
Номинальное давление газа перед горелкой, Па	До 5000 (низкое)
	Среднее давление (до критического перепада давлений)
	Высокое давление (критический и сверхкритический перепад давлений)
Возможность регулирования характеристик факела	С нерегулируемыми характеристиками факела
	С регулируемыми характеристиками факела
Необходимость регулирования коэффициента расхода воздуха	С нерегулируемым (минимальным или оптимальным) коэффициентом расхода воздуха
	С регулируемым (переменным или повышенным) коэффициентом расхода воздуха
Локализация зоны горения	В огнеупорном туннеле или в камере горения горелки
	На поверхности катализатора, в слое катализатора
	В зернистой огнеупорной массе
	На керамических или металлических насадках
	В камере горения агрегата или в открытом пространстве
Возможность использования тепла продуктов сгорания	Без подогрева воздуха и газа
	С подогревом в автономном рекуператоре или регенераторе
	С подогревом воздуха во встроенном рекуператоре или регенераторе
	С подогревом воздуха и газа
Степень автоматизации	С ручным управлением
	Полуавтоматические
	Автоматические

ления истечения в рабочий объем агрегата. Смешение потоков и горение смеси происходит в рабочем объеме по ходу движения струй.

Горелки с улучшенным смешением позволяют почти полностью провести смешение в пределах горелки. В результате этого горение начинает развиваться уже в горелочном туннеле, а в рабочем пространстве или топке оно лишь завершается.

Горелки с регулируемым смешением позволяют за счет подвижных или сменных элементов изменять характеристики факела в зависимости от требований технологического процесса в печи.

В горелках с полным предварительным смешением топливо смешивается с воздухом либо в выносном специальном смесителе, либо непосредственно внутри горелочного устройства. Полное сгорание газа происходит в пределах горелочного туннеля. В рабочее пространство поступают только продукты сгорания.

Исходя из этих характеристик, можно определить предпочтительные области применения основных типов горелок. Диффузионные горелки рекомендуется применять в тех случаях, когда необходимо использовать для горения воздух, который подается в тепловой агрегат с технологической целью, например охлаждать обожженный материал (известняк, окатыши) или готовые изделия (кирпичи).

Горелки без предварительного смешения рекомендуется применять в тех случаях, когда необходимо:

- обеспечить концентрированный подвод тепла с помощью небольшого числа крупных горелок, особенно при сжигании газа с высокой теплотой сгорания;
- получить широкие пределы регулирования;
- работать попеременно на газовом топливе различных видов или на газе и мазуте попеременно или одновременно;
- подогревать компоненты сгорания до высокой температуры.

Горелки с улучшенным смешением следует применять в тех случаях, когда допустимая длина факела ограничена и требуется концентрированный подвод значительного количества тепла при сравнительно небольших размерах горелки либо требуется создать факел специальной формы.

Горелки с регулируемым смешением следует применять в тех случаях, когда желательно изменять тепловыделение по длине факела, при установке одиночных и мощных горелок.

Горелки с полным предварительным смешением целесообразны для осуществления высокотемпературного нагрева при сжигании газов с низкой теплотой сгорания, а также при рассредоточенной подаче тепла большим числом горелок с целью достижения высокой равномерности нагрева.

2.3. ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Большое разнообразие печных агрегатов и их технологических режимов требует индивидуального подхода к выбору горелочных устройств. Выбор горелок следует производить с учетом максимального удовлетворения требова-

ний технологии и общих требований к устройствам для сжигания топлива. Поэтому ошибочны высказываемые иногда мнения об универсальности какого-либо одного типа горелок и абсолютном превосходстве этого типа над остальными. Не существует "хороших" или "плохих" типов горелок, а есть только подходящие или неподходящие для данных конкретных условий.

На основании опыта эксплуатации и анализа конструкции горелочных устройств можно сформулировать основные требования к их конструкции

Конструкция горелки должна быть возможно более простой: без подвижных частей, без устройств, изменяющих сечение для прохода газа и воздуха и без деталей сложной формы, расположенных вблизи носика горелки. Сложные устройства при эксплуатации себя не оправдывают и быстро выходят из строя под действием высоких температур в рабочем пространстве печи.

Сечения для выхода газа, воздуха и газовоздушной смеси следует отрабатывать в процессе создания горелки. В процессе эксплуатации все эти сечения должны быть неизменными. Количество подаваемых через горелку газа и воздуха следует измеиять только дроссельными устройствами, установленными на подводяших трубопроводах.

Сечения для прохода газа и воздуха в горелке и конфигурацию внутренних полостей следует выбирать таким образом, чтобы сопротивление на пути движения газа и воздуха внутри горелки было бы минимальным. Давление газа и воздуха в основном должно быть использовано для создания требуемых скоростей в выходных сечениях горелки.

Желательно, чтобы подача воздуха в горелку была регулируемой. Неорганизованная подача воздуха в результате разреженнн в рабочем пространстве или путем частичного инжектирования воздуха газом может допускаться только в особых случаях.

При необходимости разделения газового потока на несколько струй применяют массивную насалку с соответствующим числом отверстий. При осуществлении частичного предварительного смешения газа и воздуха следует использовать какой-либо один способ, а не усложнять горелку большим числом элементов одного и того же назначения — для улучшения смешения.

Для стабилизации горения предпочтительнее аэродинамические методы, т.е. создание зон циркуляции продуктов сгорания, которые поджигают газовоздушную смесь.

Применение горелок сложных конструкций бывает оправданным в тех случаях, когда горелка является единственным топливосжигающим устройством на агрегате, а тепловой режим агрегата требует изменения характеристик факела во времени. Сложные конструкции горелок применяют и в тех случаях, когда при проектировании теплового агрегата нет четких требований к тепловому режиму и его приходится подбирать при пусконаяадочных работах путем изменения характеристик факела.

Кроме того, работая в составе печного оборудования, горелочные устройства должны удовлетворять общим техническим требованиям, регламентированным стандартами [3—6].

Требования назначения

Номинальная тепловая мощность каждой горелки должна соответствовать номинальной тепловой мощности, установленной для горелок данного типоразмера (предельные отклонения (+10)—(−5) %).

Коэффициенты рабочего регулирования газовых горелок должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Класс горелки по способу подачи воздуха и степени подготовки горючей смеси	Коэффициент рабочего регулирования $K_{рр}$, не менее
Горелки с принудительной подачей воздуха с полным предварительным смешением, инжекционные горелки с полным предварительным смешением	3
Горелки с принудительной подачей воздуха с неполным предварительным смешением	4
Горелки с принудительной подачей воздуха без предварительного смешения; горелки с подачей воздуха за счет разрежения без предварительного смешения; инжекционные горелки с частичной подачей первичного воздуха	5
Беспламенные панельные горелки	2

Примечание. Указанные коэффициенты рабочего регулирования не относятся к блочным горелкам со ступенчатым регулированием, к запальным горелкам, к горелкам, предназначенным для тепловых агрегатов, не требующих указанных в таблице значений $K_{рр}$.

Коэффициент рабочего регулирования по тепловой мощности жидкотопливных горелок с плавным регулированием должен быть не менее:

- для горелок с форсунками механического распыливания 1,5
- для горелок с форсунками других схем..... 3

Требования к автоматике

Автоматические горелки должны работать при поддержании давления газа перед основным запорным органом с точностью от минус 15 до плюс 15 % номинального — для газа низкого давления (до 5 кПа) и от минус 10 до плюс 10 % — для газа среднего давления (до 100 кПа).

В автоматических горелках должны выполняться следующие операции: пуск горелки по программе, зависящей от ее мощности (включая продувку камеры горения и дымоходов), перевод ее в рабочее состояние, регулирование тепловой мощности, контроль параметров безопасности горелки и тепловой установки, выключение горелки при недопустимых отклонениях контролируемых параметров.

В автоматических горелках пуск не должен осуществляться в следующих случаях:

- при прекращении подачи электроэнергии;

- при давлении газа за основным запорным органом на 30 % ниже номинального значения;
- при недопустимых отклонениях контролируемых параметров тепловой установки,
- при недостатке воздуха для горения;
- при неполадках устройств продувки, отвода или рециркуляции продуктов сгорания;
- при коротком замыкании или разрыве в датчике контроля пламени либо связи датчика;
- если при пуске не обеспечены условия для безопасной эксплуатации горелки (требуемая температура топлива, давление распыливающего вещества, частота вращения механического распыливающего устройства и др.);
- при сигнале о нарушении герметичности запорного органа (у горелок, оснащенных автоматическим контролем герметичности).

В автоматических горелках не должна допускаться подача топлива в основную горелку, пока не включено запальное устройство или не появилось пламя запальной горелки.

Автоматика должна обеспечивать защитное выключение газовой горелки, если при ее розжиге не произойдет воспламенение топлива в течение не более: 5 с — горелок тепловой мощностью до 50 кВт; 3 с — горелок тепловой мощностью свыше 50 кВт.

У автоматических горелок в рабочем состоянии защитное выключение горелки должно обеспечиваться в следующих случаях:

- при погасании контролируемого пламени;
- при прекращении подачи электроэнергии,
- при снижении давления газа за основным запорным органом более чем на 30 % относительно номинаяьного значения;
- при недопустимых отклонениях контролируемых параметров тепловой установки;
- при недостатке воздуха для горения;
- при неполадках устройств продувки, отвода или рециркуляции продуктов сгорания.

Пуск горелки после устранения причины, вызвавшей защитное выключение горелки, не должен быть самопроизвольным. Защитное выключение должно сопровождаться сигналом.

При защитном выключении автоматической горелки из-за прекращения подачи электроэнергии возобновление подачи энергии не должно вызывать самопроизвольного пуска горелки (за исключением блочных горелок с регулированием мощности 0—100 % номинаяьной, находлщихся в рабочем состоянии, с выполнением полной программы пуска).

Защитное выключение жидкотопливной горелки должно произойти:

1) у горелок с номинвльнои тепловой мощностью до 0,35 МВт:

- если при пуске горелки в конце защитного времени отсутствует сигнал о наличии пламени;
- если во время эксплуатации пламя погаснет и при последую-

шем автоматическом повторном розжиге или повторной попытке пуска горелки в конце защитного времени отсутствует сигнал о наличии пламени.

Повторный розжиг или отключение перед повторным пуском горелки должны осуществляться не позже чем через 1 с после погасания пламени;

2) у горелок с номинальной тепловой мощностью свыше 0,35 МВт:

- если при пуске горелки в конце защитного времени отсутствует сигнал о наяичии пламени;
- если во время эксплуатации пламя погаснет.

Допускается одноразовый повторный пуск горелки, причем отключение подачи топлива должно осуществляться не позже чем через 2 с после погасания пламени.

Количество жидкого топлива, поступающего в камеру горения после защитного отключения, не должно превышать 0,1 % номинвльного часового расхода топлива.

При работе жидкотопливной горелки в камере сгорания со стенками из неогнеупорного материала для дожигания топлива, поступающего в топку после защитного отключения, должно включаться запальное устройство.

Время защитного отключения подачи жидкого топлива при розжиге горелки и при погасании пламени, не должно превышать указанного в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Номинальная тепловая мощность жидкотопливной горелки, МВт	Время защитного отключения подачи топлива, с, не более	
	при розжиге горелки	при погасании пламени
До 0,35	10	10
Свыше 0,35	5	2

Если горелки устанавливаются на воздухонагревателях, применяемых для воздушного отопления и вентиляции помещений, выработки теплоносителя для сушильных процессов или тепловых завес, то защитное выключение *горелок в рабочем состоянии, кроме вышеуказанных причин, должно* предусматриваться при:

- повышении температуры нагреваемого воздуха выше заданного значения;
- превышении давления продуктов сгорания над давлением нагреваемого воздуха в рекуперативных воздухонагревателях.

Система контроля пламени должна обеспечивать защитное выключение горелки, если произойдет погасание контролируемого пламени, при этом время защитного отключения подачи газа должно быть не более 2 с.

Для горелок номинвльной тепловой мощностью до 0,1 МВт, установленных в камерах горения, работающих под разрежением, время защитного отключения подачи газа в горелку при погасании пламени не должно превышать 30 с

Прекращение подачи электроэнергии к газовому автоматическому запорному органу от внешнего источника должно вызывать его закрытие.

Запорный орган должен закрываться без дополнительного подвода энергии от внешнего источника.

Время от момента прекращения подачи энергии от внешнего источника до прекращения поступления газа через запорный орган не должно превышать 1 с.

Устройство контроля пламени должно реагировать только на пламя контролируемой горелки и не должно реагировать на посторонние источники тепла и света (раскаленная футеровка, освещение и т.д.).

При неисправности устройства контроля пламени или нарушении в линиях связи между чувствительным элементом и вторичным прибором устройства контроля пламени при розжиге или работе горелки должно произойти защитное выключение горелки.

Группу горелок допускается оснащать одним устройством контроля пламени в случае, если наличие пламени горелки, оснащенной устройством контроля пламени, обеспечивает розжиг в других горелках группы.

Газовые горелки номинальной тепловой мощностью до 0,35 МВт должны быть оснащены одним газовым автоматическим запорным органом; мощностью свыше 0,35 до 2 МВт — двумя газовыми автоматическими запорными органами; свыше 2 МВт — двумя газовыми автоматическими запорными органами и автоматическим органом контроля утечки газа, установленным между ними и связанным с атмосферой.

При работе на тепловом агрегате группы горелок с общим подводом газа, суммарная тепловая мощность которых свыше 0,35 до 2,0 МВт, допускается один из двух автоматических запорных органов устанавливать общим для всех горелок.

Работоспособность автоматики горелок должна быть обеспечена при отклонениях питающего напряжения электрического тока от плюс 10 до минус 15 % номинального.

Конструктивные требования

Конструкция отдельных деталей горелки, а также деталей, предназначенных для соединения горелки с тепловым агрегатом, должна исключать самопроизвольное ослабление соединений в процессе эксплуатации.

Присоединение горелки к трубопроводам для подвода топлива и распыливающей среды (при необходимости) должно быть разъемным, исключать утечку.

Гибкие подводы (шланги) для подсоединения системы топливораспределения горелки к подводящему трубопроводу топлива должны быть оснащены прочно присоединенными металлическими наконечниками и отвечать требованиям по давлению, термостойкости, степени агрессивности топлива.

Подводы топлива и в случае необходимости подводы вещества для распыливания топлива должны быть оснащены очищаемыми фильтрующими устройствами.

Конструкция подвижных деталей, предназначенных для настройки горелки (включая регулировочные устройства на подводах топлива и возду-

ха для горения) должна исключать самопроизвольное изменение настроенного положения.

Конструкция горелки должна обеспечивать возможность очистки или замены сопла, завихрителя, форсунки без разборки подвода газообразного топлива и демонтажа горелки.

Ремонтные и смотровые лючки горелки должны належно закрываться. Конструкция их затворов должна исключать самопроизвольное открытие во время эксплуатации горелки.

Горелки, конструкция которых позволяет выдвигать или извлекать их из камеры горения без инструмента, должны быть оснащены блокировкой, не допускающей возможности их включения в открытом положении и осуществляющей их отключение при выдвижении или извлечении в процессе работы.

Конструкция заменяемых деталей горелки должна исключать возможность неправильной сборки, самопроизвольного перемещения или разъединения деталей.

Соединение отдельных частей системы топливораспределения горелки мягким припоем не допускается.

Конструкция жидкотопливной горелки должна предусматривать подачу в топливный тракт распыливающего или промывающего вещества для удаления остатков топлива при отключении горелки с переводом ее в нерабочее состояние. После отключения горелки ее топливные каналы от первого запорного органа до форсунки включительно не должны быть заполнены топливом.

Система топливораспределения горелки между основным запорным топливным органом и форсункой (соплом для распыливания топлива) должна быть плотной, исключающей возможность утечки топлива.

Горелка, предназначенная для камеры горения, работающей с разрежением (избыточным давлением), должна обеспечивать надежный пуск и устойчивую эксплуатацию при избыточном давлении (разрежении) в камере горения 10 Па.

Горелка, предназначенная для камеры горения, работающей с разрежением, должна обеспечивать устойчивое горение при разрежении, превышающем номинальное в 1,2 раза, — при разрежении свыше 50 Па и в 1,5 раза — при разрежении до 50 Па.

Горелка, предназначенная для камеры горения, работающей с избыточным давлением, должна обеспечивать устойчивое горение при противодавлении, превышающем номинальное в 1,2 раза, — при избыточном давлении свыше 50 Па и в 1,5 раза — при избыточном давлении до 50 Па.

Горелки или их детали, подлежащие снятию для очистки или замены, массой свыше 30 кг должны иметь приспособление для перемещения.

Горелка, розжиг которой осуществляется при помощи переносного запального устройства, должна иметь отверстие, позволяющее безопасное введение запального устройства. Допускается розжиг горелки проводить через отверстие камеры горения теплового агрегата.

Конструкция горелки должна обеспечивать возможность визуального

наблюдения за пламенем. Допускается визуальное наблюдение за пламенем через смотровые отверстия камеры горения теплового агрегата.

Конструкции горелок с принудительной подачей воздуха, предназначенных для работы на печных агрегатах, должны быть выполнены из материалов, допускающих работу на подогретом воздухе температурой не менее 300 °С.

Требования безопасности

Горелки в части общих требований безопасности должны соответствовать ГОСТ 12.2.003.

Предельно допустимые шумовые характеристики горелок должны соответствовать величинам, приведенным в табл 2.4.

Таблица 2.4

Допустимые уровни звукового давления и уровни звука

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука и эквивалентный уровень звука, дБ
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	—
107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Если значения шумовых характеристик превышают допустимые величины, то при эксплуатации горелки необходимо применять индивидуальные средства защиты органов слуха.

Температура поверхностей элементов горелок, предназначенных для ручного управления, не должна превышать 45 °С при изготовлении из неметаллических материалов и 40 °С — при изготовлении из металлов.

Электрическое оборудование горелки должно питаться от одного источника электроэнергии и выключаться при помощи одного выключателя.

Горелки номинальной мощностью свыше 0,12 МВт должны разжигаться при пусковой мощности, не превышающей 50 % номинальной.

Горелки номинальной мощностью свыше 0,1 МВт должны разжигаться запальным устройством или запальной горелкой (переносной или стационарной). Мощность запальной горелки должна быть не более 5 % номинальной мощности основной горелки, 10 % ее пусковой мощности и не превышать 0,12 МВт.

Автоматические и полуавтоматические горелки, пусковая мощность которых превышает 0,4 МВт, должны быть оснащены стационарной запальной горелкой. Группа горелок с ручным управлением может быть оснащена общим переносным запальным устройством или запальной горелкой.

Подвод топлива к переносной запальной горелке должен быть независим от подвода топлива к основной горелке и оснащен самостоятельным управляемым вручную запорным органом.

Тепловая мощность стационарной запальной горелки непрерывного действия не должна превышать 5 % номинальной тепловой мощности основной горелки. Тепловая мощность переносной запальной горелки не должна превышать 30 кВт.

Для розжига основной горелки применение электрического запального устройства запальной горелки не допускается.

Группу горелок с ручным управлением допускается оснащать одной стационарной запальной горелкой, если наличие пламени основной горелки, оснащенной запальной горелкой, обеспечивает зажигание пламени других горелок группы.

Конструкция горелок с принудительной подачей воздуха должна предусматривать возможность продувки камеры горения перед розжигом.

Горелки, в которые трубопроводом подается предварительно подготовленная горючая смесь, должны быть оснащены огнепреградителями.

Горелки должны быть оборудованы штуцерами для присоединения приборов, измеряющих давление газа перед горелкой, а горелки с принудительной подачей воздуха — дополнительно штуцерами для присоединения приборов, измеряющих дааление воздуха перед горелками (или в корпусе горелки).

Штуцера могут быть устаноалены на трубопроводах, принадлежащих непосредственно горелке, и на подволящих трубопроводах.

Во всех случаях штуцера располагают после последнего по ходу газа (воздуха) запорного или регулирующего органа.

Группу горелок допускается оснащать одним штуцером для измерения давления газа и одним штуцером для измерения давления воздуха.

Конструкция автоматических газовых горелок должна обеспечивать возможность измерения:

- давления газа за основным запорным органом и после последнего по ходу газа регулирующего органа горелки;
- давление воздуха после последнего по ходу воздуха регулирующего или запорного органа.

Измерение давления газа допускается заменять измерением расхода газа.

Конструкция блочных жидкотопливных горелок должна обеспечивать возможность измерения:

- давления подогретого жидкого топлива после последнего по ходу топлива регулирующего органа;
- температуры подогретого жидкого топлива, поступающего в сопло;
- давления жидкого топлива в обратной линии;
- дааления воздуха после последнего по ходу воздуха регулирующего или запорного органа.

Конструкция горелки должна предусматривать продувку камеры горения до открытия крана на трубопроводе подвода топлива, если продувка не обеспечена другим способом.

Для одиночно устаноаленных жидкотопливных автоматических горелок номинальной тепловой мощностью до 0,35 МВт перед пуском должна быть обеспечена продувка камеры горения (при открытом шибере на дымоходе):

- естественной вентиляцией, если воздушные заслонки фиксированы в рабочем положении,

- принудительной продувкой номинальным расходом воздуха длительностью не менее 5 с, если применяют воздушные заслонки с механическим упраалением.

Принудительную продувку можно заменить естественной вентиляцией камеры горения (с помощью естественной тяги) длительностью не менее 30 с.

Принудительная продувка не требуется при воздушных заслонках, управляемых тягой, при условии наличия в заслонках таких отверстий, что объем воздуха, проходящий через воздушную заслонку в закрытом положении, эквивалентен не менее 20 % максимального количества воздуха, подаваемого вентилятором.

Для одиночно установленных автоматических жидкотопливных горелок номинальной тепловой мощностью свыше 0,35 МВт количество продувочного воздуха должно быть не менее утроенного суммарного объема до входа в дымоход или пятикратного объема камеры горения агрегата.

Это условие считается удовлетворенным, если предварительная продувка производится в течение 15 с, а количество продувочного воздуха соответствует количеству воздуха при номинальной мощности горелки.

Требования экономного использования топлива

Газовые горелки при номинальной тепловой мощности должны обеспечивать коэффициент расхода воздуха, не превышающий значений, приведенных в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Коэффициент расхода воздуха в зависимости от класса горелки

Класс горелки по способу подачи воздуха и степени подготовки горючей смеси	Коэффициент расхода воздуха α
Горелки с принудительной подачей воздуха с полным предварительным смешением; инжекционные горелки с полным предварительным смешением, не более	1,05
Горелки с принудительной подачей воздуха с неполным предварительным смешением	От 1,05 до 1,15
Горелки с принудительной подачей воздуха без предварительного смешения; горелки с подачей воздуха за счет разрежения без предварительного смешения, не более	1,15

Это требование не распространяется на газовые запальные горелки и горелки, предназначенные для работы с переменными или повышенными коэффициентами расхода воздуха. При работе горелок в системах отопления тепловых агрегатов, предусматриваюших многостадийное (ступенчатое) сжигание топлива, значения коэффициентов расхода воздуха, указанные в табл. 2 5, следует относить к выходному сечению камеры горения теплового агрегата (за вычетом присосов).

Коэффициент расхода воздуха жилкотопливной горелки в зависимости от номинальной тепловой мощности горелки не должен превышать значений, приведенных на рис. 2.1.

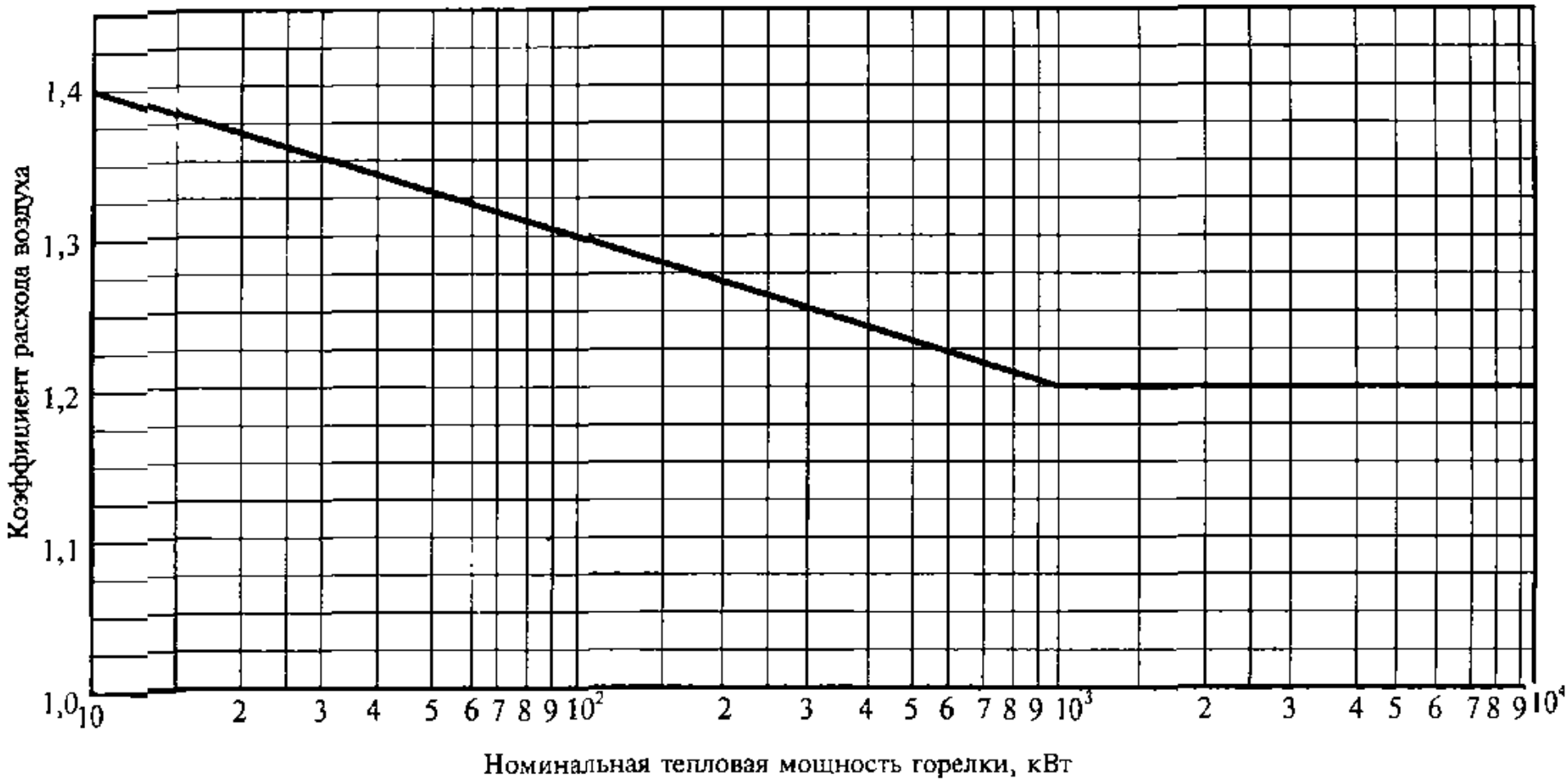


Рис. 2.1. Зависимость максимально допустимого коэффициента расхода воздуха от номинальной тепловой мощности жидкотопливной горелки

Допустимое увеличение коэффициента расхода воздуха в диапазоне рабочего регулирования мощности (за исключением пусковых режимов) не должно превышать 0,2.

Потери тепла от химической неполноты сгорания на выходе из камеры горения теплового агрегата или установки в диапазоне рабочего регулирования горелки не должны быть более 0,4 % для газовых горелок и не более 0,5 % для жидкотопливных горелок.

Сажевое число не должно превышать во всем диапазоне рабочего регулирования жидкотопливной горелки значение 3 по шкале Бахараха. У горелки с номинальной тепловой мощностью свыше 0,8 МВт и сжигании легкого жидкого топлива сажевое число не должно превышать 2.

Требования охраны окружающей среды

Содержание оксида углерода в продуктах сгорания в пересчете на сухие неразбавленные продукты сгорания (при $\alpha = 1{,}0$) не должно превышать значений, указанных в табл. 2.6 в диапазоне рабочего регулирования.

Таблица 2.6

Содержание оксида углерода в продуктах сгорания

Условия работы горелок	Место отбора проб	Температура продуктов сгорания, °С, не более	CO, % (объемн.) ($\alpha = 1$)
Тепловой агрегат (испытательный стенд)	На выходе из камеры горения	1400	0,05
Открытый воздух	В контрольном сечении за видимой длиной факела	1400	0,01

Содержание оксида углерода в продуктах сгорания для горелок, предназначенных для соответствующих котлов, — по ГОСТ 10617; ГОСТ 20548; ГОСТ 28193.

Предельные нормы концентраций оксида азота (NO_x) в продуктах сгорания для газогорелочных устройств, регламентированные стандартом ГОСТ 50591, приведены в табл. 2.7.

Соотношение между единицами измерения концентрации NO_x приведено в табл. 2.8.

Таблица 2.7

Предельные нормы концентраций NO_x в продуктах сгорания при стендовых испытаниях горелок (ГОСТ Р 505-91–93)

Тип горелочного устройства	Диапазон тепловой мощности, МВт	Степень экранирования камеры горения	Область применения горелок	Температура подогрева воздуха, °С	Предельная концентрация NO_x при $\alpha = 1{,}0$, мг/м³
1	2	3	4	5	6
Горелки для котлов:					
дутьевые (в том числе блочные), теплогенераторы, воздухонагреватели (кроме смесительных)	0,1–3,15	1,0	Котлы производительностью до 20 т/ч или до 16 МВт	Без подогрева	250
инжекционные среднего давления с полным предварительным смешением	0,1–1,6	1,0	Котлы производительностью до 10 т/ч или до 8 МВт	То же	230
Горелки промышленных печей:					
дутьевые:					
общего или специального назначения	0,07–2,0	0	Нагревательные и термические печи	"–"	205
	0,02–2,3	0	Обжиговые печи	"–"	255
	0,3–2,0	0	Стекловаренные печи прямого нагрева	"–"	375
скоростные	0,04–3,0	0	Нагревательные и термические печи	"–"	200
радиационные и плоскопламенные	0,08–0,8	0	То же	"–"	240
инжекционные:					
общего назначения с полным предварительным смешением	0,01–0,25	0	"–"	"–"	290
специального назначения	0,15–1,7	0	Трубчатые печи	"–"	225
Радиационные трубы всех типов	0,012–0,15	–	Печи для термической и химико-термической обработки металла	"–"	410
Горелки для внепечного нагрева:					
дутьевые с частичным предварительным смешением	0,01–0,1	–	Установки внепечного нагрева	Без подогрева	240
инжекционные с частичным предварительным смешением	0,14–0,35	–	То же	То же	300

Таблица 2.8

Соотношение между единицами измерения концентрации NO_x*

Единица измерения	мг/м³	% объемн.	ppm	мг/кВт ч	кг/ГДж**
мг/м³	1	$0{,}487\ 10^{-4}$	0,487	0,862	$2{,}394 \cdot 10^{-4}$
% объемн.	$2{,}054 \cdot 10^{4}$	1	$1\ 10^{4}$	$1{,}77 \cdot 10^{4}$	4,916
ppm	2,054	$1 \cdot 10^{4}$	1	1,77	$4{,}916 \cdot 10^{-4}$
мг/кВт·ч	1,16	$0{,}565 \cdot 10^{-4}$	0,565	1	$2{,}777\ 10^{-4}$
кг/ГДж	4177	0,23	2030	3601	1

* В пересчете на NO_2

** Отнесено к внесенному с газом теплу. Газ — природный, теплота сгорания 35 МДж/м³, $\alpha = 1{,}0$.

Требования надежности

Средний ресурс горелок до капитального ремонта (для ремонтируемых горелок) и до списания (для неремонтируемых горелок) должен быть по жаростойкости не менее 18000 ч. Указанный ресурс не распространяется на быстроизнашиваемые элементы, автоматику горелки, а также на детали из огнеупорной керамики.

Электрические элементы автоматики должны в условиях, близких к эксплуатационным, при питающем напряжении, равном 110 % номинального значения, выдерживать не менее 100000 циклов включения и выключения.

Вероятность безотказной работы устройства контроля пламени — не менее 0,92 за 2000 ч.

Глава 3. ДИФФУЗИОННЫЕ ГОРЕЛКИ

Особенностью диффузионных горелок является наличие в их конструкции элементов только для подвода газа и истечения газа из выходных отверстий. Для горения газа используется воздух, который либо подсасывается в агрегат через неплотности конструкций, либо нагнетается в печной объем с технологической целью. Наиболее характерными примерами таких горелочных устройств являются горелки для вращающихся трубчатых и шахтных печей, горнов обжиговых конвейерных машин.

В связи с тем, что при организации сжигания топлива практически исключается возможность воздействовать на режим течения воздуха в месте его контакта с топливом, в конструкциях горелок предусматриваются максимальные возможности по изменению режима истечения газа. Для этой цели применяются различные завихрители, профилированные сопла, подвижные дроссели и т.п.

Для повышения кинетической энергии газовых струй, увеличения глубины проникновения их в воздушный низкоскоростной поток иногда применяется частичная добавка в горелку первичного воздуха.

3.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ И СВОБОДНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ФАКЕЛОВ

Диффузионный факел в промышленных печах и топках развивается в сложных условиях при взаимодействии с обрабатываемым материалом, стенками рабочего пространства и при наличии спутных или сносящих течений газов.

При малом стеснении горящих струй стенками топочного объема и малых скоростях движения печных газов такие струи условно можно считать свободно горящими. На начальных участках горящей струи, там, где еще не произошло воспламенение, закономерности изменения характеристик течения близки к закономерностям изменения характеристик свободных изотермических струй.

3.1.1. Свободные изотермические струи

Основные параметры струи, такие как изменение скорости по оси и в конечном сечении ее, подсос окружающей среды, зависят от профиля проточной части сопла, из которого происходит истечение газа.

Чем неравномернее поле скоростей в выходном сечении сопла (чем больше угол сужения сопла), тем больше полное и меньше статическое давление и тем больше максимальный динамический напор и скорость по оси струи [1]. При этом максимальный динамический напор на оси струи численно равен полному даалению перед соплом:

$$h_{max} = p_n . \quad (3.1)$$

Это позволяет определить максимальную скорость в струе, зная полное даление перед соплом.

$$\omega_{max} = \sqrt{\frac{2gh_{max}}{\rho}} = \sqrt{\frac{2gp_n}{\rho}} . \quad (3.2)$$

При истечении из сопел одного и того же диаметра, но различного профиля при одинаковой начальной массе струи наблюдаются различные динамические напоры и скорости в различных точках объема струи (как по оси, так и в поперечных сечениях) и струи имеют различные границы.

Если же измерять в этих струях динамический напор в долях от максимального динамического напора, а расстояние от сопла в калибрах эквивалентного сопла, тогда распределение динамического напора по оси всех струй (вытекающих из сопел различного профиля) оказывается одинаковым.

Аналогично, если измерить скорость в долях от максимальной скорости в струе, а расстояние в калибрах эквивалентного сопла, оказывается одинаковым во всех струях и изменение скорости по оси струи (рис. 3.1).

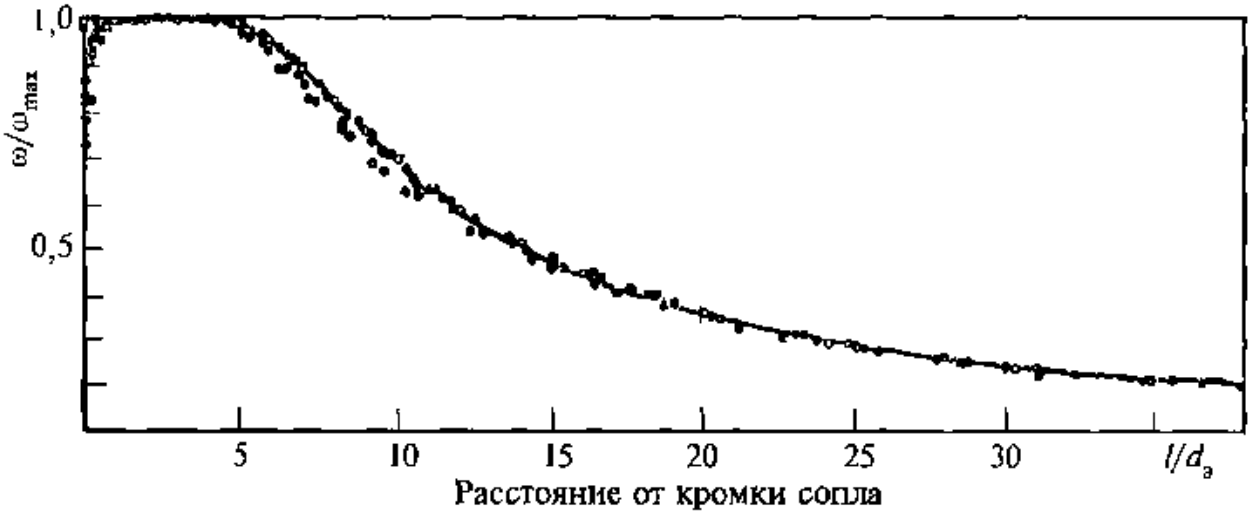


Рис. 3.1. Изменение скорости по оси струи [1]

Эквивалентный диаметр определяется как диаметр условного сопла, нужного для пропуска через него начальной массы струи с постоянной скоростью в выходном сечении сопла, равной по величине максимальной скорости в струе, вытекающей из данного сопла. В соответствии с этим определяется диаметр сопла, эквивалентного данному соплу диаметром d_0,

$$d_э = d_0\sqrt{\frac{\bar{\omega}_0}{\omega_{max}}} = d_0\sqrt{\frac{h_{\bar{\omega}_0}}{h_{max}}} . \quad (3.3)$$

Расчет основных параметров струи выполняется в следующей последовательности По известному профилю сопла, принятому по тем или иным соображениям, пользуясь справочником по гидравлическим сопротивлениям, определяют суммарный коэффициент сопротивления сопла ξ и по нему находят коэффициент расхода сопла по формуле

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\xi}}. \qquad (3.4)$$

Эквивалентный диаметр сопла определяется по выражению

$$d_э = d_0\sqrt{\varphi}\,. \qquad (3.5)$$

По заданному давлению перед соплом и найденному коэффициенту расхода определяют среднюю скорость истечения и необходимый диаметр сопла для заданного расхода через него. Затем, зная полное давление перед соплом, определяют максимальную скорость истечения по формуле (3.2).

Изменение на оси струи динамического напора определяется по формуле

$$h_{oc}/h_{max} = 48{,}4\Big/\left(\frac{L}{d_э}\right)^2, \qquad (3.6)$$

а скорости на основном участке по формуле

$$\omega_{oc}/\omega_{max} = 6{,}95\Big/\left(\frac{L}{d_э}\right). \qquad (3.7)$$

Угол раскрытия струи на начальном и переходном участках можно считать равным $2\alpha = 21°30'$, а на основном — $2\alpha = 27°$.

Подсос окружающего воздуха в струю на длине начального и переходного участка (до $L = 10d_э$) определяется по выражению

$$G = \left(1 + 0{,}21\,L/d_э\right) G_0\sqrt{\rho_\infty/\rho_0}, \qquad (3.8)$$

а на основном участке для сечений, расположенных на расстоянии от сопла более $10d_э$, по уравнению

$$G = \left(0{,}31\,L/d_э\right) G_0\sqrt{\rho_\infty/\rho_0}, \qquad (3.9)$$

где G_0 — начальная масса струи; ρ_0 — плотность газа, вытекающего из сопла; ρ_∞ — плотность окружающей среды.

Угол раскрытия изотермической затопленной струи и ее инжектирующая способность зависят также от степени закручивания вытекающего потока.

Для горелок ВРГ эти зависимости, полученные экспериментальным путем [2] при продувке их воздухом, представлены на рис. 3.2. Интенсивность крутки потока n определена в зависимости от угла поворота лопаток завихрителя β и конструктивных параметров горелки по формуле [3]

$$n = \frac{8d_2}{3\pi}\cdot\frac{d_2^3 - d_1^3}{\left(d_2^2 - d_1^2\right)^2}\,\mathrm{tg}\beta, \qquad (3.10)$$

где d_1 — внутренний диаметр головки горелки; d_2 — диаметр дросселя в месте установки завихрителя.

С увеличением интенсивности крутки потока на выходе из сопла увеличивается и угол раскрытия струи, и относительная масса струи в ее сечениях.

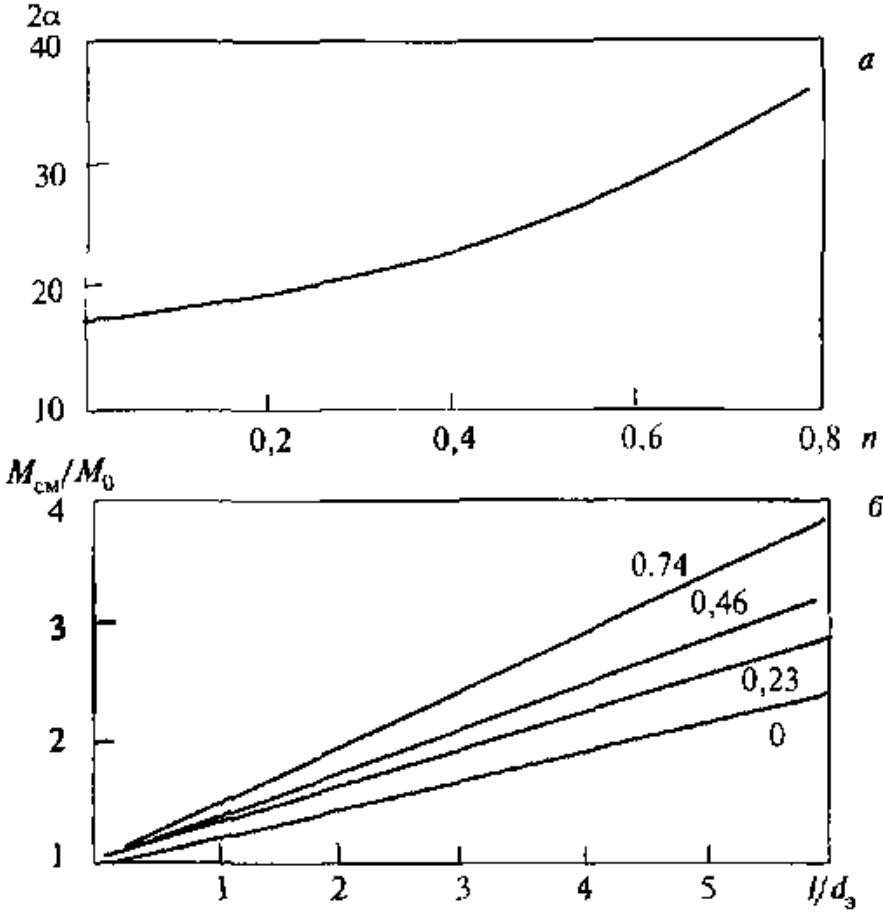


Рис. 3.2. Характеристики закрученной изотермической струи:
а – зависимость угла раскрытия от интенсивности крутки, *б* – зависимость относительной массы по длине струи от параметра крутки (указано цифрой на кривой)

3.1.2. Горящие струи газа

При воспламенении газа характер изменения основных параметров по длине струи сохраняется, но количественные характеристики существенно изменяются.

Изменение характеристик зависит от состава топлива и его теплоты сгорания, скорости истечения, ориентации факела в пространстве.

При сжигании газа с низкой теплотой сгорания (5200 кДж/м^3) угол раскрытия струи на длине $L/d = 20$ уменьшается до 14°; снижается подсос воздуха в струю. Характер изменения температуры, динамического напора и концентраций газов в факеле показан на рис. 3.3 [4]. При одинаковом расстоянии от сопла в струю подсасывается тем больше воздуха и горение протекает тем полнее, чем больше начальная неравномерность скоростного поля на выходе из сопла.

Если измерять расстояние от сопла в диаметрах эквивалентной струи, то это различие в величине подсоса воздуха и в химическом недожоге уменьшается. По подсосу воздуха различие становится настолько малым, что приближенно можно считать изменение среднего коэффициента расхода воздуха во всех струях одинаковым по длине (рис. 3.4).

Подсос воздуха в горящую струю генераторного газа примерно в четыре раза меньше, чем в изотермическую.

Характеристики свободного диффузионного факела природного газа

также зависят от формы сопел, режима истечения, и они существенно отличаются от характеристик факела низкокалорийного газа.

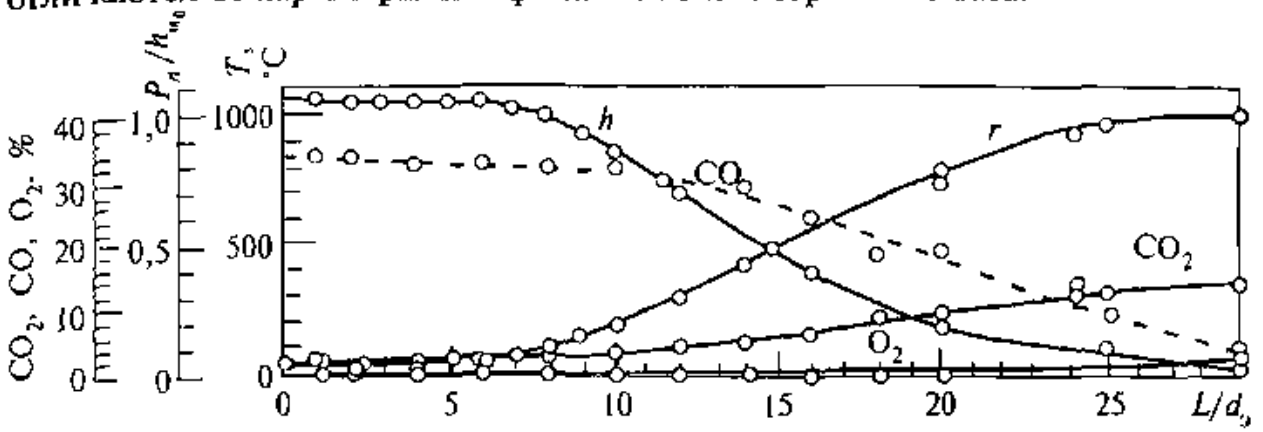


Рис 3 3. Изменение динамического напора h, температуры T и концентрации газов CO_2, CO и O_2 по оси горящей струи генераторного газа [4] (d_0 = 50 мм, $Q_н^р$ = = 5200 кДж/м^3)

Основные геометрические характеристики факела при различном направлении его развития показаны на рис. 3.5.

При малых скоростях истечения газа из сопла воспламенение происходит непосредственно в месте контакта вытекающей струи с воздухом. При увеличении скорости истечения газа наблюдается отрыв фронта воспламенения от сопла. Длина негорящего участка $x_н$ очень чувствительна к изменению режима истечения, и она соизмерима с зоной начала интенсивной турбулизации $x_т$.

Угол раскрытия горящей струи природного газа в окружающем воздухе близок к углу раскрытия затопленной струи (примерно 27°]5]).

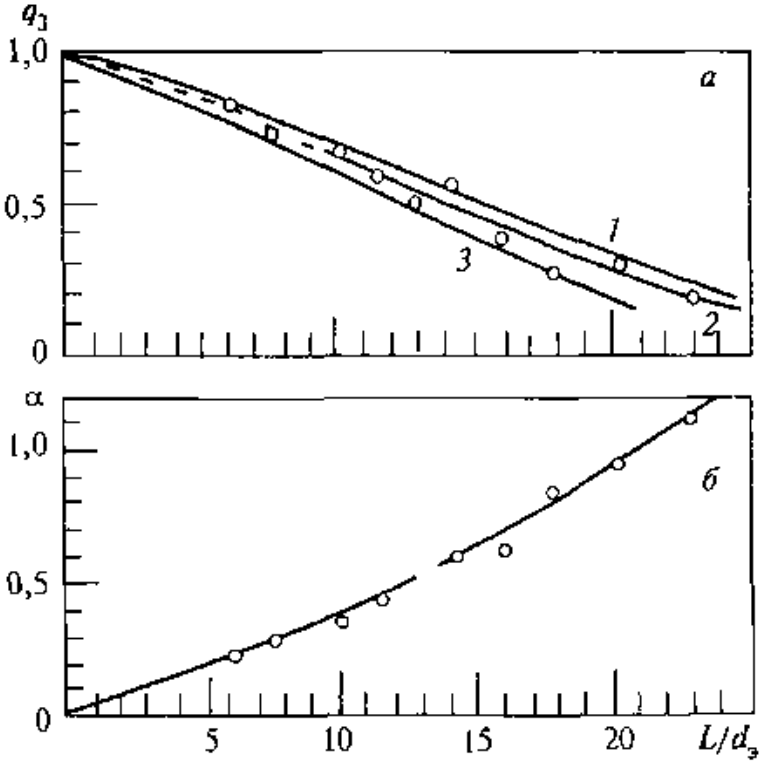


Рис 3.4. Изменение по длине факела генераторного газа среднего по сечению химического недожога (*а*) и коэффициента расхода воздуха (*б*): *1* – d_0 = 50 мм, ω = 17,4 м/с, профиль Витошинского; *2* – то же, коническое сопло с углом при вершине 90°, *3* – сопло с отверстием в плоской стенке, ω = 10,4 м/с

Границы факела можно считать прямолинейными до тех пор, пока диаметр факела не достигнет своего максимального значения D_{max}.

При горизонтальном расположении факела он характеризуется дальнобойностью, которая определяет его длину с учетом деформации под действием подъемных сил.

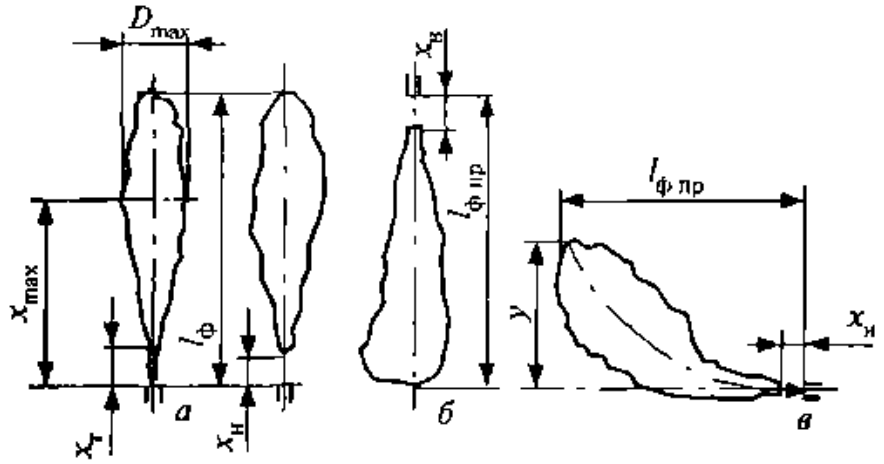


Рис. 3 5 Геометрические параметры факела, направленного.
а – вертикально вверх; *б* – вертикально вниз; *в* – горизонтально; $l_ф$ – полная длина факела; $l_{ф\,пр}$ – продольнал координата факела (дальнобойность), $x_н$ – неторящий участок; $x_т$ – расстояние до начала турбулизации, D_{max} – максимальная ширина; x_{max} – расстояние до максимальной ширины; y – отклонение факела от оси

Отрыв факела от сопла происходит при любом направлении его движения. Причем чем больше диаметр сопла, тем больше допустимы скорости истечения, при которых наблюдается горение без отрыва (рис.3.6).

Отрыв от сопла горизонтального факела и направленного вертикально вверх происходит при скоростях истечения газа порядка 25 м/с (Re_0 = = 5680), а для факела, направленного вниз, – 50 м/с (Re_0 = 11360) (рис. 3.7).

Эту разницу можно объяснить действием подъемной силы, которая либо способствует отрыву в случае истечения факела вверх или горизонтально, либо, наоборот, препятствует ему при направлении факела вниз.

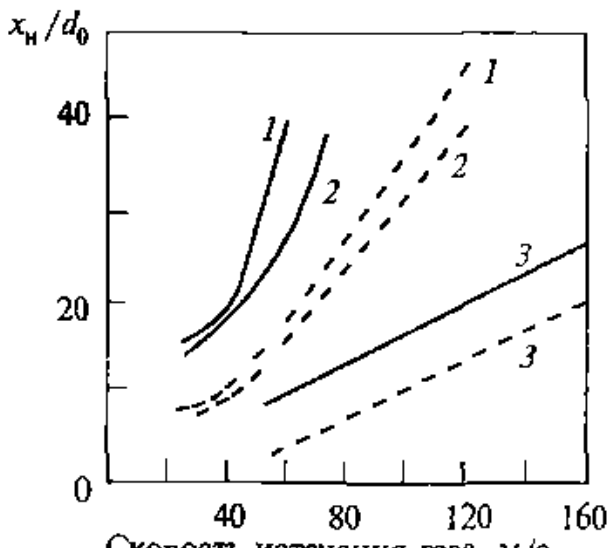


Рис. 3.6. Зависимость величины отрыва факела от сопла $x_н/d_0$ от скорости истечения газа: *1* – направление факела вверх, *2* – горизонтальное направление; *3* – направление вниз (сплошные линии – d_0 = 4 мм; пунктирные – 7 мм)

Основными параметрами, характеризующими размеры факела, являются также его полная длина, объем, зона интенсивного горения и стехиометрическая длина. Численная величина этих параметров изменяется в зависимости от состава газа, режима истечения, условий перемешивания, температурного режима, а также от положения факела в пространстве. Полная длина факела $l_ф$ – это расстояние по оси струи от выходного отверстия горелки до максимально удаленной точки на ней, определенной по кривой выгорания, по огневому свечению, визуальным ияи фотографическим методами. Стехиометрическая длина и длина ин-



Рис 3.7. Изменение геометрических характеристик факела природного газа в зависимости от скорости истечения из сопла и направления факела:
а – вертикально вверх, *б* – горизонтально; *в* – вертикально вниз, *1* – $l_ф/d_0$; *2* – x_{max}/d_0; *3* – D_{max}/d_0, *4* – $l_{ф\ пр}/d_0$, *5* – y/d_0

тенсивного горения — часть полной длины факела, определенной по расстоянию от выходного отверстия до точки на оси, в которой соответственно коэффициент расхода воздуха $\alpha = 1$ или температура факела максимальная.

С ростом скорости истечения газа из сопла (ω_0) длина диффузионного газового факела увеличивается. Однако нет пропорциональной зависимости между притоком топлива, с одной стороны, и турбулизацией потока и подсоса окислителя, с другой стороны. Например, для полного горения 1 м^3 природного газа необходимо около 9,5 м^3 воздуха, который должен поступить в факел за счет турбулентного захвата. Оказывается, что энергии потока газа для этого не хватает и поступление окислителя растягивается во времени. Здесь же можно отметить уменьшение подсоса факела за счет увеличения начального диаметра (d_0) газового потока, кинематической вязкости исходного топлива и продуктов сгорания.

В диффузионном факеле природного газа участки с максимальной температурой и коэффициентом расхода воздуха $\alpha = 1{,}0$ на оси не совпадают. Стехиометрическая длина высокотурбулентного факела больше на 5–15 % длины интенсивного горения. Полная длина высокотурбулентного факела природного газа в 1,4–1,7 раза больше его стехиометрической длины, и она увеличивается с ростом скорости истечения и расхода газа независимо от направления его в пространстве. При прочих равных условиях наиболее короткий факел наблюдается при горизонтальном истечении газа.

Подъемные силы, действующие на факел, существенно влияют на его геометрические размеры. Отклонение, например, горизонтального факела от оси с ростом скорости истечения уменьшается, но полностью не исчезает (рис. 3.7, *б*). Заметное ослабление действия подъемных сил происходит при истечении газа со скоростью $\omega_0 \geq 0{,}35\omega_{кр}$. Это соответствует числу подобия Фруда $Fr_ф = \omega_0^2/gd_0$, равному $2{,}5–4{,}5 \cdot 10^6$.

Полную длину свободного факела природного газа независимо от направления распространения его в пространстве можно определить для скорости истечения $\omega_0 \geq 0{,}15\ \omega_0^{кр}$ по формуле [5]

$$l_ф/d_0 = 58{,}8(\omega_0^2/gd_0)^{0{,}104}, \qquad (3.11)$$

для скорости истечения $\omega_0 < 0{,}15\omega_0^{кр}$ по формуле [5]

$$l_ф/d_0 = 15(\omega_0^2/gd_0)^{0,26}. \quad (3.12)$$

Структура диффузионного факела природного газа при существенно различных скоростях истечения показана на рис. 3.8.

Высокоскоростной факел активно подсасывает окружающий воздух, создавая на участке вблизи сопла зону с повышенным содержанием кислорода. В низкоскоростном факеле в этой зоне идут более интенсивно процессы разложения. Об этом свидетельствует быстрое нарастание содержания CO и H_2 и замедление изменения коэффициента расхода воздуха на оси по длине факела. В высокоскоростном факеле отмечается значительный рост

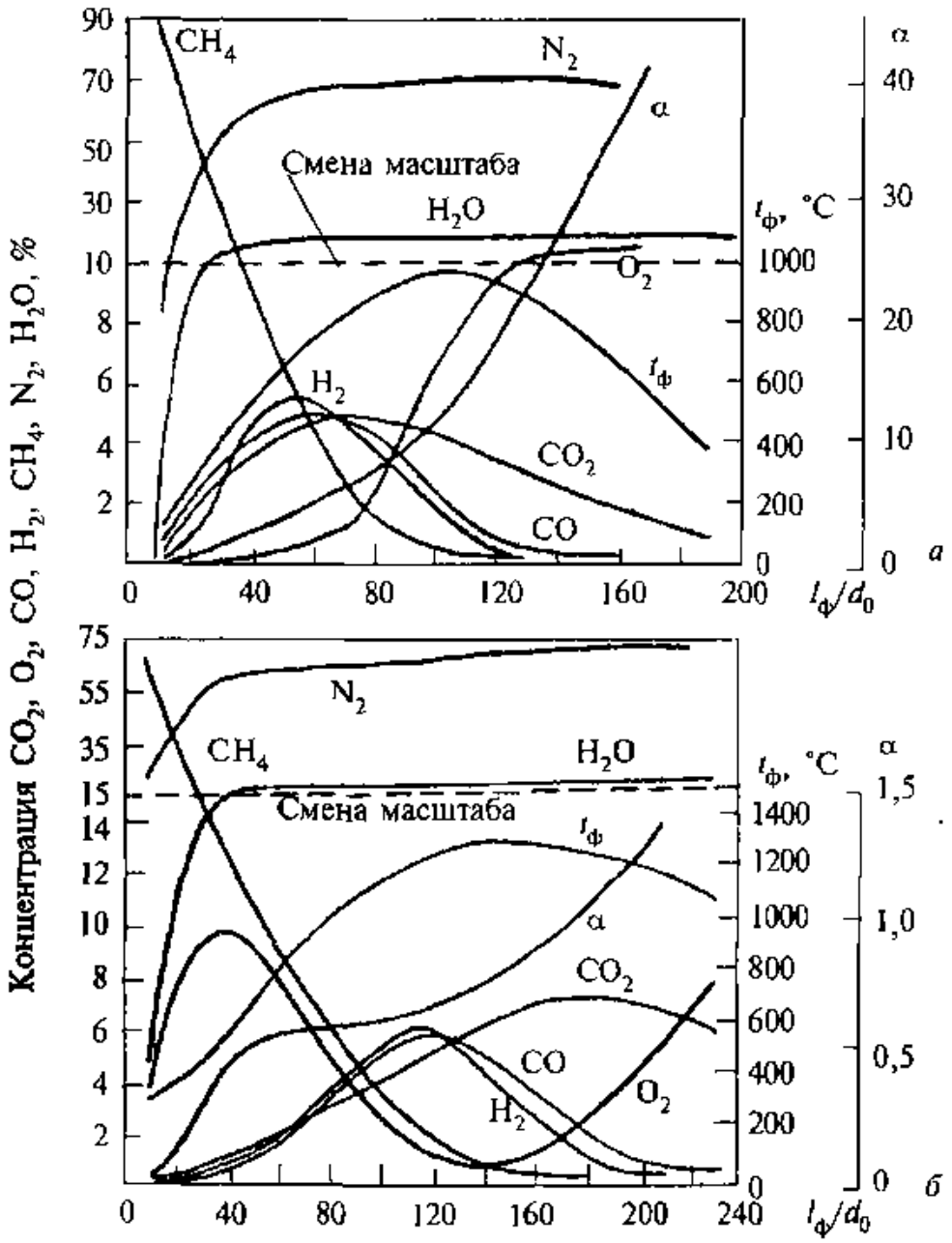


Рис. 3.8. Изменение концентрации CO_2, O_2, CO, H_2, CH_4, N_2, H_2O, температуры ($t_ф$) и коэффициента расхода воздуха (α) по оси факела природного газа, направленного вверх:
а – ω_0 = 16,5 м/с; $Re_0 = 3{,}750 \cdot 10^3$; *б* – ω_0 = 194,4 м/с; $Re_0 = 4{,}418 \cdot 10^4$

коэффициента α на участке вблизи сопла ($50d_0$) с последующим замедлением в области интенсивного горения. Интенсивное горение распространяется по всему объему, при этом максимальная температура соответствует оси факела. Горение как по оси, так и в поперечных сечениях не заканчивается при коэффициенте $\alpha = 1{,}0$ и химический недожог в этих точках равен 15—35 %.

Зона активного разложения газа, имеющая максимальные концентрации CO и H_2 и минимальное содержание кислорода, соответствует коэффициенту $\alpha = 0{,}7-0{,}8$. Стехиометрическая поверхность несколько шире, и она дальше удалена от оси к границе факела, чем поверхность интенсивного горения.

Локальный химический недожог (q_3), безразмерная концентрация исходного топлива (C), воздушный фактор $\beta = 1/\alpha$ изменяются в сечениях факела по универсальной кривой, описываемой выражением:

$$N/N_m = exp a(y/y_{0,5N_m})^n, \qquad (3.13)$$

где N/N_m — отношение, соответствующее величинам q_3/q_{3_m}; C/C_m; β/β_m; N — параметр в произвольной точке поперечного сечения; N_m — то же, на оси факела; a — коэффициент, изменяющийся в пределах от 0,690 до 0,693; n — показатель степени, равный 2,0÷2,12; y — текущая координата точки в поперечном сечении факела; $y_{0,5N_m}$ — координата точки, в которой значение параметра равно половине этой величины на оси факела.

Безразмерная концентрация топлива определяется по выражению

$$C = 1/(1 + \alpha L_0 \theta_p), \qquad (3.14)$$

где L_0 — расход воздуха, теоретически необходимый для полного сжигания газа, $\theta_p = \rho_в / \rho_г$ — показатель начальной неравной плотности воздуха и газа.

В поперечных сечениях высокоскоростных факелов отмечается универсальная зависимость в изменении динамических напоров, подчиняющихся выражению

$$h/h_m = \exp -1{,}386(y/y_{0,5h_m})^{1,71}, \qquad (3.15)$$

Соотношение общей длины факела и стехиометрической выражается зависимостью $l_ф = (1{,}6 \div 1{,}8) l_{ст}$, причем чем больше скорость истечения газа, тем меньше значение коэффициента.

Теплонапряжение в факеле природного газа непрерывно изменяется почти во всем диапазоне скоростей истечения газа. В факеле с ламинарными признаками горения теплонапряжение достигает сравнительно высоких численных значений порядка $16{,}3 \cdot 10^6$ Вт/м^3 с заметным снижением в переходной области. В области скоростей истечения 15—30 м/с теплонапряжение практически остается постоянным на уровне $2{,}91 \cdot 10^6$ Вт/м^3. Эта наименьшая величина его соответствовала моменту отрыва факела от сопла. В турбулентном факеле теплонапряжение постоянно увеличивается с ростом скорости истечения и при $\omega_0 = 230$ м/с достигает величины $20 \cdot 10^6$ Вт/м^3 [6].

Характер выгорания высококалорийного газа (пропан-бутановая смесь) показан на рис 3.9 [4]. Истечение газа с теплотой сгорания около 100 МДж/м^3 производилось при скорости около 40 — 50 м/с из сопла диаметром 13,78 мм.

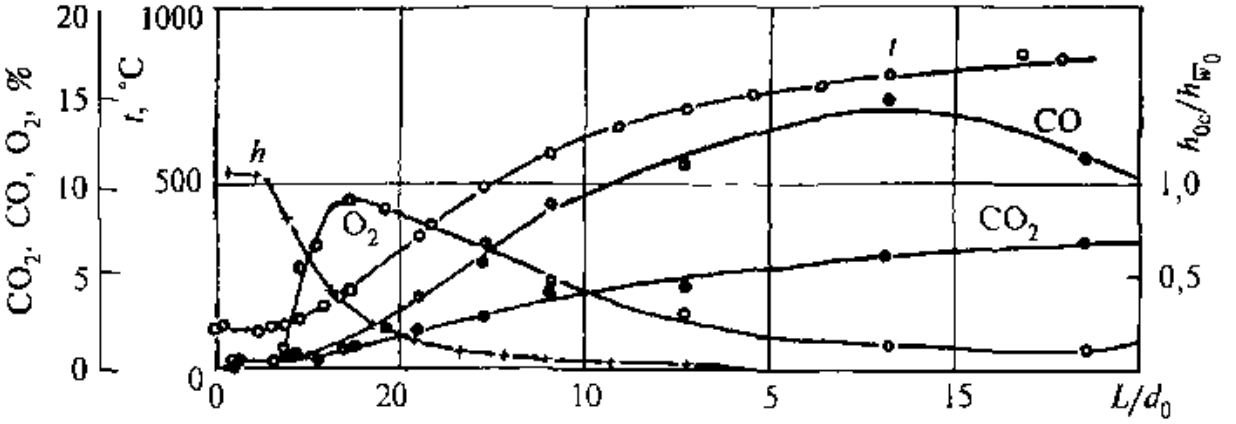


Рис. 3.9. Изменение динамического напора h, температуры t и концентрации CO_2, CO и O_2 по оси горящей струи пропан-бутанового газа

Внутреннее строение горящей струи пропан-бутанового газа характеризуется резким повышением содержания кислорода на оси струи в начале ее (до 9–12 %) при малом повышении содержания продуктов сгорания. В дальнейшем, по мере удаления от сопла, содержание кислорода уменьшается, а концентрация продуктов сгорания возрастает, при этом концентрация продуктов неполного сгорания (CO) приблизительно в 2 раза больше концентрации продуктов полного сгорания (CO_2), что свидетельствует о преобладании реакций неполного сгорания и разложения газа в начале струи.

В рабочем объеме печи или топки приведенные характеристики факела, особенно его длина, будут несколько изменяться в зависимости от свойств окружающей среды. Однако общие закономерности развития факела на участке вблизи газового сопла сохраняются, и их можно использовать для прогнозирования поведения факела в топочном пространстве.

3.1.3. Горящие струи при частичном ограничении потока смесительным устройством

В ряде тепловых агрегатов струи топлива развиваются при частичном стеснении потока на его начальном участке смесительными устройствами, выполненными в виде цилиндрических каналов. К такого рода агрегатам относятся, например, мартеновские печи, у которых применяются кессоны (рис. 3.10). Конструктивные характеристики таких устройств приведены в табл. 3.1.

Основные закономерности развития факела природного газа исследовали при истечении газа из сопла диаметром 4 мм при скорости истечения от 10 до 220 м/с и наличии смесителей с диаметром входного отверстия от 40 до 98 мм [6, 7]. При экспериментах определяли влияние основных геометрических параметров, обозначенных на рис. 3.11, на характеристики факела.

При диаметре проходного отверстия смесителя 40 мм происходило существенное стеснение развития факела, обуславливая при этом даже отрыв его от края смесителя. Такой факел был неустойчивый. Фронт его воспламенения не совпадал с выходной кромкой отверстия насадки, а горение сопровождалось частыми, но не очень сильными хлопками.

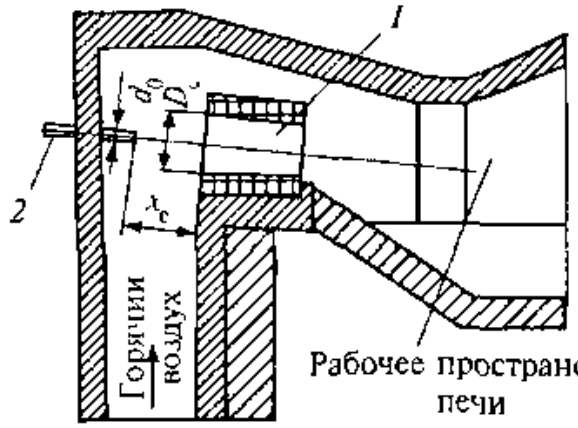


Рис. 3.10. Общий вид мартеновской печи со смесительным кессоном:
1 – смесительное устройство — кессон,
2 – горелка или форсунка

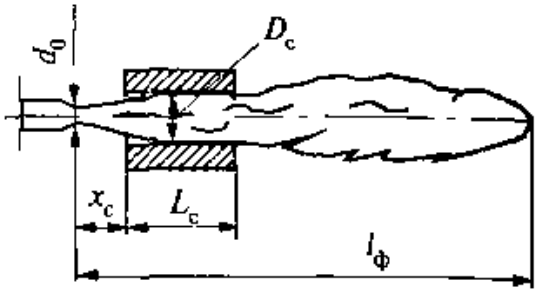


Рис. 3.11. Схема развития факела при частичном ограничении потока смесительным устройством

Таблица 3.1

Основные конструктивные параметры смесительных устройств некоторых мартеновских печей

Заводы	Тоннаж печи, т	Абсолютные размеры, мм				Относительные размеры		
		длина L_c	диаметр горелки d_0	диаметр кессона D_c	расстояние до кессона x_c	L_c/D_c	D_c/d_0	x_c/d_0
Серовский мет. завод	26	1250	45	610	650	2,05	13,55	14,45
То же	26	1300	180*	611	650	2,13	3,4	3,6
"–"	180	1960	97	607	900	3,23	6,26	9,28
Ижорский завод	75	1145	40	607	700	1,89	15,2	17,5
Верх-Исетский завод	120	2000	54	607	750÷850	3,29	11,25	12,95÷15,75
Нижнетагильский мет комбинат	400	1750	77	668	900	2,62	8,68	11,70

* С реформатором.

При максимальном внутреннем диаметре смесителя $D_c^{max} = 98$ мм факел своими видимыми границами уже не касался внутренней поверхности смесителя, но смесительное устройство с цилиндрическим отверстием изменяет полную длину факела, увеличивая или уменьшая ее. До скорости истечения газа из сопла, равной 20 м/с, смеситель, независимо от его параметров, удлиняет факел, препятствуя подсосу окружающего воздуха.

Подобно свободному факелу, полная длина при установке смесителя непрерывно увеличивается с ростом скорости истечения (рис. 3.12).

При высоких скоростях истечения газа длина факела со смесителем определяется параметрами и его положением относительно среза сопла.

В сравнении с длиной свободного факела короткие смесители с $L_c/D_c = 1{,}8 \div 2{,}8$ способствуют его укорачиванию. Увеличение размера L_c/D_c вызывает удлинение факела. При этом минимальная длина его соответствует значениям $x_c/d_c = 0$ независимо от других параметров смесителя. Удале-

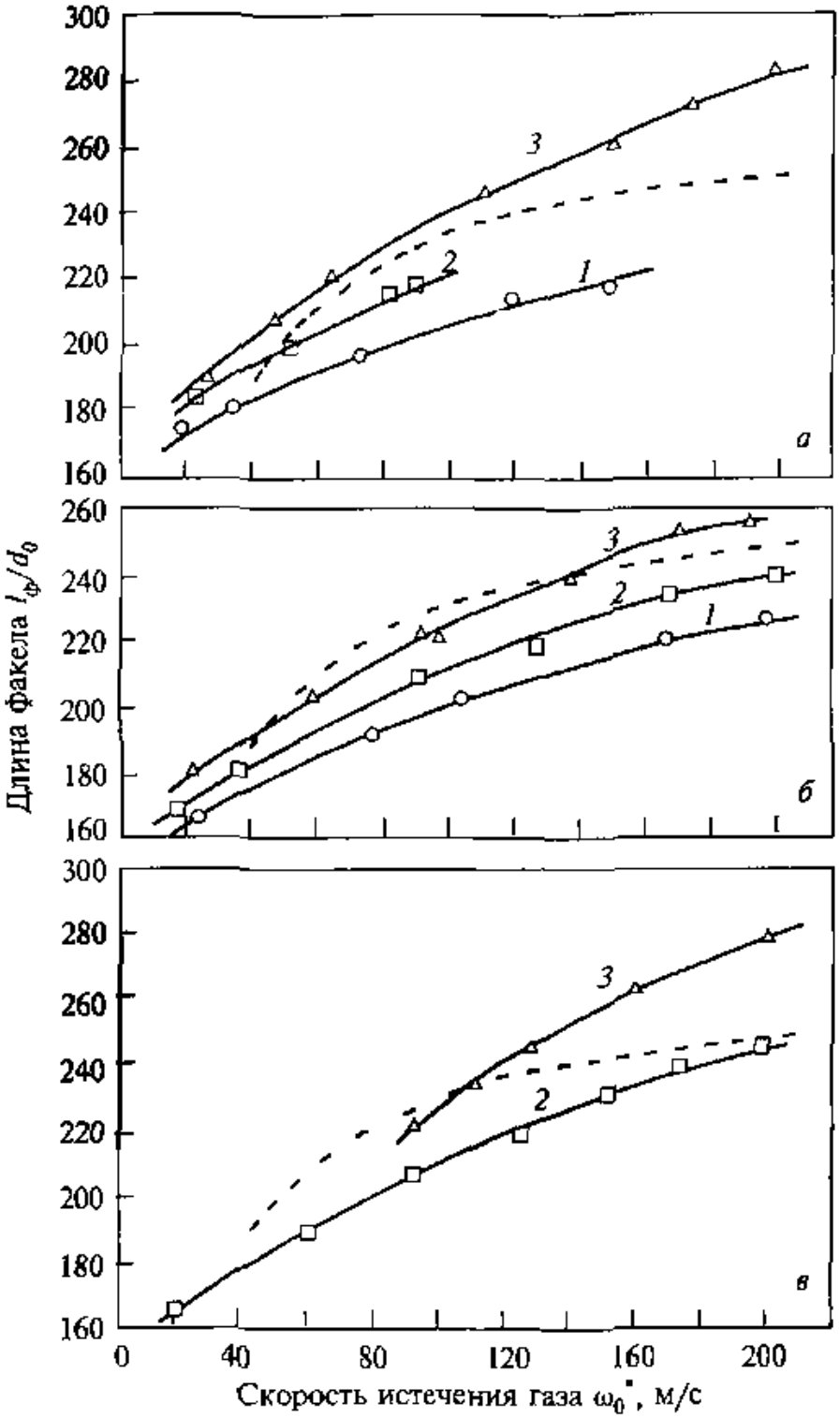


Рис 3.12. Изменение длины факела, частично ограниченного смесительным устройством длиной 110 мм, в зависимости от скорости истечения газа:
а – диаметр смесителя $D_c = 40$ мм, *б* – $D_c = 50$ мм; *в* – $D_c = 60$ мм; *1* – $x_c/d_0 = 0$, *2* – $x_c/d_0 = 17{,}5$; *3* – $x_c/d_0 = 32{,}5$

ние насадки от сопла также удлиняет факел, причем изменение величины x_c/d_c оказывает более существенное влияние на длину факела, чем изменение L_c смесителя. Диаметр отверстия смесителя оказывает сравнительно меньшее воздействие на длину факела чем параметры L_c и x_c.

В случае, когда смеситель удален от сопла на расстояние, при котором

входное его отверстие полностью перекрыто аэродинамическими границами горящей струи, длина факела со смесителем увеличивается до значений, превышающих длину свободного факела.

Поле динамического напора в поперечном сечении факела со смесителем становится более выравненным. Удаление и удлинение смесителя, а также увеличение диаметра его проходного отверстия способствуют выравниванию профиля динамического напора в сечении. Вследствие этого поля динамических напоров в относительных координатах не подчиняются универсальной закономерности и, не подобны профилю свободно горящей струи.

Аэродинамический угол раскрытия факела со смесителем (2α), определенный непосредственным измерением динамического напора, оказался равным 25°, что существенно меньше его значения для свободно горящей струи (37°) и соответствует приблизительно углу раскрытия свободной изотермической струи. Угол раскрытия, определенный по видимым границам, равен 11° вместо 19° для свободного факела.

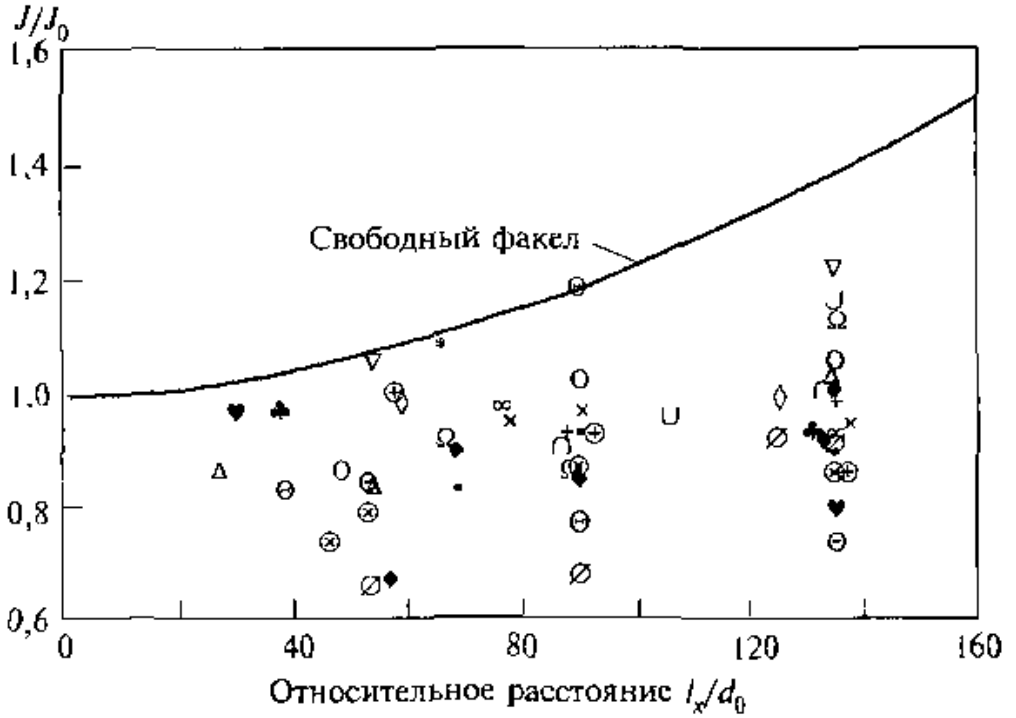


Рис. 3.13. Изменение количества движения секундной массы газа J/J_0 в факеле после смесителя при различных соотношениях геометрических параметров

D_c	L_c	x_c	Обозначение J/J_0 на рис. 3.13	D_c	L_c	x_c	Обозначение J/J_0 на рис. 3.13
40	60	40	Δ	60	180	80	♦
60	60	90	⊖	60	180	120	×
60	60	120	⊗	60	180	160	+
60	60	160	⊕	60	260	0	*
60	110	0	∅	60	260	40	∞
60	110	40	▽	90	180	80	Ω
60	110	80	O	90	180	160	∩
60	110	120	◊	90	180	240	∪
60	110	160	•				

Смеситель несколько уменьшает количество секундной массы в факеле (рис. 3.13) за счет потери части скоростного напора на соударение и трение газового потока о его стенки, а также уменьшение движущейся массы, вызванное ударом горящей струи в кромку входного отверстия (рис. 3.14). Кроме того, благодаря лучшей направленности факела со смесителем на его аэродинамике в меньшей степени сказывается влияние подъемных сил.

Динамический напор по оси факела, соответствующий сечению выходного отверстия смесителя, несколько меньше его значений в свободном факеле в равноудаленной от сопла точке. Снижение его величины существенно обусловлено частичной потерей импульса с выравниванием полей скоростного напора в поперечных сечениях.

Удаление смесителя от сопла и увеличение его длины обуславливают некоторый рост дальнобойности факела. При этом изменение диаметра проходного отверстия смесителя не оказывает заметного влияния на изменение по оси динамического напора.

Отмечено, что при $L_c/D_c \geq 3$ факел со смесителем дальнобойнее свободного вследствие изменения характера затухания динамического напора. На оси факела вблизи выходного отверстия смесителя появляются участки, где динамический напор остается практически постоянным.

Максимальные температуры факела со смесителем на 50÷70 °С выше их значений в свободном факеле. Установлено, что наибольшие величины максимальных температур соответствуют смесителю, имеющему относи-

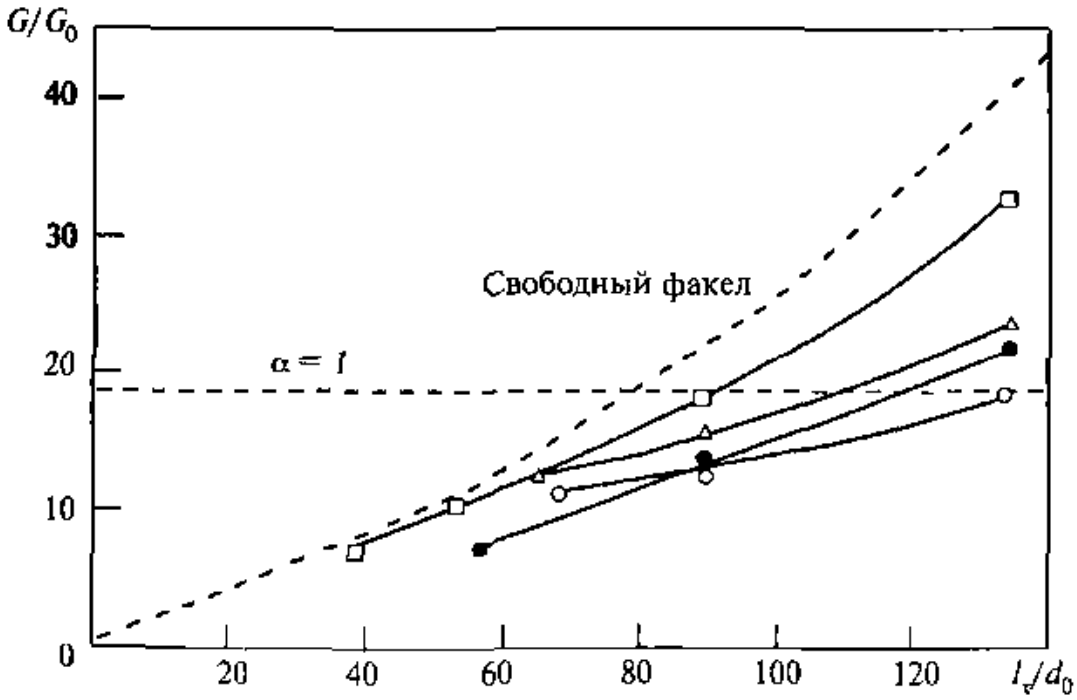


Рис. 3.14. Изменение относительного расхода секундной массы газа в факеле со смесителем

D_c	L_c	x_c	Обозначение G/G_0 на рис. 3.14	D_c	L_c	x_c	Обозначение G/G_0 на рис 3 14
60	110	40	□	60	180	80	○
60	180	40	●	90	180	80	△

тельную длину $L_c/D_c = 2+3$. Было также отмечено, что насадке диаметром $D_c/d_0 = 15$ соответствует более высокий уровень значений максимальных температур, который сохраняется при изменении x_c/d_0 от 0 до 40. Смеситель с указанными параметрами необходимо считать за оптимальный по температурному режиму.

Длина интенсивного горения факела $l_{и.г}/d_0$ со смесителем больше, чем у свободного факела. Смесителю диаметром $D_c/d_0 = 15$ и x_c/d_0, изменяющемуся в пределах от 0 до 10, соответствуют наибольшие значения отношения длины зоны интенсивного горения к полной длине факела $l_{и.г}/l_ф$, которые оказались равными 0,65–0,73 вместо 0,6 для свободного факела.

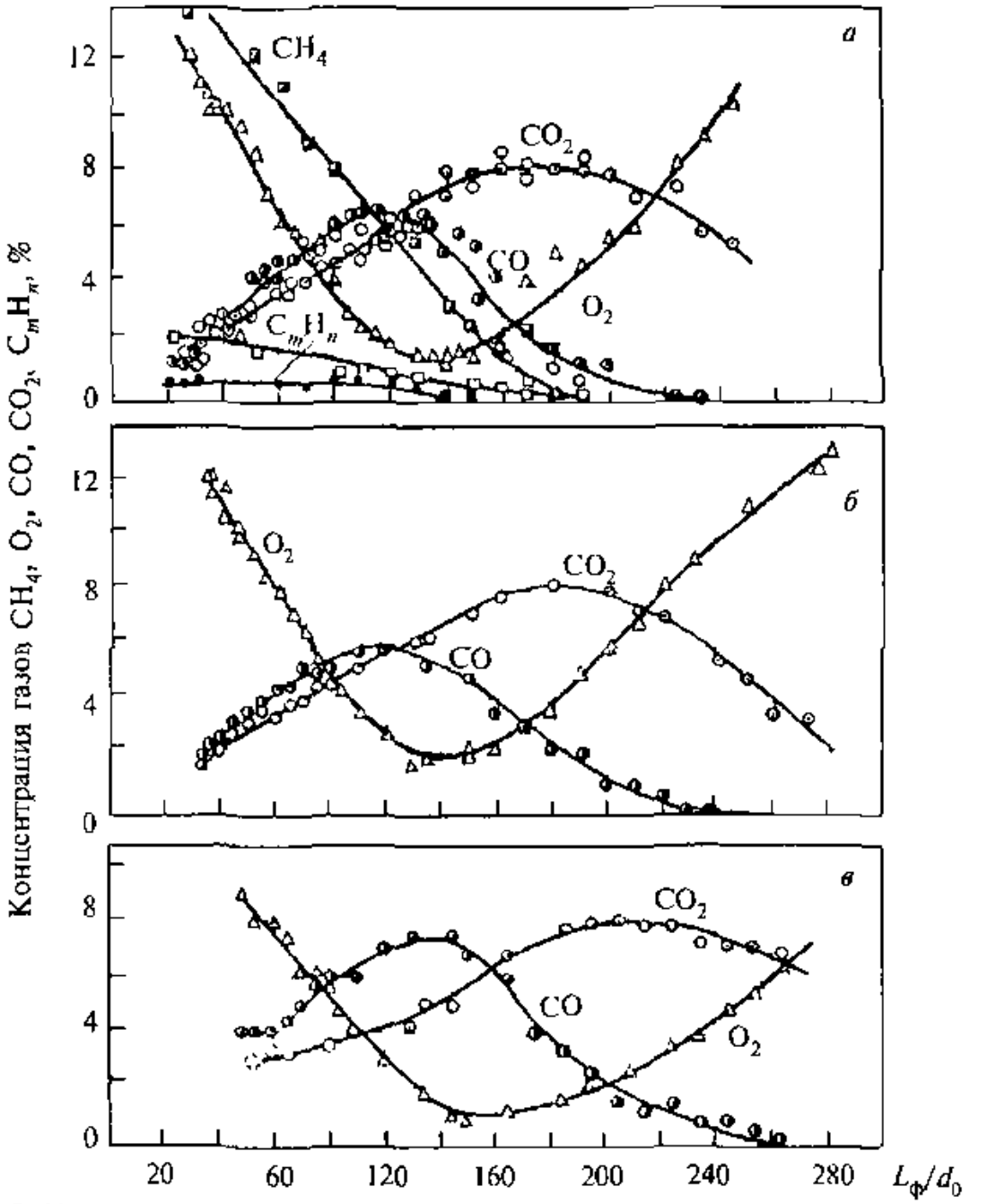


Рис. 3.15. Изменение концентрации газов по оси факела после смесителя (D_c = = 60 мм; L_c = 110 мм).
а – x_c = 40 мм; *б* – x_c = 80 мм; *в* – x_c = 160 мм

Отсюда следует, что в факеле со смесителем изменяется соотношение между $l_{н.г}$ и $l_{ф}$ за счет заметного сокращения зоны горения.

Поля температур в поперечных сечениях факела после смесителя более выравнены, а максимальные температуры несколько ближе расположены к аэродинамическим границам струи, поэтому поверхность интенсивного горения в факеле со смесителем оказалась шире, чем у свободного факела.

Присутствие в газе на выходе из смесителя (рис. 3.15) тяжелых углеводородов C_mH_n и CH_4 повышенной концентрации с несколько меньшим содержанием CO_2 по сравнению со свободным факелом свидетельствует о том, что процесс выгорания топлива в нем несколько задерживается. Присутствие сравнительно высокого содержания CO и H_2 в выходном отверстии является результатом развития процессов пиролиза при движении газа через смеситель.

Отмечено, что скорость выгорания топлива по оси факела после смесителя выше, чем в свободном факеле.

3.2. ГОРЕЛКА РЕГУЛИРУЕМАЯ ДИФФУЗИОННАЯ

Горелка регулируемая диффузионная типа ГРД разработана ВНИИпромгазом для торцевого отопления трубчатых вращающихся печей (рис. 3.16). Горелка состоит из сопловой части *1* с расположенными в ней шестью соплами *2* и центральным соплом *3*. В центральном сопле вдоль оси горелки перемещается профилированный дроссель *4*. Газ, проходя через сопловую часть, разделяется на два потока, один из которых проходит в зазор между дросселем и соплом, а второй поток проходит через шесть периферийных каналов.

При вводе дросселя в центральное сопло горелки скорость истечения газа из периферийных сопел и кольцевого зазора, образованного центральным соплом и дросселем, будет максимальной.

При выводе дросселя скорость истечения газа из центрального сопла и периферийных сопел будет плавно изменяться от максимального значения до минимального.

Расходные и регулировочные характеристики даны на рис. 3.17.

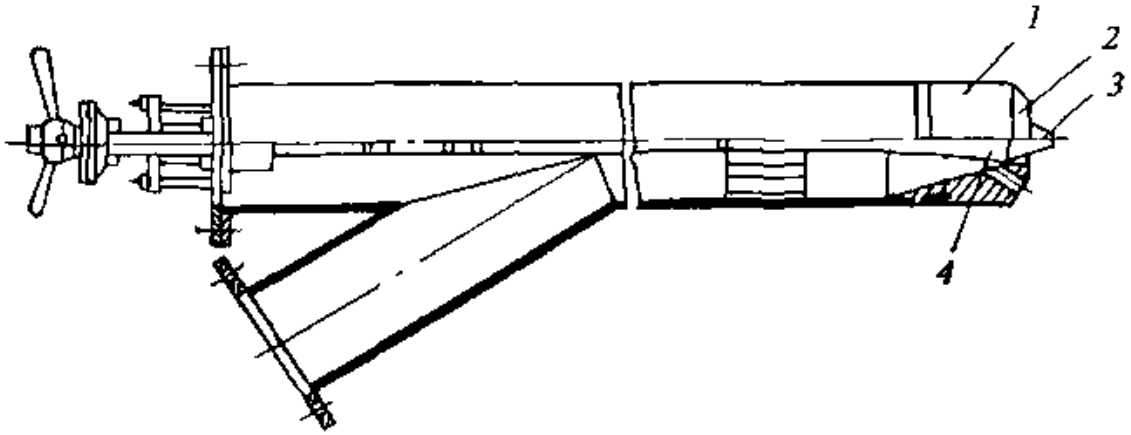


Рис 3.16. Горелка регулируемая диффузионная ГРД-2

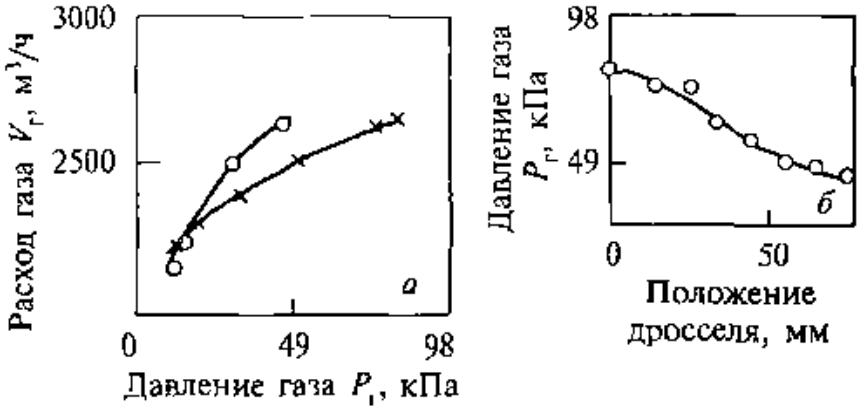


Рис. 3.17. Характеристики горелки ГРД-2: *а* — расходная $V_г = f(P_г)$; о — длинный факел, × — короткий факел; *б* — зависимость давления газа от положения дросселя

Основные паспортные данные горелки ГРД-2 приведены ниже:

Разрежение в холодном конце печи, Па	137
Тепловая мощность, МВт	31,6
Расход газа, м³/ч	3200
Коэффициент расхода воздуха в конце печи	1,08
Изменение давления при изменении положения дросселя от полностью введенного до полностью выведенного при номинальном расходе газа, кПа	45–80,5
Диапазон регулирования (по требованиям технологии):	
короткий факел	
по расходу газа, м³/ч	1200–3200
по давлению газа, кПа	12,25–80,5
длинный факел	
по расходу газа, м³/ч	1200–3200
по давлению газа, кПа	7,85–45
Скорости истечения газа при номинальном расходе (рассчитанные), м/с:	
короткий факел	375
длинный факел	260
Температура воздуха, поступающего в печь, °С	110
Температура уходящих газов в холодном конце печи, °С	360
Выходной диаметр центрального сопла, мм	44
Диаметр периферийного сопла, мм	20
Количество периферийных сопел, шт.	6
Диаметр дросселя, мм	36
Ход дросселя, мм	125
Длина дросселя, мм	174
Внутренний диаметр корпуса, мм	100
Длина корпуса, мм	3060
Диаметр подводящего газ патрубка, мм	100
Габаритные размеры горелки, мм:	
длина	3451
ширина	205
высота	324

3.3. ВИХРЕВАЯ РЕВЕРСИВНАЯ ГОРЕЛКА

Вихревая реверсивная горелка ВРГ разработана САФ ВНИИпромгаз для вращающихся печей обжига строительных материалов. Горелка ВРГ (рис. 3.18) состоит из насадка сопла *5*, корпуса *2*, дросселя *3*, лопаточного завихрителя *4* и узла управления дросселем и завилрителем *1*. Дроссель конический служит для измененил площади сопла и соответственно скорости истечения газа.

Завихритель аксиально-лопаточный с реверсивным поворотом лопаток относительно оси горелки с максимальными углами отклонения ±45°.

С помощью дросселя и завихрителя регулируются в широком диапазоне характеристики факела (угол раскрытил, длина и жесткость) в зависимости от технологии обжига материала.

Ряд горелок ВРГ разделен на пять групп. Горелки каждой группы имеют одинаковые размеры, кроме диаметра насадка сопла. В зависимости от

Осиовные размеры и параметры работы горелок ВРГ

Номинальный расход газа, м³/ч	Тепловая мощность, МВт	Диапазон регулирования, м³/ч	диаметр *сопла*, мм	диаметр *дросселя*, мм	диаметр *кольца*, мм	диаметр *завихрителя* по лопаткам, мм
			ВРГ-1			
1500	14,3	150–1650	52			
2000	19,7	200–2200	55			
2500	24,5	250–2750	58	42	56	87
3000	29,6	300–3300	60			
			ВРГ-2			
3500	34,5	350–3850	71			
4000	39,4	400–4400	73			
4500	44,4	450–4950	75	54	58	110
5000	49,2	500–5500	77			
			ВРГ-3			
5500	54,2	550–6050	80			
6000	59,1	600–6600	91			
6500	64,0	650–7050	92	68	82	136
7000	69,0	700–7700	94			
7500	76,2	750–8250	96			
8000	78,8	800–8800	97			
			ВРГ-4			
8500	83,75	850–9350	110			
9000	88,5	900–9900	112			
9500	93,5	950–10500	113			
10000	99,5	1000–11000	114	83	97	164
10500	103,5	1050–11550	115			
11000	107	1100–12100	117			
12000	118,2	1200–13200	119			
			ВРГ-5			
13000	128	1300–14300	139			
14000	138	1400–15400	141			
15000	142	1500–16500	144	108	122	214
16000	158	1600–17600	146			
18000	189	1800–19800	150			
20000	197	2000–22000	154			

диаметра насадка сопла горелки имеют различные номинальные расходы газа и пределы регулирования.

Весь горелочный ряд характеризуется следующими техническими показателями:

Номинальное давление газа, кПа 73,5
Разрежение в печи в районе установки горелки, Па 19,6–49
Коэффициент расхода воздуха 1,04–1,05
Средняя скорость факела на выходе из горелки, м/с 300–350
Расстояние по оси факела от горелки до максимума температур, м ..... $(2,5–3)D_п$
Номинальная длина факела в футерованной цилиндрической камере с диаметром $D_п$, м ..... $(2,5–3)D_п$

Размеры основных элементов горелок каждого типоразмера и технические возможности приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Основные размеры горелок					Масса, кг	Диаметр окружности болтовых отверстий диаметром 18 мм, мм
диаметр головки, мм	высота лопатки, мм	диаметр корпуса, мм	ход дросселя, мм	длина горелки, м		
			ВРГ-1			
80	15,5	125	65	6,0	84	150
			ВРГ-2			
100	21	148	90	8,0	127	170
			ВРГ-3			
125	27	175	115	10,6	199	200
			ВРГ-4			
150	33,0	200	140	12,0	289	225
			ВРГ-5			
209	44,5	259	180	13,0	726	280

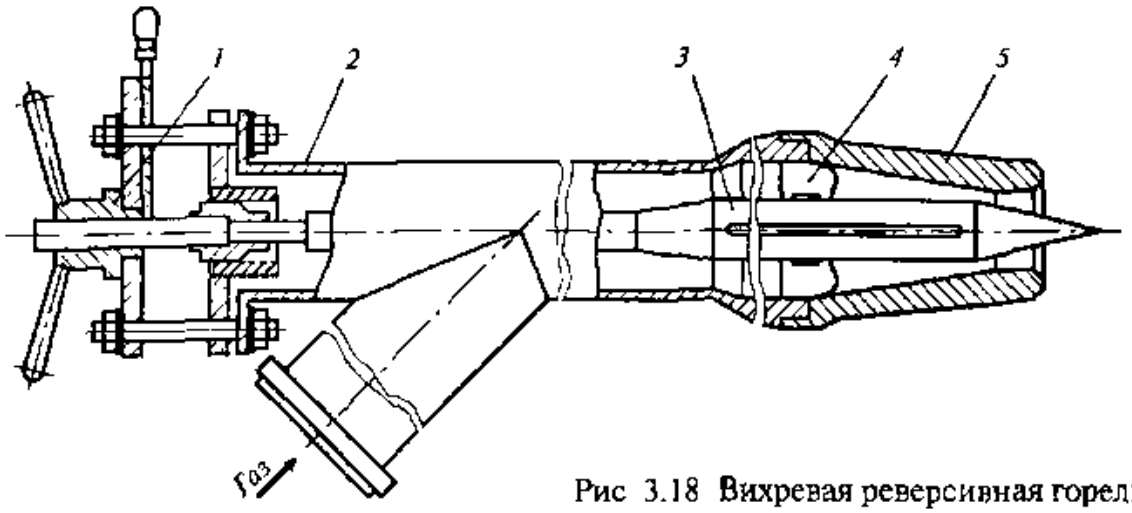


Рис 3.18 Вихревая реверсивная горелка ВРГ

3.4. ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ ВостИО

Восточным институтом огнеупоров разработаны три серии высокоскоростных газовых горелок для трубчатых вращающихся печей огнеупорного производства. Общий вид горелки приведен на рис. 3.19, а конструкции выходных элементов на рис. 3.20.

В этих горелках существенная интенсификация процесса смесеобразования с одновременным увеличением инжекционной способности газовой струи достигается за счет значительного увеличенил скорости истечения газа (сверхзвуковой режим истечения) при применении расширяющегося сопла. Полное абсолютное давление газа перед соплом для получения сверхзвуковых скоростей истечения газа должно быть более 0,18 МПа. Хороший эффект достигают при полном давлении газа перед соплом 0,3–0,4 МПа.

Наличие такого давления газа перед соплом позволяет получать скорости истечения газовой струи 500 м/с и выше. При этом значении скоростей истечения возникает сильная турбулизация выходящей газовой струи, что приводит к интенсивному перемешиванию газа с воздухом. Регулирование длины факела в рабочем пространстве печи достигается за счет измене-

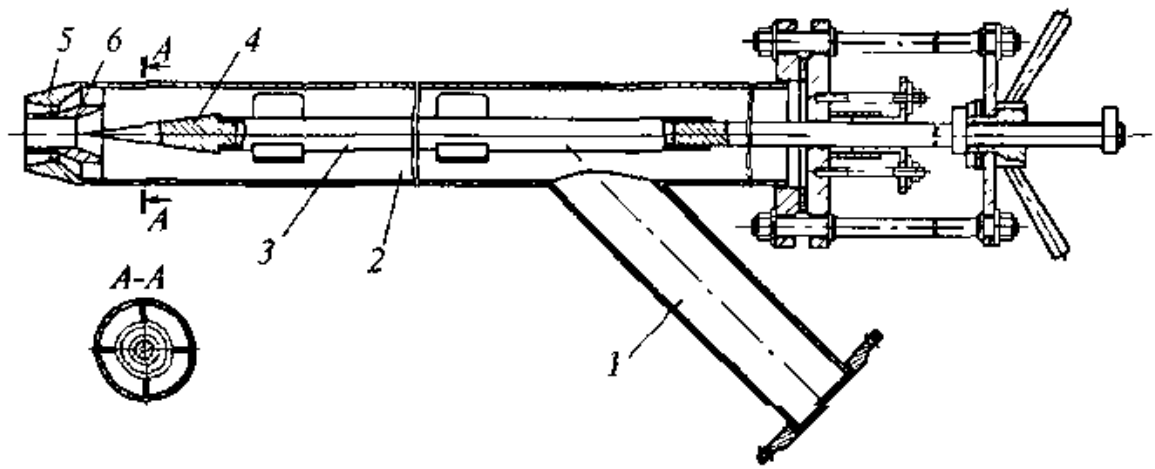


Рис. 3.19. Общий вид диффузионной горелки ВостИО:
1 – подвод газа; *2* – корпус; *3* – шток с приводом, *4* – наконечник, *5* – выходной насадок; *6* – вставка

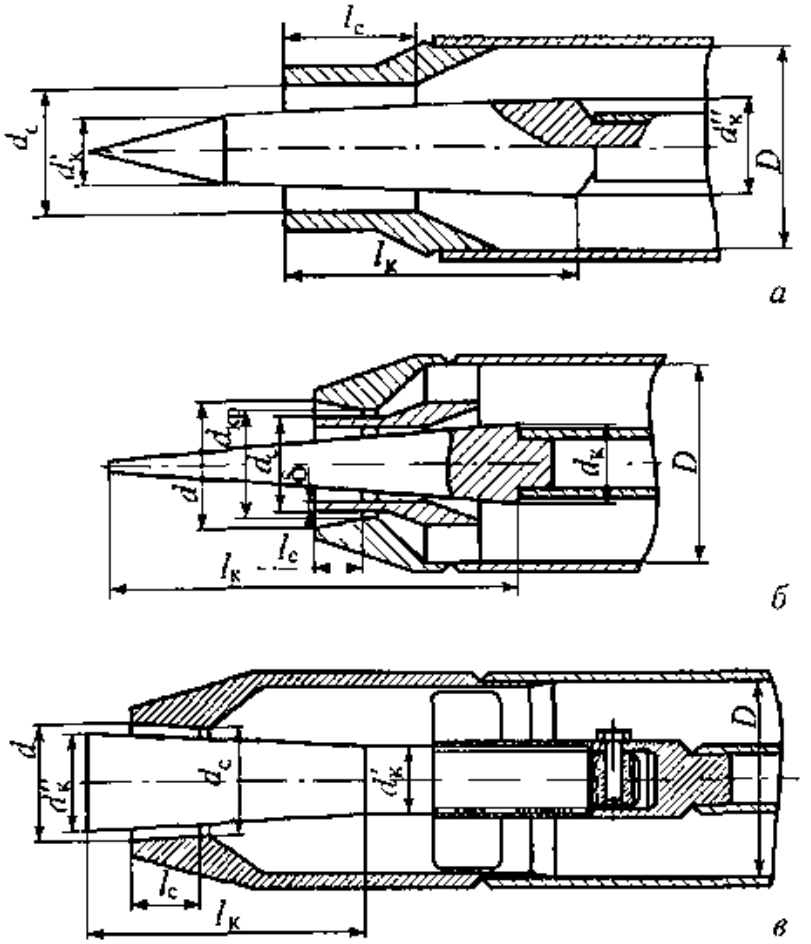


Рис 3 20 Конструкция выходных элементов горелок ВостИО:
а – ГВМ-К; *б* – ГВМ-КР; *в* – ГВВ

ния скорости истечения газа (горелка ГВМ-К), разделения общего потока на две коаксиальные струи и комбинации скоростей их истечения (горелка ГВМ-КР), а также за счет изменения угла раскрытия газовой струи.

Технические характеристики каждого типа горелок приведены в табл. 3.3–3.5.

Регулируемая горелка ГВМ-К (Н96-11-00) содержит трубу, заканчивающуюся соплом. В сопле установлен регулировочный конус, который перемещают вдоль сопла для регулирования расхода газа и длины факела при помощи механизма, установленного на противоположном конце горелки. Конус и сопло выполнены таким образом, чтобы при перемещении конуса в пределах рабочего регулирования горелки соотношение критической и выходной площадей сечения сопла обеспечивало получение сверхзвуковых скоростей истечения газовой струи

Горелка ГВМ-К имеет 5 типоразмеров на расходы газа от 1000 м^3/ч до 6000 м^3/ч.

Горелка ГВМ-КР (Н96-10-00) наряду с кольцевым соплом Лаваля имеет центральное цилиндрическое сопло, регулирование степени открытия которого производят при помощи регулировочного конуса. При перемещении конуса и изменении давления газа изменяется как абсолютный расход газа, так и соотношение скоростей в центре струи и на ее периферии. Это расширяет возможности регулирования степени перемешивания общей струи с низкоскоростным потоком воздуха, подсасываемым через холодильник печи.

Горелки ГВМ-КР дают наибольший эффект на вращающихся печах большой длины и диаметра, поэтому горелки разработаны на расходы природного газа от 1000 м^3/ч до 8000 м^3/ч.

Отличительной особенностью горелки ГВВ(Н96-12-00) от всех вышеуказанных типов является то, что регулировочный конус выполнен расширяющимся по ходу движения газа. Такая конструкция конуса в сочетании с

Таблица 3.3

Технические характеристики горелок ВостИО – ГВМ-К

Обозначение горелки	Давление газа, МПа	Расход газа, м³/ч	Конструктивные размеры, мм					
			d_c	$d'_к$	$d''_к$	l_c	$l_к$	D
ГВМ-К-1	0,4	1000	29,1	16,6	25,6	21,5	95,5	60
ГВМ-К-2		2000	41,1	27,2	33,5	27,5	78,9	75
ГВМ-К-3		3000	50,4	34,7	39,8	33,7	75,6	90
ГВМ-К-4		4000	58,2	40,9	45,3	38,9	75,1	110
ГВМ-К-6		6000	71,5	55,0	51,0	48,0	80,0	120

Таблица 3.4

Технические характеристики горелок ВостИО – ГВМ-КР

Обозначение горелки	Давление газа, МПа	Расход газа, м³/ч	Конструктивные размеры, мм							
			$d_{кр}$	d	d_c	δ	l_c	$d_к$	$l_к$	D
ГВМ-КР-1	0,4	1000	39,5	40,2	37,0	3	6,0	34,0	97,0	60
ГВМ-КР-2		2000	52,8	54,2	47,0	3	11,4	44,0	125,0	75
ГВМ-КР-3		3000	64,1	66,0	56,0	3	15,6	54,0	154,0	90
ГВМ-КР-4		4000	72,0	74,3	62,0	3	19,2	60,0	170,0	110
ГВМ-КР-6		6000	89,7	92,6	77,0	4	24,0	74,0	220,0	120
ГВМ-КР-8		8000	103,0	106,5	88,0	4	29,0	85,0	250,0	150

Таблица 3.5

Технические характеристики горелок ВостИО – ГВВ

Обозначение горелки	Давление газа, МПа	Расход газа, м³/ч	Конструктивные размеры, мм						
			d_c	d	$d'_к$	$d''_к$	l_c	$l_к$	D
ГВВ-1	0,4	1000	38,4	42,8	25,0	37,7	30,0	81,2	60
ГВВ-2		2000	48,3	50,4	25,0	44,3	30,0	122,3	75
ГВВ-3		3000	56,4	58,7	25,0	49,7	30,0	157,5	90
ГВВ-4		4000	63,5	66,0	25,0	54,7	30,0	188,8	110
ГВВ-6		6000	75,7	84,7	25,0	63,3	30,0	252,8	120

расширяющимся кольцевым соплом Лаваля позволяет получить веерообразный факел.

Такая форма факела позволяет интенсифицировать процесс сжигания газа в рабочем пространстве вращающейся печи, получать большую интенсивность тепловыделения на меньшей длине зоны обжига, что особенно важно при обжиге трудноспекающихся материалов в печах сравнительно небольшой длины.

Горелка ГВВ имеет 5 типоразмеров на расходы газа от 1000 м³/ч до 6000 м³/ч. Применение в конструкции горелки расширяющегося конуса позволяет существенно увеличивать пределы регулирования горелок (практически от нуля до максимального расхода) при неизменных сверхзвуковых скоростях истечения газовой струи.

Подсоединение горелки к газопроводу осуществляют на гибких шлангах.

Результаты испытаний горелок показали, что при любых конструкциях и расчетном режиме горелки работают с отрывом факела от сопла. Однако при разогретом рабочем пространстве срывов факела не наблюдается. Изменяя положение подвижных элементов горелки можно изменять характер выгорания топлива. Содержание в продуктах горения оксидов азота NO_x не превышает 0,01 % (объемн.), или 200 мг/м^3.

3.5. ГОРЕЛКИ ДЛЯ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ ОБЖИГА ИЗВЕСТИ

Предприятием ВНИИстром разработана система безбалочного сжигания газа в шахтной печи для обжига известняка производительностью 100 —220 т/сут. Система включает в себя восемь периферийных фурменных горелок, расположенных в зоне обжига извести, и одну центральную горелку, расположенную по вертикальной оси печи в зоне охлаждения на уровне выгрузочного механизма. Через периферийные горелки подается $^2/_3$ всего расходуемого газа, через центральную — $^1/_3$ расхода газа. Для равномерного выжига и распределения температур по сечению печи в зоне обжига на различных уровнях печи должно быть определенное разрежение. В периферийном ярусе разрежение должно быть 0,25 кПа, над зоной обжига — 0,69 кПа, на уровне засыпки сырья — 0,118 кПа.

Горелка периферийная является диффузионной, включает газовую трубу и защитную фурму. Воздух поступает через защитную фурму за счет разрежения в печи.

Центральная горелка так же является диффузионной горелкой, имеет вертикальный насадок с отверстиями диаметром 13 мм, расположенными в шахматном порядке в 11 рядах по вертикали и просверленными под углом 60° к вертикали.

Технические характеристики горелок, полученные при испытании, приведены в табл. 3.6.

Следует заметить, что качество сжигания топлива существенно зависит от технологических параметров работы агрегата: фракционного состава загружаемого материала, сегрегации материала при загрузке, ритмичности работы выгрузочного механизма.

Конструктивные особенности и работа горелок шахтной печи подробно изложены в [8]

Периферийная диффузионная горелка ГФИ разработана в двух вариантах: для установки в зоне обжига (вариант 1) и для установки в зонах обжига и охлаждения (вариант 2) (рис 3.21). Горелка имеет газовую трубу, оканчивающуюся соплом, и предохранительную фурму, выполненную из жаропрочной стали Х17Н13МТ2. Фурма имеет вид полой треугольной призмы, основная задача которой — защита газовой трубы от воздействия перемещающегося слоя шихты. При установке горелок в зоне обжига в фурму подается воздух в количестве 20—30 % от необходимого для сжигания топлива.

Таблица 3 6

Технические характеристики системы сжигания газа ВНИИстром

Параметр	Периферийная горелка	Центральная горелка
Тепловая мощность, МВт	0,4	1,61
Расход газа, м³/ч	48	190
Давление газа, кПа	29,4	29,4
Разрежение на уровне горелки, кПа	0,25	0,04
Коэффициент расхода воздуха	1,2	1,2
Диапазон рабочего регулирования по расходу, м³/ч	4,8–62,4	19–247
Коэффициент рабочего регулирования	13	13
Количество газовых отверстий, шт	1	96
Диаметр газовых отверстий, мм	10	13
Расстояние между центральной горелкой и ярусом периферийных, м	Не менее 5	

Технические характеристики горелок ГФИ при давлении газа на входе 4–5 кПа приведены в табл. 3.7.

Подовая горелка монтируется на балке-рассекателе механизма выгрузки или на сварной раме. Горелка имеет центральную газоподводящую трубу и канвл для подвода газа рециркуляции (рис. 3.22).Оба газовых тракта имеют систему газовыпускных отверстий, защищенных козырьками от воздействия шихты.

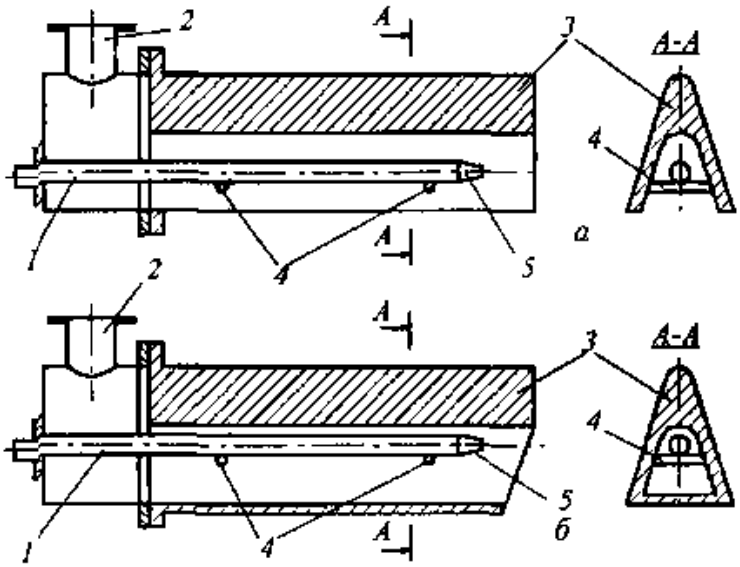


Рис 3.21. Консольная фурменная горелка шахтной печи [8]: *а* — вариант 1; *б* — вариант 2, *1* – подвод газа; *2* – подвод воздуха или рециркулята; *3* – защитная фурма; *4* – опора; *5* – сопло

Выходящие из отверстий струи природного газа перемещиваются с потоком воздуха, подсасываемого через отверстия выгрузки. При достижении нижнего концентрационного предела смесь воспламеняется и сгорает в слое шихты. Регулирование процесса выгорания топлива осуществляют подачей балластирующего рециркулята. Ввод рециркулирующих газов в зону горения в количестве 2–3 м³ на 1 м³ природного газа приводит к увеличению нижнего концентрационного предела. Это повышает температуру воспламенения горючей смеси до 900–1000 °С и увеличивает высоту зоны охлаждения в печи.

Таблица 3.7

Технические характеристики горелок ГФИ

Тип горелки	Тепловая мощность, кВт	Диаметр сопла, мм	Длина фурмы, м	Масса горелки, кг	
				вариант 1	вариант 2
ГФИ-1	233	8	0,9	190	294
ГФИ-2	233	8	1,0	285	305
ГФИ-3	233	8	1,1	305	325
ГФИ-4	233	10	1,3	345	365
ГФИ-5	350	12	1,45	365	395

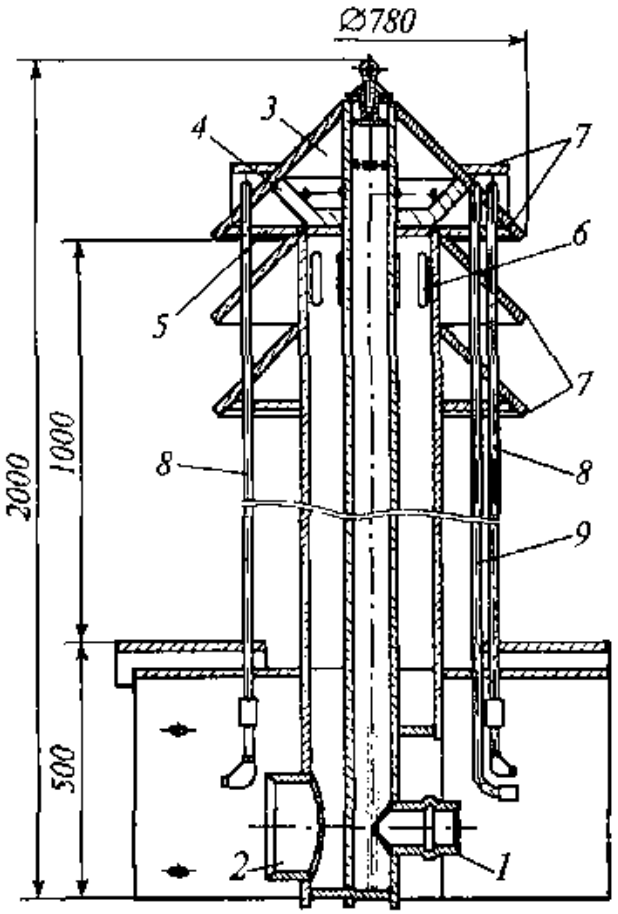


Рис 3.22 Подовая горелка шахтной печи ВНИИстром
1 – патрубок природного газа; *2* – патрубок рециркуляционного газа; *3* – камера природного газа; *4* – перфорированный конус; *5* – перфорированный диск, *6* – отверстия для выхода рециркуляционного газа; *7* – защитный козырек, *8* – термопара; *9* – труба для отбора давления в печи

3.6. ГОРЕЛКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ГАЗА В СЛОЕ ОКАТЫШЕЙ

При производстве железорудных окатышей на обжиговых конвейерных машинах подвижный слой гранул высотой от 350 до 600 мм последовательно подвергается сушке, обжигу при температуре 1300–1350 °С и охлаждению. Охлаждение окатышей производится воздухом, фильтруемым через слой. Для обеспечения качественной термообработки окатышей применяют горелки, позволяющие сжигать газ непосредственно в подвижном слое. Горелочные устройства устанавливают в начале зоны охлаждения или в конце зоны обжига. Причем они могут быть расположены и над слоем, и под ним

Особенностью процесса является необходимость предварительного нагрева части слоя до 900–1000 °С. Бедная газовоздушная смесь, проходя

через нагретые слои окатышей, подогревается до температуры воспламенения. Горение этой смеси происходит в определенной зоне слоя. Положение этой зоны зависит от начальной концентрации газа, температуры смеси и скорости фильтрации. При увеличении скорости фильтрации зона горения перемещается в направлении потока смеси и может быть вынесена даже за пределы слоя. При уменьшении скорости фильтрации зона горения перемещается против движения потока и может расположиться на входе в слой. Снижение начальной концентрации и температуры смеси приводит к перемещению зоны горения по потоку, а увеличение этих параметров к перемещению ее навстречу свежей смеси.

Основные требования к горелочным устройствам, предназначенным для сжигания газа в слое, сводятся к следующему:

- качественная предварительная подготовка газовоздушной смеси заданного состава;
- равномерная раздача смеси по площади зоны;
- устойчивость к воздействию высоких температур;
- высокая надежность при работе на запыленном воздухе.

Конструкции горелок для сжигания газа в слое разработаны в основном институтами Механобрчермет и ВНИИМТ. Ниже приведено описание горелочного устройства ВНИИМТ-УПИ, предназначенного для сжигания природного газа в количестве около 350 м^3/ч при установке горелок под слоем в дутьевых камерах (рис. 3 23). Горелочное устройство представляет собой сварную конструкцию из труб диаметром 89–159 мм с отверстиями для выхода газа под углом 45 и 90° к направлению движения потока воздуха. Давление воздуха в дутьевых камерах составляет около 6 кПа. Образующаяся смесь газа и воздуха при коэффициенте расхода последнего от 3,5 до 7,0 фильтруется через слой при скорости движения от 0,3 до 0,5 м/с.

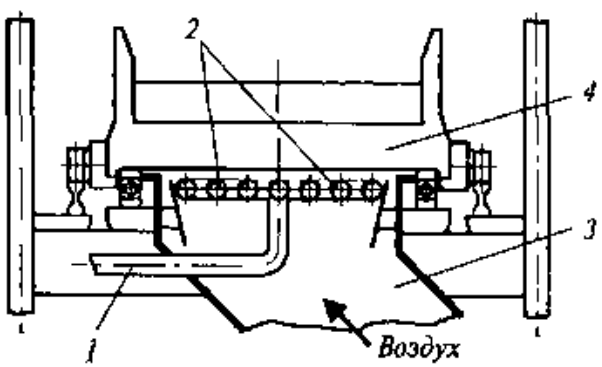


Рис. 3.23. Горелка для сжигания газа в слое окатышей:
1 – подвод газа; *2* – газовый коллектор; *3* – дутьевая камера (воздуховод); *4* – обжиговая тележка

Воспламенение смеси происходит в донной постели. Затем зона горения перемещается в верхние горизонты слоя. Особенностью работы горелок является отсутствие контроля за перемещеинем зоны горения в слое. Нормальный режим эксплуатации таких горелок характеризуется отсутствием воспламенения газа под колосниками, до входа смеси в слой. Воспламенение газа может происходить при снижении давления воздуха и нарушении газопроницаемости слоя. Этот режим контролируется датчиками, расположенными в дутьевых камерах. Следует отметить сложность такой процедуры в условиях значительной запыленности воздушного потока. При эксплуатации горелок наблюдаются трудности с герметизацией дутьевых камер.

Глава 4. ГОРЕЛКИ БЕЗ ПРЕДВАРИТЕПЬНОГО СМЕШЕНИЯ

В горелках без предварительного смешения газ и воздух смешиваются вне пределов горелки и сгорают в растянутом диффузионном факеле.

Основные их достоинства следующие:

- весьма высокие пределы регулирования, так как исключена возможность проскока пламени внутрь горелки;
- достаточно высокая температура подогрева газа и воздуха, подаваемых через горелку, так как она ограничена лишь стойкостью подводящих трубопроводов и опасностью термического разложения газа;
- удаление области высоких температур от кладки и примыкающих к рабочему пространству печи металлических частей горелки повышает стойкость последней и горело'ного камня. особенно при сжигании газа с высокой теплотой сгорания;
- отсутствие внутреннего смешения позволяет значительно уменьшить габариты и создать горелки весьма высокой тепловой мощности;
- быстрый и простой переход от работы на газе с одной теплотой сгорания к работе на газе с другой теплотой сгорания или от газового к жидкому топливу, а также обеспечение устойчивой работы при колебаниях теплоты сгорания газа и температуры подогрева компонентов сгорания.

Горелки без предварительного смешения имеют и ряд недостатков:

- необходимо подавать воздух с помощью вентиляторов через систему воздухопроводов, затрачивая на это соответствующие капиталовложения и электроэнергию;
- необходимо регулировать соотношение газа и воздуха;
- несовершенство смешения газа и воздуха приводит к необходимости работать с повышенным коэффициентом расхода воздуха, что связано с некоторым снижением калориметрической температуры и повышением расхода топлива.

Однако эти недостатки компенсируются простотой, надежностью горелок и возможностью работы на подогретом воздухе, т.е. возможностью рекуперации тепла уходящих газов. Поэтому горелки без предварительного смешения широко используют для сжигания газов в различных печных агрегатах, и в первую очередь в тех случаях, когда необходимо обеспечить концентрированный подвод тепла с помощью небольшого числа крупных горелок, особенно при сжигании газа с высокой теплотой сгорания; получить широкие пределы регулирования, а также работать попеременно на газовом топливе различных видов или на газе и мазуте.

Следует только иметь в виду, что горелкам без предварительного смешения необходим достаточный объем рабочего пространства для развития факела.

Наибольшее распространение получила самая простая и надежная горелка без предварительного смешения, так называемая горелка типа "тру-

ба в трубе". Кроме того, при необходимости работы с повышенными и переменными коэффициентами расхода воздуха применяют горелки с широким диапазоном регулирования коэффициента расхода воздуха.

4.1. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ГОРЕЛОК

Расчет горелок без предварительного смешения заключается в определении проходных сечений для газа, воздуха и газовоздушной смеси или в определении пропускной способности горелки с известными геометрическими размерами.

Расчетная схема горелки без предварительного смешения показана на рис 4.1.

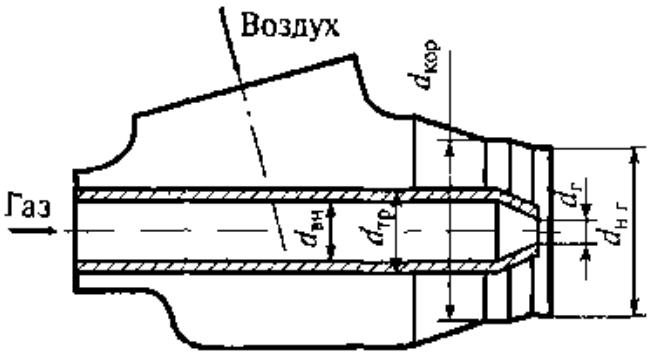


Рис. 4.1. Расчетная схема горелки без предварительного смешения

Обычно при расчете бывают заданы параметры газа ($Q_н^р$, $\rho_{0г}$, $T_г$, $p_г$), воздуха ($T_в$, $p_в$) и пропускная способность горелки по газу $V_{0г}$.

Количество воздуха $V_{0в}$ (м^3/с), которое должно быть подано для сжигания газа, можно определить по формуле

$$V_{0в} = \alpha L_0 V_{0г}, \qquad (4.1)$$

где α – коэффициент расхода воздуха, который для обеспечения полного сжигания в горелках без предварительного смешения принимают не менее 1,1–1,15 (за исключением особых случаев нагрева в продуктах неполного сгорания); L_0 – стехиометрическое (при $\alpha = 1{,}0$) количество воздуха на единицу объема газа (определяется для данного вида газа по приложению I).

Расчет горелок без предварительного смешения основан на законах истечения. Так как в горелки поступают газ и воздух низкого давления, то при расчетах их можно принять несжимаемыми. Тогда скорость газа или воздуха ω_0 (м/с) в выходном сечении можно определить по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{2T_0 p/(\xi p_0 T)}, \qquad (4.2)$$

где ξ – коэффициент сопротивления горелки, отнесенный к скорости в самом узком сечении; для горелки с конфигурацией, изображенной на рис. 4.1, $\xi_в = 1{,}0$; $\xi_г = 1{,}5$.

Площадь выходного сечения, мм^2:

$$F = V \cdot 10^6/\omega_0, \qquad (4.3)$$

Зная F, можно определить диаметр газового сопла $d_г$ и размеры щели для воздуха $d_{кор}$ (мм):

$$d_г = \sqrt{F_г / 0{,}785}; \quad (4.4)$$

$$d_{кор} = \sqrt{F_г / 0{,}785 + d_{тр}^2} \quad (4.5)$$

Действительная скорость газа или воздуха в выходном сечении ω (м/с) равна

$$\omega = \omega_0 T / T_0 . \quad (4.6)$$

Действительные скорости газа и воздуха в выходных сечениях горелки могут быть весьма различными. Опыт работы и результаты исследований горелок показывают, что скорость истечения газа не должна быть выше 80—100 м/с. Для холодного природного газа такая скорость соответствует давлению перед горелкой не более 6 кПа. Давление коксового и доменного газов по условиям газового баланса металлургических заводов обычно не превышает этой величины.

Действительная скорость воздуха для сокращения длины факела должна отличаться от скорости газа примерно в 2 раза и, во всяком случае не более чем в 3—4 раза. Для получения очень длинного факела действительные скорости газа и воздуха можно принимать равными или мало отличающимися друг от друга. Обычно скорость воздуха принимают ниже скорости газа и равной примерно 40—60 м/с, что соответствует давлению холодного воздуха 1—2,5 кПа, а воздуха, подогретого до 400 °С перед горелкой, 0,5—1,0 кПа. Такое давление отвечает возможностям современных дутьевых средств.

Скорость смеси в носике горелки при максимальном количестве подаваемых в горелку газа и воздуха может составлять 25—30 м/с.

Скорости газа и воздуха в трубопроводах, присоединенных к горелке, и во входных сечениях самой горелки выбирают равными 8—10 м/с для воздуха и 10—15 м/с для газа. При значительном давлении газа или воздуха их скорости в трубопроводе могут быть увеличены до 18—20 м/с с тем, чтобы использовать избыток давления и сократить диаметры трубопроводов. Если же давления газа и воздуха недостаточно, то для уменьшения потерь их давления скорости в трубопроводах следует принимать равными 5—7 м/с.

Скорость газа внутри горелки на подводе к соплу может быть принята примерно в два раза больше, чем в подводящем трубопроводе, т.е. 20—25 м/с.

Рекомендуемые значения скоростей приведены в табл. 4.1.

Выбирать размеры трубопроводов и частей горелки с круглым поперечным сечением или определять скорости при заданном диаметре участков газового и воздушного трубопроводов удобно по номограмме (приложение 11).

Последовательность расчета геометрических размеров горелки по заданной пропускной способности горелки по газу и давлению газа и воздуха следующая:

расчет $V_{0в}$ по формуле (4,1);

расчет $\omega_{0г}$ и $\omega_{0в}$ по формуле (4.2);

Таблица 4.1

Рекомендуемые значения скоростей газа, воздуха и смеси для горелок типа "труба в трубе"

Характерное место	Рекомендуемая скорость, м/с		
	воздуха	газа	смеси
Трубопровод перед горелкой	8–10	10–15	
Входные сечения горелки:			
при избытке давления	18–20	18–20	
при недостатке давления	5–7	5–7	
Газовое сопло до выходного сечения	–	20–25	–
То же в выходном сечении	–		–
Носик горелки.		18–100	
максимальная	–	–	25–30
минимальная	–	–	4–5

расчет $F_г$ и $F_в$ по формуле (4.3);

расчет $d_г$ по формуле (4.4);

расчет диаметра газовой трубы в горелке;

расчет воздушной щели (диаметра корпуса горелки $d_{кор}$) по формуле (4.5);

расчет действительных скоростей газа и воздуха по формуле (4.6) и проверка их соотношения;

расчет $d_{н.г}$;

расчет диаметров подводящих трубопроводов газа и воздуха.

Если известны геометрические размеры горелки и необходимо определить ее пропускную способность при заданных давлениях газа и воздуха, то, рассчитав скорости по формуле (4.2), определяют пропускную способность при известных проходных площадях по формуле (4.3).

Если давления газа и воздуха не заданы, то можно задаться скоростями газа и воздуха на выходе из горелки с учетом высказанных выше соображений (см. табл. 4.1).

Пример расчета горелки без предварительного смешения. Рассчитать горелку типа «труба в трубе» для сжигания $V_{0г} = 0{,}0085$ м^3/с природного газа с $Q_н^р = 34{,}00$ МДж/м^3. Давление газа перед горелкой 5,3 кПа, воздуха 0,5 кПа. Температура газа 20 °С, воздух подогрет до 400 °С; $\alpha = 1{,}1$.

По рис. 1-20 приложения 1 находим $\rho_{0г} = 0{,}82$ кг/м^3 и $L_0 = 9{,}01$ м^3/м^3 газа.

По формуле (4.1)

$V_{0в} = 1{,}1 \cdot 9{,}01 \cdot 0{,}0085 = 0{,}0842$ м^3/с.

По формуле (4.2)

$$\omega_{0г} = \sqrt{\frac{2 \cdot 273 \cdot 5300}{1{,}5 \cdot 0{,}82 \cdot 293}} = 89{,}8 \quad \text{м/с}, \qquad \omega_{0в} = \sqrt{\frac{2 \cdot 273 \cdot 500}{1{,}29 \cdot 673}} = 17{,}7 \quad \text{м/с}.$$

По формуле (4.3)

$$F_г = \frac{0{,}0085 \cdot 10^6}{89{,}8} = 94{,}7 \text{ мм}^2.$$

По формуле (4.4)

$$d_г = \sqrt{\frac{94{,}7}{0{,}785}} = 10{,}98 \approx 11 \text{ мм}.$$

По формуле (4.3)

$$F_в = \frac{0{,}0842 \cdot 10^6}{17{,}7} = 4760 \text{ мм}^2.$$

Принимаем скорость газа в газовой трубе 25 м/с, тогда (по приложению 11) $d_{вн} = 21$ мм.

Принимаем наружный диаметр газовой трубы $d_{тр} = 35$ мм. Тогда по формуле (4.5)

$$d_{кор} = \sqrt{\frac{4760}{0{,}785} + 35^2} = 85 \text{ мм}.$$

По формуле (4.6)

$$\omega_г = 89{,}8\frac{293}{273} = 96{,}4 \text{ м/с}, \qquad \omega_в = 17{,}7\frac{673}{273} = 43{,}6 \text{ м/с},$$

$$\omega_г : \omega_в = 96{,}4/43{,}6 = 2{,}2.$$

Количество газовоздушной смеси

$$V_{0см} = V_{0г} + V_{0в} = 0{,}0085 + 0{,}0842 = 0{,}0927 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Принимаем скорости на подводе газа 12,5 м/с, на подводе воздуха 8 м/с и на выходе газовоздушной смеси из носика горелки 25 м/с. Тогда по приложению 11 диаметры на подводе газа 30 мм, на подводе воздуха 115 мм, носика горелки 70 мм.

4.2. ГОРЕЛКИ ТИПА "ТРУБА В ТРУБЕ"

Стальпроектом разработаны горелки типа "труба в трубе" трех серий: малой тепловой мощности — серия М, средней тепловой мощности — серия С и большой тепловой мощности — серия Б. Каждая серия имеет два исполнения: для газов с высокой $Q_н^р$= 10–35 МДж/м^3 — исполнение В; для газов с низкой $Q_н^р$ = 3,5–10 МДж/м^3 — исполнение Н.

Конструкция горелок позволяет примеиять газ и (или) воздух, подогретые до 400 °С

Рекомендуемые максимальное дааление газа перед горелкой 6 кПа, минимальное, определяемое возможностью работы приборов автоматического регулирования, 0,1 кПа.

Горелки типа "труба в трубе" малой, средней и большой тепловой мощности различаются размерами и конструктивным исполнением, а го-

релки для газов с высокой и низкой теплотой сгорания — соотношением проходных сечений для воздуха и газа. Однако номинальное их деление является условным, поскольку при определенных соотношениях давлений и температур подогрева газа и воздуха, теплоты сгорания газа и коэффициентов расхода воздуха теплопроизводительность горелки серии С может оказаться выше, чем горелки серии Б, и наоборот, или для сжигания газа с низкой теплотой сгорания может потребоваться горелка исполнения В.

Горелки типа "труба в трубе" малой тепловой мощности разработаны в двух исполнениях (ДВМ и ДНМ) пяти типоразмеров с диаметром носиков горелок от 20 до 50 мм. Горелки малой тепловой мощности показаны на рис. 4.2, а их конструктивные размеры приведены в табл. 4.2.

Горелки типа "труба в трубе" средней тепловой мощности разработаны в двух исполнениях (ДВС и ДНС) шести типоразмеров с диаметром носиков горелок от 60 до 150 мм. Горелки средней тепловой мощности показаны на рис. 4.3, а их конструктивные размеры приведены в табл. 4.3.

При диаметре газопровода до $2^1/_2''$ его присоединяют к горелке на резьбе; при большем диаметре — при помощи колена, снабженного гляделкой. Это определяет тип (I или II) конструктивного исполнения горелки.

Горелки типа "труба в трубе" большой тепловой мощности разработаны в двух исполнениях (ДВБ и ДНБ) десяти типоразмеров с диаметром носиков горелок от 200 до 425 мм. Горелки большой тепловой мощности показаны на рис. 4.4, а их конструктивные размеры приведены в табл. 4.4.

Газ ко всем горелкам большой тепловой мощности подводят с помощью колена, снабженного гляделкой. Горелка с диаметром носика 300 мм выполнена в двух вариантах, различающихся диаметрами подводов воздуха

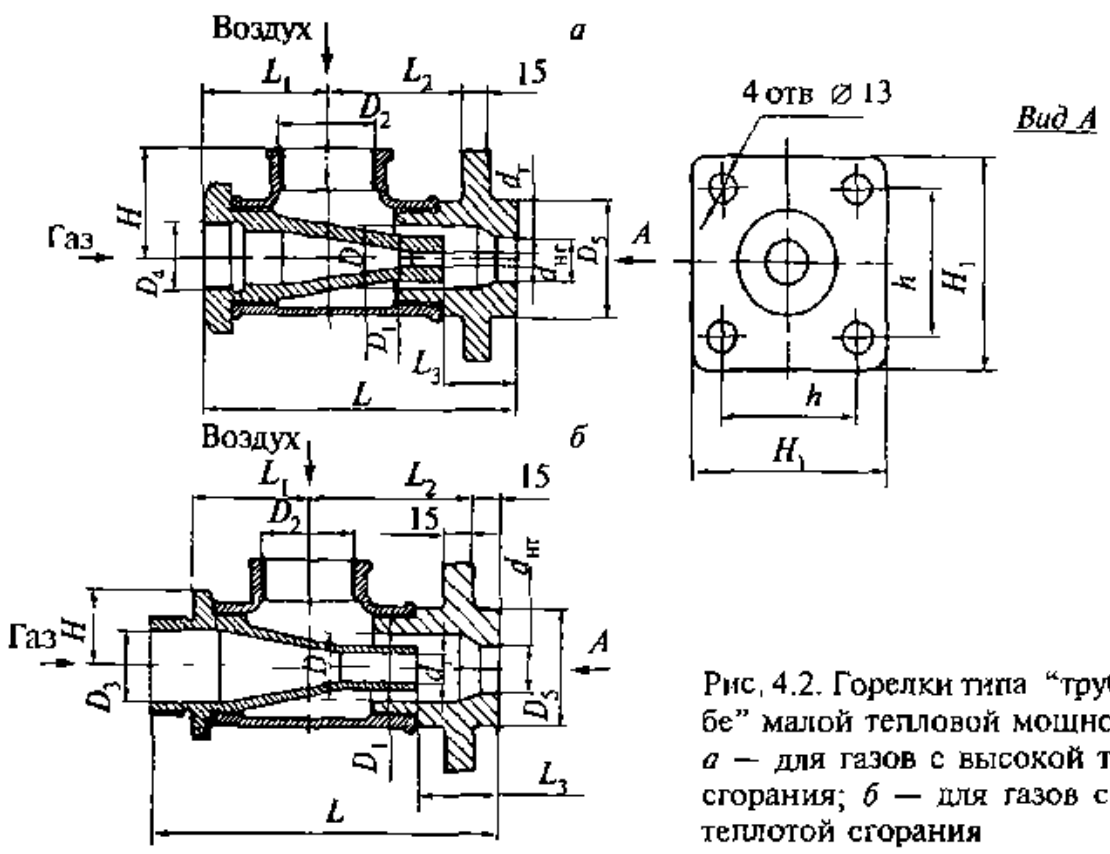


Рис. 4.2. Горелки типа "труба в трубе" малой тепловой мощности:
а — для газов с высокой теплотой сгорания; *б* — для газов с низкой теплотой сгорания

Таблица 4.2

Конструктивные размеры (мм)* горелок типа «труба в трубе» малой тепловой мощности типа ДВМ и ДНМ (рис. 4.2)

Обозначение горелки	$d_г$	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	L	L_1	L_2	L_3	H	H_1	h	Масса горелки, кг
ДВМ 20/$d_г$	4÷30	20	27,5	23	1½"	–	1"	55	157	62	80	40	50	100	70	3,0
ДНМ 20/$d_г$	4÷30	20	26,5	23	1½"	1½"	–	55	177	60	80	40	50	100	70	3,0
ДВМ 25/$d_г$	4÷30	25	29	23	1½"	–	1"	55	157	62	80	40	50	100	70	2,9
ДНМ 25/$d_г$	4÷30	25	28	23	1½"	1½"	–	55	177	60	80	40	50	100	70	3,0
ДВМ 30/$d_г$	4÷30	30	31	23	1½"	–	1"	55	157	62	80	40	50	100	70	2,9
ДНМ 30/$d_г$	4÷30	30	30	23	1½"	1½"	–	55	177	60	80	40	50	100	70	2,9
ДВМ 40/$d_г$	4÷30	40	49	42,5	2½"	–	2"	80	200	85	100	35	69	120	90	5,9
ДНМ 40/$d_г$	4÷30	40	48	42,5	2½"	2½"	–	80	223	81	100	35	69	120	90	6,0
ДВМ 50/$d_г$	4÷30	50	51,5	42,5	2½"	–	2"	80	200	85	100	35	69	120	90	5,7
ДНМ 50/$d_г$	4÷30	50	50	42,5	2½"	2½"	–	80	223	81	100	35	69	120	90	5,8

* Кроме указанных особо

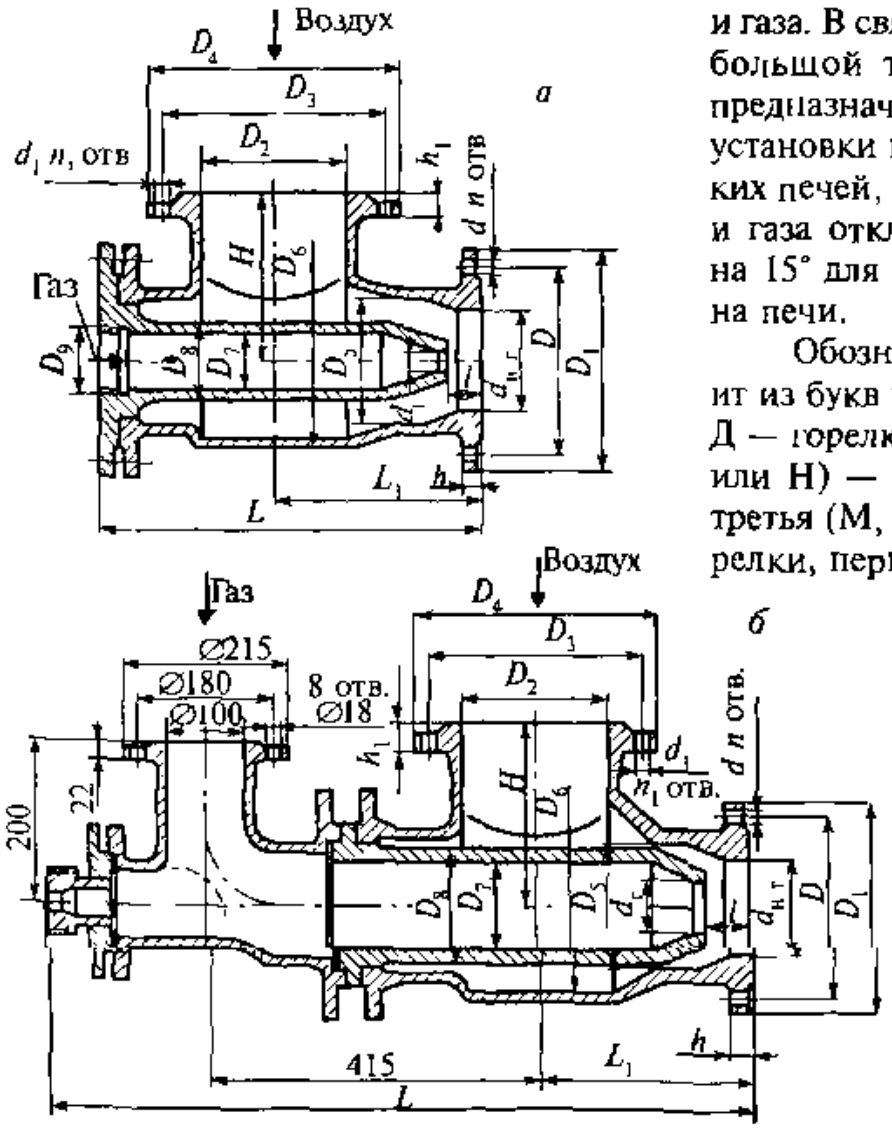


Рис. 4.3. Горелки типа «труба в трубе» средней тепловой мощности:
а — с присоединением газопровода на резьбе, исполнение I;
б — с присоединением газопровода при помощи колена, исполнение II

и газа. В связи с тем, что горелки большой тепловой мощности предназначены в основном для установки на торцах методических печей, оси подводов воздуха и газа отклонены от вертикали на 15° для удобства их монтажа на печи.

Обозначение горелок состоит из букв и цифр: первая буква Д — горелка дутьевая, вторая (В или Н) — исполнение горелки, третья (М, С или Б) — серия горелки, первая цифра — диаметр

Конструктивные размеры (мм)* горелок типа "труба в трубе" средней

Обозначение горелки	Исполнение	$d_г$	$d_{н\,г}$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
ДВС 60/$d_г$	I	10–80	60	130	160	80	160	195	76	180	35
ДНС 60/$d_г$	I	10–80	60	130	160	80	160	195	65	180	35
ДВС 70/$d_г$	I	10–80	70	150	185	100	180	215	85	180	35
ДНС 70/$d_г$	I	10–80	70	170	205	100	180	215	103	240	70
ДВС 90/$d_г$	I	10–80	90	170	205	125	210	245	98	180	35
ДНС 90/$d_г$	I	10–80	90	170	205	125	210	245	110	240	70
ДВС 110/$d_г$	I	10–80	110	225	260	150	240	280	136	240	70
ДНС 110/$d_г$	II	10–80	110	225	260	150	240	280	142	240	100
ДВС 130/$d_г$	I	10–80	130	225	260	200	295	335	150	240	70
ДНС 130/$d_г$	II	10–80	130	225	260	200	295	335	150	240	100
ДВС 150/$d_г$	I	10–80	150	255	290	200	295	335	170	240	70
ДНС 150/$d_г$	II	10–80	150	225	260	200	295	335	160	240	100

* Кроме указанных особо.

Конструктивные размеры (мм) горелок типа "труба в трубе" большой

Обозначение горелки	$d_г$	$d_{н\,г}$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9
ДВБ 200/$d_г$	30–200	200	295	335	300	400	440	100	180	215	340	100
ДНБ 200/$d_г$	30–200	200	295	335	300	400	440	150	240	280	340	125
ДВБ 225/$d_г$	30–200	225	325	365	300	400	440	100	180	215	340	100
ДНБ 225/$d_г$	30–200	225	325	365	300	400	440	150	240	280	340	125
ДВБ 250/$d_г$	30–200	250	350	390	350	460	500	100	180	215	390	100
ДНБ 250/$d_г$	30–200	250	350	390	350	460	500	150	240	280	390	125
ДВБ 275/$d_г$	30–200	275	395	435	350	460	500	100	180	215	390	100
ДНБ 275/$d_г$	30–200	275	395	435	350	460	500	150	240	280	390	125
ДВБ 300-I/$d_г$	30–200	300	400	440	400	495	535	100	180	215	440	100
ДНБ 300-I/$d_г$	30–200	300	400	440	400	495	535	150	240	280	440	125
ДВБ 300-II/$d_г$	30–200	300	400	440	450	550	590	150	240	280	490	125
ДНБ300-II/$d_г$	30–200	300	400	440	450	550	590	250	350	390	490	225
ДВБ 325/$d_г$	30–200	325	430	485	450	550	590	150	240	280	490	125
ДНБ 325/$d_г$	30–200	325	430	485	450	550	590	250	350	390	490	225
ДВБ 350/$d_г$	30–200	350	460	500	500	600	640	150	240	280	540	125
ДНБ 350/$d_г$	30–200	350	460	500	500	600	640	250	350	390	540	225
ДВБ 375/$d_г$	30–200	375	480	530	500	600	640	150	240	280	540	125
ДНБ 375/$d_г$	30–200	375	480	530	500	600	640	250	350	390	540	225
ДВБ 400/$d_г$	30–200	400	515	565	500	600	640	150	240	280	540	125
ДНБ 400/$d_г$	30–200	400	515	565	500	600	640	250	350	390	540	225
ДВБ 425/$d_г$	30–200	425	530	580	500	600	640	150	240	280	540	125
ДНБ 425/$d_г$	30–200	425	530	580	500	600	640	250	350	390	540	225

* В зависимости от диаметра сопла.

Таблица 4 3

тепловой мощности типа ДВС и ДНС (рис. 4.3)

D_8	D_9	d	d_1	H	h	h_1	L	L_1	ℓ	Количество отверстий		Масса горелки, кг
										n	n_2	
50	1 1/2"	14	18	150	16	16	370	200	40	4	4	23,8
50	1 1/2"	14	18	150	16	22	370	200	40	4	4	23,3
50	1 1/2"	18	18	150	18	22	370	200	40	8	8	24,8
90	2 1/2"	18	18	200	18	22	473	260	59	8	8	47,3
50	1 1/2"	18	18	150	18	24	370	200	40	8	8	27,3
90	2 1/2"	18	18	200	18	24	473	260	50	8	8	49,3
90	2 1/2"	18	22	200	20	24	473	260	50	8	8	54,3
120	–	18	22	200	20	23	853	260	50	8	8	80,0
90	2 1/2"	18	22	200	20	26	473	260	50	8	8	55,3
120	–	18	22	200	20	26	853	260	50	8	8	83,0
90	2 1/2"	18	22	200	22	26	473	260	50	8	8	57,3
120	–	18	22	200	22	26	853	260	50	8	8	82,0

Таблица 4.4

тепловой мощности типа ДВБ и ДНБ (рис. 4.4)

D_{10}	d	H	H_1	h	h_1	h_2	L	L_1	L_2	L_3	Количество отверстий			Масса горелки, кг
											n	n_1	n_2	
130	18	350	200	26	28	22	555	1333	1075	500	8	12	8	223
155	22	350	200	26	28	24	555	1333	1075	500	8	12	8	237
130	18	350	200	26	28	22	555	1333	1075	500	8	12	8	237
155	22	350	200	26	28	24	555	1333	1075	500	8	12	8	241
130	18	350	200	28	30	22	555	1333	1075	500	12	16	8	250
155	22	350	200	28	30	24	555	1333	1075	500	12	16	8	264
130	18	350	200	24	30	22	555	1333	1075	500	12	16	8	258
155	22	350	200	24	30	24	555	1333	1075	500	12	16	8	272
130	18	350	200	28	28	22	555	1333	1075	500	12	16	8	280
155	22	350	200	28	28	24	555	1333	1075	500	12	16	8	293
155	22	400	220	28	28	24	670	1553	1295	600	12	16	8	331
255	22	400	220	28	28	28	670	1553	1295	600	12	16	12	410–431*
155	22	400	220	26	28	24	670	1553	1295	600	12	16	8	335
255	22	400	220	26	30	28	670	1553	1295	600	12	16	12	414–432*
155	22	400	220	30	30	24	670	1553	1295	600	12	16	8	377
255	22	400	220	30	30	28	670	1553	1295	600	12	16	12	456–474*
155	22	400	220	30	30	24	670	1553	1295	600	12	16	8	381
255	22	400	220	30	30	28	670	1553	1295	600	12	16	12	460–477*
155	22	400	220	32	30	24	670	1553	1295	600	16	16	8	390
255	22	400	220	32	30	28	670	1553	1295	600	16	16	12	469–484*
155	22	400	220	30	30	24	670	1553	1295	600	16	16	8	392
255	22	400	220	30	30	28	670	1553	1295	600	16	16	12	471–485*

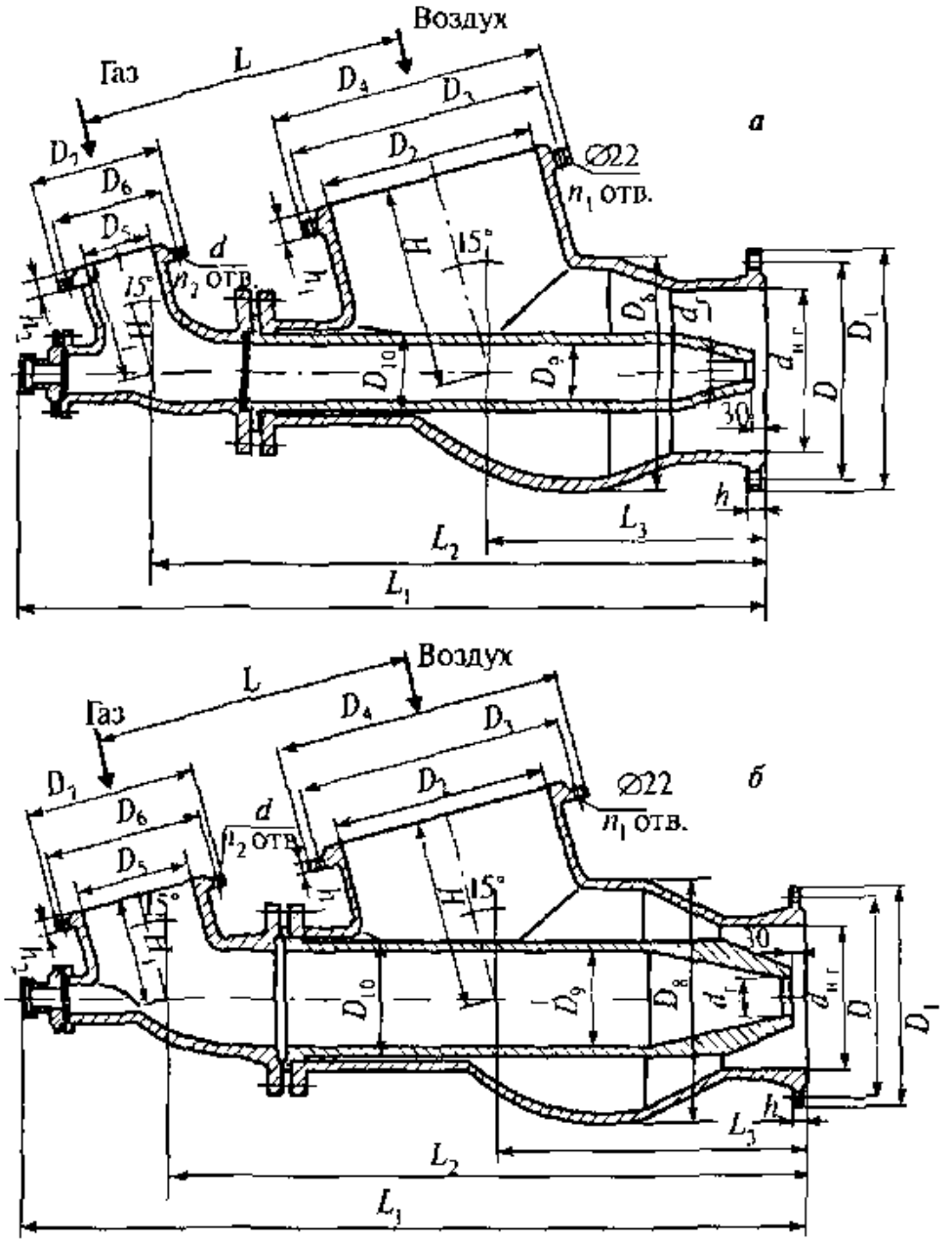


Рис. 4.4. Горелки типа "труба в трубе" большой тепловой мощности
а – для газов с высокой теплотой сгорания; *б* — для газов с низкой теплотой сгорания

носика горелки (мм), вторая (через косую) — диаметр газового сопла (мм). Например, обозначение горелки ДНС 110/60 означает: дутьевая горелка типа "труба в трубе" средней тепловой мощности для газа с низкой теплотой сгорания, имеющая диаметр носика 110 мм и диаметр газового сопла 60 мм.

4.3. ВЫБОР ГОРЕЛОК ТИЛА "ТРУБА В ТРУБЕ"

Обычно бывают заданы параметры газа ($Q_н^р$, $\rho_{0г}$, $T_г$, $p_г$), воздуха ($t_в$, $p_в$, α) и пропускная способность горелки по газу $V_{0г}$.

Выбор горелки состоит в определении ее размера, диаметра газового сопла и проверке получаемых скоростей воздуха и газа на выходе из горел-

ки и в подводящих трубопроводах, а также скорости газовоздушной смеси на выходе из горелки.

Сначала определяют необходимое количество воздуха по формуле (4.1), пользуясь данными для газа из приложения I.

Типоразмер горелки выбирают по графикам на рис. 4.5 – 4.7 в зависимости от количества воздуха и его давления перед горелкой.

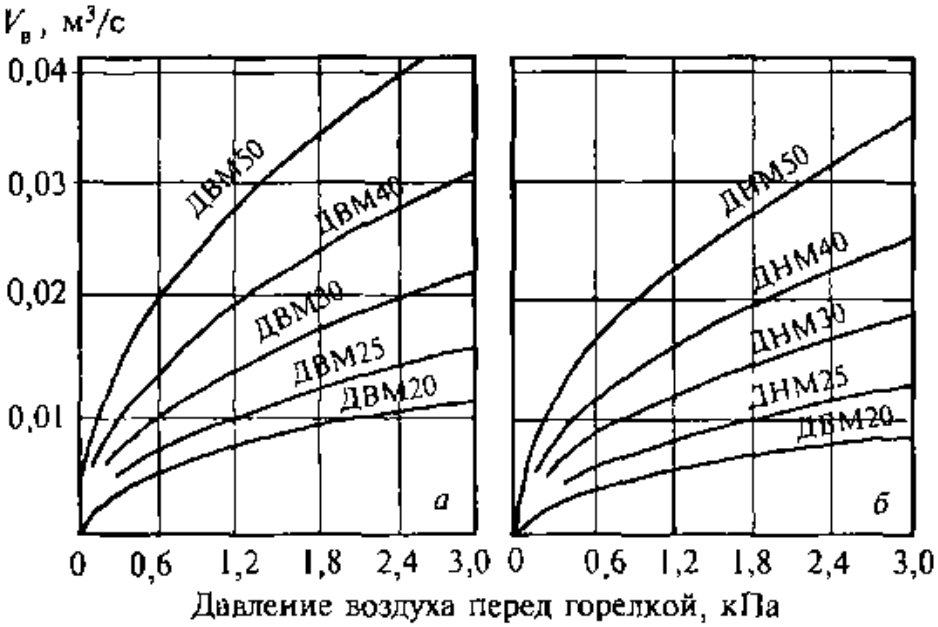


Рис. 4.5. Пропускная способность по воздуху горелок типов ДВМ и ДНМ: *а* – типа ДВМ; *б* – типа ДНМ (температура воздуха 20 °С)

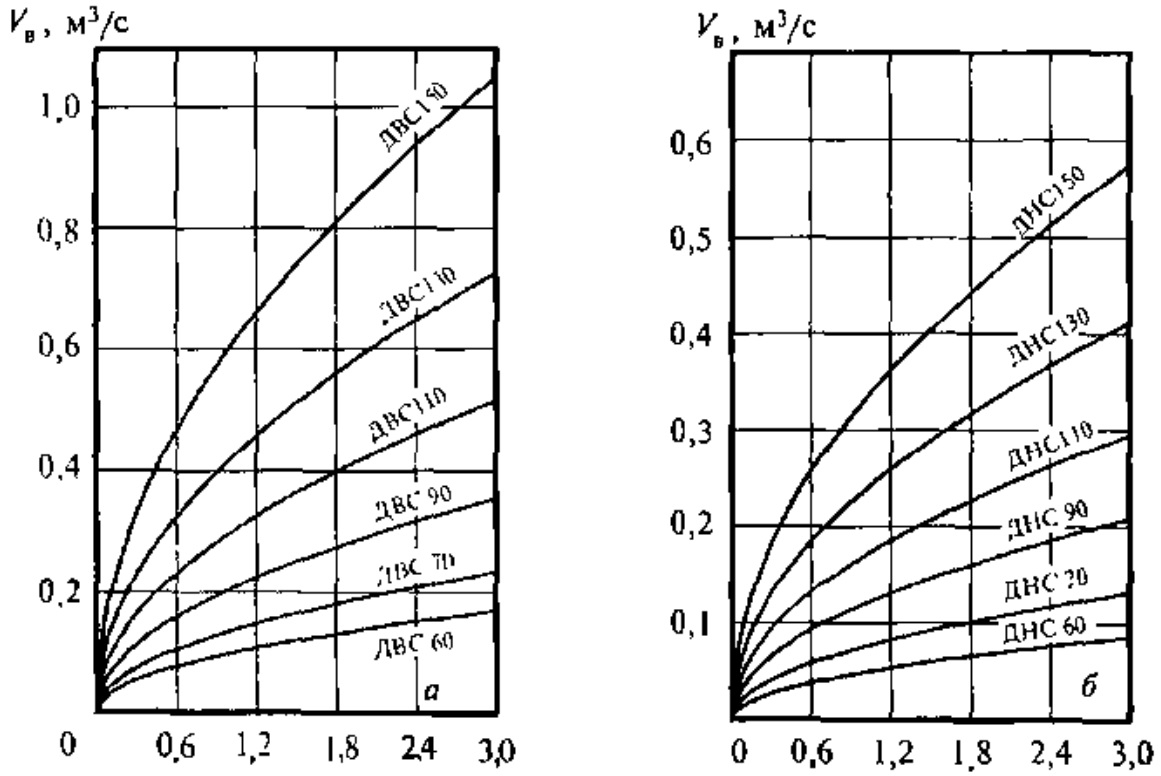


Рис. 4.6. Пропускная способность по воздуху горелок типов ДВС и ДНС: *а* — типа ДВС; *б* — типа ДНС (температура воздуха 20 °С)

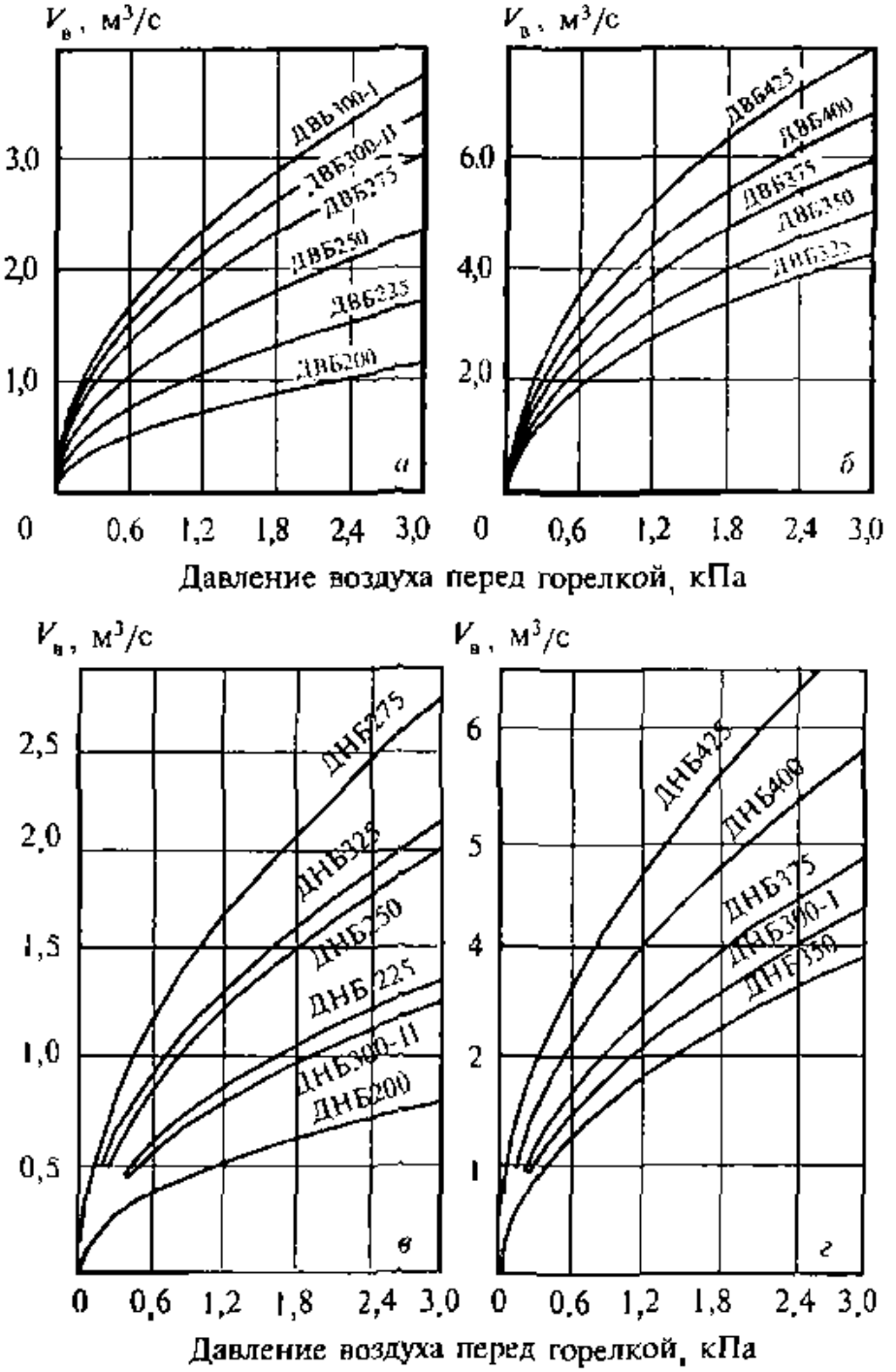


Рис. 4 7. Пропускная способность по воздуху горелок типов ДВБ и ДНБ:
а — типа ДВБ 200 – ДВБ 300; *б* — типа ДВБ 325 – ДВБ 425; *в* – типа ДНБ 200–ДНБ 325; *г* – типа ДНБ 300–ДНБ 425 (температура воздуха 20 °С)

Графики на рис. 4.5 – 4.7. построены для холодного воздуха (20 °С). При температуре воздуха t горелку следует выбирать по расчетному количеству воздуха $V_в$ (м³/с):

$$V_в = V_{0в} k_t, \qquad (4\ 7)$$

где k_t – поправка на температуру, равная $\sqrt{T/293}$.

Значение k_t можно найти по графику (рис. 4.8).

Диаметр газового сопла для газа с температурой 20 °С также определяют по графикам (рис. 4.9) в зависимости от необходимой пропускной способности горелкн по газу и его давления перед горелкой.

Для газа с температурой t и плотностью $\rho_{0г}$ горелку следует выбирать по расчетному количеству газа $V_г$ (м^3/с):

$$V_г = V_{0г} k_t k_\rho, \tag{4.8}$$

где k_ρ — поправка на плотность газа, равная $\sqrt{\rho_{0г}/\rho_{расч}}$. Значение поправки на плотность можно найти по графику на рис. 4.10.

После выбора горелкн проверяют скорости газа и воздуха на подводе к горелке и на выходе из нее.

Скорость газа и воздуха на подводе к горелке и газовоздушной смеси на выходе из горелкн удобно определять, исходя из количества среды и диаметра подвода или носика горелки по номограмме (приложение II).

Соотношение действительных скоростей газа и воздуха на выходе из горелки можно определить по формуле

$$\vartheta = \omega_г k_{tг} / (\omega_в k_{tв}), \tag{4.9}$$

где $\omega_г$ и $\omega_в$ — скорости газа и воздуха (м/с), определяемые по графику (рис. 4.11) в зависимости от давления перед горелкой и плотности газа; $k_{tг}$ и $k_{tв}$ — поправки на температуру соответственно для газа и воздуха, определяемые по приведенной выше формуле или по графику (рис. 4.8).

Рекомендуемые значения скоростей приведены в табл. 4.1.

На примерах можно показать ход выбора нормализованных горелок типа "труба в трубе" конструкции Стальпроекта.

Пример 1. Подобрать горелку для сжигания $V_{0г} = 0{,}25$ м^3/с смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р = 8{,}4$ МДж/ /м^3. Давление газа перед горелкой 4 кПа, воздуха 1,3 кПа. Газ и воздух холодные (20 °С), $\alpha = 1{,}15$.

По рис. I-9 приложения I находим плотность газа $\rho_{0г} = 1{,}01$ кг/м^3 и $L_0 = 1{,}88$ м^3/м^3 газа.

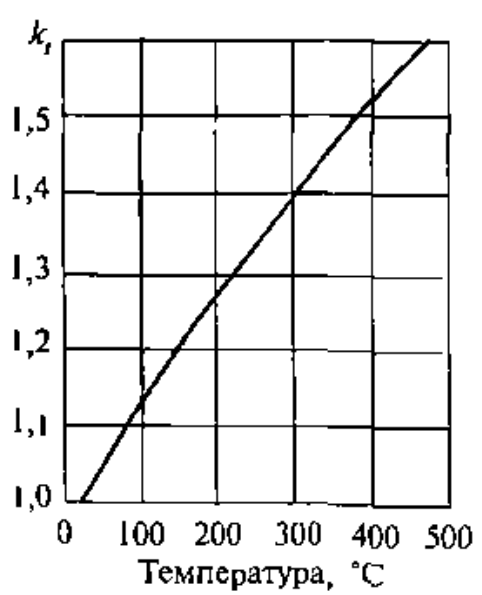


Рис. 4.8. Поправка на температуру k_t

Количество воздуха

$$V_{0в} = 1{,}15 \cdot 1{,}88 \cdot 0{,}25 = 0{,}54 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Поправки на температуру и плотность равны единице, поэтому расчетные расходы газа и воздуха равны заданным.

По графику (рис. 4.7, *в*) находим, что заданным давлению и количеству воздуха соответствует горелка ДНБ 200.

По графику (рис. 4.9, *б*) выбираем сопло $d_с = 70$ мм.

По графику (рис. 4.11) находим $\omega_г = 71$ м/с и $\omega_в = 43$ м/с. Отношение скоростей $\omega_г : \omega_в = 1{,}65$.

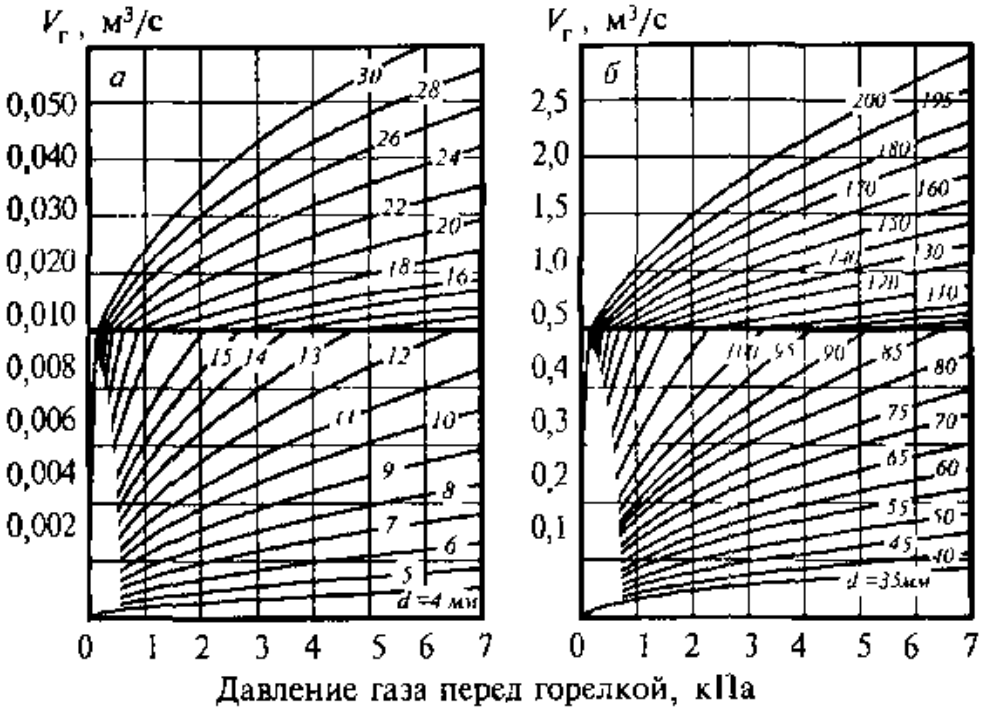


Рис. 4.9. Пропускная способность по газу горелок типа «труба в труба» с диаметром газового сопла:
а — 4–30 мм; б — 35–200 мм (температура газа 20 °С, $\rho_{расч}$ = 1 кг/м³)



Рис. 4.10. Поправка на плотность $k_р$

По номограмме (приложение II) определяем:

скорость газа в подводящем газопроводе D = 150 мм при количестве газа 0,25 м³/с равна 14,5 м/с;

скорость воздуха в подводящем воздухопроводе D = 300 мм при $V_{0в}$ = 0,54 м³/с равна 7,7 м/с;

скорость газовоздушной смеси на выходе из горелки при $d_{н.т}$ = 200 мм и количестве газовоздушной смеси 0,25 + 0,54 = 0,79 м³/с составляет 25 м/с.

Все скорости находятся в приемлемых пределах.

Пример 2. Подобрать горелку для сжигания $V_{0г}$ = 0,02 м³/с природного газа с $Q_н^р$ = 34,95 МДж/м³. Давление газа перед горелкой 5 кПа, давление воздуха 1,0 кПа. Газ холодный (20 °С), воздух подогрет до 350 °С; α = 1,1.

По рис. I-21 приложения I находим $\rho_{0г}$ = 0,77 кг/м³ и L_0 = 9,25 м³/м³ газа.

Необходимое количество воздуха

$$V_{0в} = 1{,}1 \cdot 9{,}25 \cdot 0{,}02 = 0{,}204 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику (рис. 4.8) k_t = 1,46.

Расчетное количество воздуха

$$V_в^{расч} = 0{,}204 \cdot 1{,}46 = 0{,}298 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику (рис. 4.6, *а*) по расчетному количеству воздуха и заданному его давлению подбираем горелку ДВС 110.

Для таза $k_t = 1$, $k_\rho = 0{,}88$ (см. рис. 4.10).

Тогда

$$V_г = 0{,}02 \cdot 0{,}88 = 0{,}0176 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику (рис. 4.9, *а*) по расчетному количеству газа и заданному его давлению выбираем сопло $d_г = 17$ мм.

По графику (рис. 4.11) находим $\omega_{0г} = 90$ м/с и $\omega_{0в} = 38$ м/с. Отношение скоростей по формуле (4.9)

$$\vartheta = 90 : 38 : 1{,}46 = 1{,}62.$$

По номограмме (приложение II) определяем скорости: в подводящем газопроводе ($D_9 = 2^1/_2''$) 6 м/с, в воздухопроводе ($D_2 = 150$ мм) 11 м/с и на выходе газовоздушной смеси из горелки ($d_{нг} = 110$ мм) 25 м/с. Скорость газа в газопроводе занижена, поэтому подводящие трубопроводы можно сделать меньшего диаметра с переходом на $2^1/_2''$ у горелки.

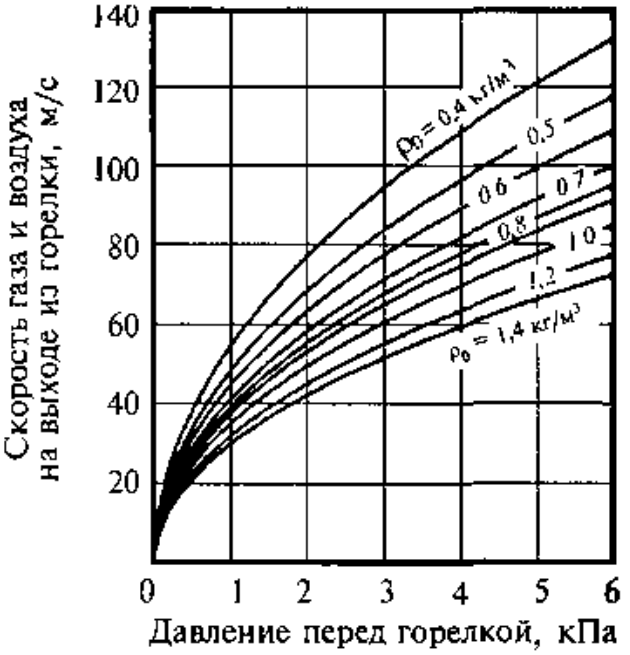


Рис. 4.11. Скорость истечения газа и воздуха из горелки

Пример 3. Подобрать горелку для сжигания $V_{0г} = 1{,}0$ м³/с смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р = 8{,}4$ МДж/м³. Давление газа перед горелкой 6 кПа, давление воздуха 0,5 кПа. Газ холодный (20 °С), воздух подогрет до 400 °С; $\alpha = 1{,}2$; $\rho_{0г} = 1{,}01$ кг/м³; $L_0 = 1{,}88$ м³/м³ газа.

$$V_{0в} = 1{,}2 \cdot 1{,}88 \cdot 1{,}0 = 2{,}26 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для воздуха по графику (рис. 4.8) $k_t = 1{,}52$.

Тогда

$$V_в^{расч} = 2{,}26 \cdot 1{,}52 = 3{,}44 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Из графика (рис. 4.7, *г*) видно, что при заданном количестве и давлении воздуха подобрать горелку ДНБ для газа с низкой теплотой сгорания нельзя. Поэтому по графику (рис. 4.7, *б*) выбираем горелку ДВБ 425.

Для газа k_t и k_ρ равны единице, поэтому расчетное количество газа равно заданному.

По графику (рис. 4.9, *б*) выбираем газовое сопло ($d_г = 120$ мм).

По графику (рис. 4.11) находим $\omega_г = 86$ м/с и $\omega_в = 27$ м/с. Отношение скоростей по формуле (4.9)

$$\vartheta = 86 : 27 : 1{,}52 = 2{,}1.$$

По номограмме (приложение II) определяем скорости, м/с: в подводящем газопроводе ($D_5 = 150$ мм) 55, в воздухопроводе ($D_2 = 500$ мм) 11 и на выходе газовоздушной смеси из горелки ($d_{нг} = 425$ мм) 22. Из этих данных видно, что завышена скорость в подводящем газопроводе, поэтому диаметр его должен быть увеличен с переходом на $D = 150$ мм вблизи горелки.

Пример 4. Определить пропускную способность горелки ДВС 150/40 при подаче через нее коксового газа с $Q_н^р = 17{,}1$ МДж/м^3. Давление газа перед горелкой 3,5 кПа, давление воздуха 1,1 кПа. Газ холодный (20 °С), воздух подогрет до 300 °С; $\alpha = 1{,}15$.

По рис. 1-17 приложения 1 определяем $\rho_{0г} = 0{,}48$ кг/м^3 и $L = 4{,}06$ м^3/м^3 газа.

По графику (рис. 4.6, *а*) определяем для горелки ДВС 150 при заданном даалении воздуха $V_в^{расч} = 0{,}65$ м^3/с. Для воздуха $k_t = 1{,}4$ (см. рис. 4.8).

Пропускная способность горелки по воздуху

$$V_{0в} = V_в^{расч}/k_t = 0{,}65 : 1{,}4 = 0{,}47 \text{ м}^3/\text{с}. \qquad (4.10)$$

Пропускная способность горелки по газу

$$V_{0г} = V_{0в}/\alpha L_0 = 0{,}47 : (1{,}15 \cdot 4{,}06) = 0{,}1 \text{ м}^3/\text{с}. \qquad (4.11)$$

Для газа $k_t = 1$ и по графику (рис. 4.10) $k_р = 0{,}69$.

Тогда

$$V_г^{расч} = 0{,}1 \cdot 0{,}69 = 0{,}069 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику (рис. 4.9, *б*) определяем, что для газового сопла $d_г = 40$ мм необходимое по расчету количество газа будет обеспечено при давлении газа перед горелкой 3 кПа.

По графику (рис. 4.11) определяем $\omega_г = 91$ м/с и $\omega_в = 41$ м/с.

По формуле (4.9)

$$\vartheta = 91 : 41 : 1{,}4 = 1{,}6$$

По номограмме (приложение 11) определяем скорости, м/с: в подводящем газопроводе ($D_у = 2^1/_2{}''$) 27, в воздухопроводе ($D_2 = 200$ мм) 15 и на выходе газовоздушной смеси из горелки ($d_{н.г} = 150$ мм) 33.

Все скорости находятся в приемлемых пределах.

Выбор горелок облегчают данные испытаний, приведенные в табл. 4.4 и на графиках рис. 4.12 – 4.14.

4.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАКЕЛА ГОРЕЛОК ДВБ И ДВС

Характеристики факела рассмотрены на примере опытных данных, полученных во ВНИИМТ при сжигании природного газа горелками ДВМ, ДВС и ДВБ 250 в футерованных и охлаждаемых камерах сгорания.

Горелки работают с огнеупорными туннелями, имеющими малый угол раскрытия. В связи с тем, что потоки газа и воздуха при истечении в пределах горелочного туннеля не успевают образовать горючую смесь, воспламенение топлива в туннеле не происходит. Поэтому стабилизирующего воздействия на факел туннель практически не оказывает. При розжиге горелки зона воспламенения может перемещаться по длине туннеля. После разогрева футеровки топочной камеры стабилизация факела обеспечивается за счет рециркулирующих продуктов сгорания

Аэродинамика факела характеризуется прямоструйным течением. Начальный угол раскрытия факела на длине его 5–7 калибров горелки со-

ставляет от 27 до 40°. Он практически не изменяется при изменении тепловой нагрузки и температуры подогрева воздуха и несколько увеличивается при увеличении диаметра газового сопла. При уменьшении диаметра газового сопла и при постоянной тепловой мощности дальнобойность факела уменьшается.

Наиболее длинный факел наблюдается при приблизительно равных скоростях истечения газа и воздуха. Для горелки ДВБ250 это соответствует работе с соплом диаметром 75 мм. Длина факела, оцененная по величине химического недожога на его оси, составляет около 16 калибров горелки, или около 4 м. Характер изменения концентрации газов, химического недожога и температур по длине факела горелки ДВБ250 с различными соплами показан на рис. 4.15.

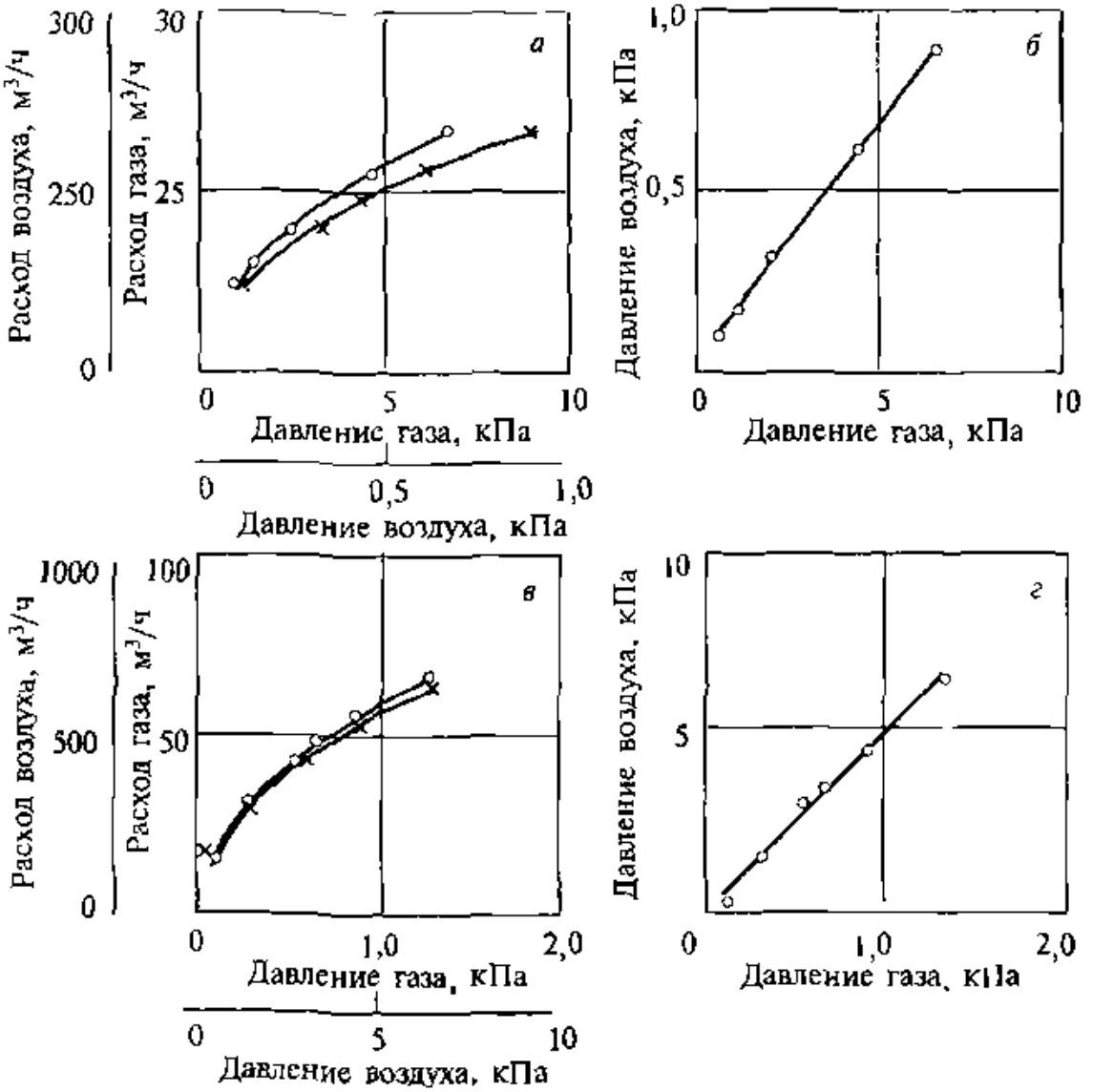


Рис. 4.12. Расходные и регулировочные характеристики горелок:

ДВС 60/10:

а — ○ – $V_г = f(P_г)$; × – $V_в = f(P_в)$

б — ○ – $P_г = f(P_г)$

ДВС 70/16:

в — ○ – $V_г = f(P_г)$; × – $V_в = f(P_в)$

г — ○ – $P_в = (P_г)$

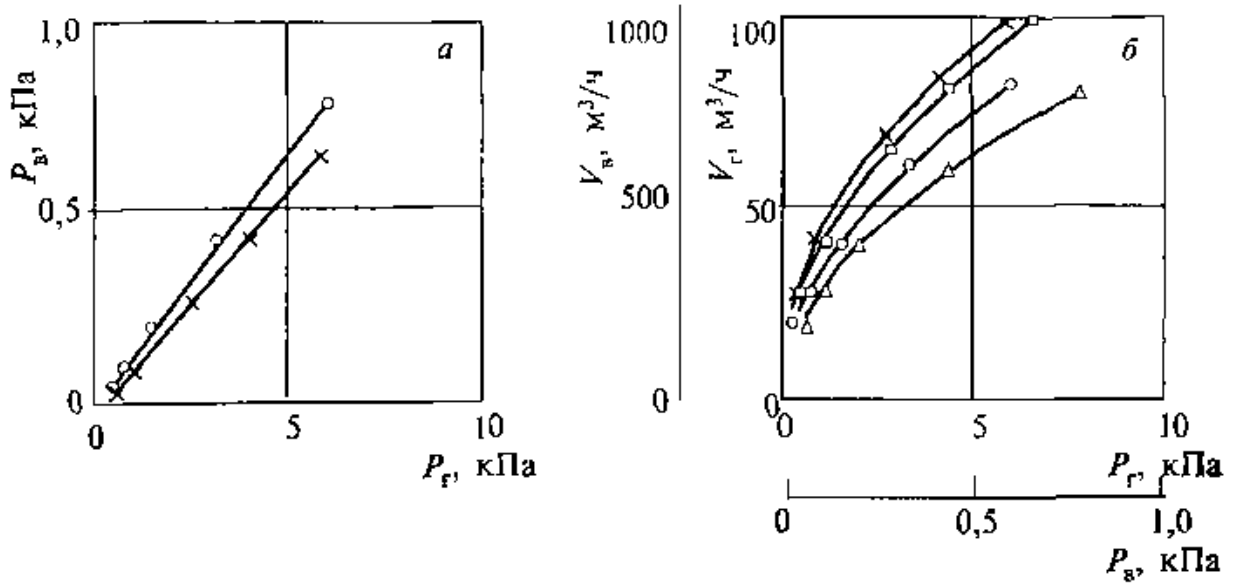


Рис. 4.13. Расходные и регулировочные характеристики горелок ДВС 90/16 и ДВС 110/18:
а — зависимость давления воздуха от давления газа (◐ — ДВС 90/16; × — ДВС 110/18), *б* — зависимость расходов газа (▵ — ДВС 90/16; ▫ — ДВС 110/18) и воздуха (○ — ДВС 90/16; × — ДВС 110/18) от их давлений



Рис. 4.14. Расходные и регулировочные характеристики горелок ДВБ:
а — зависимость давления воздуха от давления газа (▵ — ДВБ 225; ○ — ДВБ 275; × — ДВБ 250); *б* — зависимость расходов газа (◐ — ДВБ 275; × — ДВБ 250; • — ДВБ 225) и воздуха (▫ — ДВБ 275; ▵ — ДВБ 250; ▽ — ДВБ 225) от их давлений

Технические характеристики горелок ДВС и ДВБ по результатам испытаний приведены в табл. 4.5.

Такой же характер горения наблюдается и при сжигании природного газа горелками ДВМ и ДВС. Особенностью факела является значительно большая относительная длина зоны отрыва воспламенения от носика горелки и значительно большая относительная длина горелочного туннеля. При этом, несмотря на отрыв факела от горелки интенсивное перемешива-

Таблица 4.5

Технические характеристики горелок ДВС и ДВБ по результатам испытаний

Показатели	Типоразмер горелки						
	ДВС 60/10	ДВС 70/16	ДВС 90/16	ДВС 110/18	ДВБ 225	ДВБ 250	ДВБ 275
Тепловая мощность, МВт	0,335	0,66	0,79	0,989	2,49	4,48	5,47
Расход газа, $м^3/ч$	33,5	66	80	100	252	454	554
Давление газа, кПа	6,42	1,275	5,88	5,88	2,16	2,254	2,352
Расход воздуха, $м^3/ч$	336	645	800	1000	2312*	4191*	5101*
Давление воздуха, кПа	0,888	6,36	0,79	0,64	0,784	0,784	0,833
Коэффициент расхода воздуха	1,05	1,05	1,09	1,09	1,05	1,05	1,05
Коэффициент рабочего регулирования	4,0	4,0	4,0	4,0	3,15	3,11	3,15
Длина факела, м	0,75	0,78					
Общий уровень звукового давления, дБ	83	85					
Конструктивные размеры, мм:							
диаметр газового сопла	10	16	16	18			
диаметр носика горелки	60	70					
диаметр горелочного камня	370	330					
длина горелочного камня	610	580					

* Температура воздуха — 503 К.

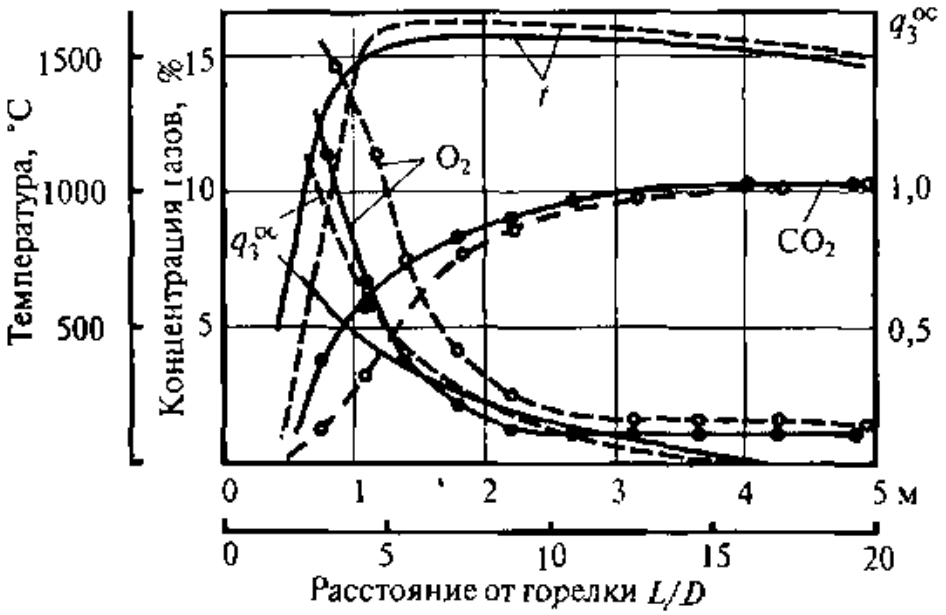


Рис. 4.15. Изменение концентрации газов, химического недожога и температуры по оси факела горелки ДВБ 250 при диаметре газового сопла 70 мм (сплошные линии) и 22 мм (штриховые линии)

ние в туннеле происходит на большой длине и смесь поступает в камеру сгорания более подготовленной. Характер выгорания газа в факеле горелки ДВМ 25 показан на рис. 4.16. Интенсивность выгорания газа горелок ДВБ и ДВМ по длине факела также зависит от режима работы горелки (рис. 4.17).

Для горелок ДВ любых типоразмеров изменение коэффициента расхода воздуха, температуры подогрева воздуха, тепловой нагрузки существенно изменяет выгорание газа по длине факела.

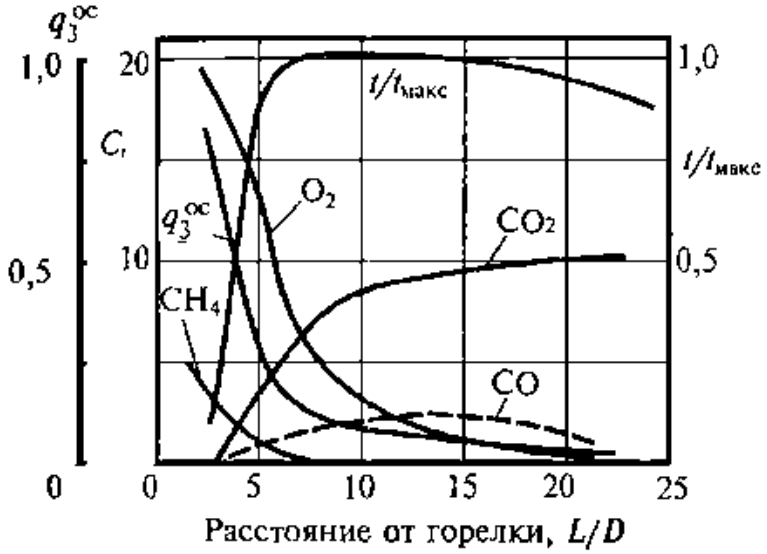


Рис. 4.16. Изменение концентрации газов (C_i, %), химического недожога (q_3^{oc}) и относительной температуры по оси факела горелки ДВМ

В соответствии с выгоранием газа изменяются и теплообменные характеристики факела по его длине: температура продуктов сгорания, излучательная способность факела и локальная теплоотдача от факела к тепловоспринимающим поверхностям (рис. 4.18–4.19). Приведенные характеристики факела следует рассматривать как качественные показатели, так как они получены в камерах сгорания различного размера.

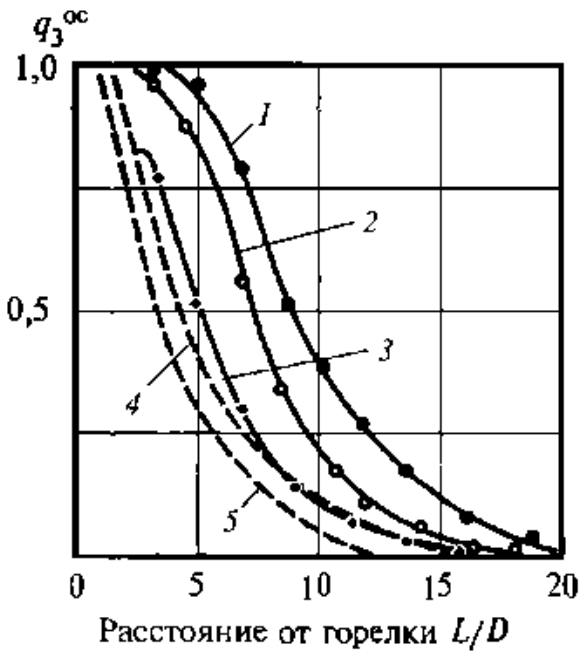


Рис. 4.17. Изменение химического недожога горелок ДВ при изменении режимных параметров.

1 — горелка ДВМ 25, $V_г$ = 5,4 м³/ч, α = 1,15, $t_в$ = 30 °С; *2* — то же, $t_в$ = 360 °С; *3* — то же, α = 1,3, $t_в$ = 30 °С; *4* — горелка ДВБ 250, $V_г$ = 240 м³/ч, α = 1,1, $t_в$ = 25 °С; *5* — то же, $t_в$ = 360 °С

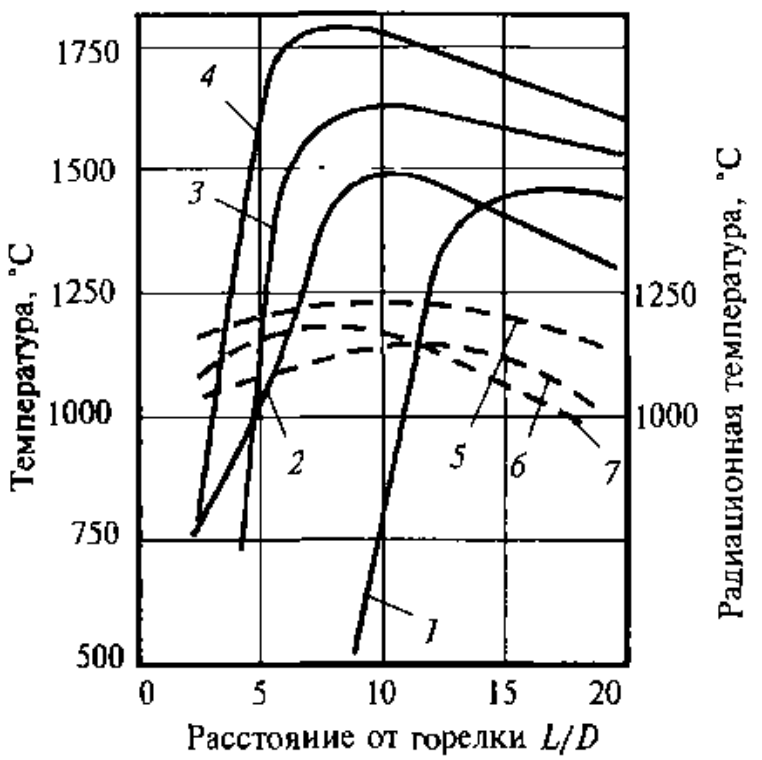


Рис. 4.18. Температура по оси факела:
1 — горелка ДВМ25, $t_в = 30$ °С, максимальный теплоотвод; *2* — то же, $t_в = 360$ °С; *3* — минимальный теплоотвод, $t_в = 30$ °С; *4* — то же, $t_в = 360$ °С; *5* — радиационная температура факела горелки ДВБ250, $V_г = 240$ м³/ч, $t_в = 25$ °С, *6* — то же, $V_г = 120$ м³/ч; *7* — то же, $t_в = 360$ °С

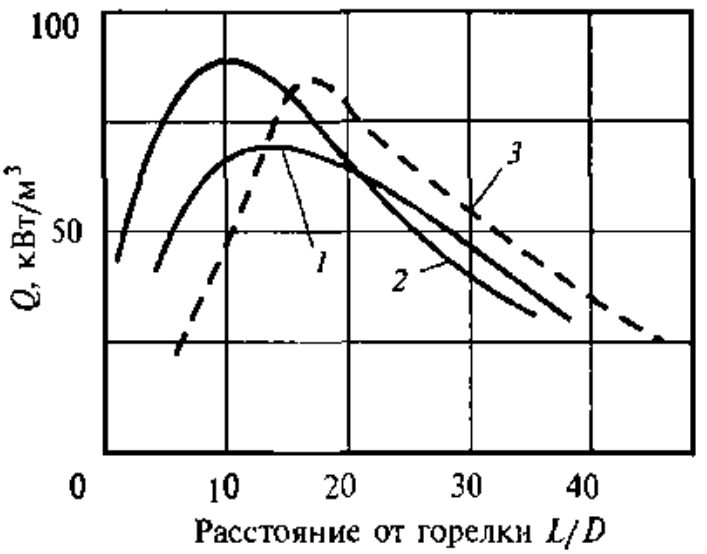


Рис 4.19. Интенсивность теплоотдачи к стенкам камеры сгорания:
1 — с горелкой ДВМ25, $t_в = 30$ °С; *2* — то же, $t_в = 360$ °С; *3* — с горелкой ДВС 70, $t_в = 30$ °С

4.5. ГОРЕЛКИ С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ВОЗДУХА ТИПА ДШ

Горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ, разработанные Стальпроектом, имеют повышенную устойчивость факела благодаря выполнению газового сопла в виде плохообтекаемого тела, за которым создается зона стабилизации факела. В результате горелки могут работать как с обычным, так и с повышенным коэффициентом расхода воздуха. Область применения таких горелок — печи с высокотемпературными и низкотемпературными режимами, технологические режимы, требующие повышенных и переменных коэффициентов расхода воздуха.

Нормализованные горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ разработаны шести типоразмеров, с номинальной теплопроизводительностью от 30 до 300 кВт.

Номинальная теплопроизводительность определяется при давлении газа перед горелкой 5 кПа, воздуха 3 кПа и $\alpha = 1{,}3$. Горелки предназначены для сжигания холодного природного газа с холодным воздухом. Рекомендуемое максимальное давление газа перед горелкой 6 кПа, минимальное, определяемое возможностью работы автоматики регулирования, 0,1 кПа.

Нормализованные горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ конструкции Стальпроекта показаны на рис. 4.20, а их конструктивные размеры приведены в табл. 4 6.

Горелка типа ДШ состоит из литого корпуса и газовой трубы с соплом. С помощью фланца горелка крепится к облицовке печи. Газо- и воздухо-

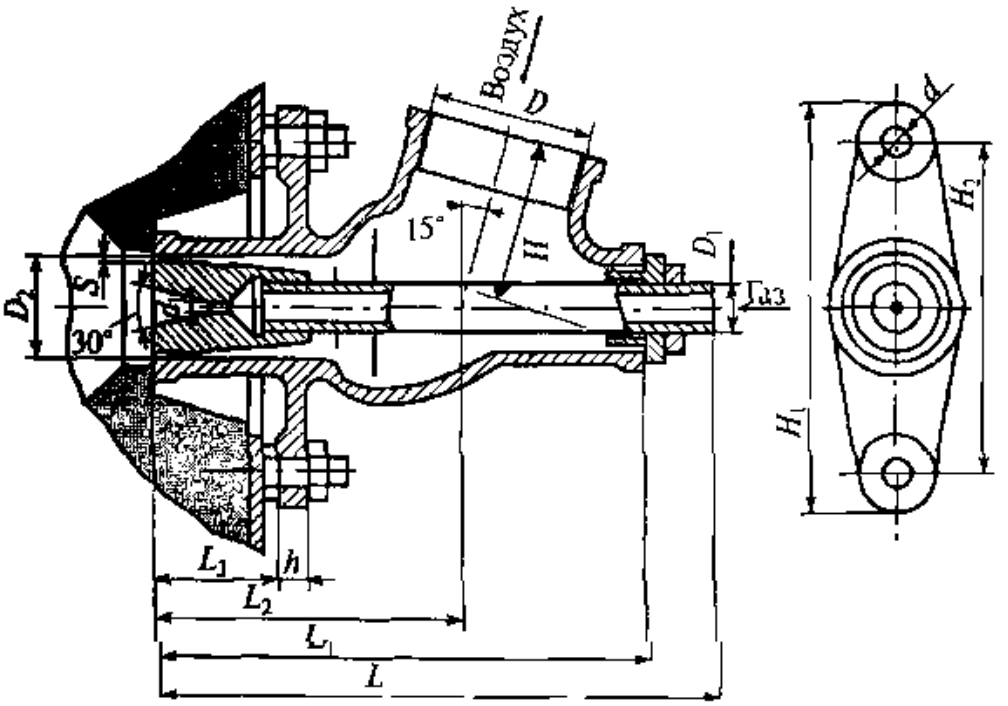


Рис. 4.20. Горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ

Таблица 4.6

Конструктивные размеры (мм)* горелок с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ (рис. 4.20)

Обозначение параметра	ДШ 25	ДШ 40	ДШ 63	ДШ 100	ДШ 160	ДШ 250
Номинальная теплопроизводительность, кВт	30	45	75	115	185	300
Размер, мм:						
D	2″	2″	3″	3″	4″	4″
D_1	1/2″	1/2″	3/4″	3/4″	1″	1″
D_2	40	40	55	55	70	70
$d_г$	3	4	5	6	8	10
d	14	14	18	18	22	22
H	70	70	90	90	120	120
H_1	210	210	240	240	315	315
H_2	150	150	170	170	225	225
h	10	10	12	12	15	15
L	250	250	300	300	390	390
L_1	200	200	255	255	330	330
L_2	130	130	160	160	210	210
L_3	54	54	67	67	90	90
S	1,5	2,5	3	5	6,5	10,5
Масса горелки, кг	2,60	2,60	5,50	5,50	9,60	9,60

* Кроме указанных особо

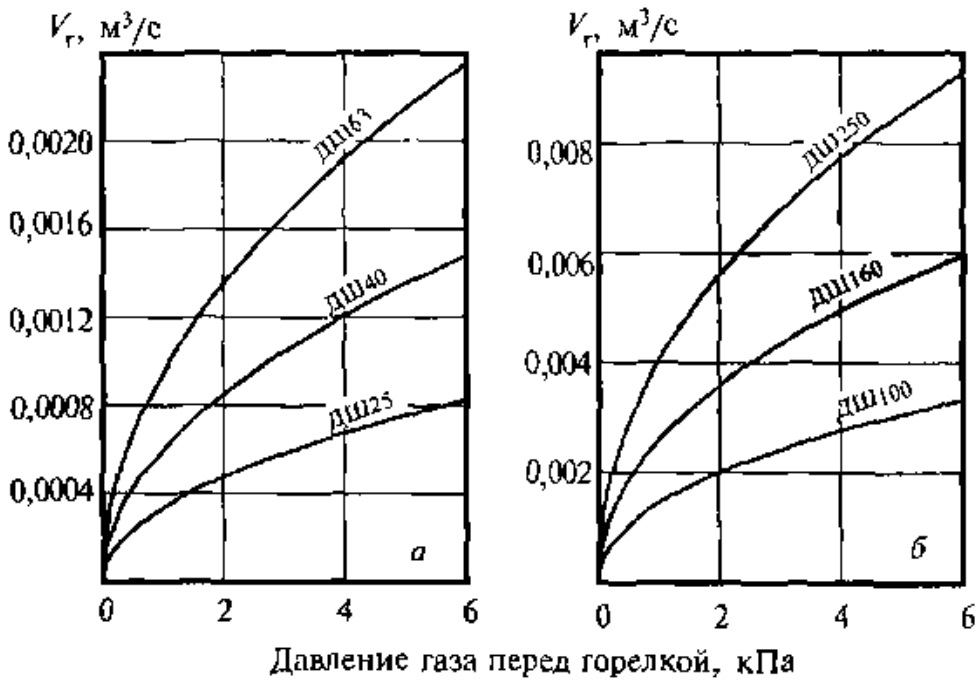


Рис 4.21. *Пропускная способность по газу горелок типа* **ДШ**:
а — **ДШ** 25 — ДШ 63, *б* — **ДШ** 100 — ДШ 250

провод крепится к горелке на резьбе. Для удобства монтажа горелки на печи воздухопровод отклонен от вертикали на 15°. Зазор между носиком горелки и горелочным камнем уплотняется огнеупорной массой

Обозначение горелки состоит из букв и цифры. Буквы обозначают: Д — горелка дутьевая, Ш — с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха; цифра характеризует типоразмер горелки. Например, обозначение «Горелка ДШ 63» следует понимать «Горелка дутьевая с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха номинаяьной теплопроизводительностью 75 кВт».

Выбор горелок типа ДШ производят следующим образом.

Сначаяа по графикам (рис. 4.21) в зависимости от заданной пропускной способности по газу и его давления перед горелкой определяют типоразмер горелки. Затем по графикам (рис. 4.22) для выбранного типоразмера горелки в зависимости от необходимого количества воздуха определяют его дааление перед горелкой. Графики построены для холодных газа и воздуха (20 °С).

Пример. Подобрать горелку для сжигания $V_{0г} = 0{,}0015$ м^3/с природного газа с $Q_н^р = 34{,}95$ МДж/м^3; дааяение газа перед горелкой 2,5 кПа, $\alpha = 1{,}50$.

По рис. 1-21 приложения 1 определяем $L_0 = 9{,}25$ м^3/м^3 газа.

$$V_{0в} = 1{,}5 \cdot 9{,}25 \cdot 0{,}0015 = 0{,}0208 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По рис. 20, *а* при пропускиой способности горелки по газу 0,0015 м^3/с и его давлении перед горелкой 2,5 кПа выбираем горелку ДШ 63.

По рис. 4.22, *а* для горелки ДШ 63 при количестве воздуха 0,0208 м^3/с определяем, что его давление должно быть 1,9 кПа.

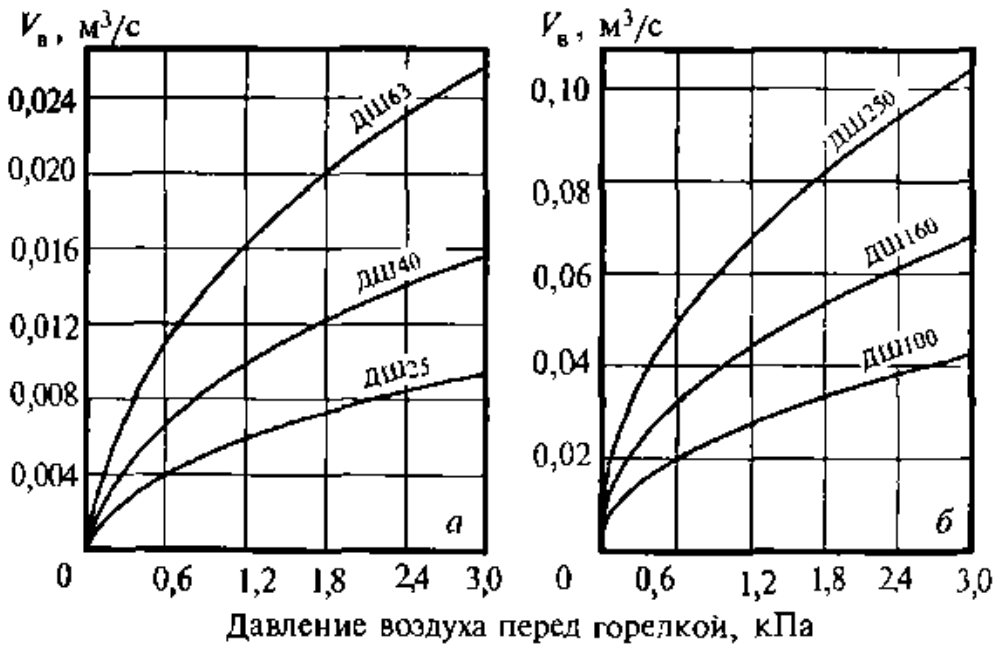


Рис. 4.22. Пропускная способность по воздуху горелок типа ДШ:
а — ДШ 25 – ДШ 63; *б* — ДШ 100 – ДШ 250

Испытаниям на соответствие стандартам подвергались две горелки: ДШ 63 и ДШ 100. Основные данные испытаний приведены в табл. 4.7, а расходные и регулировочные характеристики на рис. 4.23.

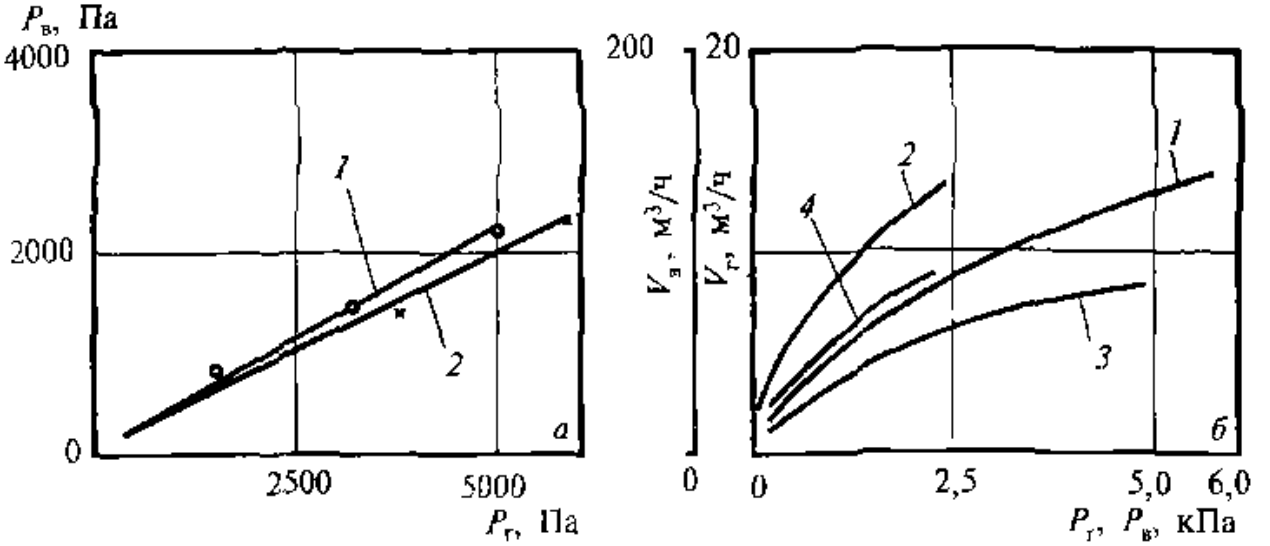


Рис. 4.23 Расходные и регулировочные характеристики горелок ДШ 63 и ДШ 100: *а* — зависимость давления воздуха от давления газа (*1* – ДШ 63, *2* – ДШ 100); *б* — зависимость расходов газа (*1* – ДШ 100, *3* – ДШ 63) и воздуха (*2* – ДШ 100, *4* – ДШ 63) от их давлений

Таблица 4.7

Данные испытаний горелок ДШ

Технические характеристики	Тип горелки	
	ДШ 63	ДШ 100
Номинальная тепловая мощность, МВт	0,088	0,140
Номинальный расход газа, м³/ч	8,8	14,0
Номинаяьное давление газа, кПа	5,0	5,7
Номинальный расход воздуха, м³/ч	89	140
Номинаяьное давление воздуха, кПа	2,25	2,45
Коэффициент расхода воздуха:		
максимальный	1,60	1,50
минимальный	1,04	1,02
Коэффициент рабочего регулирования по тепловой мощности	5,5	7,0
Длина факела, мм	600	750

4.6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАКЕЛА ГОРЕЛОК ТИПА ДШ

Изменение характеристик факела показано на примере работы горелки тепловой мощностью 300 кВт в охлаждаемой камере сгорания ВНИИМТ диаметром 0,53 м и длиной 4,0 м с горелочной амбразурой длиной 0,46 м.

Так же, как и у горелок типа ДВ, воспламенение факела происходит на некотором расстоянии от сопла в пределах горелочного туннеля. Образующаяся за плохообтекаемым телом застойная зона не обеспечивает достаточно мощный очаг воспламенения и при определенных соотношениях скоростей газа и воздуха происходит вынос зоны воспламенения в топочный объем. При этом если топочный объем имеет футерованные разогретые стенки, то воспламенение смеси обеспечивается за счет рециркулирующих продуктов горения. В камерах сгорания с охлаждаемыми стенками это приводит к погасанию пламени. Для проектного варианта горелки стабильное воспламенение смеси в горелочном туннеле обеспечивается, если соблюдается неравенство скоростей истечения воздуха $\omega_в$ и газа $\omega_г$

$$\omega_в \le 5 + 0{,}54\omega_г. \qquad (4.12)$$

Диапазон устойчивой работы горелки может быть расширен без изменения ее основного размера D_2 за счет уменьшения ширины канала S для прохода воздуха.

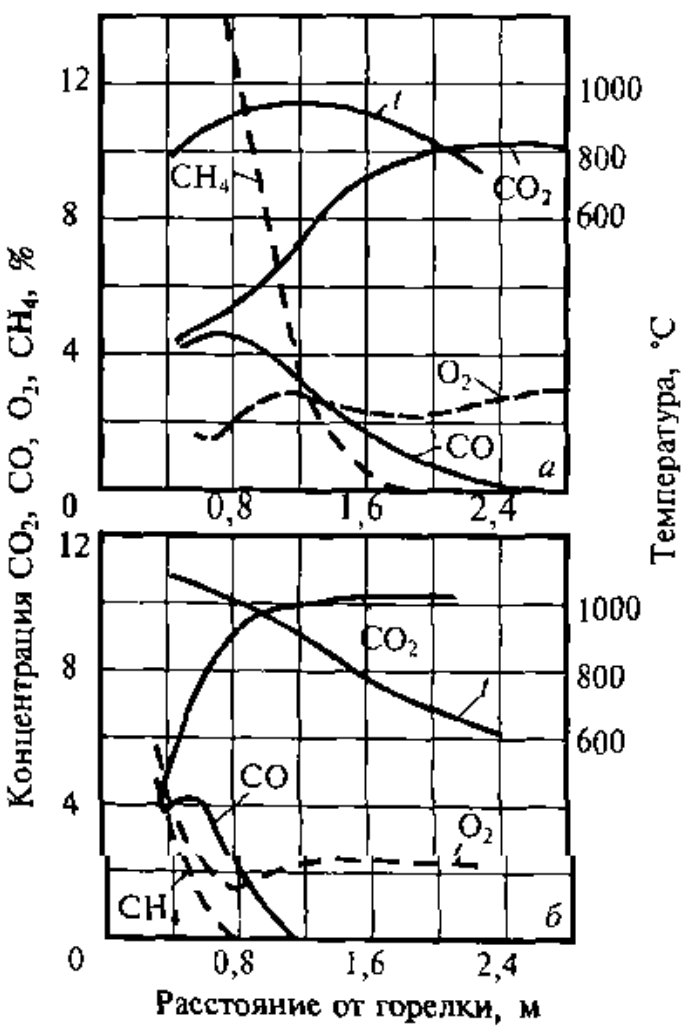


Рис 4.24. Концентрация газов и температура по оси факела горелки ДШ 250 при номинальной нагрузке и $\alpha = 1{,}1$:
а — при стабилизации зоны горения на срезе сопла; *б* — при отрыве зоны стабилизации от сопла

Характерные режимы горения газа в факеле горения ДШ при двух вариантах стабилизации пламени: непосредственно на срезе сопла горелки и при горении с отрывом зоны стабилизации от горелки на расстояние до 150 мм — показаны на рис. 4.24. При стабилизированной зоне воспламенения на срезе сопла процессы перемешивания менее интенсивны, так как потоки газа и воздуха разделены кольцевой поверхностью горения, затрудняющей взаимную диффузию компонентов. При этом на оси факела наблюдается повышенная концентрация

метана. Догорание остатков горючих элементов завершается на длине около 2,5 м. При отрыве зоны стабилизации от сопла на начальном участке туннеля происходит интенсивное перемешивание, что приводит к существенному укорачиванию факела (рис. 4.24, *б*).

Регулирование коэффициента расхода воздуха в факеле осуществляется за счет изменения расхода газа при постоянном расходе воздуха. Горелки позволяют увеличивать коэффициент расхода воздуха до 2,8. При этом горение практически на 60 % заканчивается в пределах горелочного туннеля.

4.7. ДЛИННОПЛАМЕННЫЕ ГОРЕЛКИ ВНИИМТ-Д

Горелки ВНИИМТ-Д предназначены для сжигания природного газа с холодным и подогретым воздухом. В серию ВНИИМТ-Д входит 10 горелок, охватывающих диапазон тепловых мощностей от 0,17 до 400 $МВ_т$. Горелки разработаны в сварном исполнении. Общий вид горелок показан на рис. 4.25, а их конструктивные размеры приведены в табл. 4.8.

Горелки ВНИИМТ-Д состоят из корпуса в виде тройника с подводом в него воздуха сбоку, а газа — с торца по оси центральной газоподводящей трубы с наконечником на конце. Наконечник съемный, с плоским стабилизатором, за которым в застойной зоне поддерживается постоянный очаг воспламенения. В эту зону подаются газ и воздух встречными струями через наклонные отверстия, просверленные в стабилизаторе, а также в виде вихрей, отрывающихся от основных потоков газа и воздуха.

Центральное газовое сопло крепится к торцу корпуса фланцем и может выниматься из горелки вместе с наконечником. Оно центрируется относительно выходного отверстия горелки и воздушного потока с помощью распорных шпилек.

Наружный торец газоподводящей трубы закрыт фланцем-заглушкой. На нем может быть установлено смотровое отверстие или патрубок для ввода мазутной форсунки.

Расчетные скорости выхода газа и воздуха из горелок приняты $\omega_г \approx \omega_в = 8{,}0$ м/с, поэтому горелки имеют малое сопротивление по газовому и воздушному трактам.

Для удобства регулирования расходов газа и воздуха в зависимости от их давления перед горелкой предусмотрена установка подпорных шайб либо непосредственно в корпусе горелки, либо перед входными патрубками.

Горелки устанавливаются на стенках топок с амбразурами, имеющими угол раскрытия 6–8°.

Испытаниям подвергались три горелки ВНИИМТ-Д2, Д6 и Д8. Основные характеристики факела этих горелок при различных режимах сжигания приведены на рис. 4.26–4.28.

Подробное описание особенностей развития факела горелок ВНИИМТ-Д приведено в [2, 3]. Вследствие малых и равных скоростей истечения газа и воздуха горение происходит в растянутом и светящемся факеле с образованием сажи.

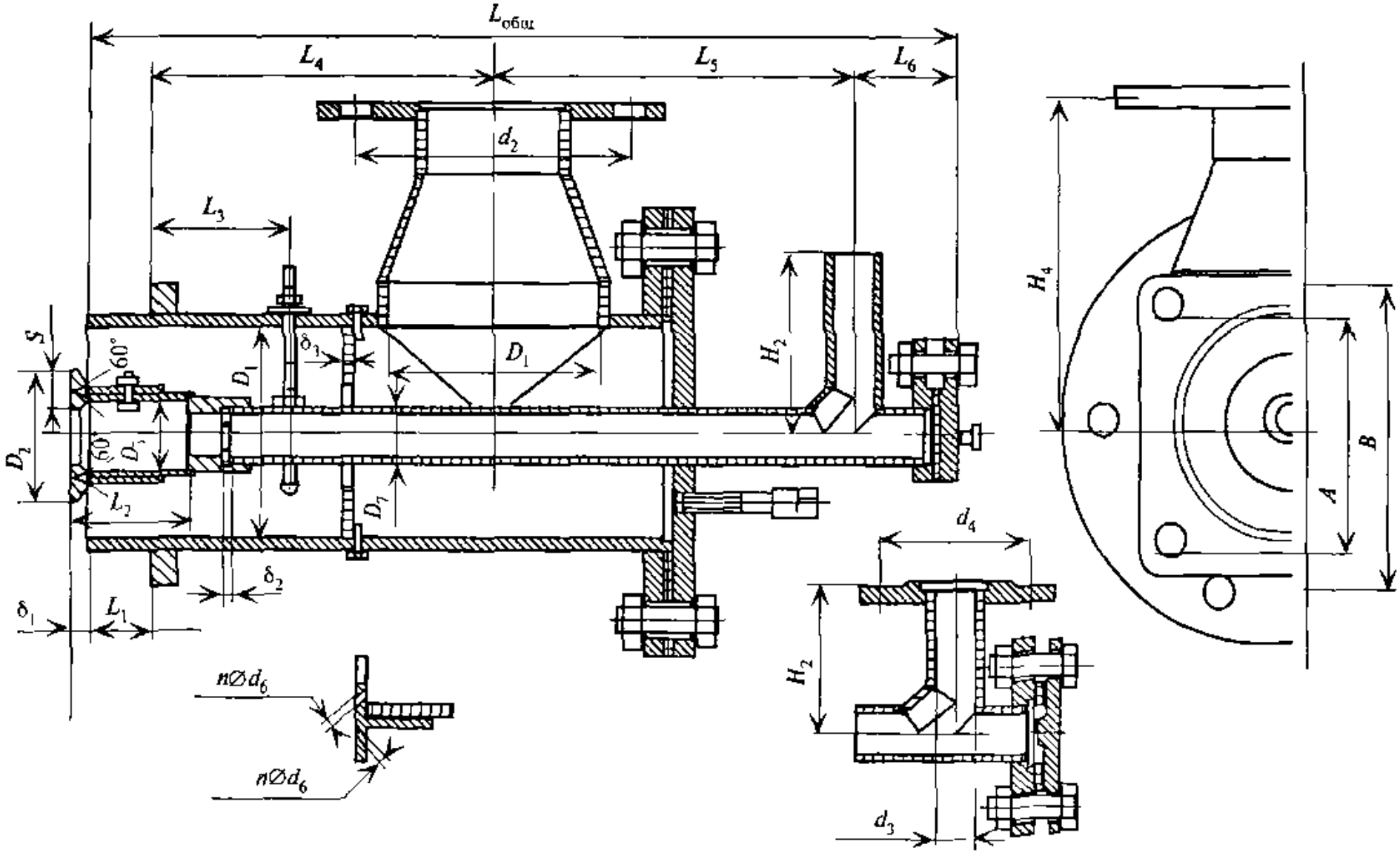


Рис 4 25. Горелка ВНИИМТ-Д

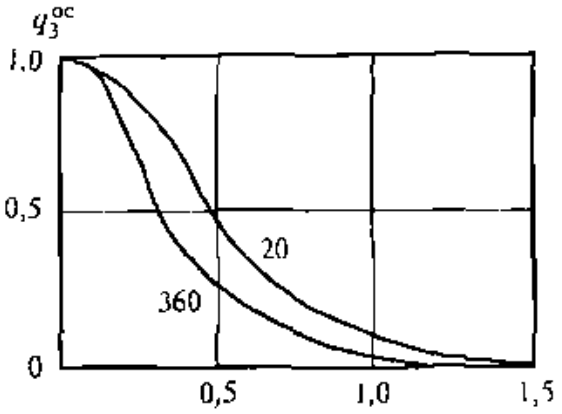


Рис. 4 26 Изменение химического недожога q_3^{oc} по длине факела горелки ВНИИМТ-Д2 при расходе газа 25 м³/ч, $\alpha = 1{,}1$ и различной температуре воздуха (°С), указанной цифрой на кривой

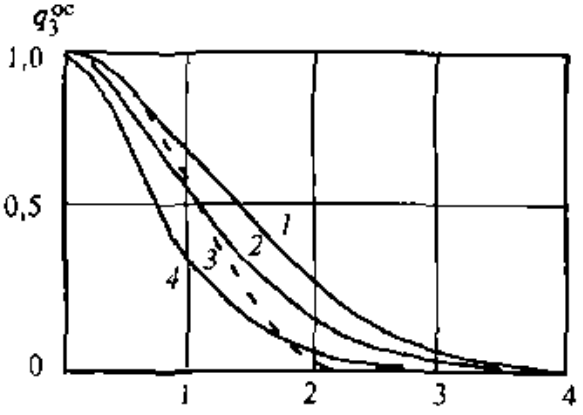


Рис. 4.27. Изменение химического недожога q_3^{oc} по длине факела горелки ВНИИМТ-Д6:
1 — $V_г = 140$ м³/ч, $\alpha = 1{,}0$, $t_в = 20$ °С; *2* — то же, $t_в = 20$ °С; *3* — $V_г = 115$ м³/ч, $\alpha = 1{,}05$; *4* — то же, $\alpha = 1{,}3$



Рис. 4.28. Изменение химического недожога q_3^{oc} по длине факела горелки ВНИИМТ-Д8 при коэффициенте расхода воздуха 1,05 и различном расходе газа (м³/ч), обозначенном цифрой на кривой

Поля концентраций элементарных газов в поперечных сечениях факела характеризуются несколькими зонами, которые явно выражены, особенно вблизи горелочной амбразуры. На оси факела расположена зона, обогащенная метаном и продуктами его разложения — CO и H_2. Вокруг этой зоны в соответствии с кольцевым потоком воздуха находится зона, обогащенная кислородом. Между этими зонами находится кольцевая зона интенсивного горения, отмеченная двумя максимумами концентрации CO_2. На периферии факела находится зона циркуляции продуктов сгорания.

По мере удаления от горелки поля концентраций отдельных газов в поперечных сечениях факела выравниваются, границы между отдельными зонами размываются и становятся менее четкими, пики CO_2 в зоне интенсивного горения (кольцевая поверхность) приближаются друг к другу и сливаются на оси факела. Концентрации отдельных газов после завершения горения приближаются к их конечным величинам при данном коэффициенте расхода воздуха. Интенсивность горения, концентрация и положение зон в поперечных сечениях факела зависят от режимных параметров.

По оси факела содержание горючих (химический недожог) непрерывно падает, а продуктов сгорания (CO_2) — растет. Содержание продуктов неполного сгорания и разложения газа (CO, H_2 и C) увеличивается с об-

разованием максимума на некотором расстоянии от горелки, затем уменьшается до нуля. Содержание кислорода в начале факела высокое даже при наличии большого количества горючих, что свидетельствует о перемешивании крупными молями при недостаточном молекулярном перемешивании. В конце факела содержание кислорода приближается к избыточному при данном коэффициенте расхода воздуха.

Максимальная неполнота сгорания наблюдается на оси факела, к периферии она убывает, при этом существует определенное соотношение между величинами среднего химического недожога по всему сечению и на оси

Таблица 4 8

Основные размеры длиннопламенных горелок ВНИИМТ-Д (рис. 4.25)

Обозначение параметра	Номер горелки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номинальная тепловая мощность, МВт	0,18	0,25	0,35	0,50	0,70	1,00	1,40	2,00	2,80	4,00
Размер, мм:										
L_1	30	35	40	50	60	70	80	95	115	135
L_2	50	60	75	90	120	140	176	230	280	330
L_3	64	76	90	108	128	148	180	213	260	307
L_4	157	187	222	266	316	363	443	525	640	755
L_5	150	183	216	248	284	364	363	443	505	640
L_6	63	59	73	79	100	120	136	136	130	157
$L_{общ}$	400	464	551	643	760	917	1022	1208	1390	1687
D_1	100	119	150	170	207	232	263	335	408	469
D_2	59	65	70	78	98	108	118	142	166	180
D_3	32	35	38	50	61	69	81	100	119	185
S	12,5	15	19	22	26	30	37,5	44	52	63
d_1	130	150	170	200	225	225	280	335	395	445
d_2	69	82	100	125	150	184	207	260	309	359
d_3	24	27,2	39,1	39,1	48	60	–	–	–	–
d_4	–	–	–	–	–	–	145	146	160	180
d_5	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4
d_6	6	6	6	6	9	9	9	12	12	12
δ_1	6	6	6	6	7	7	7	10	10	10
δ_2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
δ_3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	4
n	6	6	6	6	8	8	8	12	12	12
A	136	155	180	210	256	282	335	386	470	550
B	106	125	150	180	216	242	295	346	420	492
H_1	150	160	180	280	230	250	350	400	450	500
H_2	80	124	132	150	160	175	140	140	160	200
Масса горелки, кг	12	17	24	30	42	57	89	123	190	265

(рис. 4.29). С учетом этого величину химического недожога на оси можно принимать за характеристику полноты сгорания по длине факела.

С увеличением нагрузки полнота сгорания во всех случаях ухудшается — химический недожог на оси факела возрастает. Снижение нагрузки в 4 раза сокращает длину факела приблизительно до 0,6 от максимальной.

Увеличение коэффициента расхода воздуха и температуры его подогрева значительно сокращает длину факела, на которой сгорает основная масса газа.

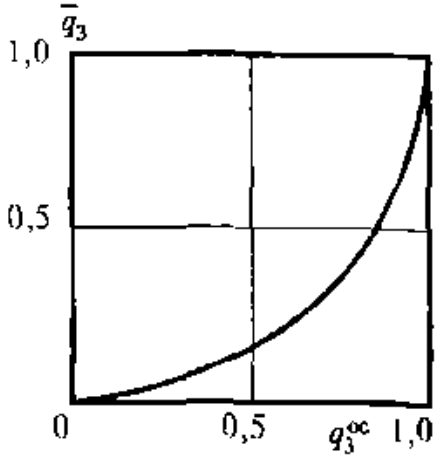


Рис 4.29. Зависимость среднего химического недожога от его величины на оси факела горелок ВНИИМТ-Д

В связи с тем, что горение на начальном участке факела происходит не интенсивно, стенки горелочной амбразуры имеют низкие температуры, но тем не менее они оказывают существенное влияние на процесс горения в целом.

Вследствие малых скоростей истечения газа и воздуха на выходе из горелок факел характеризуется малой настильностью.

Начальный угол раскрытия факела длиннопламенных горелок ВНИИМТ-Д составляет около 35°. Он существенно не изменяется при изменении тепловой нагрузки и коэффициента расхода воздуха. Но подогрев воздуха увеличивает угол раскрытия примерно до 45°.

При работе горелок в топочных камерах, у которых отношение площади поперечного сечения к площади сечения горелочной амбразуры составляет более 15, раскрывающийся факел создает разрежение у боковых и торцевых стен топки. Максимальное разрежение, создаваемое факелом длиннопламенных горелок, составляет 0,1—0,2 от величины динамического напора потока, выходящего из горелочной амбразуры.

В соответствии с характером выгорания происходит и изменение температуры по длине факела. Распределение температуры характеризуется наличием максимума, величина и положение которого относительно горелки зависит от тепловой нагрузки, коэффициента расхода воздуха, температуры подогрева воздуха и степени охлаждения факела. С ростом тепловой нагрузки максимум температуры повышается, а расстояние от его месторасположения до горелки увеличивается. С увеличением коэффициента расхода воздуха максимум температур приближается к горелке. Подогрев воздуха повышает максимум температуры и смещает его в сторону горелки. Основные закономерности изменения температуры в объеме факела горелок ВНИИМТ-Д8 приведены на рис. 4.30.

Характер изменения интенсивности теплоотдачи от факела к стенкам охлаждаемых камер сгорания во всех случаях сжигания газа одинаковый. В начале камеры теплоотдача увеличивается, на определенном расстоянии достигает максимума и к концу факела уменьшается. Пример изменения этой характеристики приведен на рис. 4.31 на основании испытаний горел-

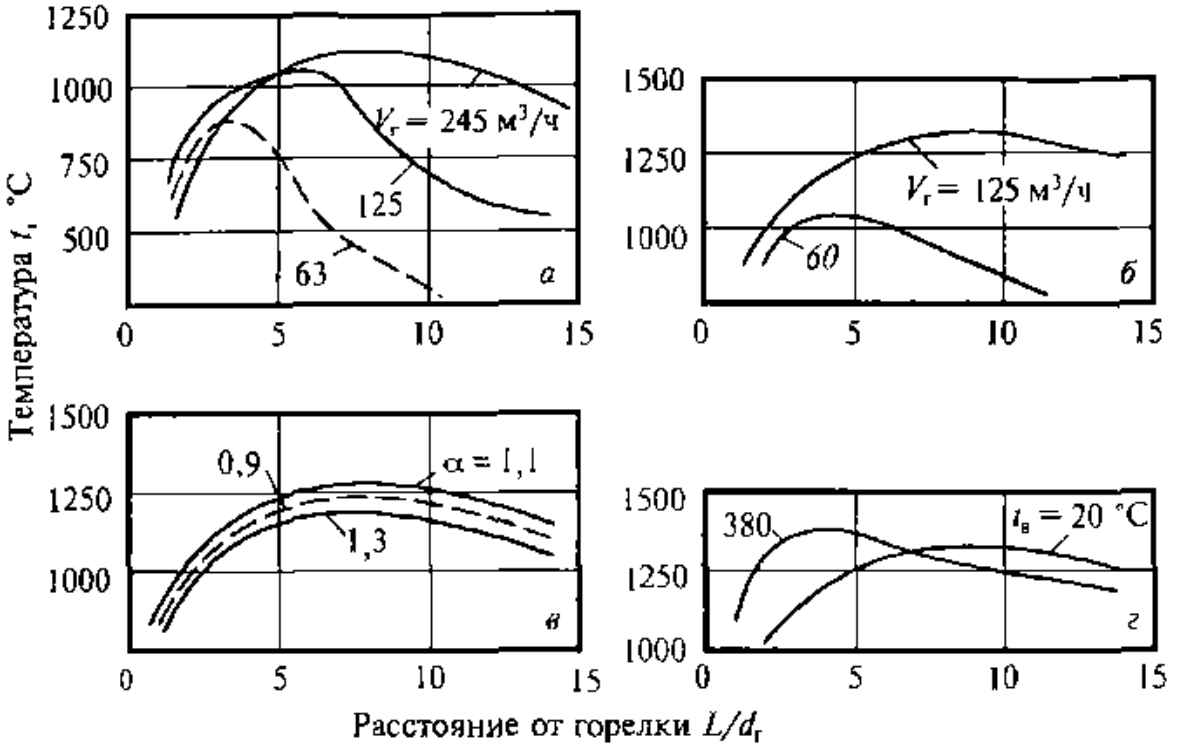


Рис. 4 30. Изменение температуры продуктов сгорания по оси факела горелки Д-8в зависимости от расхода газа в охлаждаемой камере (*а*); в футерованной (*б*), в зависимости от коэффициента расхода воздуха α (*в*) и температуры воздуха *t*(*г*), (цифрой у кривой обозначен изменяемый параметр)

ки ВНИИМТ-Д6 в камере сгорания диаметром 1,06 м и длиной 6,0 м Интенсивность теплоотдачи к стенкам камер повышается с увеличением нагрузки, при этом ее максимум отодвигается от горелки и тем значительней, чем больше размеры горелки и камеры (рис. 4.31, *а*).

Наибольшая интенсивность теплоотдачи к стенкам камер наблюдается при сжигании газа с α = 1,05 − 1,10. Заметного же влияния а (в проверенных пределах α = 0,9 − 1,3) на положение максимума теплоотдачи не обнаруживается.

Подогрев воздуха повышает интенсивность теплоотдачи и сдвигает ее максимум к горелке (рис. 4.31, *в*). Последнее более заметно также в камерах большого размера.

Доля тепла, переданного от факела, уменьшается с увеличением нагрузки (рис. 4.31, *г*), в отличие от интенсивности теплоотдачи к стенкам, которая с увеличением нагрузки возрастает (см. рис. 4.31, *а*).

Доля переданного от факела тепла, как и интенсивность теплоотдачи к стенкам, уменьшается при отклонении α от оптимального значения α = = 1,05−1,10) в ту и другую сторону (рис. 4.31, *д*).

При подогреве воздуха доля тепла, отбираемого от факела, увеличивается (рис. 4.31, *е*), особенно в камерах большого размера.

Горелки ВНИИМТ-Д работают практически без шума, имеют широкий диапазон регулирования тепловой перегрузки.

Однако при выборе горелок следует иметь в виду, что горелки малой мощности не допускают существенных перегрузок из-за возможности от-

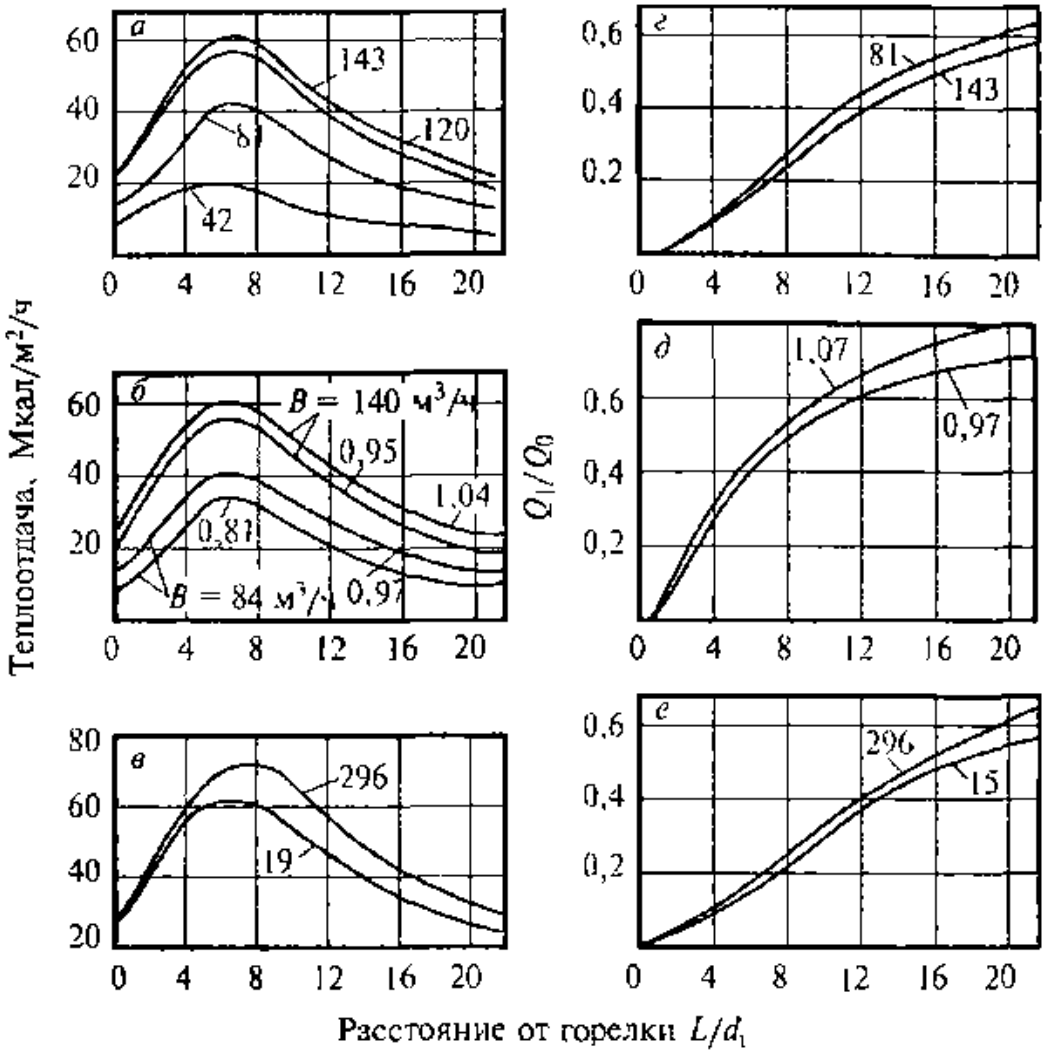


Рис 4.31. Теплоотдача к стенкам камеры диаметром 1060 мм с горелками Д-6 при различных нагрузках (*а*, *г*), коэффициенте расхода воздуха (*б*, *д*), температуре подогрева воздуха (*в*, *е*) (левая колонка — локальные значения, правая — суммарные)

рыва зоны воспламенения от стабилизатора. Отрыв зоны стабилизации от газового сопла представляет собой явление, характерное для горелок такого типа. Оно отмечалось и при описании работы горелок ДВ, ДС, ДШ.

Для горелок ВНИИМТ-Д предел стабильного воспламенения газа и горения его без отрыва от сопла может быть определен по опытным данным [4].

При нормальной работе горелки горение начинается непосредственно за стабилизатором. Фронт воспламенения устойчив и не меняет своего положения. При увеличении выходных скоростей газа и воздуха до определенных значений, зависящих от размеров горелок, а также при изменении соотношения их происходит срыв и погасание пламени.

В зависимости от того, скоростью какого потока воздействовать на факел, процесс срыва будет протекать различно, но на горелках разного размера картина срыва одинакова. При постоянной скорости воздуха и увеличении скорости газа, когда происходит срыв факела, около стабилизатора остается небольшое пламя, которое при дальнейшем увеличении скорости газа также затухает. При уменьшении скорости газа и постоянной скорости воздуха факел уменьшается и гаснет, причем при больших скоростях воздуха пога-

сание происходит мгновенно, а при малых — пламя уменьшается в размере и как бы прилипает к стабилизатору, растекается по нему, а затем гаснет.

При постоянной скорости газа и увеличении скорости воздуха факел также прижимается к стабилизатору. При больших скоростях воздуха горение происходит только в застойной зоне за стабилизатором, причем с большим химическим недожогом, затем происходит срыв. При уменьшении скорости воздуха факел удлиняется, становится светящимся и при больших скоростях газа срывается со стабилизатора мгновенно. При малых скоростях газа погасание факела аналогично погасанию свободно горящей струи

Для горелок серии ВНИИМТ-Д зависимость между средними скоростями газа и воздуха в выходном сечении горелки в момент срыва представлена на рис. 4.32, *а*. Пространство, ограниченное кривой, является областью устойчивой работы. Вне этой области факел гаснет. При увеличении размера горелок граница устойчивой работы расширяется и смещается в сторону высоких скоростей газа и воздуха. При одинаковом соотношении выходных скоростей газа и воздуха горелки большого размера допускают большие скорости без опасности срыва факела.

При оценки стабильности воспламенения следует обращать внимание на то, скорость какого потока принимается за определяющую при регулировании работы горелки, скорость газа или воздуха. Максимально допустимые скорости газа по условиям срыва факела увеличиваются с увеличением размера горелки, при этом отношение скоростей газа и воздуха тоже увеличивается от 0,8 до 1,4 (рис. 4.32, *б*). Максимально допустимые скорости воздуха по условиям срыва наблюдаются при отношении скоростей газа и воздуха от 0,4 до 0,8 (рис. 4.32, *в*). Большее значение соответствует горелкам большего диаметра. Предельная скорость газа ($\omega_г$, м/с) и воздуха ($\omega_в$, м/с), обеспечивающая устойчивое горение, в зависимости от диаметра стабилизатора горелки ($d_{ст}$, м) определяется по формулам:

$$\omega_г = 0{,}063 U^2 d_{ст}/a, \text{ м/с}, \quad (4.13)$$

$$\omega_в = 0{,}165 U^2 d_{ст}/a, \text{ м/с}, \quad (4.14)$$

где U — нормальная скорость распространения пламени, м/с; a — коэффициент температуропроводности, м^2/ч.

Для геометрически подобных горелок ВНИИМТ-Д предельные скорости можно определить по выражениям:

$$\omega_г = 79{,}3D - 0{,}36, \text{ м/с}, \quad (4.15)$$

$$\omega_г/\omega_в = 2{,}1D + 0{,}84, \text{ м/с}, \quad (4.16)$$

где D — диаметр носика горелки, мм.

При отрыве факела от стабилизатора изменяется процесс горения. На начальном участке, где горение отсутствует, идет интенсивное перемешивание газа и воздуха. Предварительно подготовленная таким образом смесь после воспламенения сгорает более интенсивно. При этом начальный угол раскрытия факела в зависимости от режима нагрузки увеличивается до 30—40°. Вследствие меньшей средней температуры и скорости смеси на выходе

из амбразуры при отрыве факела разрежение у стен камеры сгорания уменьшается. Концентрация CO и H_2 в таком факеле также снижается. В соответствие с этим химический недожог по оси быстро снижается до своего конечного значения и длина факела укорачивается.

При отрыве факела от стабилизатора температура в начале камеры на оси его низкая. Затем в результате интенсивного горения температура быстро достигала своего максимвльного значения и в дальнейшем ее значение определялось догоранием остатков горючих и охлаждением факела (рис. 4.32, *г*). При стабилизировании воспламенения высокие температуры развиваются уже в амбразуре. По длине камеры температура растет менее интенсивно и своего максимального значения достигает на большем расстоянии от горелки, чем при нестабилизированном факеле.

Отрыв факела от горелки с пульсирующим неустойчивым фронтом

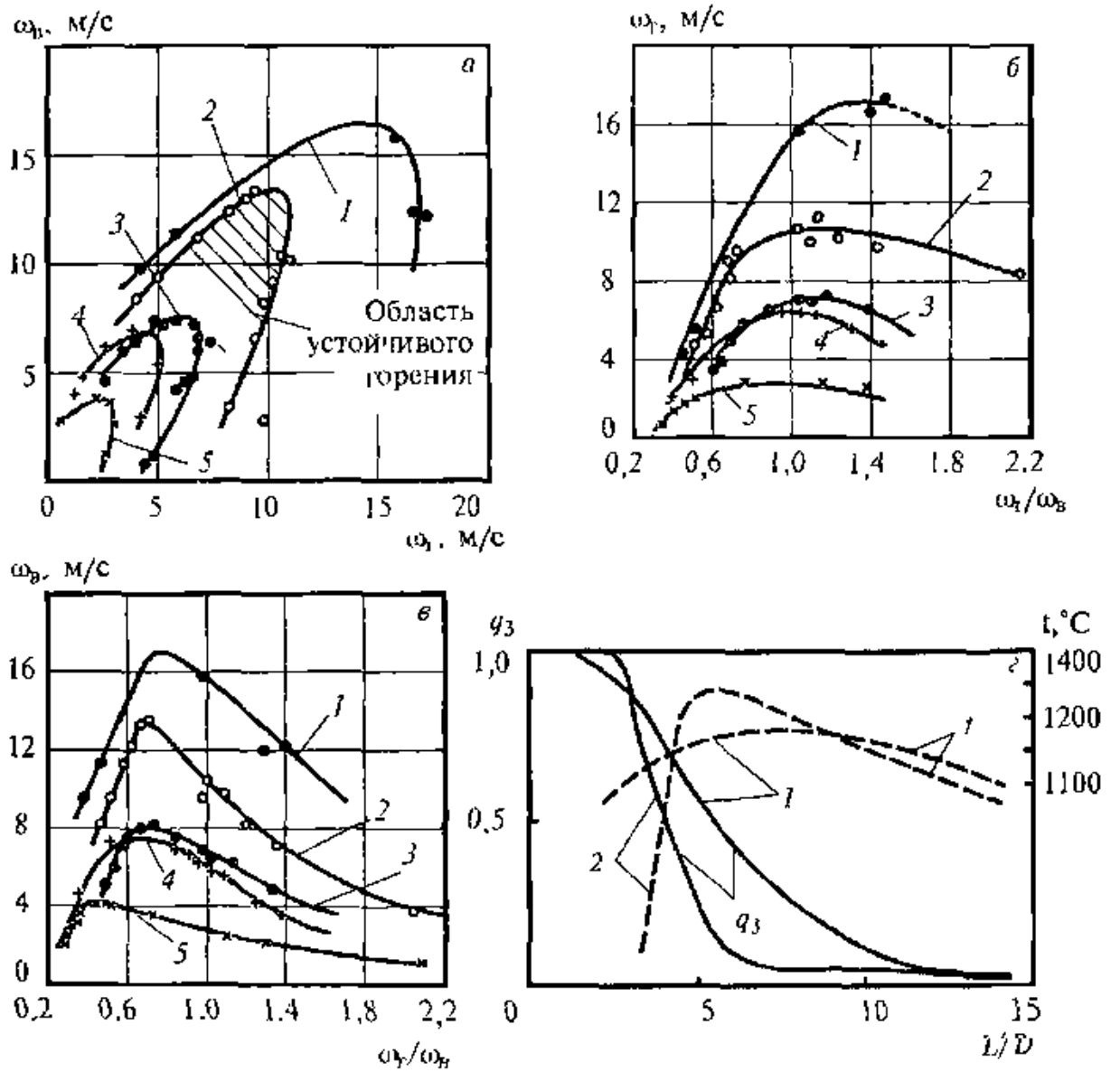


Рис. 4 32. Область устойчивой работы горелок ВНИИМТ-Д в зависимости от скоростей истечения газа $\omega_г$, воздуха $\omega_в$, и их соотношения (*а*, *б*, *в*): химический недожог и температура по оси факела (*г*) (*1* — при стабилизированном воспламенении, *2* — при отрыве факела)

воспламенения, наличие значительных градиентов давлений и температур способстаовали более интенсивной теплоотдаче на начаяьном участке факела. Максимум на кривой локальной теплоотдачи располагался на 2—3 калибра горелки ближе к передней стенке камеры, чем при стабилизированном воспламенении. Наблюдалось также более интенсивное охлаждение факела.

На стабилизацию факела длиннопламенных горелок ВНИИМТ-Д алияют также длина и форма амбразуры, хотя стенки амбразур, как правило, имеют низкую температуру и не являются источником зажигания. Короткая амбразура с большим углом раскрытия позволяет циркулирующим в камере сгорания высокотемпературным газам дальше проникать к корню факела и, смешиваясь с потоком воздуха и подогревая его, способствовать более раннему воспламенению. Длинная амбразура с холодными стенками, напротив, экранирует начальный участок факела от воздействия топки и ухудшает воспламенение топливной смеси.

4.8. ИНЖЕКЦИОННЫЕ ГОРЕЛКИ ГОРНОВ ОБЖИГОВЫХ МАШИН

Обжиговые конвейерные машины для производства железорудных окатышей, у которых имеются значительные перетоки вторичного воздуха из зоны охлаждения в горн, отапливаются природным газом при помощи инжекционных горелочных устройств. Устройства являются неотъемлемой частью горна и могут работать только совместно с форкамерой, в которую из переточного коллектора подается воздух с температурой от 800 до 1200 °С при даяхении около 0,1 кПа (см. рис. 1.4).

Общий вид горелок приведен на рис. 4.33, а их технические характеристики — в табл. 4.9.

Известны две модификации горелок, отличающиеся количе-

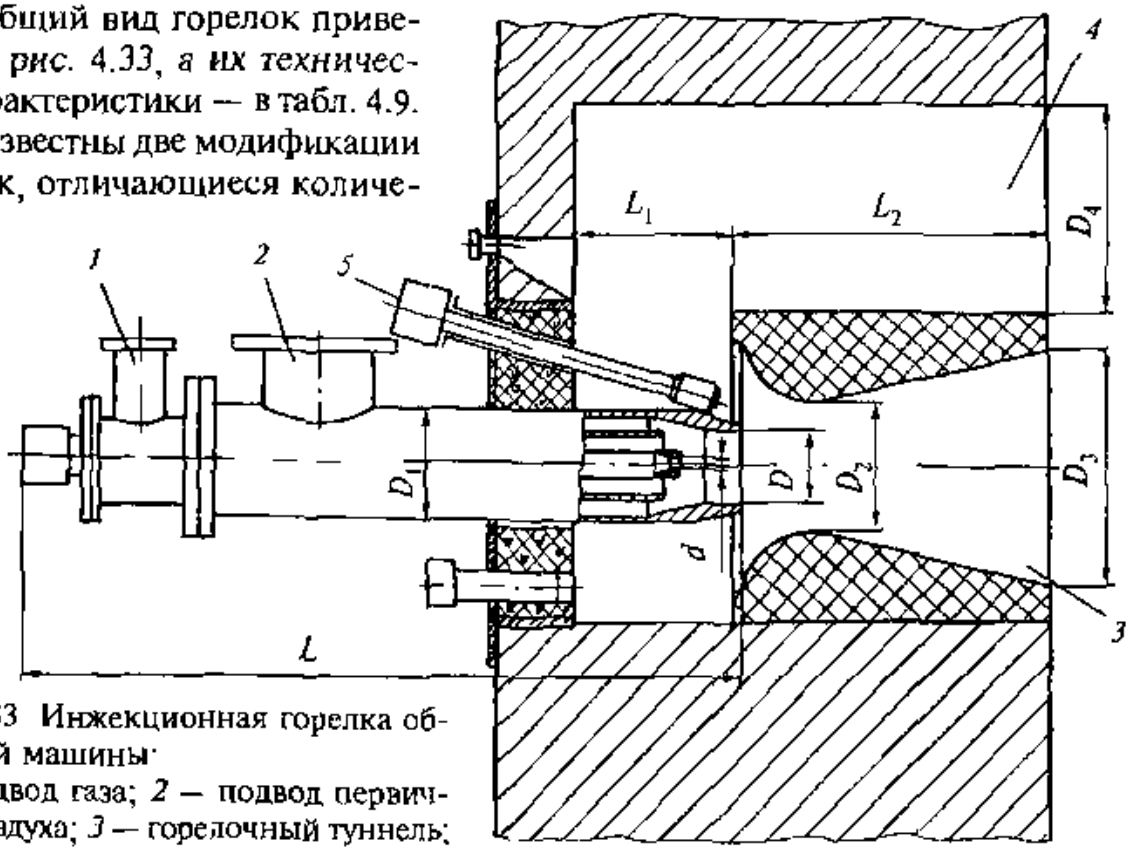


Рис. 4.33 Инжекционная горелка обжиговой машины:
1 — подвод газа; *2* — подвод первичного воздуха; *3* — горелочный туннель; *4* — канал вторичного воздуха, *5* — запальное устройстао

Таблица 4 9

Технические характеристики горелок обжиговых машин

Наименование показателя	Номинальная тепловая мощность, МВт		
	0,5	3,5	7,0
Расход природного газа, $м^3/ч$	50	350	700
Расход первичного воздуха, $м^3/ч$	75	500	1100
Давление газа, кПа	4,0	3,3	3,3
Давление первичного воздуха, кПа	3,6	5,0	5,0
Коэффициент расхода первичного воздуха	0,15	0,15	0,16
Температура вторичного воздуха, °С	800	1000	1000
Суммарный коэффициент расхода воздуха	3,0	2,2÷4,0	
Длина факела, м	0,8	1,8–2,0	2,6–2,8
Размер, мм:			
d	8,0	20	25
D	30	45	98
D_1	45	86	159
D_2	60	125	180
D_3	105	180	340
D_4	100	190	320
L	300	625	950
L_1	60	105	210
L_2	150	300	470

ством коаксиально расположенных труб, оканчивающихся соплами. В двухсопловой горелке по внутренней трубе подается газ, по наружному каналу — первичный воздух. В трехсопловой горелке воздух подается по наружному и внутреннему каналам, а газ — по центральной кольцевой щели.

Горелка устанавливается на торцевой стенке форкамеры при помощи фланца, имеющего внутреннюю огнеупорную футеровку. Выходной носик горелки расположен в нише, выполненной в стенке форкамеры, и на входе в горелочный туннель. Пространство над горелочным туннелем образует проход для подвода воздуха.

При работе горелки струя газа вытекает из сопла окруженная спутной струей первичного воздуха при первичном коэффициенте его расхода 0,15–0,2. Вытекающий поток создает разрежение на входе в горелочный туннель, благодаря чему осуществляется подсос высокотемпературного воздуха к корню струи. Образующаяся смесь при α около 0,4–0,5 через горелочный туннель вытекает в форкамеру. Воспламенение смеси происходит на выходе из туннеля, а ее догорание — по длине форкамеры при подмешивании основного потока вторичного воздуха. Суммарный коэффициент расхода воздуха на выходе из форкамеры изменяется в пределах 3–4 в зависимости от требуемой температуры в рабочей зоне.

Изменение характеристик факела при сжигании природного газа в форкамере горелками тепловой мощностью 0,5 МВт и 7,0 МВт показано на

рис. 4.34 и 4.35. На рисунках длина факела L представлена в калибрах выходного диаметра горелочного туннеля $d_т$.

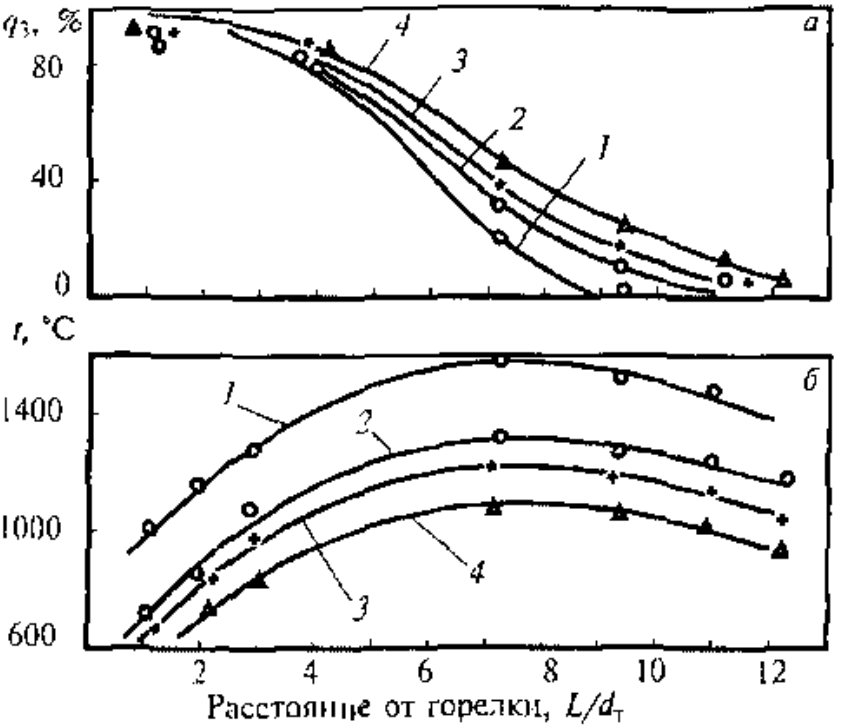


Рис. 4.34. Изменение химического недожога q_3 (*а*), и температуры продуктов горения t (*б*) по *оси факела горелки* тепловой мощностью 0,5 МВт:
1 — температура вторичного воздуха 45 °С; *2* — то же 300 °С; *3* — 600 °С; *4* — 800 °С

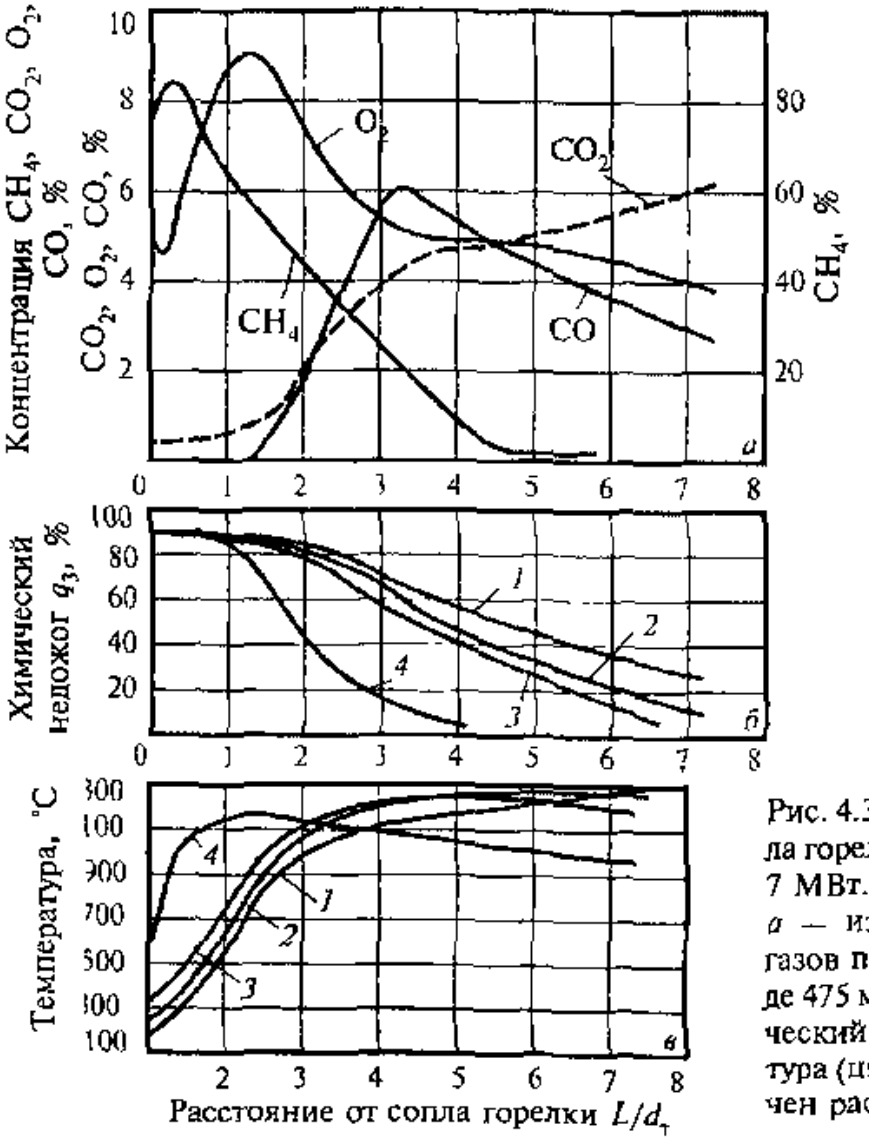


Рис. 4.35. Характеристики факела горелки тепловой мощностью 7 МВт.
а — изменение концентраций газов по оси факела при расходе 475 м³/ч и $\alpha = 0{,}15$, *б* — химический недожог; *в* — температура (цифрой на кривой обозначен расход газа, м³/ч)

4.9. ГОРЕЛКИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ ДЛЯ БОКОВОЙ КОМПОНОВКИ

Горелки предназначены для рассредоточенного подвода природного газа и воздуха по длине вращающейся печи. Конструкции горелок тепловой мощностью 5 и 30 МВт разработаны во ВНИИМТ для вращающейся печи диаметром 6,24 м длиной 92 м.

Общий вид горелки тепловой мощностью 30 МВт показан на рис. 4.36. Горелка тепловой мощностью 5 МВт аналогична по конструкции, но имеет выходной диаметр корпуса 400 мм.

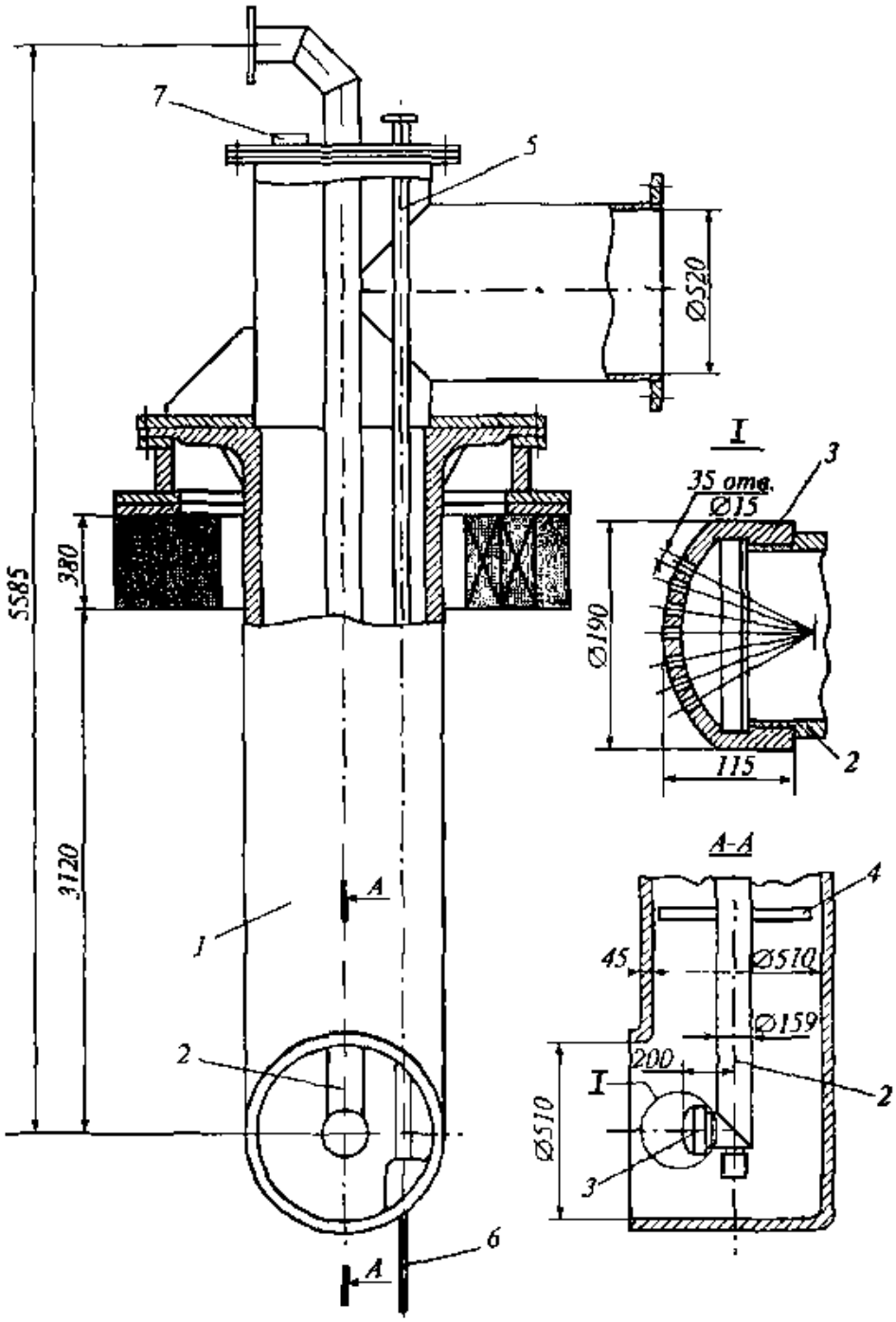


Рис. 4.36. Горелка тепловой мощности 30 МВт для вращающейся печи:
1 — воздушный корпус; *2* — газовая труба, *3* — наконечник; *4* — центрирующие ребра; *5* — направляющая труба; *6* — термопара, *7* — смотровой патрубок

Основным элементом горелки является корпус, размещенный на установочном патрубке печи и вводимый в рабочее пространство по радиусу ее поперечного сечения. К воздухоподводящему патрубку горелки, имеющему поворотный шибер с приводом, присоединен нагнетательный патрубок вентилятора. По оси корпуса горелки размещена газовая труба, оканчивающаяся сменным соплом. Особенностью горелки является выполнение выходного отверстия для истечения воздуха непосредственно в месте поворота потока на 90°. Эта особенность вызвана необходимостью иметь минимально возможный диаметр отверстия в корпусе печи для ввода горелки в рабочий объем.

Горелка может работать либо с одноструйным соплом с диаметром, примерно равным диаметру газоподводящей трубы, либо с наконечником, формирующим систему расходящихся газовых струй. В связи с тем, что корпус горелки при работе печи находится в потоке продуктов сгорания с температурой около 1200 °С, его изготавливают из стали 25Х23Н7Сл.

Для контроля температуры набегающего потока внутри горелки установлена термопара. Она размещена в направляющей трубе, а ее рабочий спай в алундовом чехле выступает из корпуса в рабочее пространство печи. При температуре печной среды 1250 °С корпус работающих горелок нагревается до 900 °С.

Факел, создаваемый горелкой, характеризуется закономерностями, свойственными горелкам типа "труба в трубе". Однако конструкции выходных элементов горелок и печная среда создают специфические особенности развития факела [5].

Для эффективной работы горелок надо прежде всего обеспечить необходимое положение факела в печи. В зависимости от требований технологии факел может располагаться по оси печи, отклоняться к слою обрабатываемого материала или подниматься к своду.

Угол отклонения вытекающего из горелки потока существенно зависит от соотношения размеров выходных элементов носика горелки: диаметра выходного отверстия, длины насадка и сочетания этих элементов.

Наиболее простой способ уменьшения угла отклонения вытекающего потока от нормали к выходному отверстию горелки является установка в ее выходном сечении диафрагмы в виде диска с отверстием (рис. 4.37).

При уменьшении диаметра диафрагмы, если центр ее отверстия продолжает совпадать с центром выходного отверстия горелки, угол отклонения струи постепенно уменьшается от 22° до нуля (рис. 4.37, кривая *1*).

Полученная зависимость приближенно описывается выражением

$$\alpha = -7{,}5\sqrt{(d_в / D)^3}\cdot e^{d_в/D}, \qquad (4.17)$$

где D и $d_в$ — диаметр трубы горелки и отверстия диафрагмы, мм; e — основание натурального логарифма.

Характер изменения угла отклонения потока зависит также от положения диафрагмы в выходном сечении горелки. Если при уменьшении диаметра отверстия диафрагмы край его все время совпадает с торцевой стен-

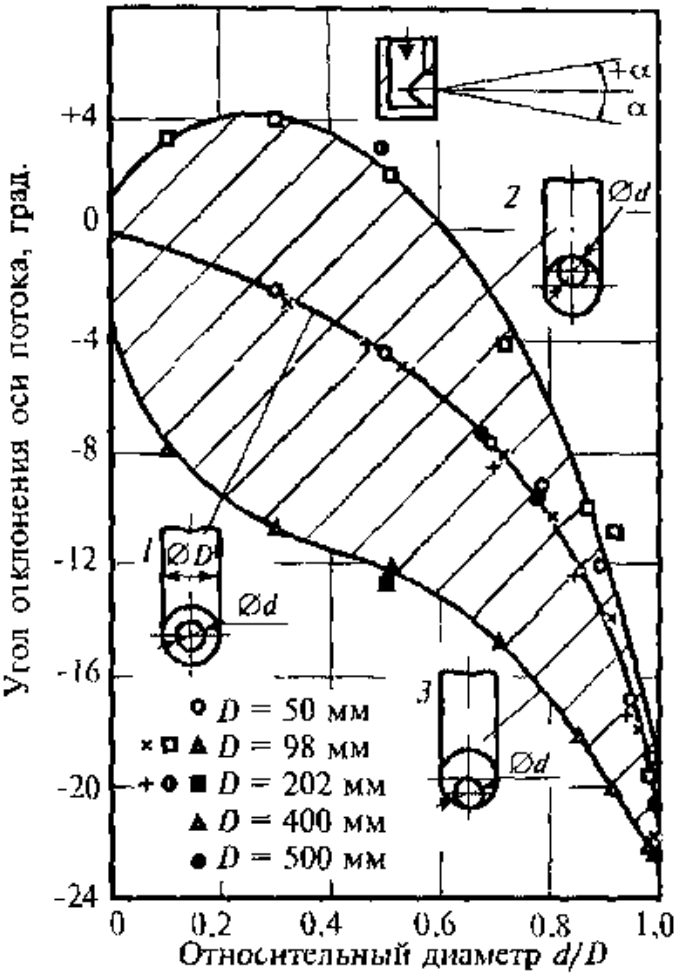


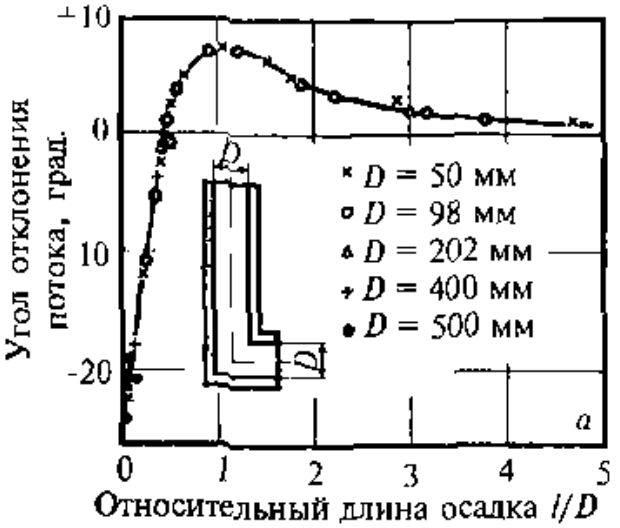
Рис. 4.37. Зависимость угла отклонения оси вытекающего потока α от диаметра диафрагмы *d* и места ее установки: *1* — симметричное расположение; *2* — смещение против потока воздуха в горелке; *3* — смещение по направлению потока воздуха (*D* — внутренний диаметр корпуса горелки, равный диаметру выходного отверстия; заштрихована область возможных углов отклонения факела)

кой горелки, в которую ударяется воздушный поток, то угол отклонения потока изменяется менее интенсивно и только при диаметре менее 0,2 *D* резко уменьшается до нуля. Если при уменьшении диаметра диафрагмы край ее отверстия все время совпадает с краем отверстия в горелке со стороны подвода воздуха (кривая *2* на рис. 4.37), интенсивность изменения угла отклонения заметно увеличивается и при диаметре диафрагмы, равном 0,6*D*, угол α уменьшается до нуля. Однако при дальнейшем уменьшении диаметра отверстия диафрагмы поток начинает отклоняться в противоположную сторону, и при диаметре ее около 0,2*D* это отклонение достигает максимума. Далее угол отклонения начинает уменьшаться и стремится к нулю. Получаются две кривые, ограничивающие область возможного изменения углов отклонения струи.

Угол отклонения оси факела можно регулировать путем изменения длины насадка, устанавливаемого на носике горелки. Длина насадка должна измеряться от внутренней стенки корпуса горелки. При удлинении насадка угол отклонения уменьшается, и при длине его около 0,5*D* он равен нулю (рис. 4.38, *а*). Однако при дальнейшем удлинении насадка струя начинала отклоняться в противоположную сторону. Максимальное значение угла отклонения, равное 7°, достигается при длине насадка около *D*. При дальнейшем увеличении *l* до 3*D* угол отклонения струи постепенно уменьшается до 2°. Таким образом, для обеспечения истечения потока по нормали к горелке относительная длина насадка *l*/*D* должна быть около 0,5 или более 3.

Суммарное воздействие на положение оси вытекающей из горелки струи одновременно и диаметра отверстия диафрагмы, и длины насадка зависит от комбинаций этих двух факторов (рис. 4.38, *б*). В отдельных случаях незначительное удлинение насадка и уменьшение диаметра диафрагмы приводит к существенному уменьшению угла отклонения потока. Однако выполнение горелки с насадком длиной 0,5*D* хотя и исключает отклонение

факела от оси вращающейся печи, но не улучшает равномерность скоростного поля в выходном сечении. У корня струи образуется значительная зона разрежения, занимающая почти половину площади выходного сечения. Наличие зоны обратных токов обнаруживается и в насадке со стороны подвода воздуха. Применение цилиндрических вставок в насадке принципиально не изменяет характер течения. На-



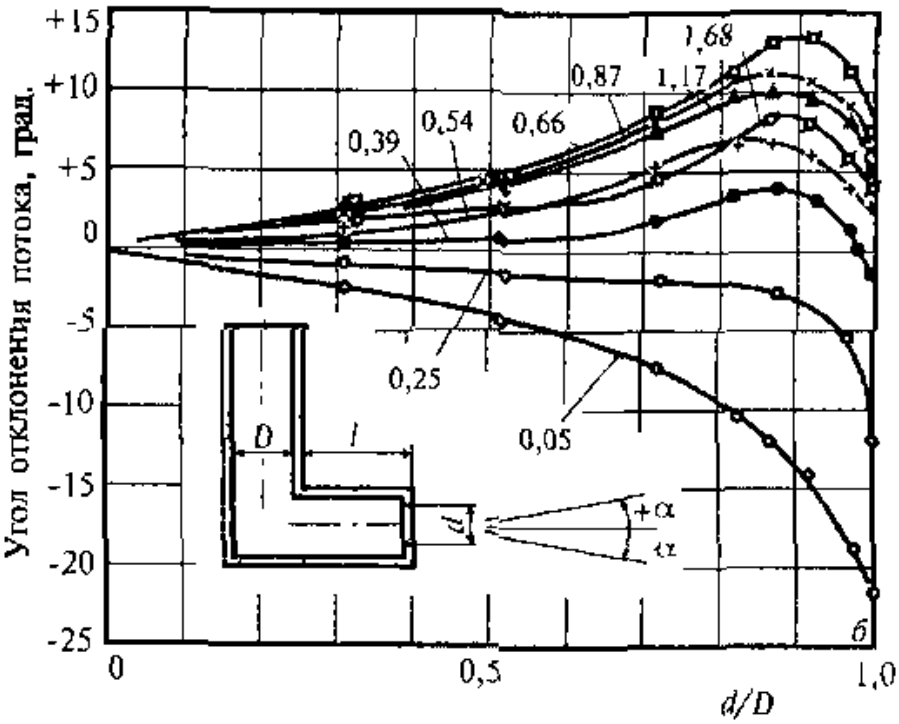


Рис. 4.38. Зависимость угла отклонения потока от длины насадка:
а — при диаметре выходного отверстия, равном диаметру горелки; *б* — при различных диафрагмах на выходе из насадка и их длинах *l*/*D*, указанных на кривых

личие зоны циркуляции в насадке отрицательно влияет на характеристики факела и прежде всего на эксплуатационную надежность горелки. При снижении нагрузки на горелку ниже определенного уровня (это зависит от размера горелки) происходит проскок пламени в зону циркуляции насадка. Возникающий в насадке очаг горения трудно выдувается даже на горелках малого размера при нагрузках, намного превышающих расчетные.

Особенности развития факела определяются спецификой расположения горелок. Поскольку горелки располагаются последовательно вдоль печи от одного торца до другого, каждая из них омывается факелом предыдущей горелки и в то же время формирует поток, который набегает на последующую горелку. По мере продвижения газов в печи изменяется скорость спутного потока, состав газовой среды и ее температура. Возможны режимы работы горелки, когда сжигание газа в факеле происходит при $\alpha = 0{,}7$, а дожигание горючих происходит в спутном или встречном потоке печных газов, содержащих избыточный кислород. В ряде случаев печная среда со-

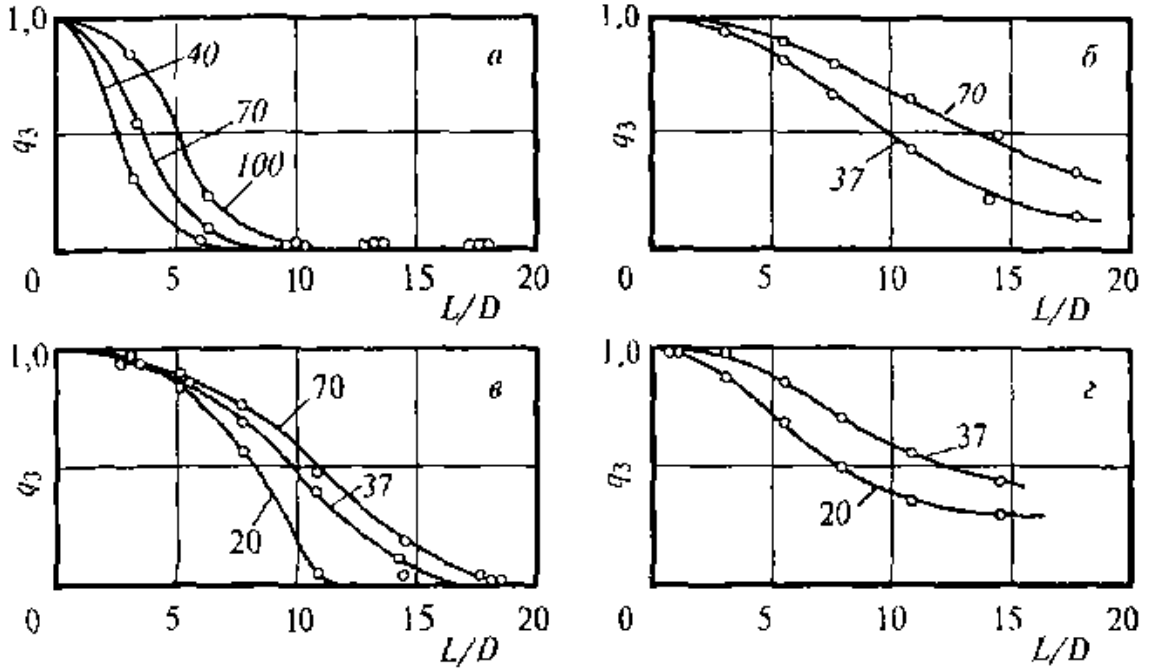


Рис 4 39. Изменение химического недожога по длине факела в зависимости от тепловой нагрузки горелки (указана цифрой у кривой, %):
а — коэффициент избытка воздуха в факеле горелки $\alpha_г = 1{,}0$, коэффициент избытка воздуха в спутном потоке $\alpha_{сп} = 2{,}0$; *б* — $\alpha_г = \alpha_{сп} = 1{,}3$; *в* — $\alpha_г = \alpha_{сп} = 1{,}0$; *г* — $\alpha_г = \alpha_{сп} = 0{,}7$

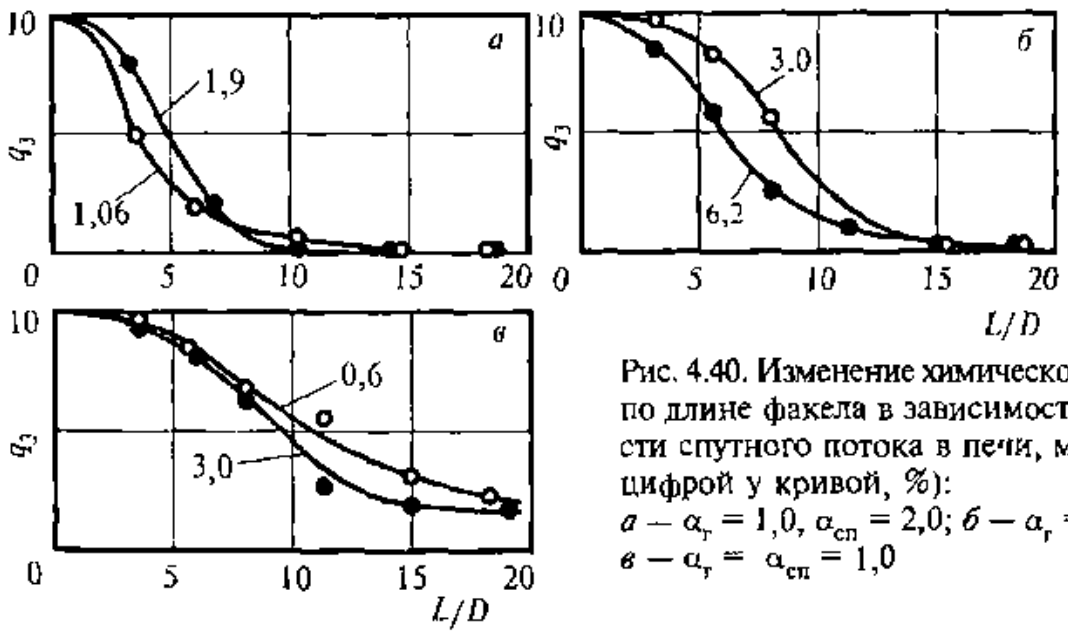


Рис. 4.40. Изменение химического недожога по длине факела в зависимости от скорости спутного потока в печи, м/с (указана цифрой у кривой, %):
а — $\alpha_г = 1{,}0$, $\alpha_{сп} = 2{,}0$; *б* — $\alpha_г = \alpha_{сп} = 1{,}3$; *в* — $\alpha_г = \alpha_{сп} = 1{,}0$

держит горючие компоненты, выделяющиеся из обрабатываемого материала. Поэтому в факеле над слоем материала сжигание газа производят с большим избытком воздуха с целью дожигания горючих компонентов спутного потока.

Характерные особенности изменения химического недожога по длине факела при различных режимах сжигания газа в факеле и различных параметрах спутного потока приведены на рис. 4.39—4.41

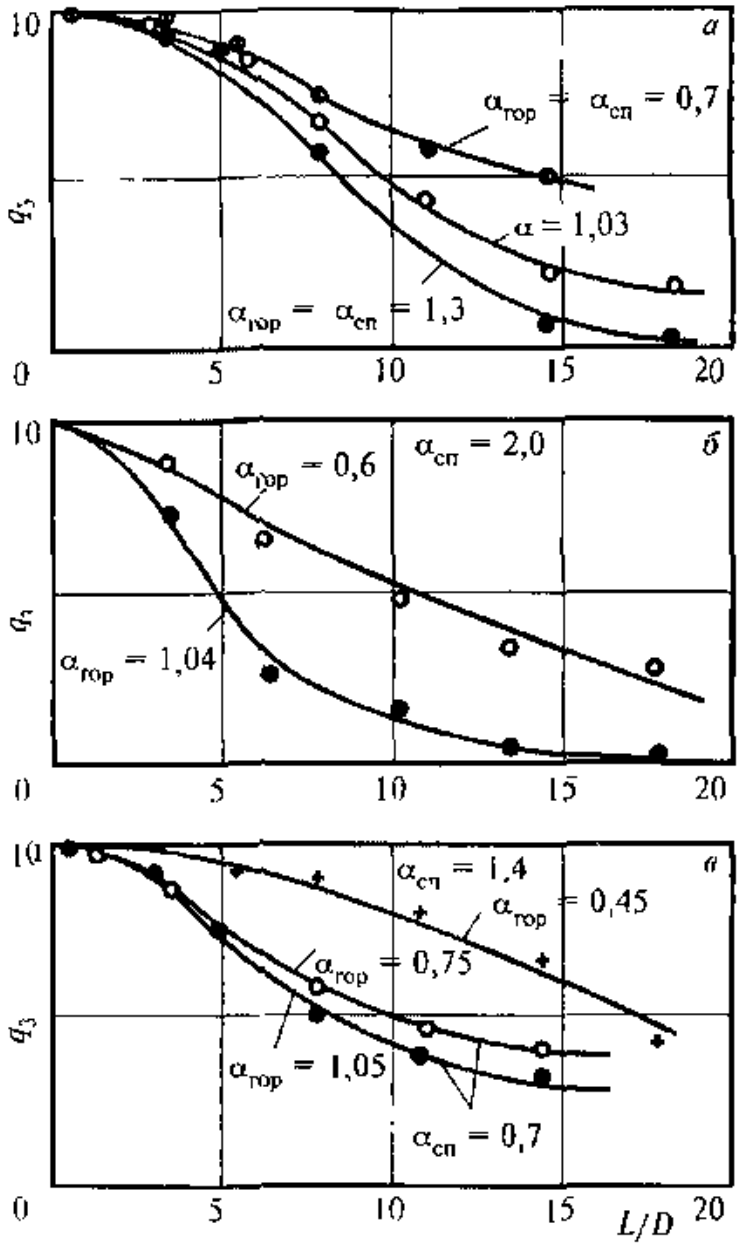


Рис. 4.41. Изменение химического недожога по длине факела в зависимости от коэффициентов расхода воздуха в факеле горелки, $\alpha_{гор}$ и в спутном потоке $\alpha_{сп}$

4.10. ГАЗОКИСЛОРОДНАЯ ГОРЕЛКА ДЛЯ МЕСТНОГО НАГРЕВА

Газокислородная горелка для местного нагрева разработана во ВНИИМТ применительно к технологии горячего окомкования железорудных материалов, предложенной институтом ДонНИИчермет.

Ниже приведены технические характеристики горелки:

Номинальная тепловая мощность	3 МВт
Расход природного газа	300 м³/ч
Давление природного газа	0,2 МПа
Расход кислорода	600 м³/ч
Давление кислорода перед горелкой	0,4 МПа
Коэффициент избытка кислорода	1,0
Коэффициент рабочего регулирования	5

Общий вид горелки показан на рис. 4.42 Горелка состоит из двух параллельно расположенных стволов для подвода природного газа и кислорода Каждый ствол выполнен в самостоятельной водоохлаждаемой рубашке, объединенной общим контуром циркуляции воды. На торцах каждый ствол имеет сопло для истечения энергоносителя.

На выходном участке горелки оба ее ствола зафиксированы на расстоянии друг от друга около 50—80 мм при помощи общего кольцевого трубопровода. На входной стороне каждый ствол закреплен в каретке, имеющей привод. Привод позволяет изменять параллельность стволов и, соответственно, угол встречи вытекающих струй газа и кислорода, интенсивность выгорания топлива и положение максимума температуры относительно выходных отверстий.

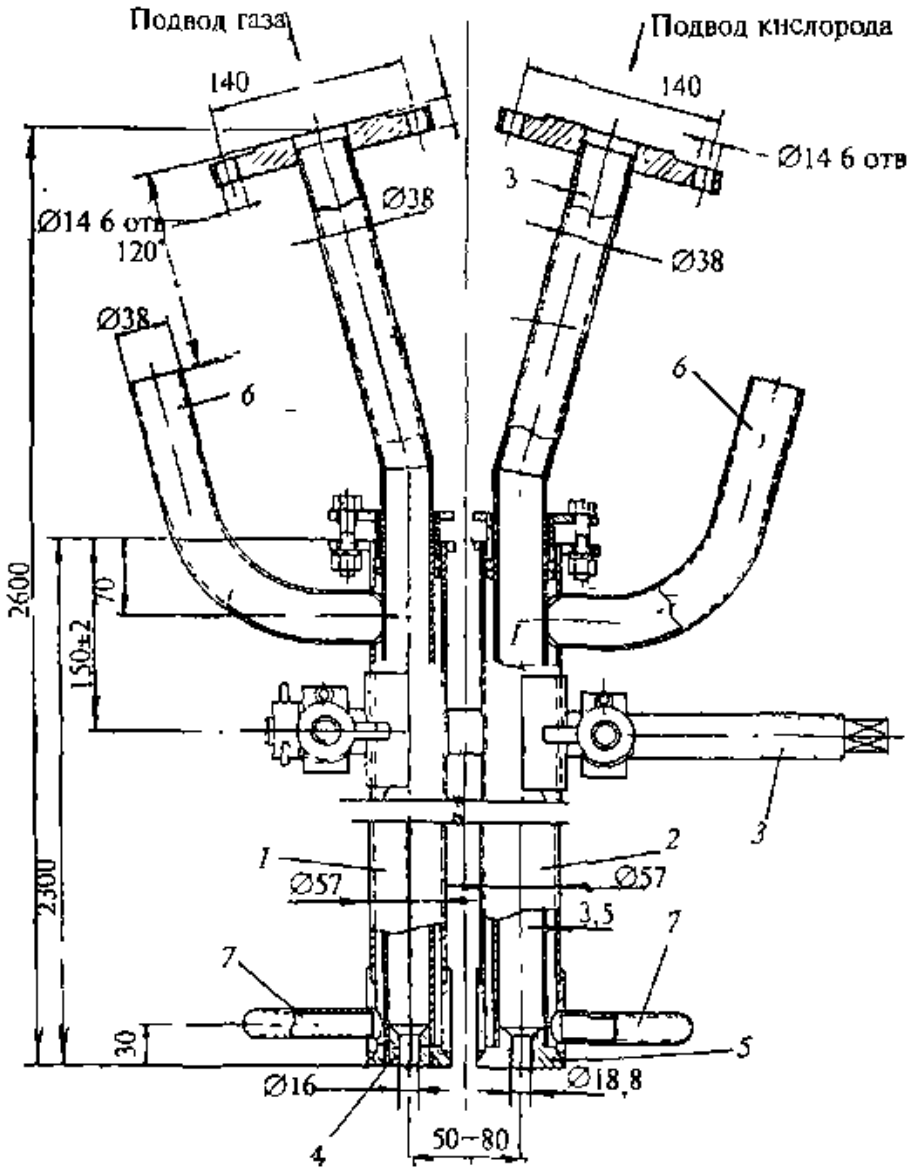


Рис. 4.42. Газокислородная горелка для местиого нагрева:
1 – ствол подачи природного газа, *2* – ствол подачи кислорода; *3* – механизм перемещения стволов, *4* – газовое сопло, *5* – кислородное сопло; *6* – водоподводящий (сливной) патрубок; *7* – кольцевой водопровод

Глава 5. ГОРЕЛКИ С УЛУЧШЕННЫМ СМЕШЕНИЕМ

Улучшения смешения газа и воздуха в этих горелках достигают следующим образом:

- увеличением пути перемешивания и продолжительности контакта газа и воздуха внутри горелки;
- разделением потока газа и (или) воздуха на мелкие струи;
- направлением потоков газа и воздуха под углом друг к другу;
- закручиванием потоков газа и (ияи) воздуха.

В результате улучшения смешения в этих горелках удается получить более короткий и высокотемпературный факел, чем в горелках без предварительного смешения, и снизить потребный коэффициент расхода воздуха Кроме того, в горелках с улучшенным смешением при соответствующем конструктивном устройстве можно получить факел заданной формы и с необходимыми характеристиками.

Горелки с улучшенным смешением в основном имеют те же достоинства и недостатки, что и горелки без предварительного смешения. Однако по сравнению с последними горелки с улучшенным смешением имеют более сложную конструкцию и меньшие пределы регулирования , так как в них уже возникает некоторая опасность проскока пламени внутрь горелки. Кроме того, при сжигании газов с высокой теплотой сгорания зона высоких температур располагается ближе к горелке, что снижает ее стойкость и стойкость горелочного камня. Поэтому применение горелок с улучшенным смешением оправдано только тогда, когда используются особые свойства получаемого в них факела.

В основном в печах черной металлургии улучшение смешения используют для получения укороченного и плоского факела. Укороченный факел используют при ограниченном объеме камеры сгорания или при сжигании газов с низкой теплотой сгорания для достижения более высоких температур в факеле.

Плоский факел образуется при сжигании газа в тонком слое, стелющемся по поверхности огнеупорного кирпича, в результате чего обеспечивается интенсивный и равномерный нагрев металла излучением от разогретой кладки печи. Применяется преимущественно при сводовом отоплении печей_

Особую группу горелок с улучшенным смешением составляют скоростные горелки, которые создают высокоскоростной поток продуктов сгорания, интенсифицирующий теплообмен и циркуляцию в рабочем пространстве печи

В связи со сложностью процессов смешения и сгорания, зависящих от способа и степени улучшения смешения, горелки с улучшенным смеше-

нием не поддаются расчету и отрабатываются экспериментально Существуют полуэмпирические методики расчета лишь для некоторых наиболее простых случаев смешения газа и воздуха: многоструйная подача газа перпендикулярно потоку воздуха (Ю. В. Иванова), аэродинамический расчет закручивания среды (Д. Н. Ляховского, Р. Б. Ахмедова) и другие.

5.1. ГАЗОВОЗДУШНАЯ ФУРМА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Воздушные фурмы доменных печей, оснащенные газовым или жидкотопливным вводом, являются, по существу, специальными горелочными устройствами. Основными требованиями, предъявляемыми к этим устройствам, являются наиболее полное обеспечение конверсии топлива без образования сажи и равномерное распределение продуктов конверсии по сечению потока, вытекающего из фурмы. Причем все предпламенные процессы должны завершаться в пределах воздушной фурмы. Основным расчетным параметром при определении качества перемешивания вводимого топлива и потока дутья, является относительная глубина проникновения струй. Этот параметр зависит от расхода, температуры и давления дутья, а также параметров топлива перед фурмой и в общем случае определяется выражением:

$$K = \frac{h}{D} = K_s \frac{m_д}{m_s + m_г} \left(\frac{d\sqrt{\mu}}{D} \right)^{0,65} \frac{\omega_г}{\omega_д} \left(\frac{\rho_г}{\rho_д} \right)^{0,5}, \qquad (5.1.)$$

где h — глубина проникновения струи в поток дутья, равная расстоянию по нормали от устья струи до ее оси, принявшей направление потока дутья; D — диаметр фурмы в месте ввода газа; K_s — коэффициент пропорциональности, равный 0,68; $m_д$ и $m_г$ — расход дутья и газа, кг/с; d — диаметр газового сопла; $\omega_г$, $\rho_г$, $\omega_д$, $\rho_д$ — скорость и плотность газовой струи в ее устье и потока дутья в месте ввода газа; μ — коэффициент расхода газового сопла; $\mu = 2{,}18 \cdot 10^{-4} \cdot m_г / n\omega_г\rho_г d^2$; n — количество отверстий.

В связи с большим разнообразием конструктивных и режимных параметров не представляется разработка типовых газовоздушных фурм. Для каждого случая необходим индивидуальный расчет и опытная проверка эффективности работы фурмы. Ниже изложено описание конструкции и режима работы фурмы, разработанной ВНИИМТ, для следующих параметров:

Температура дутья	1260 °С
Давление дутья	0,26 МПа
Скорость дутья	200 м/с
Концентрация кислорода в дутье	27 %
Расход дутья	2,0–6,0 кг/с
Расход газа	0,1–0,3 кг/с
Давление газа	0,5–1,0 МПа

Газовоздушная фурма (рис. 5.1) имеет водоохлаждаемый корпус с подводом и отводом воды и газовый ввод с кольцевым коллектором. Ввод газа в поток дутья осуществляется через три сопла, установленных на стенках центрального канала. Для исключения забивания сопел частицами расплава, которые могут попасть на стенку фурмы из фурменного очага, сопла заглублены в центральный канал.

Применение разработанной фурмы позволяет обеспечить более равномерное распределение водорода по радиусу доменной печи и повысить степень косвенного восстановления.

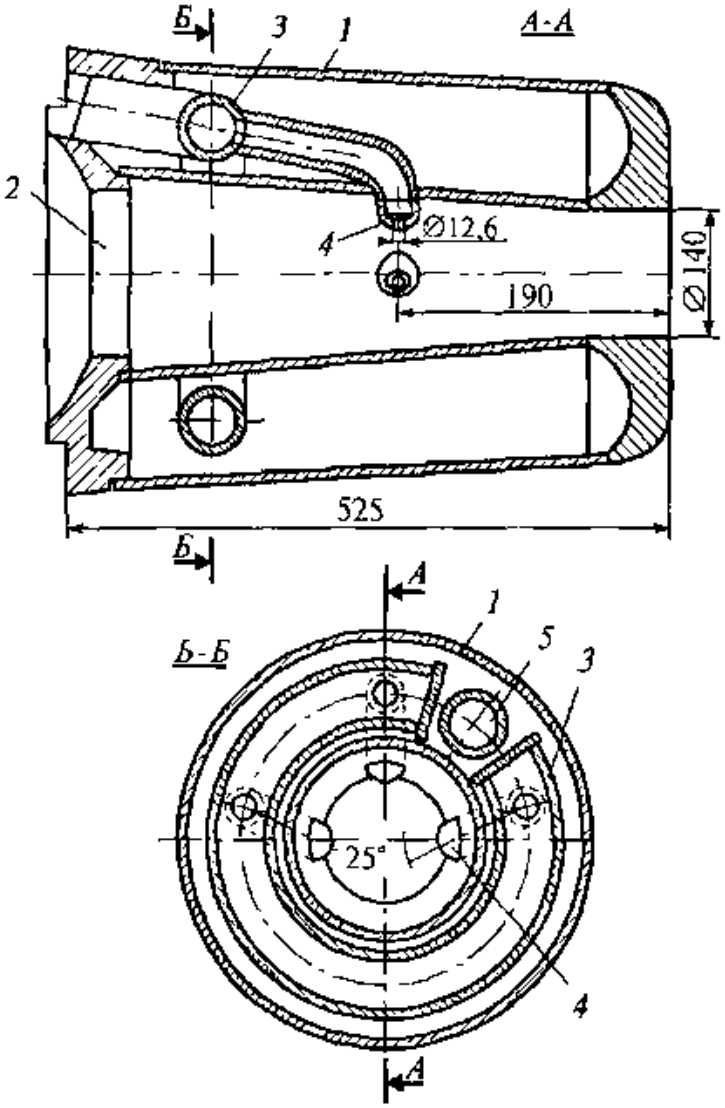


Рис. 5.1. Газовоздушная фурма ВНИИМТ:
1 — водоохлаждаемый корпус; *2* — канал подвода воздуха; *3* — газовый коллектор; *4* — сопло; *5* — водопровод

5.2. ДВУХПРОВОДНЫЕ ГОРЕЛКИ ДОМЕННЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

Двухпроводные горелки изготавливаются Иркутским заводом тяжелого машиностроения и предназначены для сжигания доменного, природного, коксового газов и их смесей в камере сгорания воздухонагревателей. Горелки работают на холодном воздухе и газе.

Горелки изготавливаются в двух исполнениях: с индивидуальным дутьевым вентилятором и с подводом воздуха от общей магистрали. Общий вид горелок приведен на рис. 5.2 и 5.3, а технические и конструктивные характеристики в табл. 5.1. Подробное исследование особенностей работы горелок и закономерностей развития их факелов выполнено во ВНИИМТ. Результаты исследований описаны в работе [1]. Ниже приведено их конспективное изложение.

Прежде всего следует отметить, что в связи с переменной теплотой сгорания низкокалорийного газа тепловая мощность горелок определяется расходом воздуха, подаваемого вентилятором. Максимальная тепловая мощ-

ность горелки достигается при использовании всего подаваемого воздуха и зависит от состава сжигаемого газа. Но тепловая мощность в значительной степени ограничивается допустимой температурой кладки купола и верхних рядов насадки воздухонагревателя. Поэтому максимальная тепловая мощность горелок получается при сжигании газа с минимальной теплотой сгорания, обеспечивающей допустимую температуру купола. С увеличением теплоты сгорания газа выше необходимой при минимальном избытке воздуха температура горения газа растет, и для сохранения заданной температуры купола необходимо увеличить расход воздуха, следовательно, и удельный расход воздуха на удельный кубометр сжигаемого газа. При этом часть воздуха расходуется на разбавление продуктов горения, а количество воздуха, используемого на собственно горение, уменьшается и, соответственно, снижается тепловая мощность горелки (рис. 5.4).

У горелок с индивидуальным вентилятором в переходном патрубке расположены жалюзи, предназначенные для регулирования расхода воздуха исполнительным механизмом или вручную В более поздних конструкциях расход воздуха регулируется направляющим аппаратом, к которому подключен исполнительный механизм; жалюзи в переходном патрубке отсутствуют. Это изменение ухудшило условия регулирования расхода воздуха при автоматическом поддержании заданной температуры купола, так как направляющий аппарат не приспособлен для постоянного плавного регулирования расхода Кроме того, ухудшились условия для устранения пульсаций.

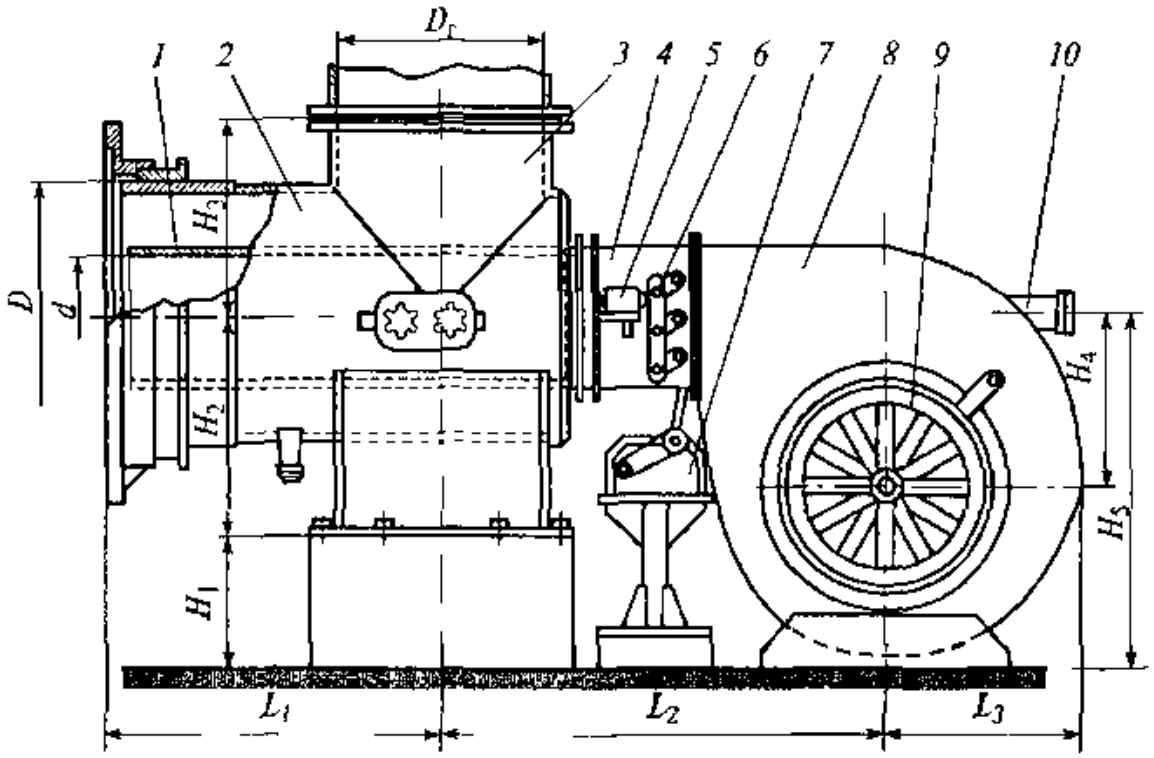


Рис 5.2. Металлическая горелка с индивидуальным вентилятором:
1 – воздушное сопло, *2* – корпус; *3* – газовый патрубок; *4* – переходной патрубок; *5* – пирометр; *6* – жалюзи; *7* – привод жалюзи; *8* – вентилятор; *9* – направляющий аппарат; *10* – гляделка

Таблица 5.1

Технические и конструктивные характеристики металлических горелок ИЗТМ (рис. 5.2)

Наименование показателя, размерность	Производительность горелки (по воздуху), тыс $м^3/ч$						
	36	48	60	75	80	120	200
Подача воздуха	Индивидуальная			Централизованная	Индивидуальная	Централизованная	
Тип вентилятора	ВД-12	ВД-12	ВД-13,5	–	ВД-13,5	ВМ160/850У	ВДП-18
Полное давление, Па	3826	3826	5150	–	5150	9810	15700
Производительность вентилятора, тыс $м^3/ч$	36	48	60	–	80	160	180
Скорость вращения ротора, об/мин	740	985	990	–	990	1000	1480
Тип электродвигателя	МА36-51/8	МА36-51/6	МА36-61/6	–	МА36-62/6	СДН14-49-6.43	ДСП140/64-4
Мощность электродвигателя	75	100	160	–	200	1000	2000
Исполнительный механизм	МЭК-25К	МЭК-25К	МЭК-25К	–	МЭК-56/120	–	–
Диаметр подводящего газопровода $D_г$, мм	1100	1100	1100	1100	1300	1300	1524
Диаметр выходного сечения корпуса D, мм	1100	1100	1100	1100	1300	1300	2000
Диаметр воздушного сопла d, мм	700	700	860	860	900	900	1500
Размеры, мм:							
L_1	1565	1565	1565	1565	1580	1795	3400
L_2	2100	2100	2325	3830	2430	3500	3760
L_3	1305	1305	1110	–	1110	–	–
H_1	600	600	886	–	865	–	–
H_2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1400
H_3	950	950	950	950	950	950	2305
H_4	735	735	821	–	821	–	–
H_5	1605	1605	1921	–	1921	–	–

Описанные горелки присоединяются к воздухонагревателю через специальный футерованный штуцер, имеющий то же проходное сечение, что и горелка. Для отделения горелки от воздухонагревателя при работе последнего на дутье между штуцером и горелкой имеется водоохлаждаемый отсечной клапан. Горение газа происходит в камере горения. Иногда горение начинается в штуцере. В штуцерах горелок с централизованной подачей воздуха расположен специальный удлинительный патрубок из жаростойкой стали того же диаметра, что и воздушное сопло, который препятствует перемешиванию газа с воздухом в штуцере и загоранию в нем смеси. Однако стойкость таких патрубков на высокотемпературных воздухонагревателях невелика (1–2 года)

Сопротивления горелок ИЗТМ по газовому и воздушному трактам, включающее потерю давления в штуцере и на выходе из него, приведены на

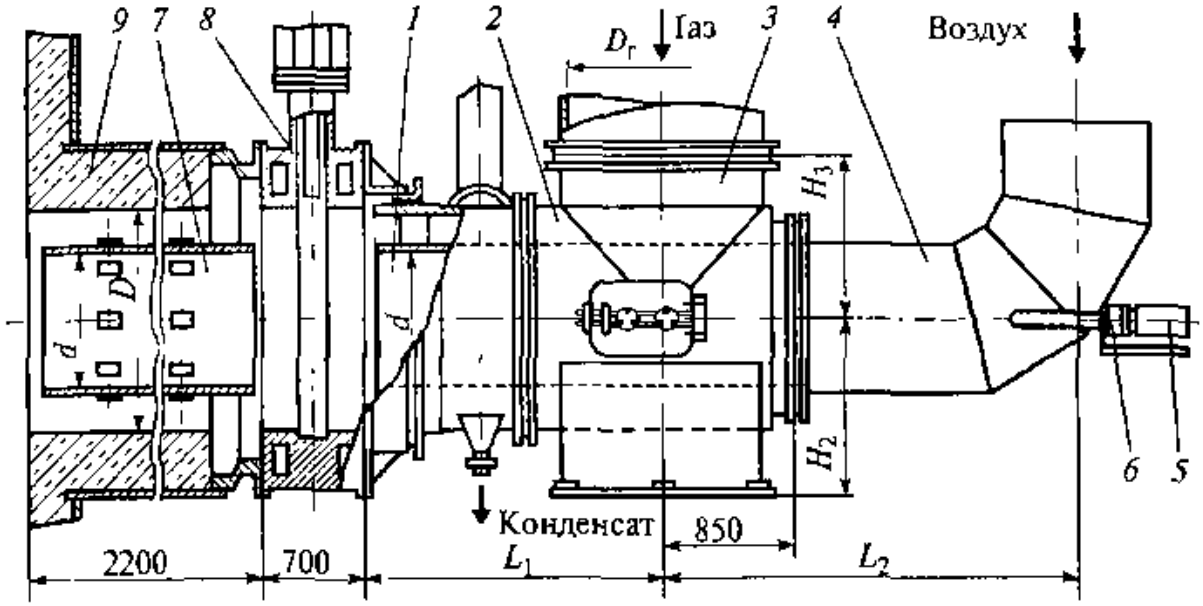


Рис. 5 3. Металлическая горелка с центральной подачей воздуха.
1 – воздушное сопло; *2* – корпус, *3* – газовый патрубок; *4* – воздухопровод; *5* – приборы контроля наличия пламени; *6* – гляделка; *7* – удлинительный патрубок; *8* – отсекающий дроссель; *9* – штуцер

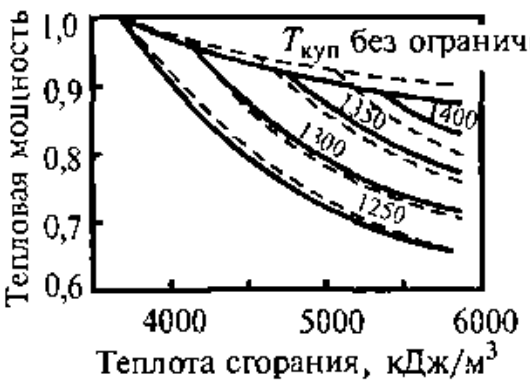


Рис. 5.4. Зависимость относительной тепловой мощности горелок от теплоты сгорания доменного газа при сохранении номинальной производительности по воздуху. Сплошная линия – при добавке природного газа, штриховая – при добавке коксового газа. Цифрами на кривых указана предельно допустимая температура куппла $T_{куп}$, °С

рис. 5.5. Большое сопротивление по газу горелок производительностью 60 и 75 тыс. м³/ч связано с уменьшением сечения для прохода газа из-за большого диаметра воздушного сопла. Это же привело к увеличению отношения скоростей газа и воздуха и способствовало появлению сильных пульсаций на воздухонагревателях. Работа горелок улучшилась при уменьшении диаметра сопла до 700 мм.

В случае загорания газа в штуцере сопротивление горелок по газовой и воздушной сторонам возрастает в среднем на 50 % при загорании во второй половине штуцера и на 100 % при загорании в первой половине. Устранению загорания газа в штуцере способствует хорошее состояние его кладки, уменьшение его длины. Загорание устраняется и сопротивление снижается также при установке удлинительного патрубка в штуцере горелки, как это выполнено у горелок с централизованной подачей воздуха. При изменении теплоты сгорания и расхода отопительного газа диаметр воздушного патрубка должен обеспечивать равенство скоростей газа и воздуха на выходе.

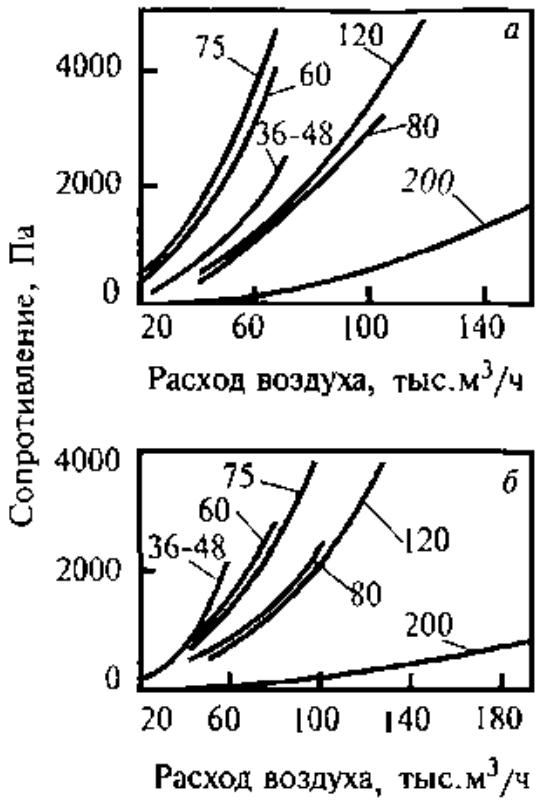


Рис. 5.5. Сопротивление металлических горелок по газовому (*а*) и воздушному (*б*) трактам ($p_г$ = 1,11 кг/м³; $p_в$ = 1,15 кг/м³, α = = 1,0). Цифры на кривых – номинальная производительность горелок по воздуху (табл. 5.1)

Это уменьшит сопротивление горелки и будет способствовать устранению пульсаций.

Характер выгорания газа по длине факела, кроме режимных факторов, зависит от размеров камеры горения и штуцера, от наличия и конструктивных особенностей удлинительного патрубка, от места загорания газа в штуцере.

Изменение основных характеристик факела по высоте камеры горения с горелкой производительностью 75 тыс. м³/ч показано на рис 5.6. Горелка работала на доменном газе с теплотой сгорания 4400–4600 кДж/м³, температура купола составила 1420 °С. Удлиненный патрубок после 7 месяцев эксплуатации вышел из строя и не функционировал. Горелка обеспечивала интенсивное горение газа с полным завершением горения на расстоянии 10 калибров от горелки ($d_г$). Близкое к полному сгорание газа наблюдалось на расстоянии уже 5–6 калибров от горелки благодаря хорошему перемешиванию газа и воздуха в горелке. Этому способствовали высокое соотношение скоростей газа и воздуха (1.7), большая длина штуцера и интенсификация смешения и горения в месте поворота потока в камеру горения. Температура в нижней части камеры горения отличалась большой неравномерностью. Наблюдался сильный нагрев противоположной горелке стенки камеры горения (до 1200 °С). Быстрый рост температуры по высоте камеры и высокая температура кладки были одними из причин развития крипа с выпучиванием кладки уже на высоте 5–6 м от горелки.

Горелка производительностью 200 тыс. м³/ч с удлинительным патрубком в штуцере при соотношении скоростей выхода газа и воздуха 0,9 обеспечивает полное сгорание в длинном факеле. Горение заканчивается на выходе из камеры горения на расстоянии 30 м от горелки (15 калибров).

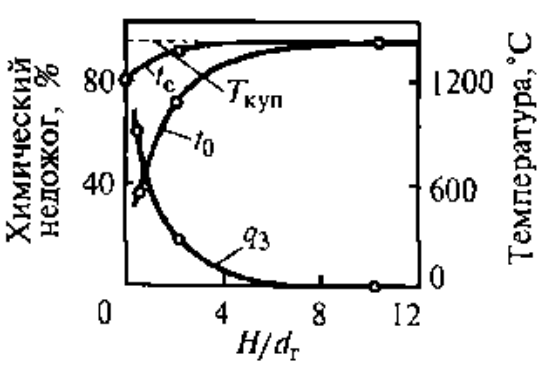


Рис. 5.6 Изменение среднего химического недожога q_3, температуры на оси камеры горения t_0 и у стенки t_c по высоте камеры горения при металлической горелке производительностью 75 тыс. м³/ч (H/d – относительная высота камеры горения, $d_г$ – диаметр штуцера горелки)

Для улучшения работы металлических горелок рекомендуется:

- воздушный патрубок выполнять диаметром, обеспечивающим соотношение скоростей выхода газа и воздуха из горелки близкое к единице, что уменьшает сопротивление горелки по газу и способствует устранению пульсаций;
- в штуцерах горелок устанавливать удлинительный патрубок из жаростойкой стали того же диаметра, что и воздушное сопло, а для увеличения стойкости патрубка его надо не доводнть до устья штуцера на половину диаметра последнего;
- между вентилятором и корпусом горелки устанавливать жалюзи, что улучшает качество автоматического регулирования расхода воздуха и способствует уменьшению пульсаций;
- увеличить напор вентиляторов для улучшения работы в скоростных режимах и создать дополнительное давление на жалюзи для устранения пульсаций.

5.3. КЕРАМИЧЕСКИЕ ГОРЕЛКИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

Керамические горелки для воздухонагревателей не изготавливаются серийно. Они проектируются индивидуально в зависимости от требуемой тепловой мощности, параметров дутья и конструктивных особенностей воздухонагревателей. Горелки для воздухонагревателей с выносной и встроенной камерой горения различной тепловой мощности разработаны ВНИИМТ. Технические и конструктивные характеристики горелок приведены в табл. 5.2, а общий вид горелок на рис. 5.7.

Горелка размещена на оси камеры горения. Ввод газа выполнен по центральному каналу, ввод воздуха — по периферийному. В месте поворота потока газа на 90° выполнена стенка специальной формы и размеров, предназначенная для выравнивания поля скоростей в потоке на участке его взаимодействия с воздушными струями. Для устранения возможности пульсаций и улучшения стабилизации пламени кладка центрального канала в определенных местах имеет специальную конфигурацию. Подвод воздуха выполнен в периферийный коллектор, из которого воздушные струи через два ряда щелей, расположенных на разных высотах, проникают в центральный канал, где происходит предварительное смешение и воспламенение топлива. В связи с ненадежностью расчетных методик количество воздушных щелей, их ширина и шаг определялись при исследовании горелок на аэродинамических моделях с последующей корректировкой на основании результатов промышленной эксплуатации.

Кладку керамических горелок выполняют из специального термостойкого огнеупора марки МК-80, разработанного УкрНИИО.

Воспламенение газа происходит в центральном канале горелки в месте ввода струй воздуха. Равномерное перемешивание потоков газа и воздуха способствует надежному воспламенению и медленному выгоранию газа по высоте камеры горения, которое завершается до выхода продуктов горения в подкупольное пространство.

Таблица 5.2

Технические и конструктивные характеристики керамических горелок воздухонагревателей конструкции ВНИИМТ (рис. 5.7)

Наименование показателей	Размерность	Воздухонагреватель доменной печи объемом, м³		
		1000	2000	3000
Тепловая мощность	МВт	55,9	79,7	107,8
Расход газа	тыс. м³/ч	38,7	55,6	75,4
Расход воздуха	тыс. м³/ч	48,8	69,5	94,0
Гидравлическое сопротивление тракта подачи:				
газа	кПа	1,58	1,23	1,02
воздуха	кПа	1,56	1,28	1,09
Диаметр газового сопла, $D_г$	м	1,43	1,73	1,9
Высота горелки H	м	5,8	6,2	7,0
Диаметр камеры горения, $D_к$	м	2,5	2,9	3,5
Масса кладки горелки	т	43	55,6	90,3

Длина факела керамических горелок зависит от количества, размеров и расположения воздушных щелей

Характерные зависимости изменения химического недожога и средней по сечению температуры продуктов сгорания по высоте камеры горения для горелки тепловой мощностью 106 МВт приведены на рис. 5.8. Экспериментальные данные получены при сжигании доменного газа с теплотой сгорания 4400 – 4600 кДж/м³ в количестве 85 тыс. м³/ч. Гидравлический диаметр горелки $d_{г.э}$ составлял 1,63 м. Температура купола воздухонагревателя достигала 1330 °С.

Такие характеристики факела по сравнению с характеристиками факелов металлических горелок обеспечивают снижение перепадов температур кладки вблизи горелок в 3–3,5 раза. При этом существенно, в 4–5 раз снижаются скорости ее нагрева и охлаждения, что уменьшает вероятность появления в кладке сколов и трещин.

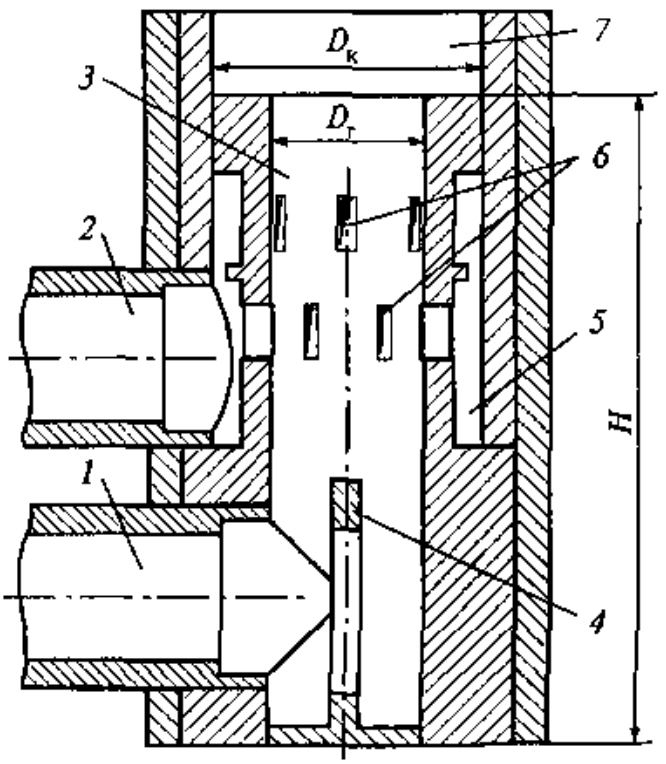


Рис. 5.7. Керамическая горелка воздухонагревателя конструкции ВНИИМТ.
1 – газовый патрубок; *2* – воздушный патрубок; *3* – центральный канал; *4* – выравнивающая стенка; *5* – коллектор; *6* – щелевой канал; *7* – камера горения

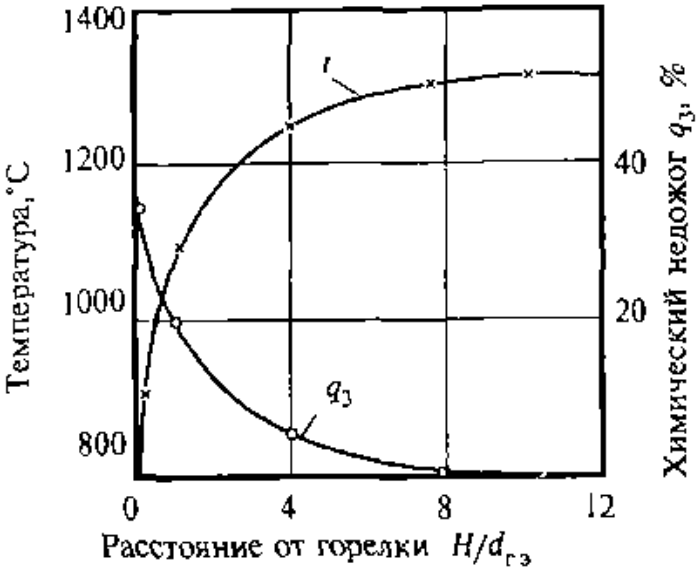


Рис. 5.8. Изменение химического недожога q_3 и средней температуры t по высоте камеры горения с керамической горелкой тепловой мощностью 106 МВт

Полученные данные справедливы для горелок, работающих как во встроенных, так и в выносных камерах горения.

5.4. ФОРКАМЕРНАЯ ГОРЕЛКА БЕСШАХТНОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ ВНИИМТ

Форкамерная горелка бесшахтного воздухонагревателя разработана ВНИИМТ при участии Уралгипромеза и ЦНИИпроектстальконструкции. Общий вид горелки показан на рис. 5.9, а технические характеристики приведены в табл. 5.3.

В горелке применен тот же принцип организации смешения и сжигания газа, что и в керамических горелках ВНИИМТ. Горелка выполнена в

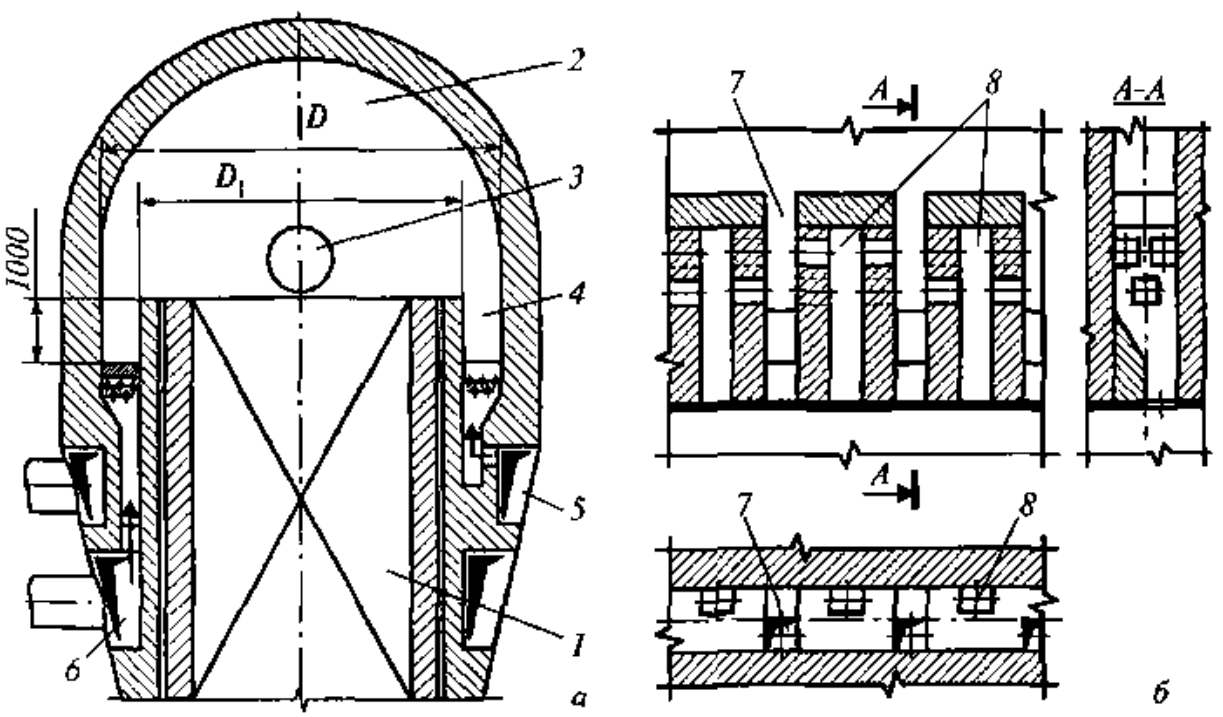


Рис 5 9. Форкамерная горелка бесшахтного воздухонагревателя ВНИИМТ:
а — общий вид: *б* — газовоздушные каналы, *1* — насадка, *2* — купол; *3* — штуцер горячего дутья; *4* — форкамера; *5* — газовый коллектор; *6* — воздушный коллектор; *7* — канал для прохода газа; *8* — канал для прохода воздуха

Таблица 5.3

Технические и конструктивные характеристики форкамерной горелки воздухонагревателя ВНИИМТ (рис. 5.9)

Наименование параметра	Размерность	Величина параметра
Тепловая мощность	МВт	60
Расход отопительного газа	тыс $м^3/ч$	50
Расход воздуха	тыс $м^3/ч$	55
Коэффициент расхода воздуха		1,05
Гидравлическое сопротивление тракта подачи:		
газа	кПа	0,9
воздуха	кПа	0,45
Наружный диаметр форкамеры D	м	10,03
Внутренний диаметр форкамеры D_1	м	8,06
Высота форкамеры	м	1,0
Количество пар газовых и воздушных каналов	шт	50

виде кольцевой форкамеры, расположенной между кладкой купола и кладкой насадочной камеры. В основании форкамеры вплотную друг к другу расположено несколько десятков керамических горелок. Горелки выполнены в виде радиальных перегородок, которые образуют каналы для прохода газа и воздуха параллельными чередующимися потоками. В выходном сечении горелки каждый воздушный поток перекрыт сводом и имеет отверстия для истечения воздуха поперечными струями в параллельно текущие потоки газа. Подводы газа и воздуха в горелочные каналы выполнены от кольцевых коллекторов.

При работе горелки происходит интенсивное перемешивание и практически полное сгорание газа в пределах форкамеры.

Характер изменения химического недожога и температуры продуктов сгорания по высоте форкамеры показан на рис. 5.10.

Горелка обеспечивает надежное воспламенение и устойчивое горение газа без отрывов и пульсаций. При переходе воздухонагревателя с режима нагрева насадки на дутье в кладке горелки не возникают большие колебания температуры. Ресурс горелки до капитального ремонта не менее 15 лет.

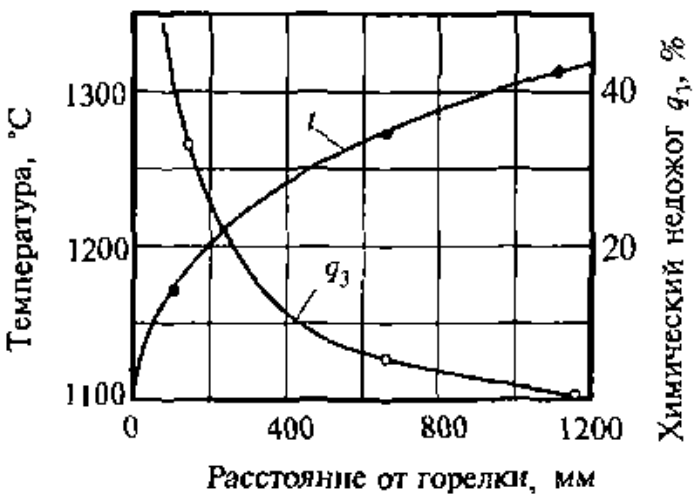


Рис. 5.10. Изменение химического недожога (q_3) и температуры (t) по высоте форкамеры горелки бесшахтного воздухонагревателя ВНИИМТ

5.5. ГОРЕЛКИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛОДЦЕВ

Для улучшения смешения в горелках нагревательных колодцев газ подают несколькими струями под углом к потоку воздуха. На рис. 5.11 показаны горелки нагревательных колодцев с отоплением из центра подины. Газовое сопло, состоящее из подвижной газовой трубы и насадки, расположено в круглом керамическом канале, через который подается воздух. Предусмотрена возможность опускания газового сопла для регулирования длины факела и смены насадки. С этой целью газ в горелки для сжигания холодной смеси коксового и доменного газов (рис. 5.11, *а*) подается через шарнирные соединения Горелки, предназначенные для сжигания подогретого газа (рис. 5.11, *б*), отличаются тем, что подвижная газовая труба перемещается в сальнике. Для уплотнения сальника предусмотрен кольцевой канал, соединенный со свечой. Горелки для природного газа, который подается под даалением 5—7 кПа, имеют фланцевое соединение с газопроводом. Подвижную газовую трубу и насадку изготавливают из жаропрочной хромоникелевой стали.

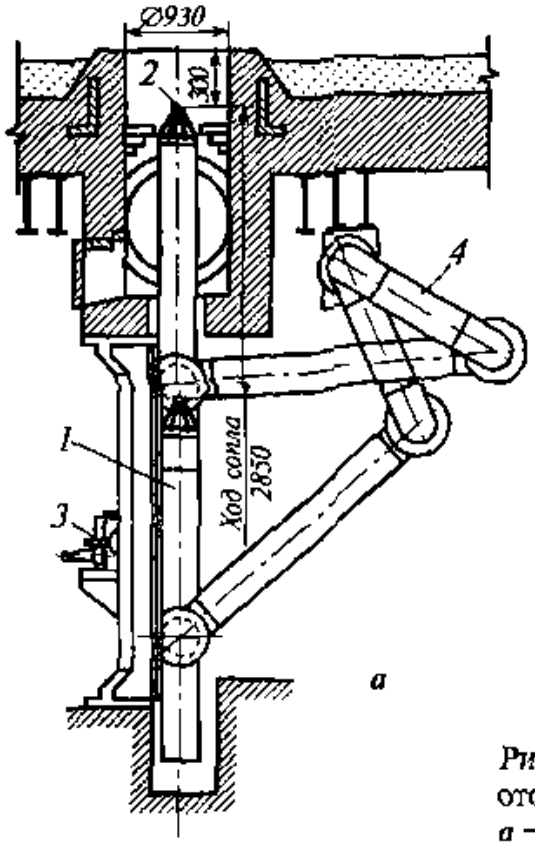
На рис. 5.12 показаны различные насадки газовых сопел и их пропускная способность по газу. Насадки газовых сопел выполияют массивными, так как они подвергаются действию высоких температур и могут испытывать значительные ударные нагрузки при падении слитков. Насадки выполняют конической формы, что предотвращает закупоривание щелей для выхода газа окалиной, падающей со слитков. Иногда торцовую поверхность насадки защищают набивной огнеупорной массой, укладываемой в специальное углубление.

Горелка нагревательного колодца с одной верхней горелкой показана на рис 5.13. Воздух к горелке подают с помощью инжектора. В качестве инжектирующей среды используют компрессорный воздух, давление которого перед горелкой 0,5—0,6 кПа. Газовое сопло горелки снабжают массивной литой металлической или керамической насадкой, в которой предусмотрено несколько отверстий, направленных под углом к потоку воздуха. При расчете проходных сечений в газовой насадке исходят из того, что при максимальной подаче газа скорость его вылета должна быть для смеси коксового и доменного газов 10– 12, для природного 25 м/с.

5.6. ВИХРЕВЫЕ ГОРЕЛКИ (ВНИИМТ-УРАЛМАШ) ДЛЯ ГАЗОВ С НИЗКОЙ ТЕПЛОТОЙ СГОРАНИЯ

Разработаны два типоразмера горелок, предназначенных для сжигания в горнах агломерационных машин газов с низкой теплотой сгорания при их повышенной влажности и запыленности. Общий вид горелок приведен на рис. 5.14, а технические характеристики в табл. 5.4.

Особенностью горелки является истечение газа одной струей с малой скоростью в вихревой поток воздуха, закрученного аксиальным лопаточным завихрителем.



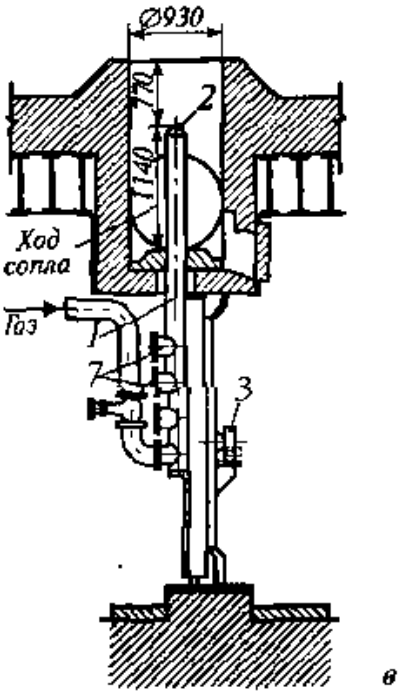
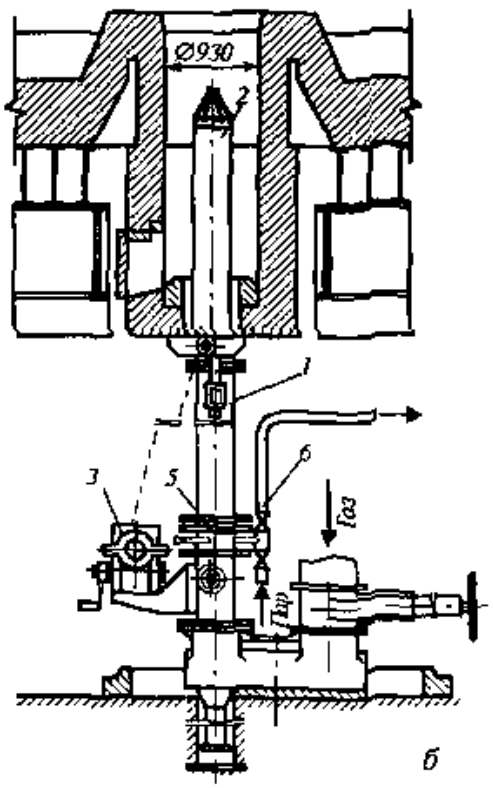


Рис. 5.11. Горелки нагревательных колодцев с отоплением из центра подины:
а – для сжигания холодной смеси коксового и доменного газов; *б* – для сжигания подогретой смеси коксового и доменного ияи доменного газов; *в* – для сжигания природного газа; *1* – подвижная газовая труба; *2* – газовая насадка; *3* – ручная лебедка, *4* – коленчатая шарнирная труба; *5* – сальник; *6* – свеча сальника; *7* – фланцевые подводы



Горелка состоит из воздушного корпуса, газового сопла, лопаточного воздушного завихрителя и обсадной трубы.

Воздушный корпус имеет подводящий патрубок, выходной канал с установленным на нем крепежным фланцем и патрубками для установки запального устройства и датчика контроля факела. Крепежный фланец и корпус горелки в месте соединения имеют ребра жесткости.

Патрубки для установки запального устройства и фотодатчика установлены под углом к оси горелки.

Газовое сопло выполнено в виде цилиндрического канала с плавным переходом с большого диаметра на малый при помощи конического сужения

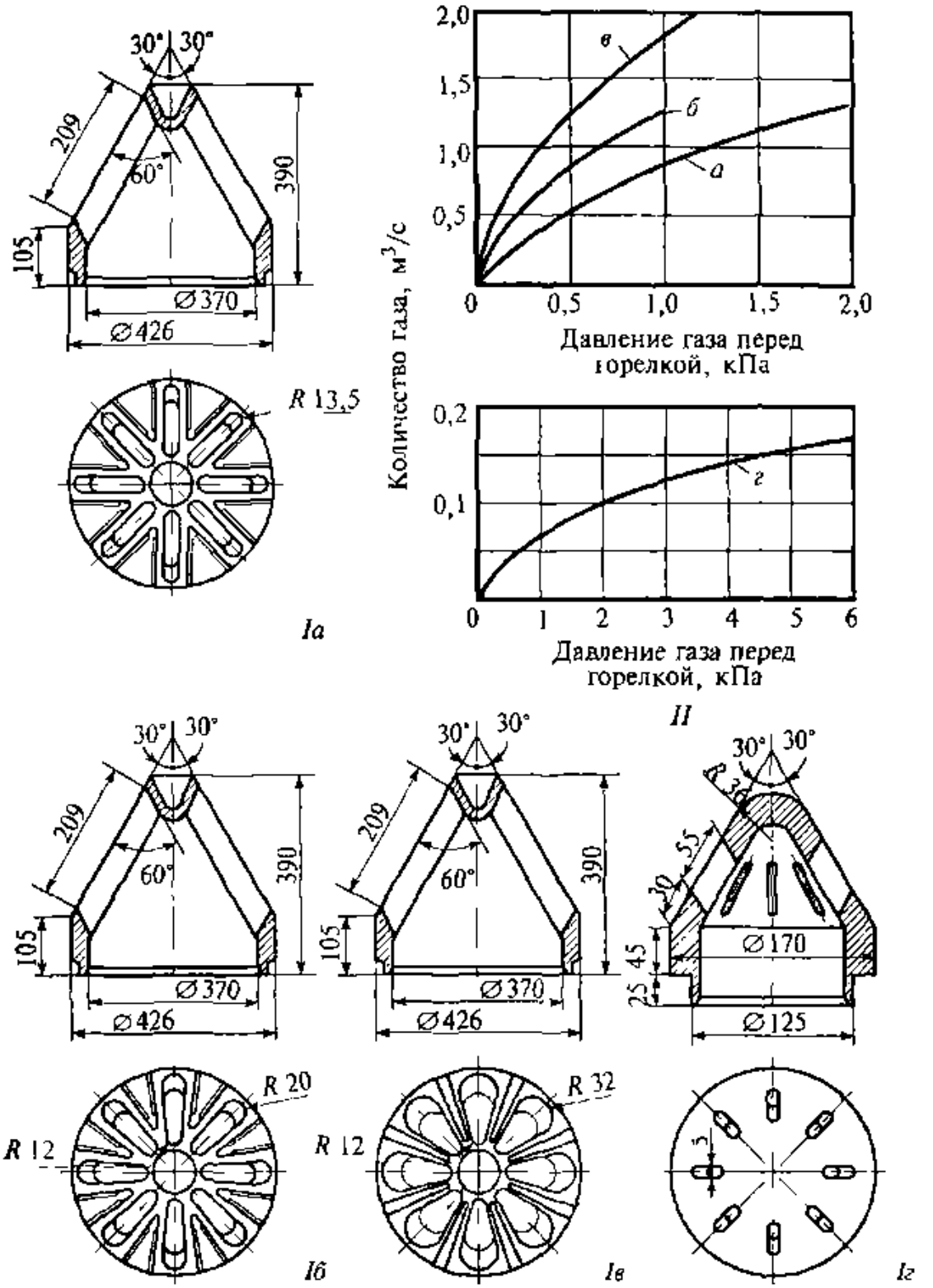


Рис. 5.12. Насадки *I* и пропускная способность по газу *II* горелок нагревательных колодцев с отоплением из центра подины:
а – для сжигания холодной смеси коксового и доменного газов (проходное сечение 600 см²); *б* – для сжигания подогретой (400 °С) смеси коксового и доменного газов (проходное сечение 700 см²); *в* – для сжигания подогретого (400 °С) доменного газа (проходное сечение 1000 см²), *г* – для сжигания природного газа (проходное сечение 22,8 см²)

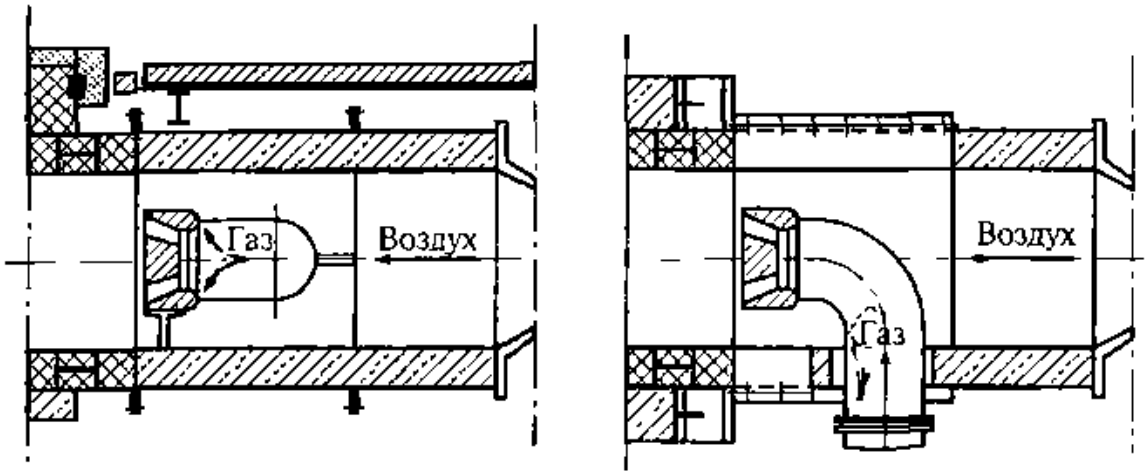


Рис. 5.13. Горелка нагревательного колодца с отоплением одной верхней горелкой

Таблица 5.4

Технические и конструктивные характеристики вихревых горелок для газов с низкой теплотой сгорания (рис. 5.14)

Наименование параметра	Размерность	Характеристика газа $Q_н^р$, МДЖ/м³		
		коксодоменная смесь, 15,1	газ фосфатных печей, 9,2	генераторный газ, 7,1
Номинальный расход газа	м³/ч	1900	535	700
Давление газа перед горелкой	кПа	2,5	1,4	1,9
Номинальный расход воздуха	м³/ч	6000	2550	2750
Давление воздуха перед горелкой	кПа	2,5	1,3	1,32
Диапазон изменения коэффициента расхода воздуха	–	1,9–2,5	1,9–2,7	1,67–2,8
Температура:				
газа	°С	40	20	20
воздуха	°С	300	20	20
Коэффициент рабочего регулирования	–	4	4	4
Характерный размер:				
D	мм	1000	1000	
D_1	" – "	375	280	
D_2	" – "	219	159	
D_3	" – "	120	100	
D_4	" – "	325	150	
D_5	" – "	426	273	
D_6	" – "	219	150	
D_7	" – "	530	370	
d	" – "	32	30	
d_1	" – "	20	10	
Количество отверстий:				
n	шт	8	8	
n_1	" – "	16	32 (в двл ряда)	

без уступов. К выходному участку конического сужения крепится труба, в которой выполнены два ряда отверстий. Через эти отверстия поступает часть воздуха, подаваемого в воздушный корпус Кольцевой канал, образованный выходным участком газового сопла и обсадной трубой, соединен наконечником, имеющим отверстия, расположенные под углом к оси горелки.

К обсадной трубе при помощи болтового соединения крепится лопаточный завихритель, состоящий из 8 лопаток, установленных под углом 45° к оси горелки на специальной втулке-трубе. В лопатках выполнены вырезы для прохода направляющей трубы запальника и фотодатчика. Выходной участок газового сопла, обсадная труба, конический переход газового сопла, наконечник и лопатки завихрителя выполнены из жаростойкой стали.

При работе горелки воздух подводится через входной патрубок в корпус и равномерно входит в лопаточный завихритель. Приобретая в завихрителе вихревое движение и частично поджимаясь конической выходной насадкой, воздух выходит в горелочную амбразуру, создавая в ней вихрь с зоной обратных токов по оси. Часть воздуха, проникая через отверстия в

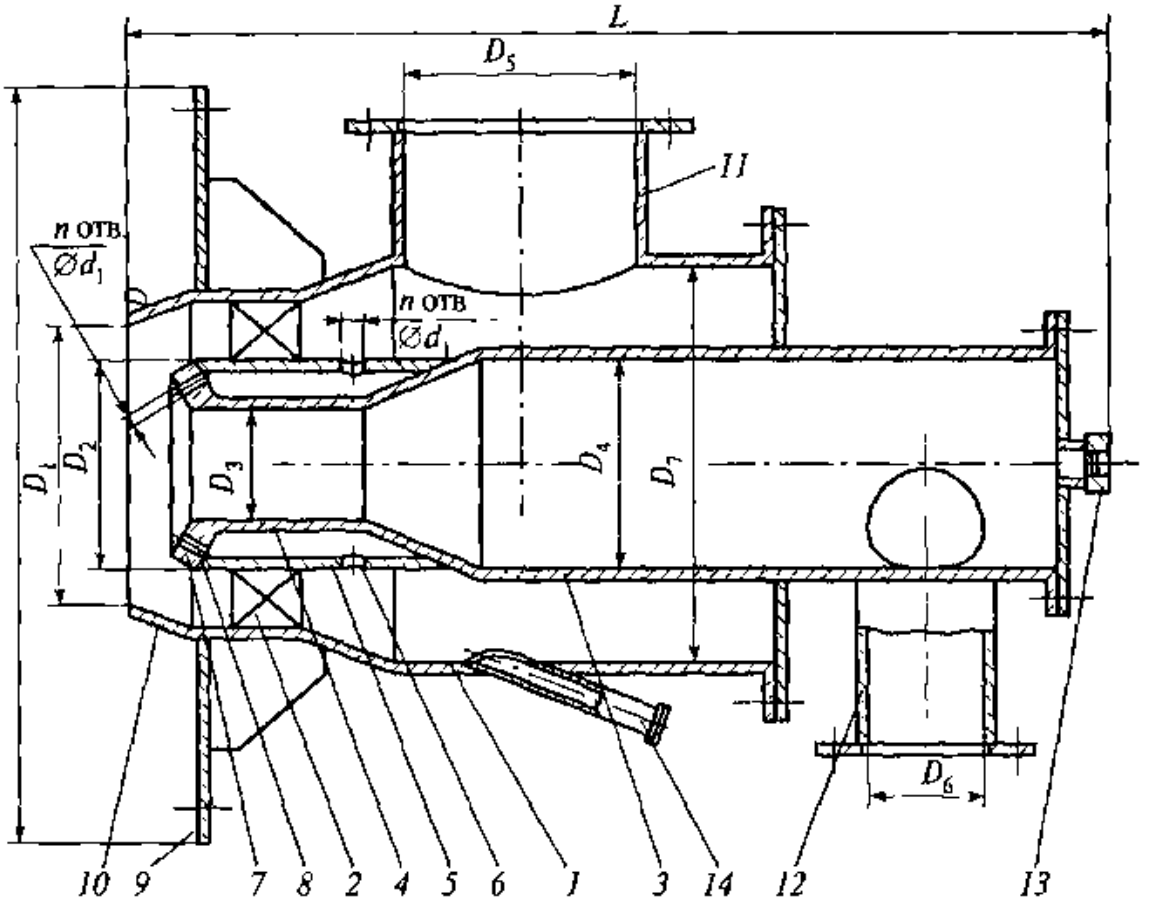


Рис. 5.14. Вихревая горелка для сжигания газов с низкой теплотой сгорания:
1 – воздушный корпус; *2* – лопаточный завихритель, *3* – газовое сопло; *4* – выходной участок газового сопла, *5* – обсадная труба, *6* – отверстия в обсадной трубе; *7* – насадка, *8* – отверстия в насадке; *9* – крепежный фланец, *10* – выходной патрубок, *11* – патрубок подвода воздуха; *12* – патрубок подвода газа; *13* – смотровое отверстие; *14* – патрубок для запальника (датчика контроля пламени)

обсадной трубе, попадает в кольцевой канал, образованный этой трубой. Истечение этого воздуха происходит через отверстия в наконечнике струями, сходящимися на оси горелочной амбразуры в зоне циркуляции обратных токов.

Газ, вытекающий из газового сопла, на начальном участке своего течения интенсивно перемешивается со струями пересекающего его воздуха. Затем частично подготовленная смесь газа и воздуха интенсивно перемешивается с потоком основного воздуха, вытекающего через завихритель. Воспламенение топливной смеси происходит в амбразуре, а догорание ее в рабочем пространстве печи.

Факел в горелочной амбразуре имеет три зоны стабилизации. Одна зона расположена вблизи газового сопла на воздушных струях, пересекающих газовый поток. Вторая зона — это циркуляционное течение продуктов сгорания непосредственно за газовым соплом (рис. 5.15). Третья зона — это циркуляционное течение в середине горелочного туннеля.

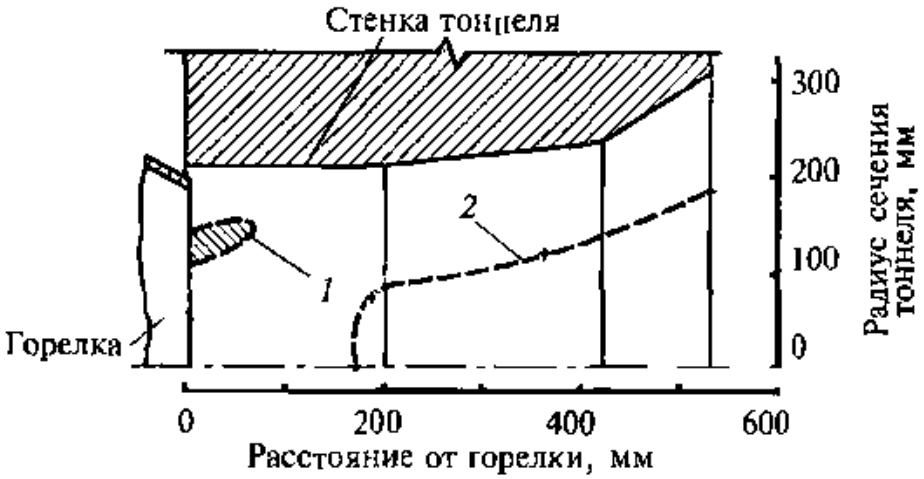


Рис. 5.15. Аэродинамические границы зоны циркуляции в горелочном туннеле:
1 – зона циркуляции за газовым соплом; *2* – граница центральной зоны циркуляции

Примененная схема смешения позволяет обеспечить интенсивное перемешивание газа и воздуха несмотря на то, что газовый поток вытекает из горелки одной струей большого калибра с малой скоростью. При работе на плохо очищенных газах забивания газового тракта пылевыми отложениями не наблюдается.

5.7. ГОРЕЛКИ ТУРБУЛЕНТНЫЕ ГТН

В турбулентных горелках типа ГТН, разработанных Стальпроектом, улучшения смешения газа и воздуха достигают путем закручивания потока воздуха при тагенциальной его подаче в корпус горелки. Турбулентные горелки разработаны двух типов: для сжигания газов с $Q_н^р$ = 3,75÷÷5,85 МДж/м^3 (тип I) и $Q_н^р$ = 5,85÷9,2 МДж/м^3 (тип II). Разработано 7 типоразмеров горелок с диаметром носика горелки от 50 до 200 мм.

Турбулентные горелки типа ГТН показаны на рис. 5.16, а их конструктивные размеры приведены в табл. 5 5.

Обозначение горелок состоит из индекса типа горелок, размера носика горелки (мм) и типа горелки Например, ГТН-100-1 означает: горелка турбулентная для газа низкого давления с диаметром носика горелки 100 мм, тип 1 (для газов с $Q_н^р$ = 3,75÷5,85 МДж/м^3).

На рис 5.17 показана зависимость пропускной способности горелки по газу от его давления перед горелкой для холодного (20 °С) газа с $Q_н^р$ = = 5,85 МДж/м^3, ρ = 1,17 кг/м^3, α = 1,05. На рис. 5.18 дана зависимость пропускной способности горелки по воздуху от его давления перед горелкой дяя холодного (20 °С) воздуха. При применении газа другой плотности

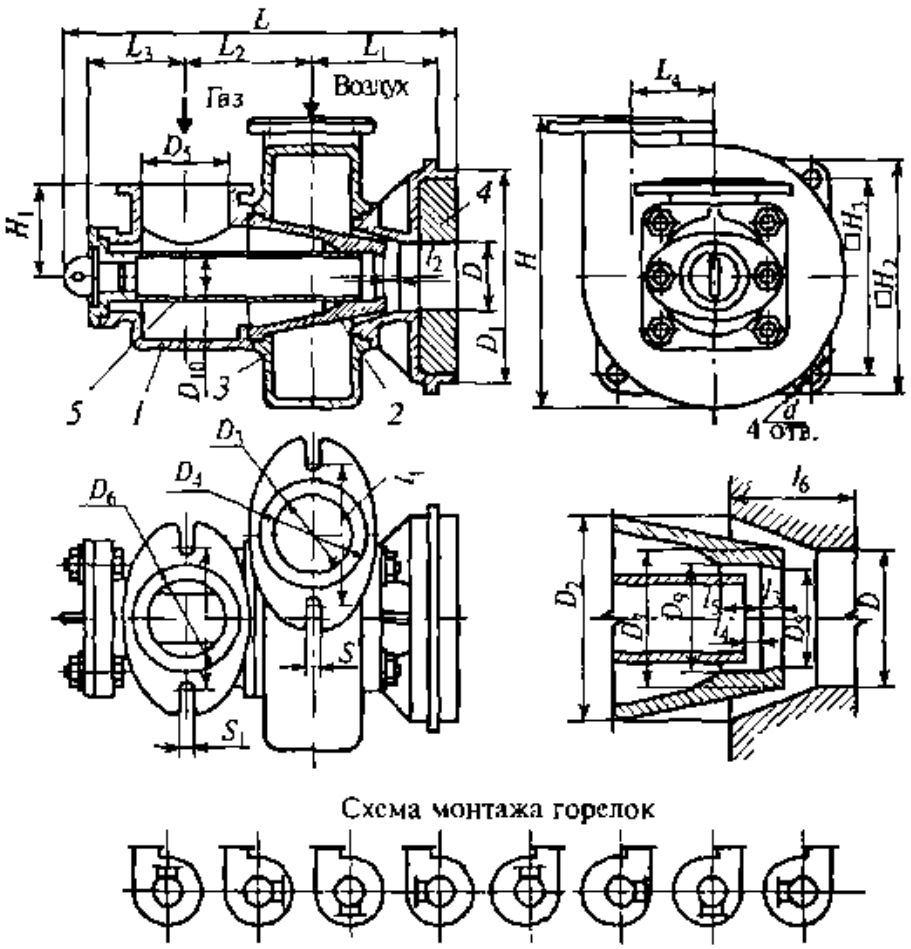


Схема монтажа горелок

Рис. 5 16. Турбулентные горелки типа ГТН для газов с низкой теплотой сгорания: *1* – газовый корпус; *2* – газовое сопло; *3* – воздушный корпус; *4* – горелочный камень; *5* – гляделка

Таблица 5.5

Конструктивные размеры (мм) турбулентных горелок для газов с низкой теплотой сгорания типа ГТН (рис. 5.16)

Обозначение	ГТН-50		ГТН-60		ГТН-75		ГТН-100		ГТН-125		ГТН-150		ГТН-200	
Тип	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
D	50	50	60	60	75	75	100	100	125	125	150	150	200	200
D_1	220	220	220	220	220	220	280	280	320	320	420	420	540	540
D_2	75	75	90	90	112	112	150	150	188	188	225	225	300	300
D_3	65	65	75	75	100	100	125	125	150	150	200	200	250	250
D_4	110	110	128	128	148	148	178	178	202	202	258	258	312	312
D_5	65	50	75	65	100	75	125	100	150	125	200	150	250	200
D_6	110	90	128	110	148	128	178	148	202	178	258	202	312	258
D_7	50	48	60	57	75	71	100	95	125	119	150	142	200	190
D_8	38	38	45	45	56	56	75	75	94	94	113	113	150	150
D_9	40	40	48	48	60	60	80	80	100	100	120	120	160	160
D_{10}	34	35	40	42	50	53	68	70	85	88	100	105	135	140
d	18	18	18	18	18	18	22	22	22	22	22	22	26	26
H	135	135	150	150	190	190	230	230	270	270	350	350	420	420
H_1	100	100	110	110	125	125	140	140	170	170	190	190	235	235
H_2	250	250	250	250	250	250	310	310	350	350	460	460	580	580
H_3	190	190	190	190	190	190	250	250	290	290	400	400	520	520
L	375	365	405	395	490	450	570	540	645	615	770	715	910	835
L_1	120,5	120,5	132,5	132,5	155	155	183,5	183,5	213	213	255	255	312	312
L_2	115	110,5	125	120	155	140,5	185	170	210	200,5	260	235	310	185
L_3	95,5	90	100,5	95,5	125	99,5	140,5	125	160	139,5	190	160	220	190
L_4	60	60	70	70	95	95	120	120	140	140	190	190	240	240
l	130	130	150	150	170	170	200	200	225	225	280	280	235	235
l_1	130	110	150	130	170	150	200	170	225	200	280	225	335	280
l_2	13	13	15	15	19	19	25	25	31	31	38	38	50	50
l_3	8	8	10	10	12	12	16	16	20	20	24	24	32	32
l_4	5	5	6	6	8	8	10	10	13	13	15	15	20	20
l_5	15	15	18	18	23	23	30	30	38	38	45	45	60	60
l_6	33	33	40	40	50	50	66	66	83	83	100	100	132	132
S	15	15	15	15	18	18	18	18	22	22	22	22	22	22
S_1	15	15	15	15	18	15	18	18	22	18	22	22	22	22

и при подогреве газа или воздуха на графиках (рис. 5.17 и 5.18) откладывают расчетные величины, которые определяют так же, как для горелок типа "труба в трубе", по формуле (4.8, *а, б*) с учетом приведенных выше поправочных коэффициентов на плотность и температуру.

Для газов с теплотой сгорания, не равной 5,85 МДж/м^3, и при других значениях коэффициента расхода воздуха полученные по графикам на рис. 5.17 и 5.18 величины следует умножить на поправочный коэффициент, определяемый по графику рис. 5.19 в зависимости от отношения количества воздуха и газа $L = \alpha L_0$.

Выбор турбулентных горелок иллюстрирован следующими примерами.

Пример 1. Подобрать турбулентную горелку для сжигания $V_{0\,г} = 0{,}1$ м^3/с смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р = 5{,}05$ МДж/м^3. Газ холодный ($t_г = 20$ °С), воздух подогрет до 300 °С. Давление газа перед горелкой 1,2 кПа, $\alpha = 1{,}1$.

По рис. 1-5 приложения I находим $\rho_{0г} = 1{,}22$ кг/м^3 и $L_0 = 1{,}05$ м^3/м^3 газа. Количество воздуха, м^3/м^3 газа, при $\alpha = 1{,}1$

$$L = 1{,}1 \cdot 1{,}05 = 1{,}16.$$

Расчетное количество газа

$$V_г^{рас} = V_{0г} k_г \sqrt{\rho_{0г}/\rho_{рас}} = 0{,}1 \cdot 1{,}004 \sqrt{1{,}22/1{,}17} = 0{,}102 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $k_г$ — поправочный коэффициент для газа, определен по графику (см. рис. 5.19) при $L = 1{,}16$.

По расчетному количеству газа и его давлению перед горелкой по графику (см. рис. 5.17) выбираем горелку ГТН-100-I.

Расчетное количество воздуха

$$V_г^{расч} = V_г L k_в k_t = 0{,}1 \cdot 1{,}16 \cdot 0{,}98 \cdot 1{,}4 = 0{,}16,$$

где $k_в$ — поправочный коэффициент для воздуха, определен по графику (см. рис. 5.19) при $L = 1{,}16$; k_t — поправочный коэффициент на температуру воздуха, определен по графику (см. рис. 4.8) при заданной температуре воздуха.

По расчетному количеству воздуха для горелки ГТН-100-I по графику (см. рис. 5.18) определяем необходимое давление воздуха перед горелкой (5 кПа).

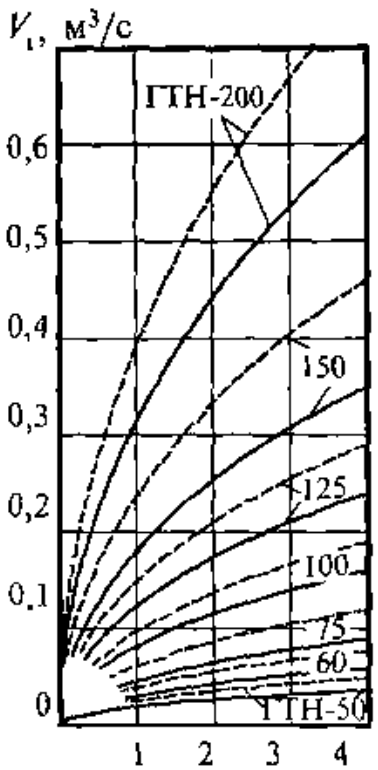


Рис. 5.17. Пропускная способность по газу горелок типа ГТН для газов с теплотой сгорания, МДж/м^3:
– – – – – 3,75 ÷ 5,85;
——— 5,85 ÷ 9,20

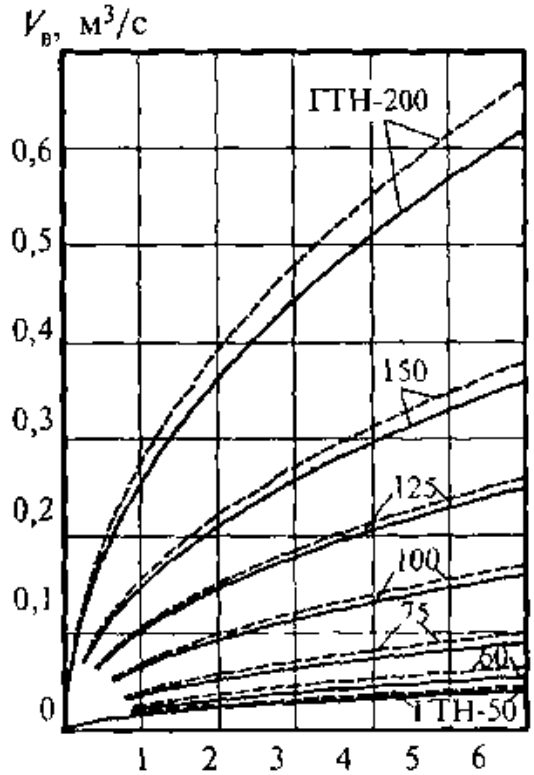


Рис. 5.18. Пропускная способность по воздуху горелок типа ГТН для газов с теплотой сгорания, МДж/м^3.
– – – – – 3,75 ÷ 5,85;
——— 5,85 ÷ 9,20

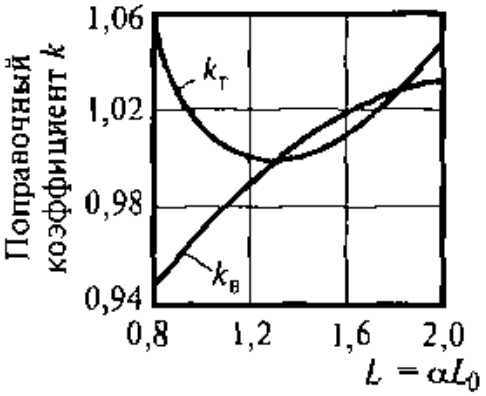


Рис. 5.19. Поправочные коэффициенты для газа $k_г$ и воздуха $k_в$

Пример 2. Определить пропускную способность горелки ГТН-150-1 при подаче через нее смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р = 6{,}3$ МДж/м^3. Давление газа перед горелкой 0,8 кПа. Газ и воздух холодные (20 °С); $\alpha = 1{,}05$.

По рис. I-6 и I-7 приложения 1 интерполяцией находим $\rho_{0г} = 1{,}14$ кг/м^3 и $L_0 = 1{,}36$ м^3/м^3 газа. При $\alpha = 1{,}05$ $L = 1{,}05 \cdot 1{,}36 = 1{,}43$ м^3/м^3 газа.

По графику (см. рис. 5.17) находим, что при заданном давлении газа для горелки ГТН-150-1 $V_г^{расч} = 0{,}16$ м^3/с. Пропускная способность горелки по газу

$$V_{0г} = \frac{V_г^{расч}}{k_г\sqrt{\rho_{0г}/\rho_{расч}}} = \frac{0{,}16}{1{,}0\sqrt{1{,}14/1{,}17}} = 0.161 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $k_г$ — поправочный коэффициент для газа, определен по графику на рис. 5.19 при $L = 1{,}43$ м^3/м^3.

$$V_{0в} = LV_{0г} = 1{,}43 \cdot 0{,}161 = 0{,}23 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$V_в^{расч} = V_{0в}k_в = 0{,}23 \cdot 1{,}01 = 0{,}232 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику на рис. 5.18 находим, что при заданном расчетном количестве воздуха его давление перед горелкой ГТН-150-1 должно составлять 2,5 кПа.

5.8. ГОРЕЛКИ ДЛЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ТИПА ГНП

В горелках для природного газа низкого давления типа ГНП, разработанных Теплопроектом, улучшения смешения добиваются путем установки завихрителя на воздушном пути. Кроме обычного одноструйного газового сопла типа Б, для дальнейшего сокращения факела применяют многоструйный наконечник типа А, в котором поток газа разбивается на мелкие струи и подается под углом к потоку воздуха.

Горелки типа ГНП рассчитаны на сжигание природного и сжиженного газов, при этом меняют только газовое сопло. Горелки могут работать с воздухом, подогретым до 500 °С. Разработано 9 типоразмеров горелок, каждый из которых может иметь сопла типов А и Б для природного и сжиженного газа.

Горелки для природного газа низкого давления типа ГНП показаны на рис. 5.20, а их конструктивные размеры приведены в табл. 5.6.

Горелки выполнены из литых деталей и крепятся на печи с помощью горелочной плиты.

Таблица 5.6

Конструктивные размеры (мм)* и характеристики горелок для природного газа низкого давления типа ГНП (рис. 5.20)

Обозначение	ГНП-1	ГНП-2	ГНП-3	ГНП-4	ГНП-5	ГНП-6	ГНП-7	ГНП-8	ГНП-9
D	25	33	45	55	73	92	110	128	142
D_1	36	41	68	80	106	131	151	175	188
D_2	90	100	130	150	170	200	225	255	255
D_3	120	130	160	185	205	235	260	290	290
D_4	45	60	80	90	130	130	150	170	180
D_5	70	90	115	135	185	185	220	250	270
D_6	45	58	82	98	132	132	158	182	200
d	14	14	14	18	18	18	18	18	18
d_1	14	14	14	14	18	18	18	23	23
H	80	90	110	120	140	160	170	200	200
H_1	110	120	150	170	225	225	260	290	320
H_2	80	90	115	130	175	175	210	240	260
h	10	10	12	12	14	15	16	16	16
L	180	205	260	30	362	397	453	515	568
l	45	50	55	75	90	105	120	135	145
n	4	4	4	4	4	8	8	8	8
Для природного газа									
d_2	$^3/_4$"	$^3/_4$"	1"	1"	$1^1/_4$"	$1^1/_2$"	2"	$2^1/_2$"	$2^1/_2$"
d_3	5,5	7,0	10,0	13,5	16,0	20,0	24,0	28,0	31,0
d_4	3,2	4,2	4,8	6,6	7,8	9,6	11,8	13,5	15,5
Число отверстий n_1	4	4	6	6	6	6	6	6	6
Для сжиженного газа									
d_2	$^1/_2$"	$^1/_2$"	$^3/_4$"	$^3/_4$"	1"	$1^1/_4$"	2"	$2^1/_2$"	$2^1/_2$"
d_3	4,5	5,8	8,0	9,5	13,0	16,0	20,0	23,0	25,0
d_4	2	2,8	3,4	3,7	6,4	8,0	9,0	10,6	12,0
Число отверстий n_1	4	6	8	10	6	6	6	6	6
Масса горелки, кг	6,6	7,8	14,4	22,0	37,0	43,0	58,0	81,0	96,0

Тип сопла	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
Длина факела**, мм	230	340	264	330	420	480	550	Нет св.	1740	2060	1680	1990	1300	Нет св	1140	1660	2270	2700

*Кроме указанных особо.

**Длина факела природного газа при давлении газа перед горелкой 4 кПа.

Обозначение горелок включает индекс типа горелок, номер типоразмера и тип газового сопла (А или Б) для природного (П) или сжиженного (С) газа. Например, обозначение горелки ГНП-5АС расшифровывается так: горелка для природного газа низкого давления, типоразмер 5, с многоструйным газовым соплом типа А для сжиженного газа.

Выбор горелок осуществляется следующим образом: сначала в зависимости от необходимой пропускной способности горелки по газу, вида применяемого газа, его давления перед горелкой и типа выбранного сопла

по графикам (рис 5.21–5 23) определяют типоразмер горелки, а затем для выбранного типоразмера горелки в зависимости от пропускной способности горелки по газу и вида применяемого газа по графикам (рис. 5.24–5.25) находят необходимое давление воздуха перед горелкой.

Графики (см. рис. 5.21, 5.22 и 5.24) построены для холодного (0 °С) природного газа с $Q_н^р$ = 35,6 МДж/м³ и ρ = 0,73 кг/м³, сжигаемого с холодным (0 °С) воздухом при расходе воздуха $L = \alpha L_0$ = 10,2 м³/м³ газа, что соответствует α = 1,05. Графики на рис. 5.23 и 5.25 построены для холодного (0 °С) сжиженного газа (пропана) с $Q_н^р$ = 88,84 МДж/м³ и $\rho_г$ =2,03 кг/м³, сжигаемого с холодным (0 °С) воздухом при L = 26,1 м³/м³ газа, что соответствует α = 1,05. Для всех графиков принято противодавление в камере сгорания от 5 до 10 Па.

Пример. Подобрать горелку для сжигания 0,03 м³/с природного газа $Q_н^р$ = 35,6 МДж/м³ в горелке с многоструйным соплом типа А. Давление газа перед горелкой 2 кПа, температура подогрева воздуха 400 °С

По графику (см. рис. 5.21) для заданной пропускной способности горелки по газу 0,03 м³/с и его давления выбираем горелку ГНП-7АП.

По графику (см. рис. 5 24) для этого типоразмера горелки при пропускной способности по газу 0,03 м³/с находим давление холодного воздуха 0,8 кПа. Необходимое давление воздуха перед горелкой с учетом его температуры 0,8 · 673 : 273 ≈ 1,9 кПа.

Теплотехнические характеристики факела горелок ГНП при сжигании природного газа и их зависимость от режимных параметров подробно исследованы во ВНИИМТ [2].

Поток, выходящий из амбразуры горелки, имеет два максимума на кривой динамического напора вблизи ее стенок. Интенсивно закрученный факел в топочном объеме раскрывается под углом около 35–44° (рис. 5.26). Если факел развивается в стесненных условиях, то на длине около пяти калибров он деформируется, уменьшая свой диаметр за счет развитой зоны периферийной циркуляции продуктов сгорания. Эта зависимость справедлива для горелок

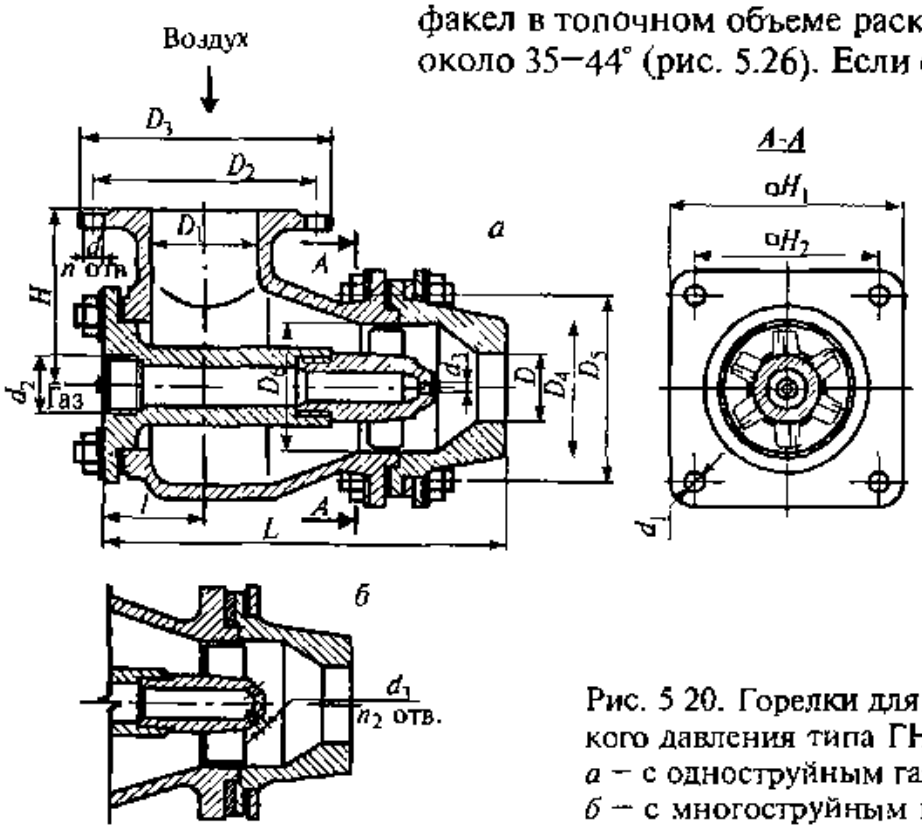


Рис. 5 20. Горелки для природного газа низкого давления типа ГНП:
а – с одноструйным газовым соплом типа Б;
б – с многоструйным наконечником типа А

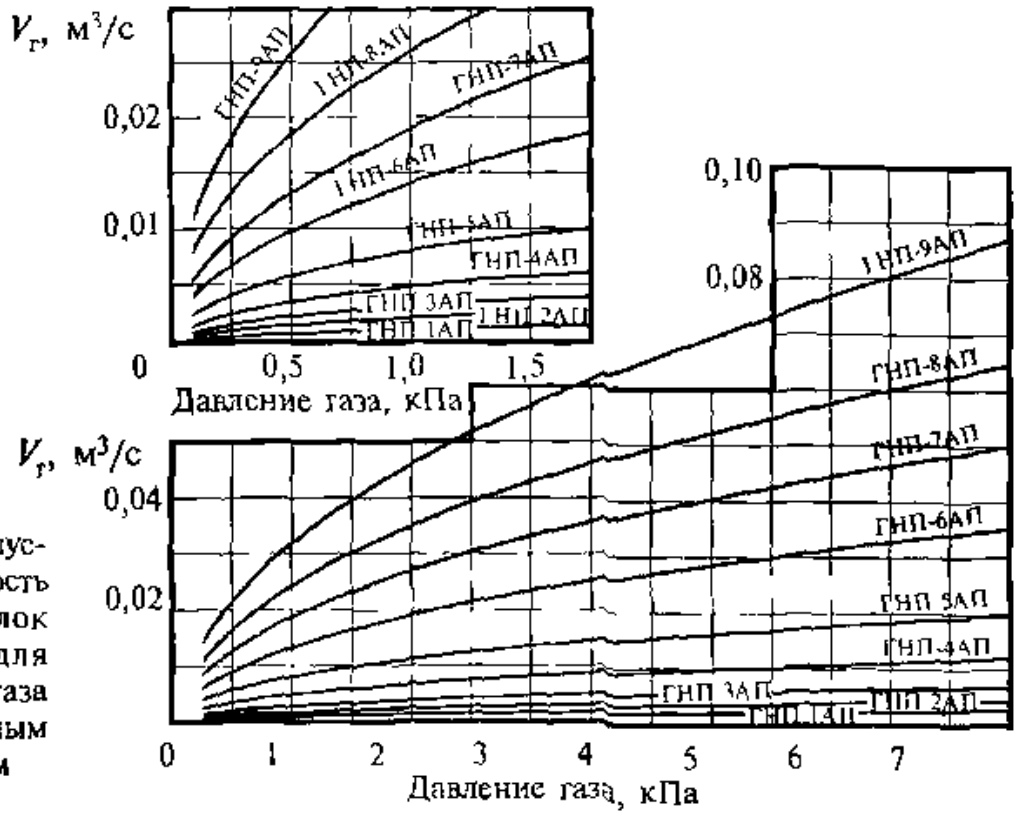


Рис 5.21. Пропускная способность по газу горелок типа ГНП для природного газа с многоструйным наконечником

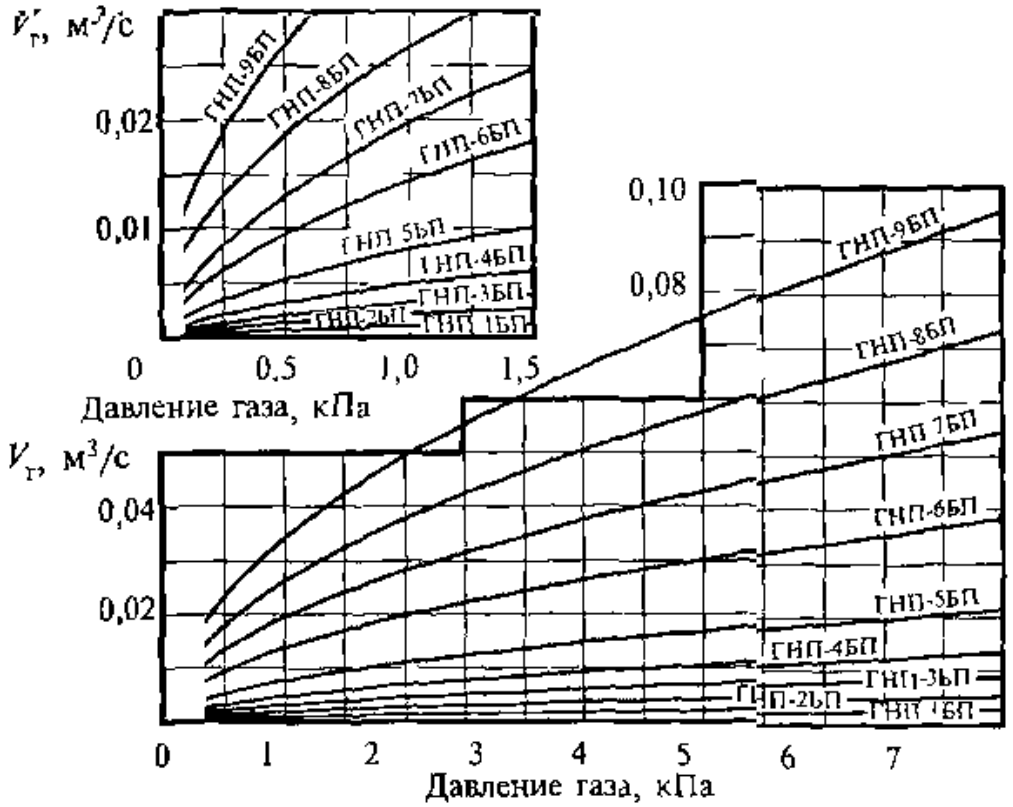


Рис. 5.22. Пропускная способность по газу горелок типа ГНП для природного газа с одноструйным газовым соплом

разного размера и не зависит от тепловой нагрузки и коэффициента расхода воздуха.

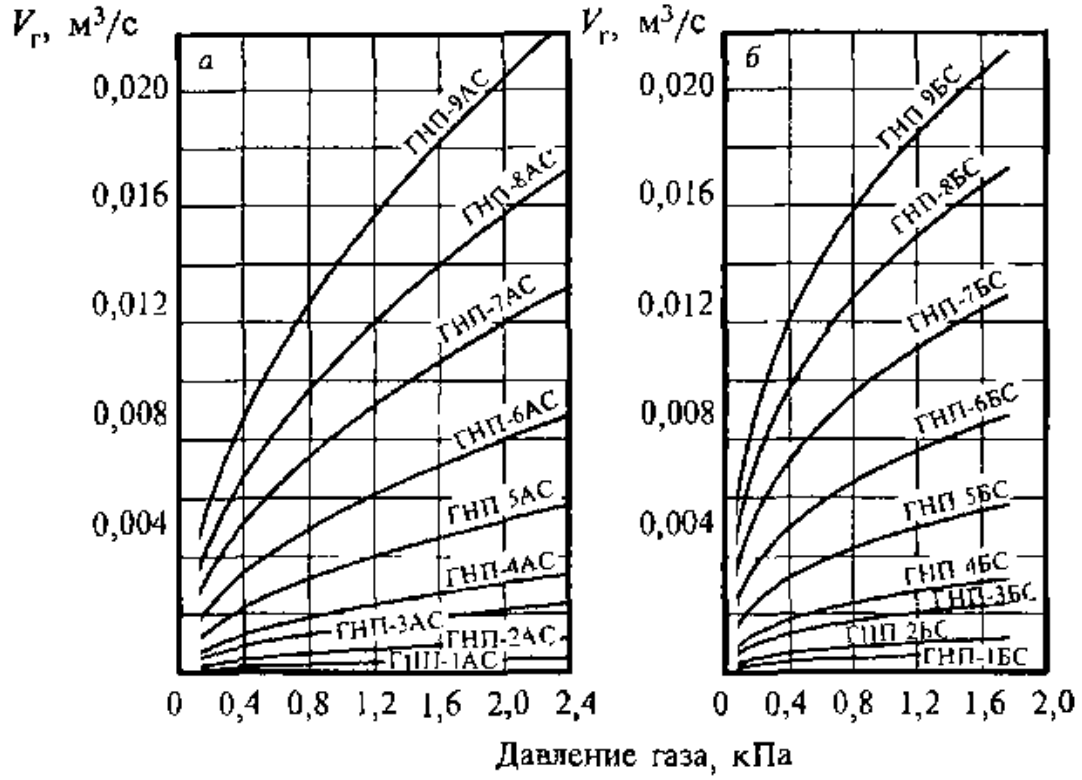


Рис. 5.23. Пропускная способность по газу горелок типа ГНП для сжиженного газа: *а* — с многоструйным наконечником; *б* — с одноструйным газовым соплом

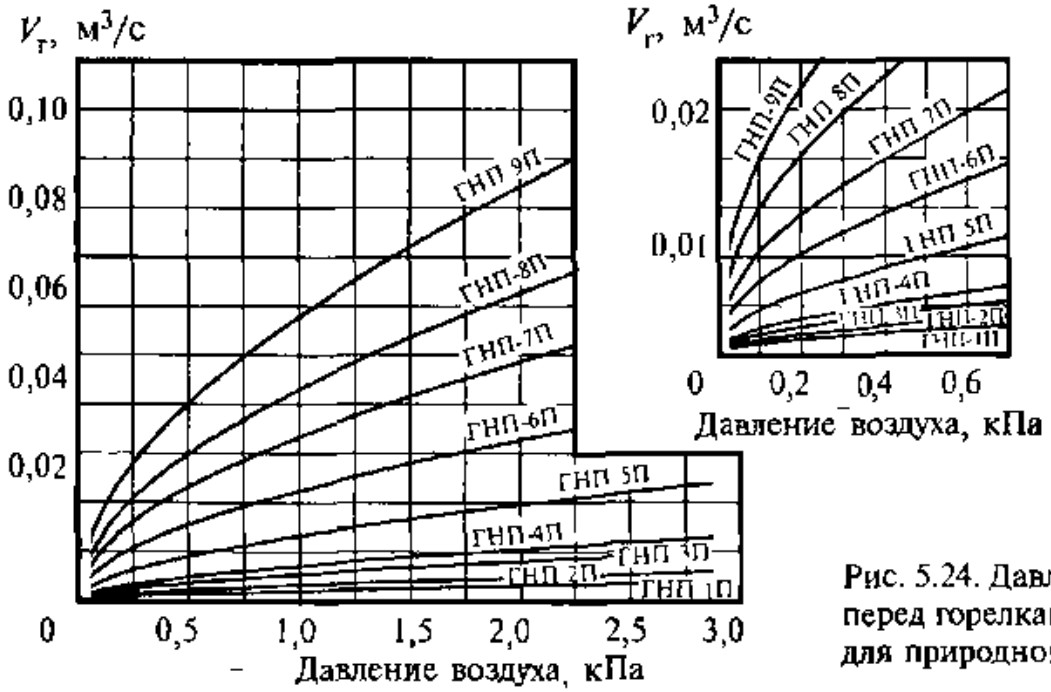


Рис. 5.24. Давление воздуха перед горелками типа ГНП для природного газа

Основная масса топлива при наконечниках типа А сгорает в пределах горелочного туннеля. Химический недожог при выходе из туннелей при номинальной нагрузке даже при интенсивном охлаждении факела не превышает 40 %. На расстоянии около 15 калибров от горелки при $\alpha = 1{,}05 \div 1{,}1$ химический недожог равен нулю.

С повышением тепловой нагрузки температура по всей длине факела возрастает, однако положение максимума температур при этом заметно не изменяется (рис. 5.27).

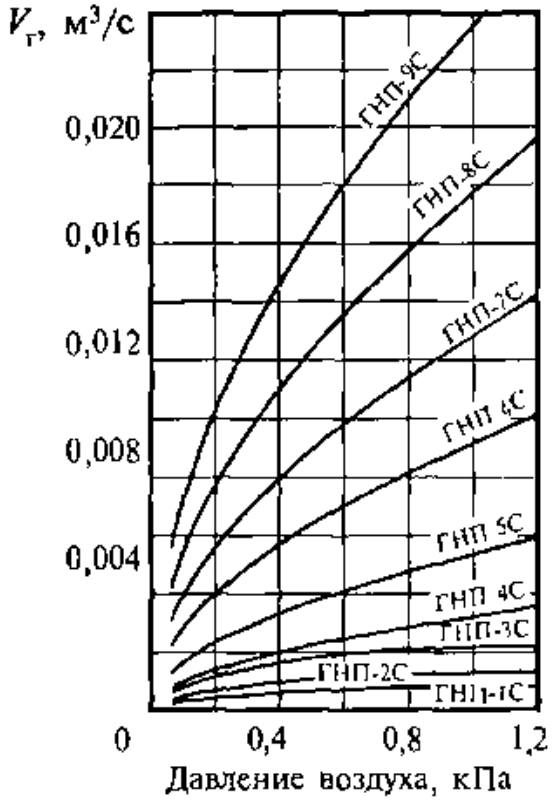


Рис. 5.25. Давление воздуха перед горелками типа ГНП для сжиженного газа

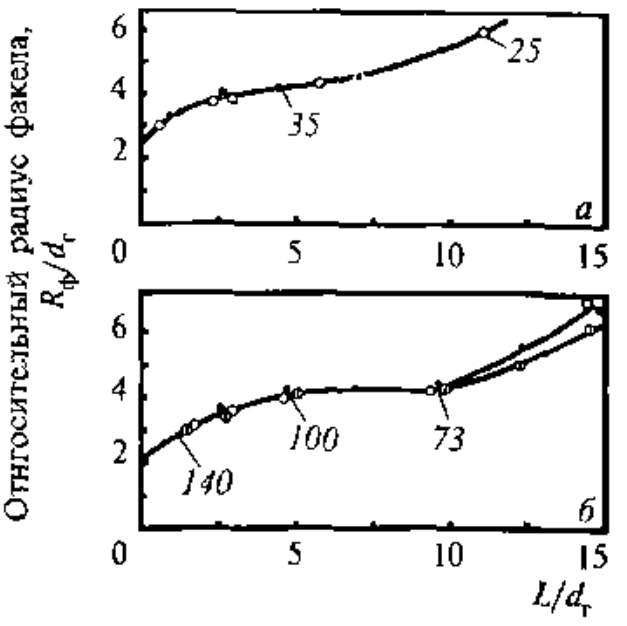


Рис 5.26. Изменение относительного радиуса факела по его длине при различном расходе газа (указано на кривой, м³/ч):
а – горелка ГНП-5; *б* – горелка ГНП-9

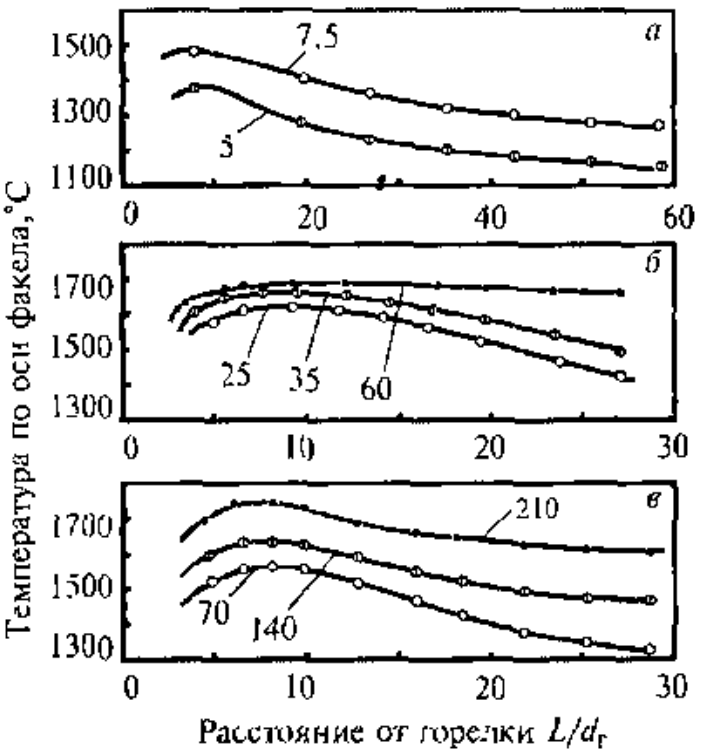


Рис. 5.27. Температура по оси факела при различном расходе газа ($V_г$, м³/ч, указано цифрами на кривых):
а – горелка ГНП-1; *б* – горелка ГНП-5; *в* – горелка ГНП-9

Температура факела при различных горелках, работающих в геометрически подобных системах и при равных тепловых напряжениях сечения топочного объема, различается сравнительно мало. Однако при сжигании газа горелками большого размера максимум температур располагается ближе к передней стенке камер сгорания.

Теплоотдача от факела характеризуется большим максимумом вблизи передней стенки камер на расстоянии 8–9 калибров горелки при сжигании с холодным воздухом и на расстоянии около 7 калибров при сжигании с воздухом, подогретым до 350 °С. При повышении тепловой нагрузки тепло-

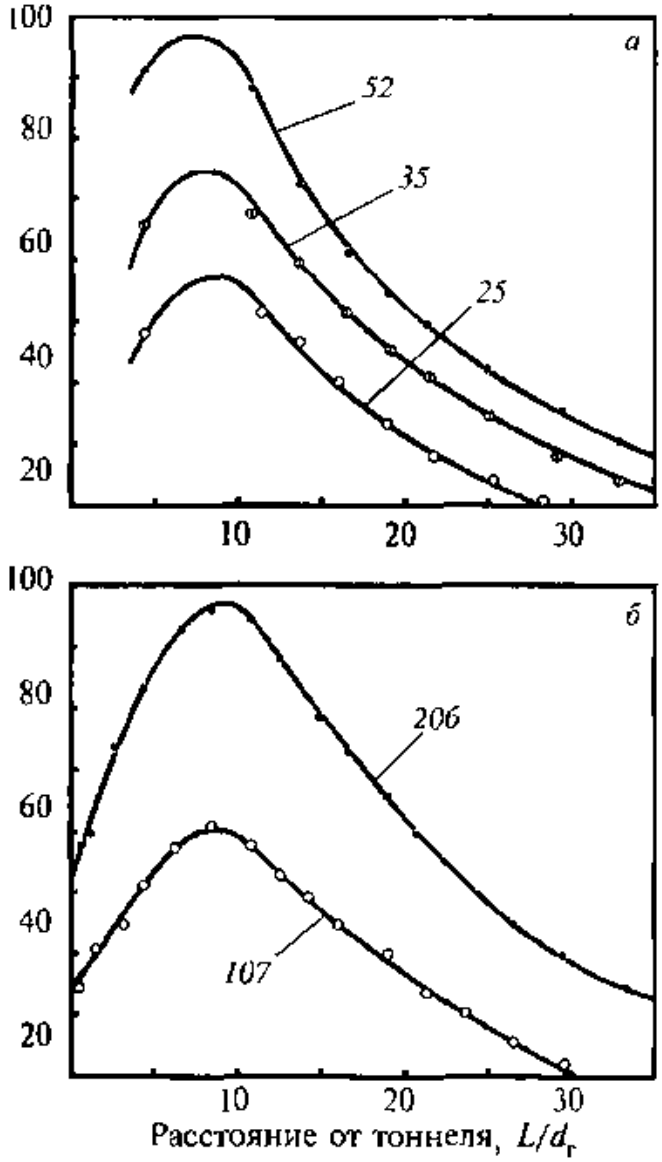


Рис. 5 28. Теплоотдача от факела к ограничивающим его стенкам камер сгорания по длине при различном расходе газа (V, м³/ч): *а* – горелка ГНП-5, *б* – горелка ГНП-9

отдача возрастает, но положение максимума относительно горелки заметно не изменяется (рис. 5.28).

5.9. ГОРЕЛКА С РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВСТАВКОЙ

Горелка разработана Теплопроектом для печей безокислительного нагрева. Разработаны два типоразмера горелок ГНП-Б3 и ГНП-Б4. Общий вид горелки показан на рис. 5.29, а основные технические данные приведены в табл. 5.7.

Горелка работает с воздухом, подогретым до 500 °С. Агрегаты, на которых устанавливаются горелки, должны иметь устройство для дожигания продуктов неполного сгорания.

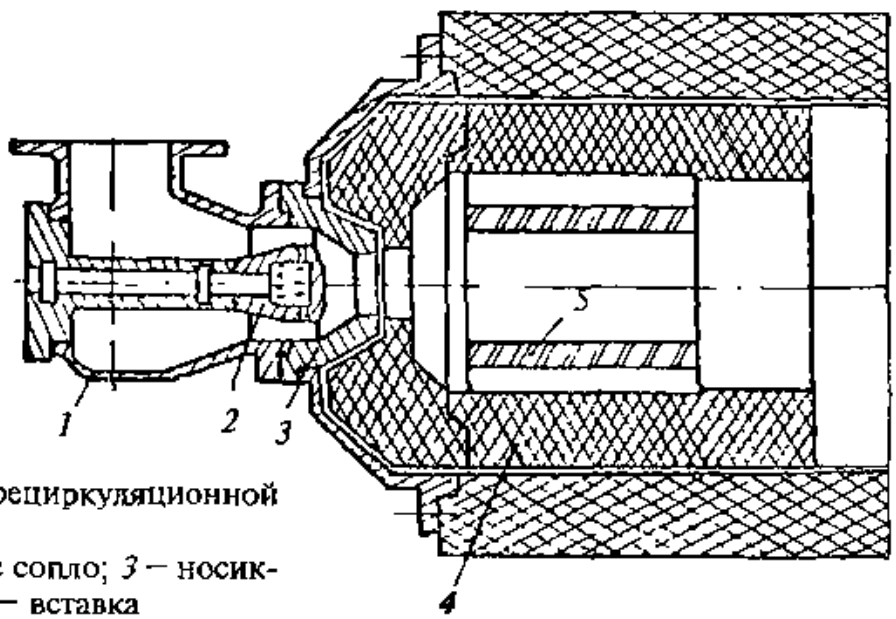


Рис. 5.29. Горелка с рециркуляционной вставкой:
1 – корпус; *2* – газовое сопло; *3* – носик-фурма, *4* – туннель; *5* – вставка

Таблица 5.7

Технические данные горелок ГНП-Б

Наименование параметра	Размерность	Типоразмер	
		ГНП-Б3	ГНП-Б4
Номинальная тепловая мощность за вычетом недожога	кВт	127	209
Номинальный расход газа	м³/ч	39	57,3
Номинальное давление газа	кПа	5,6	4,0
Номинальное давление воздуха	То же	1,35	1,45
Коэффициент расхода воздуха при номинальной тепловой мощности	–	0,5	0,5
Коэффициент рабочего регулирования	–	5,3	5,8
Состав продуктов сгорания	%		
H_2		17,5	17,0
CH_4		2,5	2,0
CO		11,0	10,0
O_2		0,5	0,5
CO_2		3,0	3,0

5.10. ГОРЕЛКИ ДУТЬЕВЫЕ УНИФИЦИРОВАННЫЕ ГДУВ

Горелки типа ГДУВ, разработанные Теплопроектом, предназначены для сжигания газообразного топлива с теплотой сгорания от 7,65 до 90 МДж/м³ в промышленных печах, сушилках и топках технологических установок. Газо-

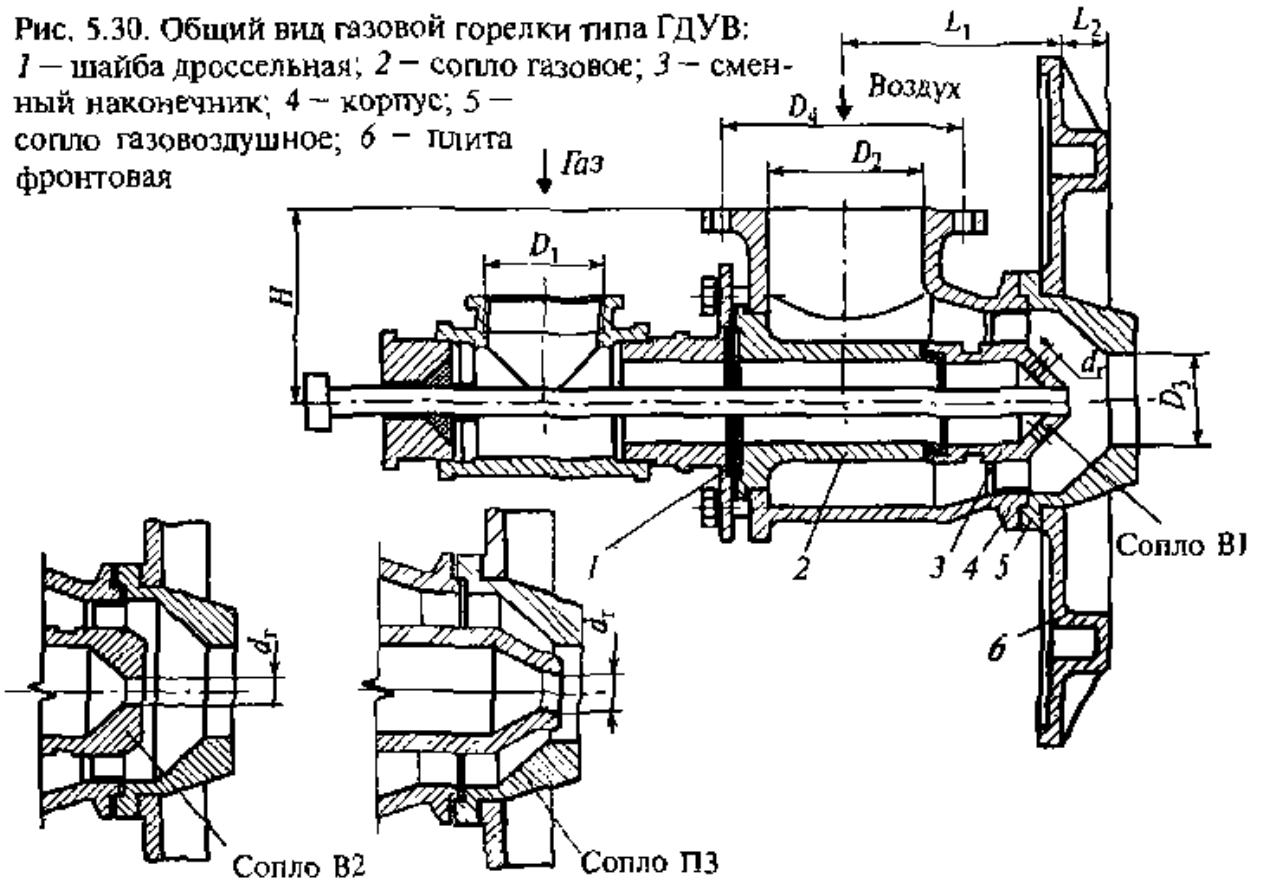


Рис. 5.30. Общий вид газовой горелки типа ГДУВ: *1* – шайба дроссельная; *2* – сопло газовое; *3* – сменный наконечник; *4* – корпус; *5* – сопло газовоздушное; *6* – плита фронтовая

Основные размеры и технические характеристики горелок типа ГДУВ

Параметр, размерность	Вариант исполнения и типоразмер горелки									
	ГДУВ-В1								ГДУВ-В2	
	0,16	0,25	0,40	0,63	1,0	1,6	2,5	4,0	0,16	0,25
Размер, мм										
D_1	*G*1	*G*1	*G*1 1/2	*G*1 1/2	*G*3	*G*4	*G*5	*G*6	*G*1	*G*1
D_2	50	55	80	100	125	150	200	250	50	55
D_3	50	63	80	100	125	160	200	250	50	63
D_4	110	130	150	170	200	225	280	335	110	130
L_1	98	117	128	149	170	194	232	323	98	117
L_2	43	43	43	41	41	40	50	50	43	43
H	105	117	129	146	176	259	261	295	105	117
$d_т$	4,1	5,4	7,1	9,0	11,5	14,25	17,75	—	19,5	20,5
Номинальная тепловая мощность, МВт	0,187	0,288	0,466	0,756	1,152	1,862	2,988	1,946	0,187	0,288
Номинальный расход газа, м³/ч	18,7	28,8	47,1	75,6	115,2	186,0	298,8	191	18,7	28,8
Номинальное даление газа, кПа	4,41	3,2	4,3	4,3	4,2	4,3	4,3	1,715	2,94	2,2
Номинальный расход воздуха, м³/ч	190	288	470	756	1152	1872	2988	1910	180	288
Номинальное давление воздуха, кПа	3,53	1,7	1,9	1,5	1,5	1,5	1,5	0,83	2,45	1,4
Коэффициент расхода воздуха на расстоянии 2700 мм от выходного сечения туннеля	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Минимальная тепловая мощность, кВт	28	48	78	126	192	310	498	649	33	52
Коэффициент рабочего регулирования по тепловой мощности	6,7	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	3,0	5,6	5,5
Длина факела, мм	400	—	600	—	—	1000	—	1100	600	—
Удельная металлоемкость, кг/кВт	0,15	0,09	0,09	0,075	0,064	0,07	0,038	—	0,15	0,09

вое сопло снабжено сменными наконечниками, изготовленными в трех исполнениях с целью получения факелов различной длины. Наконечники сопла в первом и втором исполнении снабжены лопатками для закрутки потока воздуха. Причем лопатки установлены под углом 30 °С к оси горелки. Для горелок первого варианта исполнения высота лопаток равна ширине кольцевого зазора между корпусом горелки и цилиндрическим корпусом наконечника сопла. Для горелок второго исполнения высота лопаток составляет $^2/_3$ ширины кольцевого зазора.

Наконечник сопла в первом исполнении обеспечивает многоструйную подачу газа через пять отверстий в закрученный поток воздуха и образование короткого факела.

Во втором исполнении обеспечивается подача газа через одно отверстие, расположенное в центре наконечника, в закрученный поток воздуха и образование факела средней длины.

Таблица 5.8

(рис. 5.30)

Вариант исполнения и типоразмер горелки													
ГДУВ-В2						ГДУВ-П3							
0,40	0,63	1,0	1,6	2,5	4,0	0,16	0,25	0,40	0,63	1,0	1,6	2,5	4,0
*G*1½	*G*1½	*G*3	*G*4	*G*5	*G*6	*G*1	*G*1	*G*1½	*G*1½	*G*3	*G*4	*G*5	*G*6
80	100	125	150	200	250	50	55	80	100	125	150	200	250
80	100	125	160	200	250	50	63	80	100	125	160	200	250
150	170	200	225	280	335	110	130	150	170	200	225	280	335
128	149	170	194	232	323	98	117	128	149	170	194	232	323
43	41	41	40	50	50	43	43	43	41	41	40	50	50
129	146	176	259	261	295	105	117	129	146	176	259	261	295
22,8	24,5	30	34,6	41,2	—	20	21,8	24,3	30,0	31,3	37,6	44,7	—
0,466	0,756	1,152	1,862	2,988	1,931	0,193	0,288	0,480	0,756	1,152	1,862	2,988	1,94
47,1	75,6	115,2	186,0	298,8	191	18,7	28,8	47,1	75,6	115,2	186,0	298,8	191
2,5	2,5	2,2	2,5	2,5	1,47	1,4	1,35	1,3	1,35	1,3	1,3	1,3	0,8
470	756	1152	1872	2988	1910	198	288	470	756	1152	1872	2988	1910
1,862	1,3	1,3	1,3	1,3	1,617	2,25	0,5	0,44	0,5	0,5	0,5	0,5	0,44
1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05
84,7	137	209	332	543	644	39	58	96	151	230	388	598	808
5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	3,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	2,4
800	—	—	1100	—	1100	800	—	1050	—	—	2000	—	2300
0,09	0,075	0,064	0,07	0,038	—	0,15	0,09	0,09	0,075	0,64	0,07	0,038	—

В третьем исполнении газ подается через одно центральное отверстие в наконечнике в параллельный поток воздуха и образует наиболее длинный факел. Корпус горелки является воздушной камерой.

Разработано 8 типоразмеров горелок, общий вид которых показан на рис. 5.30, а технические характеристики приведены в табл. 5.8.

При работе горелки по первому варианту исполнения центральное отверстие может выполнять роль смотрового или запального канала.

5.11. ГОРЕЛКИ РАДИАЦИОННЫЕ ТИПОВ ГР И ГРВ

В радиационных плоскопламенных горелках типа ГР, разработанных ВНИИМТ и Стальпроектом, плоский разомкнутый факел создается благодаря закручиванию газа и воздуха. Закручивание воздуха происходит вследствие тангенциальной его подачи в корпус горелки через прямоугольный

патрубок, а закручивание газа — выдачей его через сопло с косыми прорезями. Для создания плоского факела применяют также горелочный камень специальной формы с горелочным туннелем в виде криволинейного диффузора. Благодаря этому плоский факел равномерно обогревает горелочный камень и прилегающие к нему участки кладки что обеспечивает равномерный и интенсивный нагрев металла. Горелка предназначена преимущественно для установки в подвесном своде, что определяет систему крепления горелки и горелочного камня.

Радиационные плоскопламенные горелки типа ГР предназначены для сжигания холодных природного, коксового и смешанных газов. Воздух может быть нагрет до 400 °С. Разработано 10 типоразмеров горелок номинальной теплопроизводительностью от 70 до 1750 кВт. Номинальная теплопроизводительность определена при $\alpha = 1{,}05$, давление холодного воздуха перед горелкой 2,5 кПа, давление газа перед горелкой 3 кПа для газов с $Q_н^р \leq$ ≤ 19 МДж/м^3 и 5 кПа для природного газа.

Пределы регулирования горелок с сохранением плоского пламени 1 : 4 от номинала. Горелки могут работать с $\alpha = 0{,}8 \div 2{,}0$.

Радиационные плоскопламенные горелки типа ГР показаны на рис. 5.31, а их конструктивные параметры приведены в табл. 5.9.

Горелка состоит из литых деталей. С помощью верхнего фланца она опирается на металлоконструкции на своде печи, а горелочный камень подвешивается к горелке.

В обозначении горелки буквы означают ее индекс, цифры — соответственно характеристику типоразмера, ширину и через косую — длину прорези для газа в газовом сопле. Например, ГР-500-5/15 означает: горелка радиационная номинальной теплопроизводительностью 580 кВт с прорезями в газовом сопле шириной 5 и длиной 15 мм.

Выбор горелки состоит в определении типоразмера горелки и размера прорезей для газа в газовом сопле.

Типоразмер горелки выбирают по графикам (рис. 5.32) в зависимости от количества воздуха и его давления перед горелкой. График построен для холодного (20 °С) воздуха. Для подогретого воздуха типоразмер горелки следует выбирать по расчетному количеству воздуха, определяемому, как и для горелок типа "труба в трубе", по формуле (4.8, *а*).

Затем по графикам (рис. 5.33) для выбранной горелки в зависимости от характеристики сжигаемого газа и его давления перед горелкой определяют действительное проходное сечение газовых прорезей $F_{пр}$.

Длина прорезей (мм) для газа определяется по формуле:

$$H = F/(mB) + h\,, \qquad (5\,2)$$

где m — количество прорезей в газовом сопле, указанное для каждого типоразмера горелки в табл. 5.9; B — ширина прорезей, мм, B следует брать из ряда значений, указанных для каждого типоразмера горелки в табл. 5.9; h — высота зубцов резьбы, равная 1,1 мм для горелок ГР-60, ГР-85 и 1,65 мм для остальных типоразмеров горелок.

Таблица 5.9

Конструктивные размеры радиационных горелок типа ГР (рис. 5.31)

Наименование параметра	Обозначение горелки									
	ГР-60-В/Н	ГР-85-В/Н	ГР-125-В/Н	ГР-175-В/Н	ГР-250-В/Н	ГР-350-В/Н	ГР-500-В/Н	ГР-750-В/Н	ГР-1050-В/Н	ГР-1500-В/Н
Номинальная теплопроизводительность, кВт	70	100	145	200	290	400	580	850	1200	1750
Размеры, мм:										
B	3, 5; 7	3, 5; 7	3; 5	3, 5	3; 5	3; 5	3; 5; 7	3; 5, 7	3, 5, 7	5; 7
D	39	46	54	63	79	93	108	130	155	195
D_1	18	22	26	29	44	50	65	76	94	128
D_2	65	65	75	90	100	110	130	150	170	200
D_3	90	90	100	120	130	140	160	185	205	235
D_4	110	130	130	150	170	200	225	280	280	395
D_5	140	160	160	185	205	235	260	315	315	435
d	14	14	14	18	18	18	18	18	18	23
d_1	12	12	12	14	14	14	14	18	18	18
H	3–6	3–8,5	4,5–11	4–15,5	6–21	6–22	8–25	12–36	11–32	10–45
H_1	340	375	440	495	540	575	660	745	880	980
H_2	147	150	170	175	184	193	209	240	265	300
H_3	95	95	110	111	113	113	119	139	151	153
h	20	20	20	21	23	23	24	24	26	28
h_1	15	15	15	17	17	19	19	22	22	22
h_2	14	14	15	15	15	15	15	17	17	19
L	440	440	440	440	550	580	600	620	620	750
L_1	150	160	190	210	240	290	330	328	330	350
L_2	150	175	175	200	225	250	325	400	450	500
L_3	29	35	40	49	59	70,5	85	100	120	147
l	380	380	380	380	490	520	540	560	560	690
l_1	110	110	150	150	200	240	250	250	250	250
Число отверстий m	4	4	6	6	6	8	8	8	12	12
n	4	4	4	4	4	8	8	8	8	12
n_1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	8
Масса горелки, кг	39,4	44,7	55,0	66,6	88,6	110,0	125,0	153,0	207,0	276,0

Если величины $Q_н^р$ или $\rho_{0г}$ отличаются от приятых на рис. 5.33, тогда расчет следует вести по величине $Q_н^р/\sqrt{\rho_{0г}}$.

Если принятая теплопроизводительность горелки отличается от номинальной, найденную по графикам (см. рис. 5.33) величину действительного проходного сечения газовых прорезей надо умножить на отношение принятой и номинальной теплопроизводительностей.

Пример. Подобрать горелку для сжигания $V_{0г} = 0{,}1$ м^3/с смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р = 9{,}2$ МДж/м^3. Давление газа перед горелкой 3 кПа, воздуха 2 кПа. Воздух подогрет до 200°С; $\alpha = 1{,}05$.

По рис. 1-10 приложения I находим $L_0 = 2{,}09$ м^3/м^3 газа. Тогда

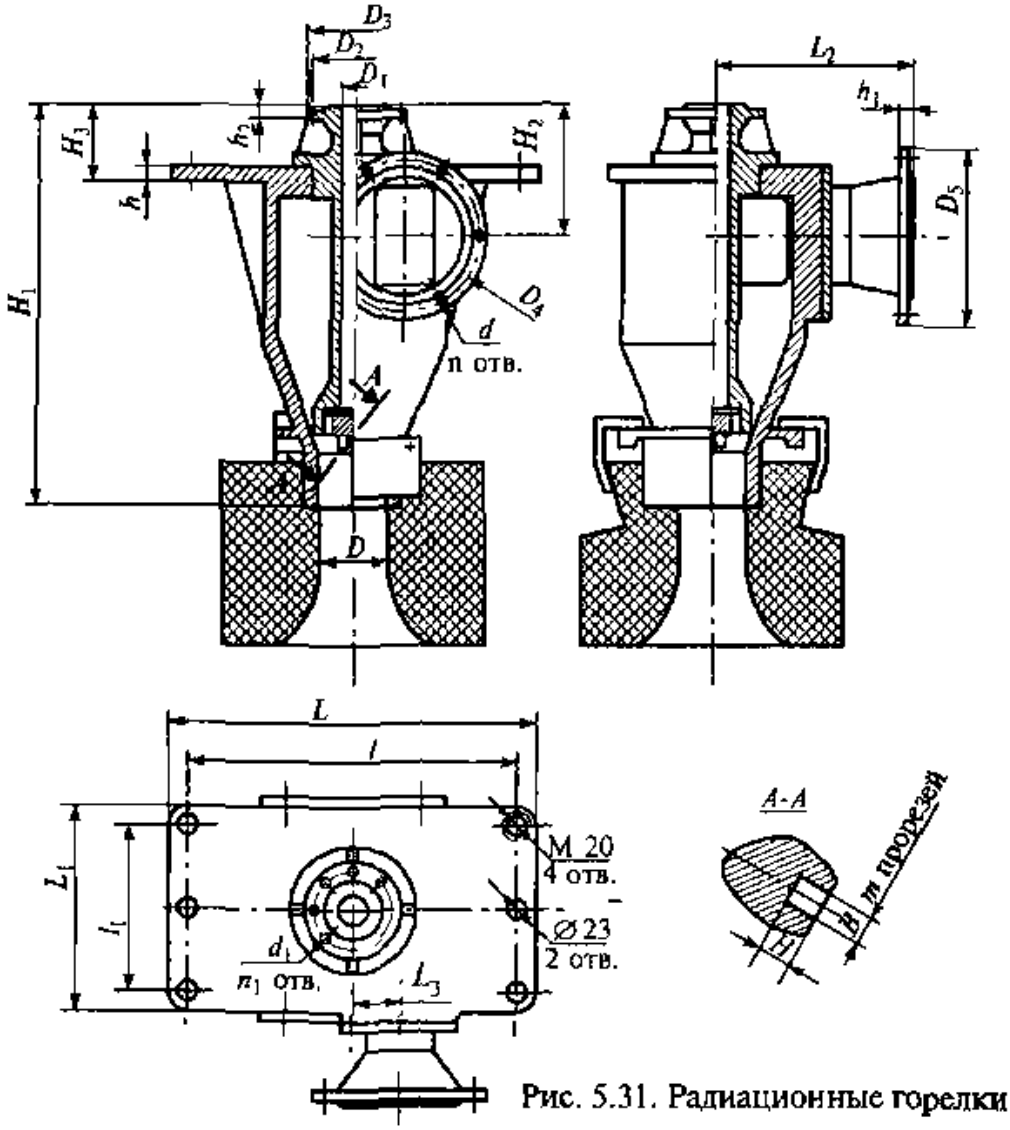


Рис. 5.31. Радиационные горелки типа ГР

$$V_{0в} = 1{,}05 \cdot 2{,}09 \cdot 0{,}1 = 0{,}22 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$V_{в}^{расч} = V_{0в} k_e = 0{,}22 \cdot 1{,}27 = 0{,}28 \text{ м}^3/\text{с},$$

(поправку на температуру воздуха находим по графику (см. рис. 4.8) при температуре подогрева воздуха 200 °С).

По графику (рис. 5.32) при расчетном количестве воздуха и располагаемом его давлении перед горелкой выбираем горелку ГР-1050 с номинальной теплопроизводительностью 1200 кВт.

По графику (см. рис. 5.33) для данной горелки при сжигании газа с теплотой сгорания 9,2 МДж/м^3 под давлением 3 кПа находим $F_{пр} = 3100$ мм^2.

Заданная теплопроизводительность горелки

$$Q = V_{0в} Q_к^р = 0{,}1 \cdot 9{,}2 = 0{,}92 \text{ МВт} = 920 \text{ кВт}.$$

При такой теплопроизводительности

$$F_{пр} = 3100 \cdot 920 : 1200 = 2380 \text{ мм}^2.$$

По табл. 5.9 принимаем ширину прорезей $B = 7$ мм; количество прорезей для горелки ГР-1050 $m = 12$.

Тогда длина прорезей по формуле (5.2)

$$H = 2380 \cdot 12 : 7 + 1{,}65 = 30 \text{ мм}.$$

Таким образом, выбираем горелку ГР-1050-7/30.

Одной из особенностей работы плоскопламенных горелок является определяющее влияние зоны воспламенения на характеристики разомкнутого факела. Зоной воспламенения может являться либо разогретая поверхность горелочного камня, либо вихревая зона циркуляции продуктов полного сгорания, подсасываемых к корню факела из рабочего пространства печи. В высокотемпературных печах при интенсивно разогретом своде и высокой температуре продуктов сгорания оба механизма воспламенения обеспечивают надежное зажигание топливной смеси и стабильные характеристики разомкнутого факела.

В низкотемпературных печах поверхность горелочного камня нагрета до температуры ниже температуры самовоспламенения газовоздушной смеси. Циркулирующие продукты сгорания, подсасываемые к корню факела, имеют также низкие температуры и вместо стабилизирующего воздействия на факел они, наоборот, балластируют выходящую из горелки смесь, ухудшая ее воспламенение. Эти явления приводят к нарушению характеристик факела.

С целью расширения диапазона регулирования тепловой мощности горелок ГР, при котором горелки работают в режиме разомкнутого факела, особенно в низкотемпературных печах, ВНИИМТ и Стальпроект разработали модернизированный вариант горелок с подачей вторичного воздуха по отдельному каналу в корневую зону факела, в ту ее часть, где имеется обогащенная смесь и недостаток окислителя.

Расход вторичного воздуха составляет от 7 до 14 % от общего расхода воздуха, подводимого в горелку, причем с уменьшением тепловой мощности и размера горелок доля вторичного воздуха увеличивается.

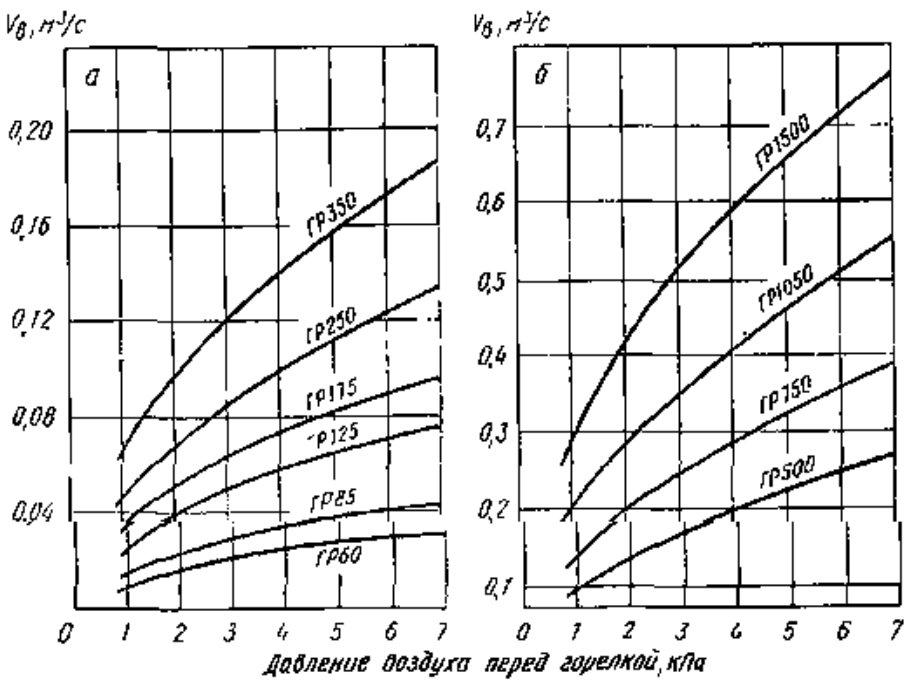


Рис. 5.32. Пропускная способность по воздуху горелок типа ГР
а – ГР-60 – ГР-350; *б* – ГР-500 – ГР-1500

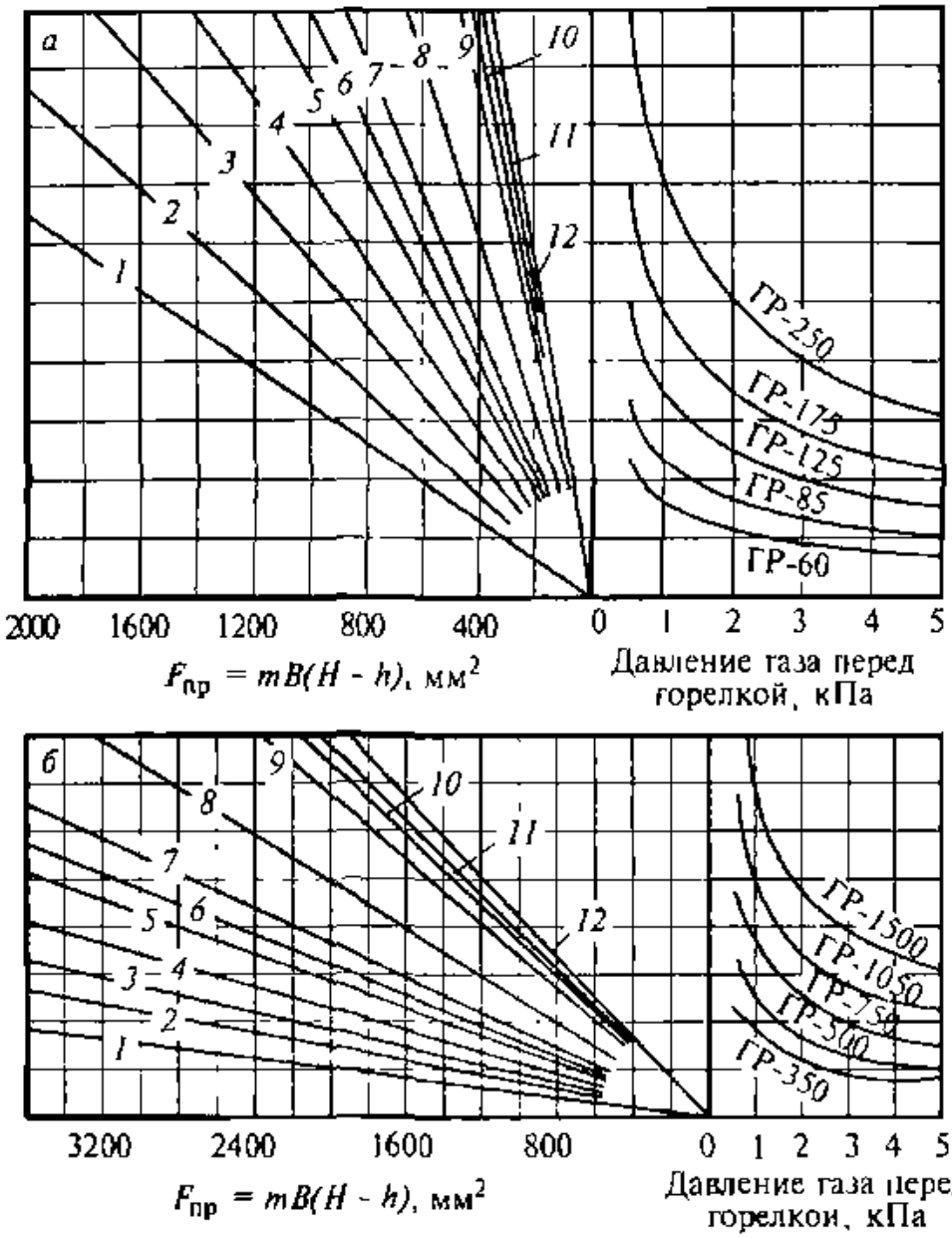


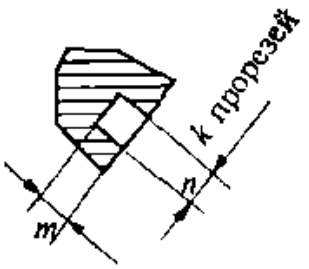
Рис. 5.33. Действительное проходное сечение $F_{пр}$ газовых прорезей для горелок типа ГР:

а – ГР-60–ГР-250; *б* – ГР-350–ГР-1500

Номер кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	$\rho_{0г}$, кг/м³	$Q_н^р/\sqrt{\rho_{0г}}$	Номер кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	$\rho_{0г}$, кг/м³	$Q_н^р/\sqrt{\rho_{0г}}$
1	5,85	1,17	5,41	*7*	14,65	0,63	18,45
2	7,55	1,07	7,30	*8*	17,10	0,48	24,68
3	9,20	0,96	9,39	*9*	26,85	0,61	34,38
4	10,90	0,86	11,76	*10*	34,00	0,82	37,53
5	12,55	0,76	14,39	*11*	34,95	0,77	39,81
6	17,10	1,07	16,54	*12*	37,20	0,78	42,13

Общий вид горелки ГРВ с расширенным диапазоном регулирования показан на рис. 5.34. Конструктивные размеры горелок ГРВ приведены в табл. 5.10, а технические характеристики – в табл. 5.11.

Расходные характеристики горелок ГРВ по трактам подачи газа и воздуха приведены на рис. 5.35.



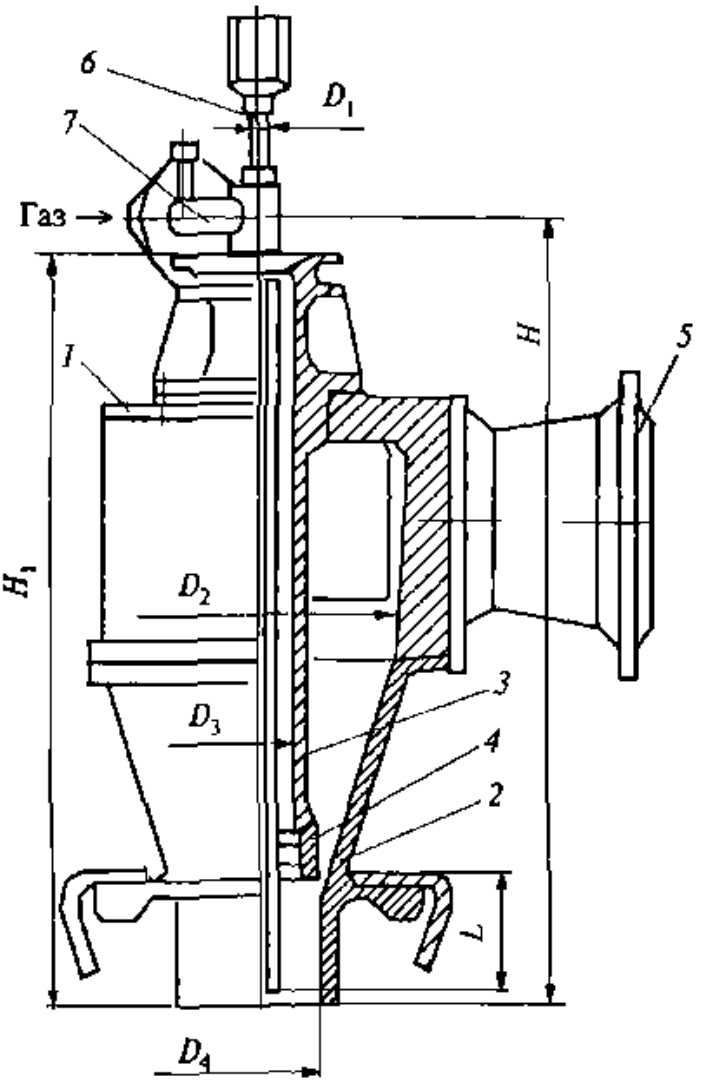


Рис. 5.34. Газовая радиационная горелка ГРВ:
1 – корпус, *2* – конфузор; *3* – газовая труба; *4* – газовое сопло; *5* – патрубок первичного воздуха; *6* – труба вторичного воздуха; *7* – газовый патрубок

При работе горелок ГРВ в низкотемпературных печах несмотря на низкие температуры свода и печных газов в горелочном туннеле обеспечивается надежное зажигание от дополнительного очага горения, образующегося за счет подачи вторичного воздуха. Регулирование расхода вторичного воздуха при изменении режима работы горелки не требуется.

При необходимости горелки ГРВ могут работать без подачи вторичного воздуха, так же как горелки ГР.

Таблица 5.10

Конструктивные размеры (мм) радиационных горелок типа ГРВ (рис. 5.34)

Обозначение горелки	Тепловая мощность, кВт	*H*	H_1	D_1	D_2	D_3	D_4	*L*	*n*	*m*	*K*	Масса горелки, кг
ГРВ-85П	100	380	425	12×1	104	22	46	65	3	4,0	4	48,0
ГРВ-175П	200	500	562	15×1	150	29	63	85	4	4,6	6	72,6
ГРВ-250П	300	546	603	20×1	176	44	79	70	5	5,3	6	94,0
ГРВ-350П	395	580	645	25×1	212	50	93	60	4,8	4,9	8	124,0

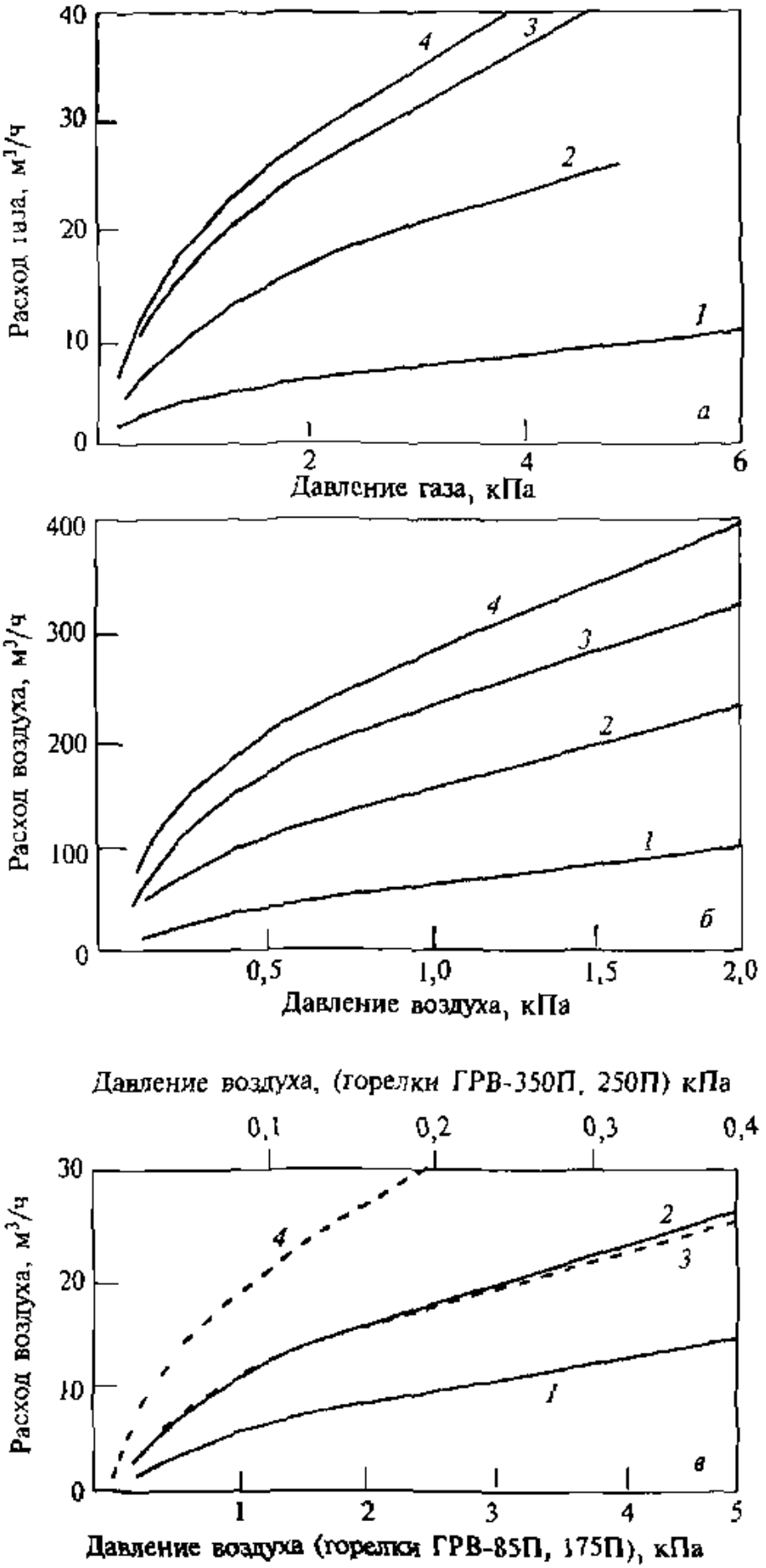


Рис. 5.35 Зависимость расхода газа (*а*), первичного (*б*) и вторичного (*в*) воздуха от давления этих сред перед горелкой ГРВ:
1 – горелка ГРВ-85П; *2* – ГРВ-175П; *3* – ГРВ-250П, *4* – ГРВ-350П

Таблица 5.11

Технические характеристики горелок ГРВ (рис. 5.34)

Наименование показателей	Размерность	Типоразмер горелки			
		ГРВ-85П	ГРВ-175П	ГРВ-250П	ГРВ-350П
Номинальный расход газа	м³/ч	10	20	30	40
Номинальный расход воздуха:	м³/ч				
первичного		85	177	279	375
вторичного		14	22	24	28
Номинальное давление перед горелкой:	кПа				
газа		5,9	3,05	2,8	4,0
первичного воздуха		1,63	1,3	1,65	1,86
вторичного воздуха		5,2	3,8	0,4	0,175
Коэффициент расхода воздуха при номинальной нагрузке		1,05	1,05	1,06	1,06
Коэффициент рабочего регулирования		4,68	4,78	5,0	4,9
Коэффициент предельного регулирования		5,8	5,8	6,2	5,9

5.12. ПЛОСКОПЛАМЕННЫЕ ГОРЕПКИ ТИПА ГПП

В плоскопламенных горелках для природного газа типа ГПП, разработанных Институтом газа АН УССР и Теплопроектом, плоский разомкнутый факел создается закручиванием воздуха с помощью направляющего винта с переменным шагом. Горелочный туниель для этих горелок имеет такую же форму, как у горелок ГР.

Горелки типа ГПП предназначены преимущественно для установки в арочном своде или в боковых стенах печи, что определяет систему крепления горелки и горелочного камня.

Плоскопламенные горелки типа ГПП предназначены для сжигания холодного природного газа. Воздух может быть подогрет до 500 °С.

Разработаны три серии горелок: серия Н — для газа низкого давления (номинальное давление газа 3 кПа); серия С — для газа среднего давления (номинальное давление газа 12 кПа) и серия В — для газа высокого давления (номинальное давление газа 70 кПа). Между собой горелки разных серий отличаются только конструкцией газового сопла. Каждая серия включает семь типоразмеров горелок с номинальной пропускной способностью по газу от 0,0014 до 0,044 м³/с. Номинальная пропускная способность по газу определена при номинальном давлении газа и давлении холодного (30 °С) воздуха перед горелкой 3 кПа.

Пределы регулирования горелок с сохранением плоского пламени 1 : 4 от номинальной пропускной способности по газу. Горелки могут работать с $\alpha = 0{,}8 \div 2{,}0$.

Плоскопламенные горелки для природного газа типа ГПП и сопла для них показаны на рис. 5.36, а их конструктивные размеры приведены в табл. 5.12.

Горелка состоит из литых деталей и крепится с помощью фланца к горелочной плите.

Обозначение горелки состоит из букв, означающих тип горелок и серию по давлению газа, и цифры, соответствующей номеру типоразмера Например, ГППС-5 означает; горелка плоскопламенная для природного газа среднего давления (номинальное давление газа 12 кПа), типоразмер 5 (номинальная пропускиая способность по газу 0,022 м^3/с).

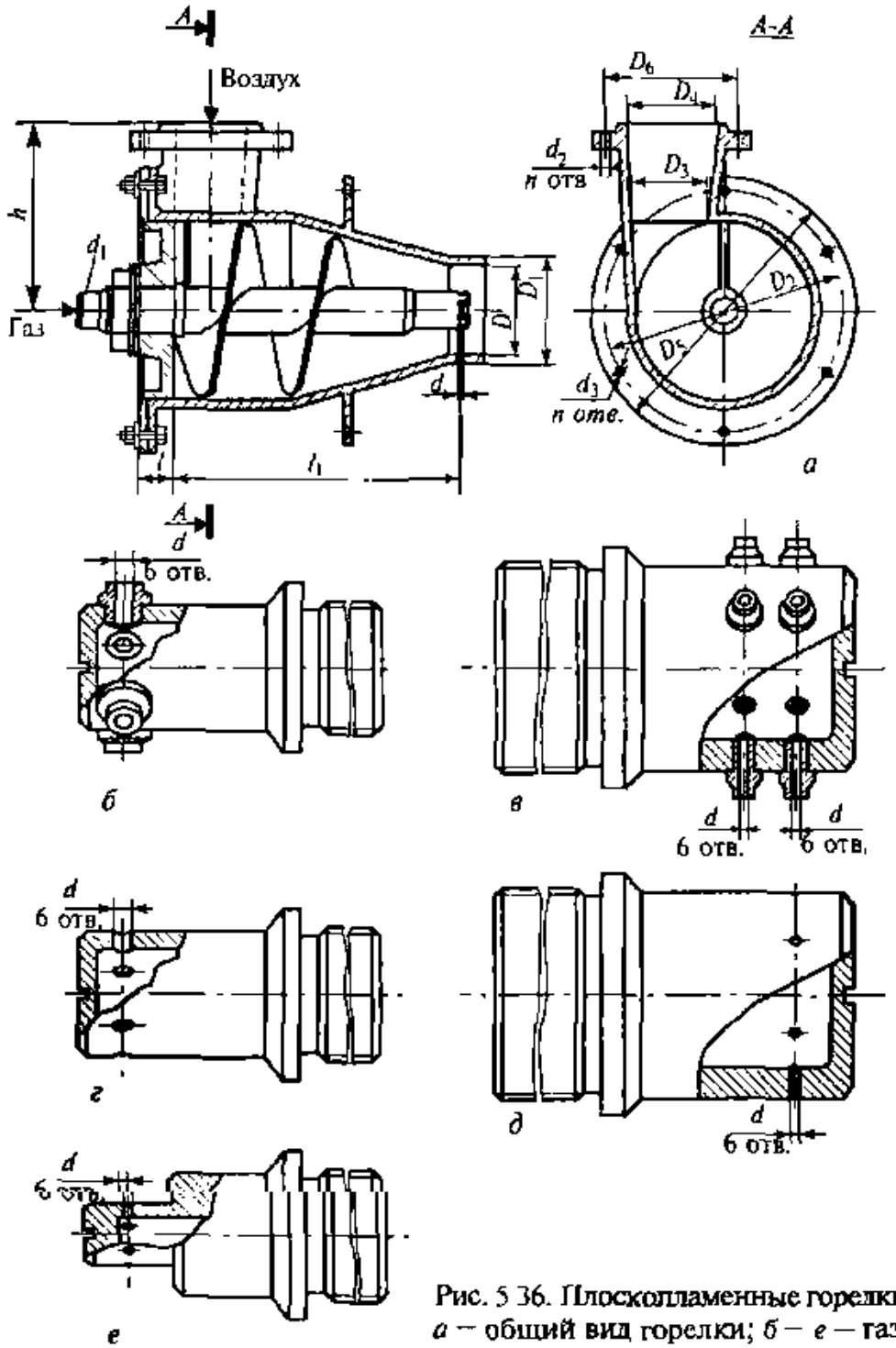


Рис. 5.36. Плоскопламенные горелки типа ГПП: *а* — общий вид горелки; *б* — *е* — газовые сопла

Таблица 5.12

Конструктивные размеры (мм)* плоскопламенных горелок типа ГПП (рис. 5.36)

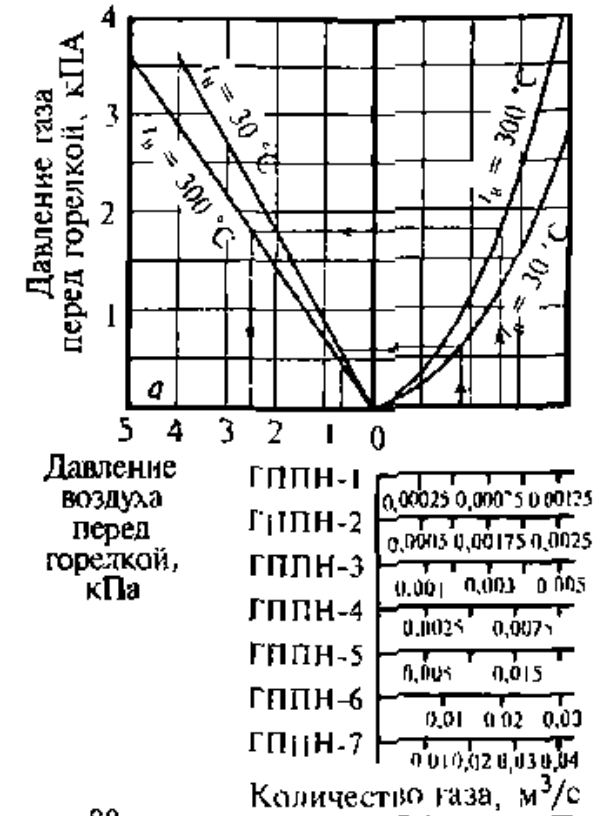
Обозначение горелки	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	d	d_1	d_2	d_3	h	L	l	l_1	Число отверстий n	Число отверстий n_1	Масса горелки, кг
ГППН-1	25	40	130	34	34	160	1 1/2"	2,3	3/8"	–	12	105	259	24	180	–	4	9,2
ГППС-1	25	40	130	34	34	160	1 1/2"	1,5	3/8"	–	12	105	259	24	180	–	4	9,2
ГППВ-1	25	40	130	34	34	160	1 1/2"	Нет св.	3/8"	–	12	105	259	24	180	–	4	9,2
ГППН-2	35	51	170	48	48	200	2"	3,3	1/2"	–	14	125	321	25	220	–	4	13,6
ГППС-2	35	51	170	48	48	200	2"	2,0	1/2"	–	14	125	321	25	220	–	4	13,6
ГППВ-2	35	51	170	48	48	200	2"	Нет св.	1/2"	–	14	125	321	25	220	–	4	13,6
ГППН-3	50	74	240	68	68	280	130	4,6	3/4"	14	14	175	457	40	310	4	4	31,2
ГППС-3	50	74	240	68	68	280	130	2,8	3/4"	14	14	175	457	40	310	4	4	31,2
ГППВ-3	50	74	240	68	68	280	130	1,85	3/4"	14	14	175	457	40	310	4	4	31,2
ГППН-4	75	105	260	92	105	310	170	6,6	1 1/4"	18	18	220	517	50	380	4	4	61,5
ГППС-4	75	105	260	92	105	310	170	4,2	1 1/4"	18	18	220	517	50	380	4	4	61,5
ГППВ-4	75	105	260	92	105	310	170	2,6	1 1/4"	18	18	220	517	50	380	4	4	61,5
ГППН-5	105	145	350	112	125	400	200	9,3	2"	18	18	240	623	60	470	8	6	112,4
ГППС-5	105	145	350	112	125	400	200	5,9	2"	18	18	240	623	60	470	8	6	112,4
ГППВ-5	105	145	350	112	125	400	200	3,7	2"	28	18	240	623	60	470	8	6	112,4
ГППН-6	140	190	395	146	150	895	225	8,2	2'	18	22	300	722	70	570	8	8	196,0
ГППС-6	140	190	395	146	150	895	225	5,2	2'	18	22	300	722	70	570	8	8	196,0
ГППВ-6	140	190	395	146	150	895	225	4,6	2"	18	22	300	722	70	570	8	8	196,0
ГППН-7	165	210	395	166	175	545	255	9,3	2 1/2"	18	22	320	818	70	645	8	8	225,0
ГППС-7	165	210	395	166	175	545	255	5,9	2 1/2"	18	22	320	818	70	645	8	8	225,0
ГППВ-7	165	210	395	166	175	545	255	Нет св.	2 1/2"	18	22	320	818	70	645	8	8	225,0

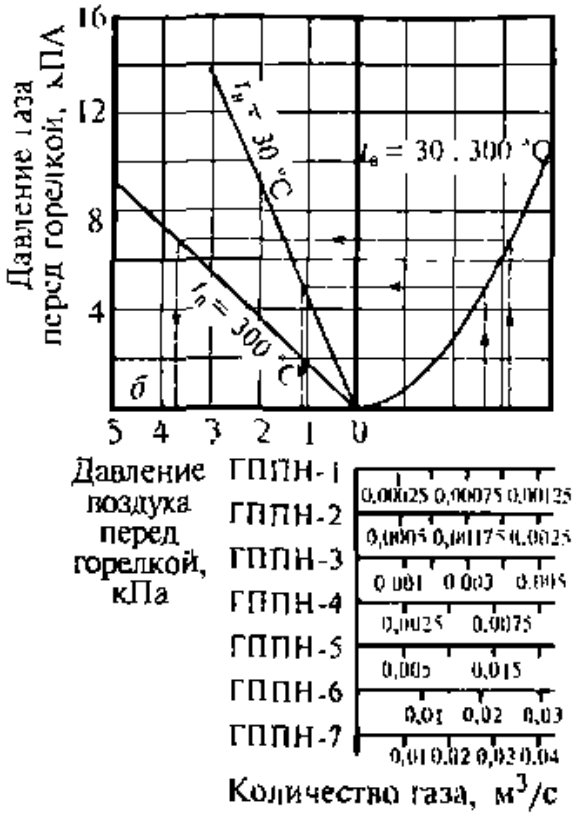
* Кроме указанных особо

Выбор горелки осуществляют по графикам (рис. 5.37) в зависимости от ее серии, заданной пропускной способности по газу и температуры подогрева воздуха. Сначала по правой части графика определяют необходимое давление газа перед горелкой, а затем по левой части — необходимое давление воздуха. Графики построены для холодного природного газа с $Q_н^р$ = = 35,6 МДж/м^3, $\rho_г$ = 0,73 кг/м^3, α = 1,05, противодавление 5—10 Па.

Пример. Подобрать горелку для сжигания 0,03 м^3/с природного газа низкого давления с $Q_н^р$ = 35,6 МДж/м^3. Температура подогрева воздуха 300 °С.

По графику на рис. 5.37, *а* находим, что заданный расход ближе всего к номинальному для горелки ГППН-6. По правой части графика находим необходимое давление природного газа при подогреве воздуха до 300 °С 3,6 кПа, по левой — необходимое давление подогретого воздуха перед горелкой 5 кПа.





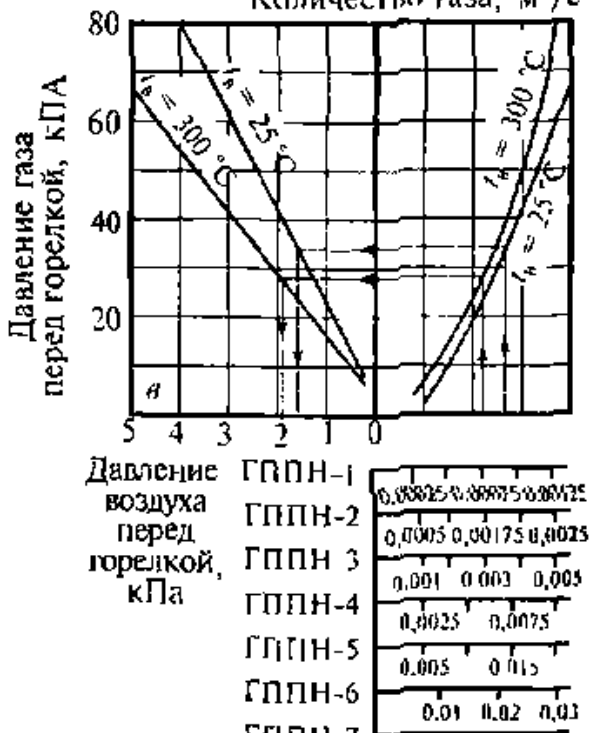


Рис. 5.37. Выбор горелок типа ГПП: *а* – для газа низкого давления; *б* – для газа среднего давления; *в* – аля газа высокого давления

5.13. ГОРЕПКИ С ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ЧАШЕЙ ТИПА ГВИЧ

В горелках с излучающей чашей типа ГВИЧ, разработанных ВНИИпромгазом и Стальпроектом, плоский факел создается благодаря закручиванию газа и воздуха, проходящих в смеситель чарез тангенциальные отверстия. Горелочный туннель в этих горелках имеет полусферическую, ча-

шеобразную форму. Сгорание газа происходит внутри горелочного камня, являющегося источником интенсивного излучения. Горелки применяют для сводового, бокового и местного нагрева. Преимуществом горелок является то, что их можно располагать близко друг к другу, компонуя из них излучающие панели с чрезвычайно высокими тепловыми потоками. Кроме того, окружающие горелочный камень огнеупоры не подвергаются прямому воздействию факела.

Однако нагрев горелками с излучающей чашей менее равномерен, чем плоскопламенными горелками типа ГР или ГПП.

Горелки с излучающей чашей (рис. 5.38) предназначены для сжигания холодного природного газа с холодным воздухом. Разработаны четыре

Таблица 5.13

Конструктивные размеры (мм)* и характеристики горелок типа ГВИЧ (рис. 5.38)**

Обозначение	ГВИЧ-3	ГВИЧ-4А	ГВИЧ-4А-02	ГВИЧ-4А-04	ГВИЧ-5	ГВИЧ-6	ГВИЧ-6-01	ГВИЧ-6-02	ГВИЧ-6-03
D	200	300	300	300	400	400	400	400	400
D_1	$1^1/_2$"	70	70	70	3"	150	150	150	150
D_2	$^1/_2$"	27	27	27	1"	34	34	34	34
D_3	53	76	76	76	100	140	140	140	140
D_4	—	130	130	130	—	225	225	225	225
d	32	48	48	48	64	86	86	86	86
d_1	16	28	28	28	32	48	48	48	48
d_2	7,5	12	12	12	15	22	22	22	22
d_3	2,3	—	—	—	4,6	—	—	—	—
d_4	-	14	14	14	-	18	18	18	18
H	110	120	120	120	180	180	180	180	180
H_1	260	400	400	400	460	500	500	500	500
L	261	334	334	334	466	592	592	592	592
L_1	230	340	340	340	320	350	350	350	350
l	—	3,0	2,0	2,0	—	6,0	4,7	4,6	3,2
l_1	—	3,7	3,1	2,4	—	5,0	4,0	3,0	2,5
Число отверстий n	—	4	4	3	—	8	8	6	6
Масса горелки, кг	22	120	120	120	90	248	248	248	248
Номинальная теплопроизводительность, кВт	80	116	116	116	320	440	440	440	440
Пропускная способность по газу, $м^3/с\ 10^3$	2,2	3,3	3,3	3,3	8,9	13,0	13,0	13,0	13,0
Давление перед горелкой (кПа) при номинальной теплопроизводительности.									
газа	5,58	3,6	12,4	28,6	4,1	3,2	6,6	21,0	66,0
воздуха	7,21	2,0	2,2	2,2	6,2	3,75	3,5	3,4	3,1
Диапазон рабочего регулирования по газу, $м^3/с\ 10^3$	0,4-2,2	1,9-3,3	2,0-3,3	1,9-3,3	1,8-8,9	2,8-13,0	2,8-13,0	3,1-13,0	2,6-13,0

* Кроме указанных особо.

** Горелки ГВИЧ-3 и ГВИЧ-5 см. рис. 5.38, *а*, остальные — рис. 5.38, *б*.

типоразмера горелок номинальной теплопроизводительностью от 80 до 440 кВт. Горелки типоразмера 4 выполнены в трех вариантах, а горелки типоразмера 6 — в четырех вариантах, различающихся номинальным давлением газа перед горелкой (табл. 5.13).

Горелки типоразмеров 3 и 5 выполнены с периферийным подводом газа, а типоразмеров 4 и 6 — с центральным подводом газа.

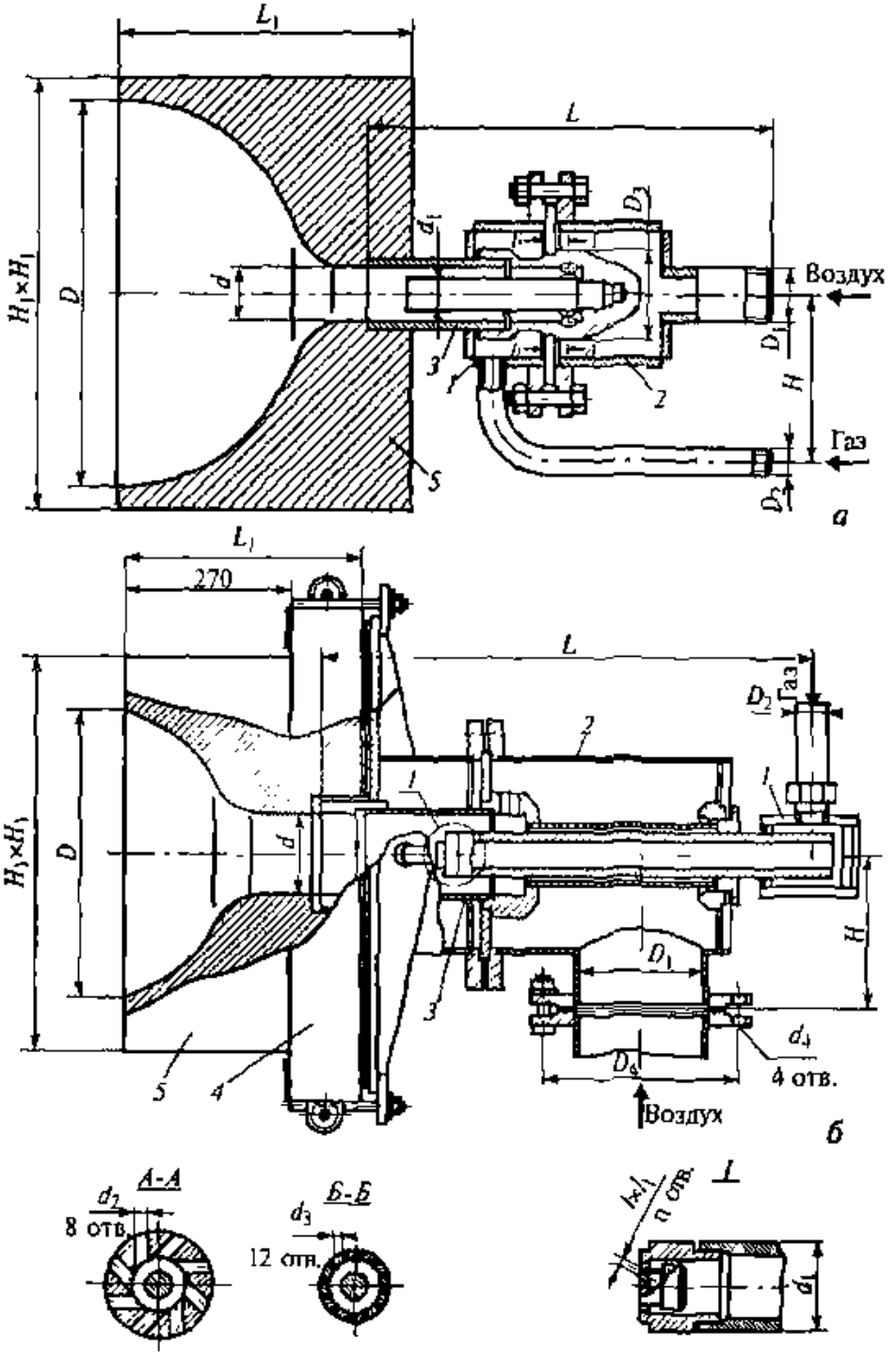


Рис. 5.38. Горелки с излучающей чашей типа ГВИЧ:
а – с периферийным подводом газа; *б* – с центральным подводом газа; *1* – корпус газовый, *2* – корпус воздушный; *3* – смеситель; *4* – фронтовая плита; *5* – горелочный камень

5.14. СКОРОСТНЫЕ ГОРЕЛКИ ОАО "УРАЛМАШ"

Скоростные горелки ОАО "Уралмаш" предназначены для сжигания холодного природного газа с холодным воздухом. Разработаны четыре типоразмера горелок, общий вид которых показан на рис 5.39, а технические характеристики приведены в табл. 5.14.

Горелка имеет воздухоподводящий корпус и встроенную камеру горения. На торцевой стенке горелки выполнена газораспределительная камера с системой газовыпускных отверстий. Основные отверстия расположены на стенке газораспределительной камеры, обращенной в сторону камеры сгорания. Часть отверстий выполнены в стенке запального канала, который имеет свечу зажигания, смотровое отверстие и сбросной патрубок с краном.

Камера сгорания выполнена двухступенчатой. Первая часть камеры сгорания имеет перфорацию из отверстий различного диаметра, вторая — кольцевую спиральную щель. Такое разделение в вариантах выполнения входных отверстий для воздуха определяется различными требованиями, предъявляемыми к процессам, происходящим в различных участках камеры горения. На начальном участке происходит интенсивное смешение струй газа со встречно вытекающими струями воздуха и воспламенение. Стабилизация пламени осуществляется на струях воздуха большого диаметра. Во

Таблица 5.14

Технические и конструктивные характеристики скоростных горелок ОАО "Уралмаш" (рис. 5.39)

Наименование параметра	Размерность	Тепловая мощность, кВт			
		30	207	610	800
Номинальный расход газа	$м^3/ч$	3,0	20	61	80
Номинальное даление газа	кПа	0,55	8,23	8,3	2,5
Номинальный расход воздуха	$м^3/ч$	30,5	206	615	806
Номинальное даление воздуха	кПа	10,0	5,98	6,3	4,2
Диапазон изменения коэффициента расхода воздуха		1,05÷4,0	1,04÷4,0	1,0÷6,0	1,05÷2,5
Минимальная тепловая мощность	кВт	5,0	22,2	29,0	100,0
Коэффициент рабочего регулирования		6,0	9,3	21,0	8,0
Длина факела	мм	150	370	860	1000
Основные размеры:	мм				
d		14	50	80	100
d_1		2	1,76	3,0	5,0
n		12	24	24	24
D		70	102	150	210
D_1		96	210	216	306
D_2		28	100	130	152
D_3		8	25	40	50
l_1		25	40	136	170
L_2		265	375	480	670
H		160	200	210	240

второй ступени камеры сгорания воздух, проникающий через щель, создает защитный слой около стенки, предохраняя ее от перегрева.

Горелка (см. рис. 5.39) работает следующим образом. Газ по патрубку *2* поступает в кольцевую газораспределительную камеру *3*, отсюда через сопла попадает в первую ступень камеры сгорания *4*. Воздух по патрубку *1* поступает в полость между камерой сгорания и корпусом горелки и через отверстия и винтовую щель попадает соответственно в первую и вторую ступени камеры сгорания. Продукты сгорания через носик *5* поступают в печь. Розжиг горелки осуществляется запальной свечой, на которую от катушки зажигания подается высокое напряжение до 15 кВ.

Розжиг производят следующим образом. Включают полную подачу воздуха, открывают кран запальника и подают на свечу высокое напряжение; затем плавно полностью открывают подачу газа. При этом топливная смесь поступает как в камеру сгорания, так и в запальное устройство, которое через кран *8* сообщается с атмосферой. От искры происходит воспламенение топливной смеси. Пламя в запальном канале движется навстречу потоку смеси и, проникая в камеру сгорания, производит воспламенение основного топлива. Скорость смеси в запальном канале поддерживается на уровне величины, меньшей скорости распространения пламени, за счет установки диафрагмы на входе в канал. После розжига кран *8* закрывают.

В некоторых конструкциях горелок свечу зажигания устанавливают непосредственно в стенке газораспределительной камеры. При этом также обеспечивается высокая надежность зажигания. Однако расположение свечи в запальном канале исключает воздействие на нее высокотемпературных продуктов сгорания и отложение сажи на электродах.

При работе горелки скорость продуктов горения в выходном наконечнике составляет около 200 м/с.

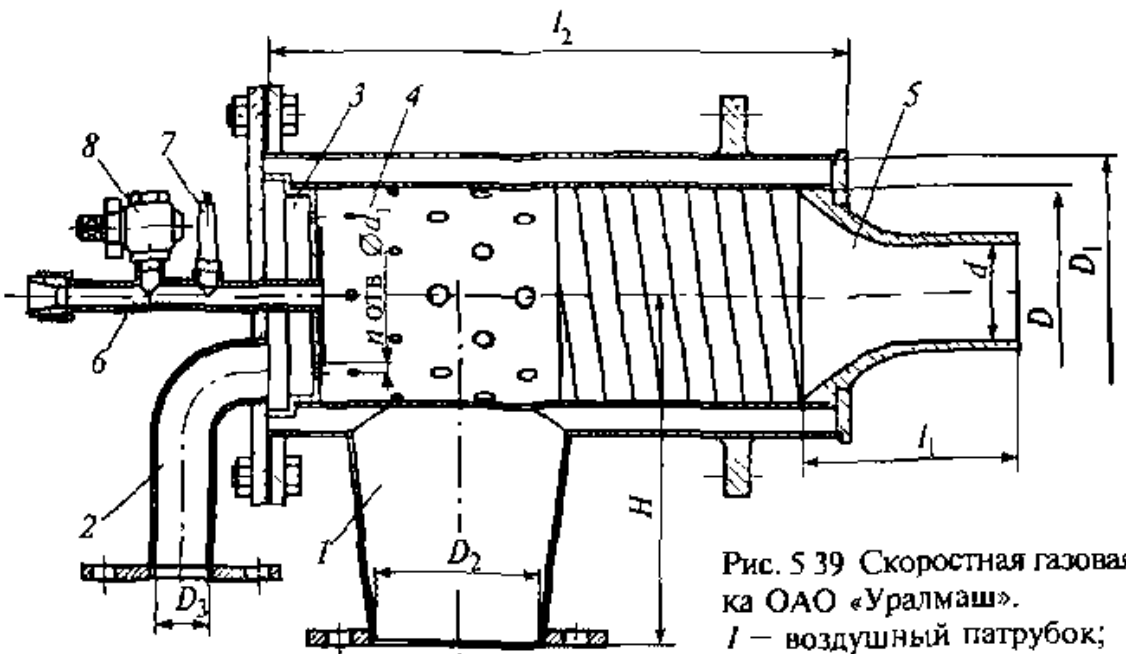


Рис. 5.39. Скоростная газовая горелка ОАО «Уралмаш».
1 – воздушный патрубок; *2* – газовый патрубок; *3* – газораспределительная камера; *4* – камера сгорания; *5* – выходной наконечник, *6* – запальный канал; *7* – свеча зажигания; *8* – сбросной кран

5.15. СКОРОСТНАЯ ГОРЕЛКА ТЕПЛОПРОЕКТА ЗСВ-24-120

Горелка разработана институтом Теплопроект для сжигания природного газа с холодным и подогретым воздухом в рекуперативных печах периферийного действия для нагрева слитков и термических печах непрерывного действия с рабочей температурой менее 1000 °С.

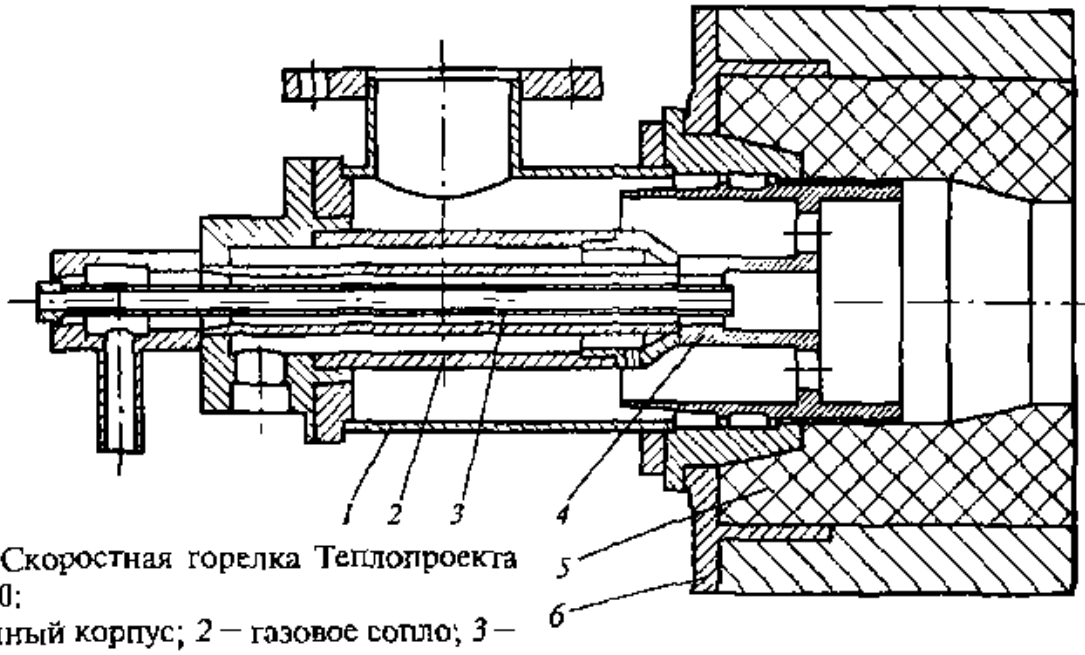


Рис. 5.40. Скоростная горелка Теплопроекта ЗСВ-24-120:
1 – воздушный корпус; *2* – газовое сопло; *3* – запально-защитное устройство; *4* – воздухораспределительное устройство; *5* – камера горения; *6* – горелочная плита

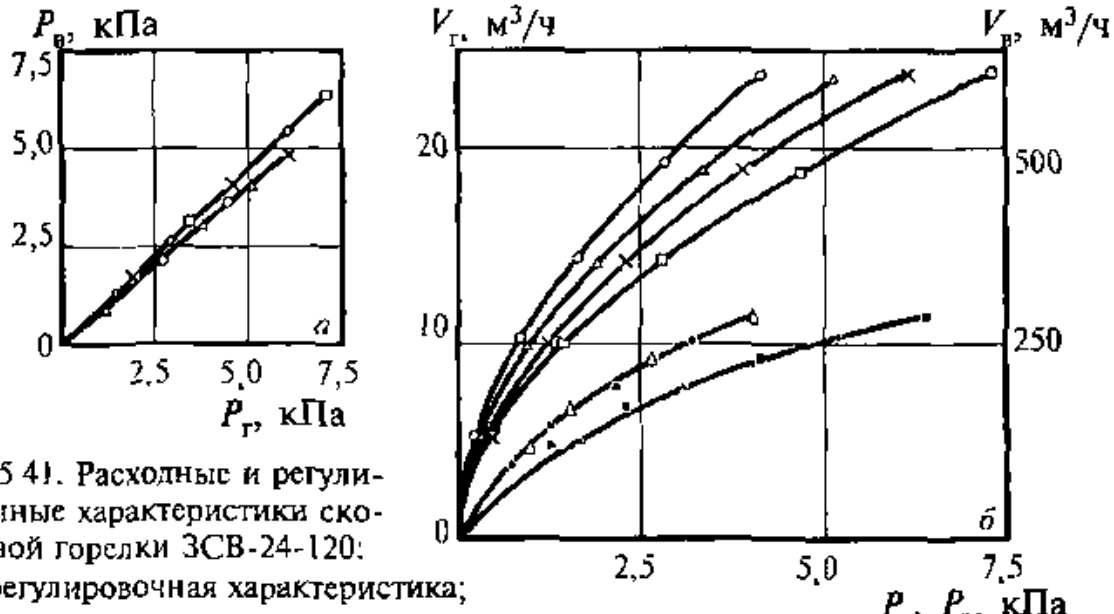


Рис. 5.41. Расходные и регулировочные характеристики скоростной горелки ЗСВ-24-120:
а – регулировочная характеристика;
× – $\alpha_{мин}$, о – $\alpha_{макс}$ | холодный воздух
Δ – $\alpha_{мин}$, – – $\alpha_{макс}$ | подогретый воздух
б – *расходные характеристики*
о – $\alpha_{мин}$, Δ – $\alpha_{макс}$ | холодный воздух; × – $\alpha_{мин}$, □ – $\alpha_{макс}$ | подогретый воздух } $V_г = f(P_г)$
● – $\alpha_{мин}$, ▲ – $\alpha_{макс}$ | холодный воздух; ~ – $\alpha_{мин}$, ■ – $\alpha_{макс}$ | подогретый воздух } $V_в = f(P_в)$

Таблица 5.15

Основные паспортные данные горелки Теплопроекта ЗСВ-24-120 (рис. 5.40)

Наименование параметра	Холодный воздух	Подогретый воздух
Номинальная тепловая мощность, кВт	244,3	244,3
Номинальный расход газа, $м^3/ч$	24,12	24,12
При $\alpha_{мин}$		
Номинальное давление газа, кПа	4,21	6,13
Номинальный расход воздуха, $м^3/ч$	244,8	250,9
Номинальное давление воздуха, кПа	2,23	5,15
Температура воздуха перед горелкой, К	290	523
Минимальный коэффициент расхода воздуха, определяемый на расстоянии 2700 мм от выходного сечения туннеля	1,04	1,03
Область устойчивого горения по коэффициенту расхода воздуха	0,7–1,62	0,63–1,9
Минимальная тепловая мощность, кВт	36,5	32,8
Коэффициент рабочего регулирования	8,6	9,6
Длина факела, мм	300	150
Скорость продуктов горения (расчетная), м/с	130	140
При $\alpha_{макс}$		
Номинаяьное давление газа, кПа	5,1	7,35
Номинальный расход воздуха, $м^3/ч$	290,9	278,8
Номинальное давление воздуха, кПа	4,12	6,37
Температура воздуха перед горелкой, К	298	523
Коэффициент расхода воздуха	1,23	1,25
Минимальная тепловая мощность, кВт	34,7	24,4
Коэффициент рабочего регулирования	7,0	10,0
Длина факела, мм	247	150
Скорость продуктов горения в выходном сечении туннеля, м/с	150	160

Общий вид горелки приведен на рис. 5.40, а основные данные, полученные при испытании, — в табл. 5.15.

Скоростнал горелка ЗСВ-24-120 состоит из корпуса *1*, газового патрубка с соплом *2*, выполненного в одном разборном узле с пилотно-запальным устройством и электродом контроля пламени *3*, воздухораспределительного устройства *4* и керамической камеры горения *5*, соединенной жароупорным составом с горелочной плитой *6*.

Воздух, подаваемый в горелку воздухораспределительным устройством, смонтированным в выходной части смесительного узла горелки, разделяется на два потока. Первый смешивается с газом, вытекающим из газового сопла. Газовоздушная смесь воспламеняется, и основнал ее часть сгорает в керамической камере горения. Второй поток воздуха, проходящий через периферийные отверстия воздухораспределительного устройства, обтекает внутреннюю поверхность камеры горения, охлаждает ее и препятствует возникновению резких перепадов температуры на поверхности камеры горения.

Расходные и регулировочные характеристики горелки ЗСВ-24-120 даны на рис. 5.41.

5.16. СКОРОСТНАЯ ГОРЕЛКА СВП

Скоростные горелки СВП разработаны институтом ВНИИпромгаз для сжигания природного газа с холодным воздухом в печах скоростного нагрева металла.

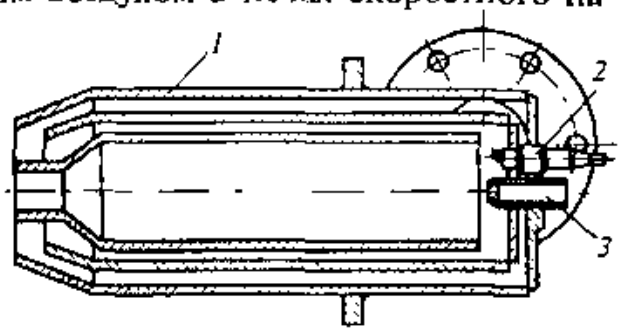


Рис. 5.42. Скоростная горелка СВП ВНИИпромгаза:
1 – воздухоподводящий корпус; *2* – свеча зажигания; *3* – газовое сопло

Общий вид горелки показан на рис. 5.42, а технические характеристики разработанной серии горелок приведены в табл. 5.16.

Горелки состоят из металлической воздухоохлаждаемой камеры горения *1*, электрозапальной свечи *2* и газового сопла *3*. Газ подается в камеру горения через газовое сопло, где смешивается с предварительно подогретым до 633 К воздухом, прошедшим двухходовой контур охлаждения. Сгорание газовоздушной смеси в основном завершается в камере горения.

Расходные и регулировочные характеристики горелок СВП-60, СВП-85 и СВП-120, работающих на предварительно подогретом воздухе, приведены на рис. 5.43.

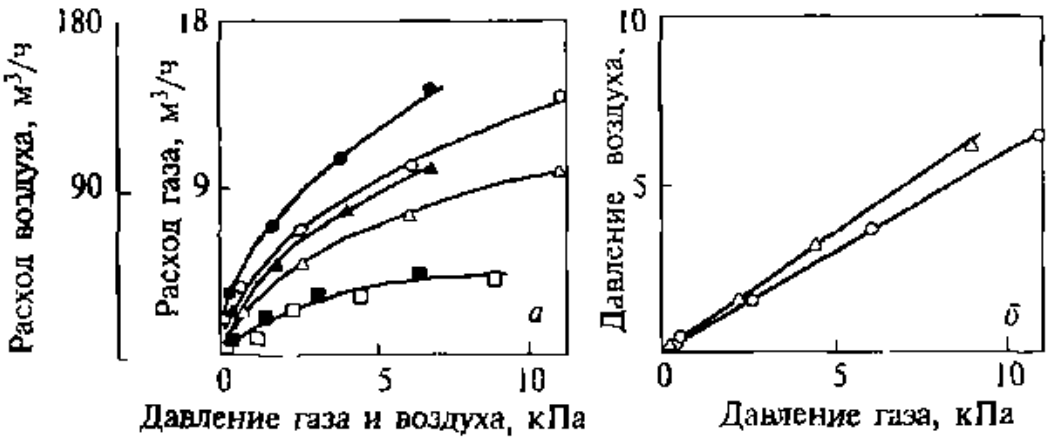


Рис. 5.43. Расходные и регулировочные характеристики горелок СВП-60, СВП-85, СВП-120:
а – расходные характеристики по газу и воздуху:
□ – СВП-60, △ – СВП-85, ○ – СВП-120 } $V_г = f(P_г)$
■ – СВП-60, ▲ – СВП-85, ● – СВП-120 } $V_в = f(P_в)$
б – регулировочные характеристики $P_в = f(P_г)$:
□ – СВП-60 △ – СВП-85 ○ СВП-120

Таблица 5.16

Основные паспортные данные горелок СВП (рис. 5.42)

Наименование параметра	Значение параметра		
	СВП-60	СВП-85	СВП-120
Тепловая мощность, МВт	0,072	0,103	0,143
Расход газа, $м^3/ч$	7,0	10,1	14,0
Давление газа, кПа	8,97	10,88	10,93
Расход воздуха, $м^3/ч$	72	101	142
Температура воздуха перед горелкой, К	633	623	623
Давление воздуха, кПа	6,37	6,57	6,66
Коэффициент расхода воздуха	1,05	1,05	1,05
Коэффициент рабочего регулирования	6,7	7	4,9
Средняя скорость продуктов сгорания на срезе выходного отверстия горелки, м/с	200	200	200
Конструктивные размеры			
габариты, мм	435×250×205	490×218×240	565×250×280
присоединительные размеры, мм:			
газ	15	20	20
воздух	49,5	65	80
диаметр газовых отверстий, мм:			
центрального	2,9	3,4	4,0
периферийных	2,3	2,5	2,9
количество газовых отверстий:			
центрального	1	1	1
периферийных	5	5	5
диаметр выходного отверстия камеры горения, мм	30	36	41,7

5.17. ГОРЕЛКИ С ПЕРЕМЕННЫМ ИЗБЫТКОМ ВОЗДУХА ТИПА ПИВ

Разработаниые ВНИИпромгазом горелки типа ПИВ предназначены для получения низкотемпературных продуктов сгорания при сжигании холодного природного газа и холодного воздуха с повышенным коэффициентом расхода воздуха.

В горелках типа ПИВ для повышения устойчивости горения предусмотрены:

камера предварительного смешения части воздуха с газом;

подача на горение подогретого воздуха после охлаждения стенки камеры сгорания,

полностью закрытая камера сгорания, из которой низкотемпературные продукты сгорания выходят через систему отверстий.

Розжиг горелки и контроль горения осуществляют с помощью пилотно-защитного устройства.

Разработано 8 типоразмеров горелок с номинальной теплопроизводи-

тельностью от 69,8 до 814,1 кВт. Номинальная теплопроизводительность определяется при давлении газа перед горелкой 3, воздуха 4 кПа и $\alpha = 2{,}0$. При $\alpha = 2{,}0$ диапазон рабочего регулирования 1 : 8. Можно повысить α до 4,0 путем снижения расхода газа от номинала.

Горелки с переменным избытком воздуха типа ПИВ показаны на рис. 5.44, а их конструктивные размеры приведены в табл. 5.17.

Камера сгорания горелок типа ПИВ изготавливается из жаростойкой стали.

Обозначение горелки состоит из индекса типа горелки и цифры, характеризующей типоразмер горелки, например, горелка ПИВ-250 означает: горелка с переменным избытком воздуха теплопроизводительностью 290,8 кВт.

Таблица 5.17

Конструктивные размеры (мм)* и характеристики горелок с переменным избытком воздуха типа ПИВ (рис. 5.44)

Обозначение	ПИВ-60	ПИВ-85	ПИВ-120	ПИВ-170	ПИВ-250	ПИВ-340	ПИВ-450	ПИВ-700
Теплопроизводительность, кВт	69,8	98,8	139,6	197,7	290,8	395,4	523,4	814,1
Номинальная пропускная способность по газу, $м^3/с \cdot 10^3$	1,94	2,78	3,89	5,56	7,78	11,11	15,28	22,22
Диапазон рабочего регулирования по газу, $м^3/с \cdot 10^3$	0,25–1,94	0,36–2,78	0,49–3,89	0,69–5,56	0,97–7,78	1,39–11,11	1,94–15,28	2,78–22,22
Размеры, мм:								
D	121	133	146	168	180	200	219	245
D_1	160	170	194	220	245	290	325	365
D_2	1/2"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/2"	2"
D_3	75	102	108	127	146	180	219	245
D_4	190	220	245	260	305	360	420	425
D_5	130	155	170	185	210	245	280	310
d	2,0	2,0	2,0	2,4	1,6	1,9	2,1	2,8
d_1	7,0	8,5	10,0	12,0	13,5	17,0	18,5	23,0
d_2	14	18	18	18	18	18	18	18
d_3	14	14	14	14	18	18	22	22
H	160	170	190	200	250	320	350	400
H_1	150	150	150	170	190	210	220	260
L	1230	1405	1525	1740	1835	1985	2180	2420
L_1	1105	1285	1415	1640	1725	1895	2085	2335
L_2	560	650	800	840	900	1000	1130	1250
L_3	135	165	170	185	220	250	350	465
l	80	75	70	70	70	65	64	60
l_1	22	22	25	27	30	32	37	40
Число отверстий n	12	18	24	24	72	72	72	72
n_1	4	4	4	8	8	8	8	8
n_2	4	8	8	8	12	12	8	12
Масса горелки, кг	40	55	78	102	126	175	235	320

* Кроме указанных особо

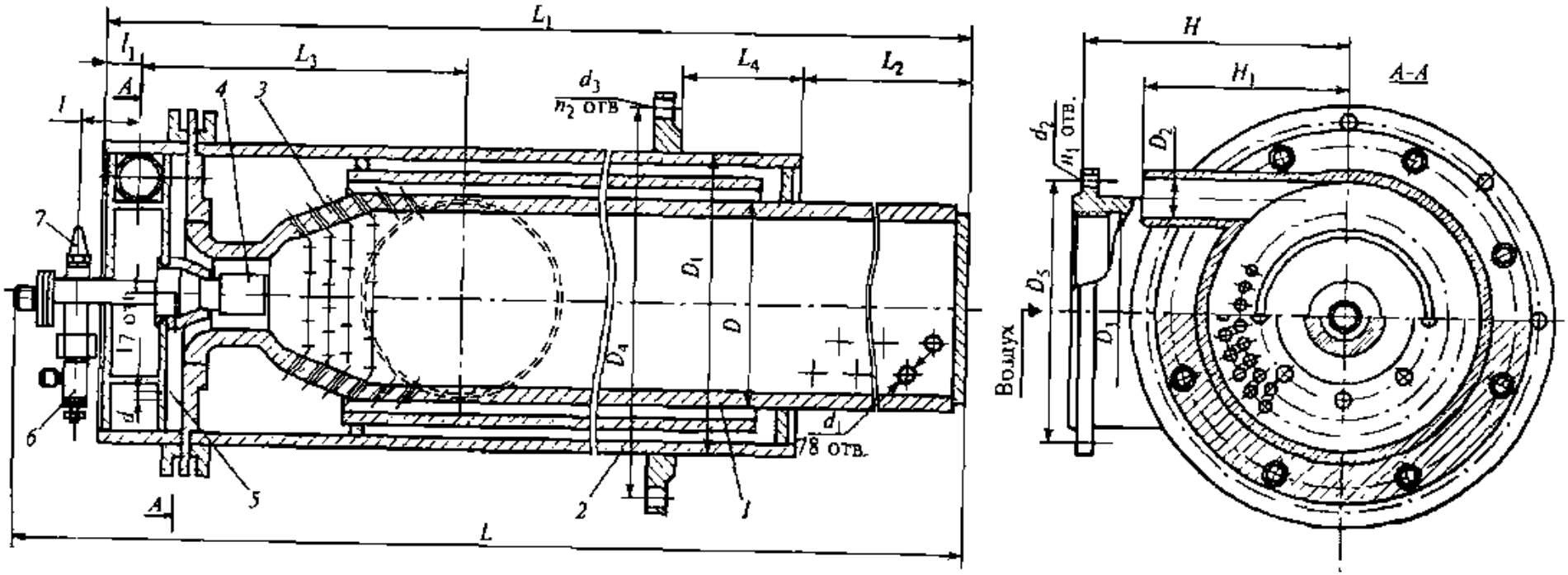


Рис. 5 44. Горелка типа ПИВ с переменным избытком воздуха:
1 – камера сгорания; *2* – двухходовой контур охлаждения камеры сгорания; *3* – периферийный конус струйно-стабилизаторного устройства; *4* – газовое сопло; *5* – камера предварительного смешения; *6* – пилотно-защитное устройство; *7* – свеча электрозажигания

5.18. ГОРЕЛКИ СКОРОСТНЫЕ ТИПА ПИВс

Горелки типа ПИВс (скоростная с переменным избытком воздуха) разработаны институтом ВНИИпромгаз и по конструкции аналогичны горелкам ПИВ. Отличительной особенностью является выход продуктов сгорания через одно калиброванное сопло.

Общий вид горелки приведен на рис. 5.45, а технические характеристики испытанных образцов — в табл. 5.18.

Горелка состоит из следующих основных частей: корпуса *4*, пилотно-защитного устройства *1*, камеры предварительного смешения *3*, газового коллектора *2*, воздушного коллектора *5* и цилиндрической камеры горения *6* с калиброванным соплом *7* для выхода продуктов сгорания.

Розжиг горелки осуществляется с помощью пилотно-защитного устройства. Смесь газа с первичным воздухом поступает из камеры предварительного смешения в камеру горения, вторичный воздух подается через

Таблица 5.18

Технические характеристики горелок ПИВс (рис. 5.45)

Наименование параметра	Размерность	Типоразмер				
		ПИВс-15	ПИВс-30	ПИВс-60	ПИВс-120	ПИВс-250
Тепловая мощность номинальная	кВт	17,5	35	70	140	275
Номинальное давление:	кПа					
газа		—	5,2	5,2	5,2	5,0
воздуха		6,5	4,8	4,8	4,8	4,7
Диапазон изменение коэффициента расхода воздуха	—	1,06—2,6	—	1,05—3,2	—	1,15—3,2
Коэффициент рабочего регулирования	—	7,8	7	7	7	8,1
Скорость выхода продуктов горения	м/с	200	200	200	200	200
Длина факела	мм	60				300
Размеры:	мм					
D		115	140	165	225	290
D_1		55	85	95	130	145
D_2		83	102	134	168	231
D_3		15	21	30	42	66
D_4		33,5	45	60	89	104
d		12	14	14	18	14
d_1		8	12	12	12	14
d_2		1/2"	1/2"	1/2"	1"	1"
L		510	410	428	620	850
H		140	175	230	300	370
n		6	6	6	6	12
n_1		4	4	4	4	4
Масса горелки	кг	8,0	11,0	14,0	48,0	85,0

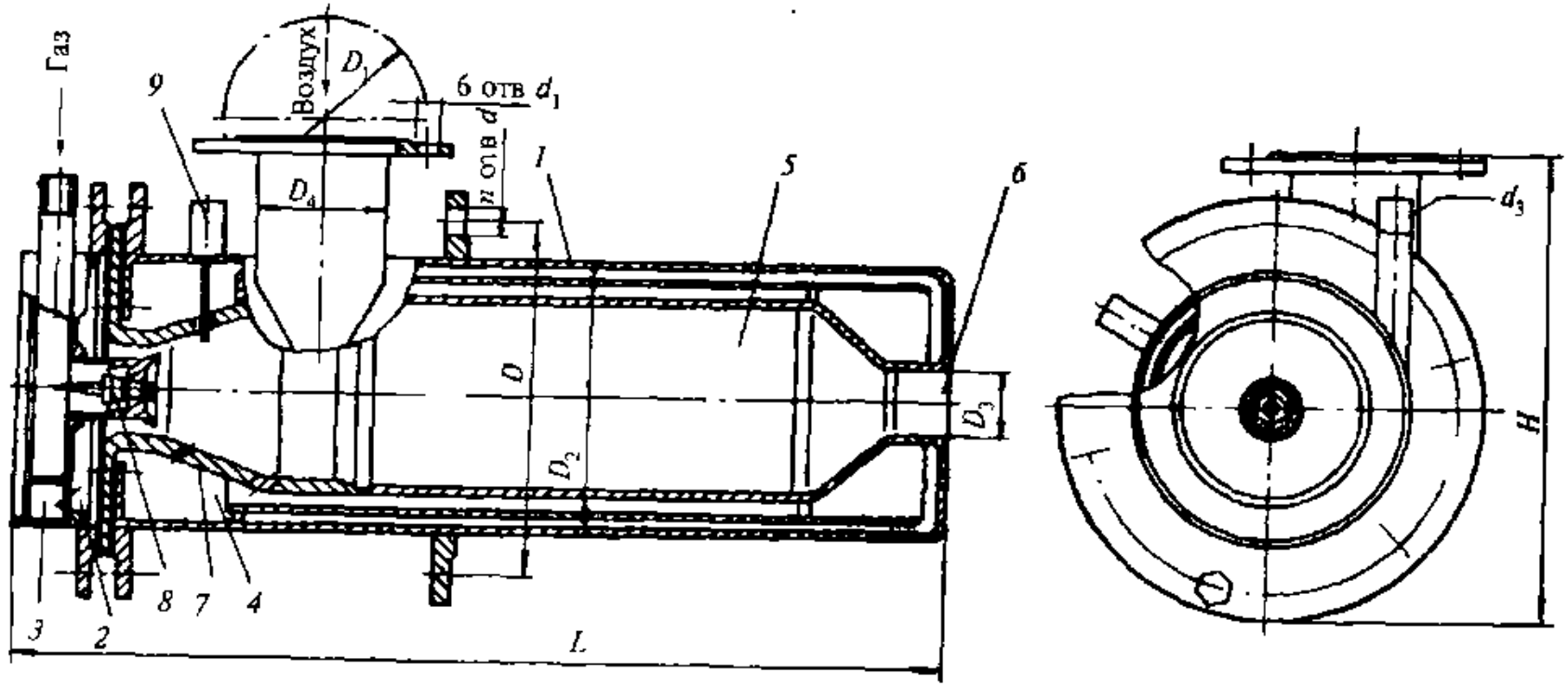


Рис. 5.45 Скоростная горелка ПИВс:
1 — корпус, *2* — камера предварительного смешения, *3* — газовый коллектор, *4* — воздушный коллектор; *5* — камера горения; *6* — выходное сопло; *7* — диффузор, *8* — свеча зажигания; *9* — контрольный электрод

отверстия в диффузоре *8*. Стабилизация горения обеспечивается в пределах диффузора. Горение газовоздушной смеси осуществляется в основном в пределах камеры горения. Продукты сгорания выходят из камеры горения через калиброванное сопло. Основные паспортные данные горелок ПИВс приведены в табл. 5.18.

В некоторых типоразмерах горелок ПИВс розжиг осуществляется при помощи запальной свечи.

5.19. ГОРЕЛКИ ГА

Горелки с принудительной подачей воздуха низкого давления типа ГА разработаны МосгазНИИпроектом. Общий вид горелок показан на рис. 5.46, а основные технические характеристики приведены в табл. 5.19.

Горелки могут работать при подаче в них газа низкого давления — 130 мм вод. ст. (серия Н) и среднего давления — 3000 мм вод. ст. (серия С). Давление воздуха перед горелкой около 100 мм вод. ст.

Горелки состоят из газовой камеры с трубной доской, в которой установлены газовые трубы с наконечниками, имеющими закручивающие лопатки и газовыпускные отверстия. Горелка, по существу, является блоком газовых элементов, объединенных общим воздушным корпусом.

Тепловая мощность горелок определяется числом отдельных смеси-

Таблица 5.19

Основные характеристики горелок типа ГА (Н — низкого, С — среднего давления) (рис. 5.46)

Обозначение	1230-00Б		1229-00Б		1228-00Б		1227-00Б		ГА-102-00Б		ГА-106-00Б		ГА-110-00Б		1702-00Б	
	С	Н	С	Н	С	Н	С	Н	С	Н	С	Н	С	Н	С	Н
Номинальная тепловая мощность, кВт	0,39		0,60		0,94		1,40		2,26		3,40		5,10		9,4	
Номинальный расход газа, м³/ч	39		60		94		140		226		340		508		940	
Число элементов	5		8		12		18		8		12		18		34	
Число газовых отверстий *n* в элементе	8		8		8		8		12		12		12		12	
Диаметры газовыпускных отверстий *d*, мм, при номинальных давлениях газа, кПА:																
1,3	—	3,1	—	3,1	—	3,1	—	3,1	—	4,3	—	4,3	—	4,3	—	4,3
3,0	1,3	—	1,3	—	1,3	—	1,3	—	2,1	—	2,1	—	2,1	—	2,1	—
Размеры, мм:																
d_1	53		53		53		53		80		80		80		80	
L	570		666		700		716		835		875		1000		1166	
H	400		540		570		580		610		700		850		1060	
D	275		320		320		440		400		490		530		752	
l	70		70		70		70		90		90		100		100	
D_r	60		88,5		88,5		77,5		108		108		133		150	
D_b (*d*×*b*)	156		181		246		256		290		360		500×300		615×400	
Масса горелки, кг	42		60		78		92		112		144		195		348	

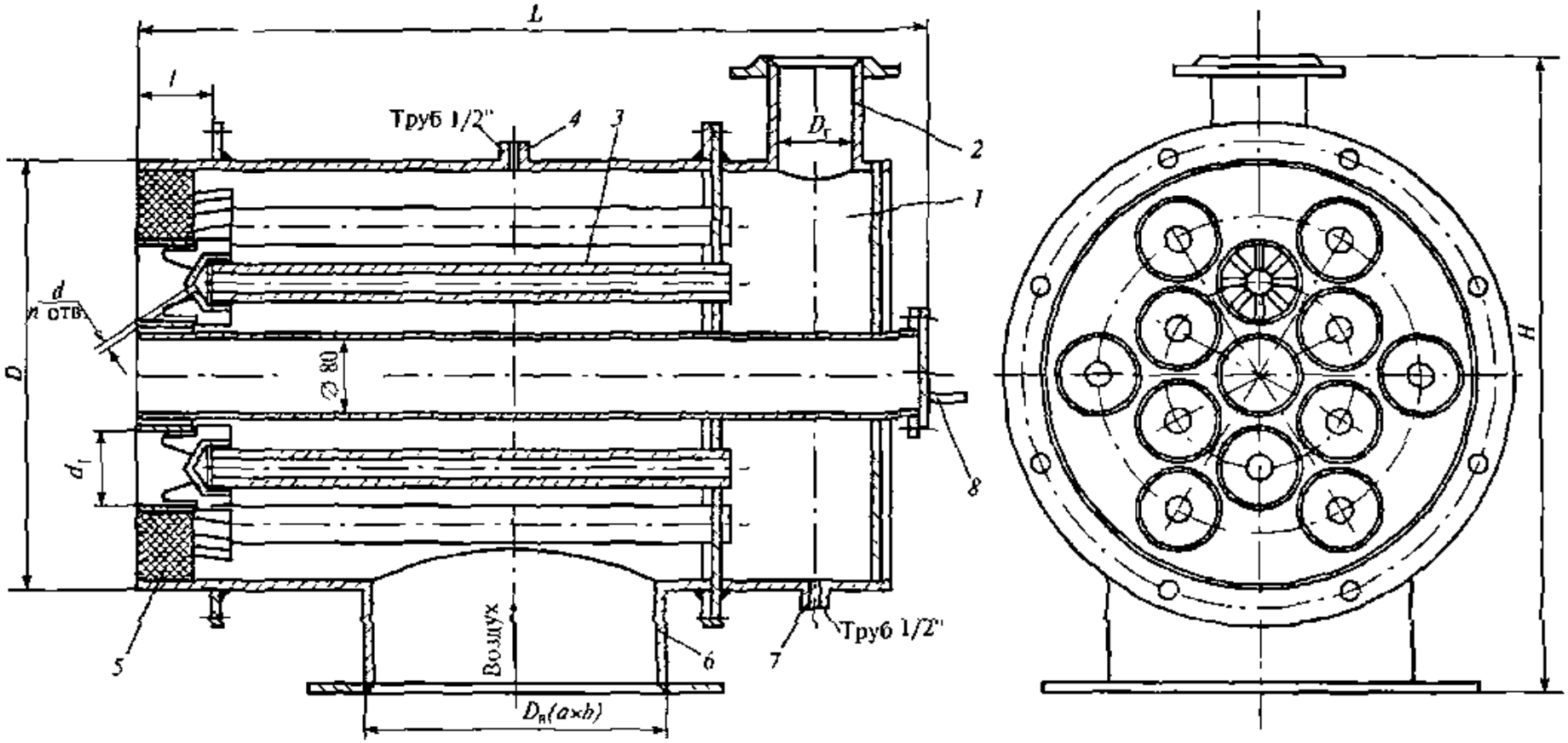


Рис. 5 46. Горелка ГА:
1 — газовая камера, *2* — газовый патрубок; *3* — газовая трубка с наконечником; *4* — штуцер для манометра (воздух), *5* — футеровка; *6* — воздушный патрубок; *7* — штуцер для манометра (газ); *8* — смотровая труба

тельных элементов, каждый из которых является самостоятельным устройством, где происходит смешение струек газа, выходящих из конического насадка элемента под углом к продольной оси, и закрученного направляющими лопатками потока воздуха. Для стабилизации пламени применяют, как правило, короткий керамический туннель с внезапным расширением.

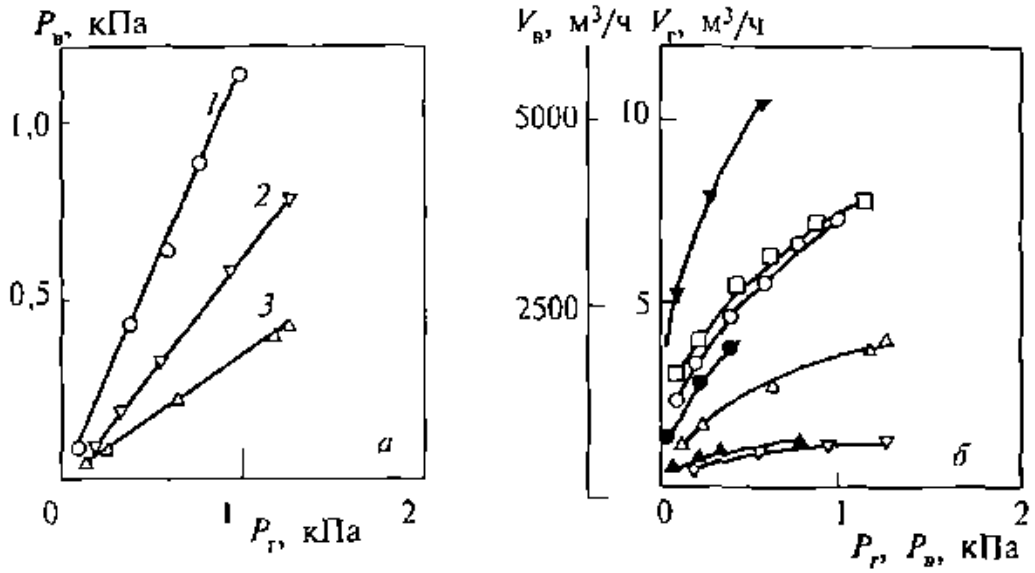


Рис. 5.47. Расходные и регулировочные характеристики горелок ГА-106, 1229-00, 1227-00, ГА-110:

а – зависимость давления воздуха от давления газа:

1 – ГА-106; *2* – 1229-00; *3* – 1227-00;

б – зависимость расходов газа и воздуха от их давлений:

○ – $V_г = f(p_г)$, □ – $V_в = f(p_в)$, для горелки ГА-106

▽ – $V_г = f(p_г)$, ▲ – $V_в = f(p_в)$, для горелки 1229-00

△ – $V_г = f(p_г)$, ● – $V_в = f(p_в)$, для горелки 1227-00

▼ – $V_в = f(p_в)$, для горелки ГА-110

Таблица 5.20

Данные испытаний горелок ГА

Наименование параметра	Типоразмер горелки			
	1229-00	1227-00	ГА-106	ГА-110
Давление в камере горения, Па	0	0	−29,4	−19,6
Номинальный расход газа, м³/ч	65	206	365	536
Номинальное давление газа, кПа	1,270	1,274	0,980	29,4
Температура газа перед горелкой, К	303	298	283	–
Номинальный расход воздуха, м³/ч	660	2049	3933	5300
Номинальное давление воздуха, кПа	0,784	0,441	1,13	0,52
Температура воздуха перед горелкой, К	302	313	298	–
Минимально необходимый коэффициент расхода воздуха	1,06	1,04	1,10	1,06
Минимальная рабочая тепловая мощность, кВт	217	595	1192	–
Максимальная тепловая мощность, кВт	872	–	–	–
Коэффициент рабочего регулирования	3,0	3,5	3,1	3,5
Длина факела, м	0,3	2,24	–	–

Пространство между элементами у выходного отверстия горелки футеруется во избежание перегрева шамотом или жароупорным бетоном. Для наблюдения за горением и розжига горелки переносным запальником имеется труба, в которую при отсутствии газа можно устанавливать мазутную форсунку.

Технические характеристики горелок, полученные при испытании институтом ВНИИпромгаз, приведены в табл 5.20 и на рис. 5.47.

5.20. ГОРЕЛКИ ТИПА Г (Г- 0,4; Г- 1,0)

Газовая горелка типа Г разработана ЦКТИ и заводом "Ильмарине". Она предназначена для использования в топках, работающих под давлением (200—500 Па) или разрежением (20—30 Па).

Общий вид горелки показан на рис. 5.48, а технические характеристики, полученные при испытании, приведены в табл. 5.21.

Таблица 5.21

Технические характеристики горелок Г-0,4 и Г-1,0 (рис. 5.48)

Наименование параметра	Типоразмер горелки	
	Г-0.4	Г-1.0
Тепловая мощность, МВт	0,438	1,12
Расход газа, $м^3/ч$	44	112
Давление газа, Па	294	834
Расход воздуха, $м^3/ч$	440	1100
Дааление воздуха, Па	392	1128
Коэффициент расхода воздуха	1,05	1,03
Диапазон рабочего регулирования:		
по расходу газа, $м^3/ч$	12—44	26—112
по давлению газа, Па	49—294	49—834
по расходу воздуха, $м^3/ч$	120—440	280—1100
по давлению воздуха, Па	49—392	98—1128
Коэффициент рабочего регулирования	3,7	4,3
Длина факела, м	0,84	1,15
Наружный диаметр газовой трубы, мм	48	76
Количество рядов газовых отверстий, шт.	8	3
С I по III ряд: диаметр, мм	3	6,5; 4,9; 3,5
количество, шт.	20	18; 18; 24
С IV по VIII ряд: диаметр, мм	3	—
количество, шт,	100	—
Выходной диаметр смесителя, мм	172	234
Длина смесителя, мм	616	760
Диаметр подводящих патрубков, мм:		
газ	49	78
воздух	100	100
газ на запальную трубку	6	6
Габаритные размеры горелки, мм:		
длина	1035	1235
ширина	460	620
высота	730	1050
Масса горелки, кг	12,8	23,8

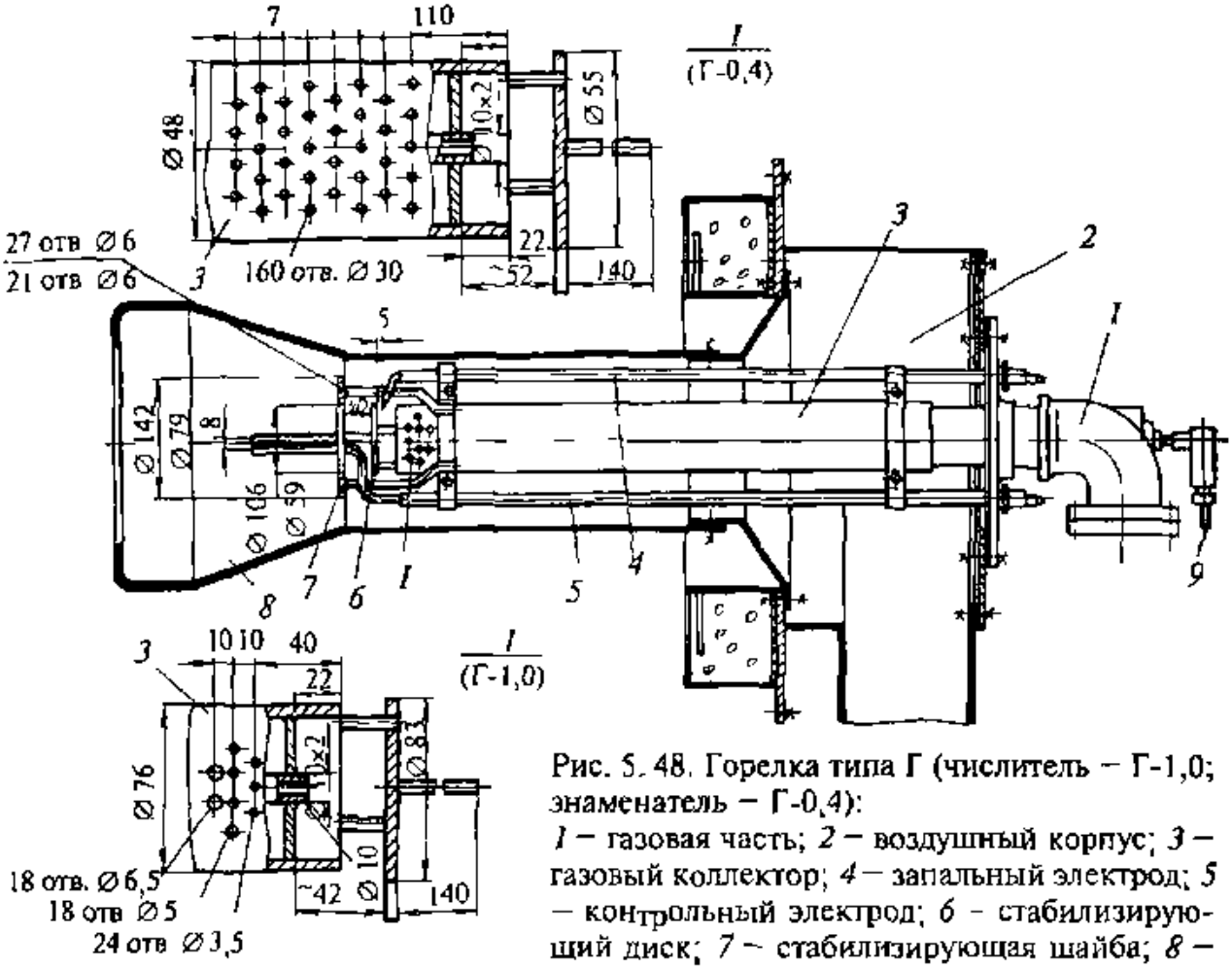


Рис. 5. 48. Горелка типа Г (числитель – Г-1,0; знаменатель – Г-0,4):
1 – газовая часть; *2* – воздушный корпус; *3* – газовый коллектор; *4* – запальный электрод; *5* – контрольный электрод; *6* – стабилизирующий диск; *7* – стабилизирующая шайба; *8* – смеситель, *9* – газоввл запвльная трубка

Горелка состоит из газовой части, воздухоподводящего устройства, смесителя и электродов розжига и контроля пламени. Газовая часть горелки состоит из коллектора с газовыпускными отверстиями и расположенной внутри него запальной трубки, к которой газ подается по самостоятельному газопроводу. Зажигание газа, выходящего из запальной трубки, осуществляется искрой между запальным электродом и корпусом горелки при подаче тока высокого напряжения от трансформатора зажигания. Для стабилизации пламени запальника на расстоянии примерно 30 мм от его торца на трех стержнях закреплен плоский диск.

При наличии устойчивого запального факела через контрольный электрод, омываемый пламенем, поступает сигнал на подачу газа в коллектор, из которого газ выходит через несколько рядов отверстий, просверленных на боковой поверхности в шахматном порядке под углом 90° к потоку воздуха. Воспламеняется газовоздушная смесь от запального пламени, которое совместно со стабилизирующей шайбой создает надежный очаг зажигания. Основная масса газа перемешивается с воздухом в смесителе, имеющем поджатие в месте выхода потока смеси в топку. В зависимости от места установки горелки на тепловом агрегате тепловая изоляция торцевой крышки горелки может быть выполнена либо укороченной, как показано на рисунке, либо удлиненной с размещением в ней части смесителя.

Следует отметить, что смеситель горелки работает в наиболее тяжелых температурных условиях и подвержен разрушениям при перегреве его стенок.

5.21. ГОРЕЛКИ ТИПА ГГВ

Вихревые горелки ГГВ разработаны институтом МосгазНИИпроект и предназначены для сжигания природного газа.

Конструкция горелки предусматривает струйную подачу газа в закрученный поток воздуха. Центральная труба служит для ввода запальника, а также для установки форсунки при работе на мазуте.

Общий вид горелки типа ГГВ показан на рис. 5.49, а технические характеристики, полученные при испытании, и основные размеры горелок приведены в табл. 5.22.

Горелки могут работать на газе низкого и среднего давления (2,0 и 30 кПа) при соответствующем изменении числа и диаметра газовыпускных

Таблица 5.22

Основные характеристики горелок ГГВ (рис. 5.49)

Обозначение	ГГВ-10	ГГВ-25	ГГВ-50	ГГВ-75	ГГВ-100	ГГВ-150	ГГВ-200	ГГВ-350	ГГВ-500	ГГВ-750
Номинальная тепловая мощность, МВт	0,12	0,29	0,59	0,94/0,87	1,17	1,75/1,69	2,35/2,33	4,12/4,09	5,64/5,85	8,76
Номинальный расход газа, $м^3/ч$	12	29	59	94/87	117	175/169	235/233	412/409	564/585	876
Длина факела, м	0,14	0,24	0,45	0,57	0,8	1,1	1,35	1,6	1,7	2,0
Число отверстий-сопел для выхода газа	12/12	24/48	16/36	12/36	12/36	12/36	12/36	12/36	12/36	24/36
Размеры, мм:										
d	2,76/1,4	3,0/1,0	5,0/1,7	7,7/2,2	8,7/2,5	11,0/3,0	12,2/3,5	16,3/4,75	20/5,8	17,3/7,0
d_1	7	12	12	12	12	12	14	14	14	14
D	68	126	152	168	192	210	270	330	386	460
D_1	85	150	180	195	215	245	290	370	405	488
$D_г$	16	46	60	76	76	103	110	128	154	179
$D_в$	62	84	115	140	160	185	218	289	346	422
L	315	514	525	603	638	725	755	930	1135	1270
l_1	80	80	80	80	80	80	120	80	120	120
l_2	70	135	160	180	200	245	230	380	445	550
l_3	125	210	205	250	260	290	280	348	420	435
h	100	150	145	170	190	200	220	306	325	360
Масса горелки, кг	4,3	18	19	26	29	38	45	65	93	90

Примечания:

1. В числителе даны характеристики горелок при работе на газе с номинальным давлением 2 кПа, в знаменателе — с давлением 30 кПа.
2. Номинальное давление воздуха 1,6 кПа.
3. Номинальная тепловая мощность ГГВ-150, согласно испытаниям, достигает при давлении газа 2,8 кПа и воздуха 2,3 кПа.

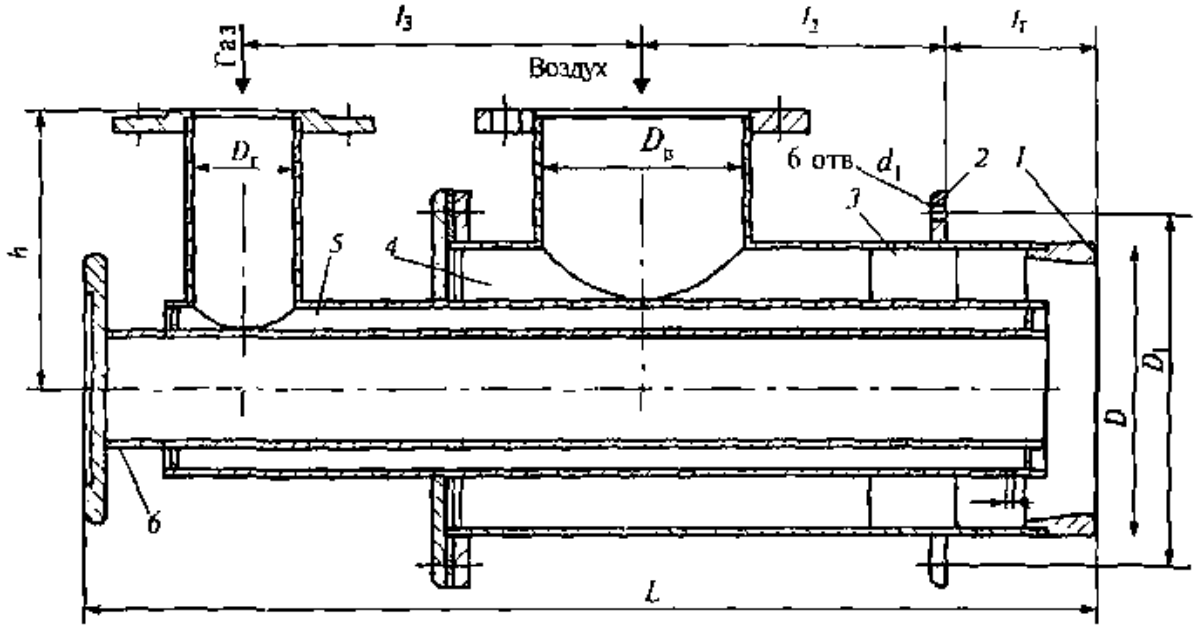


Рис. 5.49. Горелка ГГВ:
1 – огневой насалок с пережимом; *2* – фланец; *3* – лопатки; *4* – воздушная камера; *5* – газовая камера; *6* – смотровая труба

отверстий, просверленных в один ряд. Газ поступает в поток воздуха под углом 90° от центра к периферии. Крутка воздуха осуществляется лопатками, приваренными к наружной поверхности газового коллектора под углом 45°.

Чугунный огневой насадок создает пережим потока, повышая устойчивость горения. Болтовое соединение воздушной камеры позволяет поразному ориентировать между собой газовый и воздушный патрубки, а также производить при необходимости осмотр и ремонт внутренней части горелки без демонтажа ее с фронтового диска.

В качестве стабилизатора пламени служит керамический цилиндрический туннель с внезапным расширением. Горелки обеспечивают полное сжигание газа при коэффициенте расхода воздуха 1,03–1,04. Коэффициент рабочего регулирования у основной серии горелок находится в диапазоне 4,3–4,5 у горелок ГГВ-25 и ГГВ-500 – 6,2–6,3.

5.22. ГОРЕЛКИ С ПЕРЕМЕННЫМ ИЗБЫТКОМ ВОЗДУХА ГТПЦ

Горелки типа ГТПЦ разработаны НПО ЦНИИТмаш для сжигания природного газа с холодным и подогретым до 350 °С воздухом. Общий вид горелки показан на рис. 5.50.

Горелки ГТПЦ состоят из корпуса *1* для подвода первичного воздуха, центральной трубы *2* для подвода вторичного воздуха, оканчивающейся сменным соплом *3*, кольцевого газового канала *4* с выходными соплами *5*, перфорированного насадка 6 с отверстиями для истечения первичного воздуха в горелочный туннель *7*.

Газ через ряд отверстий истекает в первое отделение камеры горения,

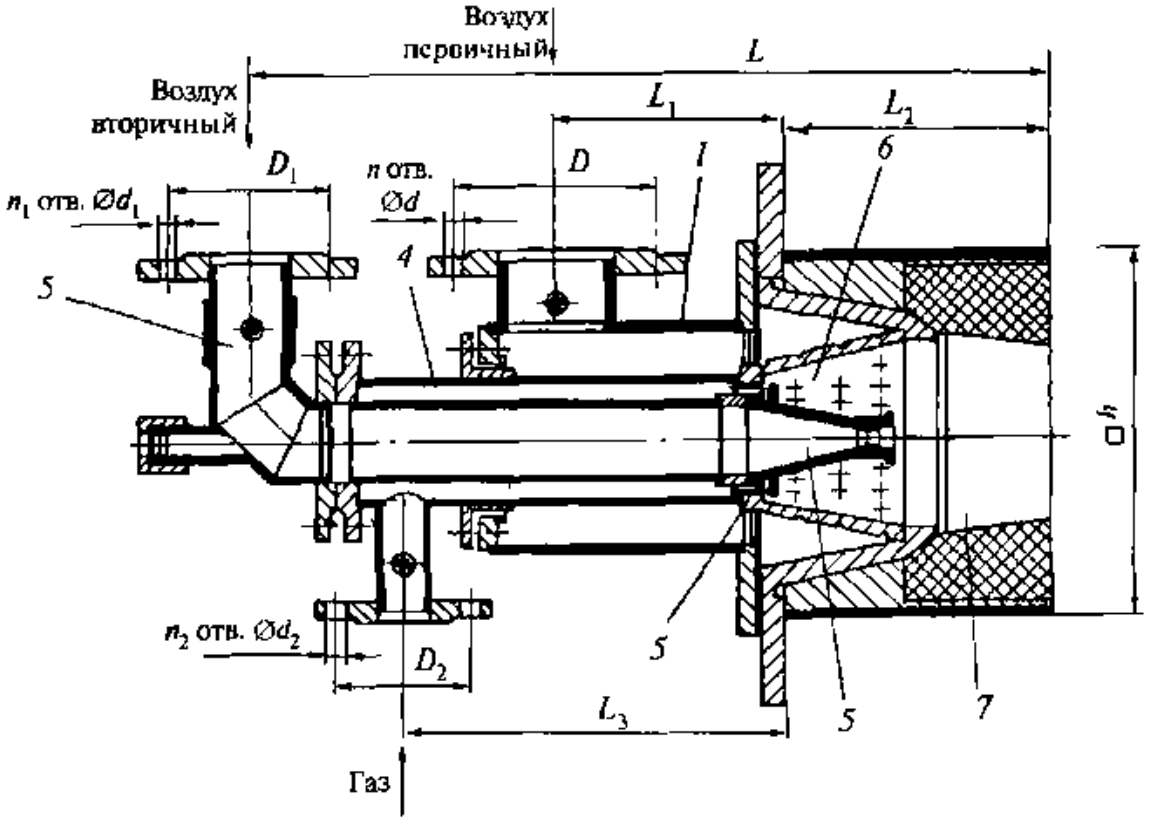


Рис. 5.50. Общий вид горелки типа ГТПЦ с переменным избытком воздуха:
1 – корпус; *2* – центральная труба; *3* – сменное сопло; *4* – газовый канал; *5* – газовое сопло, *6* – насадка, *7* – горелочный туннель

где он частично смешивается с воздухом. Эта газовоздушная смесь истекает через кольцевой зазор во второе отделение камеры горения, где происходит сгорание газовоздушной смеси. Отверстия в воздушном конусе расположены тангенциально, что позволяет обеспечить закрутку воздуха и устойчивое горение в диапазоне регулирования по расходам газа и воздуха.

Вторичный воздух истекает в туннель из воздушного сопла и позволяет увеличить скорость течения продуктов горения для создания необходимой рециркуляции печных газов в рабочем пространстве печи.

Воздушное сопло является сменным для четырех значений давления вторичного воздуха, что позволяет расширить диапазон скоростей продуктов горения в смеси с вторичным воздухом и, соответственно, кратности рециркуляции печных газов.

Расход газа регулируется в зависимости от температуры в печи, количество первичного воздуха — в соответствии с заданным коэффициентом расхода воздуха. Количество вторичного воздуха на всех режимах остается постоянным.

Разработанный горелочный ряд содержит пять типоразмеров устройств тепловой мощностью от 0,2 до 1,0 МВт. Основные размеры горелок приведены в табл. 5.23, а технические характеристики, полученные при испытании, — в табл. 5.24.

Таблица 5.23

Основные размеры горелок типа ГТПЦ (рис. 5.50)

Обозначение параметра	Типоразмер горелки					
	ГТПЦ-2	ГТПЦ-3	ГТПЦ-4	ГТПЦ-5	ГТПЦ-7	ГТПЦ-10
Размеры, мм.						
L	615		720		1010	
L_1	170		190		229	
L_2	215		260		430	
L_3	290		330		410	
h	270		320		382	
D	150		170		200	
D_1	110		150		170	
D_2	90		110			
d	16		16		16	
d_1	12		16		16	
d_2	12		12		12	
Число отверстий						
n	4		4		8	
n_1	4		4		4	
n_2	4		4		4	
Масса горелки, кг	65,0		80,0		135,0	

5.23. ГОРЕЛКА СО СТРУЙНОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ГГС

Горелка разработана НИИСТ для сжигания природного газа в отопительных котлоагрегатах типа ВК-2, ВК-3, ВК-31. Общий вид горелки показан на рис. 5.51, а технические характеристики испытанных образцов приведены в табл. 5.25.

Горелка ГГС состоит из топливного коллектора, корпуса горелки, центрального стакана с перфорированным диском и запального устройства, имеющего самостоятельный подвод газа, высоковольтный и контрольный электроды.

При работе горелки подводимый воздух разделяется на два потока: периферийный и центральный. Центральный поток воздуха заходит в стакан и через перфорацию в его торцевой стенке струями выходит в приосевую зону горелки, в которую струями нагнетается газ из запального трубопровода. Образующаяся смесь воспламеняется от искры, инициируемой запальным электродом. Образовавшийся запальный факел воспламеняет основную топливную смесь, которая формируется в периферийной зоне горелки, в которую вытекают струи из топливного коллектора.

Таблица 5.24

Технические характеристики горелок ГТПЦ

Обозначение параметра	Типоразмер горелки					
	ГТПЦ-2	ГТПЦ-3	ГТПЦ-4	ГТПЦ-5	ГТПЦ-7	ГТПЦ-10
1	2	3	4	5	6	7
Номинальная тепловая мощность, кВт	205,6	304,4	409,4	511,5	714,9	1017
Номинальный расход газа, $м^3/ч$	20	30	40	50	70	100
Номинаяьное давление газа, кПа	3,14	3,13	2,90	3,04	3,04	3,28
Расход вторичного воздуха, $м^3/ч$	60	90	120	150	225	300
При коэффициенте расхода воздуха $\alpha_{\text{нии}}^{\text{сумм}}$						
Давление вторичного воздуха, кПа:						
I сопло	3,19	3,38	3,40	3,53	3,72	3,43
II сопло	6,86	6,94	8,00	7,64	7,35	7,64
III сопло	19,6	17,74	19,60	17,90	19,10	19,60
IV сопло	30,9	30,38	34,30	28,42	33,80	34,30
Номинальный расход первичного воздуха, $м^3/ч$						
I сопло	145	216	285	349	505	737
II сопло	143	214	278	365	487	720
III сопло	144	215	277	365	492	714
IV сопло	144	215	280	400	490	730
Номинальное давление первичного воздуха, кПа:						
I сопло	2,65	2,35	2,20	2,59	2,16	2,40
II сопло	2,64	2,20	2,50	2,30	2,25	2,40
III сопло	2,84	2,20	2,20	2,45	2,16	2,40
IV сопло	2,94	2,15	2,50	2,45	2,16	2,46
Коэффициент расхода воздуха на расстоянии 2,7 м от выходного сечения туннеля:						
на номинальном расходе газа						
суммарный						
I сопло	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
II сопло	1,04	1,04	1,02	1,04	1,04	1,06
III сопло	1,02	1,04	1,02	1,04	1,07	1,04
IV сопло	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05	1,06
первичный						
I сопло	0,74	0,75	0,72	0,72	0,74	0,75
II сопло	0,73	0,73	0,72	0,75	0,72	0,74
III сопло	0,74	0,74	0,72	0,75	0,72	0,74
IV сопло	0,74	0,74	0,72	0,74	0,72	0,75
на минимальном расходе газа:						
суммарный						
I сопло	1,41	1,28	1,35	1,16	1,32	1,23
II сопло	1,32	1,28	1,35	1,30	1,32	1,38
III сопло	1,31	1,30	1,35	1,36	1,34	1,38
IV сопло	1,45	1,30	1,35	1,36	1,40	1,30
первичный						
I сопло	0,47	0,33	0,37	0,30	0,50	0,41
II сопло	0,54	0,34	0,47	0,35	0,50	0,48
III сопло	0,57	0,40	0,49	0,36	0,52	0,46
IV сопло	0,59	0,37	0,51	0,36	0,50	0,42

1	2	3	4	5	6	7
Минимальная тепловая мощность, кВт:						
I сопло	62,4	99,0	140.1	154,5	276.4	336,6
II сопло	77,1	100,8	158,6	165,6	280.0	362,0
III сопло	80,7	96,4	154,9	168,7	267,1	365,9
IV сопло	79,3	100.8	154,9	161,9	272,7	362,0
Коэффициент рабочего регулирования по тепловой мощности						
I сопло	5,2	3,1	2,9	3,3	2,6	3,0
II сопло	4,2	3,0	2,6	3,1	2,6	2,8
III сопло	4,0	3,2	2,6	3,0	2,7	2,8
IV сопло	4,1	3,0	2,6	3,2	2,6	2,8
Длина факела, мм:						
I сопло	428	491	530	750	1100	1100
IV сопло	300	378	470	500	510	780
При коэффициенте расхода воздуха $\alpha_{макс}^{сумм}$						
Даление вторичного воздуха, кПа:						
I сопло	3,33	3,58	3,40	3,72	3,92	3,43
II сопло	7,06	7,15	8,00	7,74	7,35	7,64
III сопло	19,60	17,74	19,60	17,90	19,10	19,60
IV сопло	33,03	31,85	34,30	28,80	34,10	34,30
Номинальный расход первичного воздуха, $м^3/ч$:						
I сопло	365	423	489	635	920	1255
II сопло	347	409	512	635	886	1280
III сопло	309	406	512	600	884	1240
IV сопло	309	412	471	615	900	1270
Номинальное давление первичного воздуха, кПа.						
I сопло	16,40	8,13	5,90	6,96	6,80	6,86
II сопло	17,60	7,99	9,30	6,91	7,06	6,40
III сопло	13,70	7,98	8,40	6,81	7,06	6,47
IV сопло	14,10	7,74	6,50	6,66	7,55	6,86
Коэффициент расхода воздуха на расстоянии 2,7 м от выходного сечения туннеля:						
на номинальном расходе газа:						
суммарный						
I сопло	**2,10**	1,73	1,61	1,62	1,67	1,57
II сопло	**2,07**	1,70	1,70	1,62	1,60	1,63
III сопло	**1,91**	1,69	1,62	1,55	1,68	1,64
IV сопло	**2,02**	1,69	1,55	1,57	1,62	1,59
первичный						
I сопло	1,89	1,45	1,23	1,30	1,33	1,29
II сопло	1,79	1,40	1,33	1,30	1,30	1,31
III сопло	1,70	1,39	1,39	1,24	1,29	1,29
IV сопло	1,69	1,42	1,21	1,27	1,80	1,33

Продолжение табл. 5 24

1	2	3	4	5	6	7
на минимальном расходе газа:						
суммарный						
I сопло	5,05	4,37	4,70	4,37	5,25	4,31
II сопло	5,10	4,37	4,50	4,39	6,04	4,64
III сопло	5,11	4,27	4,50	4,50	6,00	4,49
IV сопло	5,08	4,29	4,50	4,50	5,80	4,62
первичный						
I сопло	2,36	2,11	2,85	2,14	3,76	1,92
II сопло	2,80	2,00	2,83	2,21	3,47	2,31
III сопло	2,80	2,00	2,82	2,06	3,51	2,23
IV сопло	2,93	2,12	2,82	2,34	3,10	2,23
Минимальная тепловая мощность, кВт	27,5	40,3	70,1	69,9	95,8	139,0
Коэффициент рабочего регулирования по тепловой мощности	7,5	7,6	9,5	7,1	7,4	7,3
Длина факела, мм:						
I сопло	150	214	290	300	870	930
IV сопло	107	126	260	150	270	570

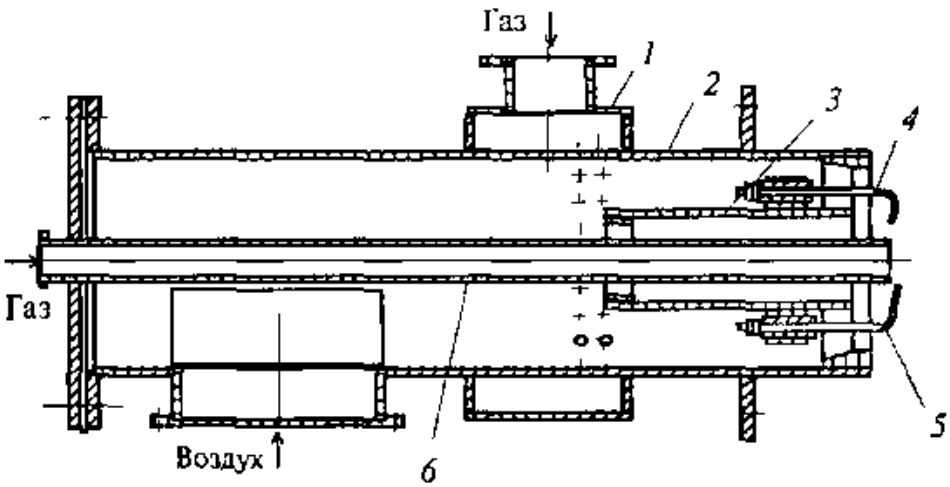


Рис. 5. 51. Газовая горелка со струйной стабилизацией ГГС:
1 — газовый коллектор; *2* — корпус; *3* — стакан; *4* — запальный электрод; *5* — контрольный электрод; *6* — подвод запального газа

Таблица 5.25

Технические характеристики горелок ГГС (рис. 5.51)

Наименование параметра	ГГС-1,3	ГГС-2,1	
		низкого давления	высокого давления
Номинальная тепловая мощность, МВт	1,3	2,1	2,17
Номинальный расход газа, м³/ч	128,3	205	212
Номинальное даление газа, кПа	0,8	1,45	18,9
Номинальный расход воздуха, м³/ч	1318	2090	2149
Номинальное давление воздуха, кПа	0,5	1,115	1,3
Коэффициент расхода воздуха	1,06	1,05	1,05
Коэффициент рабочего регулирования по тепловой мощности	3,0	3,0	3,1
Запальная (дежурная) горелка.			
номинальный расход газа, м³/ч	7,0	7,0	7,3
номинальное даление газа, кПа	900	900	900

5.24. ВИХРЕВЫЕ ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ «ЮМАС»

Для сжигания природного газа в коротком факеле применительно к агрегатам для получения теплоносителя топок печных и котельных агрегатов Межотраслевой творческой группой (МТГ «ЮМАС») и лабораторией Гидрогазодинамики и горения Казанского филиала МЭИ (г. Казань) разработана серия горелок тепловой мощностью от 0,12 до 13,0 МВт. Общий вид горелок показан на рис. 5.52, а технические и конструктивные характеристики приведены в табл. 5.26.

Особенностью горелки является использование смесителя, сочетающего вихревой принцип истечения воздуха с инжекцией в этот поток газа хордальными и радиальными сходящимися струями [3–6].

Основные принципы, положенные в основу конструкции горелок, изложены в работах [3–6]

Ниже дано описание конструкции и работы горелки на примере устройства тепловой мощностью 1,5 МВТ.

Горелка состоит из воздухоподводящего корпуса с патрубком, периферийного газового коллектора, завихрителя воздуха с 18 лопатками, установленными под углом 45°, и направляющей трубы. В стенке газового кол-

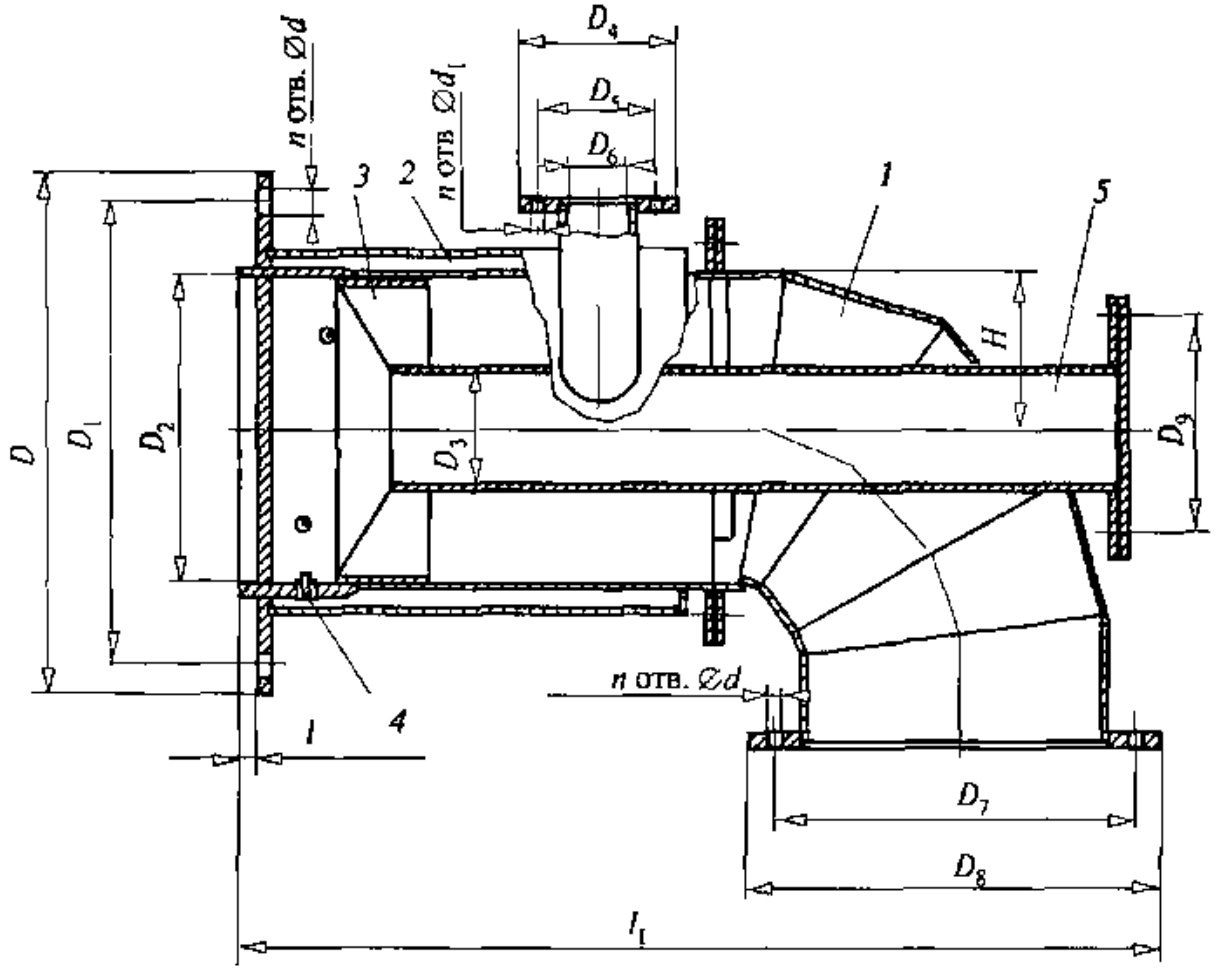


Рис 5.52 Вихревая газовая горелка «ЮМАС»:
1 – воздушный корпус; *2* – газовый коллектор, *3* – завихритель; *4* – жиклер; *5* – направляющая труба

Таблица 5.26.

Основные технические и конструктивные характеристики вихревых горелок «ЮМАС» (рис. 5.52)

Наименование параметра, характерный размер	Размерность	Тепловая мощность, МВт									
		0,12	0,25	0,5	1,0	1,5	2,9	4,5	5,25	8,3	13,0
Номинальный расход природного газа	$м^3/ч$	12	25	50	100	150	290	450	525	830	1300
Давление газа перед горелкой при номинальном расходе	кПа	2/20	2/20	2/20	2/20	12,6	12,3	12,5	20	20	20
Давление воздуха перед горелкой	кПа	0,85	8	–	0,75	1,67	0,8	0,85	1,0	1,05	1,1
Коэффициент расхода воздуха при номинальной тепловой мощности	–	1,1	1,05	1,05	1,05	1,1	1,05	1,1	1,1	1,1	1,1
Коэффициент рабочего регулирования	–	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,8	6,3	6,0	6,0	6,0
Длина факела	м	–	–	–	–	1,5	–	–	–	–	–
Конструктивные размеры:	мм										
D		146	175	210	290	340	475	580	510	540	695
D_1		134	160	195	268	305	440	545	470	500	660
D_2		100	120	145	200	198	280	346	350	380	540
D_3		76	76	76	76	76	76	76	76	76	76
D_4		55	75	97	127	140	185	210	240	280	330
D_5		45	62	80	102	110	155	175	195	235	285
D_6		34	46	60	76	46	120	140	150	180	240
D_7		114	137	165	228	280	370	445	445	480	540
D_8		124	150	180	250	315	410	485	485	520	590
D_9		130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
d		6	8	10	12	11	18	18	18	18	18
d_1		6	8	10	12	11	18	18	18	18	18
l		–	–	–	–	30	60	95	–	–	–
h_1		275	330	400	550	600	870	1165	960	1060	1160
n	шт.	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
n_1	шт.	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
H	мм	80	100	115	160	170	235	285	280	300	490

лектора установлены жиклеры (газовые сопла), расположенные в два ряда. В первом ряду, ближайшем к выходному сечению горелки, установлены 16 жиклеров, 8 из которых направлены радиально к оси горелки, причем четыре жиклера имеют диаметр 6 мм и четыре — диаметр 3,5 мм. Остальные восемь жиклеров этого ряда имеют диаметр сопла 3,5 мм и хордвльное направление своих осей в сечении горелки. Кроме того, оси жиклеров имеют наклон в сторону касательно к окружности диаметром 80 мм.

Во втором ряду, около завихрителя воздуха, установлены восемь жиклеров диаметром 5 мм, расположенных хордвльно и с углом наклона осей 60°. Причем половина жиклеров попарно имеют наклон в сторону горелочного туннеля, а половина — в сторону завихрителя воздуха. Расположение и ориентация осей жиклеров в поперечном сечении горелки тепловой мощностью 1,5 МВт показаны на рис. 5.53.

Розжиг горелки осуществляется от запально-сигнализирующего устройства, устанааливаемого в направляющую трубу.

При работе горелки струи газа из системы жиклеров под различными

углами вытекают в вихревой поток воздуха, выходящий из завихрителя. Образовавшаяся смесь после воспламенения интенсивно сгорает сначала в горелочном туннеле, затем в топочной камере.

При работе горелки тепловой мощностью 1,5 МВТ с цилиндрическим туннелем выходящий из него поток раскрывается под углом примерно 35°. У торцевой стенки топочной камеры создается разрежение, величина которого зависит от тепловой нагрузки горелки.

Химический недожог на выходе из туннеля при номинальной нагрузке не привышает 30 %. Догорание остатков топлива происходит на длине факела около 6–7 калибров туннеля.

Максимум температуры продуктов сгорания в факеле располагается на расстоянии около 1,5 калибров туннеля от передней стенки камеры сгорания. Характер изменения параметров факела горелки тепловой мощностью 1,5 МВт по длине камеры сгорания показан на рис. 5.54.

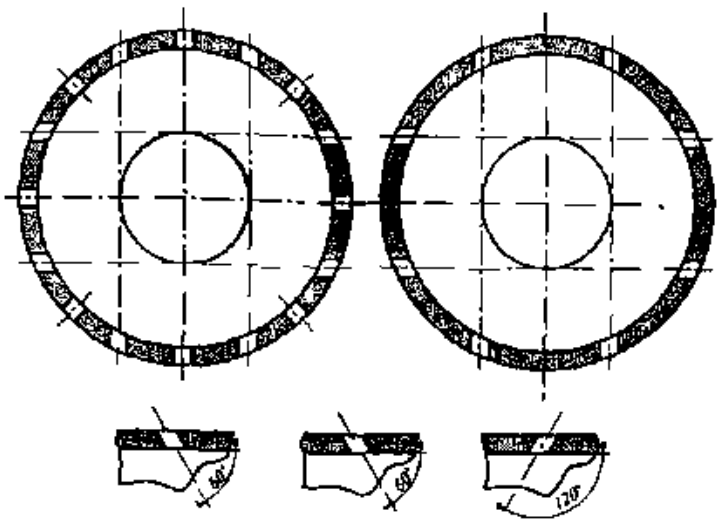


Рис. 5.53. Схема расположения жиклеров

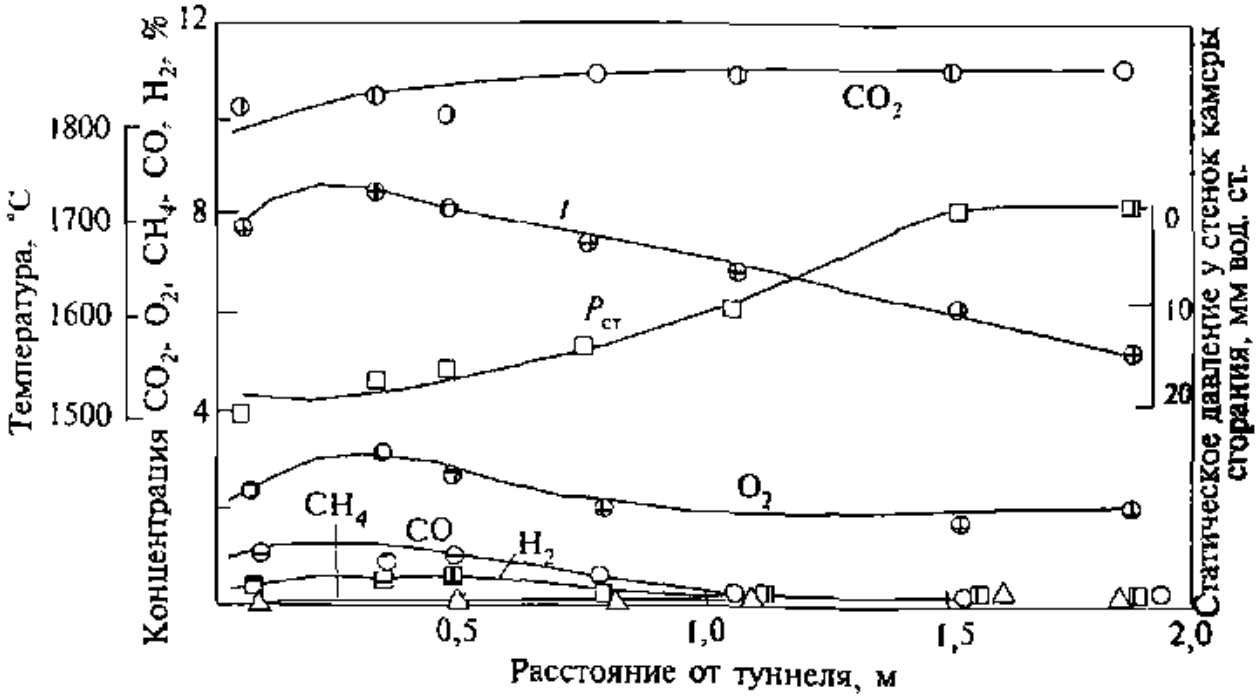


Рис 5.54. Изменение концентрации газов, температуры продуктов горения и статического давления по оси факела горелки "ЮМАС" мощностью 1,5 МВт при номинальной нагрузке

5.25. ЦИКЛОННАЯ ГОРЕЛКА ВНИИМТ

Горелка разработана институтом ВНИИМТ и предназначена для сжигания природного газа с целью получения высокотемпературных продуктов неполного горения для отопления шахтных печей обжига известняка.

Общий вид горелки показан на рис. 5 55, а технические характеристики, полученные при испытании, приведены в табл. 5.27.

Горелка предназначена для сжигания холодного газа с холодным воздухом.

Горелка состоит из корпуса с воздухоподводящим патрубком, имеющего периферийный и торцевой воздушные коллекторы. Внутренняя полость корпуса заполнена огнеупорной футеровкой и имеет центральный цилиндрический канал, являющийся камерой смешения, и тангенциальный канал для подвода газа и воздуха. На оси корпуса выполнен канал для установки запального устройства.

При работе горелки воздух, подводимый в периферийный коллектор, омывая наружную поверхность корпуса горелочного камня, попадает через тангенциальный канал в камеру смешения, в которой образуется вихревой поток, движущийся вдоль ее внутренней поверхности. Газ подается в камеру смешения через газовый патрубок и газовое сопло диаметром 21 мм.

Смешение потоков происходит в полости камеры смешения, а воспламенение смеси — на стенке этой камеры. Горение протекает устойчиво, без пульсаций и шума. По оси горелочного туннеля движется рециркулирующий поток высокотемпературных продуктов горения.

Часть воздуха, попавшего через отверстия в разделительной стенке в торцевой воздушный коллектор, предохраняет торцевую стенку от перегрева. Истечение этого воздуха происходит через отверстия направляющей трубы запальника вдоль оси горелки.

Сжигание основной массы топлива происходит в камере сгорания печи на длине около 1,3 м.

Горелочное устройство позволяет получить продукты сгорания следующего состава: CO — 9,2 %; H_2 — 9,6 %; CH_4 — 0,85 %; O_2 — 0,4 %; NO_x — 6,2 мг/м^3.

Расходные характеристики горелки приведены на рис. 5 56.

Таблица 5 27

Технические характеристики циклонной горелки ВНИИМТ (рис. 5.55)

Параметр	Размерность	Значение показателя
Номинальная тепловая мощность	МВт	0,6
Номинальный расход газа	м^3/ч	60
Номинальное давление газа	кПа	1,2
Номинальное даление воздуха	кПа	0,7
Номинальный коэффициент расхода воздуха		0,6
Коэффициент рабочего регулирования		5,2
Максимальная тепловая мощность	МВт	0,65
Коэффициент предельного регулирования		6.5

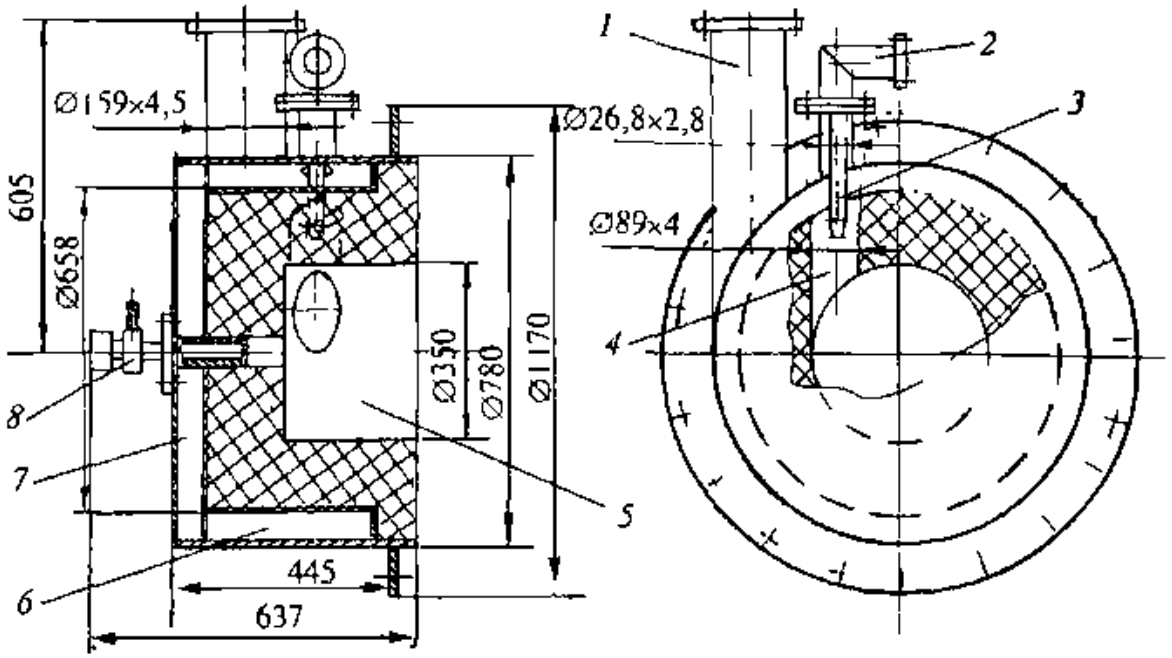


Рис. 5.55. Циклонная горелка ВНИИМТ:
1 – воздушный патрубок; *2* – газовый патрубок; *3* – газовое сопло; *4* – тангенциальный коллектор; *5* – камера смешения; *6* – периферийный коллектор; *7* – торцевой коллектор; *8* – запальное устройство

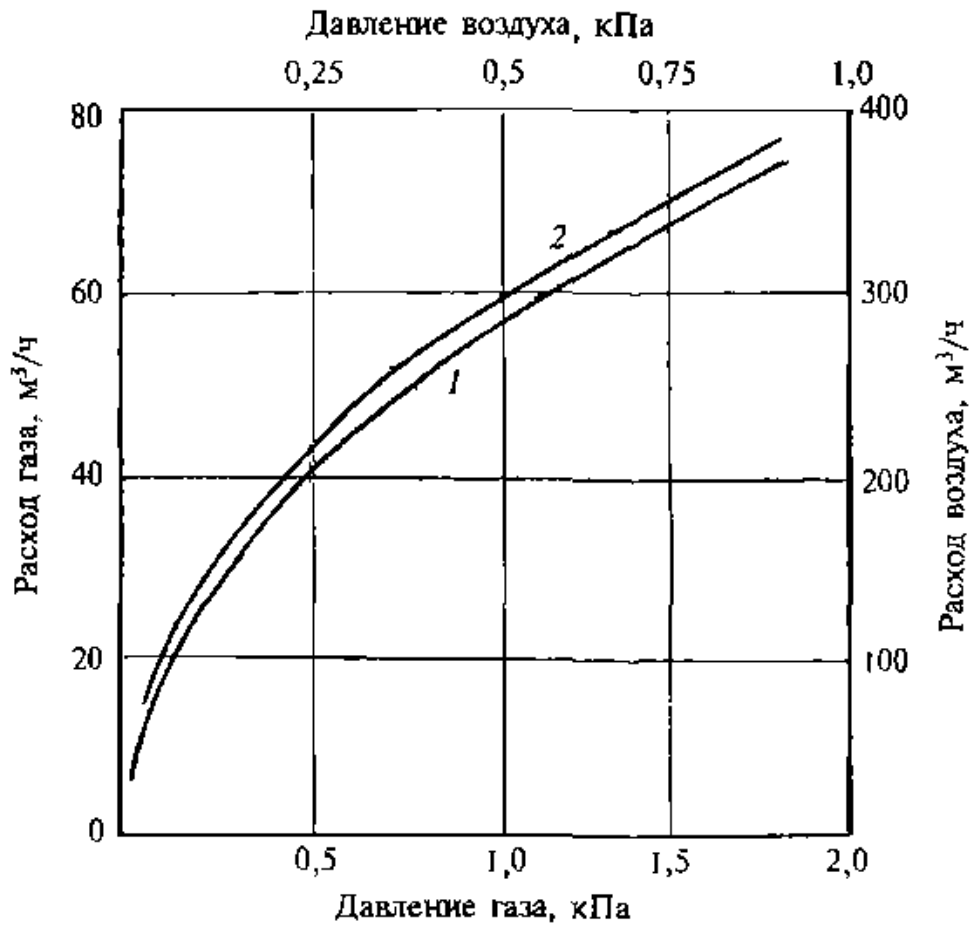


Рис. 5.56. Зависимость расхода газа (*1*) и расхода воздуха (*2*) от давления этих сред перед циклонной горелкой

5.26. СИСТЕМА СЖИГАНИЯ ГАЗА С РЕГЕНЕРАТИВНЫМИ ГОРЕЛКАМИ

Для сжигания природного газа с подогревом воздуха 1000- 1100 °С применительно к нагревательным и плавильным печам в институте ВНИИМТ разработаны регенеративные горелки, обеспечивающие различные температурно-временные и концентрационные характеристики пламени

Разработаны два варианта системы сжигания, различающиеся количеством работающих горелок. Система сжигания с использованием одного горелочного устройства тепловой мощностью 1,0 МВт показана на рис. 5.57.

Регенеративная система состоит из:

– камеры сгорания;

– керамического сопла;

– керамической форкамеры-смесителя;

– кольцевого газового коллектора с двумя рядами газовых наконечников;

– запально-дежурной горелки (2 шт.);

– регенератора состоящего из корпуса и внутренней засыпки, в качестве которой использовались корундовые шары диаметром 20 мм,

– перекидного клапана поворотного совмещенного типа для воздуха и дыма на D_y = 270 мм с приводом от пневмоцилиндра.

Установка имеет вертикальную компоновку с верхним расположением регенератора, с подачей газа перед форкамерой перпендикулярно вертикальному потоку нагретого воздуха с помощью кольцевого газового коллектора, имеющего два ряда газовых наконечников.

В установке предусмотрено автоматическое переключение режимов «нагрева» и «сдува» с помощью реле времени и удаление продуктов сгорания при «нагреве» с помощью эжектора, а при «сдуве» — через боров.

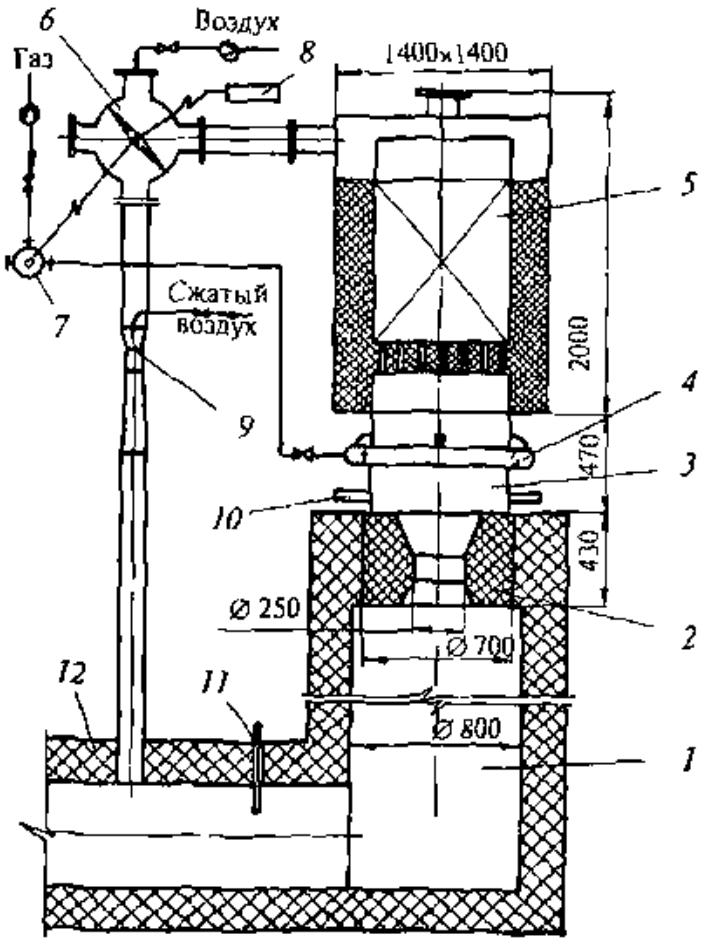


Рис. 5.57. Система сжигания с одной регенеративной горелкой: *1* – камера сгорания, *2* – сопло; *3* – форкамера-смеситель, *4* – кольцевой газовый коллектор, *5* – регенератор; *6* – распределительный клапан, *7* – распределительный кран; *8* – пневмоцилиндр; *9* – эжектор; *10* – запально-дежурнал горелка; *11* – шибер; *12* – входной газоход теплового агрегата

Нагрев регенератора при «нагреве» производится двумя запально-дежурными горелками ($V_г$ = 35 нм³/ч).

Керамическое сопло изготовлено из корундового бетона. Форкамера-смеситель (рис. 5.58) расположена между регенератором и керамическим соплом. Она изготовлена из электрокорунда с каналами для подачи первичного воздуха в первую ступень смешения и горения с каналами прямоугольного сечения для подачи вторичного воздуха. В боковой стенке форкамеры выполнены каналы для установки четырех газовых сопловых наконечников, подающих газ от общего кольцевого коллектора. Сопла устанавливают так, что их наконечники не перегораживают каналы для вторичного воздуха.

Регенеративная система сжигания работала в несимметричном режиме переключения – $\tau = {}^{2}/_{5}$ (2 мин – «сдув» и 5 мин – «нагрев» насадки запально-дежурными горелками).

При нагреве насадки регенератора шибер, установленный во входном газоходе теплового агрегата, закрывают, перекрывая выход газов из камеры горения, и включают подачу сжатого воздуха в эжектор. При этом пламя запально-дежурных горелок за счет разрежения, создаваемого эжектором, просасывается через форкамеру-смеситель в регенератор, нагревая его насадку. Охлажденные продукты горения сбрасываются в газоход. После завершения цикла нагрева насадки происходит переключение распределительного воздушного клапана и газового крана и прекращение подачи сжатого воздуха в эжектор. При этом открывается шибер в газоходе, начинается подача холодного воздуха в насадку регенератора и газа в смеситель. Сжигание газа происходит при его двухступенчатом смешении с воздухом первоначально в центральном канале форкамеры-смесителя с коэффици-

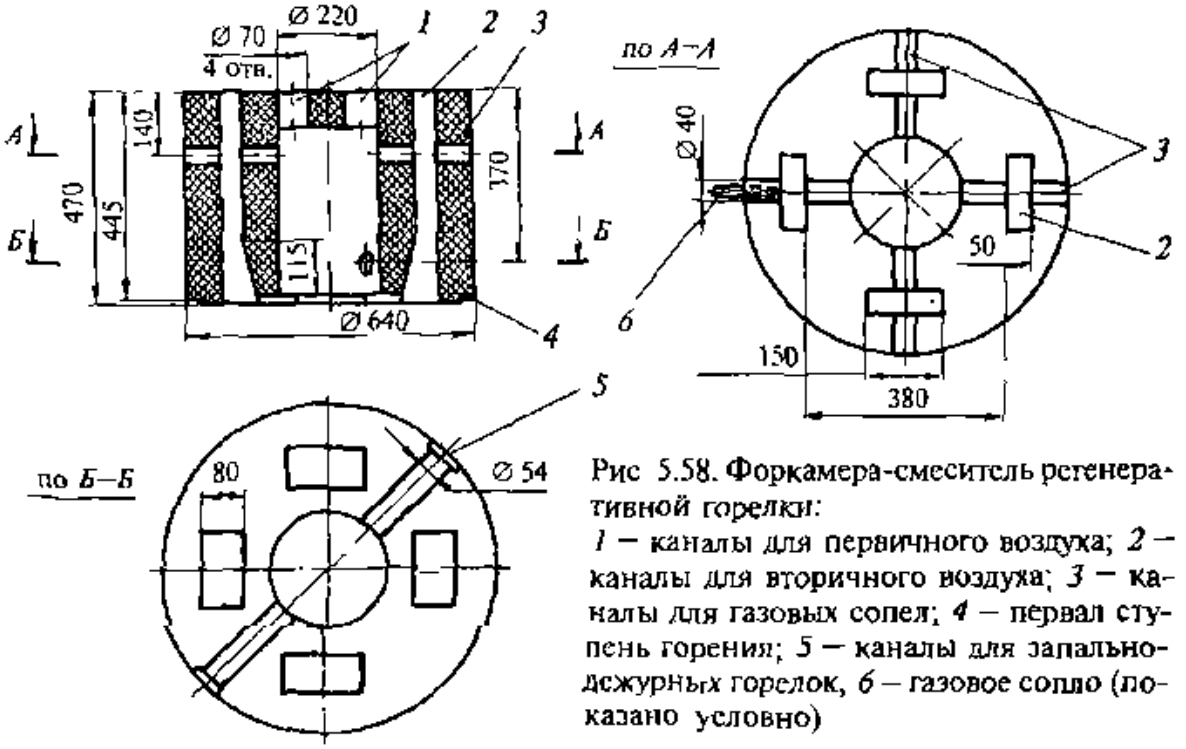


Рис. 5.58. Форкамера-смеситель регенеративной горелки:
1 – каналы для первичного воздуха; *2* – каналы для вторичного воздуха; *3* – каналы для газовых сопел; *4* – первая ступень горения; *5* – каналы для запально-дежурных горелок, *6* – газовое сопло (показано условно)

ентом расхода воздуха α, а затем при подмешивании в поток вторичного воздуха.

В течение основного периода работы горелки (2 мин) температура воздуха снижается с 1140 до 1090 °С. Температура продуктов сгорания в конце камеры горения составляет около 1420 °С.

Расходные характеристики регенеративного горелочного устройства с одной горелкой приведены на рис. 5.59.

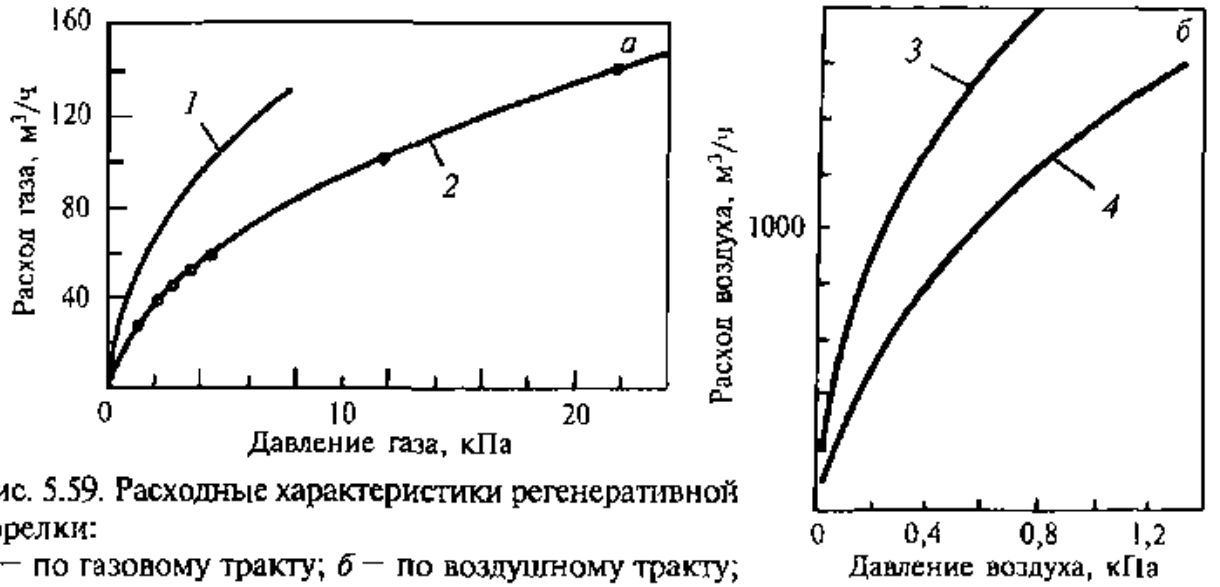


Рис. 5.59. Расходные характеристики регенеративной горелки:
а — по газовому тракту; *б* — по воздушному тракту; *1* — при 4 соплах диаметром 10 мм; *2* — то же, диаметром 8 мм, *3* — при разрежении в камере сгорания 0,03 кПа; *4* — то же, при разрежении 0,80 кПа

Система сжигания с двумя горелочными устройствами показана на рис. 5.60, а регенеративный горелочный блок — на рис. 5.61.

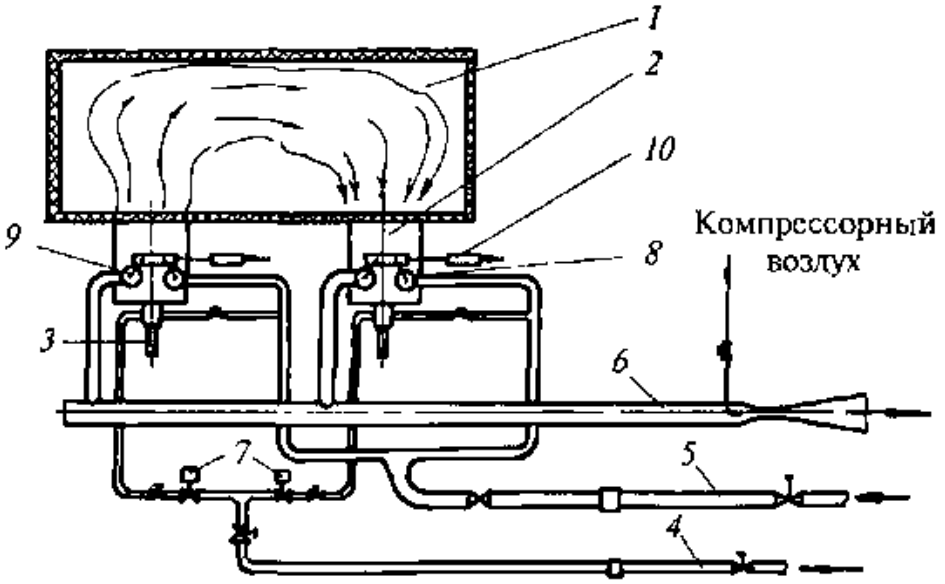


Рис. 5.60. Система сжигания газа с двумя регенеративными горелками:
1 — топочный объем; *2* — горелки; *3* — запальные устройства; *4* — подвод природного газа; *5* — подвод воздуха; *6* — отвод продуктов горения; *7* — электромагнитные клапаны; *8* — клапан воздушный ДХО-200; *9* — клапан дымовой ДП-250; *10* — пневмоцилиндр

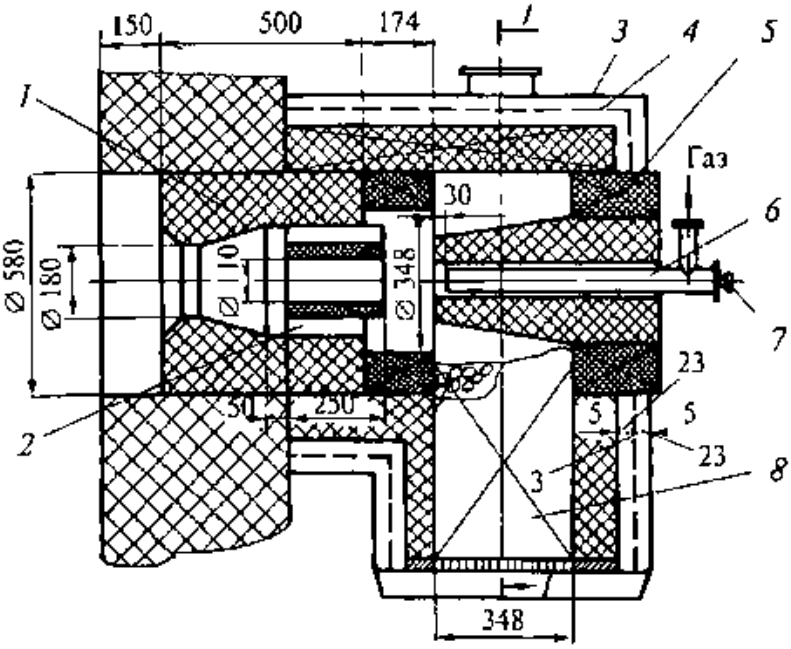
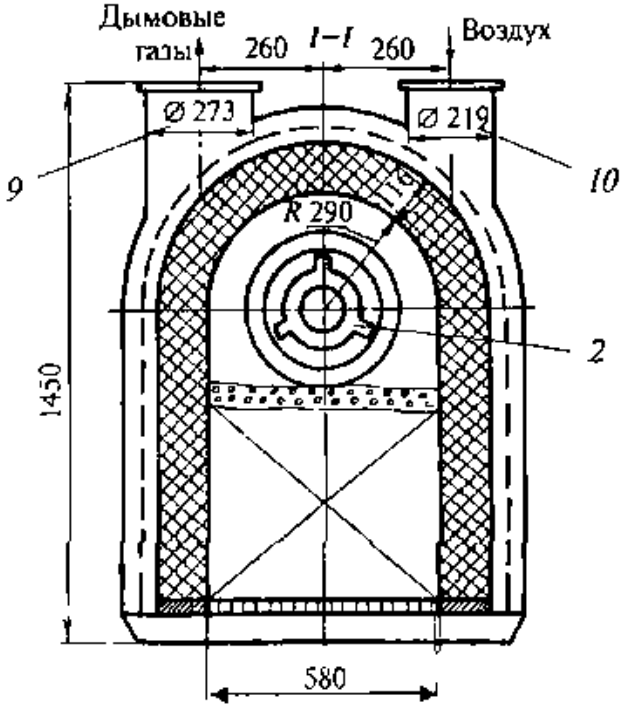


Рис. 5 61. Регенеративный горелочный блок ВНИИМТ: *1* – амбразура; *2* – форкамера; *3* – кожух; *4* – перфорированная перегородка, *5* – защитный камень; *6* – газовая фурма; *7* – запально-дежурная горелка; *8* – регенератор; *9* – дымовой патрубок; *10* – воздушный патрубок



Каждый из блоков содержит металлический корпус с перфорированной промежуточной перегородкой, футерованной огнеупорным материалом. Внутри амбразуры установлена форкамера, выполненная из специального огнеупора, которая позволяет организовать двухступенчатое сжигание природного газа. Газовая фурма защищена снаружи специальным огнеупорным камнем.

Газовая фурма выполнена кольцевой с отверстиями на торце – 8 отв. Ø 5,5 мм. Наружная труба имеет размер Ø 76×3,5 мм, а внутренняя труба Ø 57×3,5 мм. Внутри газовой фурмы установлена запально-дежурная горелка.

Для охлаждения газовой фурмы и проверки работы горелки с подачей холодного воздуха предусмотрен подвод вторичного воздуха в зазор между фурмой и защитным камнем.

Регенератор объемом 0,116 м^3 с насыпной насадкой из корундовых шаров имеет три слоя:

первый – высотой – 100 мм из шаров Ø 20–25 мм;

второй – высотой 300 мм из шаров Ø 10 мм;

третий – верхний высотой 200 мм из шаров Ø 20–25 мм.

Компоновка газовой фурмы и регенератора обеспечивает минимальную высоту последнего.

В схеме предусмотрена спаренная перекидка воздушного и дымового клапанов с помощью пневмоцилиндров, управление которыми включено в систему автоматики.

В системе сжигания регенеративные горелки работают периодически: одна из горелок работает в режиме сжигания газа, другая — в режиме нагрева насадки. При этом происходит реверс факела в топочном объеме.

В горелке, которая работает в режиме сжигания газа, воздух подводится через входной патрубок, проходит через перфорированную перегородку, поворачивает в нижнем коробе и далее проходит вверх через компактную насыпную насадку в форкамеру и вторую ступень смешения. Подогретый воздух интенсивно перемешивается с газом и образующийся факел через отверстие амбразуры вытекает в топочный объем. Во втором блоке, работающем в это время на отвод продуктов сгорания, дымовые газы проходят сверху вниз через насадку, поворачивают из нижнего короба вверх (минуя перфорированную перегородку) и проходят в дымовой патрубок. Далее продукты сгорания через дымовой коллектор отводятся в боров с помощью эжектора.

Технические характеристики регенеративной горелки ВНИИМТ (рис. 5.61):

тепловая мощность (max), МВт 1,0
топливо-природный газ:
$Q_{н}^{р}$, МДж/м^3 35,4
$Q_{н}^{р}$, ккал/м^3 8500
давление газа $P_г$, кгс/см^2 0,4
расход топлива $V_т$, нм^3/ч 98,3
давление вентиляторного воздуха $P_в$, кгс/см^2 0,5
расход вентиляторного воздуха $V_в$, м^3/ч 1580
давление компрессорного воздуха (на эжектор) $P_{кв}$, кгс/см^2 6,0
расход компрессорного воздуха $V_{кв}$, м^3/ч 300
температура рабочего пространства печи факела, °С 1100
температура дымовых газов на входе в регенератор, °С 900
температура дымовых газов на выходе из регенератора, °С 70
температура воздуха на входе в горелку, °С 20
температура подогретого воздуха, °С 700

5.27. РЕКУПЕРАТИВНАЯ ГОРЕЛКА

Рекуперативная многосопловая струйно-факельная горелка разработана институтом ВНИИМТ совместно с УПИ и Первоуральским новотрубным заводом. Горелка предназначена для сжигания природного газа в секционных печах для скоростного нагрева заготовок.

Общий вид горелки при ее установке на секции печи показан на рис. 5.62, *а*, а устройство трубного рекуперативного элемента – на рис. 5.62, *б*.

Горелка имеет дымоотводящий корпус, выполненный в виде футерованного канала, газовые и воздушные коллекторы и 15 рекуперативных трубных элементов. Каждый элемент содержит газовую трубку с многосопловым насадком, воздушный корпус и защитный экран.

При работе горелки газ и подогретый в щелевых каналах воздух частично перемешиваются в многосопловых насадках и формируют систему факелов длиной около 300 мм. Продукты горения из рабочего объема печи отводятся через дымоотводящий корпус, отдавая тепло воздуху, нагнетаемому в трубчатые элементы.

Рекуперативные трубы изготавливаются из стали 10Х23Н18.

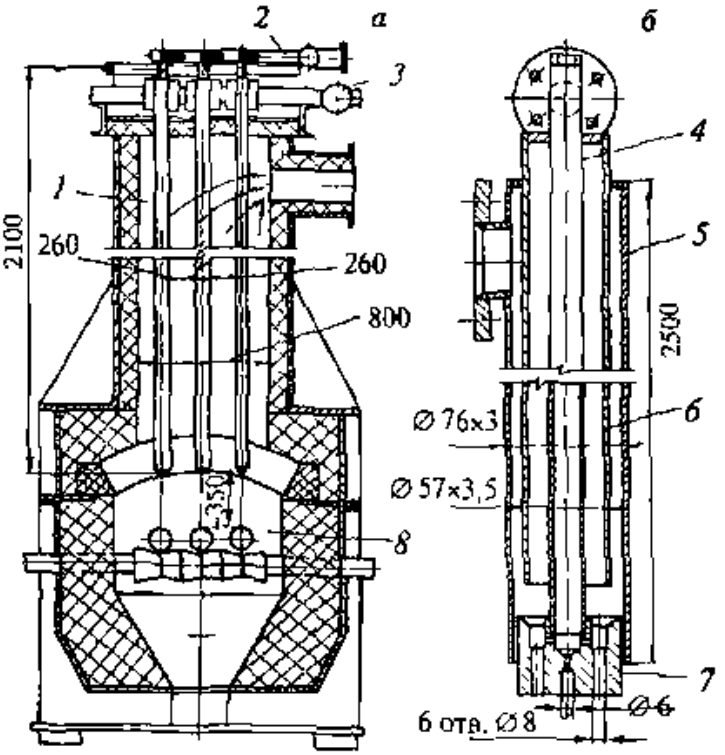


Рис 5 62. Рекуперативная горелка:
а – *общий вид горелки с установкой на печи*; *б* – трубчатый элемент,
1 – дымоотводящий корпус; *2* – газовый коллектор; *3* –воздушный коллектор; *4* – газовая труба, *5* – воздушная труба; *6* – защитная труба; *7* – насадок; *8* – рабочий объем секции печи

Техническая характеристика горелки:

номинальная тепловая мощность, МВт 1,48
расход природного газа, м^3/ч 150
номинальное давление газа, кПа 7,0
номинальное давление воздуха, кПа 10,0
коэффициент рабочего регулирования 4
максимальная тепловая мощность, МВт 1,6
коэффициент предельного регулирования 5,3
температура подогрева воздуха, °С 600–800
масса горелки, кг 800

Глава 6. ГОРЕЛКИ С РЕГУЛИРУЕМЫМ СМЕШЕНИЕМ

6.1. ГОРЕЛКИ ВНИИМТ-Р С РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИНОЙ И ФОРМОЙ ФАКЕЛА

Горелки ВНИИМТ-Р предназначены для сжигания природного газа в факеле с регулируемой интенсивностью смешения за счет изменения степени закручивания воздушного потока. В серию горелок ВНИИМТ-Р входит 10 горелок тепловой мощностью от 1,0 до 22,8 МВт. Горелки разработаны в сварном исполнении. Общий вид горелок показан на рис. 6.1, а их конструктивные размеры — в табл. 6.1.

Горелки ВНИИМТ-Р состоят из корпуса в виде тройника с подводом в него воздуха сбоку, а газа — с торца по оси, центральной подводящей трубы, газового сопла со сменным наконечником, поворотных лопаток, установленных в воздушном кольцевом проходе между центральной трубой и корпусом, и привода лопаток, состоящего из серии рычагов, тяг и поворотного кольца с рукоятками. Газовое сопло горелки в ее выходном сечении центруется при помощи осей поворотных лопаток, опирающихся на кольцевую втулку.

Сопротивление горелки по газовому тракту мало. Расчетный расход газа обеспечивается при давлении газа перед горелкой около 30 мм вод. ст. Для удобства регулирования расхода газа по его давлению перед горелкой предусмотрена возможность повышения последнего с помощью калиброванной диафрагмы, установленной между газовым соплом и наконечником.

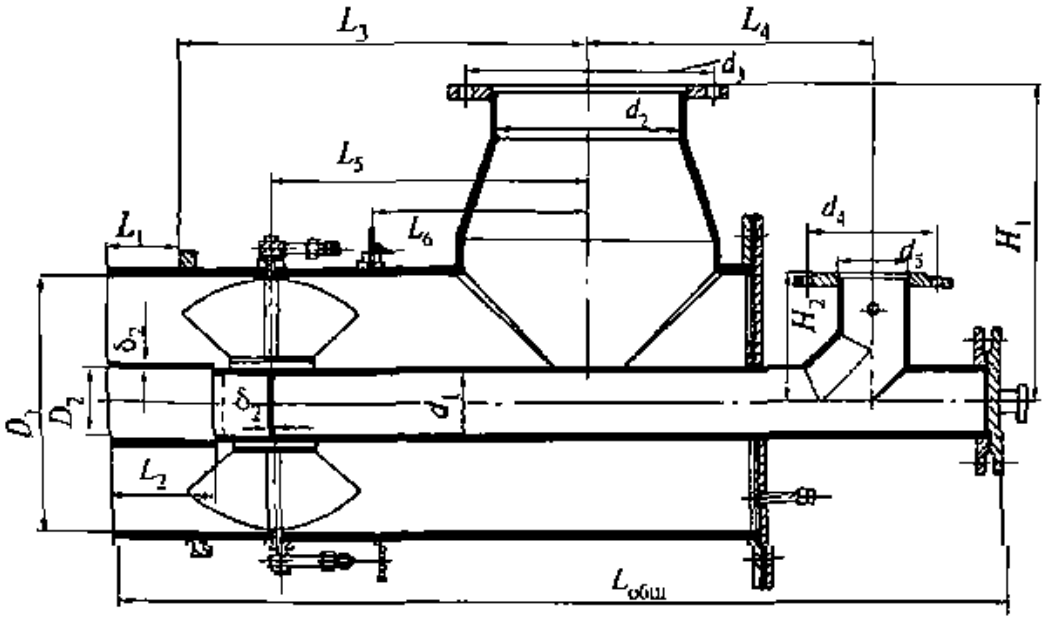


Рис. 6.1. Горелка ВНИИМТ-Р с регулируемой длиной и формой факела

Таблица 6.1

Основные размеры горелок ВНИИМТ-Р с регулируемой длиной и формой факела (рис. 6.1)

Обозначение параметра	Номер горелки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номинальная тепловая мощность, МВт	1,00	1,42	2,08	2,84	4,06	5,68	8.12	11,36	16,24	22,80
Размер, мм:										
L_1	70	80	95	115	135	135	135	135	135	135
L_2	90	120	140	175	210	220	235	240	240	240
L_3	380	460	540	670	780	820	1050	1250	1400	1400
L_4	290	325	370	450	345	640	650	830	900	1030
L_5	310	375	440	545	635	655	860	1050	1200	1200
L_6	200	247	296	366	425	415	594	694	845	843
$L_{общ}$	840	1010	1140	1375	1540	1750	2020	2430	2660	2830
D_1	232	283	335	408	482	542	612	800	996	1096
D_2	69	81	94	113	137	158	207	283	275	310
d_1	53	68	68	81	100	125	150	184	207	260
d_2	183	207	260	309	359	408	512	612	700	802
d_3	255	280	335	395	445	495	600	705	810	920
d_4	—	145	145	160	180	210	240	270	295	350
d_5	60	76	76	89	108	133	159	194	219	273
δ_1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
δ_2	3,5	4	4	4	4,5	5	6	6	7	7,5
H_1	250	350	400	450	500	550	600	800	1000	1100
H_2	175	140	140	160	200	230	250	290	320	380
Количество лопаток, шт.	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16
Масса горелки, кг	68	99	136	200	290	353	486	800	1280	1880

Сопротивление горелки по воздушному тракту зависит от угла поворота лопаток завихрителя φ, который отсчитывается от положения, когда плоскости лопаток совпадают с осью горелки. С увеличением угла поворота лопаток сопротивление горелки повышается. При максимальном угле поворота $\varphi = 60°$ расчетная производительность обеспечивается при давлении воздуха перед горелкой 100 мм вод. ст. Подробные данные о работе горелок и их характеристики изложены в [1]

Характеристики факела горелок ВНИИМТ-Р значительно изменяются при изменении интенсивности закручивания воздуха (угла поворота φ), а также зависят от угла раскрытия амбразуры $2\alpha_A$. При работе без закручивания ($\varphi = 0°$) все характеристики горелок ВНИИМТ-Р такие же, как у горелок ВНИИМТ-Д при работе без стабилизатора, и угол раскрытия амбразуры оказывает на них малое влияние.

Угол раскрытия незакрученной струи ($\varphi = 0°$) при выходе из цилиндрической амбразуры (с малой конусностью — 6°) $2\alpha = 32°$, а при конической амбразуре (90°) он составляет $2\alpha = 39°$ При этом выходящий из горелки поток «простреливает» коническую амбразуру.

При угле закручивания воздуха $\varphi = 60^\circ$ в камерах с конической амбразурой $2\alpha = 90^\circ$ факел имеет начальный угол раскрытия около 120°. При этом внешняя зона циркуляции уменьшается, а размеры внутренней зоны увеличиваются. Диаметр этой зоны составляет более 0,6 диаметра камеры горения, а длина ее соизмерима с диаметром камеры

Начальный угол раскрытия факела и длина наружной зоны циркуляции не зависят от изменения нагрузки горелки, температуры подогрева воздуха и коэффициента его расхода.

В камерах с коническими амбразурами ($2\alpha = 90^\circ$) при уменьшении угла поворота лопаток φ от 60 до 30° начальный угол раскрытия струи практически остается неизменным, тогда как размеры внутренней зоны циркуляции сокращаются (рис. 6.2, *а*).

В цилиндрических амбразурах начальный угол раскрытия факела горелок ВНИИМТ-Р значительно меньше, чем в конических. При максимальном закручивании ($\varphi = 60^\circ$) он равен приблизительно $2\alpha = 60^\circ$.

Размеры внутренней зоны циркуляции в цилиндрических амбразурах меньше, чем в конических, и начало этой зоны несколько отодвигается от горелки.

В цилиндрических амбразурах при изменении φ от 60 до 30° уменьшается как начальный угол раскрытия, так и размеры внутренней зоны циркуляции, которая в случае $\varphi = 30^\circ$ практически исчезает (рис. 6.2, *в*).

Заметной разницы в начальном угле раскрытия факелов горелок разного размера (в подобных камерах) с коническими амбразурами не обнаруживается. В камерах с цилиндрическими амбразурами он у больших горелок меньше (рис. 6.2, *г*).

Характер изменения динамического напора по оси факела, отнесенного к динамическому напору, подсчитанному по средней расходной скорости продуктов сгорания в выходном сечении амбразуры, показан на рис. 6.3.

Динамический напор в центральной зоне циркуляции при максимальной интенсификации закручивания воздушного потока ($\varphi = 60^\circ$) $h_ц = 2\bar{h}_{вс}$ и количество газов, циркулирующих во внутренней зоне, $G_ц \approx 0{,}5G_{вс}$



Рис. 6.2. Начальный угол раскрытия и границы внутренней зоны циркуляции факела горелок ВНИИМТ-Р:
а — в камерах с конической амбразурой при различных φ; *б* — в камерах с цилиндрической амбразурой при различных α; *в* — то же, при различных φ; *г* — при различных размерах камер и горелок

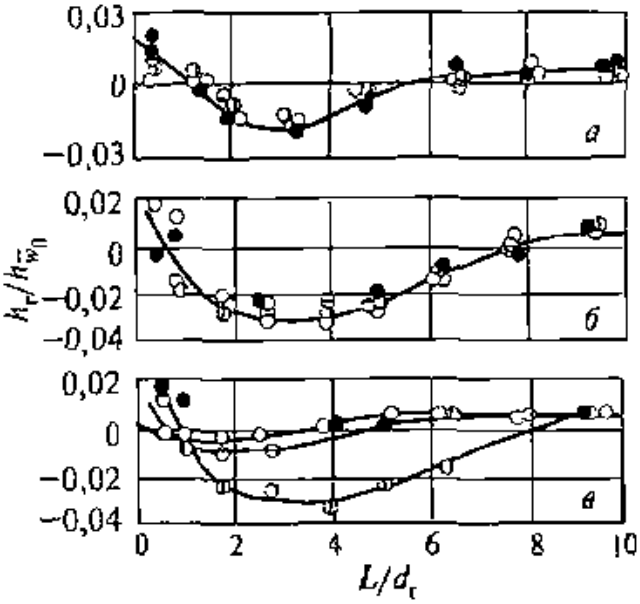


Рис. 6.3 Динамический напор по оси факела горелок ВНИИМТ-Р:
а – горелка Р-1 с $\varphi = 60°$ в футерованной камере диаметром 1060 мм с конической амбразурой; *б* – то же, в охлаждаемой камере диаметром 1590 мм с горелкой Р3, *в* – горелка Р-1 при различных значениях φ в футерованной камере диаметром 1060 мм с конической амбразурой

Центральная зона циркуляции на оси факела начинается приблизительно на расстоянии 0,6–1,2 калибров горелки от передней стенки и заканчивается приблизительно на расстоянии 5–8 калибров камеры в зависимости от степени охлаждения факела. С уменьшением значения φ динамический напор и длина самой зоны циркуляции уменьшаются

Следует отметить, что фронт зоны циркуляции в окрестностях оси факела проникает в горелочную амбразуру, особенно при ее конической форме, и на отдельных режимах горения достигает лопаточного завихрителя.

Интенсивность горения газа увеличивается при увеличении угла поворота лопаток завихрителя воздуха. Характер изменения концентраций газов в факеле при интенсивной закрутке потока воздуха показан на рис 6 4

На оси камер с конической амбразурой на длине $L \approx 3D$ от горелки происходит в основном разложение метана. В дальнейшем приблизительно на длине, равной одному калибру горелки, содержание горючих резко сни-

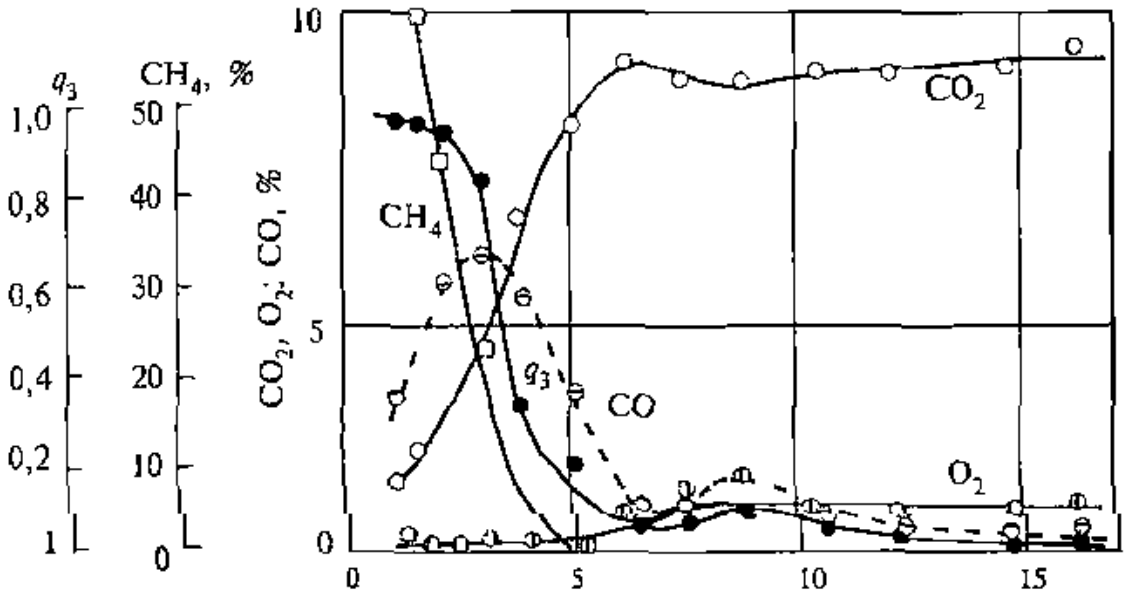


Рис 6.4 Концентрации газов и химический недожог по оси факела в охлаждаемой камере диаметром 1590 мм с горелкой Р-3 и конической амбразурой с $\varphi = 60°$

жается, в основном за счет метана, с быстрым ростом продуктов сгорания — углекислого газа.

Максимальные содержания оксида углерода и водорода наблюдаются на расстоянии приблизительно 3—4 калибров от горелки. Основная масса горючих сгорает на длине около 10 калибров горелки, а на последующих 5 калибрах догорают остатки горючих и выравнивается концентрация всех газов. Содержание углекислого газа и кислорода повышается до величин, соответствующих содержанию их при полном сгорании с данным коэффициентом расхода воздуха.

Аналогичная картина наблюдается на оси факела горелок в камерах с цилиндрическими амбразурами, при этом несколько сокращается участок с несгоревшим газом и придвигаются ближе к горелке участки с максимумом горючих вследствие укорочения внутренней зоны циркуляции.

При анализе работы вихревых горелок с переменным углом поворота аксиально установленных лопаток необходимо иметь в виду два обстоятельства.

Во-первых, химический недожог по оси факела не может быть использован для оценки среднего химического недожога из-за наличия внутренней зоны циркуляции.

Во-вторых, плавное изменение угла поворота лопаток от нуля до $\varphi = 60°$ не приводит к плавному изменению характеристик факела. При $\varphi = 0°$ факел имеет такие же характеристики, как и факел горелок ВНИИМТ-Д. В диапазоне изменения φ от нуля до ~20—25° наблюдается прямоструйное течение с видимой, но слабой закруткой потока, не приводящей к образованию внутренней зоны циркуляции. При повороте лопаток на угол 30—35° наблюдается скачкообразное изменение структуры потока от прямоструйного до вихревого с резким увеличением угла раскрытия и появлением зоны циркуляции в приосевой области.

Теплообменные характеристики факела горелок ВНИИМТ-Р существенно зависят от угла поворота лопаток завихрителя φ и от формы амбразуры. Характер изменения температуры продуктов сгорания по оси факела показан на рис. 6.5. Наиболее плавная зависимость изменения профиля температуры от φ наблюдается при цилиндрических амбразурах.

При конических амбразурах существенное изменение профиля температуры наблюдается при изменении угла поворота лопаток от нуля до $\varphi = 30°$. При $\varphi = 30°$ максимум температур располагается вблизи передней стенки камеры сгорания и дальнейшее увеличение φ не изменяет температурное поле.

Теплоотдача от факела, как и другие характеристики, зависит, и даже в большей мере, от устройства амбразуры. С увеличением раскрытия амбразуры факел раньше заполняет все сечения камеры, максимум теплоотдачи приближается к горелке и факел отдает свое тепло быстрее.

При снижении тепловой нагрузки во всех случаях локальная теплоотдача к стенкам снижается при сохранении положения ее максимума относительно передней стенки (рис. 6.6). Максимальная локальная теплоотдача к стенкам и максимальная относительная теплоотдача от факела наблюда-

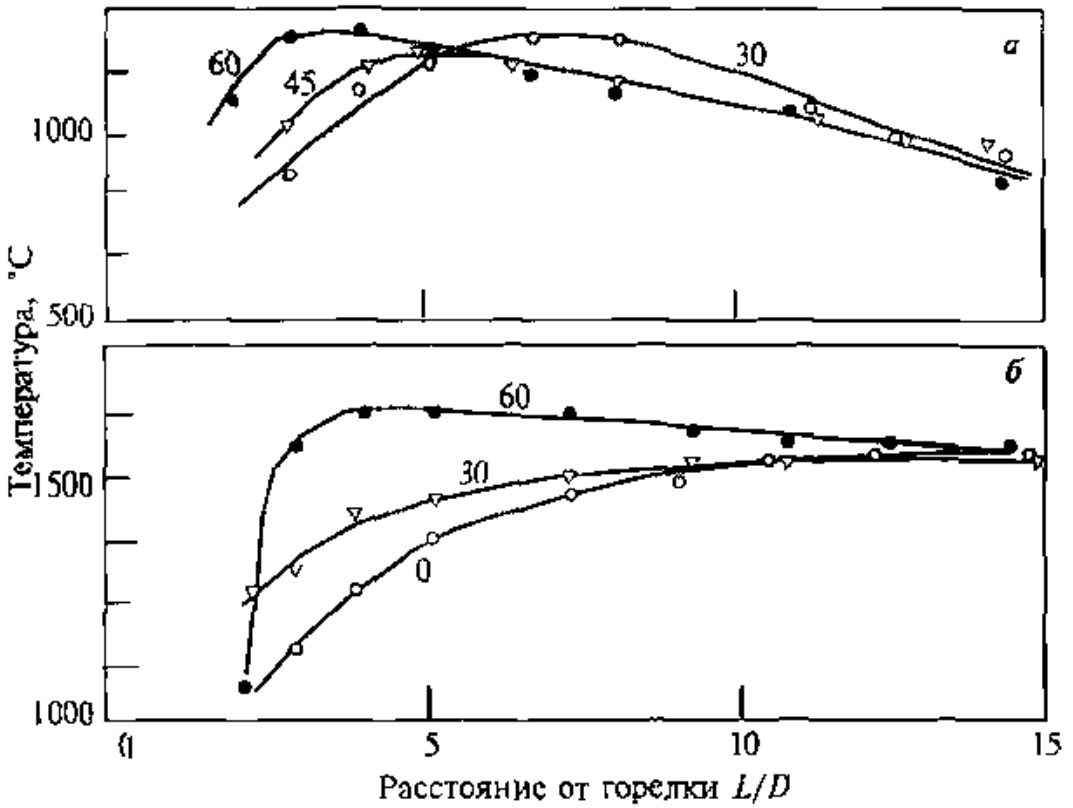


Рис 6.5. Температура факела при сжигании газа горелками ВНИИМТ-Р3 при различном угле поворота лопаток завихрителя воздуха φ (указано на кривой, градус): *а* — при цилиндрической амбразуре в водоохлаждаемой камере; *б* — при конической амбразуре в футерованной камере

ются при сжигании $\alpha \approx 1{,}10$, но положение максимума теплоотдачи не зависит от α. В конце камер при больших α теплоотдача выше

При подогреве воздуха во всех случаях существенно увеличивается как локальная теплоотдача к стенкам с сохранением положения максимума, так и относительная суммарная теплоотдача от факела

С ростом φ во всех случаях значительно увеличивается локальная теплоотдача к стенкам в начале камеры и отно-

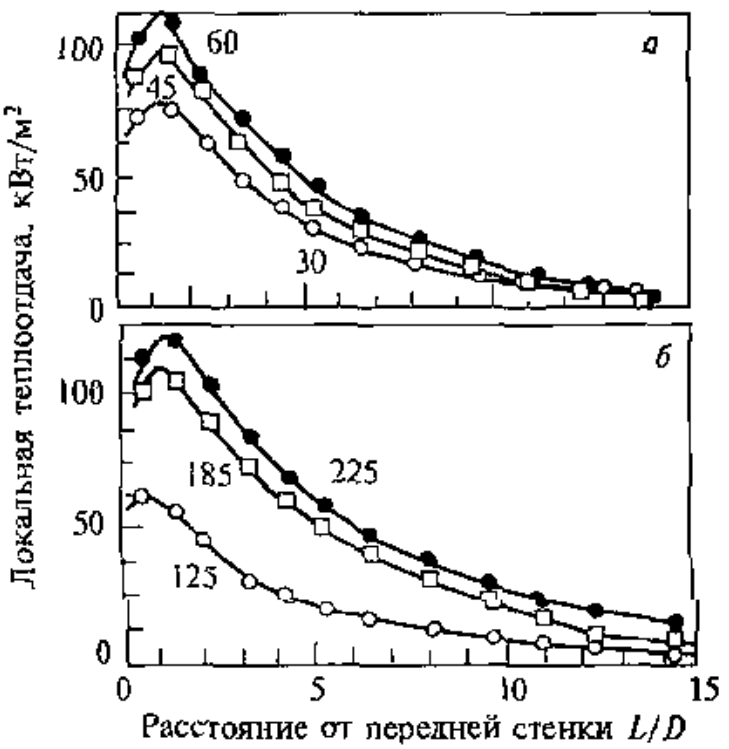


Рис. 6.6. Локальная теплоотдача от факела горелки ВНИИМТ-Р-3 к стенкам камеры сгорания с конической амбразурой:
а — при расходе газа 225 м³/ч и различных углах поворота лопаток φ (указан на кривых, градус); *б* — при φ = 60° и различном расходе газа (указан на кривой, м³/ч)

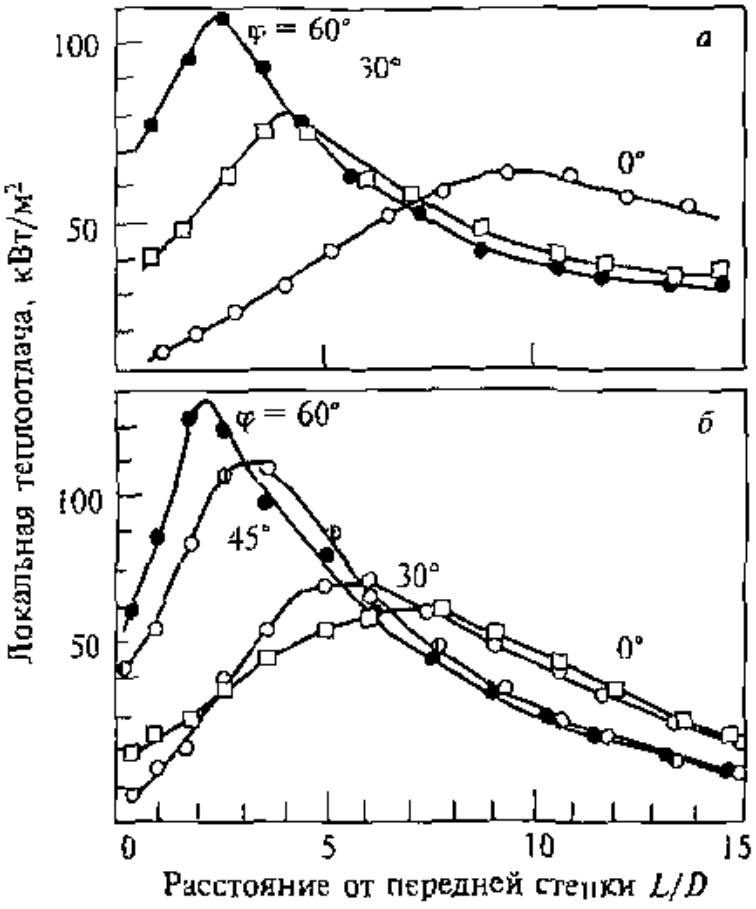


Рис 6 7. Изменение локальной теплоотдачи от факела к стенкам камеры сгорания с цилиндрической амбразурой и различном угле поворота лопаток φ и $\alpha = 1{,}05$.
а – горелка ВНИИМТ-Р-3. $V_г = 250$ м³/ч, *б* – горелка ВНИИМТ-Р-1, $V_г = 120$ м³/ч

сительная суммарная теплоотдача от факела по всей его длине, при этом одновременно максимум локальной теплоотдачи перемещается к передней стенке. Наибольший сдвиг при конических амбразурах происходит в области до $\varphi = 30°$; при цилиндрических амбразурах это влияние более равномерно во всем диапазоне закручивания до $\varphi = 60°$ (рис. 6.7).

6.2. ГОРЕЛКИ ВНИИМТ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИНОЙ ФАКЕЛА

Горелки с регулируемой длиной факела за счет изменения качества смешения газа и воздуха разработаны во ВНИИМТ на базе корпуса горелок типа ДВБ. Общий вид горелок показан на рис. 6.8, а технические характеристики в табл. 6.2.

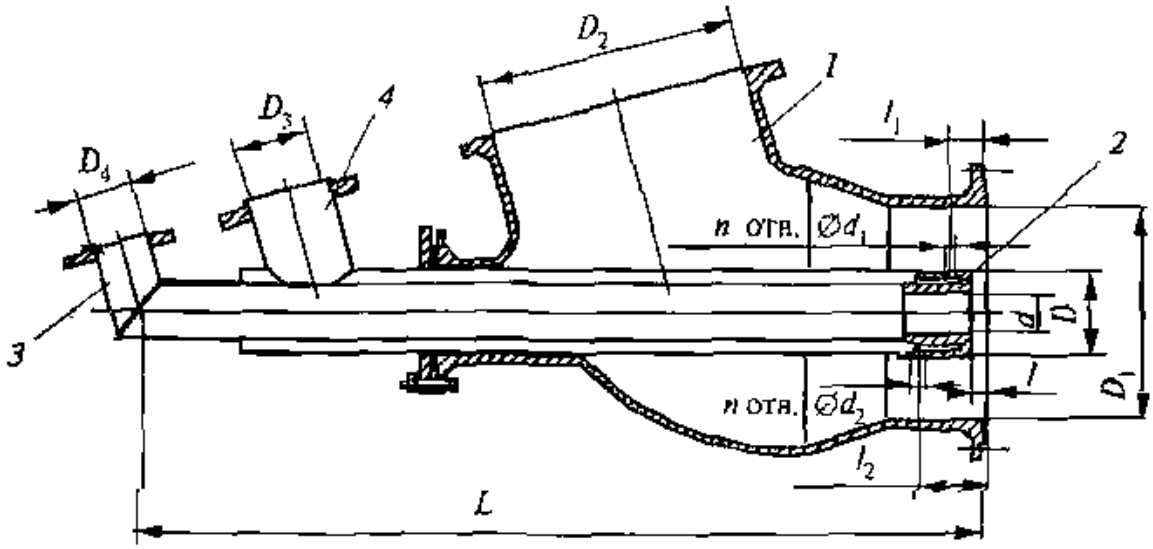


Рис. 6.8. Горелка ВНИИМТ с регулируемой длиной факела:
1 – воздушный корпус; *2* – газовое сопло, *3* – центральный ввод газа; *4* – то же, периферийный

Таблица 6.2

Конструктивные размеры и характеристики горелок ВНИИМТ с регулируемой длиной факела (рис. 6.8)

Обозначение параметра	Горелка 120	Горелка 325	Горелка 350	Горелка 400
Теплота сгорания газа $Q_н^p$, МДж/м^3	35,6	35.6	20,95	20,95
Расход газа, м^3/ч	116	330	960	1200
Давление газа, кПа				
периферия	29,5	34,0	3.5	3,5
центр	14,0	14,0	2,2	2,2
Давление воздуха, кПа:	1,6	3,2	1,5	1,5
Температура воздуха, °С	20	400	400	400
Размер, мм:				
D	40	125	159	159
D_1	120	325	350	400
D_2	190	450	500	500
D_3	60	67	150	150
D_4	60	67	100	100
L	820	1550	1640	1640
l	30	30	30	30
l_1	70	90	110	110
l_2	120	185	–	–
d	22	36	70	90
d_1	2,5	4,0	20	25
d_2	6,0	9,0	–	–
n_1	24	24	12	12
n_2	8	10	–	–

Газовый тракт горелки выполнен в виде двух коаксиальных каналов с самостоятельными подводами газа. Центральный канал имеет одно выходное отверстие для истечения газа в направлении истечения потока воздуха. Периферийный канал имеет несколько отверстий, из которых струи газа истекают под углом 90° к направлению потока воздуха.

Регулирование длины факела достигается путем перераспределения расходов газа, подаваемого в каждый канал. При подаче газа только по центральному каналу горение происходит в длинном факеле, при подаче газа в периферийный канал — в наиболее коротком факеле. При одновременной подаче газа в оба канала горелки можно получить факел с различной промежуточной длиной.

Горелки 350 и 400 рассчитаны на работу в короткофакельном или только в длиннофакельном режиме при тепловой нагрузке горелки, равной половине от максимально возможной

Изменение теплотехнических характеристик факелов при регулировании их длины для разных горелок показано на рис. 6.9 и 6 10

При сжигании природного газа в факеле горелки 120 максимум подающих тепловых потоков $Q_{под}$ может изменять свое положение относительно

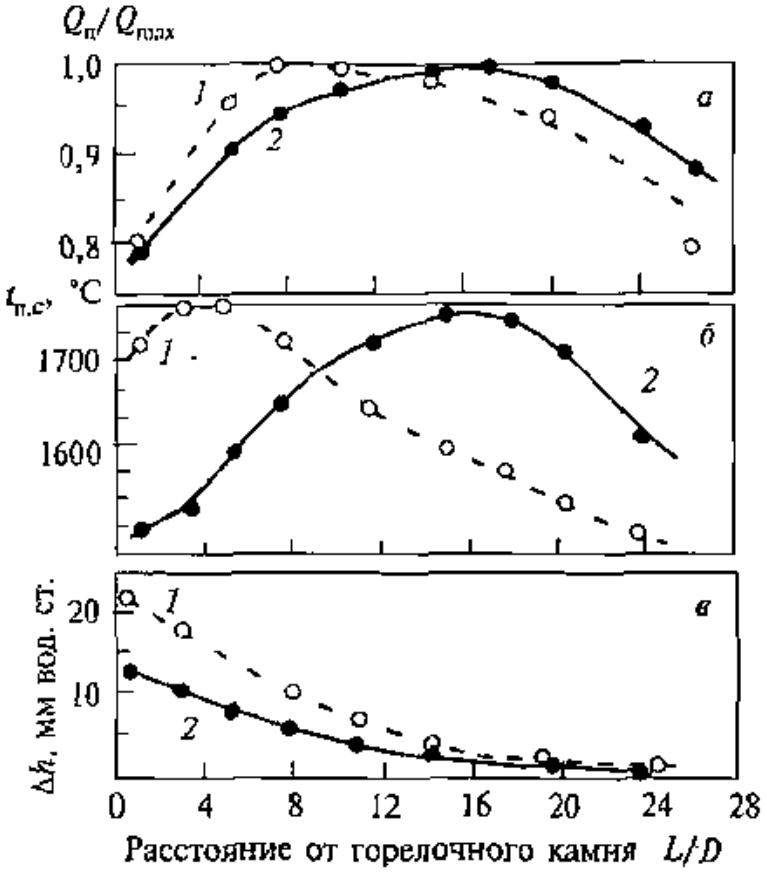


Рис. 6.9. Характеристики факела горелки 120 при короткопламенном (*1*) и при длиннопламенном (*2*) сжигании природного газа:
а — распределение падающих тепловых потоков по длине факела; *б* —изменение температуры продуктов сгорания по длине факела; *в* — изменение динамических напоров по длине факела

горелки более чем в два раза (рис. 6.9, *а*). Соответствующим образом изменяется и положение максимума температуры $t_{п.с}$ °С на оси факела (рис. 6.9, *б*).

При короткофакельном режиме сжигания газа за счет более раннего и полного перемешивания происходит значительное увеличение объема газов в горелочном туннеле. Поэтому динамический напор на выходе из туннеля на этом режиме примерно в два раза выше, чем при длиннофакельном (рис. 6.9, *в*).

Аналогичные изменения характеристик факела наблюдаются и при сжигании смеси природного и доменного газа горелкой 350 (рис. 6.10). Измерения выполнены при работе горелки в нижней камере окалиносборника томильной зоны методической печи толкательного типа.



Рис. 6.10. Распределение падающих тепловых потоков по ширине печи с горелкой 350:
1 — тепловая нагрузка 100 %, расход газа через оба тракта; *2* — тепловая нагрузка 50 %, короткий факел; *3* — тепловая нагрузка 50 %, длинный факел

6.3. ГОРЕЛКА ГТТ ВОСТИО С РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИНОЙ ФАКЕЛА

Горелка разработана Восточным институтом огнеупоров для сжигания природного газа в крупногабаритных туннельных печах обжига динасовых и шамотных изделий. Общий вид горелки показан на рис. 6.11, а техническая характеристика приведена в табл. 6.3. Горелка состоит из трех коак-

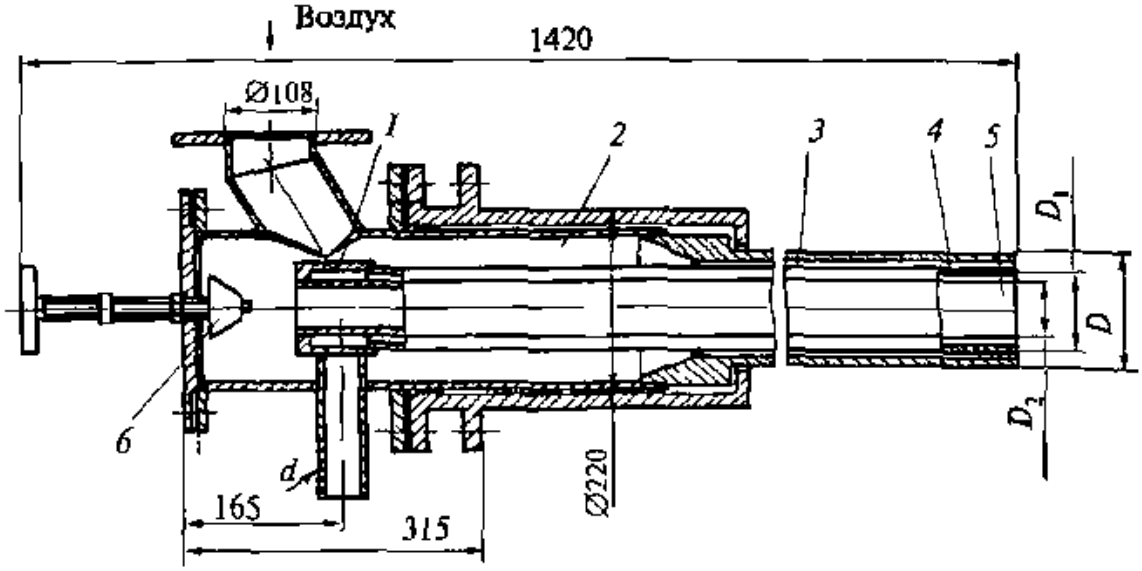


Рис. 6.11. Горелка ВостИО с регулируемой длиной и формой факела:
1 — газовая камера, *2* — воздушная камера; *3* — периферийный канал; *4* — средний канал; *5* — центральный канал; *6* — дроссель

Таблица 6.3

Техническая характеристика горелок ГТ ВостИО (рис. 6.11)

Наименование показателей, размерность	Типоразмеры	
	ГТТ-1	ГТТ-2
Номинальная тепловая мощность, кВт (Мкал/ч)	372,2 (320)	1023 (880)
Номинальное давление, кПа (мм вод. ст.)		
газа	5 (500)	4,6 (460)
воздуха	5 (500)	4,7 (470)
Коэффициент расхода воздуха при номинальном режиме	1,03	1,04
Коэффициент рабочего регулирования	4	4 4
Номинальная длина факела, мм	1200	1600
Диапазон изменения длины факела в диапазоне рабочего регулирования	950—1200	1000—1600
Характерный размер		
D, мм	89	127
D_1, мм	64	89
D_2, мм	45	70
d	Труб 1"	Труб $1^1/_2$"
Масса, кг	26,8	28,5

сиальных труб. Среднее кольцевое сопло предназначено для истечения газа, периферийное кольцевое сопло и центральный канал — для истечения воздуха. Регулирование длины факела осуществляется за счет перераспределения воздушных потоков между центральным и периферийным каналами. Перераспределение потоков воздуха осуществляется за счет перемещения дросселя, имеющего привод.

6.4. ГОРЕЛКА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИНОЙ ФАКЕЛА КПТИ И ВНИИПРОМГАЗА

Горелка представляет собой двухпроводное устройство, имеющее подвижный газораспределительный дроссельный клапан, обеспечивающий постоянство расхода и давления газа при изменении режима горения.

Разработана серия горелок, состоящая из четырех типоразмеров, тепловой мощностью от 3,5 до 14,5 МВт. Общий вид горелки показан на рис. 6.12, а технические и конструктивные характеристики приведены в табл. 6 4.

Горелка состоит из корпуса для подвода воздуха, газовой трубы, газораспределительного клапана, дроссельной шайбы и приводного механизма. Подробно особенности работы горелки изложены в [2].

Регулирование характеристик факела осуществляется путем перемещения газораспределительного клапана. При крайне правом положении клапана весь газ заходит в его внутреннюю полость и из этой полости через отверстия малого диаметра истекает под большим углом к потоку воздуха. В этом случае получается наиболее короткий факел с большим углом раскрытия.

При крайне левом положении клапана основной поток газа вытекает через кольцевое сечение между клапаном и корпусом газовой трубы. В этом

Таблица 6.4

Технические и конструктивные характеристики горелок КПТИ ВНИИпромгаза (рис. 6.12)

Параметр	Размерность	Тепловая мощность, МВт			
		3,5	8,7	11,0	14,5
Номинальное давление газа	кПа	30	30	30	30
Номинальное давление воздуха	кПа	1,8	1,8	1,8	1,8
Коэффициент расхода воздуха		1,1	1,1	1,1	1,1
Коэффициент рабочего регулирования		3,0	3,0	3,0	3,0
Длина факела:					
короткофакельный режим	м	1,08	1.7	1,9	2,2
длиннофакельный режим	м	5,4	8,4	9,5	10,8
Характерный размер:					
D	мм	55	90	100	120
D_1	То же	180	282	318	360
D_2	"–"	127	180	230	245
D_3	"–"	245	377	426	480
D_4	"–"	100	149	170	219
D_5	"–"	219	325	377	426
D_6	"–"	170	225	255	260
D_7	"–"	280	395	445	495
d_1	"–"	18	23	23	23
H	"–"	536	679	715	850
L	м	2,0	2,5	3,0	3,5
n	шт.	4	8	8	8
n_1	То же	8	12	12	16
Масса горелки	кг	135	300	382	496

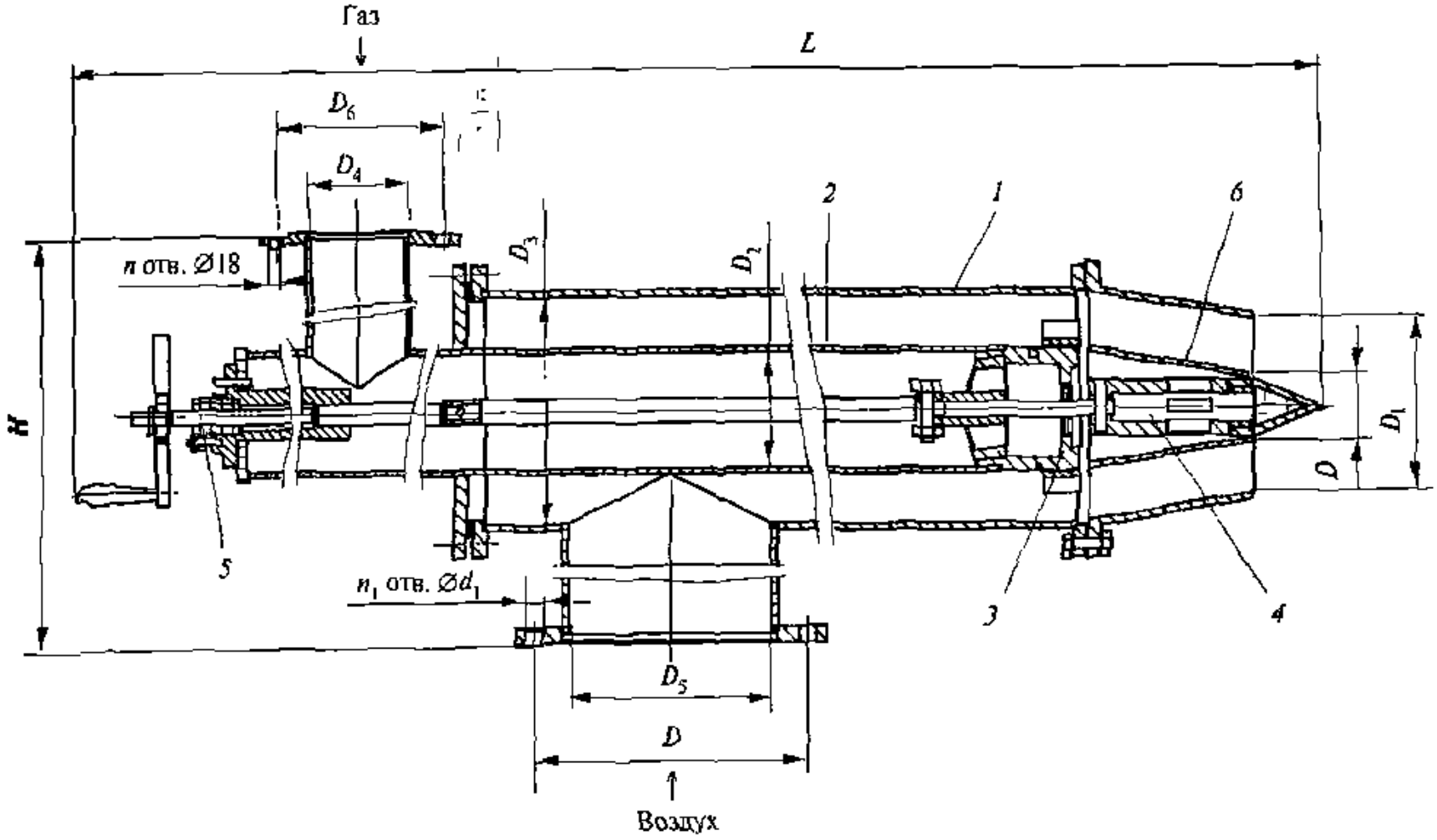


Рис. 6.12. Горелка КПТИ и ВНИИпромтаза с регулируемой длиной факела:
1 – корпус для подвода воздуха; *2* – газовый канал; *3* – дроссельная шайба; *4* – газораспределительный клапан; *5* – приводной механизм, *6* – газовое сопло

случае образуется длинный светящийся факел. При промежуточных положениях клапана образуется факел, работающий в переходной области.

6.5. ГОРЕЛКА ТИПА ГРФ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИНОЙ ФАКЕЛА

Горелки разработаны АО ВНИПИтеплопроект для отопления природным газом нагревательных печей для крупных слитков. Общий вид горелки показан на рис. 6.13, а технические характеристики разработанной серии представлены в табл. 6.5.

Горелка состоит из воздушного корпуса, оканчивающегося выходным насадком, двух параллельно расположенных труб, образующих каналы для

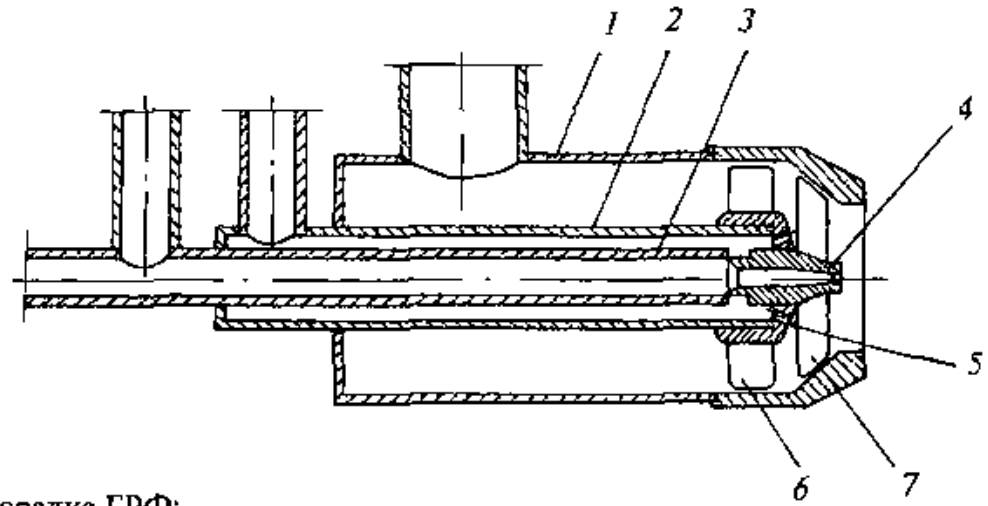


Рис. 6.13. Горелка ГРФ·

1 — воздухоподводящий корпус; *2* — периферийный газовый канал; *3* — то же, центральный; *4* — односопловый наконечник; *5* — многосопловый наконечник; *6* — завихритель воздуха; *7* — завихритель смеси

Таблица 6.5

Технические характеристики горелок ГРФ (рис. 6.13)

Параметры	Размерность	ГРФ-50		ГРФ-75	
		короткий факел	длинный факел	короткий факел	длинный факел
Номинальная тепловая мощность	МВт	0,503	0,508	0,763	0,763
Номинальный расход газа	$м^3/ч$	50	50	75	75
Номинальное давление газа	кПа	3,922	2,352	4,508	3,675
Температура газа перед горелкой	К	285	282	286	286
Номинальный расход воздуха	$м^3/ч$	505	514	766	766
Номинальное давление воздуха	кПа	0,980	0,784	1,176	1,078
Температура воздуха перед горелкой	К	287	283	283	283
Минимально необходимый коэффициент расхода воздуха		1.05	1,08	1.06	1,05
Минимальная тепловая мощность	МВт	0,124	0,123	0,187	0,154
Коэффициент рабочего регулирования по тепловой мощности		4,1	4,1	4,1	5,0
Длина факела	мм	160	640	480	1280
Отношение длин длинного и короткого факелов $l_{ф.дл}$, $l_{ф.кор}$		4,0		2,7	

подвода газа, и завихрителей. Центральный газовый канал оканчивается односопловым наконечником, периферийный — многосопловым.

При истечении газа по центральному каналу горелки одиночная газовая струя смешивается с закрученным потоком воздуха и сгорает в относительно длинном факеле. При истечении газа через систему расходящихся отверстий многосоплового наконечника струи газа вначале смешиваются с закрученным потоком воздуха, а затем образовавшаяся смесь дополнительно закручивается лопатками, установленными на газовом сопле. При этом образуется наиболее короткий факел

6.6. ГОРЕЛКА ГРДФ-8 ВНИИМТ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИНОЙ ФАКЕЛА

Горелка ГРДФ-8 ВНИИМТ предназначена для сжигания природного газа во вращающихся трубчатых печах при обжиге керамзита. Тепловая мощность горелки 8 МВт Общий вид горелки показан на рис. 6.14. В основу конструкции горелки положен принцип диффузионного сжигания газа в потоке воздуха. Воздух подводится в горелку по одному каналу, газ — по двум. На выходе из горелки воздух разделяется на семь каналов: один центральный и шесть периферийных. В центральный канал подается 50 % от общего расхода воздуха.

Воздушный корпус горелки состоит из воздухоподводящего патрубка и обечайки диаметром 606 мм, выполненной из жаростойкой стали. На входной стороне обечайка имеет фланец для присоединения газовой части. На выходной стороне имеется вставка для крепления выходных патрубков. Вставка представляет собой кольцо-диафрагму, закрепленную у выходного торца обечайки, шесть периферийных патрубков диаметром 125 мм и центральный патрубок диаметром 237 мм. Пространство между выходными участками патрубков заполнено огнеупорным материалом. Предусмотрены два варианта выполнения огнеупорной защиты: огнеупорный бетон или муллитокремнеземистая плита МКРП×450.

Газовая часть горелки состоит из газового коллектора, центрального газового канала, периферийных газовых труб и центрирующей вставки.

Газовый коллектор выполнен в виде обечайки длиной 240 мм и диаметром 630 мм, одна сторона которой закрыта днищем, а другая трубной доской, которая является одновременно фланцем для присоединения к воздушному корпусу В трубной доске выполнено шесть отверстий для приварки периферийных газовых труб. Кроме того, по оси коллектора выполнены отверстия, в которых размещена центральная газовая труба. В нижней части коллектора врезан патрубок со смотровым отверстием, через которое можно осматривать внутреннюю полость горелки. На боковой стенке коллектора врезан патрубок для подвода газа в периферийные трубы.

На входной стороне центральная труба оканчивается фланцем, к которому присоединен один из подводов газа. На выходной стороне эта труба оканчивается втулкой, в которую либо ввернуто сменное сопло, либо, как показано на рисунке, установлен пластинчатый стабилизатор. На оси газового сопла в направляющей трубе устанавливается либо запальное устрой-

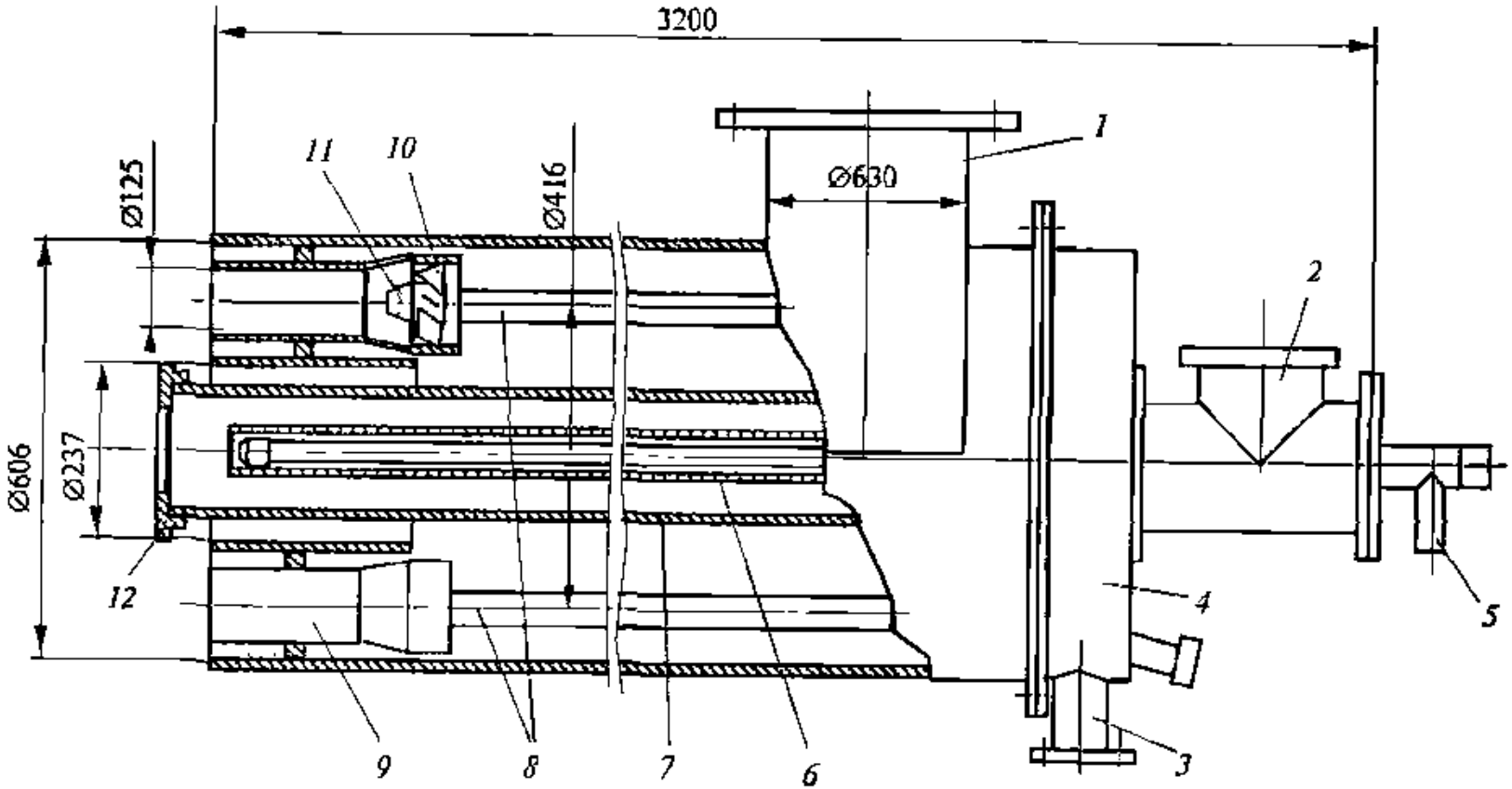


Рис 6.14. Горелка ГРДФ-8 ВНИИМТ: с регулируемой длиной факела
1 – подвод воздуха; *2, 3* – подвод газа; *4* – газовый коллектор, *5* – форсунка; *6* – направляющая труба; *7* – центральная газовая труба; *8* – периферийная газовая труба; *9* – смеситель; *10* – завихритель воздуха; *11* – газовое сопло, *12* – стабилизатор

ство, либо форсунка для сжигания резервного жидкого топлива.

Каждая из периферийных газовых труб оканчивается втулкой, на которой приварены восемь лопаток под углом 30° к продольной оси. Втулка с лопатками представляет собой завихритель воздуха.

На выходном торце втулок установлены газовые наконечники,имеющие по шесть отверстий диаметром 5 мм, выполненных под углом 30° к продольной оси периферийного канала.

Во внутренней полости горелки установлена центрирующая вставка-опора Вставка используется при изготовлении и сборке горелки для обеспечения строгой параллельности газовых периферийных труб и размещения осей их выходных элементов (наконечников и завихрителей) на окружности диаметром 416 мм.

Регулирование длины факела осуществляется за счет перераспределения расхода газа между каналами горелки и за счет изменения соотношения расходов газа и воздуха.

Давление воздуха перед горелкой 1 кПа. Давление газа перед горелкой зависит от размеров выходных отверстий в газовых наконечниках и может составлять от 3 до 30 кПа.

Диапазон регулирования длины факела 6—10 м.

Для получения короткого факела весь газ подают в шесть периферийных каналов. При истечении газа через отверстия в многоструйных наконечниках в вихревые воздушные потоки образуются шесть коротких факелов. Эти факелы объединяются в общий поток. который разбавляется струей воздуха, вытекающего из центрального канала.

Для получения длинного факела весь газ подается в центральный канал горелки и вытекает вдоль ее оси. При этом образуется длинный факел, выгорание в котором происходит медленно при подмешивании воздуха сначала из спутного центрального потока, а затем из вихревого периферийного.

Следует отметить, что при истечении газа из сопел всегда воспламенение топлива происходит на некотором расстоянии от выходного отверстия. На начальном негорящем участке происходит подсос воздуха в струю и при воспламенении газа частично подготоавленная смесь сгорает в более коротком факеле, чем в факеле, который начинается непосредственно в месте истечения газа. Для использования такой возможности удлинения факела и для повышения належности воспламенения и предусмотрен вариант горелки с пластинчатым стабилизатором на торце газового сопла, как у горелок ВНИИМТ-Д

Разработана также модификация горелки с двумя раздельными подводами воздуха в центральный и периферийный каналы.

6.7. ГОРЕЛКИ ТИПА ГРБ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ЗАБАЛЛАСТИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ

Горелки этого типа разработаны ВНИИМТ для сжигания природного газа в тех случаях, когда в качестве окислителя топлива используют смесь

атмосферного воздуха и отработанных продуктов сгорания (уходящих газов). Окислитель подается в горелку подогретым до 200—350 °С

Сжигание газа с забалластированным воздухом предусматривают в следующих случаях:

· необходимость утилизации тепла уходящих газов;

· снижение концентрации оксидов азота в пламени за счет исключения резких перепадов температур в зоне горения;

· регулирование температуры и состава теплоносителя, используемого в качестве контролируемых атмосфер при термической обработке рудного сырья.

Следует отметить, что простое балластирование воздуха отработанными продуктами сгорания приводит к существенным изменениям характеристик факела: снижению интенсивности горения, уменьшению концентрации CO и H_2 в зоне горения, снижению уровня температур и излучения.

Таким образом, предварительное смешение воздуха с охлажденными продуктами сгорания и соответствующее снижение концентрации кислорода в смеси является одним из способов регулирования характеристик факела. Подробно особенности сжигании газа в этих условиях описаны в [3]

Наиболее существенное влияние балластирование воздуха оказывает на концентрационные пределы распространения пламени и, соответственно, на устойчивое воспламенение газовоздушной смеси и стабилизацию фронта воспламенения вблизи горелочного устройства. Последнее обстоятельство особенно важно для обеспечения контролируемых атмосфер при слабоокислительном обжиге железорудных окатышей. Горелочные устройства в этих условиях должны обеспечивать полное сжигание газа с воздухом при концентрации кислорода в смеси около 13 % и при коэффициенте расхода воздуха (по кислороду) около единицы Такой режим работы выходит за область устойчивого горения.

Для обеспечения устойчивого воспламенения, безопасного и полного сгорания газа в разработанных горелках предусмотрено:

· интенсивное перемешивание газа с забалластированным воздухом;

· регулируемая степень закрутки потока, так как в начальный период работы агрегата забалластированный воздух отсутствует и концентрация кислорода в окислителе около 21 %;

· низкие скорости течения газовоздушной смеси в горелочной амбразуре, не более 1,0 м/с;

· организация дополнительного очага воспламенения за счет постоянно работающего запального устройства, в котором сжигается до 10 % основного топлива со специально подведенным атмосферным воздухом и при условии сохранения неизменной общей концентрации кислорода в топливо-воздушной смеси и сохранении коэффициента его расхода.

Общий вид разработанного устройства показан на рис 6.15, а техническая характеристика приведена в табл. 6.6.

Горелка состоит из корпуса для подвода забалластированного воздуха, в котором установлен тангенциальный завихритель, состоящий из 12 лопаток, объединенных общим приводом, расположенным на торцевой

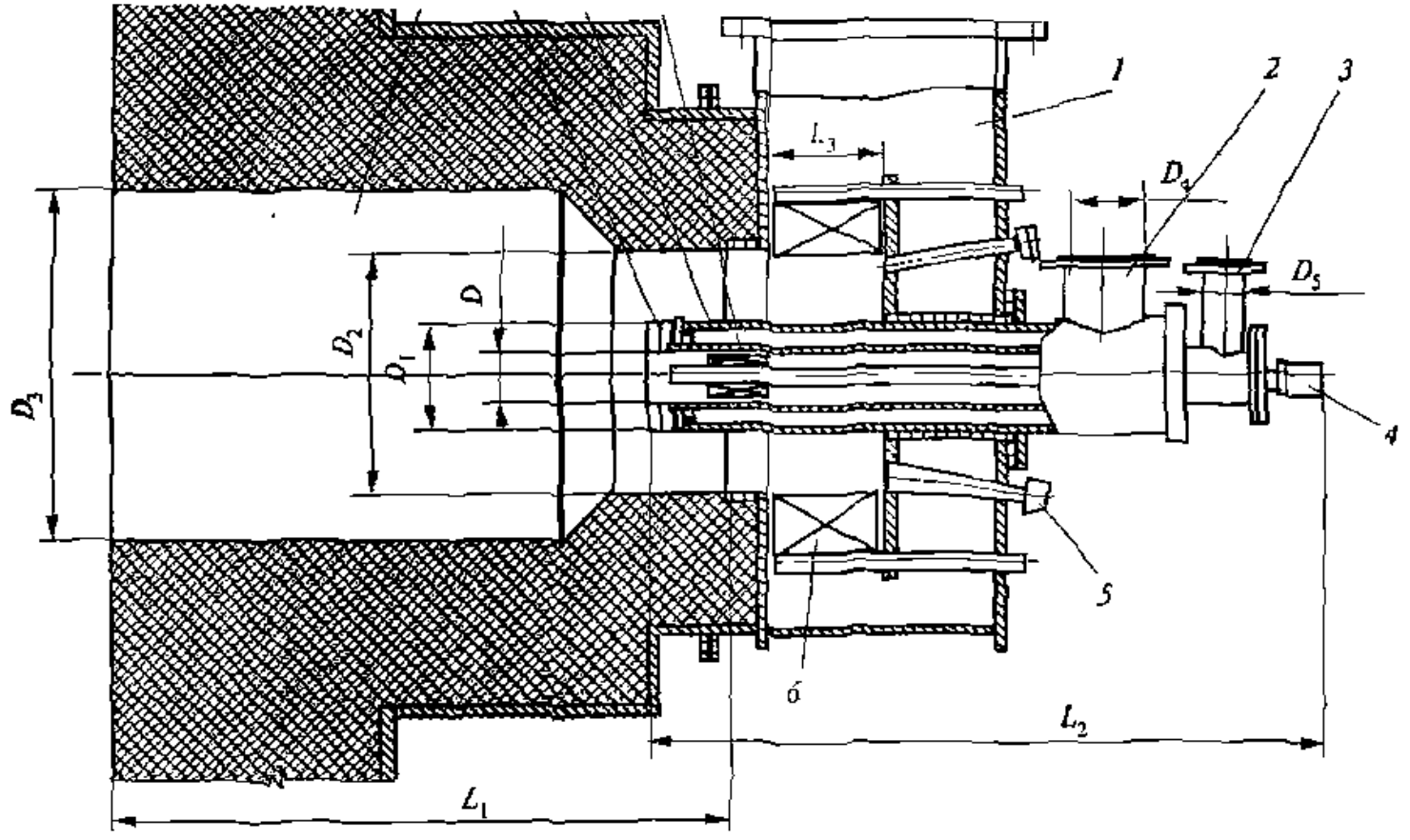


Рис. 6.15. **Горелка ГРБ**

1 – корпус подвода забалластированного воздуха; *2* – патрубок подвода газа; *3* – то же, воздуха; *4* – электрозапальник; *5* – фотодатчик; *6* – тангенциальный завихритель; *7* – аксиальный завихритель; *8* – газовое сопло; *9* – наконечник; *10* – форкамера

Таблица 6.6

Технические и конструктивные характеристики горелок ГРБ для сжигания природного газа с забалластированным воздухом (рис. 6.15)

Наименование параметра, характерный размер	Размерность	Типоразмер	
		ГРБ-1	ГРБ-2
Номинальная тепловая мощность	МВт	3,0	6,6
Номинальный расход газа	$м^3/ч$	300	660
Номинальное давление газа	кПа	30	17,5
Номинальный расход окислителя (смесь воздуха и продуктов сгорания)	$м^3/ч$	*6000*	*12000*
Номинальное давление окислителя	кПа	1,0	2,0
Концентрация кислорода в окислителе	%	13	13
Расход первичного воздуха	$м^3/ч$	300	600
Давление первичного воздуха	кПа	2,0	2,5
Коэффициент расхода воздуха (по кислороду)		1,1	1,1
Коэффициент рабочего регулирования		4,0	5,5
Размеры:	мм		
D		100	100
D_1		159	219
D_2		416	500
D_3		600	730
D_4		100	159
D_5		89	89
D_6		416	–
$A \times B$		–	475 × 475
L_1		1200	1200
L_2		1300	1400
L_3		200	240

стенке. На оси горелки установлена газовая часть, состоящая из двух коаксиально расположенных труб. Внутренняя полость служит для подвода атмосферного воздуха. На оси этой полости расположено электрогазовое запальное устройство и аксиальный лопаточный завихритель. Кольцевая полость служит для подвода природного газа. Ее торцевая часть заканчивается соплом с системой газовыпускных отверстий, через которые газовые струи вытекают в закрученный периферийный поток забалластированного воздуха и в закрученный аксиальный поток атмосферного воздуха.

На торце газовой части горелки установлен съемный наконечник, выполненный из жаропрочной стали и предохраняющий газовую часть от перегрева.

Расходные характеристики горелки ГРБ-3 приведены на рис. 6.16. Для обеспечения устойчивой работы горелки при сжигании газа с забалластированным воздухом по центральному каналу необходимо подавать около 10 % чистого атмосферного воздуха. В потоке этого воздуха сжигается часть природного газа, вытекающего через отверстия во внутренней стенке коак-

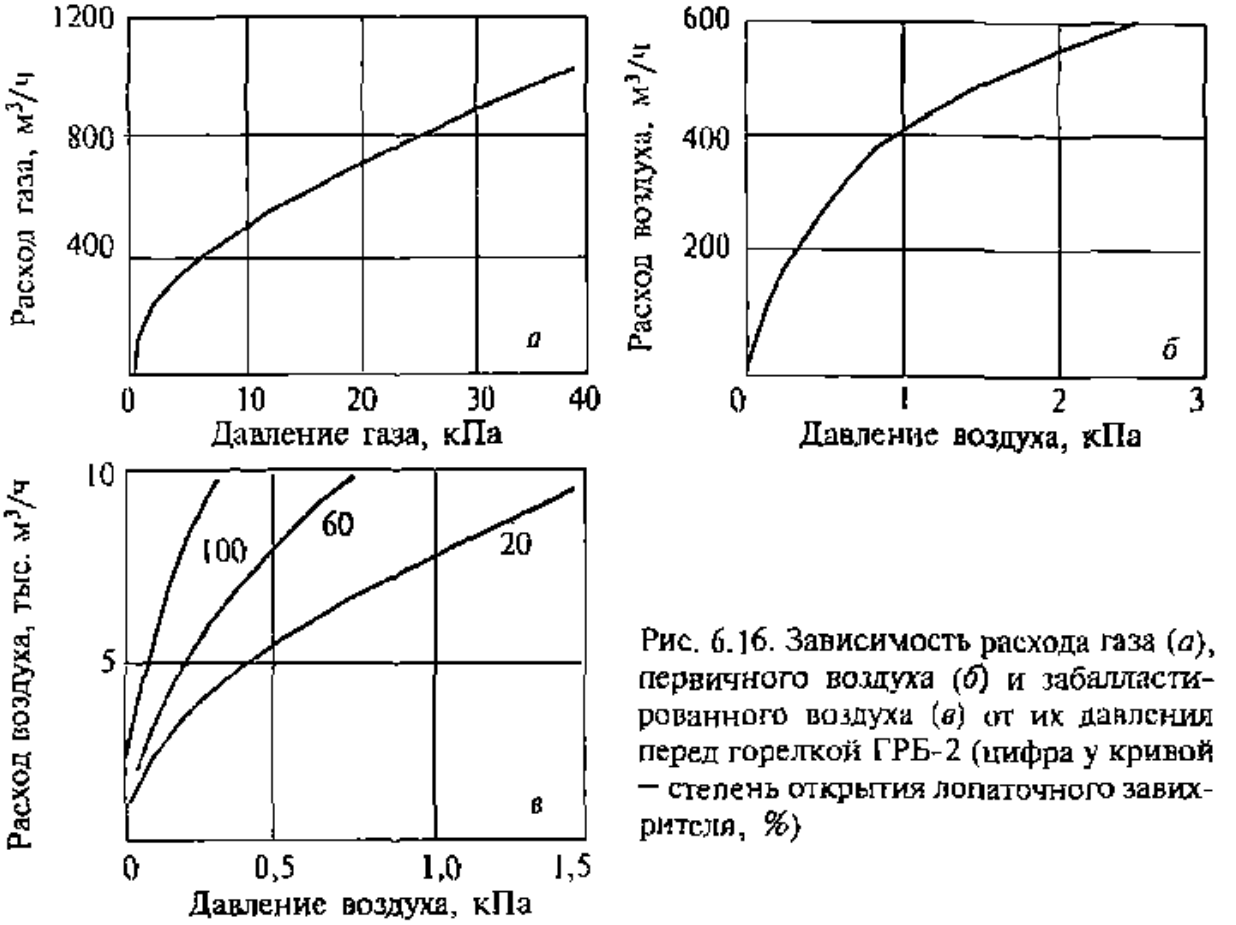


Рис. 6.16. Зависимость расхода газа (*а*), первичного воздуха (*б*) и забалластированного воздуха (*в*) от их давления перед горелкой ГРБ-2 (цифра у кривой — степень открытия лопаточного завихрителя, %)

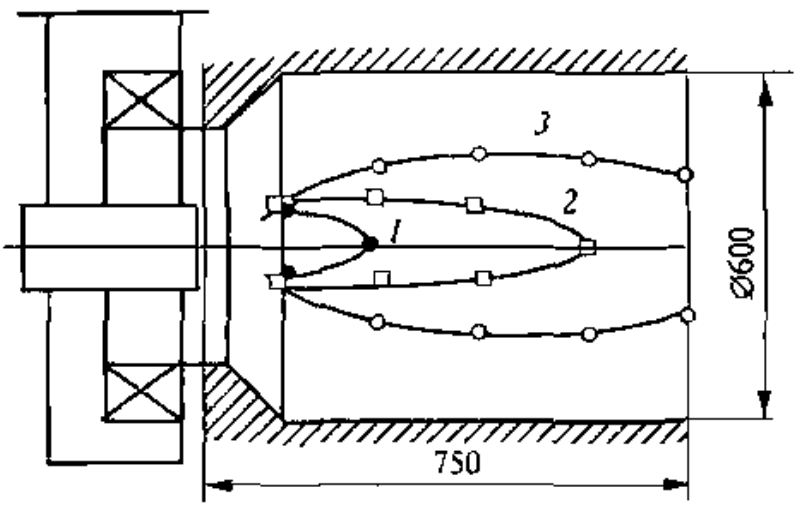


Рис 6.17. Границы внутренней зоны циркуляции в факеле горелки ГРБ-1 при угле поворота лопаток завихрителя $\varphi_{лоп}$: *1* – $\varphi_{лоп} = 30°$; *2* – $\varphi_{лоп} = 40°$; *3* – $\varphi_{лоп} = 60°$ (угол $\varphi_{лоп}$ отсчитывается между лопаткой и касательной к окружности в точке расположения ее оси вращения)

сиального канала газового сопла. Образующийся устойчивый факел развивается во внутренней зоне циркуляции, которая формируется вихревым потоком газовоздушной забалластированной смеси (рис. 6.17). Этот факел является надежным очагом воспламенения для основного потока.

Регулирование характеристик факела осуществляется за счет изменения угла поворота лопаток тангенциального завихрителя. При подаче в основной тракт горелки воздуха с концентрацией кислорода, близкой к 21 %, лопатки тангенциального завихрителя устанавливают на угол, обеспечивающий минимальную закрутку периферийного потока. Температура продуктов полного сгорания на уровне 1250–1350 °С поддерживается за

счет изменения коэффициента расхода суммарного воздуха. При подаче в горелку забалластированного воздуха по мере снижения в нем концентрации кислорода увеличивают степень закручивания периферийного потока. При достижении предельно низкой концентрации кислорода в забалластированном воздухе (~ 13 %) закрутка периферийного потока должна быть максимальной. Температура продуктов сгорания в этом случае сохраняется на уровне 1250–1350 °С, а суммарный коэффициент расхода воздуха в пересчете на концентрацию кислорода в общей смеси «газ + забалластированный воздух + атмосферный первичный воздух» снижается до 1,05 – 1,1. В этом случае обеспечивается концентрация кислорода в продуктах полного сгорания на уровне 0,5–1 % при температуре 1250–1350 °С.

При всех режимах работы горелки в ее центральный тракт подается атмосферный воздух в минимальном количестве, обеспечивающий устойчивое горение как при $\alpha = 2{,}0$ и $O_2 = 21$ %, так и при $\alpha = 1{,}0$ и $O_2 = 13$ %.

Характер изменения концентраций газов в сечении факела горелки ГРБ-1 при различных режимах сжигания и одинаковой тепловой нагрузке 1,0 МВт и интегрального химического недожога по длине факела показан на рис. 6.18 и 6.19. Эти примеры иллюстрируют замедление выгорания при балластировании воздуха несмотря на искусственную интенсификацию перемешивания.

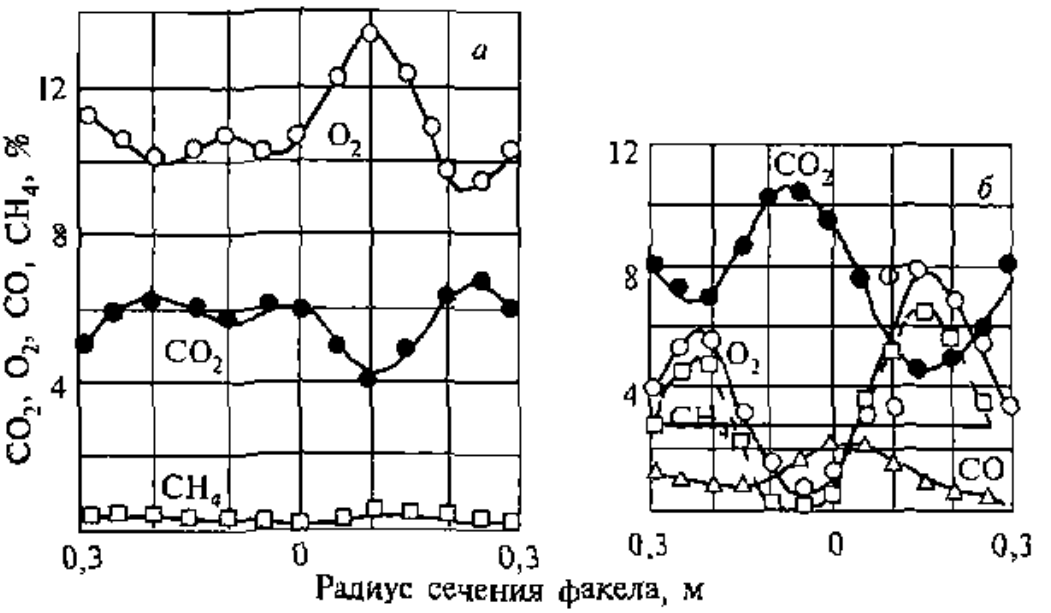


Рис. 6.18. Изменение концентраций газов в сечении факела горелки ГРБ-1 на расстоянии от газового сопла 0,4 м.
а – при работе на чистом воздухе и $\alpha = 2{,}0$; *б* – при работе на забалластированном воздухе при концентрации кислорода 13 % и $\alpha = 1{,}03$



Рис. 6.19. Изменение среднего химического недожоте $\bar{q}_3$ по длине факела горелки ГРБ-1:
1 – концентрация кислорода в воздухе горения O_2 = 21 %, α = 2,03, $\varphi_{лоп}$ = 65°; *2* – O_2 = 14 %, α = 1,03, $\varphi_{лоп}$ = 40°

6.8. ГОРЕЛКА ГСТ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИНОЙ ФАКЕЛА

Горелка ГСТ конструкции ВНИИпромгаза разработана для сжигания природного газа преимущественно в системах бокового и сводового отопления туннельных печей обжига силикатных изделий.

Разработано пять типоразмеров горелки, различающихся тепловой мощностью и длиной корпуса.

Общий вид горелки показан на рис. 6.20, конструктивные характеристики приведены в табл. 6.7, а технические — в табл. 6.8

Горелка ГСТ состоит из корпуса, воздушного сопла, газового сопла, регулировочного конуса с механизмом перемещения, газовой трубы с ме-

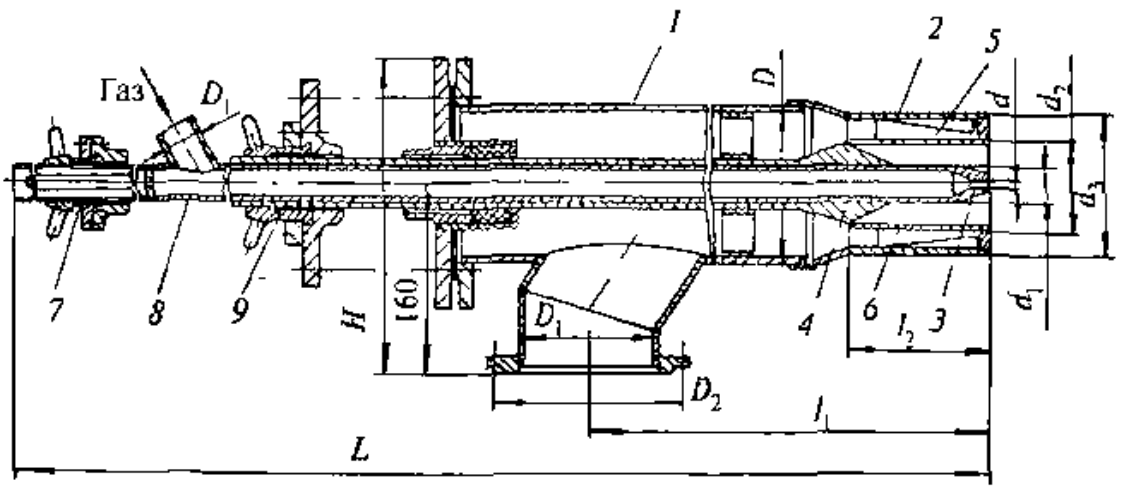


Рис. 6.20. Газовая горелка института ВНИИпромгаз типа ГСТ:
1 – корпус, *2* – воздушное сопло, *3* – газовое сопло, *4* – распределительный регулировочный конус; *5* – завихритель воздуха; *6* – втулка; *7* – механизм перемещения газовой трубы; *8* – газовая труба; *9* – механизм перемещения регулирующего конуса

Таблица 6.7

Конструктивные характеристики горелок ГСТ (рис. 6.20)

Типоразмер горелки	Характерный размер мм										
	L	l_1	l_2	d	d_1	d_2	d_3	D	D_1	D_2	H
ГСТ-10-1	1805	1190	60	8	16	24	50	76	16	170	240
-2	2085	1420									
-3	1915	1300									
-4	1685	1070									
-5	1564	950									
-6	1445	830									
ГСТ-20-1	1805	1150	70	8	16	34	60	76	16	170	240
-2	2036	1470									
-3	1915	1300									
-4	1685	1070									
-5	1565	950									
-6	1445	830									
ГСТ-35-1	1805	1190	80	10	22	40	70	76	22	130	240
-2	2035	1420									
-3	1916	1300									
-4	1685	1070									
-5	1565	950									
-6	1445	830									
ГСТ-70-1	1855	1190	105	15	36	65	100	121	36	170	262
-2	2085	1420									
-3	1965	1300									
-4	1735	1070									
-5	1615	950									
-6	1495	830									
ГСТ-90-1	1855	1190	120	17	36	70	110	121	36	170	262
-2	2085	1420									
-3	1965	1300									
-4	1735	1070									
-5	1615	950									
-6	1495	830									

ханизмом перемещения и туннеля. Воздушное сопло состоит из центральной прямоточной втулки и кольцевого завихрителя с лопатками.

При осевом перемещении регулировочного конуса осуществляется перераспределение воздушных потоков, проходящих через цилиндрическую втулку и кольцевой завихритель. Перемещением газовой трубы с соплом обеспечивается регулирование необходимой степени предварительного смешения газа с воздухом. В крайнем — выдвинутом из воздушного сопла — положении регулировочного конуса доля закрученной части потока минимальная, а факел обладает максимальной дальнобойностью. В крайнем — вдвинутом в воздушное сопло — положении конуса факел имеет *минимальную дальнобойность, но при этом угол раскрытия факела увеличивается*. Таким образом, меняя положение регулировочного конуса и газового сопла, можно регулировать угол раскрытия и дальнобойность факела в широких пределах.

Таблица 6.8

Технические характеристики горелок ГСТ (рис. 6.20)

Технический параметр	Размерность	ГСТ-10		ГСТ-35		ГСТ-70	
		при крайне вдвинутом в воздушное сопло конусе	при крайне выдвинутом из воздушного сопла конусе	при крайне вдвинутом в воздушное сопло конусе	при крайне выдвинутом из воздушного сопла конусе	при крайне вдвинутом в воздушное сопло конусе	при крайне выдвинутом из воздушного сопла конусе
Номинальная тепловая мощность	кВт	105,3	105,3	363,9	363,9	910,7	910,7
Номинальный расход газа	$м^3/ч$	10	10	35	35	87,3	87,3
Номинальное давление газа	кПа	2,4	2,45	8,43	8,82	5,2	5,9
Номинальный расход воздуха	$м^3/ч$	103	103	363	364	882	913
Номинальное давление воздуха	кПа	1,8	1,1	5,73	2,65	4,8	1,57
Коэффициент расхода воздуха		1,01	1,03	1,04	1,04	1,04	1,05
Коэффициент рабочего регулирования по тепловой мощности		4	4	10,3	5,9	8,0	5,3
Длина факела при полностью выдвинутом за пределы горелки газовом сопле	мм		900		900		1500
при полностью вдвинутом в горелку газовом сопле	мм	180		180		300	
Коэффициент регулирования длины факела		5		5		5	

6.9. ГОРЕЛКА ДЛЯ СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО И ФЕРРОСПЛАВНОГО ГАЗОВ В ТРУБЧАТЫХ ПЕЧАХ

Горелка разработана в институте ВНИИМТ для совместного обжига хромовой руды и известняка в трубчатых вращающихся печах. Общий вид горелки показан на рис. 6.21, 6.22, а техническая характеристика приведена в табл. 6 9.

Горелка состоит из трех основных деталей: узла смешения и подачи топлива; узла подачи воздуха и дуффузора

Узел подачи топлива состоит из центральной трубы для подвода природного газа и аксиально установленной вокруг нее трубы для подачи ферросплавного газа. Эта труба соединена с цилиндрической камерой смешения, в которой происходит перемешивание подводимых потоков газа.

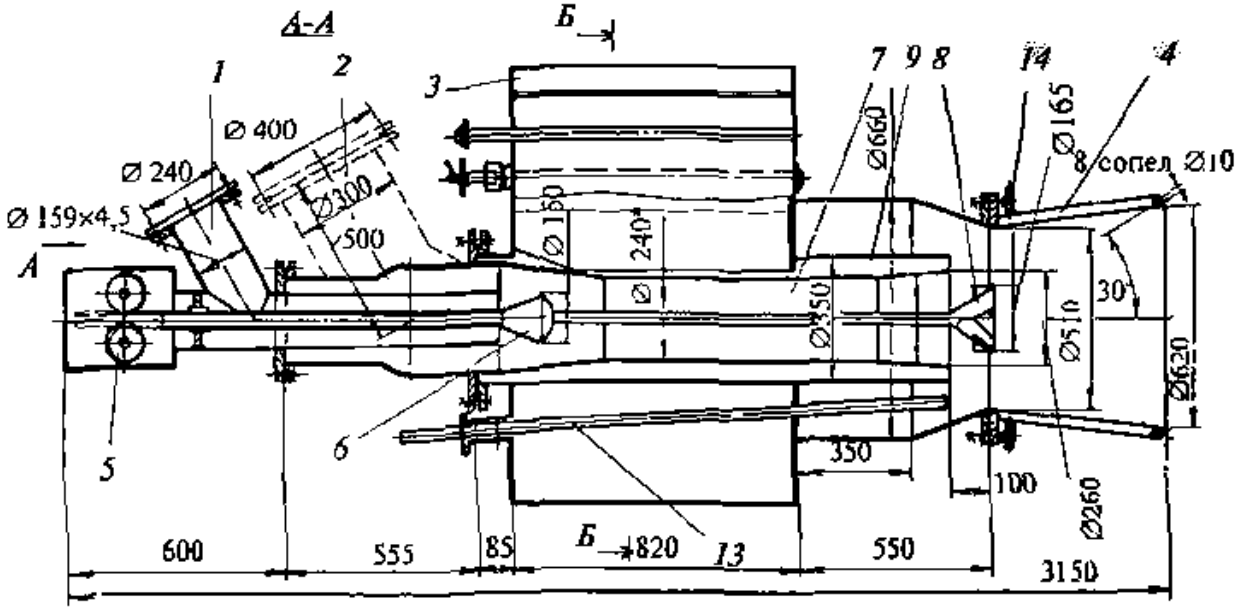


Рис. 6.21. Горелка ВНИИМТ для совместного сжигания природного и ферросплавного газов в трубчатых печах.
1 – подвод природного газа, *2* – подвод ферросплавного газа; *3* – подвод воздуха; *4* – выходной диффузор, *5* – приводной механизм, *6* – регулирующий конус, *7* – камера смешения; *8* – подвижный завихритель смеси; *9* – патрубок первичного воздуха; *10* – аксиальный воздушный канал; *11* – тангенциальный канал, *12* – поворотный шибер; *13* – запальное устройство; *14* – патрубки подвода пара

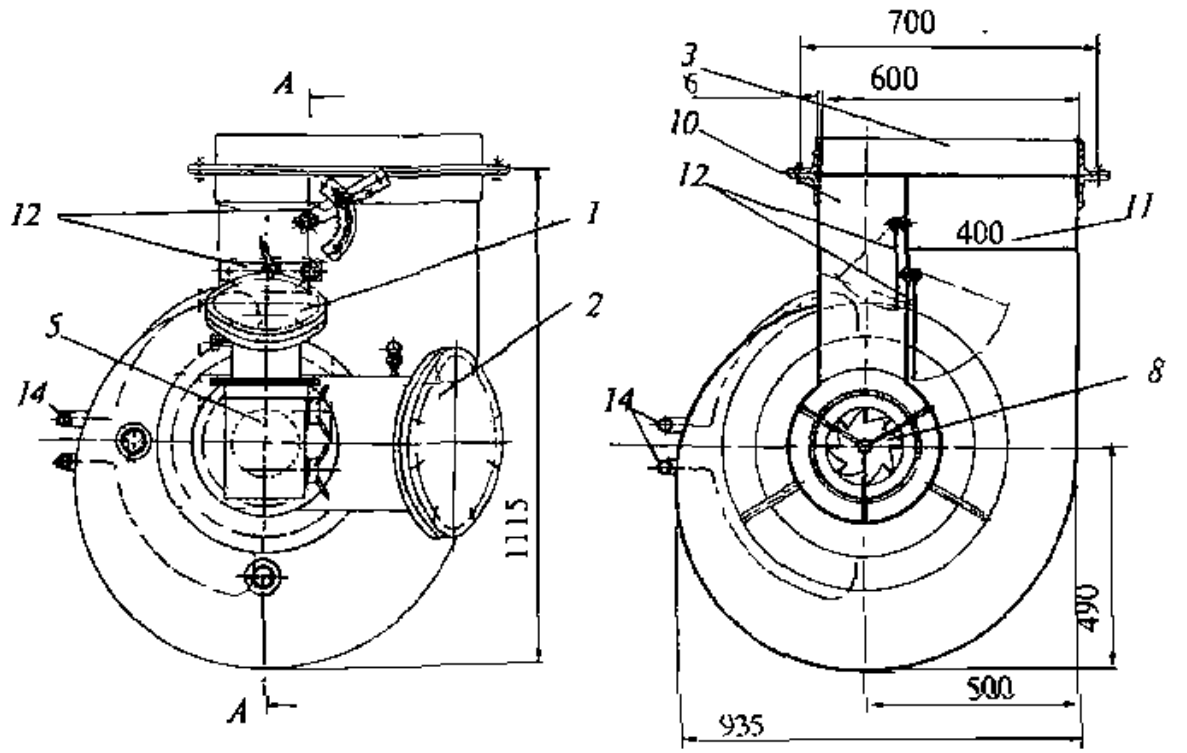


Рис. 6.22. Горелка ВНИИМТ для совместного сжигания природного и ферросплавного газов в трубчатых печах
(Детали. Обозначения см. рис. 6.21)

Таблица 6.9

Техническая характеристика горелки ВНИИМТ для совместного сжигания природного и ферросплавного газов (рис. 6.21)

Наименование показателя	Размерность	Показатель
Номинальная тепловая мощность	МВт	29
Расходы:		
природного газа	$м^3/ч$	1000
ферросплавного газа	—"—	7500
воздуха общего	—"—	25000
в том числе первичного	—"—	6000
Давление перед горелкой:		
природного газа	**МПа**	**0,1**
ферросплавного газа	**кПа**	**2,5**
воздуха	—"—	**3,0**
пара	МПа	0,25
Коэффициент расхода воздуха	—	0,85—1,0

На входе в камеру смешения и на выходе из нее нвходятся узлы смешения. Входной узел выполнен в виде конуса со штоком. Он имеет механизм передвижения с указателем положения, что позволяет изменять площадь выходного сечения центральной трубы и, соответственно, скорость истечения природного газа и его эжекционную способность.

На выходе из камеры смешения установлен конус с лопаточным завихрителем. Этот конус также с поимошью штока и механизма перемещения может передвигаться в выходном сечении камеры смешения. При этом изменяются условия перемешивания дутьевого воздухв и выходяшей газовой смеси.

Общий воздушный узел горелки разделен перегородкой на два канала: аксиальный и тангенциальный (рис 6.22) Аксиальный канал соединен с внутренней воздушной трубой для подачи первичного воздуха Тангенциальный канал через улиточный подвод соединен с наружной воздушной трубой, которая на конце имеет коническое сужение для улучшения смешения потоков.

В патрубках установлены поворотные шибера, при помощи которых можно изменять расходы аксиального и тангенциального потоков воздуха и тем самым регулировать длину факела.

Горелка заканчивается диффузором, выполненным из жаростойкой стали и имеюшим двойные стенки и сопла для выхода пара. Пар в горелку подается для интенсификации процесса обжига и для регулирования состава печных газов в месте выгрузки обожженных материалов.

6.10. ГОРЕЛКА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО И ФЕРРОСПЛАВНОГО ГАЗОВ В ТОПКАХ КОТЛОВ

Горелка разработана в институте ВНИИМТ и предназначена для совместного и раздельного сжигания природного газа с объемной низшей теплотой сгорания 35,6 МДж/м^3 и газов, отходящих от ферросплавных электропечей, со средней низшей теплотой сгорания 10,4 МД/м^3. Основное назначение горелки — использование в системе отопления котлов типа Е-25.

Номинальная тепловая мощность горелки 18,6 МВт. Воздух и газы подаются в горелку неподогретыми.

В основу конструкции положен принцип вихревого истечения воздуха и ферросплавного газа в горелочный туннель через тангенциальные завихрители и инжекции в эти вихревые потоки струй природного газа через периферийные сопла

Основным топливом является природный газ, резервным — ферросплавный. В связи с тем, что параметры ферросплавного газа могут изменяться при изменении режима работы печного агрегата, а также для облегчения процесса розжига предусмотрено сжигание части природного газа в дежурной горелке.

Общий вид горелочного устройства показан на рис. 6.23, а техническая характеристика приведена в табл. 6.10.

Горелка состоит из воздушной части, комбинированного устройства для подачи природного и ферросплавного газов, торцевого дежурного устройства и двух аксиально расположенных туннелей.

Таблица 6.10

Технические характеристики горелки для сжигания природного и ферросплавного газов (рис. 6.23)

Наименование параметра	Размерность	Режим работы		
		дежурный	сжигание природного газа	сжигание смеси газов
Номинальная тепловая мощность	МВт	0.34	18,6	18.6
Номинальный расход:	м^3/ч			
природного газа		40	1880	400
ферросплавного газа		–	–	5050
воздуха		400	19600	15250
Номинальное давление:	кПа			
природного газа		0,32	50,8	2.3
ферросплавного газа		–	–	0,92
воздуха		0,03	2,0	1,57
Максимальная тепловая мощность	МВт	2,12	18,6	21.4
Коэффициент рабочего регулирования		–	5,22	10
Коэффициент предельного регулирования		14,8	5,22	11,5

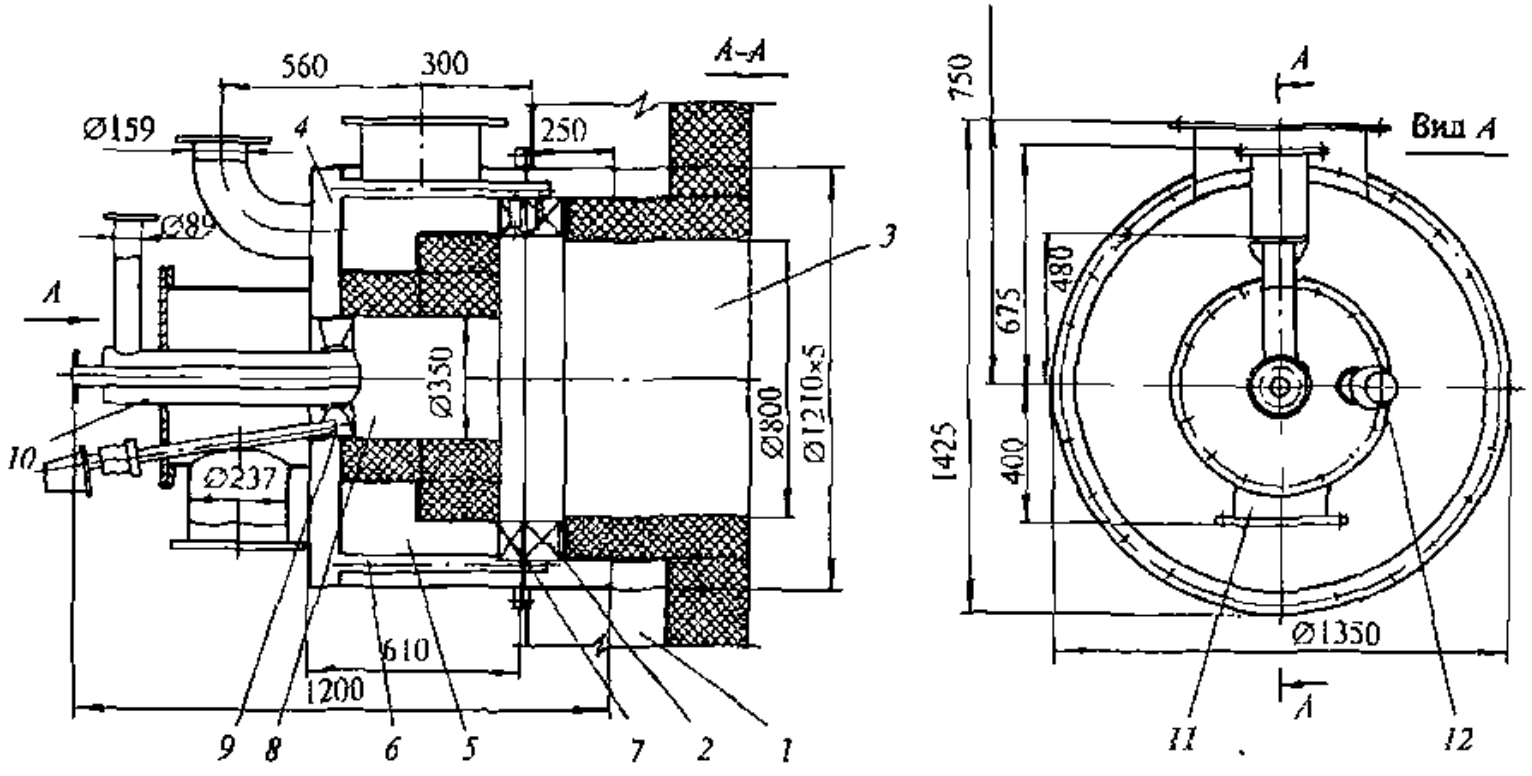


Рис. 6.23. Комбинированная горелка ВНИИМТ тепловой мощностью 18,6 МВт

1 – воздухоподводящий короб; *2* – тангенциальный завихритель воздуха; *3* – основной туннель; *4* – торцевой коллектор природного газа, *5* – периферийный коллектор ферросплавного газа; *6* – газовые трубы с соплами; *7* – тангенциальный завихритель ферросплавного газа; *8* – туннель дежурной горелки; *9* – аксиальный завихритель, *10* – газовое сопло; *11* – подвод воздуха; *12* – фотодатчик

Воздушная часть горелочного устройства состоит из воздухоподводящего короба топки и тангенциального завихрителя — 24 лопаток, установленных на входе в основной горелочный туннель.

Комбинированная часть для подачи природного и ферросплавного газов состоит из общего корпуса, разделенного на две полости: торцевой коллектор и периферийный коллектор. Последний имеет патрубок для ввода ферросплавного газа. Выход газа выполнен в виде тангенциального завихрителя — 12 лопаток. Торцевой коллектор имеет патрубок для ввода природного газа. Истечение газа из коллектора происходит через 12 труб, которые заканчиваются соплами. Причем 24 сопла установлены между лопатками завихрителя воздуха и 12 сопел — между лопатками завихрителя ферросплавного газа.

На оси периферийного коллектора выполнен туннель из огнеупорного кирпича, на входе в который установлены аксиальный лопаточный завихритель воздуха дежурной горелки и сопло для подвода природного газа. Внутренняя полость газового сопла имеет направляющую трубу для установки запальника. На торцевой стенке дежурной горелки установлен датчик контроля пламени (на рис. 6.23, сечение $A-A$ датчик показан условно).

При любом режиме работы пуск горелки осуществляется с розжига дежурного горелочного устройства. После разогрева футеровки туннеля дежурной горелкой осуществляют пуск в горелку либо только природного газа, либо одновременно и ферросплавного. При этом подача газа в дежурную горелку не производится.

При работе горелки только на природном газе воздух подается также в периферийный коллектор ферросплавного газа. При этом закрученный воз-

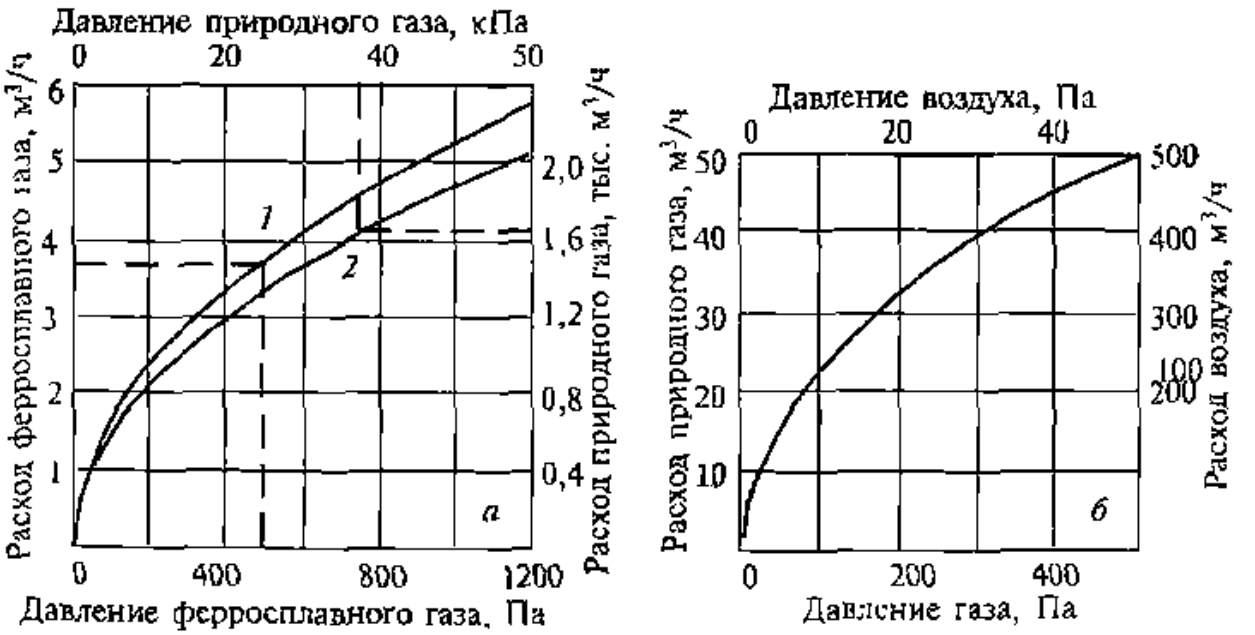


Рис 6.24 Расходные характеристики горелки тепловой мощностью 18,6 МВт:
а — зависимости расхода ферросплавного (*1*) и природного (*2*) газов от их давления перед основной горелкой, *б* — то же, природного газа и воздуха перед дежурной горелкой

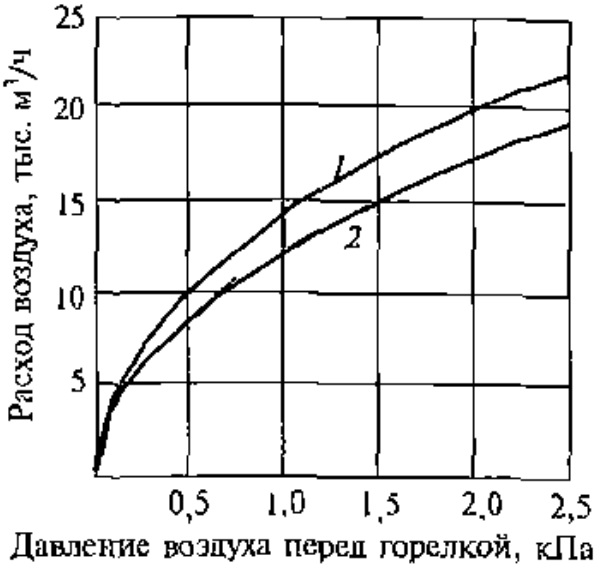


Рис. 6.25. Зависимость расхода воздуха от его давления перед горелкой тепловой мощностью 18,6 МВт:
1 – при работе горелки на природном газе; *2* – при совместном сжигании природного и ферросплавного газов

душный поток вытекает в горелочный туннель через лопатки обоих тангенциальных завихрителей.

При работе горелки на смеси газов в периферийный газовый коллектор подается ферросплавный газ. При этом через тангенциальный завихритель 7 вытекают перемешивающиеся потоки топливных газов, а через завихритель *2* — потоки природного газа и воздуха

Регулирование характеристик факела осуществляется за счет перераспределения потоков газа, подаваемого через каждый завихритель.

Расходные характеристики горелки по каждому тракту подачи энергоносителя приведены на рис. 6.24 и 6.25. Горелка обеспечивает полное сгорание топлива при коэффициенте расхода воздуха 1,1.

6.11. ГОРЕЛКА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИНОЙ ФАКЕЛА ГПГ НПО ПРОМГАЗ

Горелка предназначена для формирования кинетического или диффузионного факела с регулируемыми параметрами при сжигании природного газа. Разработана серия горелок тепловой мощностью 100 и 200 кВт для газа даалением 4,3 и 29 кПа.

Общий вид горелок показан на рис. 6.26, а конструктивные и технические характеристики приведены в табл. 6.11.

Горелка состоит из воздухоподводящего корпуса, периферийного газового коллектора, центрального газового сопла и смесителя. Для формирования длинного факела газ подается в центральное сопло, для получения короткого — в периферийный коллектор. При подаче газа и воздуха в смеситель образуется предварительно подготовленная смесь, которая воспламеняется на входе в горелочную фурму.

Расход топлива, подаваемого на предварительное смешение, составляет около 10 % от общего его расхода. При регулировании длины факела этот расход топлива и коэффициент расхода воздуха при предварительном смешении не изменяются.

Коэффициент рабочего регулирования горелок — 4 при $\alpha = 1.08$.

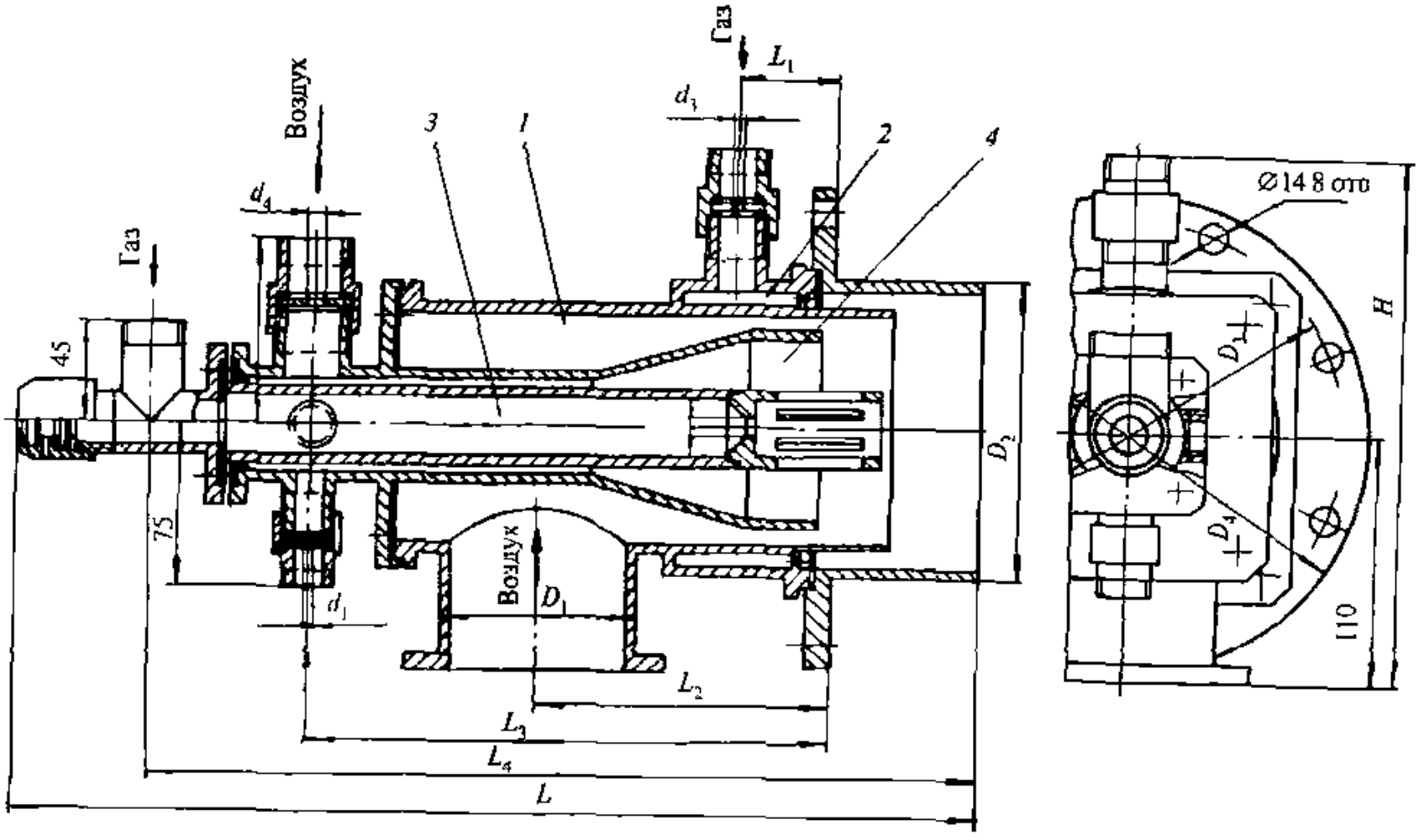


Рис. 6.26. Горелка с предварительным горением ГПГ:
1 – воздухоподводящий корпус; *2* – газовый коллектор, *3* – центральное сопло, *4* – смеситель; *5* – фурма

Таблица 6.11

Технические и конструктивные характеристики горелок ГПГ с регулируемой длиной факела (рис. 6.26)

Наименование показателя и характерный размер	Размерность	Типоразмер							
		ГПГ-10 Н		ГПГ-10 С		ГПГ-20 Н		ГПГ-20 С	
		короткий факел	длинный факел	короткий факел	длинный факел	короткий факел	длинный факел	короткий факел	длинный факел
Номинальная тепловая мощность	кВт	100				200			
Номинальное давление газа:									
основное горение	кПа	4,6	4,3	28,4	29,9	4,4	3,6	27,0	24,0
предварительное смешение	кПа	2,3		17,2		0,74		26,5	
Номинальное давление воздуха:									
основное горение	кПа	1,47	1,3	1,37	1,32	1,12	1,12	1,13	1,12
предварительное смешение	кПа	2,89	2,84	2,94	2,84	1,13	1,13	1,13	1,13
Номинальная длина факела	м	0,36	0,86	0,34	0,80	0,69	1,27	0,59	0,92
Размер.									
d_1	мм	2,4		1,4		6,3		1,8	
d_2	" _ "	6,1		3,7		9,0		5,4	
d_3	" _ "	7,0		3,7		12,0		5,4	
d_4	" _ "	9,0		9,0		–		–	
D_1	" _ "	76		76		89		89	
D_2	" _ "	110				133			
D_3	" _ "	175				195			
D_4	" _ "	200				220			
L_1	" _ "	42				45			
L_2	" _ "	120				132			
L_3	" _ "	227				245			
L_4	" _ "	302				320			
L	" _ "	458				476			
H	" _ "	222				232			
P		G1/2				G3/4			

6.12. ГОРЕЛКА ТИПА «ГРИФ»

Горелка типа «Гриф» разработана для сжигания природного газа в регулируемом факеле применительно для камерных печей. Разработчик горелок — завод им. С. Орджоникидзе. Тепловая мощность горелки — 0,35 МВт. Горелка предназначена для работы на холодном и подогретом воздухе при установке на своде или боковых стенках печи. Общий вид горелки показан на рис. 6.27.

Принцип работы горелки основан на регулировании степени закрутки воздуха Корпус горелки имеет цилиндрический патрубок с двумя тангенциальными подводами воздуха, на каждом из которых установлен регулирующий шибер. Цилиндрический патрубок коническим переходом соединен с выходным участком горелки, который имеет смесительную камеру, соединенную с туннельной плитой. Вокруг смесительной камеры выполнена

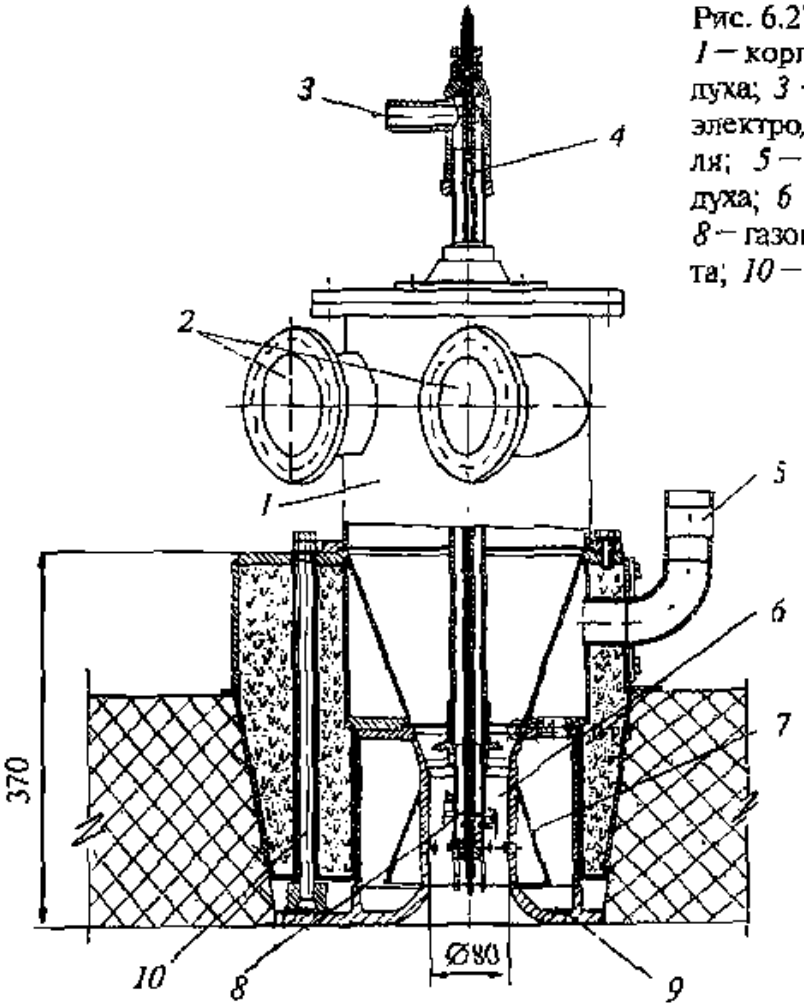


Рис. 6.27. Горелка типа "Гриф":
1 — корпус; *2* — патрубки подвода воздуха; *3* — патрубок подвода газа; *4* — электрод системы розжига и контроля; *5* — патрубок охлаждающего воздуха; *6* — смеситель; *7* — обтекатель; *8* — газовое сопло; *9* — туннельная плита; *10* — шпилька

дополнительная обечайка, которая вместе с туннельной плитой представляет собой охлаждающую полость горелки. Туннельная плита при помощи шпилек поджата к торцевому фланцу. По оси горелки расположена газовая труба, оканчивающаяся соплом, имеющим отверстия в боковой стенке

На оси газовой трубы установлен электрод системы автоматического розжига и контроля пламени.

Горелка может работать в прямоструйном или вихревом режиме формирования факела. Для создания прямоструйного факела воздух подают в горелку через оба тангенциальных патрубка. Патрубки установлены таким образом, что тангенциально подведенные потоки во входном цилиндрическом канале при встрече гасят взаимную закрутку воздуха. Общий поток воздуха через цилиндрический смеситель вытекает в топочный объем. При этом поток воздуха пронизывается струями газа и формирует прямоструйный факел.

Для создания вихревого или плоскопламенного факела воздух в горелку подают через один тангенциальный патрубок. Интенсивно закрученный поток воздуха перемешивается в смесителе со струями газа и, вытекая через отверстие туннельной плиты, создает вихревой факел с развитой зоной приосевой циркуляции

При любой структуре факела, создаваемого горелкой, предусмотрено интенсивное охлаждение туннельной плиты дополнительным потоком вторичного воздуха, подаваемого в горелку в количестве до 20 % от необходимого для полного сгорания топлива. Этот воздух подводится через специальный патрубок горелки и проникает в ее охлаждающую полость. Омывая внутреннюю стенку туннельной плиты, этот воздух также сбрасывается в камеру смешения через отверстия в ее боковой стенке. При работе горелки расход охлаждающего воздуха не регулируется.

В наиболее тяжелых температурных условиях работает туннельная плита горелки, изготавливаемая из жаростойкой стали

Ниже приведена техническая характеристика горелки:

Расход газа номинальный	35 м³/ч
Давление газа перед горелкой	3 кПа
Расход воздуха	380 м³/ч
Давление воздуха перед горелкой	2,7 кПа
Диапазон изменения коэффициента расхода воздуха	0,8–2,0
Коэффициент рабочего регулирования	5
Длина прямоструйного факела	0,6 м
Диаметр разомкнутого факела	0,35 м

6.13. ГОРЕЛКА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ РАСПЫЛИВАНИИ В ФАКЕЛЕ ВОДЫ

Горелка, предназначенная для сжигания природного газа при распыливании в факеле воды, разработана в ВНИИМТ применительно к агрегатам для магнетизирующего обжига железных руд. Применение таких горелок обусловлено необходимостью иметь газопечную среду с температурой 1000–1150 °С при сжигании газа с коэффициентом расхода воздуха 0,9–0,95.

Разработанная горелка тепловой мощностью 1,0 МВт показана на рис. 6.28. Горелка имеет воздухоподводящий корпус с аксиальным лопаточным

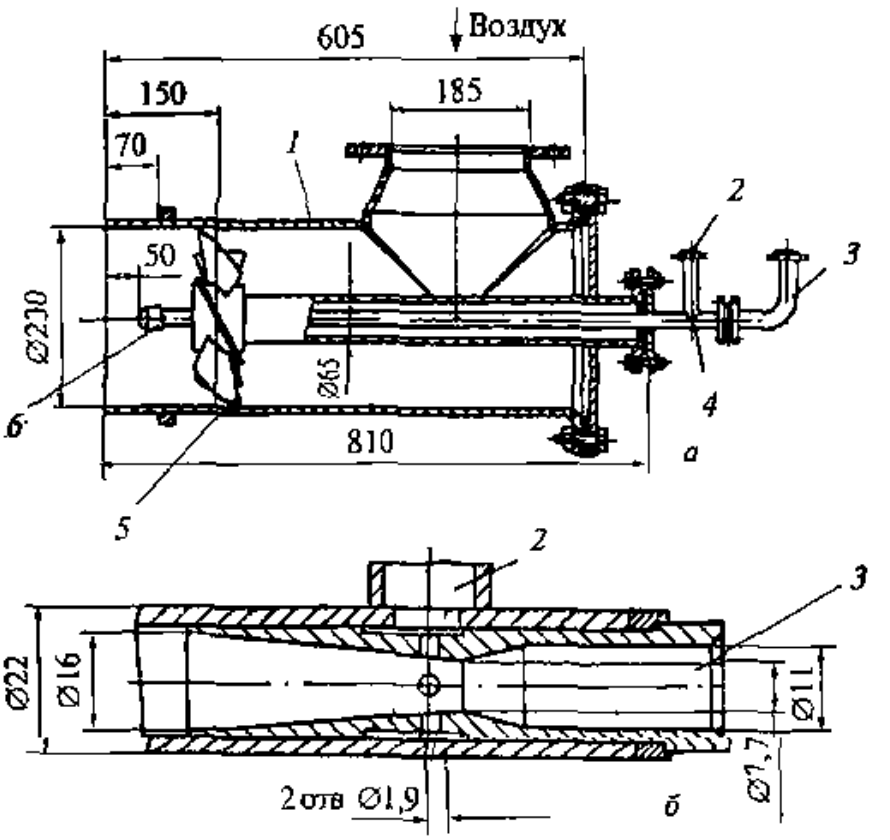


Рис. 6.28. Горелка для сжигания природного газа при распыливании в факеле воды. *а* – общий вид, *б* – газоводяной смеситель; *1* – воздухоподводящий корпус; *2* – подвод воды; *3* – подвод газа; *4* – смеситель; *5* – завихритель; *6* – выходное сопло

завихрителем, состоящим из восьми лопаток, установленных под углом 60° к оси горелки. На оси горелки установлен узел подвода газа и воды.

Этот узел выполнен по типу эмульсионного тракта мазутных форсунок и имеет ствол диаметром 16 мм с эмульсионной вставкой в виде сопла Лаваля для смешения газа и воды и выходное сопло с 12 отверстиями диаметром 2,6 мм, расположенными под углом 45° к оси.

При работе горелки распыливание воды производится газовой струей до образования газоводяного тумана, который вытекает в центральную зону камеры сгорания и интенсивно перемешивается с воздухом.

Ниже приведена техническая характеристика горелки с распыливанием в факеле воды (рис. 6.28).

Расход природного газа номинальный	100 м³/ч
Давление газа перед горелкой	0,15 МПа
Расход воздуха	920 м³/ч
Давление воздуха перед горелкой	1,50 кПа
Диапазон изменения коэффициента расхода воздуха	0,9–0,95
Диапазон изменения расхода воды	1–2,4 кг/м³ газа
Давление воды перед горелкой	0,1 МПа

Падача воды в газовый тракт горелки влияет как на строение факела, так и на ее эксплуатационные характеристики. Горение происходит во всем объеме факела, причем присутствие тонкораспыленных капель воды не допускает развития высоких температур (рис. 6.29). При расходах воды до 2,3 кг на 1 м³ природного газа наблюдается устойчивое горение без пульсаций. С увеличением расхода воды увеличивается неравномерность концент-

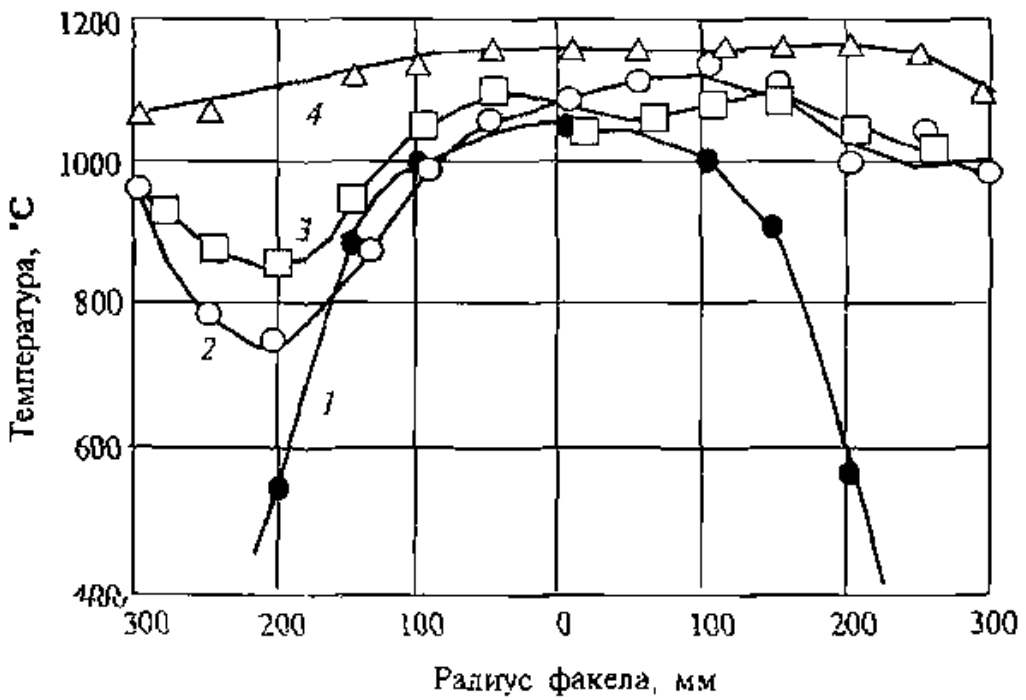


Рис. 6.29. Изменение температуры продуктов сгорания в сечениях факела при распыливании воды в количестве 2,15 кг/м³ газа, α = 0,95 на различном расстоянии от горелки, мм: *1* – 210; *2* – 880, *3* – 1070; *4* – 1530

раций газов в сечениях факела и изменяется соотношение компонентов Добавка в факел воды в количестве до 1,0 кг на 1 м^3 газа приводит к изменению соотношения CO и H_2 и увеличению процентного содержания H_2. *При дальнейшем увеличении расхода воды концентрации CO и* H_2 уменьшаются и появляется непрореагировавший метан (рис. 6.30)

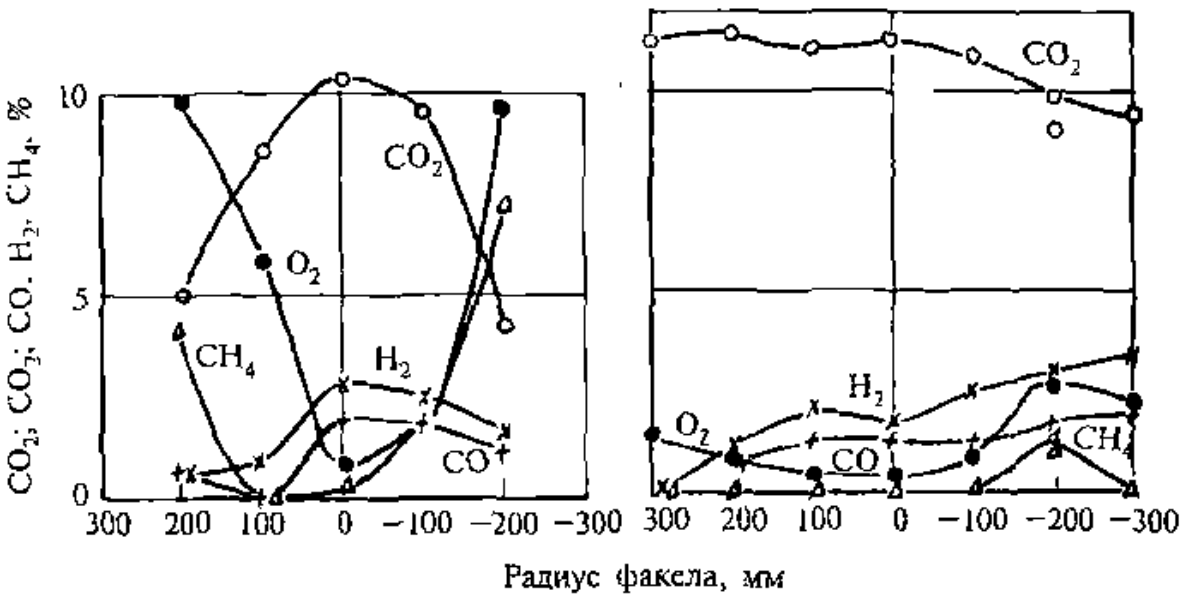


Рис 6.30. Изменение концентрации газов в сечениях факела при распыливании воды в количестве 2,15 кг/м^3 газа, α = 0,95 на расстоянии от горелки, мм:
а — 440; *б* — 1530

С увеличением добавки воды увеличивается длина факела, необходимая для полного расхолования кислорода и выравнивания поля концентраций и температур. При расходе воды 2,3 кг/м^3 газа длина факела составляет 2,5 м

Отмечено уменьшение сажеобразования и снижение выхода оксидов азота со 110 (при сжигании без воды) до 37 мг на 1 м^3 продуктов сгорания при подаче в факел воды в количестве 1—2 кг на 1 м^3 газа.

Добавка воды в факел влияет на устойчивость горения. В диапазоне изменения расхода воды 2,4—2,8 кг на 1 м^3 газа наблюдается ухудшение смешения и испарения воды. При длительной работе горелки с расходом 2,8 кг на 1 м^3 газа появляются непериодические пульсации факела и срыв сгорания.

6.14. ГОРЕЛКА ДЛЯ СУШКИ И РАЗОГРЕВА ФУТЕРОВКИ КОВШЕЙ

*Режимы сушки и разогрева футеровки ковшей для приемки расплав*ленного металла требуют изменения в широких пределах параметров работы применяемых горелочных устройств. Горелочные устройства, разработанные для этих целей во ВНИИМТ, предназначены для сжигания холодного природного газа с неподотретым воздухом и обеспечивают диапазон тепловых мощностей от 70 кВт до 3,0 МВт.

Общий вид разработанной серии горелок показан на рис. 6.31, а технические и конструктивные характеристики приведены в табл. 6 12.

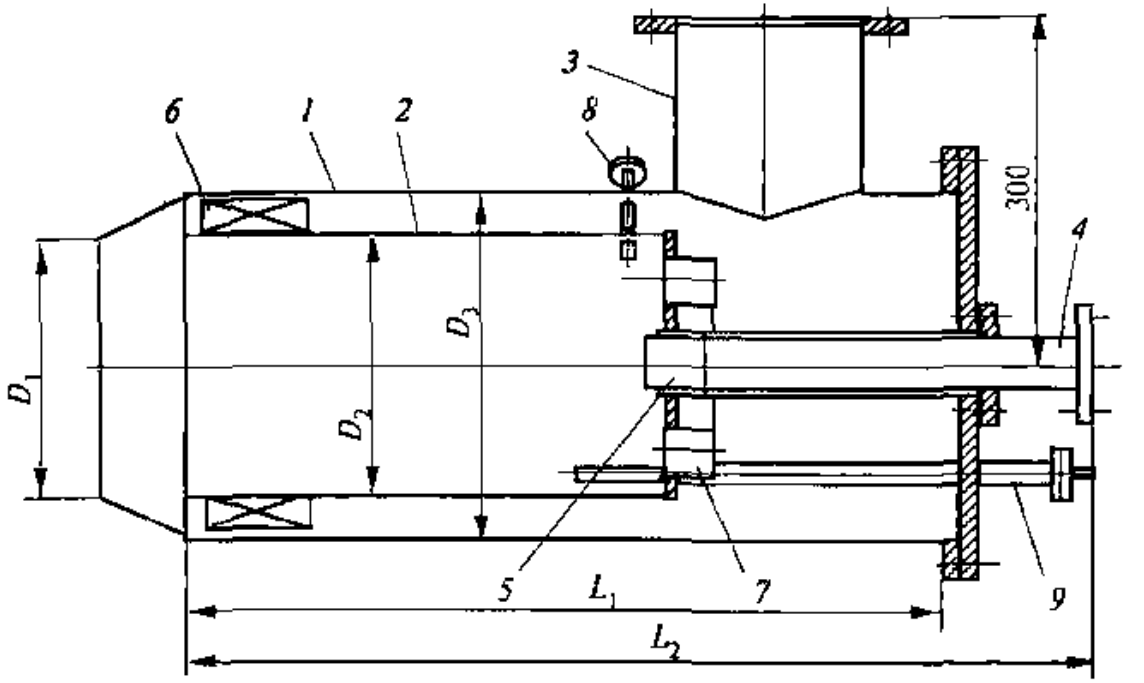


Рис. 6.31. Горелка ВНИИМТ для сушки и разогрева футеровки ковшей:
1 – корпус; *2* – огневая камера; *3* – патрубок подвода воздуха; *4* – газовая труба; *5* – сопло; *6* – завихритель; *7* – патрубки распределения первичного воздуха; *8* – свеча зажигания; *9* – датчик контроля пламени

Таблица 6.12

Технические и конструктивные характеристики горелок ВНИИМТ для сушки и разогрева футеровки ковшей (рис. 6.31)

Наименование показателей	Размерность	Типоразмер			
		ГСФ-1	ГСФ-2	ГСФ-3	ГСФ-4
Номинальная тепловая мощность	МВт	0,07	0,3	1,0	3,5
Номинальный расход газа	м³/ч	7	30	100	350
Давление газа перед горелкой	кПа	10	15	11,4	15
Давление воздуха перед горелкой	кПа	1,5	1,5	0,63	1,5
Номинальный коэффициент расхода воздуха		1,15	1,15	1,15	1,15
Диапазон изменения коэффициента расхода воздуха		1,1–5,0	1,1–5,0	1,15–4,5	1.1–5,0
Коэффициент рабочего регулирования		5	5	5	5
Максимальная тепловая мощность	МВт	0,1	0,35	1,5	4,0
Коэффициент предельного регулирования		7.2	7,2	7,2	7,2
Длина факела	м	1.0	1,2	1.7	4,0
Характерный размер:	мм				
D_1		80	114	211	235
D_2		66	150	209	315
D_3		108	184	273	380
L_1		309	490	730	950
L_2		430	720	830	1243
Масса горелки	кг	62	90	72	136

Горелка состоит из корпуса с воздухоподводящим патрубком, встроенной камеры сгорания и газовой трубы со сменным соплом. На торцевой стенке камеры сгорания выполнены патрубки и отверстия для ввода в ее объем воздуха. У выходного торца воздушного корпуса, имеющего пережим, между корпусом и стенкой камеры сгорания установлен завихритель. Горелка имеет стационарно установленные электроискровой запальник и датчик контроля пламени.

При работе горелки воздух разделяется на два потока. Один поток через отверстия и патрубки в торцевой стенке проникает в камеру сгорания, где происходит его смешение со струями газа, вытекающими радиально из отверстий газового сопла. Воспламенившееся топливо интенсивно сгорает в пределах камеры сгорания.

Второй поток воздуха, омывая и охлаждая стенки камеры горения, проходит завихритель воздуха и интенсивно подмешивается к потоку, выходящему из камеры горения.

Регулирование характеристик факела осуществляется путем изменения тепловой нагрузки при постоянном коэффициенте расхода воздуха и путем изменения расхода воздуха. В этих условиях горелки обеспечивают получение высокоскоростного потока теплоносителя с температурой от 450 до 1400 °С.

Горелки могут устанавливаться на специальной крышке стенда в вертикальном или горизонтальном положении и могут иметь специальный блок из огнеупорного материала.

6.15. КОМБИНИРОВАННАЯ ИНЖЕКЦИОННАЯ ГОРЕЛКА ДЛЯ СУШКИ ФУТЕРОВКИ КОВШЕЙ

Для сушки и разогрева футеровки ковшей институтом Челябгипромез разработана специальная комбинированная инжекционная горелка для сжигания природного газа низкого давления. Особенностью горелки является подача воздуха как за счет нагнетания в смеситель сжатого воздуха, так и за счет эжекции. Общий вид горелки показан на рис. 6.33.

Горелка имеет воздухоподводяший корпус, входная часть которого выполнена по типу проточной части инжекционных горелок. По оси горелки установлено воздушное сопло с отверстием диаметром 5,3 мм для выхода сжатого воздуха. На корпусе сопла установлена подвижная шайба, при помощи которой регулируется размер кольцевой щели для входа воздуха из атмосферы в конфузор смесителя.

Выходная часть воздушного корпуса выполнена с поворотом на 60° к его продольной оси

На расстоянии 60 мм от выходного сечения горелки в ее корпусе установлено газовое сопло, имеющее 6 отверстий диаметром 4,6 мм, выполненных под углом 30° к оси, и лопаточный завихритель воздуха. Подвод газа к соплу выполнен по самостоятельному трубопроводу, установленному вне воздухоподводящего корпуса.

При работе горелки сжатый (первичный) воздух, вытекая из воздуш-

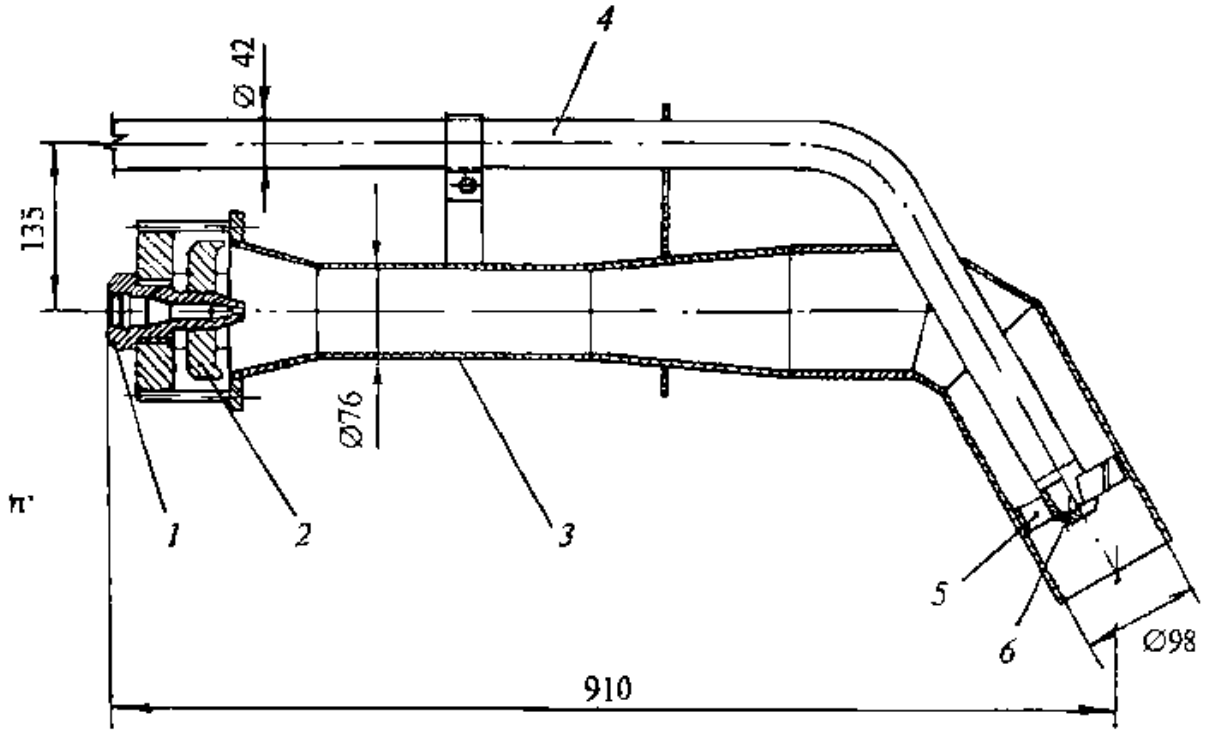


Рис. 6.33. Комбинированная инжекционная горелка для сушки ковшей:
1 — воздушное сопло; *2* — регулирующая шайба; *3* — корпус; *4* — газовая труба, *5* — завихритель воздуха; *6* — газовое сопло

ного сопла в смеситель горелки, инжектирует во внутреннюю полость вторичный воздух из окружающей атмосферы

Общий поток воздуха, закрученный лопаточным завихрителем, вытекает из носика горелки В этот поток внедряются струи газа, вытекающие из газового сопла. Образующийся вихревой факел своей корневой зоной удерживается на выходе из горелки.

Регулирование качества сжигания газа обеспечивается за счет изменения соотношения первичного и вторичного воздуха.

Техническая характеристика горелки:

Номинальная тепловая мощность, кВт	297
Номинальный расход газа, $м^3/ч$	30
Номинальный расход сжатого воздуха, кг/ч	28,4
Номинальное давление газа, кПа	4,5
Номинальное давление сжатого воздуха, кПа	100
Коэффициент расхода первичного воздуха	0,1
Суммарный коэффициент расхода воздуха	1,03
Коэффициент рабочего регулирования	5,3
Коэффициент предельного регулирования	6,4
Длина факела, м	Около 1,0
Масса горелки, кг	18,5

При работе горелка создает шум, превышающий санитарные нормы, поэтому при работе необходимо применять средства защиты органов слуха.

Расходные характеристики горелки приведены на рис. 6.34 и 6.35.

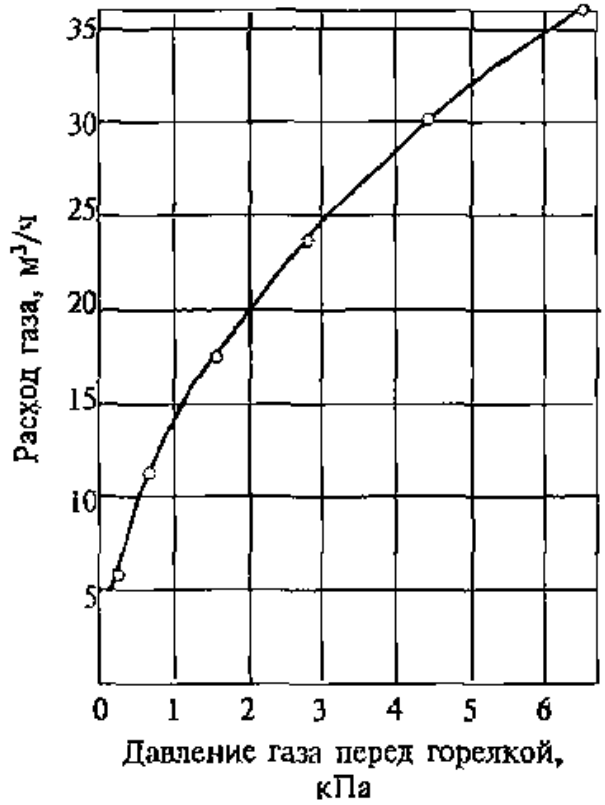


Рис. 6 34. Зависимость расхода газа от его давления перед комбинированной горелкой

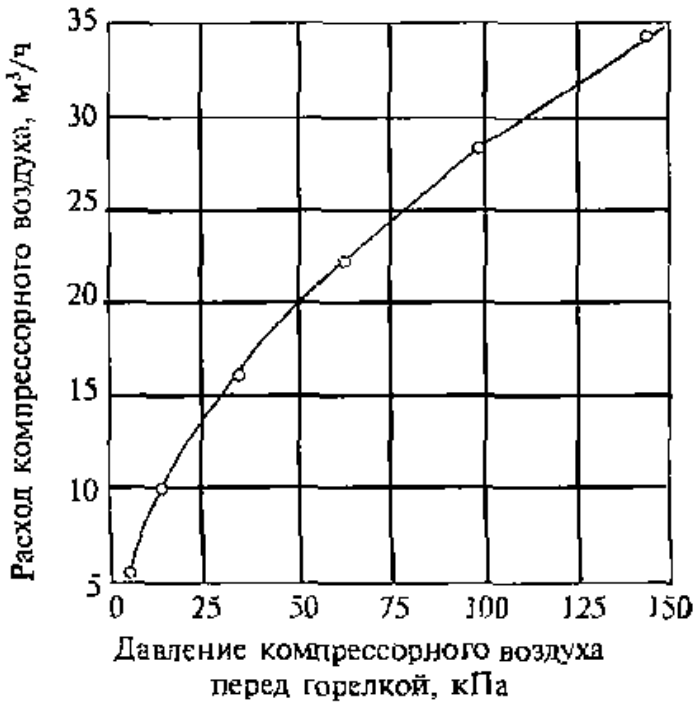


Рис. 6 35. Зависимость расхода компрессорного воздуха от его давления перед комбинированной горелкой

Глава 7. ГОРЕЛКИ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ СМЕШЕНИЕМ

Горелки с предварительным смешением обеспечивают образование внутри горелки полностью перемешанной газовоздушной смеси, которая сгорает при выходе из горелки или внутри горелки в коротком и высокотемпературном факеле

Наиболее распространенными горелками с полным предварительным смешением являются инжекционные, в которых газ высокого давления подсасывает воздух, причем соотношение «газ—воздух» сохраняется при изменении давления газа, т.е. при изменении количества газа, проходящего через горелку. Основным достоинством инжекционных горелок является то, что они обеспечивают полное сгорание при коэффициенте расхода воздуха, близком к единице, и не требуют специальных устройств для подачи и регулирования количества воздуха, что существенно упрощает систему отопления печи.

При отоплении высокотемпературных печей газом с низкой теплотой сгорания только применение горелок с полным предварительным смешением обеспечивает сжигание газа в коротком факеле с коэффициентом расхода воздуха, близким к единице, что дает возможность получить вблизи горелки зону достаточно высоких температур. Например, при сжигании доменного газа и смеси коксового и доменного газов с низкой теплотой сгорания только в горелках полного предварительного смешения можно получить температуры горения, обеспечивающие нагрев металла под прокатку. В этих случаях применяют инжекционные горелки типа Н, работающие на холодном или подогретом газе с низкой теплотой сгорания, а иногда и горелки типа П, использующие подогретый воздух.

Для обеспечения равномерного нагрева в проходных и садочных печах часто бывает необходимо рассредоточить подачу тепла В этом случае установка большого числа горелок не приводит к чрезмерному усложнению и громоздкости конструкции печи, так как для инжекционных горелок не нужна система разводки воздуха и регулирования соотношения «газ—воздух». Здесь инжекционные горелки используют и при отоплении печей газами с высокой теплотой сгорания. Для уменьшения габарита горелок в плане применяют инжекционные горелки с поворотом смесителя. При сжигании газов с высокой теплотой сгорания чаще всего используют инжекционные горелки типов В и ВП или их модернизированный вариант — инжекционные горелки типа ИУ.

Для сжигания газов с высокой теплотой сгорания в низкотемпературных камерах при температуре в рабочем пространстве ниже температуры воспламенения топлива, а также для работы на открытом воздухе применяют инжекционные горелки типа ИУ со стабилизатором.

Однако инжекционные горелки имеют ряд существенных недостатков:

сравнительно низкие пределы регулирования вследствие опасности проникновения пламени внутрь горелки;

тяжелые условия работы горелочного туннеля и прилегающих к нему частей горелки из-за концентрированного высокотемпературного сгорания;

сравнительно большие габариты горелок из-за необходимости организовать хорошее смешение газа и воздуха внутри горелки.

Эти недостатки усугубляются с повышением теплопроизводительности горелки. Поэтому на крупных инжекционных горелках приходится прибегать к водяному охлаждению носиков, чтобы облегчить условия их работы и снизить опасность проникновения пламени в горелку.

При сжигании газов с высокой теплотой сгорания указанные недостатки приобретают решающее значение, так как в туннелях инжекционных горелок развиваются весьма высокие температуры, что приводит к повышению опасности проскока пламени в горелку и снижению стойкости туннеля и горелки. Кроме того, чем выше теплота сгорания газа, тем больше габариты горелки при той же теплопроизводительности.

Недостатками инжекционных горелок являются также: необходимость высокого давления газа; невозможность работы при высоком и переменном давлении в камере сгорания; трудность перехода с одного вида топлива на другое; сложность конструкции и изготовления горелок.

Поэтому инжекционные горелки в черной металлургии находят ограниченное применение.

В некоторых особых случаях нагрева используют разновидности инжекционных горелок, в какой-то мере избавленных от перечисленных выше недостатков.

Для обеспечения высокой равномерности нагрева применяют беспламенные панельные горелки типа ГБПш, в которых газовоздушную смесь, подготовленную в инжекционном смесителе, сжигают в мелких керамических туннелях, объединенных в панели. Излучающие поверхности горелок этого типа имеют весьма равномерное распределение температур. Кроме того, раздача газовоздушной смеси через малые сечения снижает опасность проникновения пламени в горелку и повышает пределы регулирования. Однако горелки сложны по конструкции, температура применения их ограничена; они требуют весьма высокого давления газа и значительной площади стен в камере сгорания.

Если в рабочем пространстве печи имеется разрежение (например, в колпаковых печах), то можно использовать инжекционно-атмосферные горелки. В этих горелках инжектируется газом только часть необходимого воздуха, а остальной поступает за счет разрежения в рабочем пространстве. Благодаря неполной инжекции инжекционно-атмосферные горелки имеют меньшие габариты и более высокие пределы регулирования по сравнению с инжекционными горелками. В черной металлургии чаще всего применяются инжекционно-атмосферные горелки типа ИА.

При высоком давлении в рабочем пространстве, например в камерах сгорания установок для приготовления атмосфер контролируемого соста-

ва, находят применение инжекционные горелки с инжектированием газа воздухом, так называемые двухпроводные инжекционные смесители. Инжекционная система смешения в этих горелках позволяет очень точно поддерживать соотношение «газ—воздух», однако горелки требуют разводки воздуха и вентилятора высокого давления.

Особую группу горелок с предварительным смешением составляют горелки, в которых происходит полное сгорание газа и образуются струи продуктов сгорания с заданными характеристиками. В печах черной металлургии используют высокотемпературные высокоскоростные струи продуктов сгорания для скоростного нагрева и низкотемпературные продукты сгорания в низкотемпературных циркуляционных печах.

Высокотемпературные высокоскоростные струи продуктов сгорания получают, приготавливая в горелке полностью перемешанную газовоздушную смесь ($\alpha \approx 1{,}0$) и сжигая ее в керамическом или охлаждаемом металлическом туннеле. Для получения высокотемпературных струй продуктов сгорания применяют скоростные горелки типа ГВ и горелки полного предварительного смешения для безокислительного нагрева.

Низкотемпературные продукты сгорания получают путем сжигания в горелке газа с повышенным коэффициентом расхода воздуха.

Во всех горелках, предназначенных для получения высоко- и низкотемпературных продуктов сгорания, используют неинжекционный принцип смешения: газ и воздух подают принудительно, а для хорошего смешения используют те же методы, что и в горелках с улучшенным смешением.

Расчет горелок с предварительным смешением хорошо разработан только для инжекционных горелок. Горелки, использующие неинжекционный принцип смешения, так же как горелки с улучшенным смешением, как правило, не рассчитывают, а отрабатывают экспериментально.

7.1. РАСЧЕТ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК

При расчете горелок обычно известна характеристика сжигаемого газа [$Q_н^р$, $p_г$ ($P_г$), $T_г$, $\rho_{0г}$] , характеристика воздуха, поступающего на горение ($P_в$, $T_в$, $\rho_{0в}$) и α, $V_{0г}$, противодавление, равное сумме давления в печи $p_{печ}$ и сопротивления на пути подсасываемого воздуха $\Delta p_в$.

Расчет инжекционных горелок (рис. 7.1) основан на уравнении количества движения и основных уравнениях истечения газа, в соответствии с которыми различают методы расчета для газа низкого давления, когда его можно считать несжимаемым (< 20 кПа), докритического давления (< 90 кПа) и сверхкритического давления (> 90 кПа). Давление инжектируемого воздуха $P_в$ считают равным атмосферному P_0.

Порядок расчета инжекционных горелок следующий. Скорость истечения газа из сопла (м/с) определяют при давлении газа < 20 кПа:

$$\omega_{0г} = \varphi \sqrt{\frac{2T_0 P_г}{\rho_{0г} T_г P_0} p_г} \; ; \qquad (7.1)$$

при докритическом давлении газа

$$\omega_{0г} = 2{,}944\varphi P_г \sqrt{\frac{T_0}{\rho_{0г} T_г P_0}\left[\left(\frac{P_0}{P_г}\right)^{1{,}54} - \left(\frac{P_0}{P_г}\right)^{1{,}77}\right]}; \qquad (7.2)$$

при сверхкритическом давлении газа

$$\omega_{0г} = 0{,}667\varphi P_г \sqrt{\frac{T_0}{\rho_{0г} T_г P_0}}; \qquad (7.3)$$

Здесь φ — коэффициент истечения из сопла; для сходящихся сопел можно принять $\varphi = 0{,}85$.



Рис. 7.1. Расчетная схема инжекционной горелки:
1 — газовое сопло; *2* — входной конфузор; *3* — смеситель; *4* — диффузор; *5* — носик горелки

По формулам (7.1) и (7.2) построены графики (рис. 7.2), по которым можно определить скорость истечения газа из сопла в зависимости от $p_г$

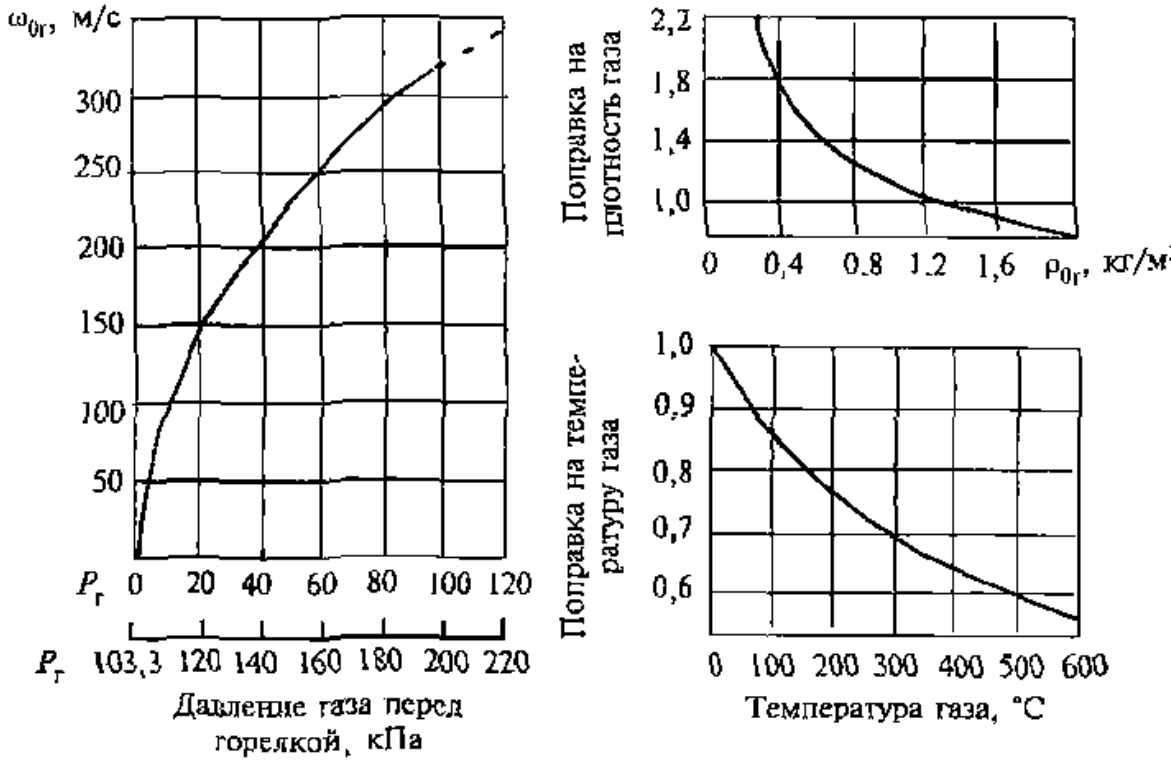


Рис. 7.2. Скорость истечения газа из сопла:
а — при $\rho_{0г} = 1{,}29$ кг/м³, $t_г = 0$°С; *б* — поправка на плотность газа; *в* — поправка на температуру газа

($P_г$). $\rho_{0г}$ и $T_г$. Сначала по графику (рис. 7.2) определяют скорость истечения газа при $\rho_{0г} = 1{,}29$ кг/м^3 и $t_г = 0$ °С, а затем полученную величину умножают на поправки на плотность и температуру газа, определяемые по графикам (рис. 7.2); φ принят равным 0,85.

Диаметр газового сопла (мм) определяют по формуле

$$d_г = \sqrt{\frac{V_{0г}\ 10^6}{0{,}785\ \omega_{0г}}}. \qquad (7.4)$$

Оптимальное отношение площадей смесителя $f_с$ и газового сопла $f_г$ можно найти из соотношения

$$F_1 = f_с/f_г = A[Bmn - C(m-1)(n-1)], \qquad (7.5)$$

где

$$A = \frac{0{,}277}{\sqrt{\left(\frac{P_0}{P_г}\right)^{1{,}54} - \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{1{,}77}}}. \qquad (7.6)$$

Значения A можно найти по графику (рис.7.3) в зависимости от давления газа $p_г$ ($P_г$) или по табл. 7.1 в зависимости от значения отношения $P_0/P_г$. Для докритического давления газа $A = 1$.

Объемную кратность инжекции m (отношение объема смеси к объему газа после истечения) определяют по формуле

$$m = 1 + \alpha L_0 \frac{T_в}{T_г}\left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{-0{,}23} = 1 + \alpha L_0 \frac{T_в}{T_1} П. \qquad (7.7)$$

Значения $П$ можно найти по графику (см. рис.7.3) в зависимости от давления газа $p_г$ ($P_г$) или по табл. 7.1 в зависимости от значения отношения $P_0/P_г$. При давлении газа < 20 кПа можно принимать $П = 1$

Массовая кратность инжекции n (отношение массы смеси к массе газа) равна

$$n = 1 + \alpha L_0(\rho_{0в}/\rho_{0г}) \qquad (7.8)$$

Коэффициент B характеризует сопротивление по пути движения газовоздушной смеси в горелке, а коэффициент C — на пути движения воздуха:

$$B = 1 + \Sigma\xi_с;\ C = 1 - \Sigma\xi_в, \qquad (7.9)$$

где $\Sigma\xi_с$ — сумма коэффициентов сопро-

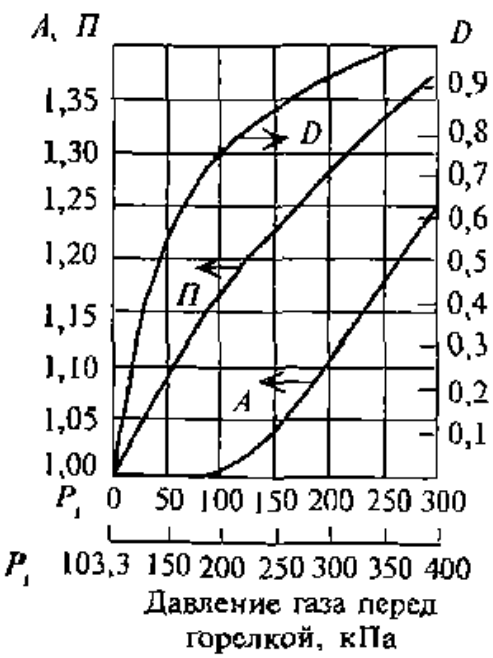


Рис. 7.3. Значения коэффициентов A, $П$ и D

Таблица 7.1

Значения коэффициентов A, П и D

$P_0/P_т$	Горючие газы, перегретый пар			Воздух		Сухой насыщенный пар	
	A	*П*	*D*	*A*	*П*	*A*	*П*
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	9,6747	2,896	1,5896	8,1161	3,737	13,9900	1,699
0,02	5,9574	2,467	1,5149	5,1600	3,057	8,0733	1,568
0,03	4,5148	2,246	1,4634	3,9817	2,723	5,8935	1,497
0,04	3,7224	2,102	1,4225	3,3272	2,509	4,7282	1,448
0,05	3,2131	1,997	1,3880	2,8995	2,353	4,0008	1,411
0,06	2,8558	1,915	1,3578	2,5976	2,234	3,5950	1,382
0,07	2,5874	1,847	1,3306	2,3699	2,138	3,1238	1,358
0,08	2,3793	1,791	1,3059	2,1931	2,058	2,8387	1,337
0,09	2,2122	1,743	1,2829	2,0485	1,990	2,6092	1,319
0,10	2,0749	1,702	1,2615	1,9311	1,931	2,4242	1,303
0,11	1,9595	1,664	1,2413	1,8311	1,879	2,2706	1,289
0,12	1,8618	1,631	1,2220	1,7455	1,833	2,1392	1,276
0,13	1,7762	1,602	1,2041	1,6716	1,791	2,0271	1,265
0,14	1,7023	1,575	1,1866	1,6076	1,753	1,9310	1,254
0,15	1,6376	1,549	1,1699	1,5513	1,719	1,8457	1,244
0,16	1,5800	1,527	1,1538	1,5006	1,688	1,7699	1,235
0,17	1,5278	1,506	1,1387	1,4557	1,659	1,7022	1,224
0,18	1,4829	1,486	1,1231	1,4157	1,632	1,6438	1,218
0,19	1,4411	1,467	1,1085	1,3792	1,607	1,5893	1,211
0,20	1,4034	1,449	1,0943	1,3458	1,584	1,5403	1,203
0,21	1,3693	1,434	1,0804	1,3156	1,561	1,4969	1,197
0,22	1,3372	1,418	1,0699	1,2879	1,541	1,4564	1,190
0,23	1,3090	1,403	1,0536	1,2623	1,522	1,4191	1,184
0,24	1,2829	1,390	1,0405	1,2393	1,504	1,3846	1,178
0,25	1,2576	1,377	1,0283	1,2184	1,486	1,3544	1,173
0,26	1,2359	1,364	1,0155	1,1989	1,470	1,3243	1,167
0,27	1,2150	1,353	1,0033	1,1805	1,453	1,2983	1,163
0,28	1,1958	1,341	0,9913	1,1640	1,439	1,2738	1,158
0,29	1,1783	1,331	0,9793	1,1480	1,425	1,2517	1,152
0,30	1,1614	1,320	0,9678	1,1335	1,410	1,2305	1,148
0,31	1,1468	1,311	0,9560	1,1206	1,398	1,2101	1,144
0,32	1,1325	1,301	0,9446	1,1078	1,385	1,1969	1,140
0,33	1,1197	1,292	0,9332	1,0963	1,373	1,1741	1,136
0,34	1,1070	1,283	0,9222	1,0856	1,361	1,1589	1,133
0,35	1,0956	1,275	0,9114	1,0759	1,350	1,1443	1,129

1	2	3	4	5	6	7	8
0,36	1,0854	1,266	0,9004	1,0666	1,339	1,1308	1,125
0,37	1,0751	1,258	0,8898	1,0583	1,329	1,1175	1,121
0,38	1,0662	1,251	0,8789	1,0508	1,318	1,1065	1,118
0,39	1,0578	1,243	0,8686	1,0444	1,309	1,0946	1,114
0,40	1,0508	1,235	0,8576	1,0374	1,299	1,0840	1,111
0,41	1,0430	1,229	0,8475	1,0321	1,290	1,0748	1,108
0,42	1,0368	1,221	0,8369	1,0256	1,282	1,0659	1,105
0,43	1,0313	1,215	0,8265	1,0216	1,273	1,0581	1,102
0,44	1,0256	1,209	0,8163	1,0172	1,265	1,0497	1,099
0,45	1,0207	1,202	0,8063	1,0136	1,256	1,0425	1,096
0,46	1,0172	1,196	0,7956	1,0104	1,248	1,0361	1,093
0,47	1,0133	1,190	0,7854	1,0075	1,241	1,0307	1,091
0,48	1,0096	1,185	0,7756	1,0052	1,234	1,0244	1,088
0,49	1,0071	1,179	0,7654	1,0030	1,226	1,0207	1,086
0,50	1,0043	1,174	0,7556	1,0020	1,219	1,0167	1,083
0,51	1,0028	1,168	0,7454	1,0008	1,212	1,0133	1,080
0,52	1,0017	1,163	0,7352	1,0003	1,205	1,0087	1,078
0,53	1,0009	1,158	0,7251	1,0000	1,199	1,0075	1,075
0,54	1,0004	1,152	0,7153	1,0000	1,192	1,0045	1,073
0,55	1,0000	1,148	0,7048	1,0000	1,187	1,0029	1,071
0,56	1,0000	1,143	0,6945	1,0000	1,180	1,0014	1,069
0,57	1,0000	1,138	0,6839	1,0000	1,174	1,0007	1,067
0,58	1,0000	1,134	0,6738	1,0000	1,169	1,0000	1,065
0,59	1,0000	1,130	0,6625	1,0000	1,163	1,0000	1,063
0,60	1,0000	1,125	0,6506	1,0000	1,157	1,0000	1,060
0,61	1,0000	1,121	0,6394	1,0000	1,151	1,0000	1,058
0,62	1,0000	1,116	0,6264	1,0000	1,146	1,0000	1,057
0,63	1,0000	1,113	0,6140	1,0000	1,141	1,0000	1,055
0,64	1,0000	1,109	0,6013	1,0000	1,136	1,0000	1,053
0,65	1,0000	1,105	0,5893	1,0000	1,131	1,0000	1,051
0,66	1,0000	1,100	0,5767	1,0000	1,126	1,0000	1,049
0,67	1,0000	1,097	0,5617	1,0000	1,121	1,0000	1,047
0,68	1,0000	1,093	0,5495	1,0000	1,116	1,0000	1,045
0,69	1,0000	1,090	0,5348	1,0000	1,112	1,0000	1,044
0,70	1,0000	1,086	0,5218	1,0000	1,107	1,0000	1,042
0,71	1,0000	1,082	0,5055	1,0000	1,103	1,0000	1,041
0,72	1,0000	1,079	0,4913	1,0000	1,099	1,0000	1,039
0,73	1,0000	1,075	0,4776	1,0000	1,094	1,0000	1,037
0,74	1,0000	1,072	0,4620	1,0000	1,090	1,0000	1,035
0,75	1,0000	1,069	0,4460	1,0000	1,086	1,0000	1,034

Продолжение табл. 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8
0,76	1,0000	1,065	0,4302	1,0000	1,081	1,0000	1,032
0,77	1,0000	1,063	0,4154	1,0000	1,078	1,0000	1,031
0,78	1,0000	1,059	0,3987	1,0000	1,073	1,0000	1,029
0,79	1,0000	1,056	0,3824	1,0000	1,070	1,0000	1,028
0,80	1,0000	1,053	0,3672	1,0000	1,066	1,0000	1,026
0,81	1,0000	1,049	0,3493	1,0000	1,062	1,0000	1,025
0,82	1,0000	1,047	0,3333	1,0000	1,058	1,0000	1,024
0,83	1,0000	1,044	0,3162	1,0000	1,055	1,0000	1,022
0,84	1,0000	1,041	0,2994	1,0000	1,051	1,0000	1,020
0,85	1,0000	1,38	0,2814	1,0000	1,047	1,0000	1,018
0,86	1,0000	1,035	0,2639	1,0000	1,044	1,0000	1,017
0,87	1,0000	1,033	0,2468	1,0000	1,041	1,0000	1,016
0,88	1,0000	1,030	0,2286	1,0000	1,037	1,0000	1,015
0,89	1,0000	1,028	0,2108	1,0000	1,034	1,0000	1,013
0,90	1,0000	1,025	0,1926	1,0000	1,031	1,0000	1,012
0,91	1,0000	1,022	0,1749	1,0000	1,028	1,0000	1,011
0,92	1,0000	1,019	0,1553	1,0000	1,024	1,0000	1,010
0,93	1,0000	1,017	0,1369	1,0000	1,020	1,0000	1,008
0,94	1,0000	1,014	0,1173	1,0000	1,018	1,0000	1,007
0,95	1,0000	1,012	0,0975	1,0000	1,015	1,0000	1,006
0,96	1,0000	1,009	0,0790	1,0000	1,012	1,0000	1,005
0,97	1,0000	1,007	0,0584	1,0000	1,009	1,0000	1,004
0,98	1,0000	1,005	0,0392	1,0000	1,006	1,0000	1,002
0,99	1,0000	1,002	0,0198	1,0000	1,003	1,0000	1,001
1,00	1,0000	1,000	0,0000	1,0000	1,000	1,0000	1,000

тивления на пути движения газовоздушной смеси в горелке, а $\Sigma\xi_в$ — то же, на пути движения воздуха.

Коэффициенты B и C зависят от конструктивного исполнения и качества изготовления горелки. Для инжекционных горелок с оптимальной конфигурацией можно принимать $B = 1{,}15$; $C = 0{,}425$.

По уравнению (7.5) построен график (рис. 7.4), по которому можно найти значение оптимального отношения площадей смесителя и газового сопла F_1 при известных значениях объемной m и массовой n кратности инжекции. При построении графика принято: $A = 1$; $B = 1{,}15$; $C = 0{,}425$.

Диаметр смесителя (мм) определяют по формуле

$$d_c = d_г\sqrt{F_1} \qquad (7.10)$$

Оптимальное отношение площадей носика горелки $f_{н.г}$ и смесителя f_c можно найти по уравнению

$$F_2 = \frac{f_{н.г}}{f_c} = \sqrt{\frac{mn(1+\xi_{н.г})\Delta p_c}{F_1(\Delta p_c - \Delta p_в - p_{печ})}}, \qquad (7.11)$$

где $\xi_{нг}$ — коэффициент сопротивления носика горелки; для горелки с носиком *оптимальной конфигурации* $\xi_{нг} = 0{,}2$; Δp_c — повышение давления в горелке, Па:

$$\Delta p_c = \varphi^2 (D/2)(P_г/F_1); \tag{7.12}$$

при докритическом давлении газа

$$D = 8{,}67[(P_0/P_г)^{0{,}77} - (P_0/P_г)]; \tag{7.13}$$

при сверхкритическом давлении газа

$$D = 1.98\sqrt{1 - \left(\frac{P_0}{P_г}\right)^{0{,}23}}. \tag{7.14}$$

Значение D можно найти по графику (см. рис. 7.3) в зависимости от давления газа $p_г$ ($P_г$) или по табл. 7.1 в зависимости от соотношения $P_0/P_г$.

При давлении газа <20 кПа можно принимать

$$\Delta p_c = \varphi^2 (P_г/F_1). \tag{7.15}$$

Значение Δp_c можно найти по графику (рис. 7.5) в зависимости от $p_г$ ($P_г$) и отношения площадей смесителя и газового сопла F_1; φ принят равным 0,85.

При отсутствии противодавления ($\Delta p_в + p_{печ} = 0$) формула (7.11) упрощается:

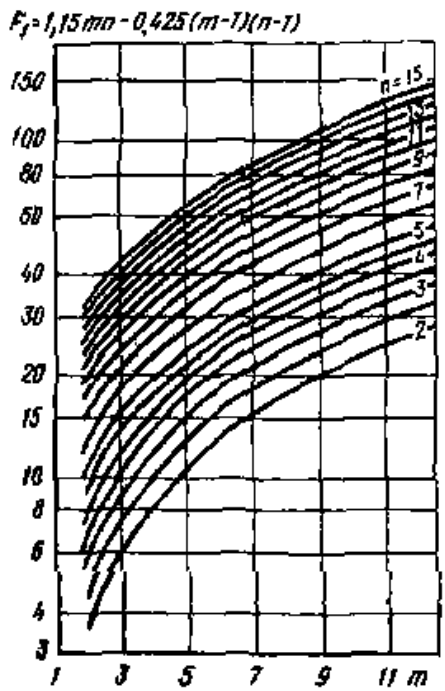


Рис. 7.4. Оптимальное отношение площадей смесителя и газового сопла

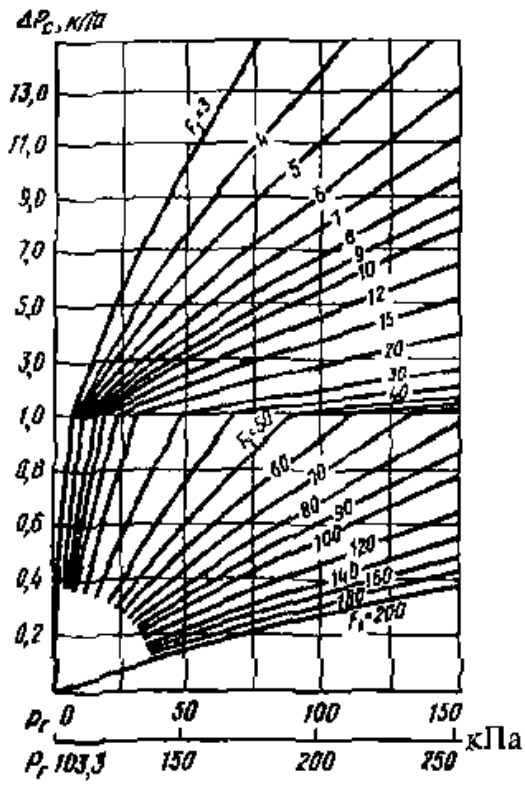


Рис. 7.5. График для определения повышения давления в горелке

$$F_2 = \sqrt{\frac{m(1+\xi_{н.г})}{F_1}}. \qquad (7.16)$$

Диаметр носика горелки (мм) определяют по формуле

$$d_{н.г} = d_c\sqrt{F_2}. \qquad (7.17)$$

Остальные конструктивные размеры инжекционных горелок, близкие к оптимальным, определяются из экспериментально найденных соотношений:

длина смесителя и диффузора, мм,

$$l_c = l_д = (4\div6)d_c; \qquad (7.18)$$

угол сужения входного конфузора $\beta_н = 30\div45°$;

длина входного конфузора, а также расстояние от среза газового сопла до начала смесителя, мм

$$l_к = (0{,}5\div1{,}5)d_c; \qquad (7.19)$$

угол раскрытия диффузора $\beta_д = 6\div9°$;

угол сужения носика горелки $\beta_{н.г} \approx 12\div15°$.

После определения геометрических размеров горелки находят скорость смеси (м/с) в носике горелки:

$$\omega_{н.г} = [V_{0г}(1 + \alpha L_0)T_{см} \cdot 10^6]/(0{,}785d^2_{н.г}T_0). \qquad (7.20)$$

Температуру смеси (К) можно найти по формуле

$$T_{см} = [T_г + T_в(m-1)]/m. \qquad (7.21)$$

При использовании холодных газа и воздуха следует иметь в виду, что за счет излучения из камеры сгорания и разогрева корпуса горелки смесь может нагреваться в горелке до 100 °С.

Затем определяют пределы регулирования горелки:

$$\vartheta = \omega_{н.г}/\omega_{пр}, \qquad (7.22)$$

где $\omega_{пр}$ — скорость проскока; определяется в зависимости от вида применяемого газа, диаметра носика горелки $d_{н.г}$ и температуры смеси $t_{см}$. По графику (рис. 7.6, *а*) определяют скорость проскока для холодной смеси, а затем полученную величину умножают на поправку на температуру смеси, которую находят по кривой на рис 7.6, *б*.

Для горелки с известными размерами можно определить величину α при заданных условиях:

$$\alpha = \frac{-M + \sqrt{M^2 + 4\frac{\rho_{0г}}{\rho_{0в}}\frac{T_г}{T_в}\Pi\left(1 - \frac{C}{B'}\right)\left(\frac{\vartheta}{B'} - 1\right)}}{2\Pi L_0\left(1 - C/B'\right)}. \qquad (7.23)$$

Здесь

$$M = (\rho_{0г}/\rho_{0в})\Pi + (T_г/T_в); \qquad (7.24)$$

$$B' = B + (1 + \xi_{н.г})/F_2^2; \qquad (7.25)$$

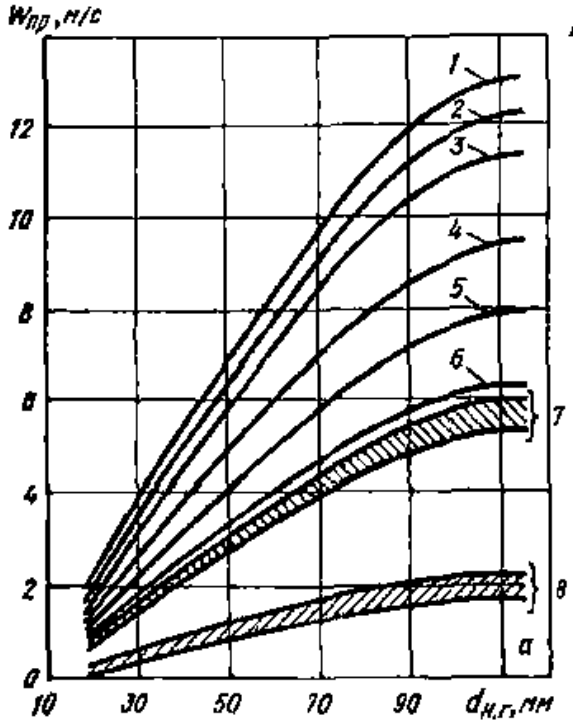


Рис. 7.6. Скорость проскока для холодной смеси (*а*):
1 — коксовый газ, $Q_н^р$ = 17,10 МДж/м³; *2* — смесь коксового и доменного газов, $Q_н^р$ = 8,40 МДж/м³; *3* — то же, $Q_н^р$ = 7,55 МДж/м³; *4* — то же, $Q_н^р$ = 6,65 МДж/м³; *5* — то же, $Q_н^р$ = 5,85 МДж/м³; *6* — то же, $Q_н^р$ = 5,05 МДж/м³; *7* — природные и попутные газы; *8* — доменные газы; *б* — поправка на температуру смеси

$$\theta = 2(F_1/A)[1 - F_1(\Delta p_в + p_н)/\varphi^2 D p_г]. \quad (7.26)$$

При давлении газа < 20 кПа можно принять

$$\theta = 2F_1 - F_1^2(\Delta p_в + p_н)/\varphi^2 p_г. \quad (7.27)$$

При отсутствии противодавления ($\Delta p_в + p_п = 0$)

$$\theta = 2F_1. \quad (7.28)$$

Для инжекционных горелок с оптимальными размерами значение коэффициента расхода воздуха можно определить по графикам (рис 7.7) в зависимости от характеристики применяемого газа и воздуха, величины противодавления $\Delta p_в + p_п$ и отношения диаметров смесителя и газового сопла $d_с/d_г$. При построении графика принято $П = 1$, что справедливо для низкого давления газа. Однако и при высоком давлении газа расчет по графикам на рис. 7.7 дает достаточную точность.

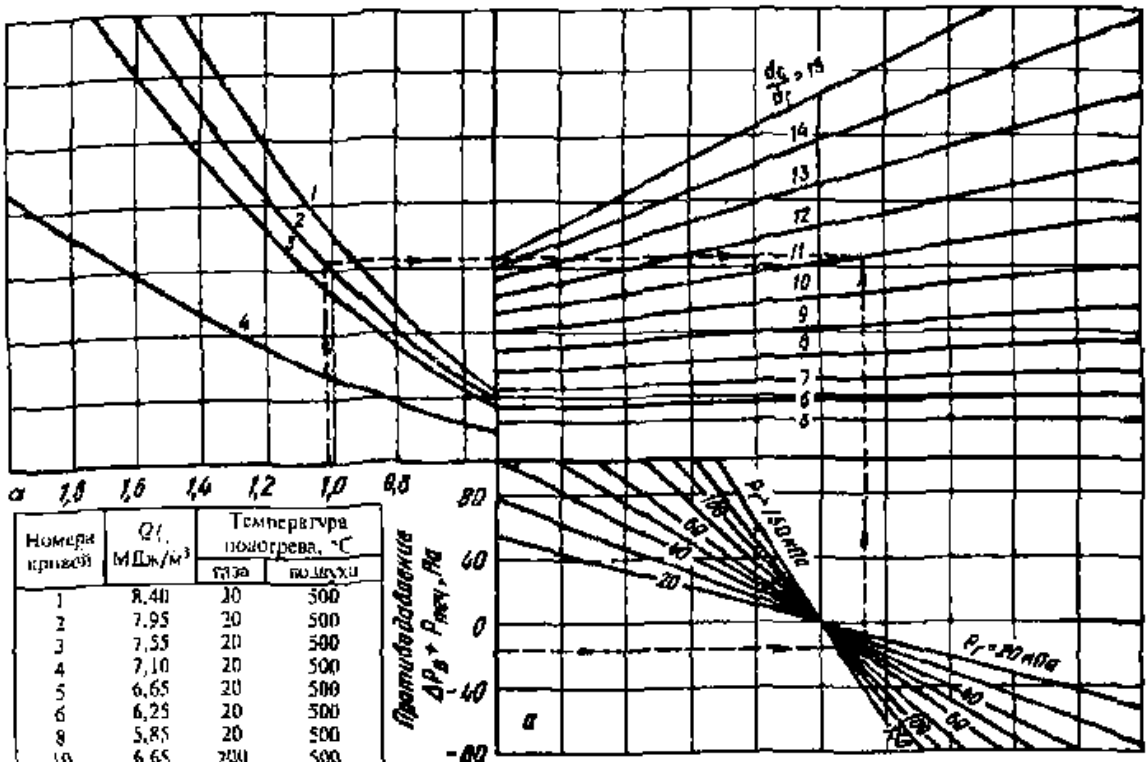
Пример. Рассчитать инжекционную горелку для сжигания $V_{0г}$=0.005 м³/с природного газа с $Q_н^р$ = 34,95 МДж/м³; $p_г$ = 50 кПа ($P_г$ = 153,3 кПа). Газ и воздух холодные (20 °С), α = 1,05; давление в печи $p_п$ = 30 Па.

По рис. 1-21 приложения 1 находим $\rho_{0г}$ = 0,77 кг/м³, L_0 = 9,25 м³/м³ газа.

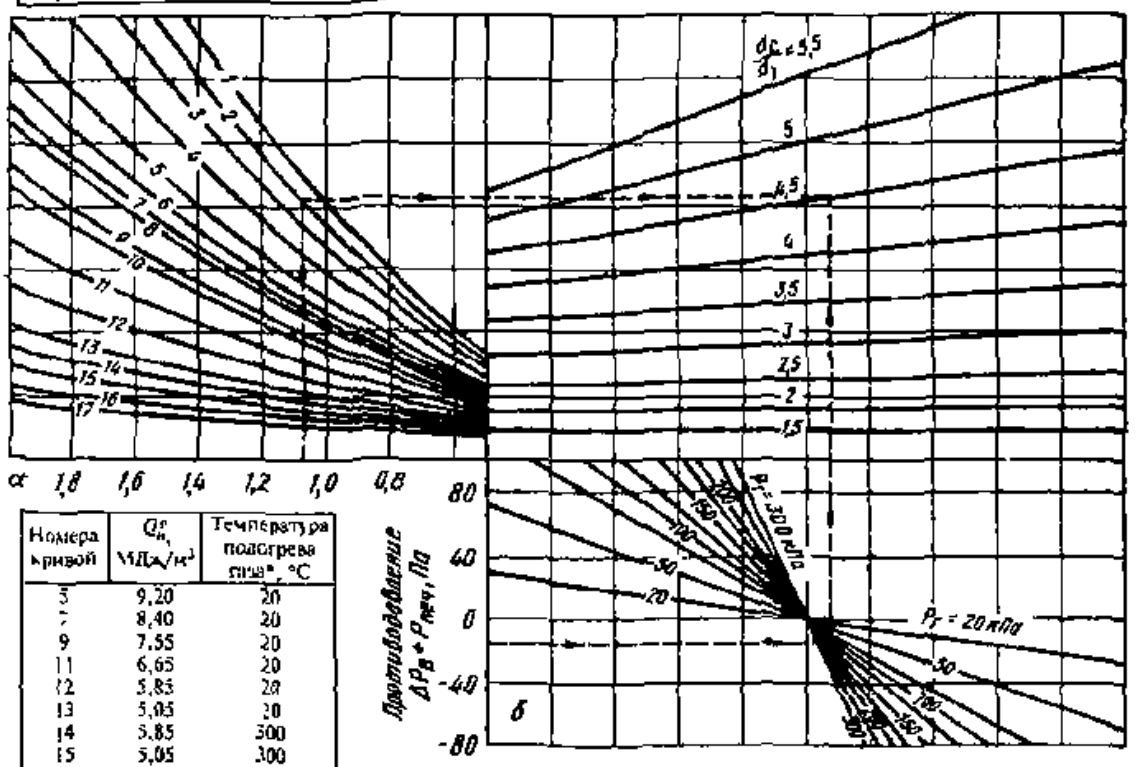
По графику на рис. 7.2, *а* находим скорость истечения газа при его давлении 50 кПа 226 м/с; при $t_г$ = 20 °С поправка на температуру равна 0,965 (см. рис. 7.2, *б*), поправка на плотность (см. рис. 7.2, *в*) при $\rho_{0г}$ = 0,77 кг/м³ равна 1,29:

$$\omega_{0г} = 226 \cdot 0{,}965 \cdot 1{,}29 = 282 \text{ м/с}.$$

Диаметр газового сопла по формуле (7.4)



Номера кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	Температура подогрева, °С	
		газа	воздуха
1	8,40	20	500
2	7,95	20	500
3	7,55	20	500
4	7,10	20	500
5	6,65	20	500
6	6,25	20	500
8	5,85	20	500
10	6,65	200	500
11	5,85	200	500
15	3,75	300	600



Номера кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	Температура подогрева газа*, °С
5	9,20	20
7	8,40	20
9	7,55	20
11	6,65	20
12	5,85	20
13	5,05	20
14	5,85	300
15	5,05	300
16	3,75	20
17	3,75	300

* Воздух холодный (20°С)

Рис. 7.7. Характеристика инжекционных горелок с оптимальными размерами: *а* — для газов с высокой теплотой сгорания ($Q_н^р$, МДж/м³), *б* — для газов с низкой теплотой сгорания; *1* — природный газ (34,95); *2* — смесь природного и коксового газов (30,20); *3* — то же (26,85); *4* — коксовый газ (17,16)

$$d_г = \sqrt{\frac{0,005 \cdot 106}{0,785 \cdot 282}} = 4,8 \text{ мм}.$$

Объемная кратность инжекции по формуле (7.7)

$$m = 1 + 1,05 \cdot 9,25(293/293)1,093 = 11,6,$$

где значение $П = 1,093$ взято по графику (см. рис. 7.3) при $p_г = 50$ кПа.

Массовая кратность инжекции по формуле (7.8)

$$n = 1 + 1,05 \cdot 9,25 \cdot 1,29 : 0,77 = 17,3.$$

Оптимаяьное отношение площадей смесителя и газового сопла по формуле (7.5) при $A = 1$

$$F_1 = 1,15 \cdot 11,6 \cdot 17,3 - 0,425 \cdot 10,6 \cdot 16,3 = 157.$$

Значение F_1 можно найти также по графику (см рис. 7.4).

Диаметр смесителя по формуле (7.10)

$$d_с = 4,8\sqrt{157} = 60 \text{ мм}.$$

Повышение давления в горелке по формуле (7.12)

$$\Delta p_с = 0,85^2(0,55/2) \cdot (153300/157) = 197 \text{ Па}.$$

где значение $D = 0,55$ взято по графику (см. рис.7.3) при $p_г = 50$ кПа.

Значение $\Delta p_с$ можно найти также по графику (см. рис. 7.5).

Оптимальное отношение площадей носика горелки и смесителя по формуле (7.11)

$$F_2 = \sqrt{\frac{11,6 \cdot 17,3(1+0,2)}{157} \cdot \frac{197}{197-30}} = 1,345.$$

По формуле (7.17)

$$d_{нг} = 60\sqrt{1,345} = 70 \text{ мм}.$$

По формуле (7.18)

$$l_с = l_д = 4d_с = 4 \cdot 60 = 240 \text{ мм}.$$

По формуле (7.19)

$$l_к = 1,25d_с = 1,25 \cdot 60 = 75 \text{ мм}.$$

На том же расстоянии размещаем срез газового сопла.

Угол сужения входного конфузора принимаем $\beta_к = 42°$

Начальный диаметр входного конфузора

$$d_к = d_с + 2l_к\text{tg}(\beta_к/2) = 60 + 2 \cdot 75\text{tg}(42/2) = 118 \text{ мм}$$

Принимаем $\beta_д = 7°$.

Конечный диаметр диффузора

$$d_д = d_с + 2l_д\text{tg}(\beta_д/2) = 60 + 2 \cdot 240\text{tg}(7/2) = 90 \text{ мм}.$$

Принимаем $\beta_{нг} = 14°$.

Тогда

$$l_{н.г} = (d_д - d_{н.г})/2\text{tg}(\beta_{н.г}/2) = (90 - 75)/2\text{tg}(14/2) = 60 \text{ мм}.$$

Скорость смеси в носике горелки (принимаем подогрев смеси до $t_{см} = 10$ °С) по формуле (7.20)

$$\omega_{н.г} = \frac{0,005(1+1,05\cdot9,25)373\cdot10^6}{0,785\cdot70^2\cdot273} = 19 \text{ м/с}.$$

Пределы регулирования горелки по формуле (7.22)

$$\vartheta = 19 : 4,2 : 2,0 = 2,3,$$

где скорость проскока холодной смеси взята по графику для природного газа при $d_{н.г} = 70$ мм (см. рис. 7.6, *а*), а поправка на температуру — по графику при температуре смеси 100 °С (см. рис. 7.6, *б*).

7.2. ВЫБОР И ПЕРЕРАСЧЕТ НОРМАЛИЗОВАННЫХ ГОРЕЛОК

Все нормализованные горелки имеют оптимальные размеры и рассчитаны для работы на оптимальном режиме.

В табл. 7.2 приведены внутренние размеры нормализованных инжекционных горелок типов Н, П и В, которые были рассчитаны по приведенной выше методике. Линейные размеры выражены через диаметр смесителя $d_с$.

Таблица 7.2

Внутренние размеры* нормализованных инжекционных горелок конструкции Стальпроекта

Тип горелки	$d_к$	$d_{т.}$	$d_{н.г}$	$l_к$	$l_с$	$l_д$	$l_г$	$l_{н.г}$	$l_ц$	Угол, град.		
										$\beta_к$	$\beta_д$	$\beta_{н.г}$
Н	1,77	1,24	1	1	4	2	0,4	1	0,08—0,2	42	7	14
П	1,77	1,49	1	1	4	4	—	2	0,02—0,1	42	7	14
В	1,96	1,55	1,25	1,25	4,15	4,45	0,5	1	0,1—0,25	42	7	14

* Все линейные размеры выражены в долях диаметра смесителя $d_с$.

Для выбора нормализованных горелок и диаметров сопел к ним построены графики пропускной способности горелок по газу и составлены таблицы диаметров газовых сопел (см следующие разделы). Однако по этим графикам и таблицам можно выбрать горелку и диаметр газового сопла к ней только при тех параметрах газа и воздуха, коэффициентах расхода воздуха и противодавлениях, которые указаны на соответствующих графиках и таблицах.

Если условия работы инжекционной горелки отличаются от принятых для нормализованных горелок, то необходимо выполнить расчет по указанной выше методике расчета инжекционных горелок. При этом следует иметь в виду, что у нормализованных горелок можно менять только диаметр газового сопла $d_с$, а соотношение размеров смесителя и носика горелки, характеризуемое величиной F_2, уже выбрано. Поэтому отношение $f_с/f_т$ здесь следует определять по формуле

$$F_1 = \frac{f_c}{f_г} = \frac{A\left[B'mn - C(m-1)(n-1)\right]}{1 + \sqrt{1 - 2A\dfrac{\Delta p_в + p_п}{\varphi^2 DP_г}\left[B'mn - C(m-1)(n-1)\right]}}. \qquad (7.29)$$

где B' определяют по формуле (7.25).

При давлении газа < 20 кПа можно принимать

$$F_1 = \frac{B'mn - C(m-1)(n-1)}{1 + \sqrt{1 - \dfrac{\Delta p_в + p_п}{\varphi^2 P_г}\left[B'mn - C(m-1)(n-1)\right]}}. \qquad (7.30)$$

При отсутствии противодавления ($\Delta p_в + p_п = 0$) формула упрощается:

$$F_1 = \frac{B'mn - C(m-1)(n-1)}{2}. \qquad (7.31)$$

Как видно из табл. 7.2, нормализованные горелки для газов с низкой теплотой сгорания (типа Н и П) имеют $d_{н.г} = d_c$, откуда $F_2 = 1{,}0$ и $B' = 2{,}35$, а в нормализованных горелках для газов с высокой теплотой сгорания (тип В) $d_{н.г} = 1{,}25d_c$, откуда $F_2 = 1{,}56$ и $B' = 1{,}65$.

Определив диаметр смесителя горелки по формуле (7.10), подбирают ближайший подходящий диаметр смесителя нормализованной горелки, предназначенной для работы с такой же примерно теплотой сгорания газа и такими же параметрами воздуха. После этого уточняют диаметр газового сопла, мм:

$$d_г = d_c / \sqrt{F_1}, \qquad (7.32)$$

где d_c — диаметр смесителя выбранной нормализованной горелки.

Затем уточняют пропускную способность горелки по газу, м/с:

$$V_{0г} = 0{,}785 \cdot 10^{-6} \omega_{0г} d_г^2. \qquad (7.33)$$

Если нужно перевести нормализованную горелку на работу в условиях, отличающихся от тех, на которые она была рассчитана, то следует изменить диаметр газового сопла. Определив по формулам (7.29—7.31) отношение F_1 для новых условий работы, находят по формуле (7.32) необходимый диаметр газового сопла, а затем по формуле (7.33) — пропускную способность горелки по газу. Если расчетная пропускная способность горелки по газу не удовлетворяет заданной, то, задаваясь различными значениями давления газа перед горелкой, пересчет ведут до совпадения расчетной пропускной способности горелки по газу с заданной.

Примеры подбора и пересчета нормализованных горелок приведены при описании конкретных типов горелок в последующих разделах.

7.3. ИНЖЕКЦИОННЫЕ ГОРЕЛКИ ТИПА Н

Инжекционные горелки типа Н, разработанные Стальпроектом, предназначенные для сжигания доменного и смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р$ = 3,75÷9,20 МДж/м³. Горелки этого типа работают на холодном воздухе и холодном или подогретом (для газов с $Q_н^р$ < 5,85 МДж/м³) газе до 300 °С.

Разработано 20 типоразмеров горелок с диаметром носика от 15 до 235 мм.

Инжекционные горелки типа Н, выполняемые из литых деталей, показаны на рис. 7.8, их конструктивные размеры приведены в табл. 7.3.

Горелки с $d_{н.г}$ ≤ 75 мм (рис. 7.8, *а,в*) выполняют с неводоохлаждаемыми носиками. Их крепят на фланце к облицовке печи. Горелки с $d_{н.г}$ > 75 мм (рис. 7.8, *г*) выполняют с разъемным корпусом, водоохлаждаемым носиком и специальным кронштейном для крепления к каркасу печи. При $d_{н.г}$ ≤ ≤ 37 мм (рис 7.8, *а*) газовое сопло присоединяют на резьбе, в остальных горелках — на фланце. Газопровод к горелкам с $d_{н.г}$ ≤ 56 мм (рис. 7.8, *а, б*) крепят на резьбе, к остальным горелкам — на фланце.

Для присоединения газопровода к горелкам с $d_{н.г}$ > 56 мм (рис. 7.8, *в, г*) разработана серия колен. Установка горелки типа Н с коленом показана на рис 7.9. Колена для инжекционных горелок показаны на рис. 7.10, а их конструктивные размеры приведены в табл. 7.4.

Обозначение горелки состоит из индекса типа горелки, цифры, обозначающей диаметр носика горелки (мм), и через косую — цифры, обозначающей диаметр газового сопла $d_г$ (мм). Например, обозначение инжекционной горелки Н-75/31 означает: инжекционная горелка типа Н для холодного воздуха и холодного или подогретого газа низкой теплоты сгорания, имеющая диаметр носика горелки 75 мм и диаметр газового сопла 31 мм.

Выбор типоразмера инжекционной горелки типа Н осуществляется по графику (рис. 7.11). График построен для горелки с $d_{н.г}$=100 мм. Для горелок с другими значениями $d_{н.г}$ пропускную способность по газу вычисляют умножением величины, полученной по графику (см. рис 7.11), на поправочный коэффициент (табл. 7.5).

Необходимый диаметр газового сопла в зависимости от выбранного типоразмера горелки и характеристики применяемого газа можно определить по табл. 7.6. Диаметры газовых сопел рассчитаны для сжигания газа с α = 1,05 при давлении в камере сгорания не более ± 20 Па.

Выбор и пересчет инжекционной горелки типа Н иллюстрированы следующими примерами.

Пример 1. Подобрать инжекционную горелку типа Н для сжигания 0,07 м³/с газа с $Q_н^р$ = 7,35 МДж/м³. Газ холодный; давление газа перед горелкой 20 кПа.

По графику (см. рис. 7.11) определяем пропускную способность по газу горелки Н100 для применяемого газа при заданном давлении: она равна 0,16 м³/с. Отношение заданной пропускной способности к пропускной способности горелки Н100 составит 0,07 : 0,16 = 0,43. По табл. 7.5 находим,

Таблица 7.3

Конструктивные размеры (мм)* инжекционных горелок типа Н (рис. 7.8)

Обозначение горелки	$d_{нг}$	$d_г$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	d	d_1	d_2	H	h	h_1	K	L	L_1	L_2	L_3	L_4	l	l_1	Число отверстий n	Масса горелки, кг
Н15/$d_г$	15	4,0–9,2	60	15	30	71	–	–	3/4"	М12	–	120	80	–	110	220	195	25	101	44	–	–	–	5,1
Н18/$d_г$	*18*	*4,5–11,0*	*60*	*18*	*30*	*71*	–	–	3/4"	М12	–	120	80	–	110	245	220	25	101	44	–	–	–	5,7
Н21/$d_г$	21	5,5–13,0	60	21	35	86	–	–	1"	М12	–	120	80	–	130	275	250	25	110	44	–	–	–	6,3
Н24/$d_г$	24	6,5–14,5	80	24	40	86	–	–	1"	М16	–	140	100	–	130	305	265	40	110	48	–	–	–	9,5
Н28/$d_г$	28	7,5–17,0	80	28	40	111	–	–	1 1/4"	М16	–	140	100	–	160	340	300	40	114	48	–	–	–	10,6
Н32/$d_г$	32	8,5–19,5	80	32	45	111	–	–	1 1/4"	М16	–	140	100	–	160	375	335	40	114	48	–	–	–	11,1
Н37/$d_г$	37	10,0–22,5	100	37	50	111	–	–	1 1/4"	М16	–	160	120	–	160	420	365	55	114	52	–	–	–	14,0
Н42/$d_г$	42	11–26	100	42	55	147	–	–	2"	М16	–	160	120	–	195	480	425	55	142	52	–	–	–	17,0
Н48/$d_г$	48	13–29	120	48	65	147	–	–	2"	М16	–	180	140	–	195	530	460	70	142	56	–	–	–	23,6
Н56/$d_г$	56	15–34	120	56	70	147	–	–	2"	М16	–	180	140	–	195	600	530	70	142	56	–	–	–	27,4
Н65/$d_г$	65	17–40	140	65	85	175	160	200	75	М16	17	210	170	20	260	760	660	100	275	56	–	–	4	44,6
Н75/$d_г$	75	20–46	140	75	95	175	160	200	75	М16	17	210	170	20	260	845	745	100	265	56	–	–	4	44,7
Н86/$d_г$	86	23–52	220	86	105	230	180	220	100	1/2"	17	145	40	22	305	990	185	200	190	130	90	55	8	81,3
Н100/$d_г$	100	27–61	260	100	120	210	180	220	100	1/2"	17	150	40	22	305	1110	255	200	190	130	90	55	8	97,5
Н116/$d_г$	116	31–71	300	116	135	235	210	250	125	1/2"	17	200	50	22	330	1250	290	240	220	160	110	65	8	128
Н134/$d_г$	134	36–82	350	134	155	300	240	285	150	3/4"	22	200	50	24	420	1435	380	240	220	160	110	65	8	190
Н154/$d_г$	154	41–94	410	154	175	300	240	285	150	3/4"	22	250	50	24	420	1595	435	280	260	200	150	65	8	258
Н178/$d_г$	178	48–109	470	178	200	335	295	340	200	1"	22	250	55	26	470	1840	550	280	260	200	150	65	8	343
Н205/$d_г$	205	55–126	490	205	230	435	350	395	250	1"	22	280	70	28	610	2120	640	300	280	220	170	65	12	500
Н235/$d_г$	235	64–144	510	235	260	435	350	395	250	1"	22	280	70	28	610	2365	805	300	280	220	170	65	12	531

* *Кроме указанных особо.*

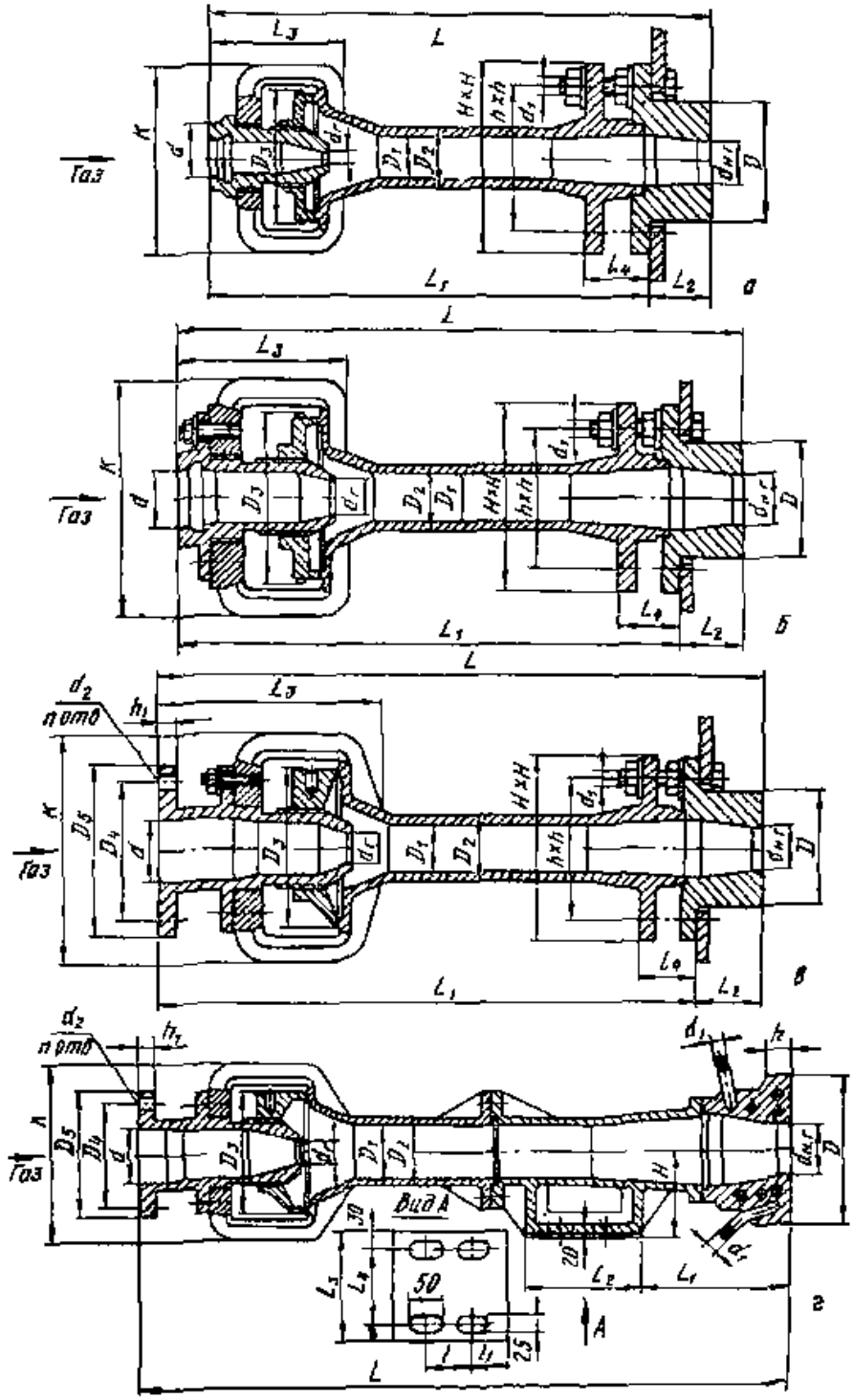


Рис. 7.8. Инжекционные горелки типа Н:
а – $d_{нг}$ = 15÷37 мм; *б* – $d_{нг}$ = 42÷56 мм; *в* – $d_{нг}$ = 65÷75 мм; *г* – $d_{нг}$ = 86÷235 мм

что этому соотношению соответствует горелка Н65. По табл. 7.6 находим диаметр газового сопла к горелке Н65 для применяемого газа (24 мм). Таким образом, выбираем горелку Н65/24.

Пример 2. Подобрать горелку для сжигания $V_{0г}$ = 0,09 м³/с водяного газа с $Q_н^р$ = 10,1 МДж/м³; $\rho_{0г}$ = 0,71 кг/м³; L_0 = 2,12 м³/м³ газа, $p_с$ = 20 кПа ($P_с$ = 123,3 кПа); $t_г$ = $t_в$ = 20 °С; α = 1,05, противодавление $\Delta p_в + p_п$ = 0

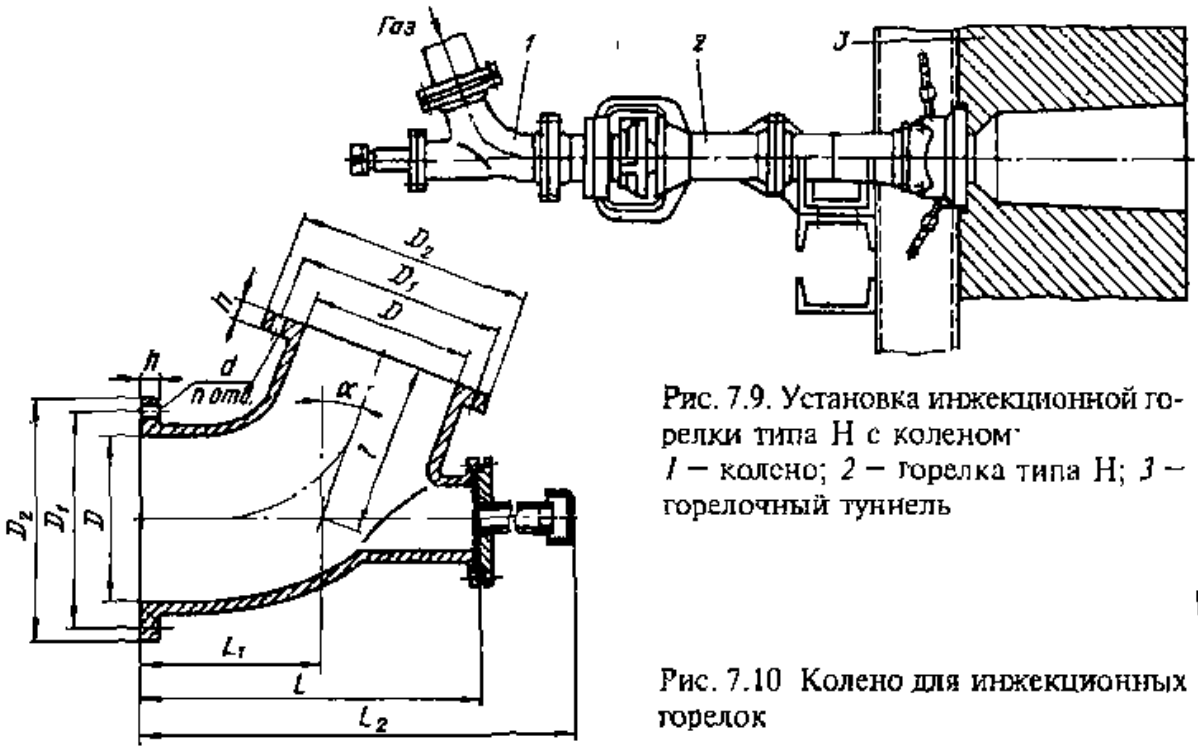


Рис. 7.9. Установка инжекционной горелки типа Н с коленом:
1 – колено; *2* – горелка типа Н; *3* – горелочный туннель

Рис. 7.10 Колено для инжекционных горелок

Таблица 7.4

Конструктивные размеры (мм) колен для инжекционных горелок (рис. 7.10)

$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	d	h	L	L_1	L_2	l	Число отверстий n	Масса колена, кг
65; 75	75	160	200	18	20	310	150	470	180	4	20
86. 100	100	180	220	18	22	360	180	520	190	8	25
116	125	210	250	18	22	390	200	550	200	8	31
134; 154	250	240	285	23	24	420	210	580	210	8	54
178	200	295	340	23	26	500	240	660	300	8	73
205; 235	250	350	395	23	28	600	325	760	325	12	101
270	300	395	435	23	28	620	325	780	325	12	142

Примечание. Каждое колено выполнено в двух вариантах: α = 12° и α = 20°.

Таблица 7.5

Поправочный коэффициент для определения пропускной способности инжекционных горелок

$d_{н.г}$, мм	Поправочный коэффициент	$d_{н.г}$, мм	Поправочный коэффициент	$d_{н.г}$, мм	Поправочный коэффициент
15	0,0225	42	0,176	116	1,35
18	0.0324	48	0,230	134	1,80
21	0.0441	56	0,314	154	2,37
24	0,0576	65	0,422	178	3,17
28	0,0784	75	0,562	205	4,20
32	0,102	86	0,740	235	5,52
37	0,137	100	1,00	270	7,29

Таблица 7 6

Диаметры газовых сопел (мм) для инжекционных горелок типа Н

$d_{пр}$, мм	Холодный (20 °С) газ с теплотой сгорания, МДж/м³													Подогретый до 300 °С газ с теплотой сгорания, МДж/м³				
	3,75	4,10	5,05	5,45	5,85	6,25	6,65	7,10	7,55	7,95	8,40	8,80	9,20	3,75	4,10	5,05	5,45	5,85
15	8	7,7	6,8	6,4	6	5,8	5,5	5,2	4,8	4,6	4,4	4,2	4	9,2	8,8	7,7	7,4	7
18	9,8	9,2	8	7,7	7,2	6,8	6,4	6,2	5,8	5,5	5,2	5	4,8	11	10,5	9,2	8,8	8,5
21	11,5	11	9,5	9	8,5	8	7,5	7	7	6,5	6	6	5,5	13	12,5	11	10,5	10
24	13	12,5	10,5	10	9,5	9	8,5	8	8	7,5	7	7	6,5	14,5	14	12,5	12	11,5
28	15	14,5	12,5	11,5	11	10,5	10	9,5	9	8,5	8,5	8	7,5	17	16,5	14,5	14	13
32	17,5	16,5	14	13,5	13	12	11,5	11	10,5	10	9,5	9	8,5	19,5	19	16,5	16	15
37	20	19	16,5	15,5	15	14	13,5	12,5	12	11,5	11	10,5	10	22,4	21,5	19	18	17,5
42	23	22	19	18	17	16	15	14,5	13,5	13	12,5	12	11	26	25	22	21	20
48	26	25	21,5	20	19	18	17,5	16,5	15,5	15	14	13,5	13	29	28	25	24	23
56	30	29	25	24	22,5	21	20	19	18	17,5	16,5	15,5	15	34	33	29	27	26
65	35	34	29	28	27	25	24	22	21	20	19	18	17	40	38	34	32	31
75	41	39	33	31	30	29	27	25	24	23	22	21	20	46	44	39	37	35
86	47	45	38	36	34	32	31	29	28	27	25	24	23	52	50	45	42	40
100	54	52	45	42	40	38	36	34	32	31	29	28	27	61	59	52	49	47
116	63	60	52	49	46	44	42	40	38	36	34	32	31	71	68	60	57	55
134	73	69	60	56	53	50	48	45	43	41	39	37	36	82	79	69	66	63
154	84	80	69	66	62	59	56	53	50	48	45	43	41	94	91	80	76	73
178	97	92	79	75	71	67	64	61	58	55	52	50	48	109	104	92	88	84
205	111	105	91	86	82	78	74	70	67	64	61	58	55	126	121	105	100	97
235	128	121	105	100	94	89	85	80	76	73	70	67	64	144	138	121	116	111

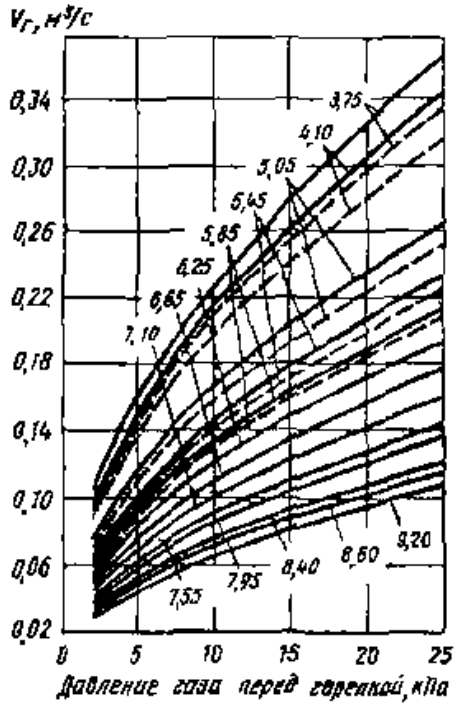


Рис. 7.11 Пропускная способность по газу инжекционной горелки типа Н с диаметром носика $d_{н.г} = 100$ мм при $\alpha = 1{,}05$ (цифры на кривых $Q_н^р$, МДж/м³)

По формуле (7.1)

$$\omega_{0г} = 0{,}85\sqrt{\frac{2\cdot 273\,123{,}3}{0{,}71\cdot 293\cdot 103{,}3}20000} = 213 \text{ м/с}.$$

По формуле (7.4)

$$d_г' = \sqrt{\frac{0{,}09\cdot 10^6}{0{,}785\cdot 213}} = 23 \text{ мм}.$$

По формуле (7.7)

$$m = 1 + 1{,}05\cdot 2{,}12(293/293) = 3{,}23.$$

По формуле (7.8)

$$n = 1 + 1{,}05\cdot 2{,}12(1{,}29/0{,}71) = 5{,}04.$$

По формуле (7.31)

$$F_1 = (2{,}35\cdot 3{,}23\cdot 5{,}0 - 40{,}425\cdot 2{,}23\cdot 4{,}04)/2 = 17{,}2.$$

По формуле (7.10)

$$d_с' = 23\sqrt{17{,}2} = 95{,}4 \text{ мм}.$$

Принимаем ближайшую горелку типа Н $d_{н.г} = 100$ мм ($d_с = 100$ мм) и производим уточненный расчет.

По формуле (7.32)

$$d_г = 100\sqrt{17{,}2} = 24 \text{ мм}.$$

По формуле (7.33)

$$V_{0г} = 0{,}785\cdot 10^{-6}\cdot 213\cdot 24^2 = 0{,}096 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Скорость смеси (м/с) в носике горелки (принимаем температуру смеси $t_{см} = 100$ °С) по формуле (7.20)

$$\omega_{н.г} = \frac{0{,}096(1+1{,}05\cdot 2{,}12)373\cdot 10^6}{0{,}785\cdot 100^2\cdot 273} = 53{,}9.$$

Принимаем, что скорость проскока для водяного газа такая же, как для смешанного газа с теплотой сгорания 8,4 МДж/м³. Тогда по графику на рис. 7.6, *а* для этого газа при $d_{н.г} = 100$ мм скорость проскока 11,7 м/с, а по графику на рис. 7.6, *б* при температуре смеси 100 °С поправка на температуру 2,0.

Пределы регулирования горелки по формуле (7.22)

$$\vartheta = 53{,}9 : 11{,}7 : 2{,}0 = 2{,}3.$$

7.4. ИНЖЕКЦИОННЫЕ ГОРЕЛКИ ТИПА П

Инжекционные горелки типа П, разработанные Стальпроектом, предназначены для сжигания доменного и смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р = 3{,}75 \div 8{,}40$ МДж/м^3. Горелки могут работать на подогретом воздухе и на холодном или подогретом газе.

Разработано 11 типоразмеров горелок с диаметром носика от 65 до 270 мм.

Инжекционные горелки типа П показаны на рис. 7.12, а их конструктивные размеры приведены в табл. 7.7.

Горелки выполнены из литых деталей.

Для крепления горелок типа П к металлоконструкциям каркаса печи применяют опорные стойки, для присоединения газопровода — колена, а для присоединения футерованного изнутри воздухопровода — дроссельные клапаны типа ДГ. Установка горелки типа П с опорной стойкой, коленом и дроссельным клапаном показана на рис. 7.13.

Опорные стойки для горелок типа П показаны на рис. 7.14, а их конструктивные размеры приведены в табл. 7.8.

Колена для присоединения газопровода к горелкам типа П применяют те же, что и для горелок типа Н (см. рис. 7.10 и табл. 7.4).

Дроссельные клапаны для горелок типа П показаны на рис. 7.15, а их конструктивные размеры приведены в табл. 7.9.

Обозначение горелки состоит из индекса типа горелки, диаметра

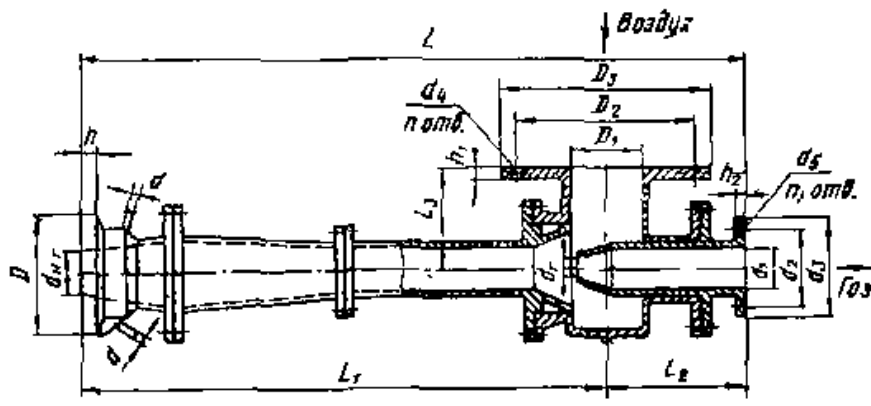


Рис. 7.12. Инжекционные горелки типа П

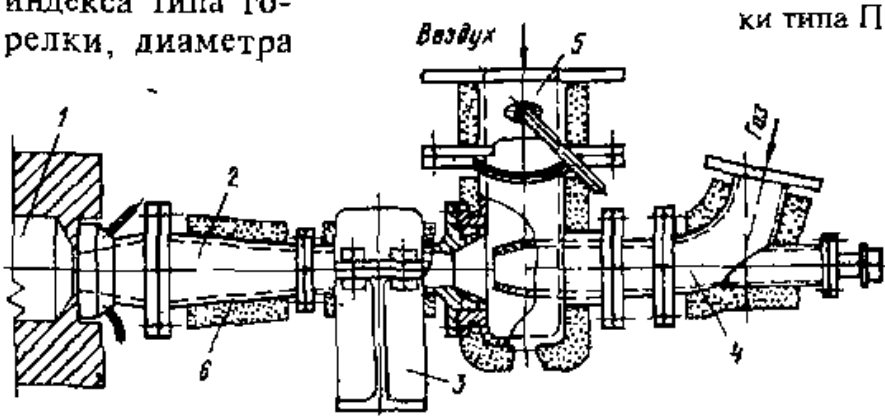


Рис. 7.13. Установка инжекционной горелки типа П с опорной стойкой, коленом и дроссельным клапаном:
1 — горелочный туннель, *2* — инжекционная горелка типа П; *3* — опорная стойка; *4* — колено; *5* — дроссельный клапан; *6* — изоляция

Таблица 7.7

Конструктивные размеры (мм)* инжекционных горелок типа П (рис. 7.12)

Обозначение горелки	$d_{н.г}$	$d_г$	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	L	L_1	L_2	L_3	h	h_1	h_2	Число отверстий n	Число отверстий n_1	Масса горелки, кг
П65/$d_г$	65	14–37	170	125	360	400	3/8"	75	160	200	18	18	1035	785	250	200	32	24	20	12	4	113,4
П75/$d_г$	75	16–45	190	125	360	400	3/8"	75	160	200	18	18	1145	895	250	200	32	24	20	12	4	122,0
П86/$d_г$	*86*	*18–50*	*220*	*200*	*445*	*490*	1/2"	*100*	*180*	*220*	*23*	*18*	*1360*	*1035*	*325*	*230*	*40*	*26*	*22*	*12*	*8*	*206,0*
П100/$d_г$	100	22–57	260	200	445	490	1/2"	100	180	220	23	18	1530	1205	325	230	40	26	22	12	8	227,0
П116/$d_г$	116	25–67	300	250	495	540	1/2"	125	210	250	23	18	1740	1395	345	250	50	28	22	16	8	282,0
П134/$d_г$	134	29–77	350	300	655	705	3/4"	150	240	285	25	23	2000	1615	385	280	50	30	24	20	8	429,0
П154/$d_г$	154	33–89	410	300	655	705	3/4"	150	240	285	25	23	2245	1860	385	280	50	30	24	20	8	489,0
П178/$d_г$	178	39–100	470	350	705	755	1"	200	295	340	25	23	2585	2145	440	350	55	32	26	20	8	697,0
П205/$d_г$	205	44–115	490	350	705	755	1"	250	350	395	25	23	2915	2475	440	350	65	32	28	20	12	920,0
П235/$d_г$	235	50–132	510	350	705	755	1"	250	350	395	25	23	3290	2850	440	350	70	32	28	20	12	925,0
П270/$d_г$	270	57–152	510	450	550	590	1"	300	395	435	23	23	3695	3230	465	460	70	36	28	16	12	1062,0

* Кроме указанных особо.

Таблица 7.8

Конструктивные размеры (мм) опорных стоек для инжекционных горелок типа П (рис. 7.14)

$d_{н.г}$, мм	D	d	H	H_1	h	L	L_1	l	l_1	Масса стойки, кг
65	94	19	250	330	24	155	230	105	180	20,0
75	103	24	250	340	24	165	270	105	210	26,0
86	118	26	270	370	26	180	290	120	230	36,0
100	132	26	270	375	26	200	300	130	240	38,0
116	150	26	290	405	28	240	320	160	260	50,0
134	170	28	310	440	30	240	370	160	300	58,0
154	190	28	310	450	30	300	390	200	310	81,0
178	216	28	350	505	30	300	430	200	350	95,0
205	244	28	350	515	30	300	450	200	370	98,0
235	278	28	350	534	30	300	480	200	400	100,0
270	314	28	350	552	30	300	530	200	450	109,0

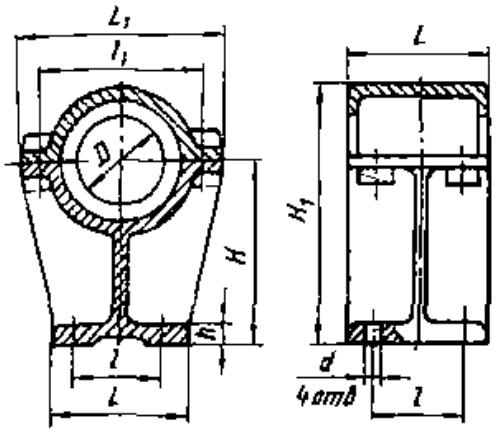


Рис. 7.14 Опорная стойка для инжекционных горелок типа П

носика горелки (мм) и через косую — шифры, обозначающей диаметр газового сопла (мм), например, П134/55 означает: инжекционная горелка типа П для подогретого воздуха и холодного или подогретого газа низкой теплоты сгорания, имеющая диаметр носика горелки 134 мм и диаметр газового сопла 34 мм.

Выбор типоразмера инжекционной горелки типа П при $d_{н.г} = 100$ мм производят по графику (рис. 7.16).

При $d_{н.г} \neq 100$ мм пропускную способность по газу вычисляют умножением величины, полученной по графику (см. рис. 7.16), на поправочный коэффициент (см. табл. 7,5).

Необходимый диаметр газового сопла можно определить в зависимости от выбранного типоразмера горелки и характеристики применяемого газа и воздуха по табл. 7.10.

Диаметры газовых сопел рассчитаны для сжигания газа с $\alpha = 0{,}9$ и 1,0 при давлении в камере сгорания не

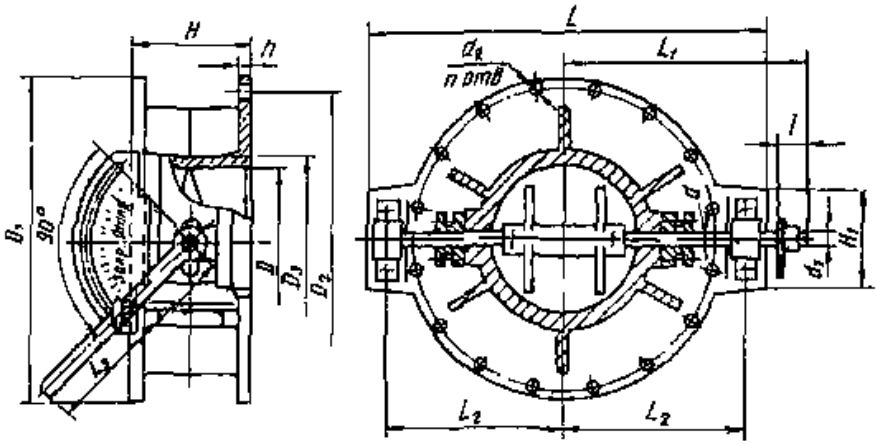


Рис 7.15. Дроссельный клапан для инжекционных горелок типа П

Таблица 7.9

Конструктивные размеры дроссельных клапанов (мм) для инжекционных горелок типа П (рис. 7.15)

$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	d_2	H	H_1	h	L	L_1	L_2	L_3	l	Число отверстий n	Проходное сечение при открытом клапане, м²	Масс клап на, к
65; 75	125	400	360	145	20	16	18	200	130	18	520	310	230	350	30	12	0,0077	49
86; 100	200	490	445	224	25	20	23	200	150	20	610	365	275	350	40	12	0,0223	77
116	250	540	495	274	25	20	23	200	150	20	660	390	300	350	40	16	0,0388	97
134; 154	300	705	655	332	30	25	25	250	—	20	—	410	280	370	50	20	0,0537	152
178, 205; 235	350	755	705	382	30	25	25	250	—	22	—	435	305	370	50	20	0,0791	166
270	450	590	550	482	30	25	23	250	150	24	800	470	370	370	50	16	0,0137	113

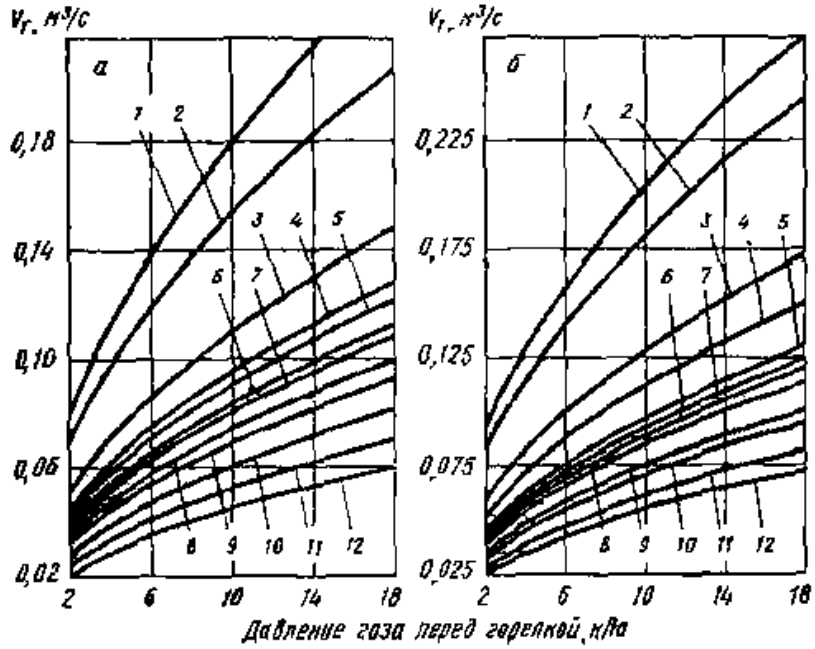


Рис. 7 16. Пропускная способность по газу инжекционной горелки типа П с диаметром иосика $d_{н.г}$ = 100 мм: *а* – при α = 1,0, *б* – при α = 0,9

Номер кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	Температура подогрева, °С		Номер кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	Температура подогрева, °С	
		газа	воздуха			газа	воздуха
1	3,75	300	600	*7*	6,65	200	500
2	4,10	300	600	*8*	6,25	20	500
3	5,45	200	500	*9*	6,65	20	500
4	5,85	200	500	*10*	7,10	20	500
5	6,25	200	500	*11*	7,55	20	500
6	5,85	20	500	*12*	8,40	20	500

более ± 20 кПа и сопротивлении на пути подогретого воздуха, равном 2,5 скоростных напора во входном сечении коробки смесителя.

Выбор и пересчет инжекционной горелки типа П можно показать на следующих примерах.

Пример 1. Определить пропускную способность инжекционной горелки П86 при сжигании доменного газа с $Q_н^р$ = 4,0 МДж/м³; $t_г$ = 300 °С; $t_в$ = 600°С.

Давление газа перед горелкой 10 кПа, α = 1,0.

По графику (см. рис. 7.16, *а*) определяем пропускную способность горелки П100 для заданных условий (0,17 м³/с). По табл. 7.5 для горелки с $d_{н.г}$ = 86 мм поправочный коэффициент равен 0,74. Таким образом, пропускная способность по газу горелки П86 0,17×0,74 = 0,126 м³/с.

По табл. 7.10 находим, что в данных условиях для горелки П86 необходимо газовое сопло диаметром 46 мм

Пример 2. Пересчитать горелку типа П, $d_{н.г}$ = 100 мм (диаметр смесителя $d_с$ = 100 мм) для сжигания генераторного газа с $Q_н^р$ = 5,45 МДж/м³; $\rho_{0г}$ = 1,11 кг/м³; L_0 = 1,13 м³/м³ газа; $t_г$ = 200 °С; $t_в$ = 500 °С; $p_г$ =15 кПа ($P_г$ = 118,3 кПа); α = 1,05; сопротивление на пути воздуха $\Delta p_в$ = 150 Па; давление в печи $p_п$ = 30 Па.

По формуле (7.1)

Таблица 7.10

Диаметры газовых сопел (мм) для инжекционных горелок типа П

$d_{н.п}$	Диаметры при температурах подогрева, °С, для газов с теплотой сгорания, МДж/м³												
	$t_в = 600$, $t_г = 300$		$t_в = 500$, $t_г = 200$				$t_в = 500$, $t_г = 20$						
	3,75	4,10	5,45	5,85	6,25	6,65	5,85	6,25	6,65	7,10	7,55	7,95	8,40
						$\alpha = 1$							
65	35	32	26	24	23	21	19	18	17	16	15	14	14
75	40	37	30	28	26	24	23	21	21	19	18	17	16
86	46	43	34	32	31	29	26	24	24	22	20	20	18
100	54	50	40	37	36	34	31	29	28	26	24	22	22
116	63	59	47	44	41	38	36	34	32	30	28	27	25
134	73	67	55	51	48	45	42	39	37	35	33	31	29
154	84	77	62	58	55	51	48	45	42	40	37	35	33
178	95	90	71	67	63	59	55	52	49	47	44	42	39
205	109	98	82	76	71	67	63	60	56	53	50	47	44
235	125	115	92	87	82	76	71	67	63	60	56	53	50
270	144	132	106	100	94	87	82	77	73	69	64	61	57
						$\alpha = 0,9$							
65	37	35	28	26	24	23	21	20	19	18	17	16	15
75	43	40	32	30	28	26	24	23	22	21	19	18	17
86	50	46	37	34	32	31	28	26	26	24	22	22	20
100	57	54	43	40	37	36	32	31	29	28	26	24	24
116	67	63	50	47	44	41	38	36	34	32	30	28	27
134	77	73	58	55	51	48	45	42	40	37	35	33	31
154	89	84	67	62	58	55	51	48	45	43	40	39	37
178	100	95	76	71	67	63	59	55	52	49	47	44	42
205	115	109	87	82	76	71	67	63	60	56	53	50	47
235	132	125	98	92	87	82	76	71	67	66	60	58	56
270	152	144	113	106	100	94	87	82	77	73	69	67	64

$$\omega_{0г} = 0,85\sqrt{\frac{2 \cdot 273 \cdot 118,3}{1,11 \cdot 473 \cdot 103,3} 15000} = 141 \text{ м/с}.$$

По формуле (7.7)

$$m = 1 + 1,05 \cdot 1,13 \cdot 773 : 473 = 2,94.$$

По формуле (7.8)

$$n = 1 + 1,05 \cdot 1,13 \cdot 1,29 \cdot 1,11 = 2,38.$$

По формуле (7.30)

$$F_1 = \frac{2,35\ 2.94 \cdot 2,38 - 0,425 \cdot 1,94 \cdot 1,38}{1 + \sqrt{1 - \frac{150 + 30}{0,85^2 \cdot 15000}(2,35 \cdot 2,94 \cdot 2,38 - 0,425 \cdot 1,94 \cdot 1,38)}} = 8,2.$$

По формуле (7.32)

$$d_г = 100 \cdot \sqrt{8,2} = 35 \text{ мм}.$$

По формуле (7.33)

$$V_{0г} = 0,785 \cdot 10^{-6} \cdot 141 \cdot 35^2 = 0,136 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По формуле (7.21)

$$t_{см} = [473 + 773(2.94 - 1)]/2.94 = 398°\text{C}.$$

По формуле (7.20)

$$\omega_{п г} = [0,136(1 + 1,05 \cdot 1,13)671 \cdot 10^6]/(0,785 \cdot 100^2 \cdot 273) = 93,1 \text{ м/с}.$$

Принимаем, что скорость проскока для генераторного газа такая же, как для смеси коксового и доменного газов с теплотой сгорания 5,45 МДж/м^3. По графику (рис. 7.6, *а*) для этого газа при $d_{п г} = 100$ мм скорость проскока 6,85 м/с, а по графику (рис. 7 6,*б*) при температуре смеси 398 °С поправка на температуру 7,7.

Пределы регулирования горелки по формуле (7.22)

$$\theta = 93,1 : 6,85 : 7,7 = 1,77.$$

7.5. ИНЖЕКЦИОННЫЕ ГОРЕЛКИ ТИПА В И ВП

Инжекционные горелки типа В и ВП, разработанные Стальпроектом, предназначены для сжигания природного, коксового, смесей природного и коксового, а также других газов с высокой теплотой сгорания. Горелки работают на холодном воздухе и холодном газе. Горелки типа ВП отличаются от горелок типа В только поворотом смесителя.

Разработано 20 типоразмеров горелок с $d_{п г} = 15$–235 мм.

Инжекционные горелки типа В и ВП показаны на рис. 7.17, а их конструктивные размеры приведены в табл. 7.11.

Горелки выполнены из литых деталей.

Горелки типов В и ВП с $d_{п г} \le 75$ мм (рис. 7.17, *а, б*) выполняют с неводоохлаждаемым носиком. Их крепят на фланце к облицовке печи. Газовое сопло присоединяют к горелке на резьбе.

Горелки типов В и ВП с $d_{п г} > 75$ мм (рис. 7.17. *в, г*) выполняют с разъемным корпусом, водоохлаждаемым носиком и специальным кронштейном для крепления к каркасу печи. Газовое сопло присоединяют к горелке на фланце.

Газопровод ко всем горелкам присоединяют на резьбе.

Обозначение горелки включает индекс типа горелки, диаметр носика горелки (мм) и через косую диаметр газового сопла (мм). Например, горелка ВП 32/2.0 означает: инжекционная горелка типа ВП для газов с высокой теплотой сгорания с поворотом смесителя, имеющая диаметр носика 32 и диаметр газового сопла 2,0 мм.

Выбор типоразмера инжекционных горелок типа В и ВП осуществляют по графику (рис.7 18), на котором дана зависимость пропускной способности горелки по газу от его давления для горелки типа В (рис. 7.18, *а*) и типа ВП (рис 7.18, *б*) с $d_{п г} = 100$ мм при $\alpha = 1,05$. При другом диаметре

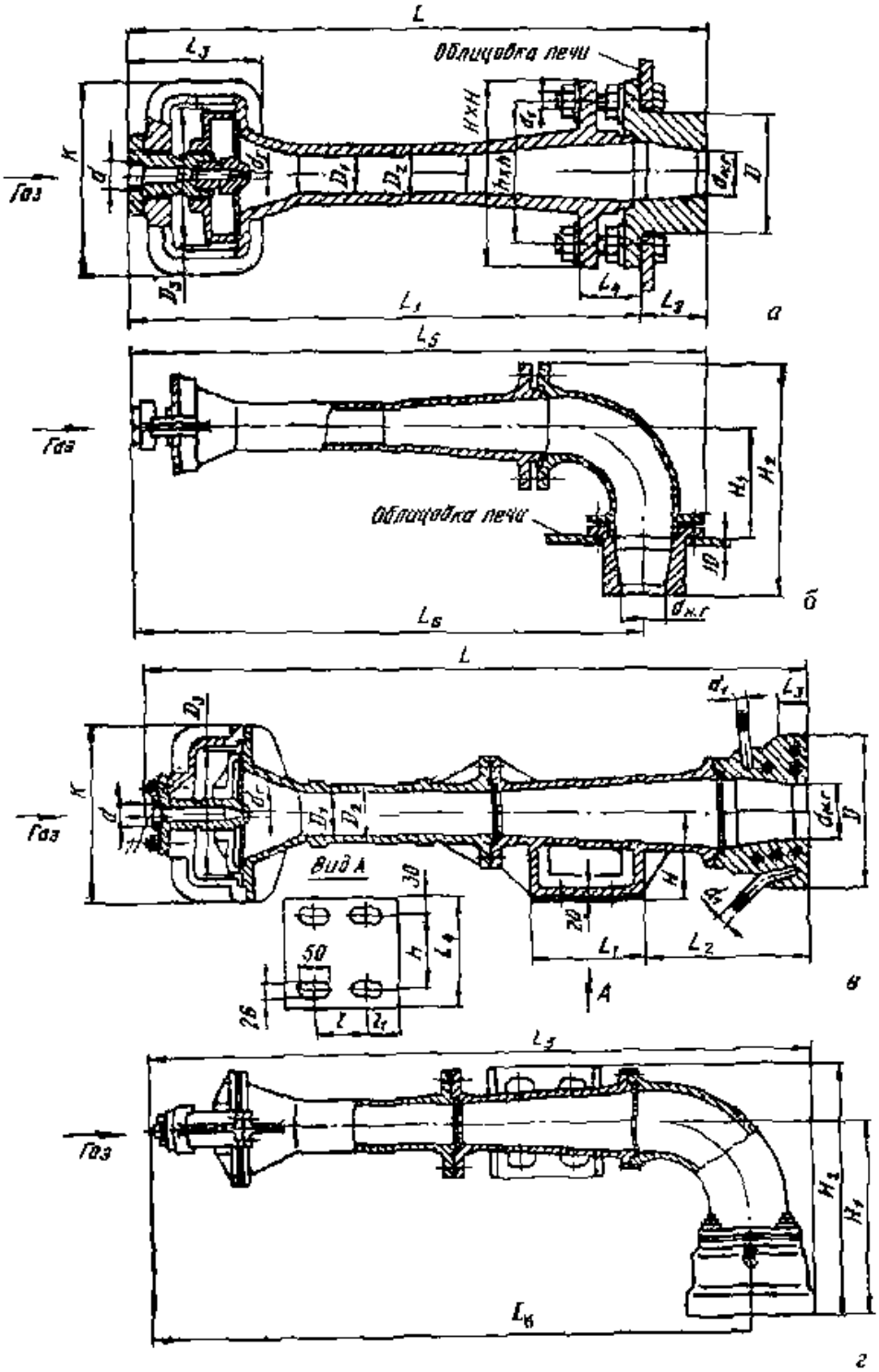


Рис 7.17. Инжекционные горелки типа В и ВП:
а и б – соответственно типа В и ВП с $d_{г.т}$ от 15 до 75 мм; *в и г* – соответственно типа В и ВП с $d_{н.г}$ от 86 до 235 мм

носика пропускную способность по газу вычисляют умножением величины, полученной по графику (см. рис. 7.18), на поправочный коэффициент, который берут из табл. 7.5.

Диаметр газового сопла можно определить в зависимости от выбран-

Таблица 7.11

Конструктивные размеры (мм)* инжекционных горелок типа В и ВП (рис. 7.17)

$d_н$,	d_1	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	H	H_1	H_2	h	K	L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	l	l_1	Масса горелки, кг	
																						В	ВП
15	0,9–1,6	60	12	25	66	$^1/_2$"	M12	120	90	175	80	110	220	195	25	94	44	323	263	–	–	5,0	8,4
18	1,1–2,0	60	15	30	66	$^1/_2$"	M12	120	90	175	80	110	250	225	25	94	44	353	293	–	–	5,3	8,5
21	1,2–2,3	60	17	30	66	$^1/_2$"	M12	120	90	175	80	110	275	250	25	94	44	378	318	–	–	5,6	9,0
24	1,4–2,6	80	19	35	86	$^1/_2$"	M16	140	106	216	100	135	300	260	40	96	48	416	346	–	–	9,0	13,5
28	1,6–3,0	80	23	40	86	$^1/_2$"	M16	140	106	216	100	135	335	295	40	96	48	451	381	–	–	9,5	14,0
32	2,0–3,5	80	26	40	86	$^1/_2$"	M16	140	106	216	100	135	375	335	40	96	48	491	421	–	–	9,8	14,8
37	2,1–4,0	100	30	45	116	$^1/_2$"	M16	160	128	263	120	165	440	385	55	113	52	569	489	–	–	14,3	21,8
42	2,4–4,5	100	34	50	116	$^1/_2$"	M16	160	128	263	120	165	490	435	55	113	52	619	539	–	–	14,8	22,8
48	2,8–5,2	120	39	55	116	$^1/_2$"	M16	180	150	310	140	165	545	475	70	113	56	687	597	–	–	21,0	31,0
56	3,2–6,1	120	45	60	166	$^3/_4$"	M16	180	150	310	140	215	625	555	70	113	56	767	677	–	–	26,0	37,0
65	3,8–7,0	140	53	70	166	$^3/_4$"	M16	210	170	375	170	215	700	600	100	113	56	857	752	–	–	33,5	49,0
75	4,4–8,1	140	61	80	166	$^3/_4$"	M16	210	190	395	170	215	800	700	100	113	56	967	862	–	–	35,2	51,2
86	5,0–9,3	220	70	90	207	1"	$^1/_2$"	145	338	433	130	285	960	200	185	40	190	1136	1026	90	55	64,0	78,0
100	5,8–10,8	260	81	100	207	1"	$^1/_2$"	150	383	478	130	285	1095	200	255	40	190	1296	1166	90	55	82,0	97,2
116	6,7–12,6	300	94	115	242	$1^1/_4$"	$^1/_2$"	200	428	538	160	330	1240	240	290	50	220	1466	1316	110	65	111,0	133,0
134	7,7–14,5	350	108	130	267	$1^1/_4$"	$^3/_4$"	200	473	583	160	360	1420	240	380	50	220	1666	1491	110	65	152,0	180,0
154	8,9–16,7	410	125	145	297	$1^1/_2$"	1"	250	528	658	200	410	1615	280	435	50	260	1896	1691	150	65	218,0	251,0
178	10,4–19,3	470	145	165	345	$1^1/_2$"	1"	250	558	688	200	475	1840	280	550	55	260	2121	1886	150	65	250,0	289,0
205	11,9–22,2	490	166	190	390	2"	1"	280	593	733	220	555	2130	300	640	70	280	2386	2141	170	65	359,0	410,0
235	13,6–25,4	510	190	215	440	2"	1"	280	633	773	220	605	2400	300	805	70	280	2626	2371	170	65	421,0	478,0

* Кроме указанных особо.

ного типоразмера горелки и характеристики применяемого газа по табл. 7.12. Диаметры газовых сопел рассчитаны на сжигание газа с $\alpha = 1{,}05$ и при давлении в камере сгорания не более ± 20 Па. Во избежание засорения сопел с $d \le 2$ мм газ должен быть сухим и чистым.

Выбор и пересчет инжекционных горелок типа В и ВП иллюстрированы следующими примерами.

Пример 1 Подобрать инжекционную горелку типа ВП для сжигания 0,05 м³/с природного газа с $Q_н^р = 34{,}95$ МДж/м³. Давление газа перед горелкой 70 кПа.

По графику (см. рис. 7.18, *б*) определяем пропускную способность по газу горелки ВП 100 для применяемого газа при заданном давлении (0,009 м³/с). Отношение заданной пропускной способности к пропускной способности горелки ВП 100 составит 0,05 0,009 = 5,56. По табл. 7,5 находим, что этому отношению соответствует горелка ВП 235. По табл. 7.12 находим диаметр газового сопла к горелке ВП 235 для применяемого газа (13,6 мм). Таким образом, выбираем горелку ВП 235/13,6.

Пример 2. Пересчитать горелку типа В с $d_{н.г} = 100$ мм ($d_с = 80$ мм), предназначенную для работы на смеси природного и коксового газов с $Q_н^р = 26{,}85$ МДж/м³ при нулевом давлении в камере сгорания на работу при давлении в камере сгорания $p_п = 50$ Па. $p_г = 40$ Па ($P_г = 143{,}3$ Па); $t_г = t_в = 20$ °С; $\alpha = 1{,}05$.

По рис. 1-18 приложения 1 находим $\rho_{0г} = 0{,}605$ кг/м³ и $L_0 = 6{,}87$ м³/м³ газа.

По формуле (7.7)

$$m = 1 + 1{,}05 \cdot 6{,}87(293/293)1{,}078 = 8{,}78,$$

где значение П взято по графику (рис. 7.3) при $p_г = 40$ Па.

По формуле (7 8)

$$n = 1 + 1{,}05 \cdot 6{,}87\ (1{,}29/0{,}605) = 16{,}38.$$

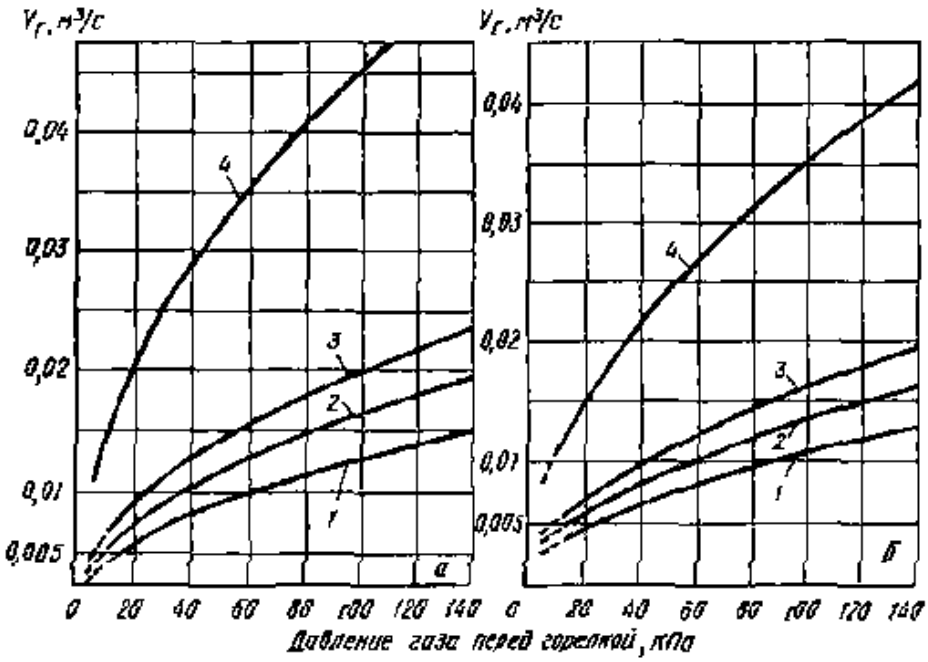


Рис. 7 18. Пропускная способность инжекционной горелки $d_{н.г} = 100$ мм типа В (*а*) и типа ВП (*б*) при $\alpha = 1{,}05$ по газам ($Q_н^р$, МДж/м³): *1* — природный газ (34,95); *2* — смесь природного и коксового газов (*30, 20*), *3* — то же (26,85); *4* — коксовый газ (17,10)

Таблица 7.12

Диаметры газовых сопел (мм) для инжекционных горелок типа В и ВЛ

$d_{н.г}$	Природный газ, $Q_н^р$ = 34,95 МДж/м³		Смесь природного и коксового газов				Коксовый газ $Q_н^р$ = 34,95 МДж/м³	
			$Q_н^р$ = 34,95 МДж/м³		$Q_н^р$ = 34,95 МДж/м³			
	В	ВП	В	ВП	В	ВП	В	ВП
15	1,0	0,9	1,1	0,9	1,3	1,0	1,6	1,4
18	1,2	1,1	1,3	1,2	1,4	1,2	2,0	1,7
21	1,4	1,2	1,5	1,3	1,6	1,4	2,3	2,0
24	1,6	1,4	1,7	1,5	1,8	1,6	2,6	2,2
28	1,8	1,6	2,0	1,8	2,1	1,9	3,0	2,7
32	2,1	2,0	2,3	2,2	2,4	2,3	3,5	3,2
37	2,4	2,1	2,6	2,3	2,8	2,5	4,0	3,5
42	2,7	2,4	3,0	2,6	3,2	2,8	4,5	3,9
48	3,1	2,8	3,4	3,0	3,6	3,2	5,2	4,5
56	3,6	3,2	4,0	3,5	4,2	3,7	6,1	5,2
65	4,2	3,8	4,6	4,1	4,9	4,4	7,0	6,1
75	4,8	4,4	5,3	4,7	5,7	5,0	8,1	7,0
86	5,5	5,0	6,1	5,5	6,5	5,8	9,3	8,1
100	6,4	5,8	7,1	6,3	7,6	6,7	10,8	9,3
116	7,5	6,7	8,2	7,3	8,8	7,8	12,6	10,8
134	8,6	7,7	9,5	8,4	10,2	8,9	14,5	12,5
154	9,9	8,9	10,9	9,8	11,7	10,3	16,7	14,4
178	11,4	10,4	12,6	11,2	13,5	12,0	19,3	16,7
205	13,2	11,9	14,5	13,0	15,6	13,7	22,2	19,1
235	15,1	13,6	16,6	14,8	17,8	15,7	25,4	21,9

По формуле (7.31) при нулевом давлении в камере сгорания

$$F_1 = \frac{1{,}65 \cdot 8{,}78 \cdot 16{,}38 - 0{,}425 \cdot 7.78 \cdot 15{,}38}{2} = 93{,}2.$$

По формуле (7.32)

$$d_г = 80 : \sqrt{93{,}2} = 8{,}3 \text{ мм}.$$

Отношение площадей смесителя и газового сопла при $p_{печ} = 50$ Па по формуле (7.29)

$$F_1' = \frac{1{,}65 \cdot 8{,}78 \cdot 16{,}38 - \rightarrow}{1 + \sqrt{1 - 2\dfrac{50}{0{,}85^2 \cdot 0{,}48 \cdot 143300} \times}}$$

$$\rightarrow \frac{- 0{,}425 \cdot 7{,}78 \cdot 15{,}38}{\times (1{,}65 \cdot 8{,}78 \cdot 16{,}38 - 0{,}425 \cdot 7.78 \cdot 15{,}38)} = 102{,}4,$$

где значение $D = 0{,}48$ взято по графику на рис. 7.3 при $p_г = 40$ кПа.

Диаметр газового сопла в этом случае

$$d_г' = 8{,}0 : \sqrt{102{,}4} = 7{,}9.$$

Снижение пропускной способности горелки по газу при давлении в камере сгорания составляет согласно формуле (7.33)

$$V'_{0г} / V_{0г} = (d'_г / d_г)^2 = (7{,}9/8{,}3)^2 = 0{,}91.$$

Если необходимо сохранить пропускную способность горелки, то следует повысить давление газа перед горелкой, работающей при давлении в камере сгорания.

Согласно формулам 7.2 и 7.33 это повышение должно составлять

$$p'_г = p_г(V_{0г} / V'_{0г}) = 1{,}09\ p_г.$$

Характеристики работы инжекционных горелок типа В и особенности развития их факелов исследованы во ВНИИМТ и подробно описаны в работе [1].

Коэффициент истечения из сопла φ зависит от типоразмера горелки. Зависимость φ от диаметра сопла, подсчитанная по известному профилю сопел, при номинальной тепловой нагрузке практически совпадает с зависимостью, найденной опытным путем из соотношения действительной и *теоретической скоростей истечения* (*рис.* 7.19).

При снижении тепловой нагрузки до определенной величины и соответствующем снижении скорости выхода газовоздушной смеси, последняя становится меньше скорости распространения пламени. При этом происходит проскок пламени в смеситель, резкое сокращение коэффициента расхода воздуха и перегрев корпуса горелки. Предельно минимальные скорости истечения смеси, при которых происходит проскок пламени, показаны на рис. 7.20.

Во избежание проскока пламени в смеситель нельзя допускать снижения давления газа перед соплом ниже величины, указанной на рис. 7.21, *а*.

Таким образом, коэффициент рабочего регулирования инжекционных горелок типа В непостоянный, он уменьшается при увеличении типоразмера горелок и зависит от способа охлаждения его носика (рис. 7.21, *б*)

Начальный угол раскрытия факела инжекционных горелок приблизительно равен 22 ≈ 26°.

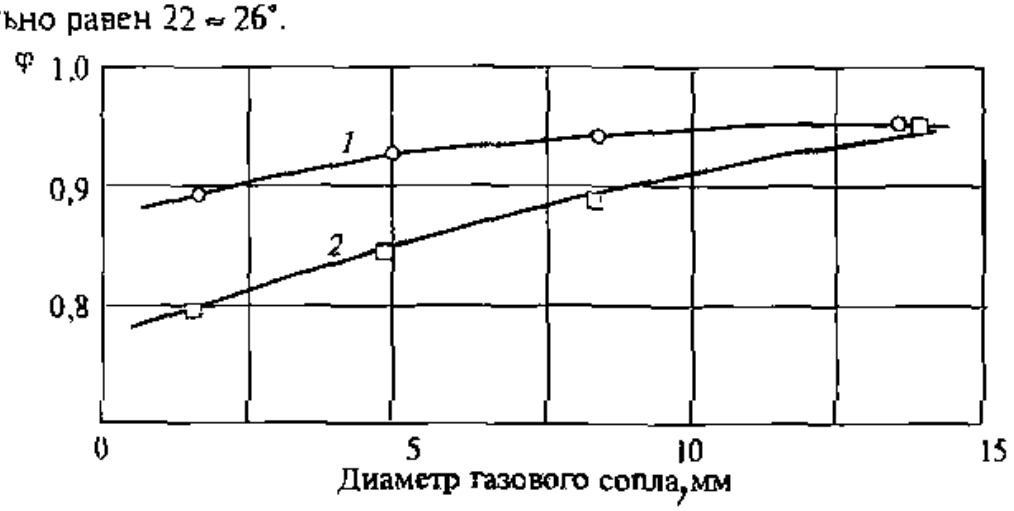


Рис. 7.19. Коэффициент истечения φ сопел инжекционных горелок Стальпроекта типа В:

1 — при номинальной тепловой нагрузке; 2 — при нагрузке 50 % от номинальной



Рис. 7.20. Зависимость видимой скорости распространения пламени инжекционных горелок типа В от диаметра носика: *1* — при водяном охлаждении, *2* — то же, без охлаждения

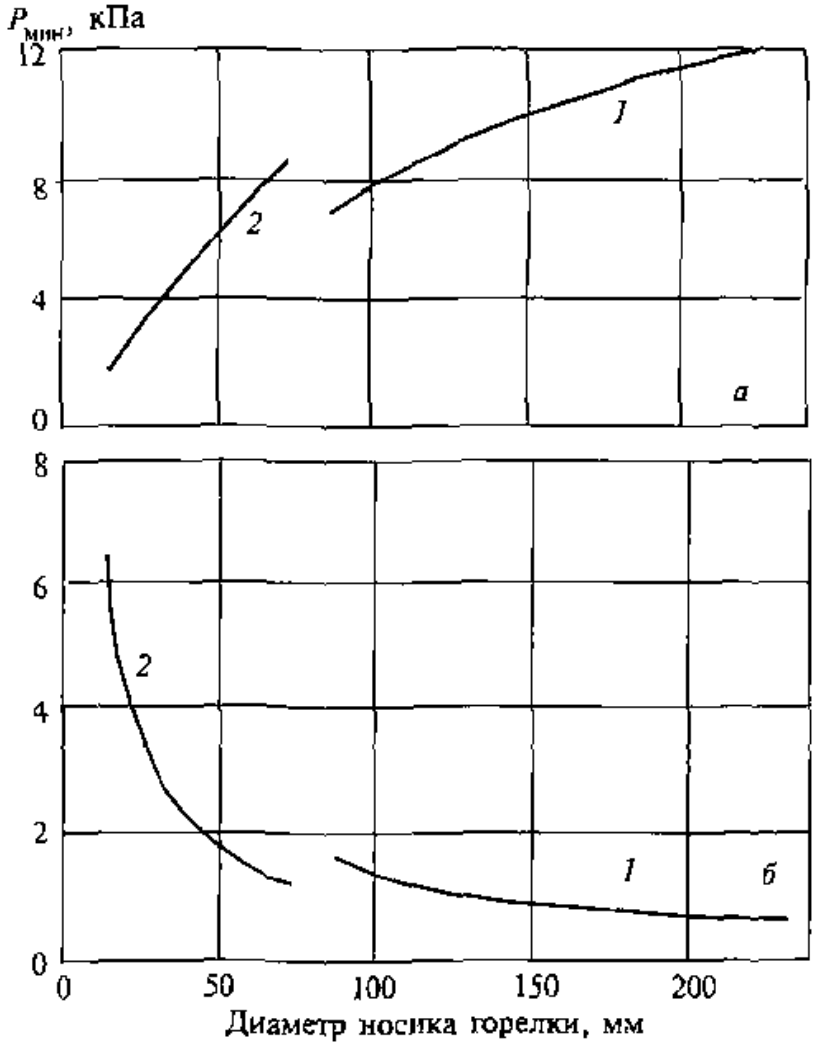


Рис. 7.21. Зависимость минимально допустимого давления газа перед горелкой $P_{мин}$ (*а*) и коэффициента рабочего регулирования (*б*) от диаметра носика: *1* — при водяном охлаждении; *2* — то же, без водяного охлаждения

Горение газа завершается в пределах горелочного туннеля, и в топочный объем вытекают продукты полного сгорания с коэффициентом избытка воздуха, близким к единице. Причем отмечено, что горелки большой мощности работают с несколько повышенным коэффициентом расхода воздуха

При работе горелок воздушная заслонка должна быть открыта полностью. Уменьшение ширины щели между заслонкой и входной кромкой диффузора на величину, составляющую менее чем 0,3 диаметра смесителя, приводит к снижению коэффициента расхода воздуха.

Максимальная температура газов на выходе из туннелей горелок снижается с уменьшением их размеров. Величина ее в долях от теоретической температуры горения при известном коэффициенте расхода воздуха может быть определена по выражению

$$t_{max}/t_{теор} = Ad + 0{,}87, \qquad (7.34)$$

где $t_{теор}$ – калориметрическая температура горения, °С; d – диаметр носика горелки (от 0,075 до 0,235 м); A – коэффициент, равный для футерованных камер сгорания 0,455; для охлаждаемых – 0,295.

Характер изменения локальной теплоотдачи от факела инжекционных горелок к боковым стенкам камер сгорания не изменяется с изменением типоразмера горелок. Механизм теплоотдачи от факела находится примерно на расстоянии 10–12 калибров горелки от передней стенки камер сгорания (рис. 7.22).

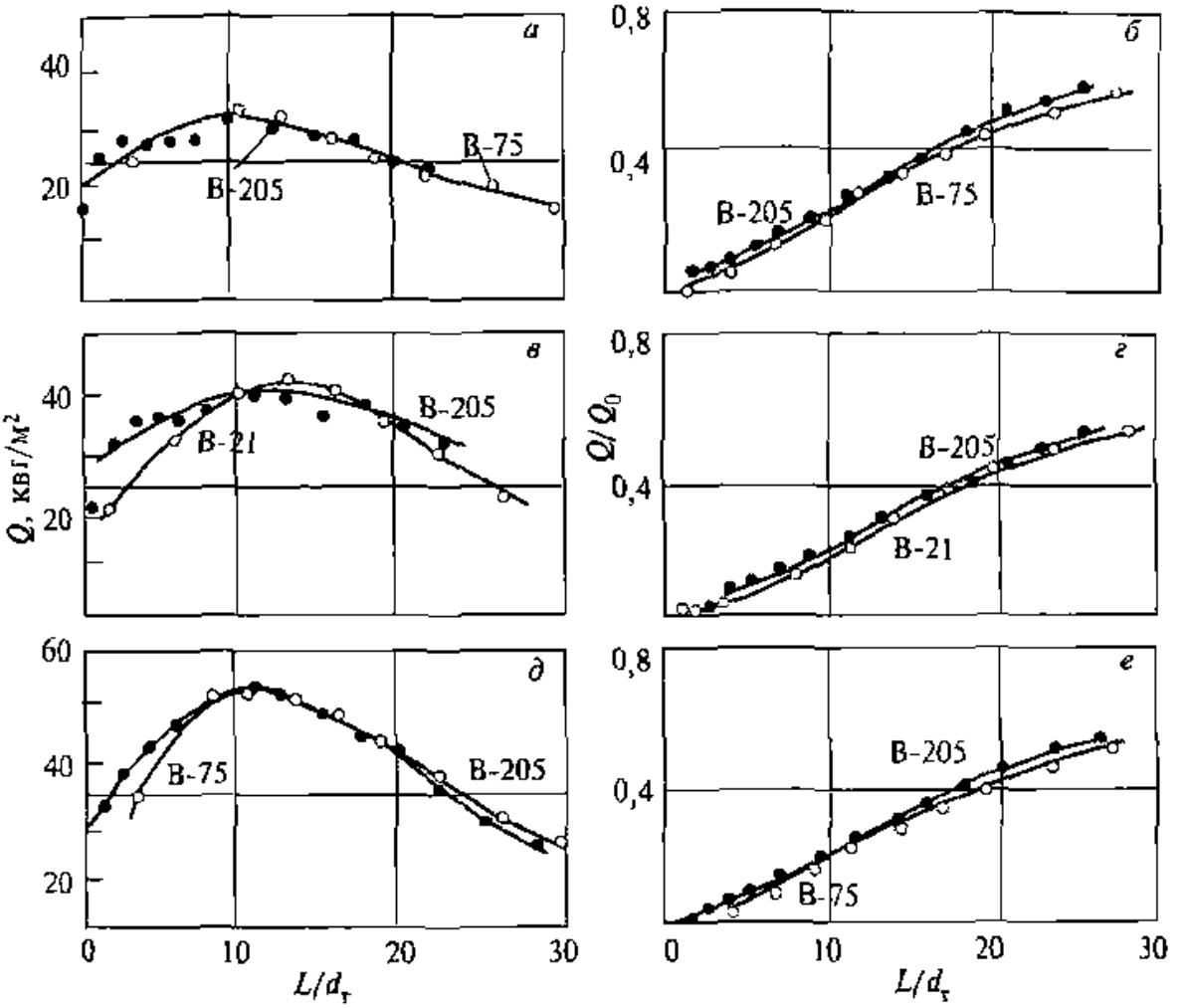


Рис. 7.22. Теплоотдача от факела инжекционных горелок типа В (левая колонка – локальная; правая – суммарная).
а, б – при давлении газа перед соплом $P_г$ = 30 кПа; *в, г* – то же, $P_г$ = 60 кПа; *д, е* – то же, $P_г$ = 90 кПа.
Цифрой у кривых обозначен типоразмер горелки.

7.6. ИНЖЕКЦИОННЫЕ ГОРЕЛКИ ТИПА ИУ

Инжекционные горелки типа ИУ, разработанные Стальпроектом, предназначены для сжигания газов с высокой теплотой сгорания (сжиженный, природный, коксовый газ).

Разработано 14 типоразмеров горелок с диаметром носика $d_н$, от 15 до 100 мм.

Каждая горелка разработана в четырех исполнениях: прямая без стабилизатора, с поворотом смесителя без стабилизатора, прямая со стабилизатором, с поворотом смесителя и со стабилизатором.

Инжекционные горелки типа ИУ прямые без стабилизатора и с поворотом смесителя без стабилизатора являются модернизированными горелками соответственно типов В и ВП с расширенным диапазоном применяемых газов. Они предназначены для работы в высокотемпературных печах с использованием огнеупорного горелочного туннеля в качестве стабилизатора.

Инжекционные горелки типа ИУ прямые со стабилизатором и с поворотом смесителя и со стабилизатором предназначены для работы в низкотемпературных камерах сгорания при температуре в рабочем пространстве ниже температуры воспламенения топлива, а также для работы на открытом воздухе.

Инжекционные горелки типа ИУ выполняют из литых деталей, газопровод к горелкам присоединяется на резьбе.

Инжекционные горелки типа ИУ с диаметром носика $d_{н.г}$ от 15 до 75 мм показаны на рис. 7.23, а их конструктивные размеры приведены в табл. 7.13.

Инжекционные горелки типа ИУ с диаметром носика $d_{н.г}$ 86 и 100 мм выполняют с разъемным корпусом. Эти горелки показаны на рис. 7.24, а их конструктивные размеры приведены в табл. 7.14.

Обозначение горелки включает индекс типа горелки, диаметр носика горелки $d_{н.г}$ (мм) и через косую — диаметр газового сопла $d_г$ (мм), а также буквы П и С, характеризующие наличие соответственно поворота смесителя и стабилизатора. Например, горелка ИУ 32/2,5 ПС означает: инжекционная горелка типа ИУ с диаметром носика 32 мм и диаметром газового сопла 2,5 мм, имеющая поворот смесителя и стабилизатор.

Выбор типоразмера инжекционных горелок типа ИУ осуществляют по графику на рис. 7.25, на котором дана зависимость пропускной способности горелки по газу от его давления перед горелкой для горелок с диаметром носика $d_{н.г}$ = 100 мм при α = 1,05: прямой без стабилизатора (рис. 7.25, *а*), с поворотом смесителя без стабилизатора (рис. 7.25, *б*), прямой со стабилизатором (рис. 7.25, *в*), с поворотом смесителя и со стабилизатором (рис. 7.25, *г*). При другом диаметре носика горелки пропускную способность по газу вычисляют умножением величины, полученной по графику (см. рис. 7.25), на поправочный коэффициент, который берут из табл. 7.5.

Диаметр газового сопла $d_г$ можно определить в зависимости от выбранного типоразмера горелки и характеристики применяемого газа по табл. 7.15. Диаметры газовых сопел рассчитаны на сжигание газа с α = 1,05 при

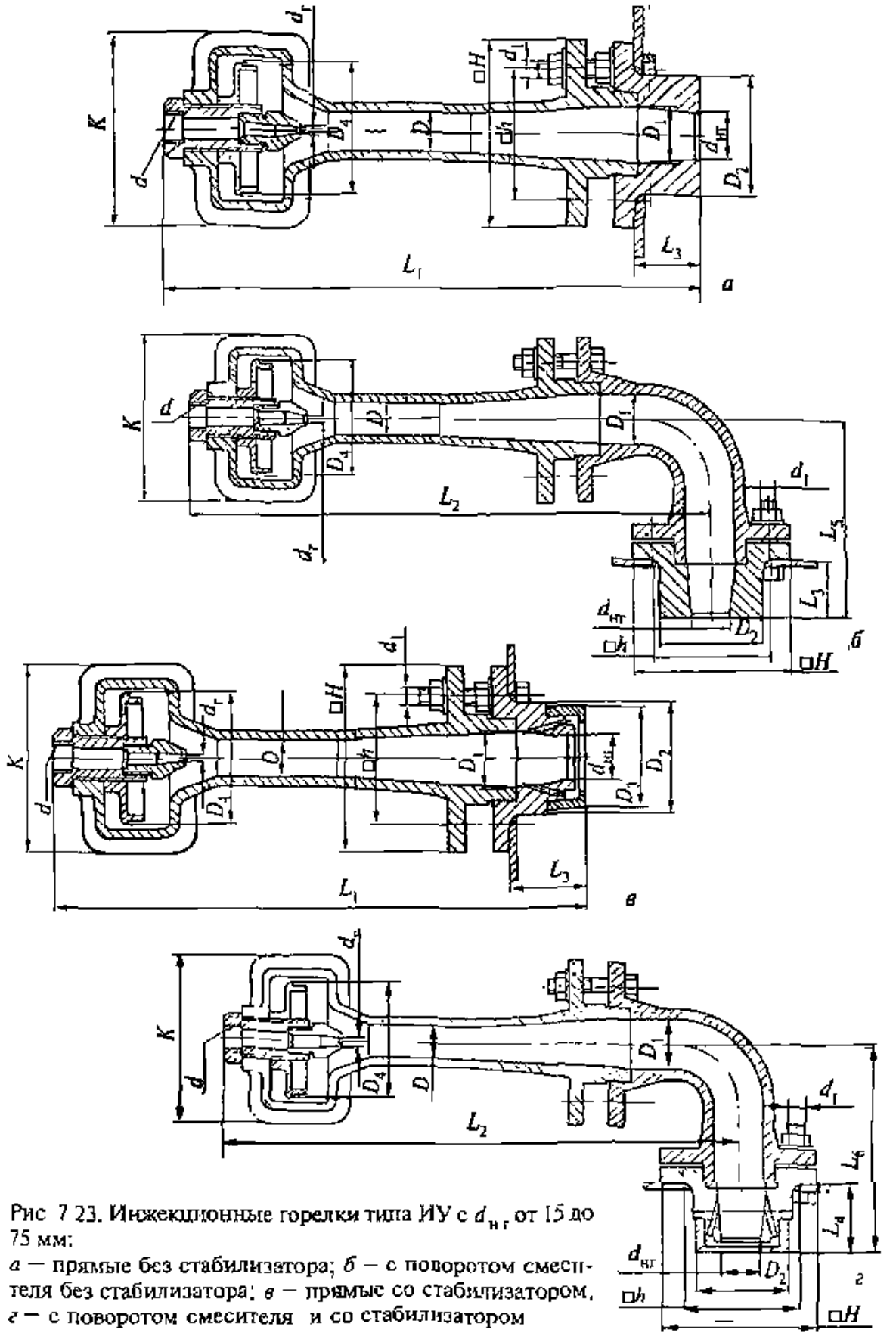


Рис 7 23. Инжекционные горелки типа ИУ с $d_{нг}$ от 15 до 75 мм:
а — прямые без стабилизатора; *б* — с поворотом смесителя без стабилизатора; *в* — прямые со стабилизатором, *г* — с поворотом смесителя и со стабилизатором

Таблица 7.13

Конструктивные размеры (мм)* инжекционных горелок типа ИУ с $d_{н.г}$ от 15 до 75 мм (рис. 7.23)

$d_{н.г}$	d_1 горелки прямые	d_1 горелки с поворотом на 90°	D	D_1	D_2	D_3	D_4	d	d_1	H	h	K	L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	Масса горелки, кг: горелки прямые, без стабилизатора	горелки прямые, со стабилизатором	горелки с поворотом на 90°, без стабилизатора	горелки с поворотом на 90°, со стабилизатором
15	0,55–2,1	0,55–1,65	12	19	55	55	68	1/2"	M12	110	70	110	244	250	290	35	41	122	128	4,2	4,2	6,7	6,7
18	0,70–2,4	0,65–2,1	15	22	55	55	68	1/2"	M12	110	70	110	259	265	302	35	41	122	128	4,4	4,4	7,0	7,0
21	0,80–2,8	0,75–2,5	17	26	55	55	68	1/2"	M12	110	70	110	290	290	327	35	41	122	128	4,8	4,8	7,3	7,3
24	0,95–3,1	0,85–2,8	19	30	65	65	91	1/2"	M16	130	90	130	325	325	376	38	48	142	152	7,6	7,6	11,9	11,9
28	1,10–3,6	1,05–3,5	23	34	65	65	91	1/2"	M16	130	90	132	345	345	393	50	60	154	164	7,7	7,7	12,0	12,0
32	1,35–4,1	1,20–4,0	26	40	80	72	91	1/2"	M16	130	90	132	380	380	420	48	58	156	166	8,7	8,7	12,6	12,6
37	1,50–4,6	1,45–4,6	30	46	80	72	116	1/2"	M16	130	90	160	450	450	500	55	65	180	190	9,7	9,7	15,0	15,0
42	1,70–5,3	1,60–5,1	34	52	85	78	116	1/2"	M16	150	166	166	485	485	535	56	65	180	189	11,2	11,2	17,8	17,8
48	1,90–5,9	1,80–5,8	39	60	100	92	116	1/2"	M16	160	166	166	560	560	610	74	87	217	230	14,1	14,1	22	22
56	2,20–6,9	2,10–6,6	45	70	110	96	168	3/4"	M16	160	216	216	630	630	676	80	90	240	250	17,5	17,5	26	26
65	2,50–7,9	2,40–7,6	53	82	125	110	168	3/4"	M16	180	216	215	720	720	770	102	115	285	297	24	24	35	35
75	2,90–9,1	2,80–8,7	61	94	135	125	168	3/4"	M16	180	215	215	825	825	885	102	115	294	307	26	26	37	37

* Кроме указанных особо.

Таблица 7.14

Конструктивные размеры (мм)* инжекционных горелок типа ИУ с $d_{н.г}$ 86 и 100 мм (рис. 7.24)

$d_{н.г}$	d_1 горелки прямые	d_1 горелки с поворотом на 90°	D	D_1	D_2	D_3	D_4	d	d_1	H	h	K	L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	Масса горелки, кг: горелки прямые, без стабилизатора	горелки прямые, со стабилизатором	горелки с поворотом на 90°, без стабилизатора	горелки с поворотом на 90°, со стабилизатором
86	3,3–10,4	3,2–9,9	70	108	150	145	210	1"	M16	200	150	270	920	935	990	114	131	326	343	41	41	55	55
100	3,9–12,2	3,7–11,6	81	124	170	155	210	1"	M16	210	170	270	1080	1100	1180	114	131	366	383	53	53	70	70

* Кроме указанных особо.

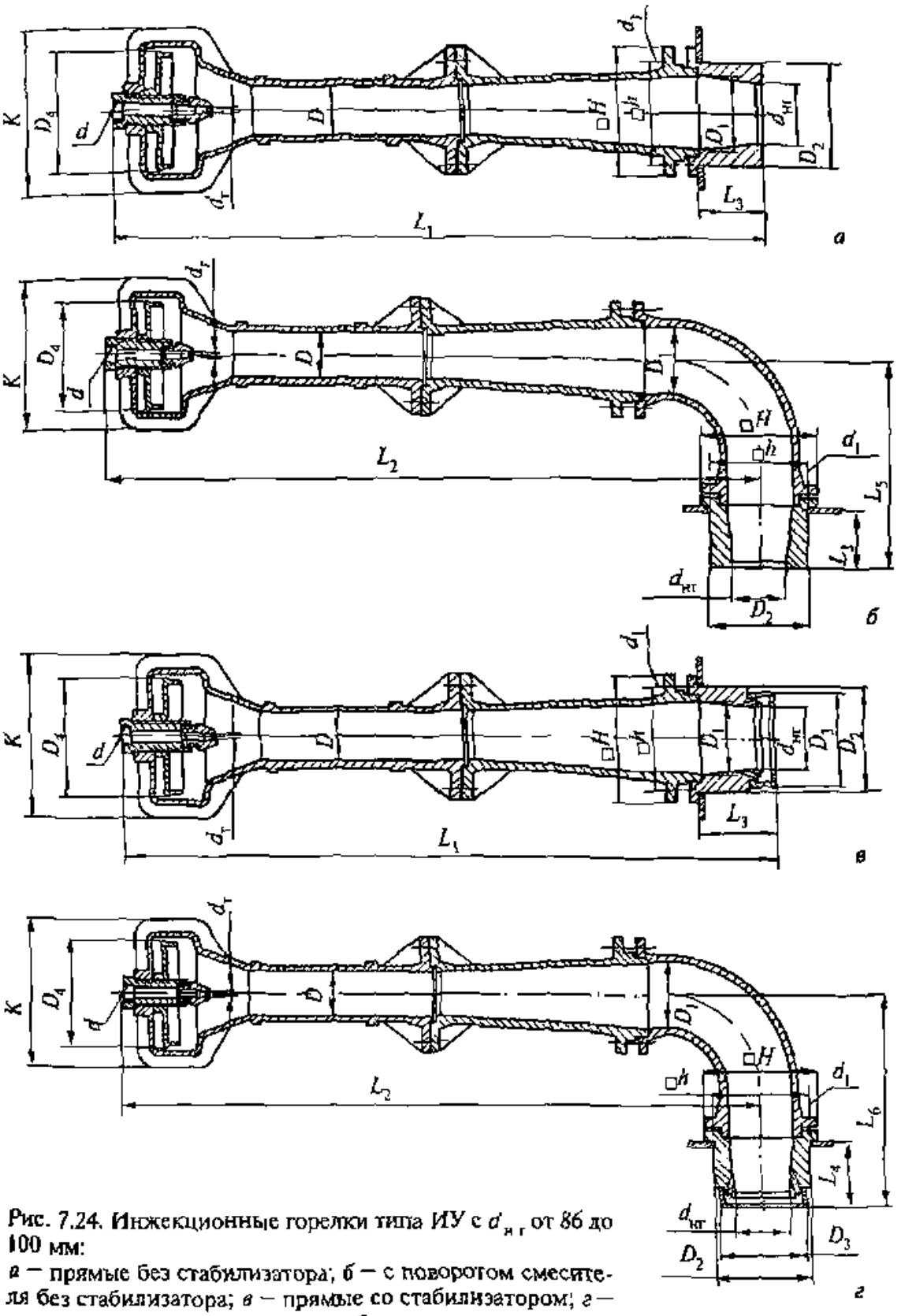


Рис. 7.24. Инжекционные горелки типа ИУ с $d'_{н.г}$ от 86 до 100 мм:
а — прямые без стабилизатора; *б* — с поворотом смесителя без стабилизатора; *в* — прямые со стабилизатором; *г* — с поворотом смесителя и со стабилизатором

давлении в камере сгорания не более ± 20 Па. Во избежание засорения сопел с $d_г < 2$ мм газ должен быть сухим и чистым.

Выбор и пересчет инжекционных горелок типа ИУ производится так же, как горелок типа В и ВП (см. примеры 1 и 2 в разделе 7.5).

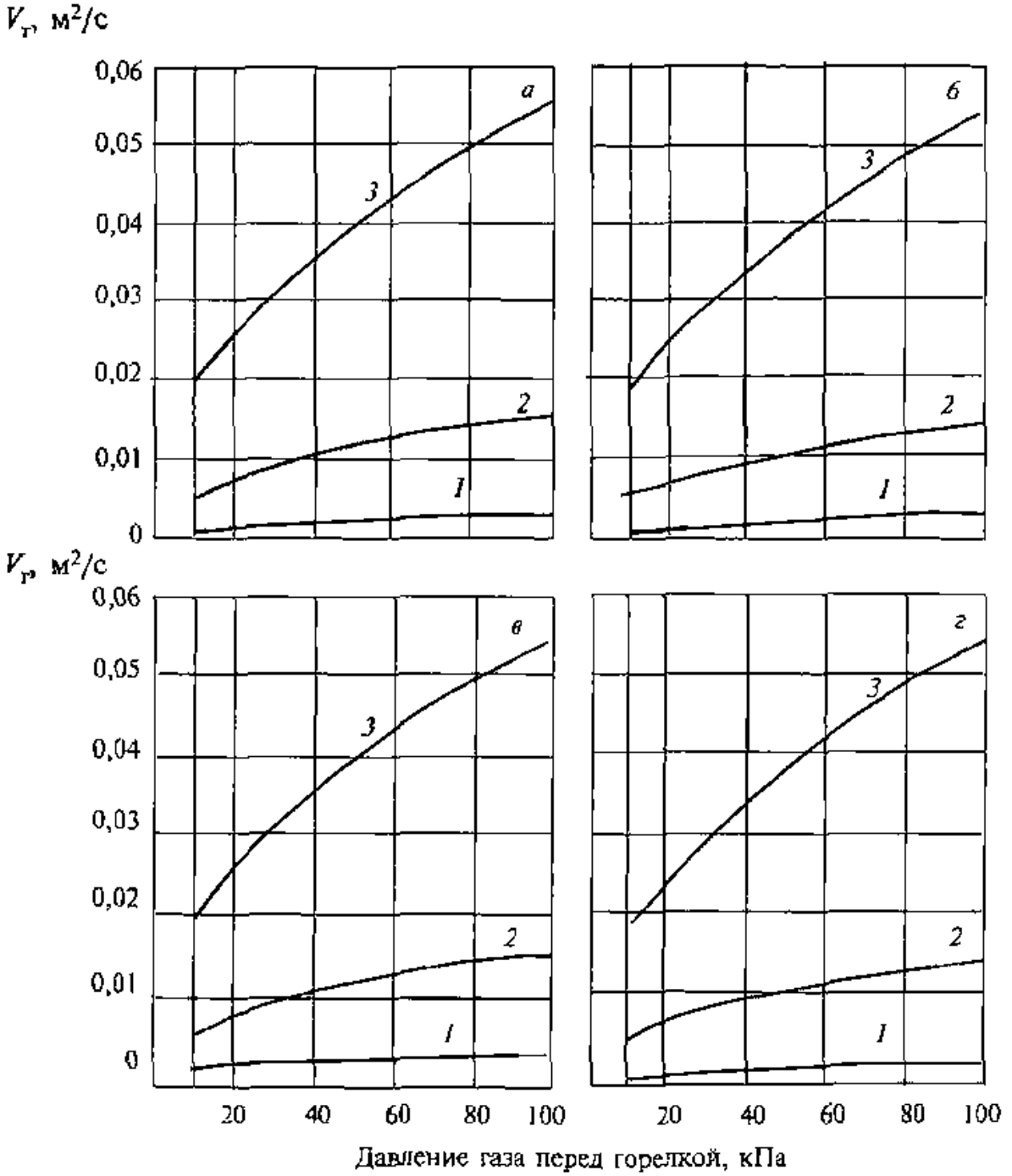


Рис. 7.25. Пропускная способность инжекционной горелки с $d_н$ = 100 мм типа ИУ 100/$d_г$ (*а*), ИУ 100/$d_г$ П (*б*), ИУ 100/$d_г$ С (*в*), ИУ 100/$d_г$ ПС (*г*) при $\alpha = 1{,}05$ по газам: *1* – сжиженный газ ($Q_н^р$ = 105 МДж/м³); *2* – природный газ ($Q_н^р$ = 34,95 МДж/м³); *3* – коксовый газ ($Q_н^р$ = 17,10 МДж/м³)

Таблица 7.15

Диаметры газовых сопел (мм) для инжекционных горелок типа ИУ

Типоразмер горелки		Применяемый газ ($Q_н^р$, МДж/м³)			Типоразмер горелки		Применяемый газ ($Q_н^р$, МДж/м³)		
		сжиженный (105)	природный (34,95)	коксовый (17,10)			сжиженный (105)	природный (34,95)	коксовый (17,10)
ИУ 15/$d_г$	–	0,55	1,00	1,65	ИУ 42/$d_г$	–	1,70	3,20	5,30
	С	0,65	1,25	2,10		С	1,70	3,20	5,30
	П	0,55	1,00	1,65		П	1,60	3,00	5,00
	ПС	0,55	1,00	1,65		ПС	1,65	3,10	5,10
ИУ 18/$d_г$	–	0,70	1,30	2,10	ИУ 48/$d_г$	–	1,90	3,60	5,90
	С	0,75	1,45	2,40		С	1,90	3,60	5,90
	П	0,65	1,20	2,00		П	1,80	3,40	5,60
	ПС	0,65	1,25	2,10		ПС	1,85	3,50	5,80
ИУ 21/$d_г$	–	0,80	1,55	2,60	ИУ 56/$d_г$	–	2,20	4,20	6,90
	С	0,90	1,70	2,80		С	2,20	4,20	6,90
	П	0,75	1,45	2,40		П	2,10	4,00	6,60
	ПС	0,80	1,50	2,50		ПС	2,10	4,00	6,60
ИУ 24/$d_г$	–	0,95	1,80	3,00	ИУ 65/$d_г$	–	2,50	4,80	7,90
	С	1,00	1,90	3,10		С	2,50	4,80	7,90
	П	0,85	1,65	2,70		П	2,40	4,60	7,60
	ПС	0,90	1,70	2,80		ПС	2,40	4,60	7,60
ИУ 28/$d_г$	–	1,10	2,10	3,50	ИУ 75/$d_г$	–	2,90	5,50	9,10
	С	1,15	2,20	3,60		С	2,90	5,50	9,10
	П	1,05	2,00	3,30		П	2,80	5,30	8,70
	ПС	1,10	2,10	3,50		ПС	2,80	5,30	8,70
ИУ 32/$d_г$	–	1,35	2,50	4,10	ИУ 86/$d_г$	–	3,30	6,30	10,40
	С	1,35	2,50	4,10		С	3,30	6,30	10,40
	П	1,20	2,30	3,80		П	3,20	6,00	10,00
	ПС	1,25	2,40	4,00		ПС	3,20	6,00	10,00
ИУ 37/$d_г$	–	1,50	2,80	4,60	ИУ 100/$d_г$	–	3,90	7,40	12,20
	С	1,50	2,80	4,60		С	3,90	7,40	12,20
	П	1,45	2,70	4,50		П	3,70	7,00	11,60
	ПС	1,50	2,80	4,60		ПС	3,70	7,00	11,60

7.7. БЕСПЛАМЕННЫЕ ПАНЕЛЬНЫЕ ГОРЕЛКИ ТИПА ГБПШ

Беспламенные панельные горелки типа ГБПш, разработанные ВНИИнефтемашем, предназначены для сжигания холодного природного газа с холодным воздухом. Предварительно смешение в этих горелках осуществляется в инжекционном смесителе. Из диффузора смесителя газовоздушная смесь поступает в распределительную камеру, а оттуда через систему соединительных трубок в горелочные туннели, где и сгорает.

Разработано 6 типоразмеров горелок с номинальной теплопроизводительностью от 52,4 до 325,7 кВт. Номинальная теплопроизводительность определена при давлении природного газа перед горелкой 190 кПа для трех меньших типоразмеров горелок и 150 кПа для трех больших типоразмеров. Каждый типоразмер горелки разработан в двух исполнениях в зависимости от материала соединительных трубок: исполнение I с трубками из стали 10 может работать при температуре продуктов сгорания на выходе из камеры

сгорания до 800 °С: исполнение II с трубками из стали 10Х23Н18 или 15Х25Т – до 1200 °С. Пределы регулирования горелок — не менее 1 : 2 от номинала.

Беспламенные панельные горелки типа ГБПш показаны на рис. 7.26, а их конструктивные размеры приведены в табл. 7.16.

Горелки имеют штампованный корпус.

Горелочные камни выполнены в виде керамических призм, которые свободно надеваются на соединительные трубки, поэтому горелки могут устанавливаться только на поду или боковых стенах камер сгорания.

Обозначение горелок состоит из индекса типа горелок, римской цифры, указывающей исполнение горелки, и цифры, характеризующей ее типоразмер. Например, обозначение горелки ГБПш-I-85 означает: горелка беспламенная панельная со штампованным корпусом, исполнение I (для

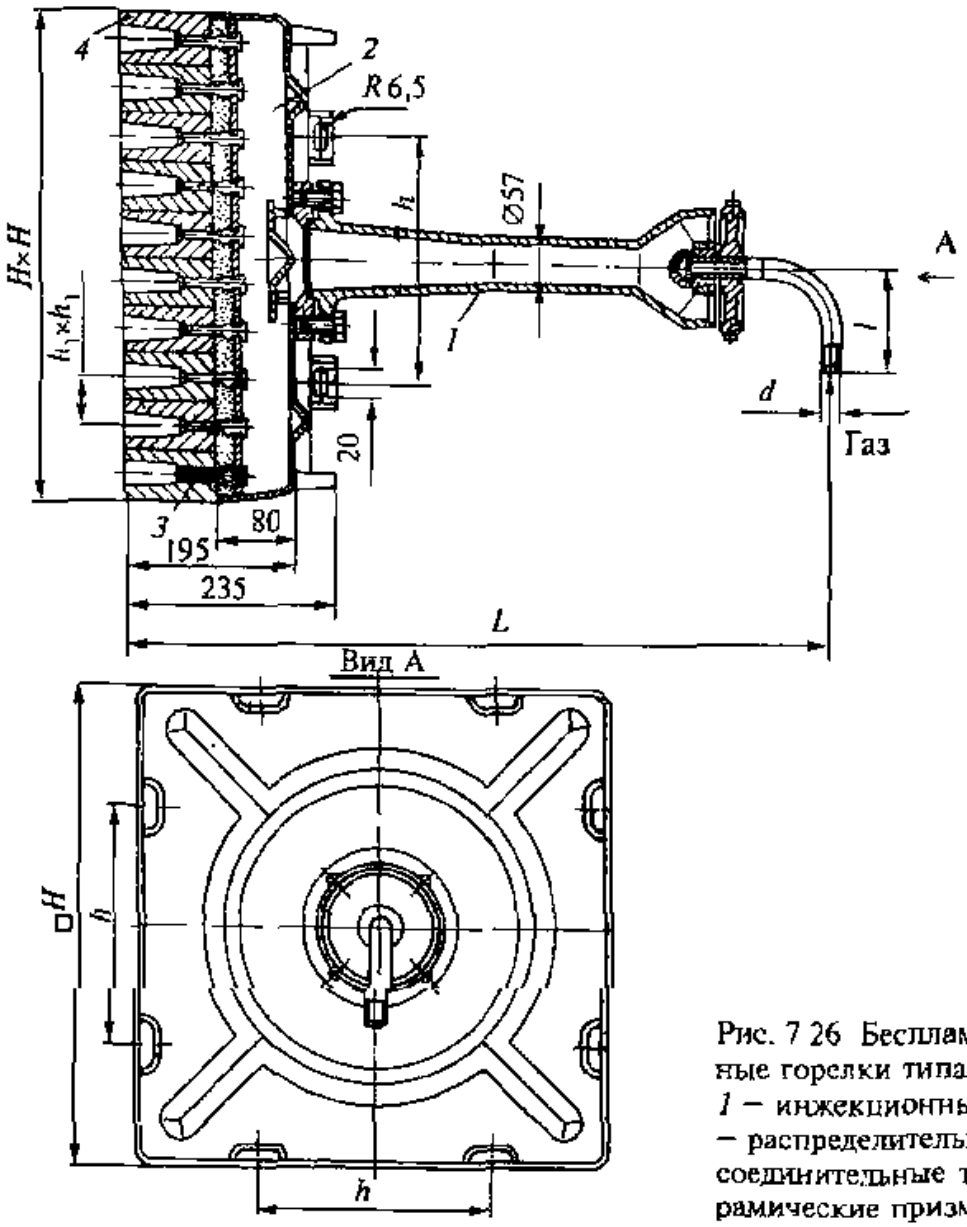


Рис. 7.26. Беспламенные панельные горелки типа ГБПш:
1 – инжекционный смеситель; *2* – распределительная камера; *3* – соединительные трубки; *4* – керамические призмы

Таблица 7.16

Конструктивные размеры (мм)* беспламенных панельных горелок типа ГБПш (рис. 7.26)

Обозначение горелки	Номинальная теплопроизводительность, кВт	d	H	h	h_1	L	l	Число трубок	Масса горелки без керамики, кг
ГБПш-45	52,4	$^1/_2$"	500	250	50,0	740	110	100	27,5
ГБПш-85	98,9	$^1/_2$"	500	250	50,0	740	110	100	28,3
ГБПш-120	139,6	$^1/_2$"	605	300	50,0	740	110	144	35,5
ГБПш-140	162,8	$^1/_2$"	500	250	50,0	740	110	100	28,7
ГБПш-200	232,6	$^1/_2$"	605	300	50,0	740	110	144	36,3
ГБПш-280	325,7	1"	500	250	35,7	845	140	196	38,4

* Кроме указанных особо.

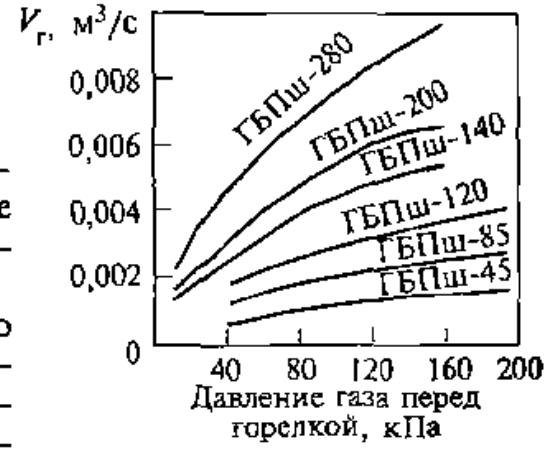


Рис. 7.27. Пропускная способность по газу беспламенных панельных горелок типа ГБПш

работы при температуре продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания не выше 800 °С) с номинальной теплопроизводительностью 98,9 кВт.

Выбирают горелки типа ГБПш по графику (рис. 7 27), на котором дана зависимость пропускной способности горелок по газу от давления газа перед горелкой. График построен для холодного природного газа с $Q_н^р = 33{,}5$ МДж/м³ и $\rho_{0г} = 0{,}7$ кг/м³.

По результатам испытаний установлено, что горелки такого типа обеспечивают полное сгорание газа при коэффициенте расхода воздуха 1,04—1,05. *Коэффициент рабочего регулирования* от 2 до 3,5.

7.8. ИНЖЕКЦИОННО-АТМОСФЕРНЫЕ ГОРЕПКИ ТИПА ИА

Инжекционно-атмосферные горелки типа ИА, разработанные Стальпроектом, предназначены для сжигания холодных природного газа с $Q_н^р = 34{,}95$ МДж/м³ и смеси доменного и коксового газов с $Q_н^р = 7{,}55$ МДж/м³ в камерах сгорания, находящихся под разрежением.

Инжекционно-атмосферные горелки относятся к горелкам частичного предварительного смешения. Смешение части необходимого для горения воздуха с газом происходит в инжекционной горелке с поворотом смесителя. Остальной воздух, обеспечивающий полное сжигание газа, поступает в зазор между носиком горелки и горелочным туннелем.

В конце диффузора горелки установлена решетка, которая предупреждает проникновение пламени внутрь горелки.

Разработаны 4 типоразмера горелок со смесителями диаметром от 30 до 44 мм. Каждый типоразмер выполнен с двумя соплами: для природного и смешанного газов.

Кроме того, в зависимости от вида применяемого газа меняется диаметр отверстий в решетке.

Инжекционно-атмосферные горелки типа ИА показаны на рис. 7.28, а их конструктивные размеры приведены в табл. 7.17.

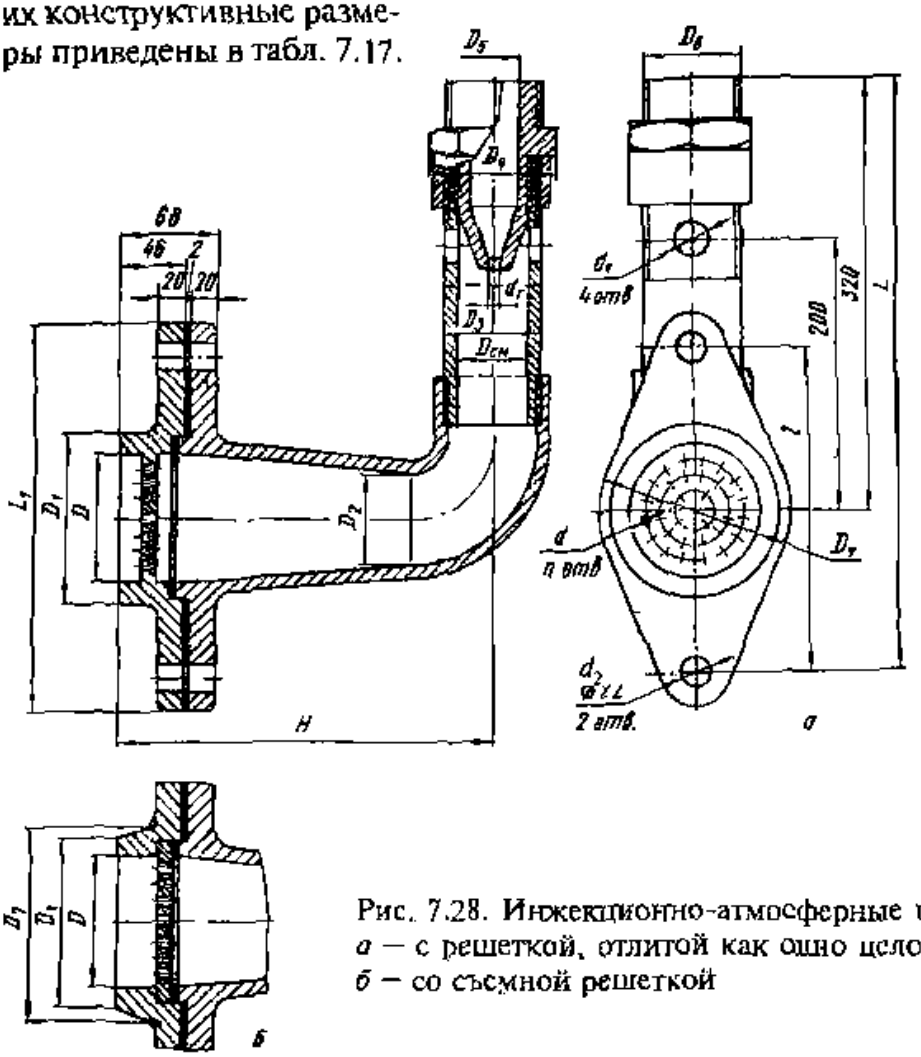


Рис. 7.28. Инжекционно-атмосферные горелки типа ИА: *а* — с решеткой, отлитой как одно целое с носиком; *б* — со съемной решеткой

Конструктивные размеры (мм)* инжекционно-атмосферных горелок

Обозначение горелки	Сжигаемый газ	$D_{см}$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
ИА-30/2,5	Природный	30	70	90	37	45	63,5	20	1¼"	105
ИА-30/9,0	Смешанный**	30	70	90	37	45	63,5	20	1¼"	105
ИА-34/2,8	Природный	34	80	100	43	50	63,5	24	1½"	110
ИА-34/10	Смешанный	34	80	100	43	50	63,5	24	1½"	110
ИА-38/3,3	Природный	38	90	110	43	50	63,5	29	1½"	120
ИА-38/11,5	Смешанный	38	90	110	43	50	63,5	29	1½"	120
ИА-44/3,8	Природный	44	105	125	56	60	72,0	35	2"	135
ИА-44/14	Смешанный	44	105	125	56	60	72,0	36	2"	135

* Кроме указанных особо.

** Смесь коксового и доменного газов

Горелки выполнены из литых деталей. Решетка может быть съемной или отлитой как одно целое с носиком.

Обозначение горелки включает индекс типа горелки, диаметр смесителя в миллиметрах и через косую диаметр газового сопла в миллиметрах. Например, горелка ИА-30/2,5 означает: горелка инжекционно-атмосферная с диаметром смесителя 30 и диаметром газового сопла 2,5 мм. При применении решетки, отлитой как одно целое с носиком, в обозначении горелки добавляются слова «с литой решеткой».

Выбор горелки осуществляется в зависимости от необходимой пропускной способности горелки по газу и располагаемого давления газа перед горелкой по графику (рис. 7.29).

Максимальное давление перед горелкой природного газа 75, смешанного газа 12 кПа.

При испытании горелки ИА-34/2,8 в стендовых условиях обнаружены следующие особенности Коэффициент расхода первичного воздуха состав-

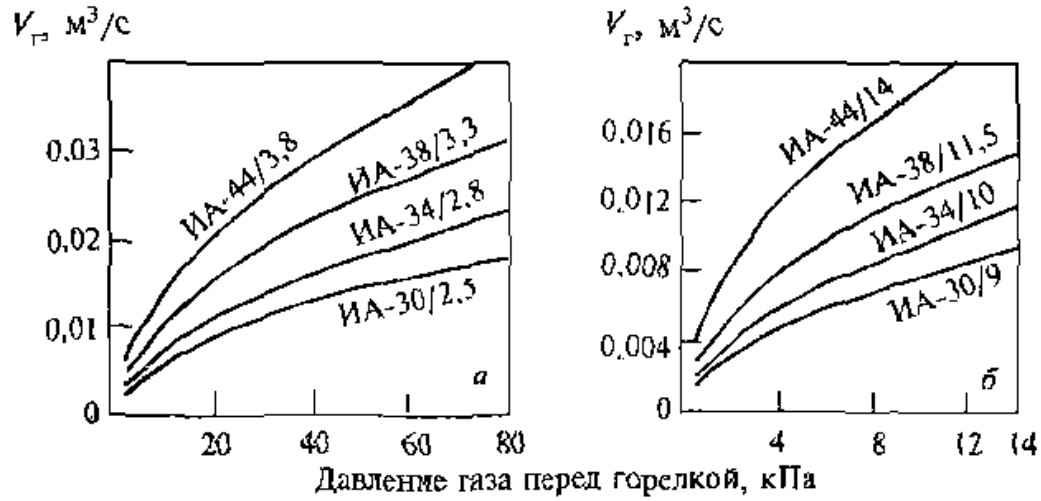


Рис. 7.29. Пропускная способность по газу инжекционно-атмосферных горелок: *а* – для природного газа, $Q_н^р$ = 34,95 МДж/м³; *б* – для смешанного газа, $Q_н^р$ = = 7,55 Мдж/м³;

Таблица 7.17

типа ИА (рис. 7.28)

$d_г$	d	d_1	d_2	H	L	L_1	l	Количество отверстий n	Масса горелки, кг
2,5	5,0; 6,3	18	18	195	445	250	200	37	10,0
9,0	4,0; 4,3	18	18	195	445	250	200	57	10,0
2,8	6,0; 6,8	20	18	210	455	270	220	37	11,5
10,0	4,4; 5,1	20	18	210	455	270	220	57	11,5
3,3	7,0; 7,6	24	18	250	455	270	220	37	13,5
11,5	5,1; 5,7	24	18	250	455	270	220	57	13,5
3,8	7,8; 9,2	28	22	278	465	290	240	37	16,5
14,0	6,0; 6,4	28	22	278	465	290	240	57	16,5

ляет 0,6—0,63. Длина факела находится в пределах 0,72 м. При увеличении разрежения в камере горения с 20 до 40 Па суммарный коэффициент расхода воздуха увеличивается с 1,08 до 1,3, а коэффициент рабочего регулирования снижается с 7,1 до 4,6.

7.9. ДВУХПРОВОДНЫЕ ИНЖЕКЦИОННЫЕ СМЕСИТЕЛИ

Двухпроводные инжекционные смесители, разработанные Стальпроектом, предназначены для работы на холодном природном газе с $Q_н^р$ = = 34,95 МДж/м^3 и холодном воздухе в камерах, находящихся под давлением. Смешение газа и воздуха в этих смесителях происходит в трубе Вентури, по которой подают под давлением воздух.

Воздушный поток подсасывает газ, поступающий через отверстия в узком сечении трубы Вентури. Перед смесителем газ проходит через регулятор, поддерживающий его давление равным давлению в камере сгорания, а затем через специально подобранное сопротивление, служащее для настройки и регулировки смешения.

Разработано семь типоразмеров двухпроводных инжекционных смесителей с диаметром подводящей воздушной трубы от 1 до 5". Каждый типоразмер выполнен в 2—4 вариантах, отличающихся диаметрами проходных сечений на пути газа и воздуха, а следовательно, и пропускной способностью по газу. К одному смесителю можно подсоединить от 1 до 4 горелок.

Двухпроводные инжекционные смесители показаны на рис. 7.30, а их конструктивные размеры приведены в табл. 7.18. В табл. 7.19 для всех типоразмеров и вариантов смесителей приведены диаметр подвода $d_{подв}$ и отвода $d_{отв}$ регулятора нулевого давления газа, а также диаметр подвода к го-

Конструктивные размеры (мм)* двухпроводных инжекционных

Обозначение смесителя	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	H	H_1	h
1"/1	1"	6,0	2,0	22	3/4"	38	3	—	—	—	72	40	35
1"/2	1"	7,1	2,3	23	3/4"	38	3	—	—	—	72	40	35
1"/3	1"	8,0	2,6	24	3/4"	38	3	—	—	—	72	40	35
1 1/2"/1	1 1/2"	9,3	3,0	30	1 1/4"	54	4,5	—	—	—	100	56	40
1 1/2"/2	1 1/2"	10,4	3,4	31	1 1/4"	54	4,5	—	—	—	100	56	40
1 1/2"/3	1 1/2"	11,5	3,8	32	1 1/4"	54	4,5	—	—	—	100	56	40
1 1/2"/4	1 1/2"	13,2	4,3	34	1 1/4"	54	4,5	—	—	—	100	56	40
2"/1	2"	14,8	4,8	43	1 1/2"	65	6	—	—	—	119	64	45
2"/2	2"	16,5	5,4	45	1 1/2"	65	6	—	—	—	119	64	45
2"/3	2"	18,1	5,9	47	1 1/2"	65	6	—	—	—	119	64	45
2 1/2"/1	*2 1/2"*	*20,3*	6,6	*52*	*2"*	*82*	*7,5*	—	—	—	*143*	*75*	*55*
2 1/2"/2	2 1/2"	22,5	7,3	54	2"	82	7,5	—	—	—	143	75	55
3"/1	3"	24,7	8,0	62	2 1/2"	95	9	—	—	—	163	85	65
3"/2	3"	27,5	8,9	65	2 1/2"	95	9	—	—	—	163	85	65
4"/1	4"	30,0	9,8	87	180	220	11	114	160	200	246	146	95
4"/2	4"	33,5	10,8	90	180	220	11	114	160	200	246	146	95
5"/1	5"	37,0	11,9	108	210	250	14	140	180	220	292	172	135
5"/2	5"	41,0	13,3	112	210	250	14	140	180	220	292	172	135

* Кроме указанных особо

релке $D_{подв}$ и диаметр носика горелки $d_{н.г}$ в зависимости от количества горелок на один смеситель.

Обозначение двухпроводных инжекционных смесителей состоит из цифры, обозначающей диаметр подводящей воздушной трубы в дюймах, и через косую — цифры, обозначающей номер варианта. Например, обозначение двухпроводного инжекционного смесителя 2″/2 означает: двухпроводный инжекционный смеситель с диаметром подводящей воздушной трубы 2″, второй вариант.

Выбор двухпроводных инжекционных смесителей осуществляется по графику (рис. 7.31), на котором дана зависимость пропускной способности смесителя по газу от давления воздуха.

На графике следует откладывать значение давления воздуха, равное разности между давлением воздуха перед смесителем и в камере сгорания. График построен для смесителей, приготавливающих газовоздушную смесь с $\alpha = 1{,}05$.

Если требуется двухпроводный инжекционный смеситель, приготавливающий газовоздушную смесь с $\alpha \neq 1{,}05$, то на графике рис. 7.31 откладывают расчетное значение пропускной способности смесителя по газу (м³/с):

$$V_г = 0{,}935 V_{0г} \alpha^{1{,}5}, \qquad (7.34)$$

где $V_{0г}$ — заданная пропускная способность смесителя по газу, м³/с.

При этом в выбранном двухпроводном инжекционном смесителе следует изменить диаметр отверстий в газовой насадке до значения

$$D_2' = 0{,}97 D_2 \alpha^{0{,}75}, \qquad (7.35)$$

Таблица 7.18

смесителей (рис. 7.30)

h_1	L	L_1	L_2	l	l_1	l_2	Число отверстий n	Масса смесителя, кг
21	192	180	50	20	23	16	—	3,0
21	192	180	50	20	23	16	—	3,0
21	192	180	50	20	23	16	—	3,0
28	252	240	90	22	25	22	—	4,0
28	252	240	90	22	25	22	—	4,0
28	252	240	90	22	25	22	—	4,0
28	252	240	90	22	25	22	—	4,0
35	355	340	145	29	35	27	—	5,6
35	355	340	145	29	35	27	—	5,6
35	365	340	145	29	35	27	—	5,6
45	395	380	135	30	35	25	—	10,6
45	395	380	135	30	35	25	—	10,6
50	468	450	130	35	35	27	—	16,5
50	468	450	130	35	35	27	—	16,5
73	678	660	185	21	19	—	4	57,0
73	678	660	185	21	19	—	4	57,0
85	841	820	250	24	22	—	8	73,0
85	841	820	250	24	22	—	8	73,0

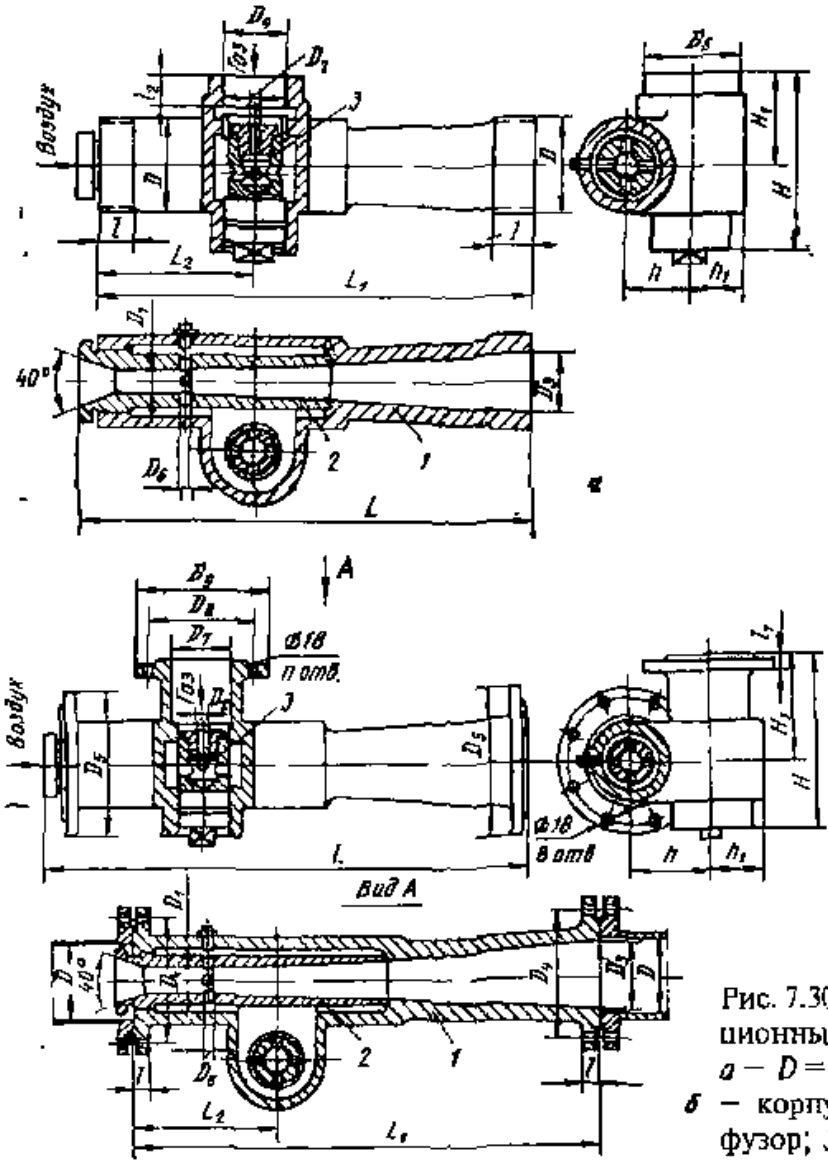


Рис. 7.30. Двухпроводные инжекционные смесители:
а – $D = 1 - 3''$; *б* – $D = 4 + 5''$; *1* – корпус смесителя; *2* – диффузор; *3* – газовая насадка

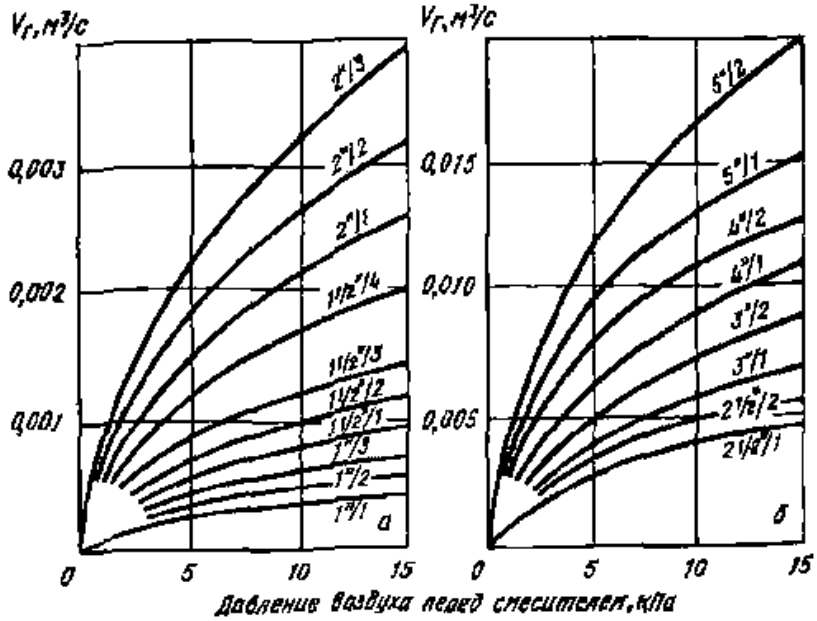


Рис 7.31 Пропускная способность по газу двухпроводных инжекционных смесителей: *а* – $D = 1 \div 3''$; *б* – $D = 2^1/_2 \div 5''$

Таблица 7.19

Размеры регулятора нулевого давления и горелок для двухпроводных инжекционных смесителей

Обозначение смесителя	$d_{подв}$	$d_{отв}$	Размеры (мм)* при количестве горелок на один смеситель							
			1		2		3		4	
			$d_{н.г}$	$D_{подв}$	$d_{н.г}$	$D_{подв}$	$d_{н.г}$	$D_{подв}$	$d_{н.г}$	$D_{подв}$
1″/1	1¼″	1″	11	1½″	–	–	–	–	–	–
1″/2	1¼″	1″	13	1½″	–	–	–	–	–	–
1″/3	1¼″	1″	14,5	1½″	–	–	–	–	–	–
1½″/1	1¼″	1″	17	2″	11	1½″	–	–	–	–
1½″/2	1¼″	1″	19	2″	13	1½″	11	1½″	–	–
1½″/3	1¼″	1″	21	2″	14,5	1½″	13	1½″	11	1½″
2½″/4	1¼″	1″	24	2″	17	1½″	14,5	1½″	11	1½″
2″/1	1¼″	1″	27	2½″	19	1½″	16	1½″	13	1½″
2″/2	1¼″	1″	30	2½″	21	2″	17	1½″	14,5	1½″
2″/3	1¼″	1″	33	80	23	2″	19	1½″	16	1½″
2½″/1	1¼″	1″–1½″	37	80	26	2½″	21	2″	18	1½″
2½″/2	1¼″	1″–1½″	41	100	30	2½″	23	2″	20	1½″
3″/1	1¼″	1″–1½″	45	100	33	80	26	2½″	22	2″
3″/2	1¼″	1″–1½″	50	100	37	80	30	2½″	24	2″
4″/1	2″–3″	1½″–2½″	55	125	39	100	33	80	27	2½″
4″/2	2″–3″	1½″–2½″	61	125	43	100	37	80	30	2½″
5″/1	2″–3″	1½″–2½″	67	150	45	100	39	100	33	80
5″/2	2″–3″	1½″–2½″	75	150	55	125	43	100	37	80

* Кроме указанных особо.

где D_2 – диаметр отверстий в газовой насадке, полученный из табл. 7.18 для выбранного смесителя, мм.

Пример. Подобрать двухпроводный инжекционный смеситель для сжигания $V_{от} = 0{,}008$ м³/с природного газа с $Q_н^р = 34{,}95$ МДж/м³ при $\alpha = 0{,}9$. Давление воздуха перед смесителем 25 кПа, в камере сгорания 20 кПа.

Давление воздуха $p_в = 25 - 20 = 5$ кПа.

По формуле (7.34)

$$V_г^{расч} = 0{,}935 \cdot 0{,}008 \cdot 0{,}9^{1{,}5} = 0{,}0064 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику (см. рис. 7.31) в соответствии с расчетной пропускной способностью горелки по газу и давлению воздуха, равному 5 кПа, выбираем двухпроводный инжекционный смеситель 4″/1. Необходимый диаметр отверстий в газовой насадке по формуле (7.35)

$$D'_2 = 0{,}97 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}9^{0{,}75} = 8{,}8 \text{ мм},$$

где $D_2 = 9{,}8$ мм взят из табл. 7.18 для двухпроводного инжекционного смесителя 4″/1.

7.10. СКОРОСТНЫЕ ГОРЕЛКИ ТИПА ГВ

Для создания высокотемпературной высокоскоростной струи продуктов сгорания применяют скоростные горелки ГВ с воздухоохлаждаемой ка-

мерой сгорания, разработанные ВНИИпромгазом. Горелки работают на холодном природном газе и подогретом воздухе. Воздух нагревается, охлаждая металлическую камеру сгорания с зауженным выходом. Для хорошего предварительного смешения газ подается мелкими струями в поток подогретого воздуха. Стабильное горение обеспечивается высокой скоростью газовоздушной смеси. Зажигание смеси осуществляется от электрозапальной свечи.

Разработано 5 типоразмеров горелок с номинальной теплопроизводительностью от 33,7 до 133,7 кВт. Номинальная теплопроизводительность определена при давлении газа перед горелкой 7,5, а воздуха 11 кПа.

Скоростные горелки типа ГВ показаны на рис. 7.32, а их конструктивные размеры и основные характеристики приведены в табл. 7.20.

Камера сгорания горелок типа ГВ изготавливается из жаропрочной хромоникелевой стали.

Обозначение горелки состоит из индекса типа горелок и цифры, характеризующей типоразмер горелки. Например, обозначение скоростной горелки ГВ-40 означает: скоростная горелка с воздухоохлаждаемой камерой сгорания номинальной теплопроизводительностью 47,7 кВт. Выбор скоростных горелок типа ГВ осуществляют, исходя из основных характеристик горелок, приведенных в табл. 7.20.

Основные технические характеристики горелок ГВ, полученные при их испытании в стендовых условиях, приведены в табл. 7.21.

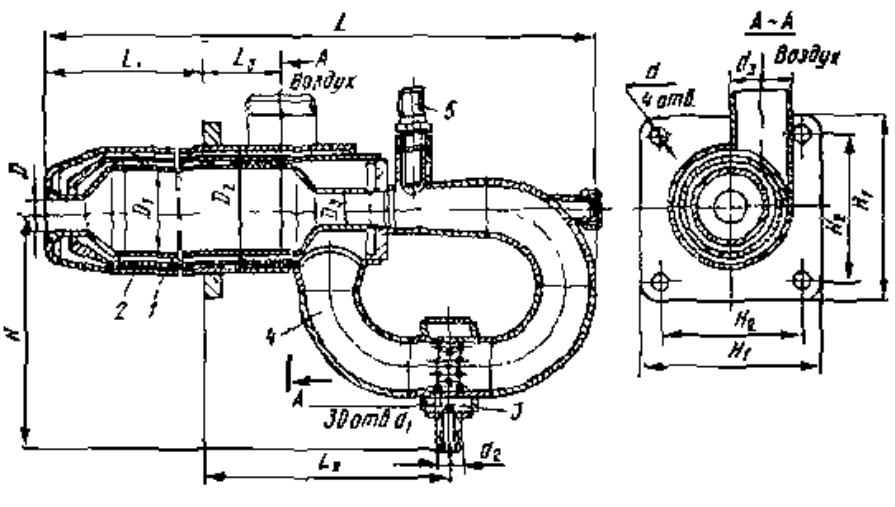


Рис 7 32. Скоростная горелка типа ГВ:
1 — камера сгорания, *2* — двухходовой контур охлаждения камеры сгорания; *3* — газовый коллектор; *4* — смеситель, *5* — электрозапальная свеча

Таблица 7.20

Конструктивные размеры (мм)* и характеристика скоростных горелок типа ГВ (рис. 7.32)

Обозначение горелки	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	d_2	d_3	H	H_1	H_2	L	L_1	L_2	L_3	Масса горелки, кг
ГВ-30	22	57	89	17	12	1,4	$1^1/_4''$	$^1/_2''$	135	250	110	460	170	40	160	8,0
ГВ-40	25	64	102	21	12	1,7	$1^1/_2''$	$^1/_2''$	135	260	110	480	170	45	135	10,5
ГВ-60А	30	72	114	25	14	2,0	$2''$	$^1/_2''$	170	280	140	525	240	55	155	14,0
ГВ-85А	36	81	133	30	14	2,4	$2^1/_2''$	$^3/_4''$	190	325	160	625	260	85	205	16,0
ГВ-120А	42	90	146	35	14	2,9	$2^1/_2''$	$1''$	190	325	160	670	270	90	230	25,0

Продолжение табл. 7.20

Обозначение горелки	Давление перед горелкой, кПа		Теплопроизводительность, кВт	Пропускная способность по газу, $м^3/с \cdot 10^3$	Скорость вылета продуктов сгорания из горелки, м/с	Диапазон рабочего регулирования по газу, $м^3/с \cdot 10^3$
	газа	воздуха				
ГВ-30	7	11	33,7	0,97	200	0,14—0,97
	2	3,5	16,7	0,48	100	0,14—0,48
ГВ-40	7	11	47,7	1,39	200	0,19—1,39
	2	3,5	23,3	0,69	100	0,19—0,69
ГВ-60А	7	11	66,3	1,94	200	0,28—1,94
	2	3,5	33,7	0,97	100	0,28—0,97
ГВ-85А	7	11	95,4	2,78	200	0,40—2,78
	2	3,5	47,7	1,39	100	0,40—1,39
ГВ-120А	7	11	133,7	3,89	200	0,56—3,89
	2	3,5	66,3	1,94	100	0,56—19,4

* Кроме указанных особо.

Таблица 7.21

Параметры горелок ГВ, полученные при испытании

Параметры	ГВ-30	ГВ-40	ГВ-60А	ГВ-85А	ГВ-120А
Номинальная тепловая мощность, квт	34,5	9,4	69,2	98,9	138,4
Номинальный расход газа, $м^3/ч$	3,5	5,0	7,0	10,0	14,0
Номинальное давление газа, кПа	7,15	6,67	6,9	5,73	5,73
Номинальный расход воздуха, $м^3/ч$	36	52,5	72	102	143
Номинальное давление воздуха, кПа	9,8	10,5	9,8	9,06	10,8
Коэффициент расхода воздуха	1,03	1,03	1,04	1,01	1,01
Диапазон рабочего регулирования:					
по расходу газа, $м^3/ч$	0,05—3,5	1,0—5,0	1,0—7,0	1,5—10	2—14
по давлению газа, кПа	0,2—7,15	0,29—6,67	0,18—6,9	0,2—5,73	0,15—5,73
Коэффициент рабочего регулирования	7,0	5,0	7,0	5,0	6,0
Средняя скорость продуктов сгорания на срезе выходного сечения горелки (рассчитанная), м/с	200	200	200	200	200
Степень выгорания на выходе из камеры горения, %	98,1	99,0	98,2	97,6	95

7.11. ГОРЕЛКА ПОЛНОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ ДЛЯ БЕЗОКИСЛИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА

Горелка полного предварительного смешения для безокислительного нагрева, разработанная ВНИИМТ и Стальпроектом, предназначена для камер скоростного безокислительного нагрева протяжных печей, агрегатов непрерывного горячего цинкования. Горелка работает на холодном природном газе и холодном воздухе. Согласно требованиям технологии горелка работает при $\alpha = 0{,}85 \div 0{,}95$ и обеспечивает содержание свободного кислорода в продуктах сгорания < 0,003 %.

Горелка полного предварительного смешения для безокислительного нагрева показана на рис. 7 33.

Для хорошего предварительного смешения на пути воздуха установлены закручивающие лопатки, которые образуют профилированный смеситель. Газ подается мелкими струями в закрученный поток воздуха. Для стабилизации горения в носике горелки установлены пластины, на которых укреплен стабилизатор горения из колец. Пластины с кольцами разбивают поток газовоздушной смеси на мелкие струи, в результате чего выравниваются скорости, затрудняется проникновение пламени в горелку, увеличиваются пределы регулирования, а за пластинами и кольцами создаются зоны устойчивого воспламенения. Горелка работает в комплекте с дежурной электрозапальной горелкой.

Номинальная пропускная способность горелки по газу 0,0083 м^3/с при давлении перед горелкой газа 13, воздуха 11,5 кПа. Пределы регулирования горелки по газу 0,0055–0,01 м^3/с. Масса 27 кг.

Агрегаты, на которых устанавливаются такие горелочные устройства,

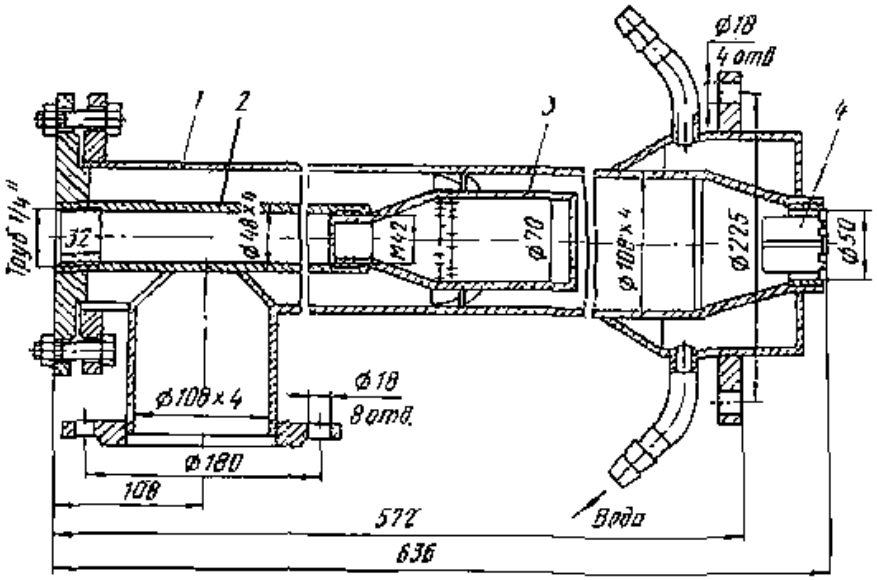


Рис. 7.33. Горелка полного предварительного смешения для безокислительного нагрева.
1 – корпус; *2* – газовая труба; *3* – наконечник газового сопла (завихритель); *4* – стабилизатор горения

должны быть оснащены средством для дожигания продуктов неполного сгорания.

Основные конструктивные данные горелки и характеристики ее работы, полученные при испытаниях в условиях противодавления в камере горения, 50 кПа, приведены в табл. 7.22.

Таблица 7.22

Основные данные испытаний и конструктивные характеристики горелки для безокислительного нагрева (рис. 7.33)

Параметр и характеристика	Величина
Основная горелка	
Номинальная тепловая мощность, кВт	275
Номинальный расход газа, $м^3/ч$	27,8
Номинальное давление газа, кПа	12,5
Номинальный расход воздуха, $м^3/ч$	246
Номинальное давление воздуха, кПа	10,8
Коэффициент расхода воздуха	0,88
Диапазон рабочего регулирования.	
по расходу газа, $м^3/ч$	4,0—27,8
по давлению газа, кПа	0,38—12,5
Коэффициент рабочего регулирования	6,7
Состав продуктов сгорания на расстоянии 0,025 м	$CO + H_2 = 6,4$
от выходного сечения горелочного камня, % об.	$O_2 - 0,0005$
Диаметр газовых отверстий, мм	2,3
Количество газовых отверстий, шт.	36
Угол наклона закручивающих лопаток, град.	23
Длина вылета закручивающих лопаток, мм	34
Внутренний диаметр корпуса горелки, мм	100
Наружный диаметр наконечника сопла, мм	70
Диаметр входного отверстия горелочного камня, мм	70
Диаметр выходного отверстия горелочного камня, мм	150
Дежурная горелка	
Тепловая мощность, кВт	49,5
Расход газа, $м^3/ч$	0,5
Давление газа, кПа	0,51
Расход воздуха, $м^3/ч$	4,3
Давление воздуха, кПа	0,45
Система зажигания	Свеча mCA-55 АНМ-70

7.12. ДУТЬЕВЫЕ ГОРЕЛКИ ТИПА ДИС С ИНЖЕКЦИОННЫМ СМЕСИТЕЛЕМ

В горелках инжекционного типа в качестве активного энергоносителя может использоваться воздух. Принцип инжекции газа воздушной струей положен в основу горелок, разработанных в КПТИ. Общий вид горелок ДИС показан на рис. 7.34, а основные конструктивные размеры приведены в табл. 7.23.

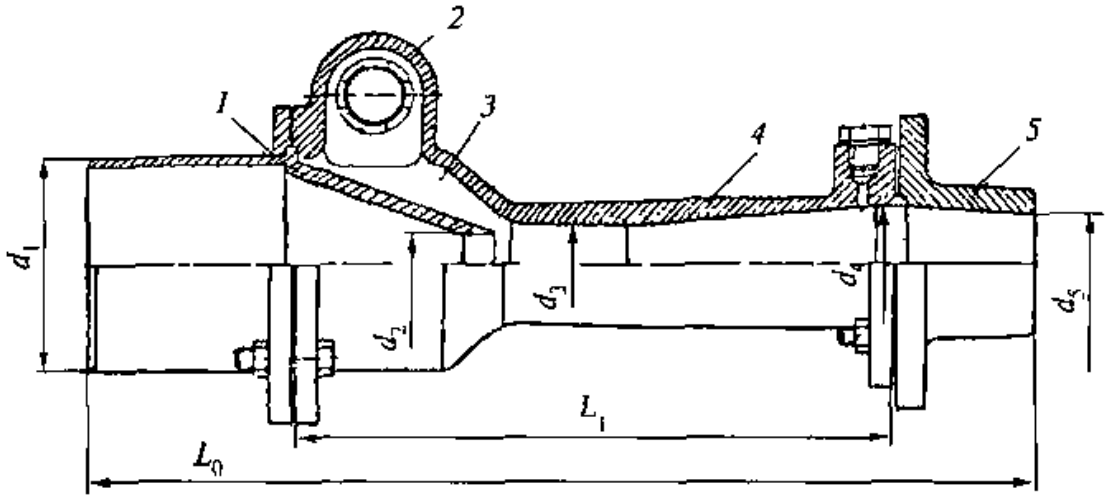


Рис. 7.34. Дутьевая горелка типа ДИС с инжекционным смесителем
1 – воздушное сопло; *2* – газовая втулка, *3* – камера всасывания; *4* – корпус смесителя; *5* – горелочная головка

Таблица 7.23

Конструктивные размеры (мм) горелок ДИС (рис. 7.34)

Обозначение горелки	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	L_1	L_2	C	Диаметр выходного отверстия туннеля
ДИС-0,1	75,5	24,4	30	43	34,3	262	389	7	95
ДИС-0,25	114	39	47	66	56	703	548	9	155
ДИС-1,0	224	77	92	128	115	807	1064	27	296

Дутьевая горелка типа ДИС с инжекционным смесителем состоит из воздушного сопла, корпуса смесителя, горелочной головки и газовой втулки.

Воздух через воздушное сопло истекает в смеситель. Газ, проходя через окна газовой втулки, преодолевает стабилизирующее сопротивление, величина которого регулируется клапаном, находящимся на газовой линии, в зависимости от необходимого минимального значения коэффициента расхода воздуха, и поступает в камеру всасывания. Воздушная струя инжектирует необходимое количество газа и перемешивается с ним в смесителе. Образующаяся горючая смесь через горелочную головку поступает в огнеупорный туннель, где в основном и происходит ее сгорание. Основные паспортные данные дутьевой горелки типа ДИС с инжекционным смесителем приведены в табл. 7.24.

Таблица 7.24

Основные паспортные данные горелок ДИС

Наименование показателей	Типоразмер горелок		
	ДИС-0,1	ДИС-0,25	ДИС-1,0
Номинальная тепловая мощность, МВт	0,114	0,293	0,93
Номинальный расход газа, $м^3/ч$	11,4	23,2	111,8
Номинальное давление газа, кПа	1,82	1,67	1,42
Номинальный расход воздуха, $м^3/ч$	118	292	1138
Номинальное давление воздуха, кПа	1,82	1,67	1,42
Коэффициент расхода воздуха	1,04	1,04	1,03
Диапазон рабочего регулирования:			
по расходу газа, $м^3/ч$	2,0–11,4	5,0–23,2	25,5–111,8
по давлению газа, кПа	0,05–1,82	0,05–1,67	0,07–1,42
по расходу воздуха, $м^3/ч$	20–118	52–292	258–1138
по давлению воздуха, кПа	0,05–1,82	0,05–1,67	0,07–1,42
Коэффициент рабочего регулирования	5,7	5,6	4,4
Длина факела, м	0,23	0,465	0,53

7.13. СКОРОСТНЫЕ ГОРЕЛКИ ГГПС ДЛЯ БЕЗОКИСЛИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА

Скоростные горелки предварительного смешения природного или коксового газа и воздуха разработаны ВНИИМТ и Стальпроектом для агрегатов непрерывного горячего алюминирования. Горелки работают без подогрева газа и воздуха. Общий вид разработанных горелок показан на рис. 7.35, а технические и конструктивные характеристики приведены в табл. 7.25.

Горелка состоит из корпуса с патрубками для подвода воздуха и газа, смесителя, огнепреградителя и водоохлаждаемой фурмы. Между корпусом и смесителем установлено воздушное сопло с периферийными наклонными в сторону оси горелки отверстиями для истечения воздуха в поток газа.

Воспламенение газа происходит при истечении смеси в горелочный туннель.

При работе горелки ГГПС-2 на номинальной нагрузке возникающий шум превышает установленные нормы. Для снижения уровня шума в смеситель дополнительно устанавливают подпорную решетку с семью отверстиями диаметром 26 мм каждое.

Расходные характеристики горелок ГГПС приведены на рис. 7.36.

Для работы на коксовом газе разработана горелка (рис. 7.37) с упрощенной конструкцией смесителя [1]. Особенностями конструкции являются разворот патрубка подвода воздуха на 180°, что позволяет уменьшить длину смесителя, и радиальная раздача газа через стенку газовой трубы в сносящий поток воздуха. В горелочном туннеле установлен рассекатель потока.

При расходе коксового газа 70 $м^3/ч$ горелочное устройство обеспечивает получение на выходе из туннеля продуктов неполного горения с концентрацией кислорода 0,003 %. Однако при таком варианте конструкции больше вероятность забивания газовых отверстий отложениями смол и нафталина.

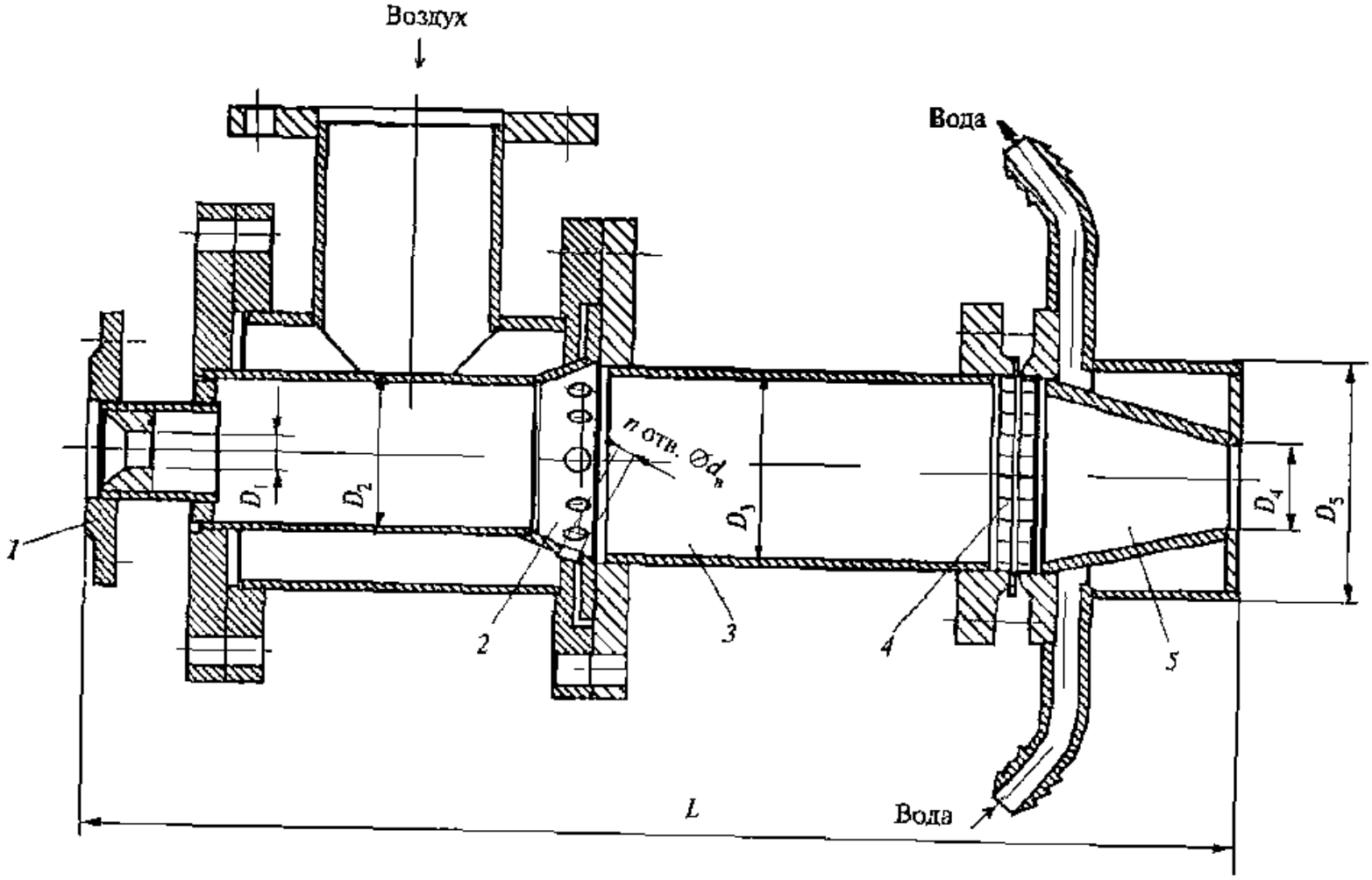


Рис. 7.35. Газовая горелка предварительного смешения ВНИИМТ-Стальпроекта ГГПС:
1 — газовое сопло; *2* — воздушное сопло; *3* — смеситель; *4* — огнепреградитель; *5* — водоохлаждаемая фурма

Таблица 7.25

Технические и конструктивные характеристики скоростных горелок ВНИИМТ-Стальпроекта (рис. 7.35)

Технические и конструктивные характеристики	Размерность	Типоразмер горелки		
		ГГПС-1		ГГПС-2
		природный газ	коксовый газ	природный газ
Номинальная тепловая мощность	кВт	350	350	500
Номинальный расход газа	м³/ч	35	75	50.3
Номинальный расход воздуха	м³/ч	280	250	406
Номинальное давление газа	кПа	1,5	2,8	6,2
Номинальное давление воздуха	кПа	4,0	4,0	4,9
Коэффициент расхода воздуха		0,85	0,85	0,85
Диапазон изменения коэффициента расхода воздуха, при котором обеспечивается концентрация O_2 < < 0,003 %		0,85÷0,93	0,85÷0,91	0,80÷0,93
Диапазон изменения расхода газа, при котором обеспечивается концентрация O_2 < 0,003 %		8÷35	–	12,7÷60,2
Коэффициент рабочего регулирования		4,4	3,5	3,96
Характерные размеры:				
D_1	мм	14	22,4	16
D_2	" – "	89×4,5		114,5
D_3	" – "	108×4,0		127×5
D_4	" – "	50		60
D_5	" – "	135		155
$d_в$	" – "	12		18
n	шт.	12		14
l	мм	715		823
Длина туннеля	" – "	580		720
Диаметр туннеля	" – "	150		178

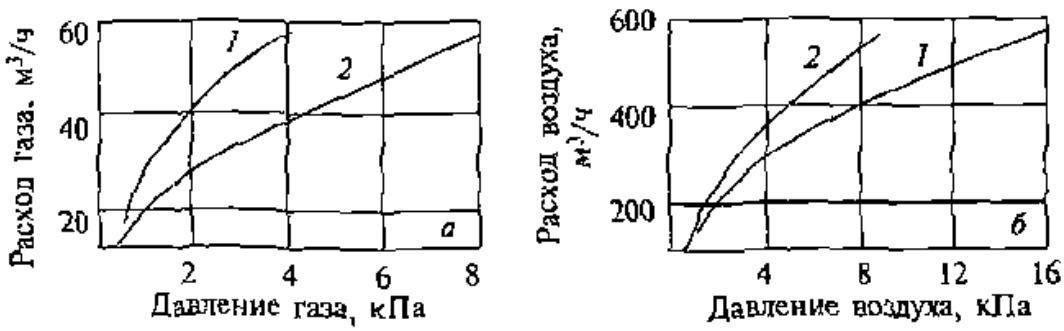


Рис. 7.36. Зависимости расхода природного газа (*а*) и воздуха (*б*) от давления этих сред перед горелками ГГПС при α = 0,85:
1 — *горелка ГГПС-1*; *2* — горелка *ГГПС-2*

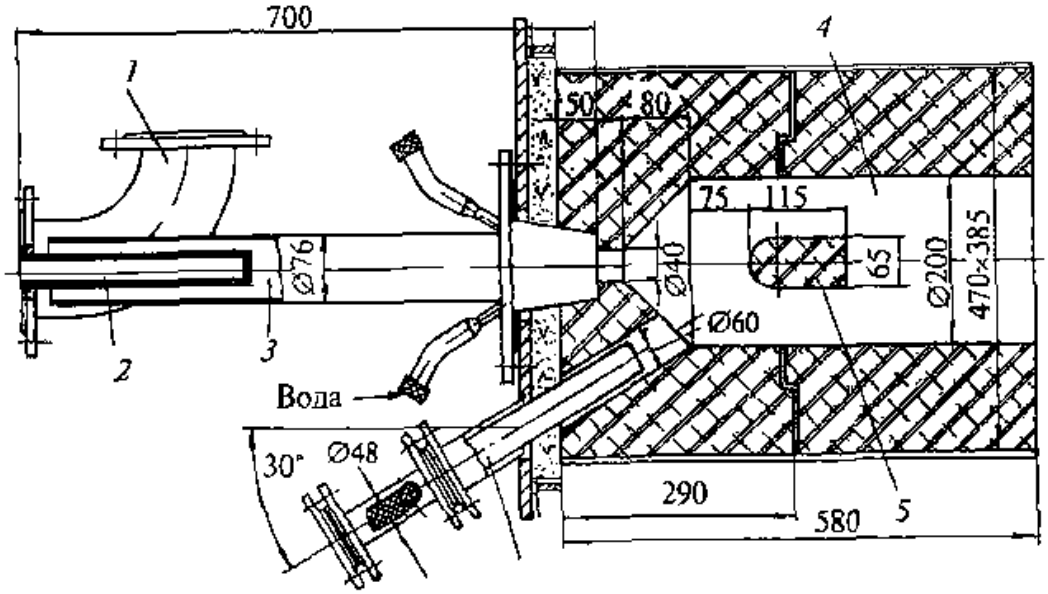


Рис. 7.37. Горелочный блок для сжигания коксового газа;
1 — воздушный патрубок; *2* — газовая труба; *3* — смеситель; *4* — горелочный камень; *5* — рассекатель; *6* — запальное устройство

7.14. ГОРЕЛКИ ТИПА ГВН ДЛЯ ВНЕПЕЧНОГО НАГРЕВА

Для сжигания природного газа в установках местного нагрева изделий ВНИИМТ разработаны горелки предварительного смешения тепловой мощностью 0,1 и 0,3 МВт. Общий вид горелок показан на рис. 7.38, а технические характеристики приведены в табл. 7.26.

При работе горелки в смесительный канал подается предварительно подготовленная смесь с коэффициентом расхода воздуха меньше единицы. Воспламенение смеси происходит в корпусе горелки и завершается в кольцевом разомкнутом факеле вне ее пределов. Наблюдаются два режима горения, условно названные внутренний и внешний. При внутреннем режиме горение в основном сосредоточено в пределах корпуса горелки. При внешнем режиме горение происходит в основном за пределами корпуса. Режим горе-

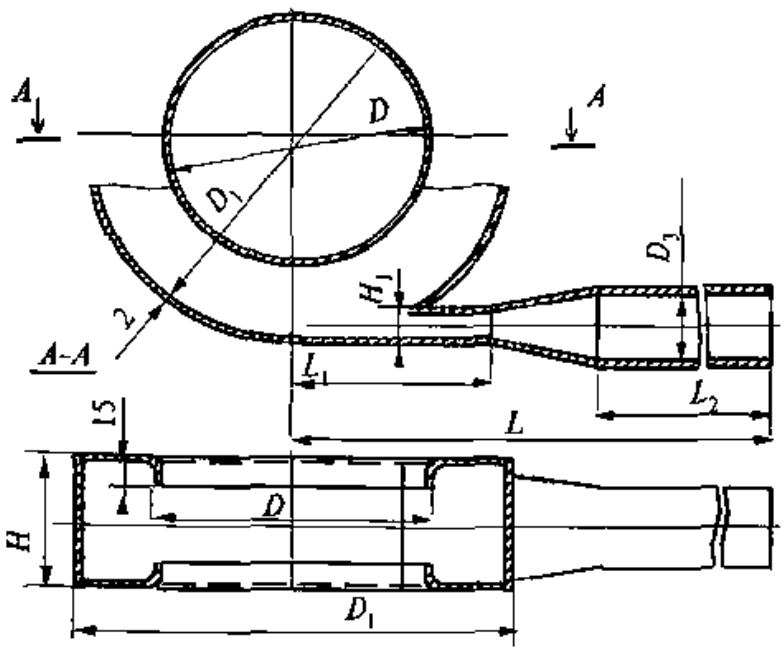


Рис. 7.38. Горелка для внепечного нагрева

ния зависит как от расхода газа, так и от коэффициента расхода воздуха. Характерные зоны горения, полученные при испытании горелки тепловой мощностью 0,3 МВт, представлены на рис. 7.39. Расходные характеристики горелки данной мощности приведены на рис. 7.40.

Таблица 7.26

Технические и конструктивные характеристики горелок внепечного нагрева (рис. 7.38)

Параметр и характерный размер	Размерность	Типоразмер горелки	
		ГВН-1	ГВН-2
Номинальная тепловая мощность	МВт	0,1	0,3
Номинальный расход газа	м³/ч	10,0	30,0
Номинальный расход воздуха	м³/ч	—	132
Номинальное давление газа	кПа	1,5	1,5
Номинальное давление воздуха	кПа	1,2	1,2
Коэффициент расхода первичного воздуха		0,4	0,46
Коэффициент рабочего регулирования		3	3,58
Коэффициент предельного регулирования		—	4,63
Характерный размер:	мм		
D		145	200
D_1		210	300
D_2		32	48
L		250	515
L_1		100	140
L_2		120	150
H		80	100
H_1		14	14

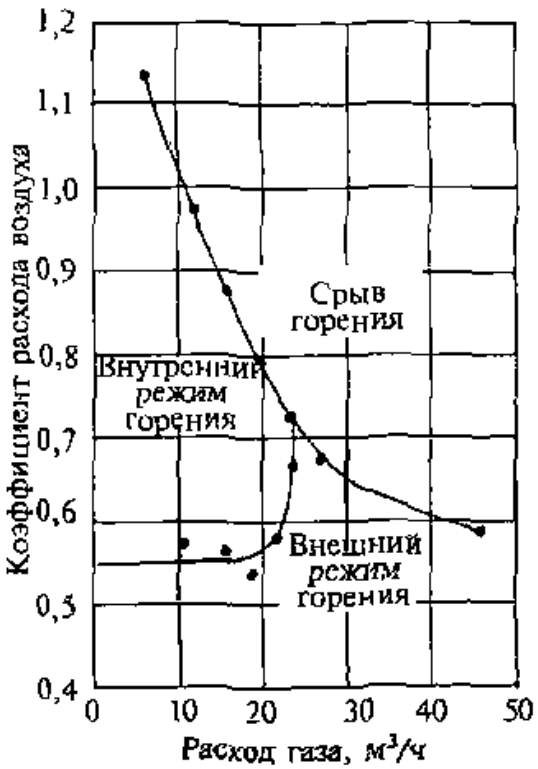


Рис. 7.39. Диапазоны режимов работы горелки ГВН-2 в зависимости от расхода газа и коэффициента расхода воздуха



Рис. 7.40. Зависимость расхода газа (*1*) и расхода воздуха (*2*) от давления этих сред перед горелкой ГВН-2 при коэффициенте расхода воздуха 0,46

7.15. ГАЗОВАЯ ГОРЕЛКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ

Двухпроводная горелка предварительного смешения тепловой мощностью 1 МВт разработана Уралгипромезом и ВНИИМТ для сжигания природного газа в циклонных печах, предназначенных для огневого обезвреживания жидкотекучих промышленных маслосодержащих отходов. Общий вид горелки показан на рис. 7.41.

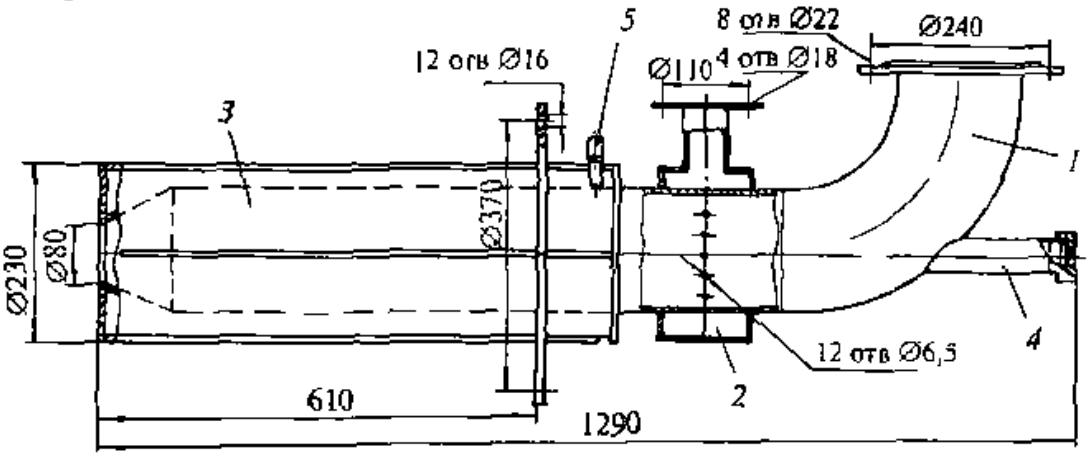


Рис. 7.41. Двухпроводная горелка предварительного смешения:
1 — подвод воздуха; *2* — газовый коллектор; *3* — смеситель; *4* — смотровой патрубок; *5* — патрубки подвода и отвода воды

Горелка имеет торцевой подвод воздуха и периферийный газовый коллектор с 12 отверстиями диаметром 6,5 мм каждое. Смеситель горелки имеет на выходе коническое сужение и рубашку водяного охлаждения.

Ниже приведены технические характеристики горелки.

Расход природного газа номинальный	100 м³/ч
Давление газа номинальное	6,2 кПа
Расход воздуха номинальный	1000 м³/ч
Давление воздуха	3,05 кПа
Максимальная тепловая мощность	1,24 МВт
Минимальная тепловая мощность	0,2 МВт
Коэффициент рабочего регулирования	3,0
Коэффициент предельного регулирования	6,2
Видимая длина факела	0,9 м
Содержание оксидов азота в сухих продуктах сгорания в пересчете на NO_2 при $\alpha = 1,0$.	65 мг/м³

При работе горелки подготовленная в смесителе смесь по горелочному туннелю диаметром 80 мм и длиной 600 мм вытекает тангенциально в футерованную камеру горения. Воспламенение смеси происходит на стенке камеры горения.

Расходные и регулировочные характеристики горелки приведены на рис. 7.42, а степень выгорания по длине факела на рис. 7.43.



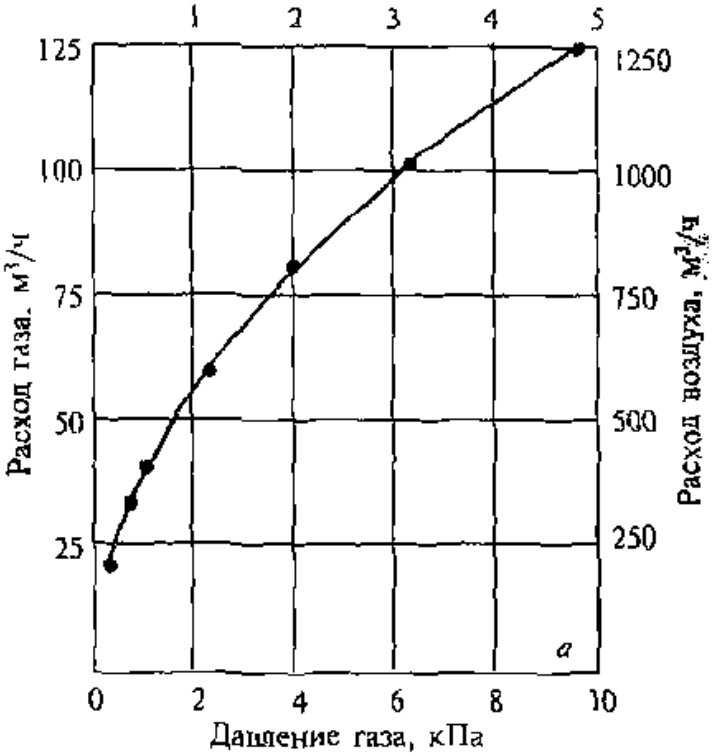


Рис 7.42. Расходные (*а*) и регулировочные (*б*) характеристики горелки предварительного смешения Уралгипромеза-ВНИИМТ

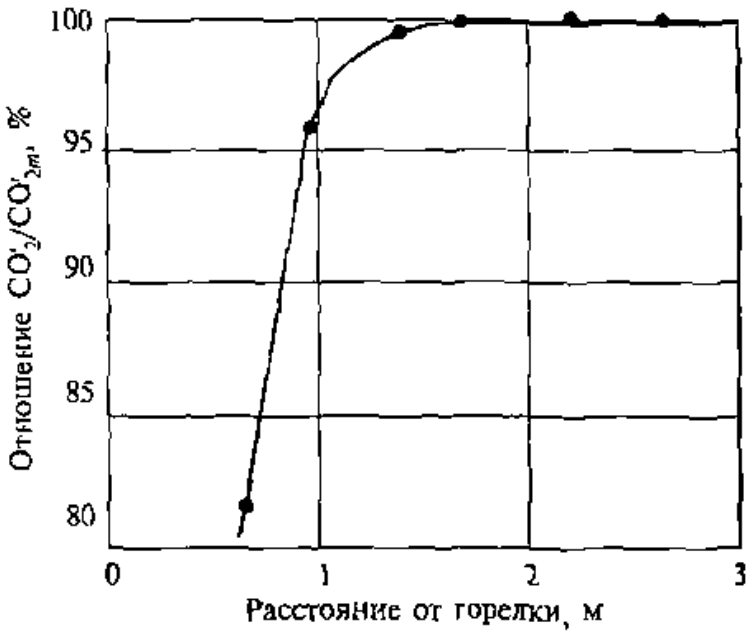


Рис 7.43. Изменение степени выгорания по длине факела горелки Уралгипромеза-ВНИИМТ

7.16. БЛОЧНЫЕ ИНЖЕКЦИОННЫЕ ГОРЕЛКИ БИГ И БИГ-М

Горелки БИГ разработаны Промэнергогазом для топок, работающих под разрежением 15–20 Па при тепловом напряжении объема топки не более 0,465 МВт/м³. Общий вид горелок БИГ показан на рис. 7.44, а технические характеристики приведены в табл. 7.27.

В обозначении горелки первая цифра: 1 — однорядная, 2 — двухрядная, 3 — трехряднал; вторые цифры — число единичных элементов.

Каждая горелка состоит из набора единичных элементов — смесителей ∅48×3 и длиной 290 мм, объединенных общей газовой камерой. В стенке смесителя под углом 25° просверлены четыре сопла диаметром 1,5 мм, разженкованных со стороны коллектора. Из сопел подается газ, который через открытый торец смесителя инжектирует воздух с $\alpha = 1{,}02 \div 1{,}05$. Устройство для регулирования расхода воздуха отсутствует.

Горение газовоздушной смеси начинается в керамическом прямоугольном туннеле длиной 100 мм, высотой и шириной — по размерам корпуса Прямоугольная форма туннеля позволяет выполнять его из огнеупорного кирпича с минимаяьным количеством обмазки, что повышает его надежность и долговечность. При установке горелки в кладке топки толщиной 510 мм образуется ниша глубиной 130 мм, позволяющая разместить щумопоглощающее устройство

Пространство между единичными элементами заполняют огнеупорной массой густой консистенции с размером зерен не более 3 мм в два этапа: первоначальная набивка массы с подсушкой ее в атмосферных условиях в течение 24 ч и дополнительная подбивка массы с такой же выдерж-

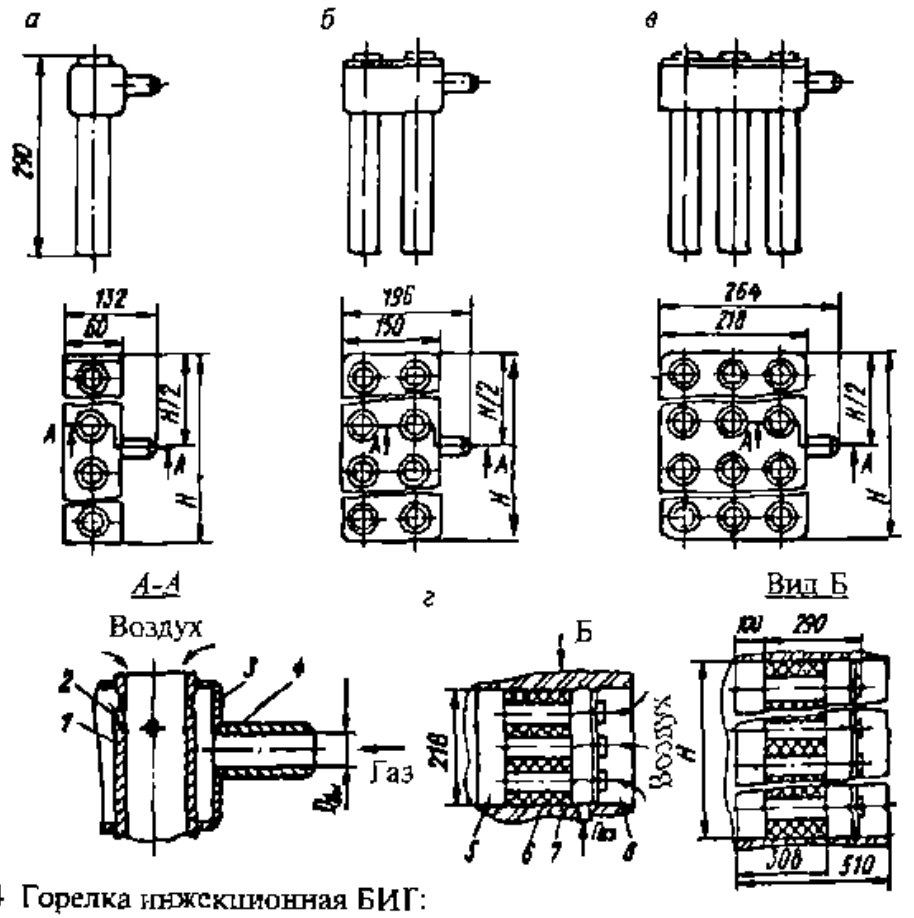


Рис 7.44 Горелка инжекционная БИГ:
а — однорядная; *б* — двухрядная, *в* — трехрядная, *г* — установка трехрядной горелки в кладке топки, *1* — смеситель, *2* — сопло, *3* — газовая камера; *4* — штуцер; *5* — туннель, *6* — кладка топки; *7* — огнеупорная набивка; *8* — ниша в стенке топки

кой. Окончательную досушку массы проводят при работе горелки с минимальной тепловой нагрузкой не менее 12 ч.

Горелки БИГм являются модификацией горелок типа БИГ. При сохранении основного принципа подачи газа и воздуха эти горелки отличаются тем, что их смеситель имеет конический участок для более равномерного входа воздуха и конический участок для истечения газовоздушной смеси (рис.7.45). Газовые сопла выполнены в виде втулок, запрессованных в цилиндрическую часть смесителя. Технические характеристики горелок БИГм приведены в табл. 7.28.

Горелки типа БИГ обеспечивают полное сгорание газа на длине факела около 1 м.

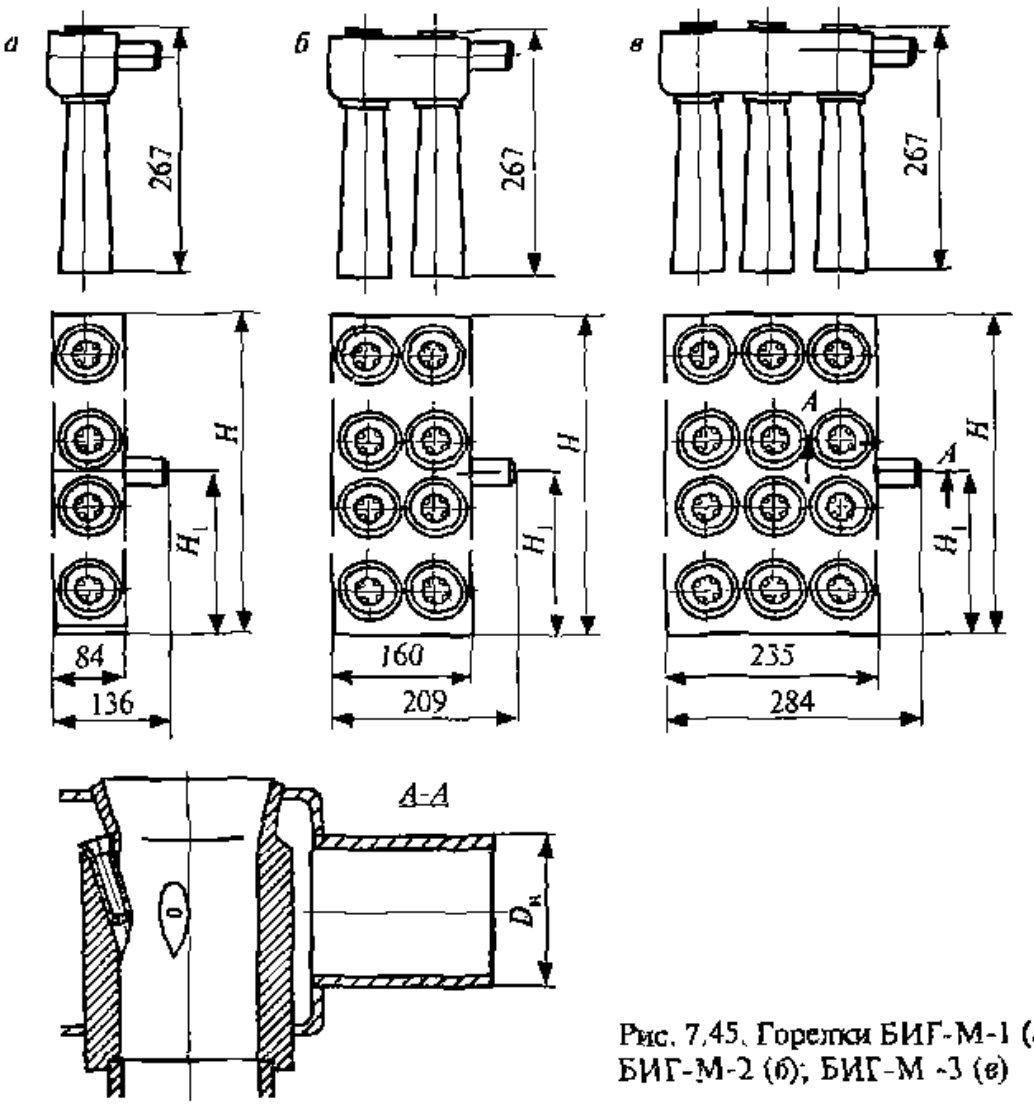


Рис. 7.45. Горелки БИГ-М-1 (*а*); БИГ-М-2 (*б*); БИГ-М -3 (*в*)

Таблица 7.27

Основные характеристики горелок БИГ (рис. 7.44)

Обозначение горелки	Номинальные		Минимальный расход газа, м³/ч, при $p_г$ = = 7 кПа	Размеры, мм		Масса, кг
	тепловая мощность, МВт	расход газа, м³/ч, при $p_г$=80 кПа		H	$D_{вн}$	
БИГ-1-1	0,95	9,7	3,2	70	21	2,2
БИГ-1-3	0,21	29,1	9,7	218	27	5,1
БИГ-1-6	0,58	58,2	19,4	422	27	9,4
БИГ-1-11	1,05	106,7	35,6	762	41	16,8
БИГ-1-13	1,25	126,1	42,0	898	41	19,6
БИГ-1-14	1,34	135,8	45,3	966	41	21,0
БИГ-1-16	1,54	155,2	51,7	1102	41	24,1
БИГ-1-18	1,73	174,6	58,2	1238	53	27,0
БИГ-1-22	2,11	213,4	71,1	1510	53	32,9
БИГ-2-4	0,38	38,8	12,7	144	21	6,1
БИГ-2-6	0,58	58,2	19,4	212	27	8,7
БИГ-2-8	0,77	77,6	25,9	280	27	11,4
БИГ-2-10	0,96	97,0	32,3	348	41	14,1
БИГ-2-12	1,15	116,4	38,8	416	41	16,8
БИГ-2-14	1,34	135,8	45,3	484	41	19,5
БИГ-2-16	1,54	155,2	51,7	552	41	22,1
БИГ-3-12	1,15	116,4	38,8	280	41	16,5
БИГ-3-21	2,1	203,7	67,9	484	53	28,0
БИГ-3-24	2,3	232,8	77,6	552	53	31,8

Таблица 7.28

Основные характеристики горелок БИГм (рис. 7.45)

Обозначение горелки	Тепловая мощность, МВт		Размеры, мм			Масса, кг
	номинальная	максимальная рабочая	$D_н$	H	H_1	
БИГм-1-1	0,23	0,077	28	100		3,0
БИГм-1-4	0,92	0,31	48	306	153	10,0
БИГм-1-6	1,38	0,46	48	456	228	14,7
БИГм-1-8	1,84	0,62	48	606	303	19,4
БИГм-1-10	2,3	0,77	60	756	378	24,1
БИГм-1-12	2,76	0,92	60	906	453	28,1
БИГм-1-15	3,45	1,15	60	1131	565	35,8
БИГм-2-4	0,92	0,31	48	160		9,6
БИГм-2-6	1,38	0,46	48	235	117	14,0
БИГм-2-10	2,3	0,77	60	395	197	22,8
БИГм-2-16	3,68	1,23	60	610	305	36,0
БИГм-3-18	4,14	1,38	60	460	230	39,8

7.17. ГАЗОВЫЙ СМЕСИТЕЛЬ ВНИИМТ

Смеситель предназначен для приготовления газовоздушной смеси природного газа и воздуха, подаваемой в горелки предварительного смешения. Конструкция основана на принципе принудительного нагнетания газа и воздуха в смеситель в виде системы струй.

Смеситель рассчитан на приготовление смеси в количестве 100–400 м^3/ч при коэффициенте расхода воздуха от 0,8 до 0,9.

Смеситель состоит из воздухоподводящего канала и бокового ввода природного газа (рис. 7.46). Газовый канал в выходном сечении имеет решетку с пятью отверстиями диаметром 10 мм каждое.

В воздушном канале установлена решетка, в которой выполнены 12 отверстий диаметром 19,4 мм каждое с патрубками, установленными под углом к оси смесителя. На выходе из камеры смешения установлена турбулизирующая решетка.

При работе смесителя пересекающиеся струи газа и воздуха способствуют созданию однородной смеси. Окончательная подготовка качественной смеси происходит за решеткой на выходе из камеры смешения.

Расходные характеристики смесителя приведены на рис. 7.47. При номинальном расходе газа 45 м^3/ч сопротивление газового тракта составляет 0,54 кПа. Для воздушного тракта при расходе воздуха 350 м^3/ч эта величина составляет 0,7 кПа.

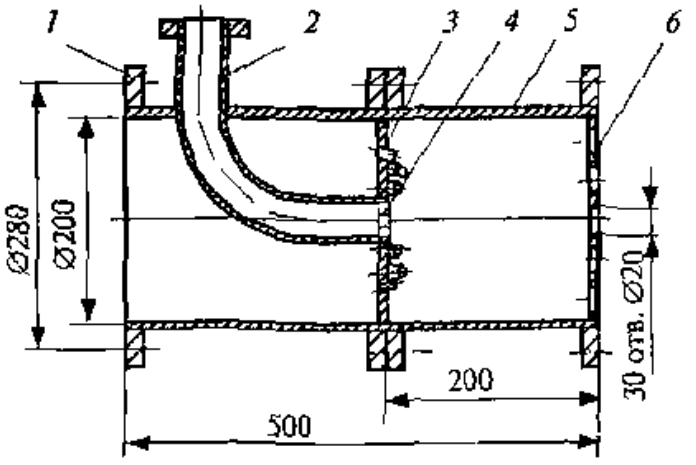


Рис. 7.46. Схема газового смесителя ВНИИМТ:
1 – подвод воздуха; *2* – подвод газа; *3* – решетка воздушная; *4* – решетка газовая; *5* – камера смешения; *6* – решетка газовоздушной смеси

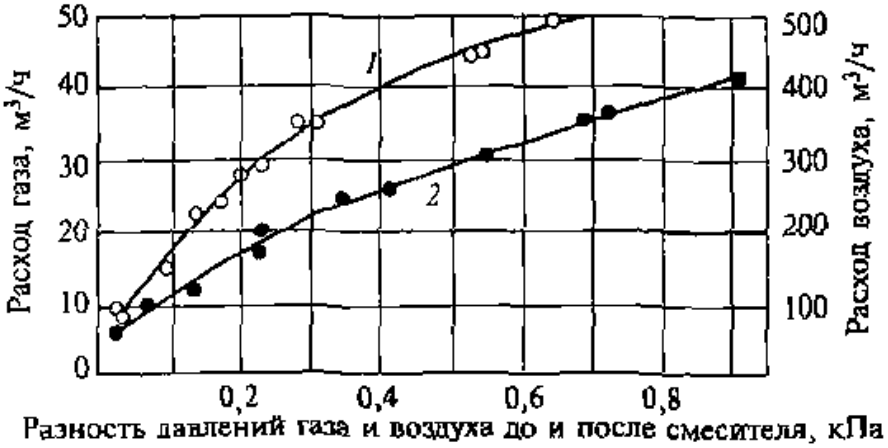


Рис. 7.47. Расходная характеристика смесителя:
1 – по тракту подачи газа; *2* – по тракту подачи воздуха

7.18. ГОРЕЛОЧНЫЙ БЛОК ПАТЕНТИРОВОЧНОЙ ПЕЧИ

Горелочный блок разработан ВНИИМТ и ВНИИметиз для сжигания природного газа в патентировочной печи и создания в ней слабо восстановительной атмосферы. Общий вид горелочного блока показан на рис. 7.48, а технические характеристики, полученные при испытаниях, приведены в табл. 7.29.

Горелочный блок состоит из фурмы для истечения газовоздушной смеси, горелочного камня, форкамеры, смесепровода с краном и огнепреградителя. При работе горелочного блока газовоздушная смесь через огнепреградитель и запорный кран подается в фурму, при истечении из которой происходит воспламенение в горелочном камне Продукты горения вытекают в форкамеру, имеющую выходное отверстие диаметром, меньшим диаметра горелочного камня. В объеме форкамеры происходит интенсивное перемешивание продуктов горения, сопровождающееся полным расходованием свободного кислорода и выравниванием концентраций газов.

Регулирование тепловой мощности блока осуществляется по давлению смеси непосредственно перед горелкой, при ее единичной компоновке на печи, или по давлению перед огнепреградителем (в общем смесепроводе печи) в соответствии с расходной характеристикой (рис. 7.49).

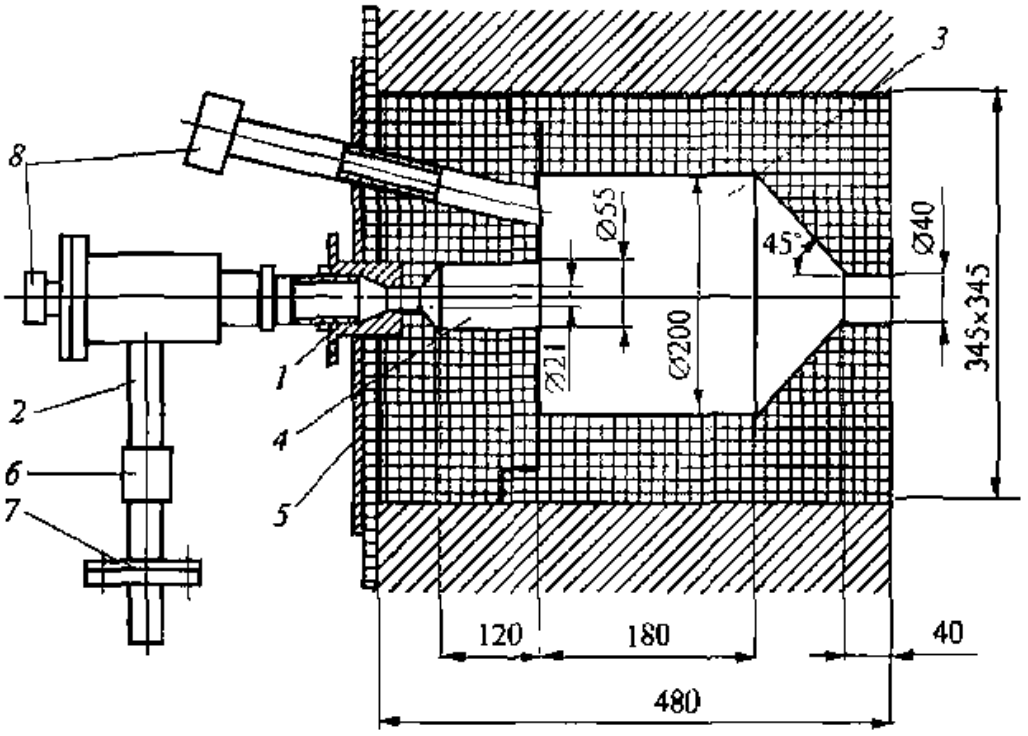


Рис. 7.48. Горелочный блок патентировочной печи:
1 – фурма; *2* – смесепровод; *3* – форкамера; *4* – горелочный камень; *5* – горелочная плита; *6* – кран, *7* – огнепреградитель; *8* – запальный и смотровой патрубки

Таблица 7.29

Техническая характеристика горелочного блока (рис. 7.48)

Параметр	Размерность	Значение параметра
Номинальная тепловая мощность	кВт	29,6
Номинальный расход газа	м³/ч	3,0
Номинальный расход воздуха	м³/ч	23,3
Номинальный расход газовоздушной смеси	м³/ч	28,3
Номинальное даление газовоздушной смеси.		
перед горелкой	кПа	1,0
перед огнепреградителем	кПа	4,6
Коэффициент расхода воздуха		0,9
Коэффициент рабочего регулирования		3,0
Максимальная тепловая мощность	кВт	38,5
Коэффициент предельного регулирования		3,9
Содержание оксида углерода в сухих продуктал сгорания в диапазоне рабочего регулирования	–	3.3



Рис. 7.49. Зависимость расхода газовоздушной смеси от давления смеси перед горелкой (*1*) и перед огнепреградителем (*2*)

7.19. ГОРЕЛКА ДЛЯ КАМЕР СКОРОСТНОГО НАГРЕВА ЛЕНТЫ

Институтами ВНИИМТ и Стальпроект для агрегата термопластической отделки стальной холоднокатаной ленты разработана струйно-факельная горелка предварительного перемешивания. Горелка обеспечивает скоростной предварительный нагрев ленты до температуры 250–300 °С с одновременным удалением с ее поверхности остатков прокатной смазки. Основными элементами горелочного устройства (рис. 7.50, *а*) являются смеситель, стабилизатор и камера сгорания. Горение природного газа происходит в высокоскоростном факеле длиной около 0,2 м.

Технические характеристики горелки:

Номинальная тепловая мощность, квт 24,8
Номинальный расход газа, м³/ч, ... 1,03

Номинальный коэффициент расхода воздуха	1,03
Номинальное давление газовоздушной смеси, кПа	2,8
Коэффициент рабочего регулирования —	5
Коэффициент предельного регулирования —	6,1

Расходная характеристика горелки приведена на рис. 7.50, б.

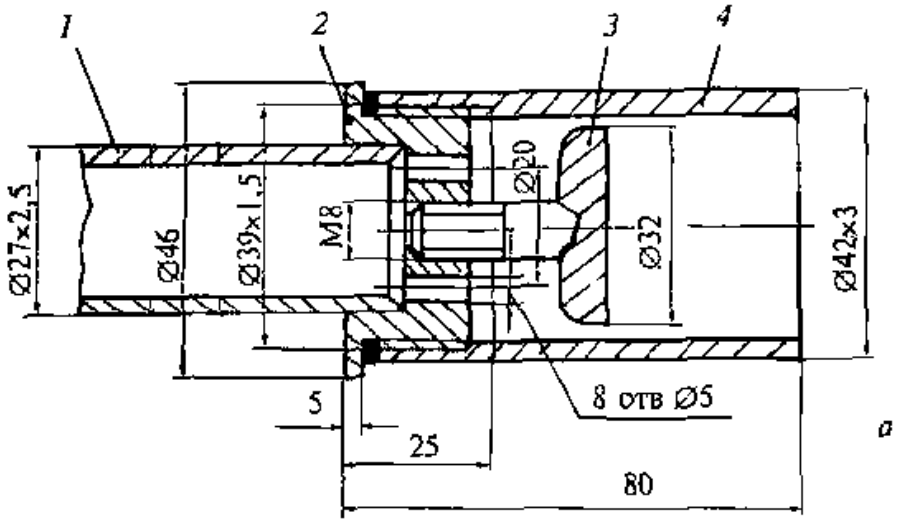




Рис. 7.50. Горелка для камер скоростного нагрева ленты: *а* — общий вид; *б* — расходная характеристика; *1* — патрубок подвода смеси; *2* — насадок с отверстиями; *3* — стабилизатор, *4* — корпус камеры сгорания

7.20. СТРУЙНО-ФАКЕЛЬНЫЙ НАГРЕВАТЕЛЬ СФН

Струйно-факельные нагреватели предназначены для нагрева заготовок различного диаметра в процессе изготовления отводов методом горячей протяжки.

Для нагрева заготовок диаметром от 45 до 83 мм струйно-факельный нагреватель разработан институтом ВНИИтеплопроект (СФН-1), для заготовок диаметром 121—168 мм институтом ВНИИМТ (СФН-2). Оба нагревателя имеют приблизительно одинаковое конструктивное исполнение. Ниже описаны конструкция и особенности работы нагревателя СФН-2.

Нагреватель (рис. 7.51) состоит из 4 рабочих секций с групповыми или индивидуальными смесителями газа и воздуха, двух концевых секций с системой дымоудаления и оборудован системой электророзжига. Загрузка заготовок, расположенных на штангах пресса и формообразующих сердеч-

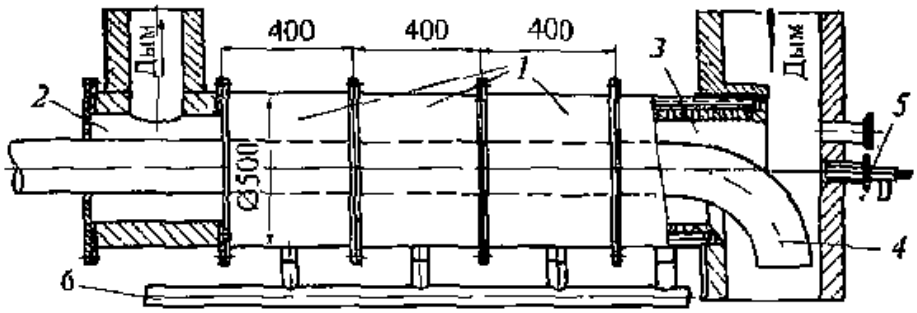


Рис. 7.51 Общий вид нагревателя СФН-2:
1 – рабочие секции; *2* – входная секция; *3* – то же, выходная; *4* – формообразующий сердечник; *5* – запально-дежурная горелка; *6* – подвод смеси

никах, производится через торец нагревателя. Рабочая секция нагревателя (рис. 7.52) состоит из трех концентрично расположенных труб: корпуса, промежуточной перфорированной трубы и внутренней футерованной трубы с соплами, обращенными в рабочее пространство. Сопла из стали 10Х18Н10Т расположены с равномерным шагом внутри футеровки, поверхность которой выполнена заподлицо со срезами сопел

Работа нагревателя происходит следующим образом Природный газ смешивается с воздухом в смесительных секциях нагревателя, после чего газовоздушная смесь, проходя через перфорированную промежуточную решетку, омывает стенку внутренней трубы системой образующихся струй, охлаждая ее до 200 °С. Поступая в рабочее пространство со скоростью 90–120 м/с через сопла, смесь сгорает в струйно-факельной системе в виде коротких кинетических факелов Продукты сгорания, отдав тепло нагреваемым заготовкам, удаляются через дымоходы входной и выходной секций под вытяжной зонт

Конструкция нагревателя отли-

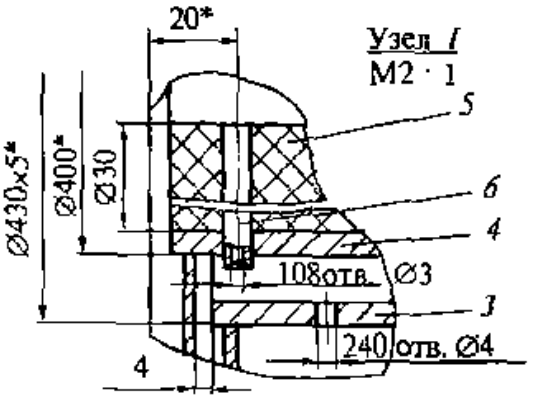
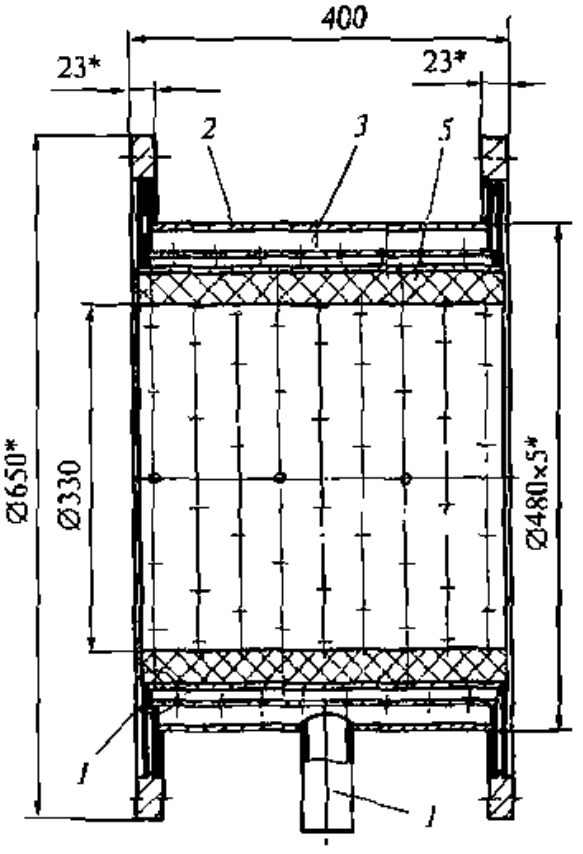


Рис. 7.52. Рабочая секция нагревателя СФН-2·
1 – патрубок подвода газовоздушной смеси; *2* – корпус, *3* – перфорированная труба, *4* – внутренняя труба, *5* – футеровка; *6* – сопло



чается удобством монтажа и эксплуатации и обладает высокой эффективностью нагрева по сравнению с традиционными газовыми печами.

При уровне тепловых потоков на заготовку в среднем около 200 кВт/(м^2 · К) уровень температуры футеровки не превосходит 1000 °С, а значения КПД нагревателя составляют 20—24 %, что в 2—3 раза выше, чем в типовых кузнечных печах для тепловой обработки заготовок с преимущественным радиационным нагревом.

Основные конструктивные и технические параметры струйно-факельного нагревателя СФН-2:

Номинальная тепловая мощность на один метр длины, кВт	540
Расход природного газа, номинальный, м^3/ч	54
Коэффициент расхода воздуха в смеси –	1.03
Давление газовоздушной смеси перед сопловой системой, кПа	4
Скорость смеси в отверстиях перфорированной трубы, м/с	17—34
Температура подогрева смеси перед сопловым аппаратом, °С	Не более 160
Температура смеси на выходе из сопел, °С	Не более 380
Диаметр сопел, мм	3
Шаг установки сопел по длине секции, мм	40
Количество сопел в одном сечении, шт	12
Количество сопел на один погонный метр нагревателя, шт	284
Расстояние от сопел до нагреваемой поверхности металла (зависит от размера заготовки), мм	75 – 100

7.21. ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ГМП-200 ПЕЧИ СКОРОСТНОГО СТРУЙНОГО НАГРЕВА

Горелочное устройство ГМП-200 разработано институтом ВНИИМТ совместно с Первоуральским новотрубным и Северским трубными заводами и предназначено для сжигания природного газа в печах скоростного струйного нагрева металла.

Общий вид горелочного устройства и его компоновка на одной секции печи показаны на рис. 7.53.

Горелочное устройство состоит из смесителя с гибкими металлорукавами для подвода газа и воздуха, газовоздушного коллектора с четырьмя отводами по два слева и справа от вертикальной оси коллектора, четырех огнепреградителей, четырех боковых коллекторов, в каждом из которых по пять сопел с отверстиями 6 мм.

Газ и воздух подаются к горелочному устройству по металлорукавам и смешиваются в смесителе. Готовая газовоздушная смесь из общего коллектора подается через четыре огнепреградителя в сопловые коллекторы и через сопла вдувается в рабочее пространство секции печи.

Розжиг горелочного устройства производится переносным газовым запальником или стационарной запально-дежурной горелкой через отверстие в кладке секции.

Зависимость расхода газа и воздуха от давления этих сред перед смесителем горелки приведены на рис. 7.54

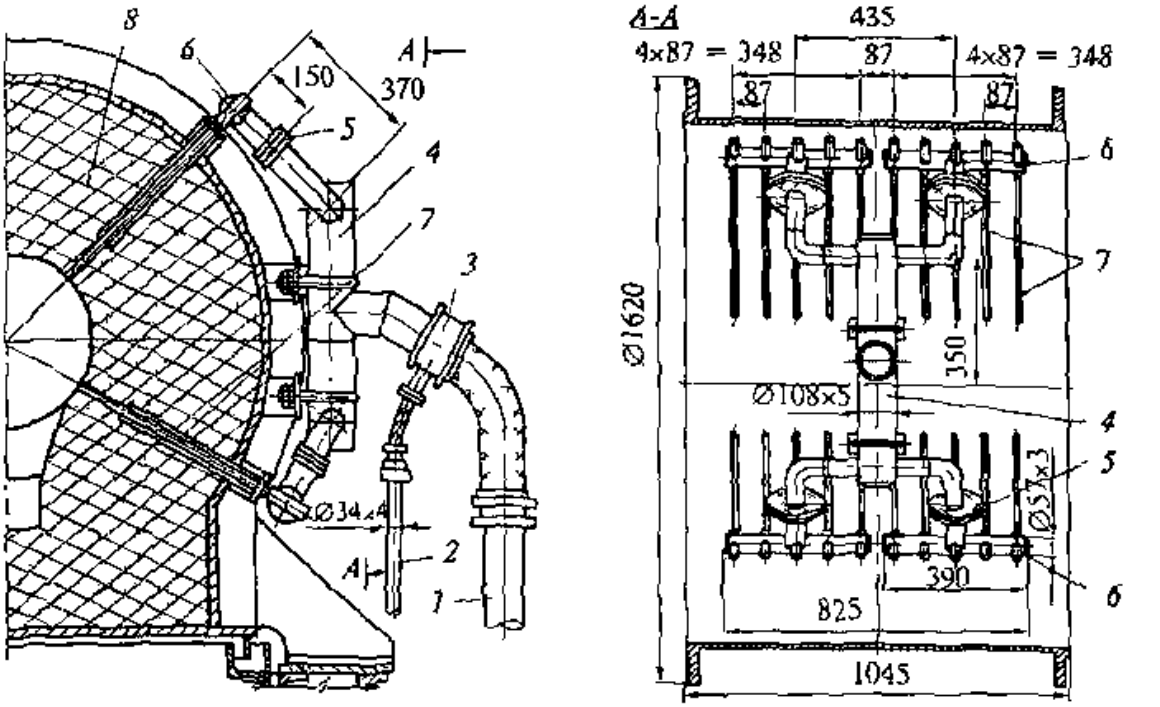


Рис. 7.53. Горелочное устройство ГМП-200 печи скоростного струйного нагрева:
1 – воздухопровод; *2* – газопровод; *3* – смеситель; *4* – газовоздушный коллектор; *5* – огнепреградитель; *6* – сопловый коллектор; *7* – сопло; *8* – печь

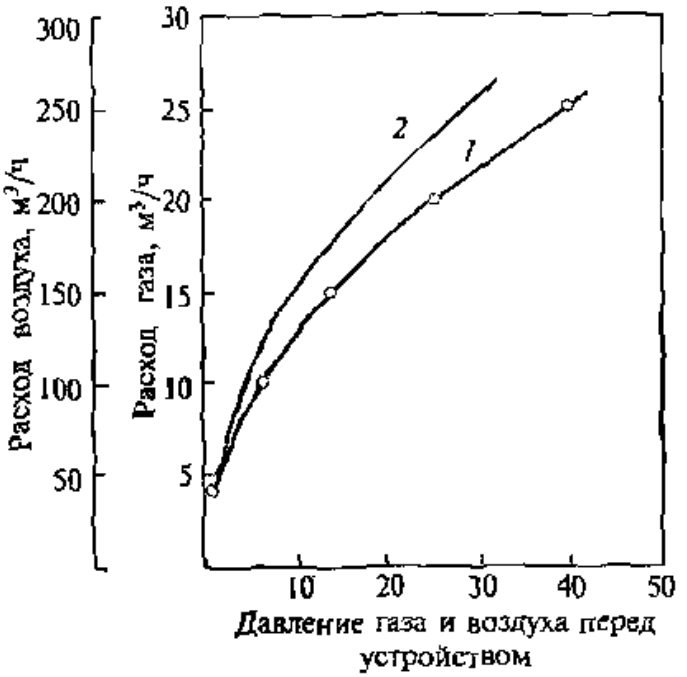


Рис. 7.54. Зависимость расхода газа (*1*) и воздуха (*2*) от их давления перед горелочным устройством

Для обеспечения максимального уровня конвективной теплоотдачи расстояние от сопел до поверхности металла должно быть приблизительно равно длине факела и составлять 150– 200 мм.

Техническая характеристика горелочного устройства ГМП-200:

Номинальная тепловая мощность, кВт	199
Номинальный расход газа, $м^3/ч$,	20
Номинальное давление газа, кПа	25,2
Коэффициент расхода воздуха в смеси	1,03
Номинальное давление воздуха, кПа	18,7
Коэффициент рабочего регулирования	4,4
Температура подогрева воздуха, °С	350–450
Скорость потока на выходе из сопел, м/с	До 350
Масса горелки, кг	60

Температура на оси факела перед ударом о поверхность нагреваемого металла составляет от 1350 до 1550 °С При этом температура футеровки не превышает 1150 °С.

Средний уровень тепловых потоков составляет 200–250 $кВт/м^2$, а максимальное значение около 500 $кВт/м^2$. Доля конвекции в тепловом потоке на металл составляет 60–90 %.

Устойчивое горение смеси при температуре воздуха 400 °С обеспечивается в диапазоне изменения коэффициента расхода воздуха от 0,5 до 1,4.

Глава 8. ФОРСУНКИ ДЛЯ РАСПЫЛИВАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

8.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В качестве жидкого топлива для отопления топок и печей используют, как правило, мазут. Для транспортировки и его распыливания перед сжиганием вязкость мазута снижают путем подогрева до 90—150 °С. Иногда в зависимости от особенностей производства в качестве жидкого топлива используются технологические отходы, например смолы и масла, потерявшие потребительские свойства и не подлежащие регенерации. Известны примеры сжигания в печах и топках сырой нефти. Это характерно как для нефтехимических производств, так и для мелких потребителей, расположенных вблизи нефтепромыслов. Иногда, особенно в сельскохозяйственных негазифицированных районах, мелкие потребители используют в качестве топлива соляровое масло. В некоторых случаях соляровое масло используют как аварийное топливо.

Распыливание жидкого топлива осуществляют форсунками: паровыми и пневматическими высокого и низкого давления, механическими, паромеханическими, акустическими.

Выбор типа форсунок определяется двумя обстоятельствами: технологическими требованиями к качеству распыливания топлива и соответственно характеристикам факела, и наличием энергоносителей для распыливания требуемых параметров.

В форсунках высокого давления в качестве распылителя используют компрессорный воздух или пар высокого давления. Необходимое давление воздуха $P = 400 \div 600$ кПа, удельный расход 1,0—1,5 кг/кг мазута; пар может быть сухой и насыщенный или перегретый под давлением $P = 700$–900 кПа; удельный расход пара 0,8—1,0 кг/кг мазута. Применение высоконапорного распылителя в форсунках высокого давления позволяет получить высокое качество распыливания мазута и обеспечить эффективное его сжигание при достаточно высоких пределах регулирования. Кроме того, можно создать форсунки высокой единичной пропускной способности по мазуту. Поэтому форсунки высокого давления используют в крупных топках и печах.

Для получения длинного и жесткого факела применяют форсунки высокого давления с двойным распыленим типа ФВД. Для получения короткого жесткого и настильного факела применительно к мартеновским печам используют специальные форсунки высокого давления, у которых удельная кинетическая энергия топливного потока при расширении до атмосферного давления составляет не менее 2 кВт на 1 МВт установленной мощности. Такой факел должен покрывать ванну, не касаться по возможности, передней и задней стенок и быть максимально удаленным от свода [1]. При

необходимости иметь более короткий и широкий факел используют коротко-факельные форсунки системы Карабина типа ФК.

При необходимости изменять характеристики факела в процессе настройки теплового режима печного агрегата применяют пневматические форсунки ВНИИМТ.

В форсунках низкого давления распылителем является идущий на сгорание воздух низкого давления. Поэтому качество распыливания и сжигания здесь хуже, а пределы регулирования ниже, чем в форсунках высокого давления. Кроме того, форсунки низкого давления имеют меньшую пропускную способность по мазуту.

Достоинство форсунок низкого давления заключается в том, что они не нуждаются в подводе высоконапорного распылителя. Их применяют в основном на небольших металлургических печах. Наибольшее распространение получили форсунки низкого давления конструкции Стальпроекта.

Следует отметить, что форсунки низкого давления являются, по существу, жидкотопливными горелочными устройствами.

Механические и паромеханические форсунки относятся к устройствам центробежного типа. В механических форсунках жидкое топливо по тангенциальным каналам подается в камеру завихрения. Под действием центробежных сил топливо отжимается к стенкам камеры завихрения, и в виде тонкой пленки вытекает из сопла, распадаясь на капли. При этом корневой угол топливного факела изменяется в незначительных пределах, примерно 70—110°. Качество распыливания у этих форсунок ниже, чем у устройств пневматического типа, особенно при снижении расхода топлива. Диапазон регулирования простых механических форсунок центробежного типа находится в пределах 70—100 % от расчетной номинальной нагрузки. Поэтому такие форсунки применяют только в том случае, когда горелки должны работать при постоянной тепловой нагрузке.

Для расширения диапазона регулирования центробежных форсунок в камере завихрения выполняют дополнительное отверстие или несколько отверстий, через которые часть топлива отводится в сливную линию. При работе таких форсунок давление топлива на линии нагнетания и, соответственно, расход топлива, поддерживаются постоянными. Регулируют производительность изменением расхода топлива на сливной магистрали. Это обеспечивает постоянные скорости завихренного потока в камере завихрения и примерно одинаковое качество распыливания при истечении топлива из сопла. Недостатком форсунок является большой расход топлива на рециркуляцию и увеличение количества запорной и регулирующей арматуры.

Диапазон регулирования центробежных механических форсунок может быть расширен в результате выполнения дополнительной ступени для подвода пара (паромеханические форсунки). При работе на нагрузках, близких к номинальным, пар в форсунку не подают, и она работает как механическая. При снижении нагрузки ниже 70 % от номинальной производится подача пара в форсунку при давлении 0,1—0,2 МПа.

В некоторых случаях для распыливания жидкого топлива применяют акустические форсунки. Основным элементом таких форсунок является

акустический излучатель, выполненный по типу стержневого резонатора, генератора Гартмана или акустического свистка. В этих излучателях осуществляется преобразование кинетической энергии струй распылителя в акустическую энергию колебаний различной частоты. Распыливание жидкого топлива в акустическом поле происходит под воздействием капиллярных волн, возникающих на его поверхности, кавитации и за счет аэродинамического воздействия

Расчет форсунок основан на формулах истечения и имеет целью определить проходные сечения для мазута, распылителя и воздуха, идущего на сгорание Расчет проходных сечений для воздуха, идущего на сгорание, аналогичен расчету воздуха в горелках без предварительного смешения и поэтому в дальнейшем не рассматривается.

Особенность представляет расчет проходных сечений для распылителя в форсунках высокого давления, так как в этих форсунках с целью лучшего использования сверхкритического давления распылителя и получения более высокой скорости его выхода используются сечения типа сопла Лаваля. Кроме того, в форсунках высокого давления возникает необходимость дополнительно рассчитывать камеру смешения

В форсунки мартеновских печей вместе с жидким топливом и распылителем подается природный газ под давлением 0,3–0,6 МПа. При этом поток природного газа, подаваемый по специальному каналу, выполненному также по типу сопла Лавля, играет роль вторичного распылителя.

Учитывая, что расчет мазутного сопла для форсунок высокого и низкого давления аналогичен, в разделе 8.2 приведена, как наиболее общий случай, методика расчета форсунок высокого давления.

8.2. РАСЧЕТ ФОРСУНОК ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

При расчете форсунок высокого давления обычно бывают заданы параметры мазута $\rho_м$, $T_м$, $p_м$ и распылителя $P_р$, $T_р$, $\rho_{0р}$, пропускная способность форсунки по мазуту $B_ч$ и удельный расход распылителя q.

Схема расчета форсунки высокого давления с двойным распыливанием показана на рис 8.1. Обычный порядок расчета форсунок высокого давления следующий.

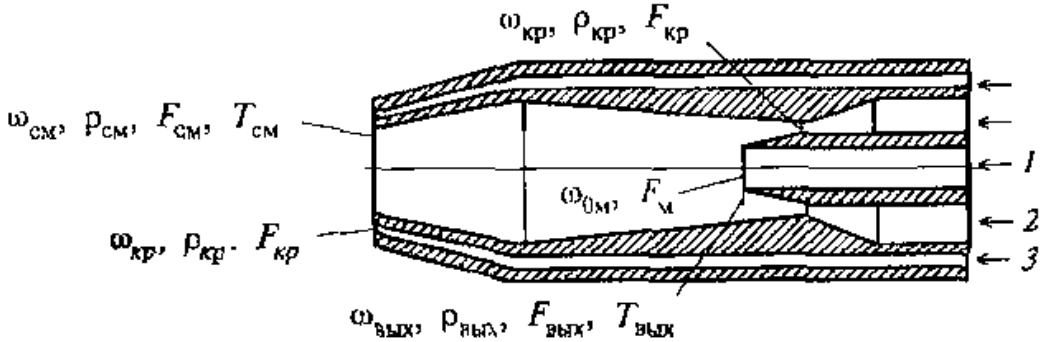


Рис. 8.1. Расчетная схема форсунки высокого давления. 1 – мазут; 2 – распылитель первичный; 3 – то же, вторичный

Скорость истечения мазута из сопла (м/с) определяют по формуле

$$\omega_м = \mu\sqrt{\frac{2p_м}{\rho_м}}. \qquad (8.1)$$

Коэффициент истечения мазута из сопла μ можно принять равным 0,2, а плотность мазута $\rho_м = 960$ кг/м^3

Диаметр мазутного сопла, мм

$$d_м = \sqrt{\frac{B_м \cdot 10^6}{0{,}785\omega_м\rho_м}}. \qquad (8.2)$$

По формулам (8.1) и (8.2) построен график (рис. 8.2), по которому можно определить диаметр мазутного сопла в зависимости от заданной пропускной способности форсунки по мазуту и давления мазута перед форсункой.

Во избежание засорения и закоксовывания мазутного сопла его диаметр должен быть не менее 3 мм

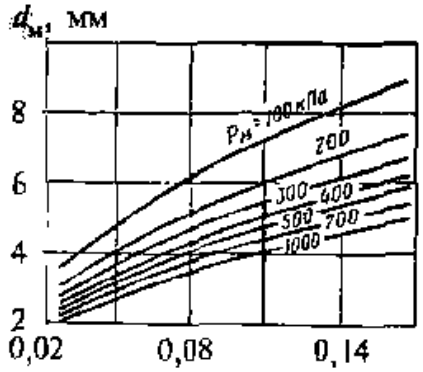
Расчет проходных сечений для распылителя производится по формулам для сверхкритического давления газа.

Скорость распылителя (м/с) в критическом (узком) сечении сопла Лаваля определяют по формуле

$$\omega_{0кр} = \varphi M p_р \sqrt{\frac{T_0}{\rho_{0р} T_р m_р}}, \qquad (8.3)$$

где для воздуха $M = 0{,}685$; $\rho_{0р}$=1,29 кг/м^3; для сухого насыщенного пара $M = 0{,}635$, $\rho_{0р} = 0{,}804$ кг/м^3; для перегретого пара $M = 0{,}667$; $\rho_{0р} = 0{,}804$ кг/м^3.

Коэффициент истечения φ для сопла Лаваля можно принять равным 0,8.



Пропускная способность форсунки по мазуту $B_м$, кг/с

Рис. 8.2. Определение диаметра мазутного сопла

Площадь критического сечения сопла Лаваля, мм^2,

$$F_{кр} = B_м q \cdot 10^6/\omega_{0кр}\rho_{0р}. \qquad (8.4)$$

При двойном распыливании значение q следует брать в соответствии с удельным расходом распылителя в рассчитываемой ступени.

Площадь выходного (конечного) сечения (мм^2) сопла Лаваля определяют по формуле

$$F_{вых} = F_{кр}A \qquad (8,5)$$

(значение A берут по табл. 7.1 соответственно для воздуха или пара в зависимости от их давления перед форсункой).

Далее рассчитывают смеситель, в который поступают мазут и распылитель через выходное сечение сопла Лаваля.

Плотность распылителя (кг/м^3), поступающего в смеситель, определяют по формуле

$$\rho_{вых} = \rho_{0р}(T_0/T_р)П \qquad (8.6)$$

(значение $П$ для воздуха или пара берут по табл. 7 1 в зависимости от их давления перед форсункой).

Скорость распылителя (м/с), поступающего в смеситель, определяют по формуле

$$\omega_{вых} = B_м q \cdot 10^6/(F_{вых}\rho_{вых}) \qquad (8.7)$$

(значение q берут в соответствии с удельным расходом распылителя, поступающего в смеситель).

Суммарная кинетическая энергия (Дж/кг) в начальном сечении смесителя, отнесенная к 1 кг мазута, складывается из кинетической энергии мазута и распылителя:

$$E_{нач} = \omega_м^2/2 + (\omega_{вых}^2/2)q. \qquad (8.8)$$

Расход энергии (Дж/кг) на смешение, отнесенный к 1 кг мазута, определяют по формуле

$$E_{см} = |(\omega_{вых} - \omega_м)^2/2]q/(1 + q). \qquad (8.9)$$

Радиус капли распыленного мазута, м,

$$r = 0{,}275/(\omega_{вых}^2\rho_{вых}). \qquad (8.10)$$

Расход энергии на распыливание 1 кг мазута (Дж/кг) определяют по формуле

$$E_{расп} = 3\sigma/(\rho_м r), \qquad (8.11)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения мазута (в зависимости от сорта и температуры мазута изменяется в пределах 0,024—0,033 Н/м).

Кинетическую энергию в выходном (конечном) сечении смесителя, отнесенную к 1 кг мазута (Дж/кг), определяют по формуле

$$E_{кон} = (E_{нач}\eta_{см} - E_{см} - E_{расп})/\eta_{см}, \qquad (8.12)$$

где $\eta_{см}$ — коэффициент полезного действия смесителя, равный 0,8—0,9.

Скорость смеси (м/с) в выходном сечении смесителя

$$\omega_{см} = \sqrt{2E_{кон}/(1+q)}. \qquad (8.13)$$

Температура распылителя (К), поступающего в смеситель,

$$T_{вых} = T_р/П. \qquad (8.14)$$

Энтальпию мазута и распылителя, поступающих в смеситель, отнесенную к 1 кг мазута (Дж/кг), определяют по формуле

$$i_{нач} = c_м T_м + c_р T_{вых} q, \qquad (8.15)$$

где $c_м$ и $c_р$ — теплоемкость мазута и распылителя соответственно, Дж/(кг · град). В зависимости от сорта и температуры мазута $c_м$ = 1880—2050 Дж/(кг · град).

Тепло смешения и трения, отнесенное к 1 кг мазута (Дж/кг), определяют по формуле

$$i_{\text{п}} = E_{\text{нач}} - E_{\text{кон}} - E_{\text{расп}}. \quad (8.16)$$

Температура смеси в выходном сечении смесителя, К,

$$T_{\text{см}} = (i_{\text{нач}} + i_{\text{п}})/(c_{\text{м}} + c_{\text{р}}q). \quad (8.17)$$

Плотность смеси в выходном сечении смесителя, кг/м^3,

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{0\text{р}} T_0 / T_{\text{см}}. \quad (8.18)$$

Площадь выходного сечения смесителя, мм^2,

$$F_{\text{см}} = B_{\text{м}} q \cdot 10^6/(\omega\rho_{\text{см}}). \quad (8.19)$$

Для расчета диаметров подводящих трубопроводов можно пользоваться номограммой приложения II, определив предварительно объемы сред. При этом рекомендуется принимать следующие скорости в подводящих трубопроводах: мазут 0,5–1,5 м/с, компрессорный воздух 15–20 м/с, сухой насыщенный пар 20–30 м/с, перегретый пар 30–60 м/с. Рекомендации о скоростях вентиляторного воздуха, идущего на сгорание, даны в табл. 4.1. В корпусе форсунки допускается увеличение скоростей на 20–30 %.

Пример. Рассчитать форсунку высокого давления с двойным распыливанием для сжигания $B_{\text{м}} = 0{,}028$ кг/с мазута. Давление мазута перед форсункой $p_{\text{м}} = 200$ кПа; температура 90 °С. Распылитель — компрессорный воздух под давлением $P_{\text{р}} = 600$ кПа с температурой $t_{\text{р}} = 50$ °С. Удельные расходы первичного и вторичного распылителя одинаковы и равны $q = 0{,}65$ кг/кг мазута.

По формуле (8.1)

$$\omega_{\text{м}} = 0{,}2\sqrt{\frac{2 \cdot 200000}{960}} = 4{,}08$$

По формуле (8.2)

$$d_{\text{м}} = \sqrt{\frac{0{,}028 \cdot 10^6}{0{,}785 \cdot 4{,}08 \cdot 960}} = 3{,}0 \text{ мм}.$$

Можно также определить $d_{\text{м}}$ по графику на рис. 8.2 при заданной пропускной способности форсунки по мазуту $B_{\text{м}} = 0{,}028$ кг/с и давлении мазута перед форсункой $p_{\text{м}} = 200$ кПа.

По формуле (8,3)

$$\omega_{0\text{кр}} = 0{,}8 \cdot 0{,}685 \cdot 600000\sqrt{\frac{273}{1{,}29 \cdot 323 \cdot 103300}} = 826{,}3 \text{ м/с}.$$

По формуле (8,4)

$$F_{\text{кр}} = (0{,}028 \cdot 0{,}65 \cdot 10^6)/(826{,}3 \cdot 1{,}29) = 17{,}2 \text{ мм}^2.$$

Если принять наружный диаметр мазутного сопла в критическом сечении сопла Лаваля $d^{\text{кр}}_{\text{нар}} = 10$ мм, то внутренний диаметр промежуточной трубы, образующей сопло Лаваля, должен быть равен

$$d^{\text{кр}}_{\text{вн}} = \sqrt{\left(d^{\text{кр}}_{\text{нар}}\right)^2 + \frac{F_{\text{кр}}}{0{,}785}} = \sqrt{10^2 + \frac{17{,}2}{0{,}785}} = 11 \text{ мм}.$$

По формуле (8.5) $F_{вых} = 17{,}2 \cdot 1{,}45 = 24{,}9$ мм^2, где $A = 1.45$ (по табл. 7.1 для воздуха при $P_0/P_р = 109{,}3 : 600 = 0{,}172$).

Наружный диаметр мазутного сопла и внутренний диаметр промежуточной трубы в выходном сечении сопла Лаваля должны быть выбраны так, чтобы обеспечить необходимую площадь сечения $F_{вых} = 24{,}9$ мм^2. Из конструктивных соображений эта площадь может быть несколько увеличена, так как это не приведет к снижению скорости воздуха в выходном сечении сопла Лаваля.

По формуле (8.6)

$$\rho_{вых} = 1{,}29 \cdot (273/323) \cdot 1{,}65 = 1{,}8 \text{ кг/м}^3,$$

где $П = 1{,}65$ (по табл. 7.1 для воздуха при $P_0/P_р = 0{,}172$).

По формуле (8.7)

$$\omega_{вых} = (0{,}028 \cdot 0{,}65 \cdot 10^6)/(24{,}9 \cdot 1{,}8) = 405{,}6 \text{ м/с}$$

По формуле (8.8)

$$E_{нач} = 4{,}0^2/2 + (405{,}6^2/2) \cdot 0{,}65 = 53474 \text{ Дж/кг}.$$

По формуле (8,9)

$$E_{см} = [(405{,}6 - 4{,}0)^2/2] \cdot [0{,}65/(1 + 0{,}65)] = 31767 \text{ Дж/кг}.$$

По формуле (8 10)

$$r = 0{,}275(405{,}6^2 \cdot 1{,}8) = 0{,}928 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

По формуле (8.11)

$$E_{рвсп} = (3{,}0 \cdot 0{,}028)/(960 \cdot 0{,}928 \cdot 10^{-6}) = 94 \text{ Дж/кг}$$

По формуле (8.12)

$$E_{кон} = (53474 \cdot 0{,}8 - 31767 - 94)/0{,}8 = 13647 \text{ Дж/кг}.$$

По формуле (8.13)

$$\omega_{см} = \sqrt{\frac{2 \cdot 13647}{1 + 0{,}65}} = 128{,}6 \text{ м/с}.$$

По формуле (8.14)

$$T_{вых} = 323 : 1{,}65 = 196 \text{ К } (-77 \text{ °C}).$$

По формуле (8.15)

$$i_{нач} = 1960 \cdot 363 + 1000 \cdot 196 \cdot 0{,}65 = 838880 \text{ Дж/кг},$$

где 1000 – теплоемкость воздуха, Дж/(кг · град); 1960 – теплоемкость мазута, Дж/(кг · град).

По формуле (8.16)

$$i_п = 53474 - 13647 - 94 = 39733 \text{ Дж/кг}.$$

По формуле (8.17)

$$T_{см} = (838880 + 39733)/(1960 + 1000 \cdot 0.65) = 337 \text{ К } (64 \text{ °C}),$$

По формуле (8.18)

$$\rho_{см} = 1{,}29 \cdot (273/337) = 1{,}045 \text{ кг/м}^3.$$

По формуле (8.19)

$$F_{см} = (0{,}028 \cdot 0{,}65 \cdot 10^6)/(128{,}6 \cdot 1{,}045) = 135{,}4 \text{ мм}^2.$$

Диаметр выходного сечения смесителя

$$d_{см} = \sqrt{F_{см}/0{,}785} = \sqrt{134{,}4/0{,}785} = 13{,}1 \text{ мм}$$

(принимаем $d_{см} = 13$ мм).

Площадь выхода для вторичного распылителя должна быть равна площади критического сечения сопла Лаваля, так как расширяющаяся часть сопла для вторичного распылителя отсутствует. Если принять наружный диаметр выходного сечения промежуточной трубы равным $d_{нар}^{вых} = 17$ мм, то внутренний диаметр выходного сечения внешней трубы, образующей сечение для выхода вторичного распылителя, должен быть равен

$$d_{нар}^{вых} = \sqrt{\left(d_{нар}^{вых}\right)^2 + \frac{F_{кр}}{0{,}785}} = \sqrt{17^2 + \frac{17{,}2}{0{,}785}} = 17{,}6 \text{ мм}.$$

Принимаем $d_{нар}^{вых} = 18$ мм.

Объемный расход мазута

$$V_м = B_м/\rho_м = 0{,}028/960 = 0{,}000029 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Принимаем скорость в подводящем мазутопроводе $\omega_м^{вх} = 0{,}5$ м/с. Тогда проходное сечение мазутопровода должно быть равно

$$F_м = V_м \cdot 10^6/\omega_м^{вх} = 0{,}000029 \cdot 10^6/0{,}5 = 58 \text{ мм}^2,$$

а проходной диаметр мазутопровода

$$d_м^{вых} = \sqrt{\frac{F_м}{0{,}785}} = \sqrt{\frac{58}{0{,}785}} = 8{,}5 \text{ мм}$$

Плотность компрессорного воздуха в подводящем воздухопроводе

$$\rho_р = \rho_{0р}(T_0/T_р)(P_р/P_0) = 1{,}29 \cdot (273/323)(600/103{,}3) = 6{,}33 \text{ кг/м}^3.$$

Объемный расход первичного или вторичного распылителя

$$V_р = B_м q/\rho_р = (0{,}028 \cdot 0{,}65)/6{,}33 = 0{,}00288 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Принимаем скорость компрессорного воздуха в подводящем воздухопроводе $\omega_р = 20$ м/с. По номограмме приложения 11 находим, что при необходимом расходе распылителя и принятой его скорости проходной диаметр для первичного и вторичного распылителя $d_р$ должен быть равен 13,5 мм.

8.3. ФОРСУНКИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С ДВОЙНЫМ РАСПЫЛИВАНИЕМ ТИПА ФВД

Разработанные Стальпроектом форсунки высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД предназначены для сжигания мазута с холодным или подогретым воздухом. В качестве распылителя применен компрессорный воздух под давлением $P_в = 600$ кПа с удельным расходом 1,3 кг/кг мазута или

сухой насыщенный пар под давлением $P_п$ = 700–750 кПа с удельным расходом 1,0 кг/кг мазута

Форсунки высокого давления устанавливаются в форсуночных коробках, через которые подается воздух для горения. Схема установки форсунки высокого давления типа ФВД в форсуночной коробке показана на рис. 8.3.

Разработано 7 типоразмеров форсунок номинальной пропускной способностью по мазуту от 0,028 до 0,167 кг/с (для давления мазута перед форсункой $p_м$ = 200 кПа).

Форсунки высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД показаны на рис. 8.4, а их конструктивные размеры приведены в табл. 8.1.

Форсунки с номинальной пропускной способностью по мазуту 0,083 и 0,111 кг/с выполнены в двух вариантах, различающихся только длиной.

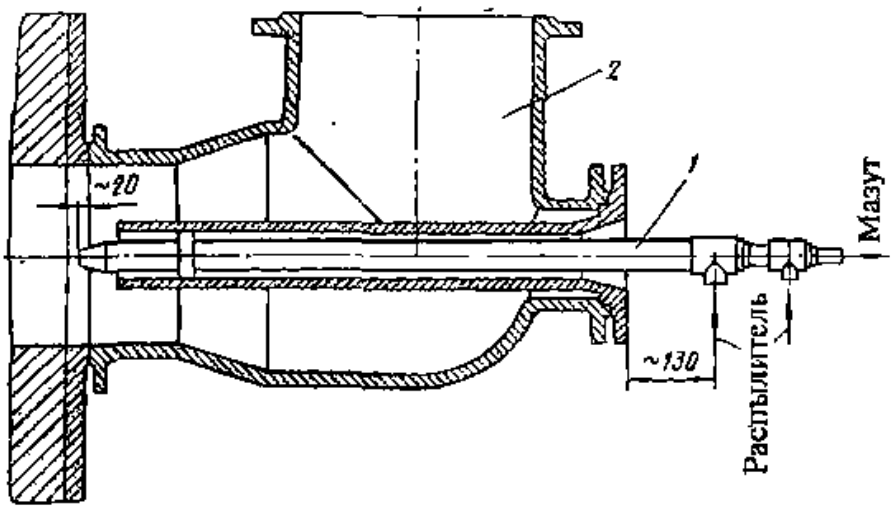


Рис 8.3 Установка форсунки высокого давления с двойным распыливанием в форсуночной коробке: *1* — форсунка; *2* — форсуночная коробка

Таблица 8.1

Конструктивные размеры (мм)* форсунок высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД (рис. 8.4)

Обозначение форсунки	Номинальная пропускная способность по мазуту, кг/с	d	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	L	l	Масса форсунки, кг
ФВД-100	0,028	3,0	1/2"	1/2"	1 1/2"	1"	10	10,8	12	16	17	1270	1050	10,2
ФВД-150	0,042	3,8	3/4"	1/2"	1 1/2"	1"	10	13,3	15	19	20	1270	1050	10,2
ФВД-200	0,056	4,3	3/4"	1/2"	1 1/2"	1"	10	11,7	17	21	22	1270	1050	10,2
ФВД-300-I	0,083	5,3	1"	3/4"	2"	1 3/4"	10	12,5	21	25	26	1270	1050	12,9
ФВД-300-II	0,083	5,3	1"	3/4"	2"	1 1/4"	10	12,5	21	25	26	1470	1250	14,8
ФВД-400-I	0,111	6,0	1"	3/4"	2"	1 1/4"	10	13,0	24	28	29	1270	1050	12,9
ФВД-400-II	0,111	6,0	1"	3/4"	2"	1 1/4"	10	13,0	24	28	29	1470	1250	14,8
ФВД-500	0,139	6,8	1 1/4"	1"	2"	1 1/4"	13	16,0	27	31	32	1470	1250	14,9
ФВД-600	0,167	7,5	1 1/4"	1"	2"	1 1/4"	13	16,5	29	33	34	1470	1250	14,9

* Кроме указанных особо.

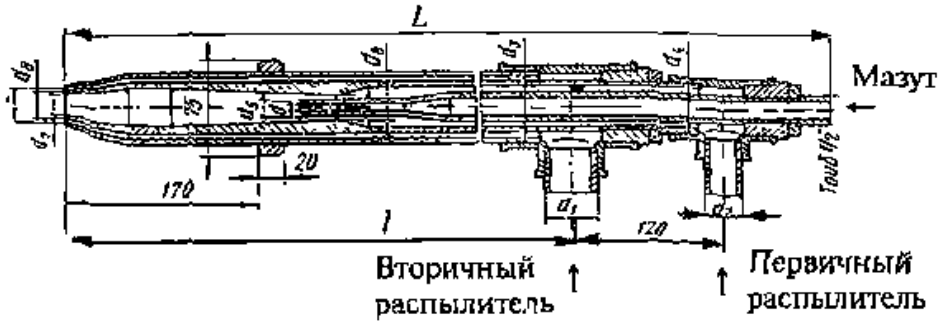


Рис. 8.4. Форсунки высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД

Выбор той или иной длины форсунки зависит от размеров примененной форсуночной коробки.

Обозначение форсунки состоит из индекса типа форсунки и цифры, характеризующей номинальную пропускную способность форсунки по мазуту, например форсунка ФВД-200 обозначает, форсунка высокого давления с двойным распыливанием, имеющая номинальную пропускную способность по мазуту 0,056 кг/с.

Форсунку типа ФВД выбирают по графику (рис 8.5) в зависимости от необходимой пропускной способности по мазуту и давления мазута перед ней.

Форсуночные коробки (рис. 8.6, табл. 8.2) для установки форсунок высокого давления могут использоваться для подачи воздуха, подогретого до 400 °С. Разработаны коробки двух типов: А — с патрубком для подвода воздуха, расположенным под углом 90° к оси коробки, и Б — с патрубком, расположенным под углом 75° к оси коробки. Каждый из этих типов включает коробки 12 типоразмеров.

Обозначение форсуночных коробок состоит из буквы, соответствующей типу коробки, и цифры, соответствующей типоразмеру коробки, например, форсуночнал коробка А8 означает: форсуночная коробка типа А; типоразмер 8.

Выбор форсуночной коробки производится по графику (рис. 8.7) в заяисимости от необходимой пропускной способности форсуночной коробки по воздуху и его давления перед форсуночной коробкой. График построен для холодного (20 °С) воздуха. При подогреве воздуха выбор форсуночной коробки производится по расчетному количеству воздуха, которое определяется так же, как для горелок типа "труба в трубе".

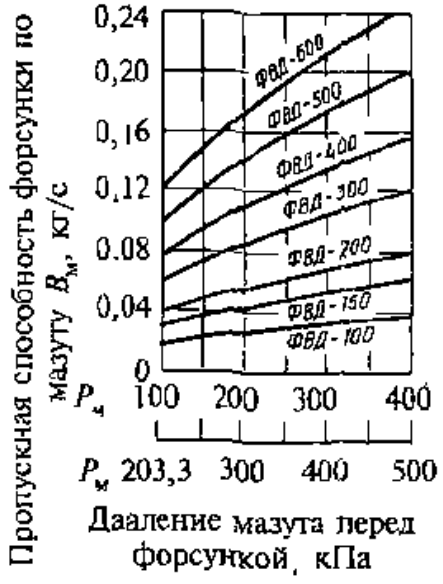


Рис. 8.5. Пропускная способность по мазуту форсунок высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД

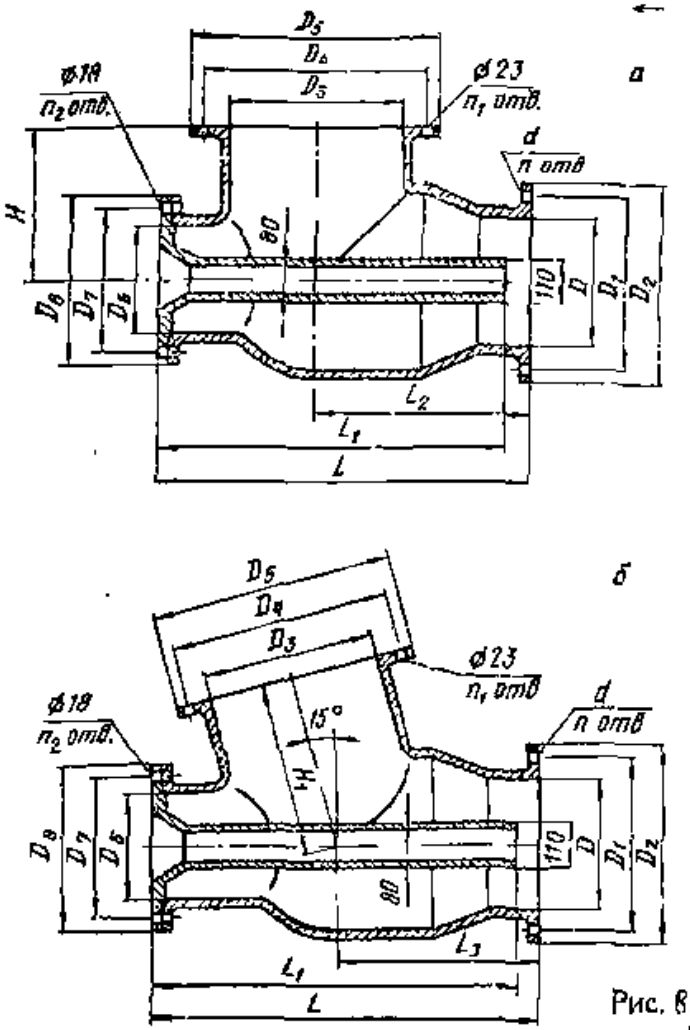


Рис 8.6. Форсуночные коробки. *а* — с вертикальным подводом воздуха; *б* — с подводом, отклоненным на 15° от вертикали

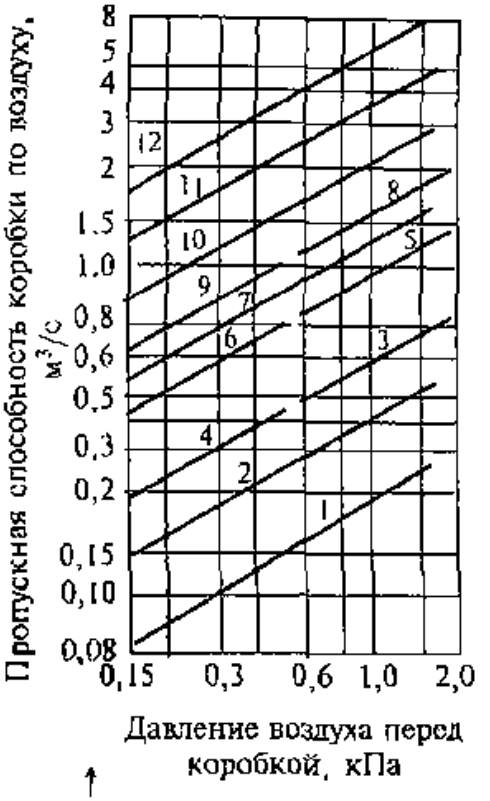


Рис. 8.7. Пропускная способность по воздуху форсуночных коробок (цифры на кривых соответствуют номерам типоразмеров коробок)

Таблица 8.2

Конструктивные размеры (мм) форсуночных коробок (рис. 8.6)

Номер типоразмера	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	d	H	H_1	L	L_1	L_2	L_3	Число отверстий n	n_1	n_2	Масса коробки, кг
1	150	225	260	250	350	390	150	240	280	18	250	300	900	850	525	500	8	12	8	184
2	175	255	290	250	350	390	150	240	280	18	250	300	900	850	525	500	8	12	8	188
3	200	280	315	250	350	390	150	240	280	18	250	300	900	850	525	500	8	12	8	192
4	200	280	315	300	400	440	150	240	280	18	300	300	900	850	550	500	8	12	8	204
5	250	335	370	300	400	440	150	240	280	18	300	300	900	950	550	500	12	12	8	209
6	250	335	370	350	460	510	150	240	280	18	300	300	900	950	550	500	12	16	8	219
7	275	365	400	300	400	440	150	240	280	18	300	300	900	850	550	500	12	12	8	214
8	300	395	435	400	495	535	150	240	280	23	400	400	900	850	550	475	12	16	8	254
9	300	395	435	450	550	590	250	335	370	23	400	400	1100	1050	600	600	12	16	12	347
10	350	445	485	500	600	640	250	335	370	23	400	400	1100	1050	650	600	12	16	12	363
11	425	520	560	500	600	640	250	335	370	23	400	400	1100	1050	650	600	12	16	12	374
12	500	600	640	570	885	945	250	335	370	23	450	500	1100	1050	650	575	12	20	12	432

Пример. Подобрать форсунку и форсуночную коробку для сжигания, $B_м = 0{,}125$ кг/с мазута; $p_м = 250$ кПа; $p_в = 0{,}6$ кПа; $t_в = 400$ °С; $\alpha = 1{,}1$.

По графику (см. рис. 8.5) находим, что заданной пропускной способности по мазуту и давлению мазута перед форсункой отвечает форсунка ФВД-400.

По рис 1—1 приложения 1 находим $L_0 = 10{,}44$ м³/кг мазута;

$$V_{0в} = \alpha L_0 B_м = 1{,}1 \cdot 10{,}44 \cdot 0{,}125 = 1{,}44 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$V_в^{расч} = V_{0в} k_t = 1{,}44 \cdot 1{,}52 = 2{,}18 \text{ м}^3/\text{с},$$

где k_t определяется по формуле (4.7) или по графику на рис. 4.8 при $t_в = 400$ °С.

По графику (см. рис. 8.7) находим, что расчетному количеству воздуха и заданному его давлению соответствует форсуночная коробка № 10.

Выбираем форсуночную коробку А10 По табл. 8 2 длина этой коробки 1100 мм, поэтому выбираем форсунку ФВД-400-11, размер которой по табл. 8.1 $L_1 = 1250$ мм, что позволяет правильно установить форсунку в форсуночной коробке (см. рис. 8.3).

Выбранная форсунка требует для распыления $0{,}125 \cdot 1{,}3 = 0{,}165$ кг/с компрессорного воздуха, или $0{,}125 \cdot 1{,}0 = 0{,}125$ кг/с пара.

8.4. ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ ФОРСУНКА УПИ-К

Оригинальную конструкцию пневматических форсунок для распыливания жидкого топлива применительно к мартеновским печам предложил в Уральском политехническом институте Н. И Кокарев. [1].

Основная особенность ее состоит в том, что распылитель подводится по центральному каналу с последующим расширением его в сопле Лаваля. Жидкое топливо подается в поток распылителя с периферии через кольцевую щель или ряд отверстий. Подвод мазута через кольцевую щель создает противодавление, для преодоления которого необходимо избыточное давление мазута не ниже 0,4 МПа. Форсунка обеспечивает хорошее распыление, равномерное распределение топлива по сечению факела и достаточный угол его раскрытия. Этих результатов можно достичь при условии, если распылитель (сжатый воздух) подогревается до 250—300 °С. Расход распылителя изменяется в пределах от 0,38 до 0,59 кг на 1 кг жидкого топлива, что существенно меньше, чем на других форсунках такого же типа.

На этом принципе разработана серия форсунок тепловой мощности от 17 до 22 МВт Один из вариантов конструкции такой форсунки показан на рис. 8.8. Форсунка выполнена в комбинации с соплом для подачи кислорода. Для исключения коксования мазута в носике форсунки при распылении топлива сжатым воздухом применяется головка водяного охлаждения. Фигурная форма головки вызвана необходимостью изменения угла наклона форсунки в процессе работы.

Наличие коротких выхлопных труб малого сечения, периферийная направленная перпендикулярно к потоку распылителя подача мазута в область наименьших давлений и наибольших скоростей распылителя позво-

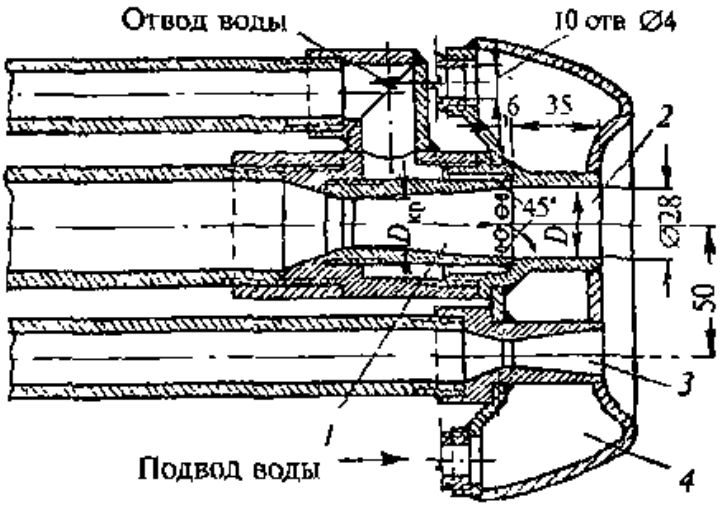


Рис. 8.8. Пневматическая форсунка УПИ-К:
1 — сопло для истечения распылителя, *2* — выхлопная труба; *3* — кислородное сопло; *4* — головка

лили улучшить распыление мазута, сохраняя большие скорости истечения паромазутной смеси.

При работе на форсунках УПИ-К благодаря истечению мазута тонкими струйками или пленками по поверхности высокоскоростного потока распылителя, как правило, наблюдается горение мазута по всему сечению факела почти от носика форсунки, в то время как при работе на форсунках иных типов в факеле имеется темная центральная полоса мазута, достигающая длины до 0,7 м.

Это позволяет при работе на форсунках УПИ-К получить более короткий с наибольшим углом раскрытия мазутный факел.

Меньшая потеря энергии на удар с малоскоростным потоком мазута, небольшие сопротивления выхлопных труб форсунок и большие скорости истечения паромазутной смеси позволяют получить на форсунке УПИ-К более активный мазутный факел при меньшем расходе распылителя.

8.5. КОРОТКОФАКЕЛЬНЫЕ ФОРСУНКИ СИСТЕМЫ КАРАБИНА ТИПА ФК

Такие форсунки (рис. 8.9, табл. 8.3) предназначены для сжигания мазута с холодным или подогретым воздухом. Короткий факел в этих форсунках образуется в результате подачи распылителя под углом к струе мазута, вытекающего из сопла.

Таблица 8.3

Конструктивные размеры (мм) короткофакельных форсунок типа ФК (рис. 8.3)

Обозначение форсунки	Номинальная пропускная способность по мазуту, кг/с	d	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	H	h	L	Масса форсунки, кг
ФК-250	0,07	4	3/8"	14	40	48	25	85	115	14	62	14	1485	17
ФК-350	0,10	4,5	1/2"	16	43	53	31	100	135	18	60	16	1485	21
ФК-550	0,15	5,5	3/4"	20	50	60	38	110	145	18	70	18	1705	30

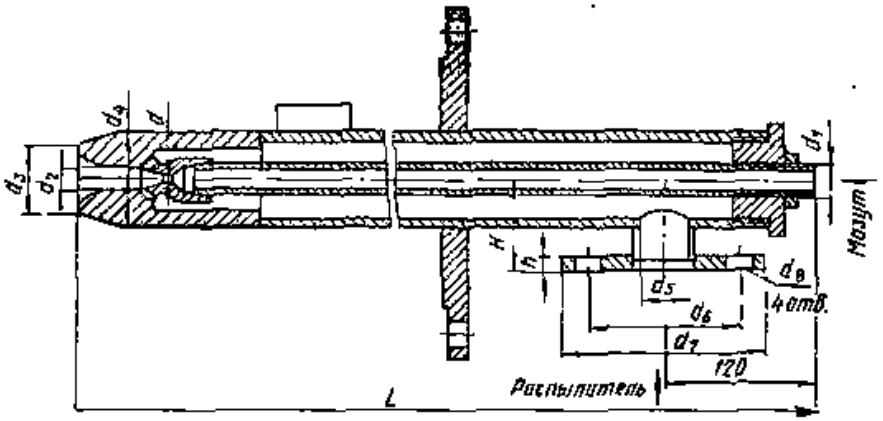


Рис. 8.9. Короткофакельные форсунки системы Карабина типа ФК

Для центрирования форсунок предусмотрены ребра, а для крепления — подвижный фланец, который приваривается к форсунке после установки.

Форсунки типа ФК имеют одноступенчатое распыливание. В качестве распылителя применяют компрессорный воздух под давлением $P_в = 450-600$ кПа с удельным расходом 1,3 кг/кг мазута или перегретый пар $P_п = 700-900$ кПа, $T_п = 220-250$ °С с удельным расходом 1,0 кг/кг мазута.

Форсунки типа ФК устанавливают в форсуночных коробках аналогично форсункам типа ФВД (см рис. 8.3).

Разработаны форсунки трех типоразмеров: ФК-250, ФК-350 и ФК-550 с номинальной пропускной способностью по мазуту соответственно 0,07; 0,1 и 0.15 кг/с, определенной при давлении мазута перед форсункой $p_м = 200$ кПа.

Выбор короткофакельных форсунок типа ФК производится по графику (рис. 8.10) в зависимости от необходимой пропускной способности форсунки по мазуту и располагаемого давления мазута перед форсункой.

Выбор форсуночной коробки для форсунки типа ФК производится так же, как и для форсунки типа ФВД, по графику на рис 8.7.

Пример. Подобрать форсунку и форсуночную коробку для сжигания $B_м = 0,09$ кг/с мазута. Давление мазута перед форсункой $p_м = 300$ кПа. Давление воздуха перед форсуночной коробкой $P_в = 1,2$ кПа, температура подогрева воздуха $t_в = 300$ °С; $\alpha = 1.15$.

По графику (см рис. 8.10) находим, что заданной пропускной способности по мазуту и давлению мазута перед форсункой соответствует форсунка ФК-250.

Из предыдущего примера $L_0 = 10,44$ м^3/кг мазута.

$$V_{0в} = \alpha L_0 B_м = 1,15 \cdot 10,44 \cdot 0,09 =$$

$$= 1,08 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$V_в^{расч} = V_{0в} k_t = 1,08 \cdot 1,4 = 1,51 \text{ м}^3/\text{с},$$

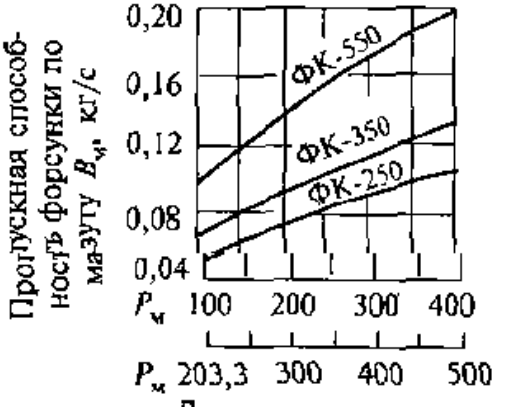


Рис 8.10. Пропускная способность по мазуту короткофакельных форсунок типа ФК

где k_t определяют по приведенной выше формуле (4.7) или по графику (см. рис. 4.8) при $T_в = 400$ °С.

По графику (см. рис. 8.7) находим, что расчетному количеству воздуха и заданному его давлению соответствует форсуночная коробка № 5.

Необходимое для распыливания количество компрессорного воздуха $0{,}09 \cdot 1{,}3 = 0{,}117$ кг/с или пара $0{,}09 \cdot 1{,}0 = 0{,}09$ кг/с.

8.6. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ФОРСУНКИ ВНИИМТ

Форсунка предназначена для сжигания мазута с холодным или подогретым воздухом. Распыливание топлива производится сжатым воздухом с давлением 0,3–0,5 МПа. Общий вид форсунки показан на рис. 8.11 а конструктивные характеристики приведены в табл. 8.4.

Основной принцип подачи топлива и распылителя у этих форсунок такой же, как у форсунок УПИ-К (см. рис. 8 8)· распылитель подается по оси форсунки через диспергатор. выполненный в виде сопла Лаваля, топливо вводится через систему отверстий, выполненных в стене диспергатора. Особенности расчета форсунок такого типа изложены в [2].

Конструктивным отличием форсунки от ранее известных является наличие на торце ее ствола раздающего наконечника с системой отверстий, выполненных под углами к ее оси.

Работа форсунки характеризуется низким удельным расходом распылителя — до 0,3 кг/кг топлива, высоким качеством распыливания топлива и возможностью регулировать (при наладке) угол встречи топливных струй, вытекающих из раздающего наконечника, и основного потока воздуха, подаваемого в горелку. Последнее достигается заменой раздающего наконечника.

При работе форсунки в горловине диспергатора происходит резкое снижение статического давления на участке длиной 20–25 мм. Затем это

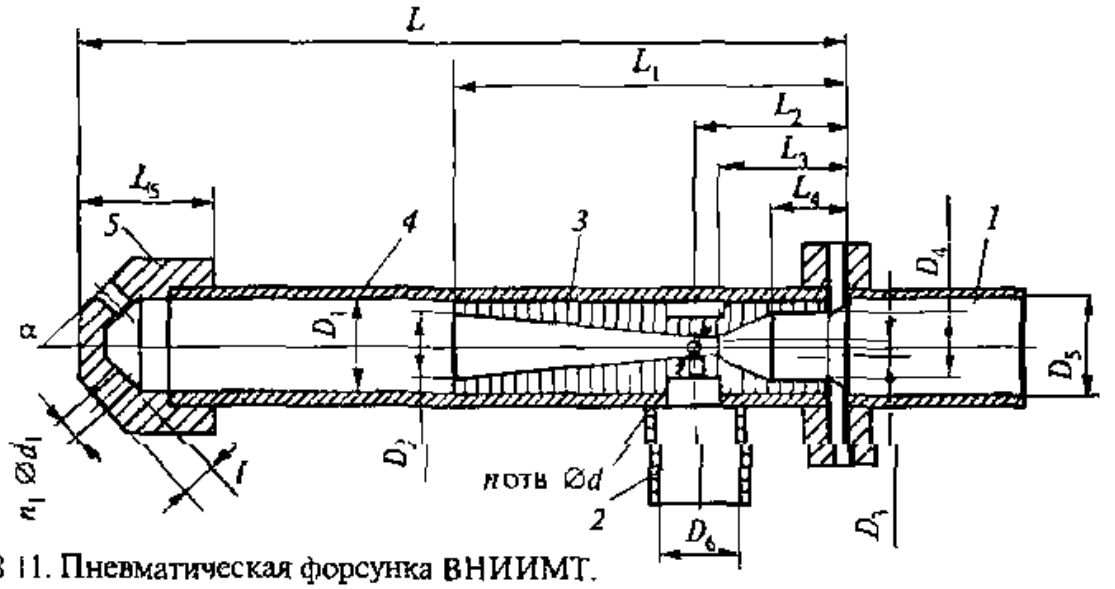


Рис 8 11. Пневматическая форсунка ВНИИМТ.

1 — подвод распылителя; *2* — подвод мазута; *3* — диспергатор; *4* — ствол; *5* — раздающий наконечник

Таблица 8.4

Конструктивные характеристики пневматических форсунок ВНИИМТ (мм) (рис. 8.11)

Номинальная пропускная способность по мазуту, кг/ч	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
50	8	7	3	5	10	10	55	37	30	20	20
120	12	8	3,5	8	10	10	65	37	30	20	20
300	16	9	4,5	10	16	12	70	40	32	20	30
600	22	18	9	20	30	16	90	45	35	20	30
1000	30	22	11	16	40	20	110	50	35	20	36

давление возрастает, поскольку возникают скачки уплотнений. На этом участке производится истечение топлива в поток распылителя. Типичное изменение статического давления по длине диспергатора форсунки с расходом топлива до 900 кг/ч показано на рисунке 8.12. При истечении топлива увеличивается противодавление в диспергаторе и в стволе форсунки.

Расходные характеристики форсунки существенно зависят от размеров проходных отверстий. Но общая закономерность сохраняется независимо от типоразмера. На примере форсунки с номинальным расходом топлива 120 кг/ч (рис 8.13) видно, что расход мазута зависит не только от его давления перед форсункой, но и от давления распылителя. При увеличении расхода мазута и постоянном давлении распылителя расход распылителя через форсунку уменьшается (рис. 8.14). Эту особенность необходимо учитывать при настройке режима распыливания топлива.

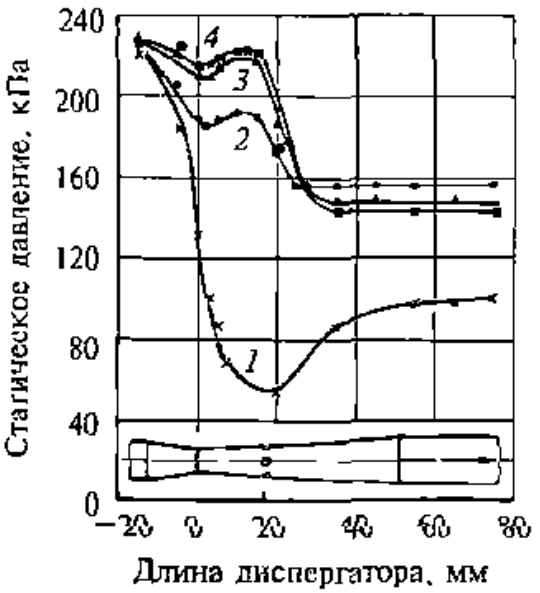


Рис. 8.12. Изменение статического давления по длине диспергатора при P_{01} = = 245 кПа (2,5 кг/см^2): *1–4* — $G_ч$ = 0; 360; 670 и 890 кг/ч

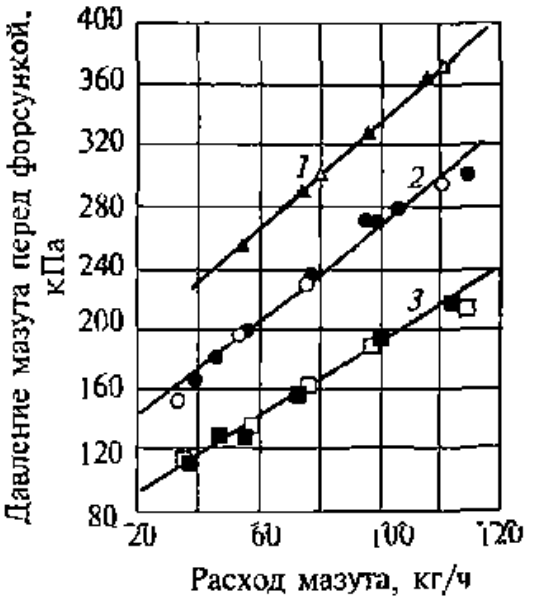


Рис. 8.13 Зависимость расхода мазута через форсунку от его давления: *1–3* — $P_{кв}$ = 0,4; 0,3 и 0,2 МПа

Топливный аэрозоль, полученный в диспергаторе при давлении 1,4÷2,0 МПа, транспортируется по стволу форсунки, длина L которой определяется длиной корпуса горелки, к раздающему наконечнику. Для того, чтобы направление истечения струи аэрозоля совпадало с направлением оси отверстия, из которого происходит истечение, длина канала l должна быть не менее $2d_1$. Кроме того, необходимо учитывать, что при малых углах наклона осей отверстий к оси форсунки (меньше 45°) и большом количестве отверстий, вытекающие струи, создавая разрежение в донной части раздающего насадка, отклоняются в сторону от своего первоначального направления к оси форсунки.

Коэффициент расхода отверстий раздающего насадка $\mu_{отв}$ зависит от живого сечения насадка, места размещения в нем отверстий, угла их наклона к оси форсунки и других факторов. Приближенно коэффициент расхода можно определить по выражению

$$\mu_{отв} = 0{,}83q^{0{,}27}, \qquad (8.20)$$

где q — удельный расход распылителя, а также по опытным данным, полученным при испытании форсунок (рис. 8.15) [2].

Для снижения вероятности засорения выходных отверстий их диаметр рекомендуется принимать не менее 2 мм.

При конструировании сопла диспергатора угол входного конуса выбирается в диапазоне 20÷30°, а расширяющегося насадка — 8÷12°. Диаметр топливных отверстий d выбирается в интервале 1,5÷3,0 мм. Выполняются эти отверстия на расстоянии $(1{,}5÷2{,}0)D_3$ от критического сечения сопла.

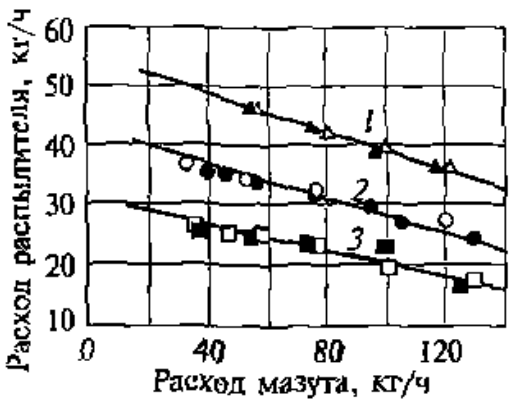


Рис. 8.14. Зависимость расхода распылителя от расхода мазута при $P_{хв}$ — *1*, *2* и *3* соответственно 0,4, 0,3 и 0,2 МПа

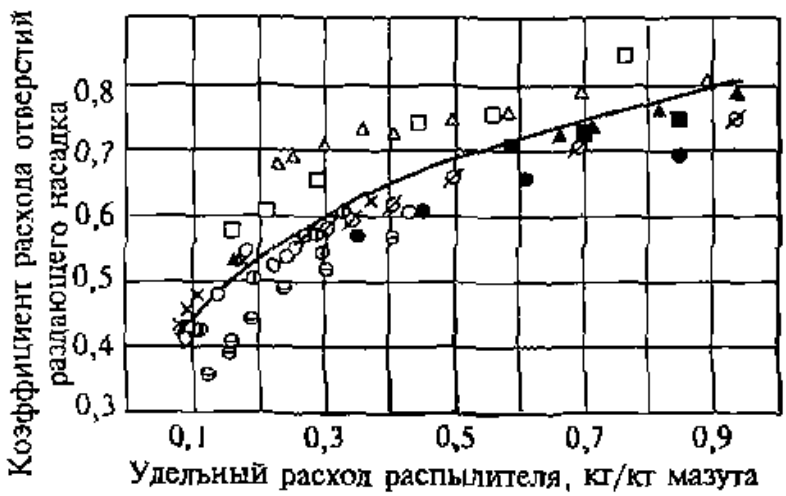


Рис. 8.15. Зависимость коэффициента расхода отверстий раздающего насадка от удельного расхода распылителя.
При $D_3 = 7$ мм: × и ∅ — $n_1 = 8$, $d_1 = 4$ мм, $P_1 = 0{,}196$ и 0,442 МПа соответственно. При $D_3 = 11{,}3$ мм: ○ и ● — $n_1 = 8$, $d_1 = 4$ мм, $P_1 = 0{,}196$ и 0,442 МПа соответственно, □ и ■ — $n_1 = 8$, $d_1 = 4{,}4$ мм, $P_1 = 0{,}196$ и 0,442 МПа соответственно. △ и ▲ — $n_1 = 16$, $d_1 = 4{,}4$ мм, $P_1 = 0{,}196$ и 0,442 МПа соответственно; ⊖ и ⊕ — отверстия расположены по центру и периферии насадка, $n_1 = 4$, $d_1 = 4{,}4$ мм, $P_1 = 0{,}196$ МПа

8.7. ФОРСУНКИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ СТАЛЬПРОЕКТА

Разработанные Стальпроектом форсунки низкого давления (рис. 8.16, табл. 8.5) предназначены для сжигания мазута в смеси с холодным воздухом.

Распыливание мазута в этих форсунках производится воздухом, подаваемым вентилятором. Оптимальное давление воздуха перед форсункой не менее 5 кПа, минимально допустимое для работы форсунки — 3 кПа.

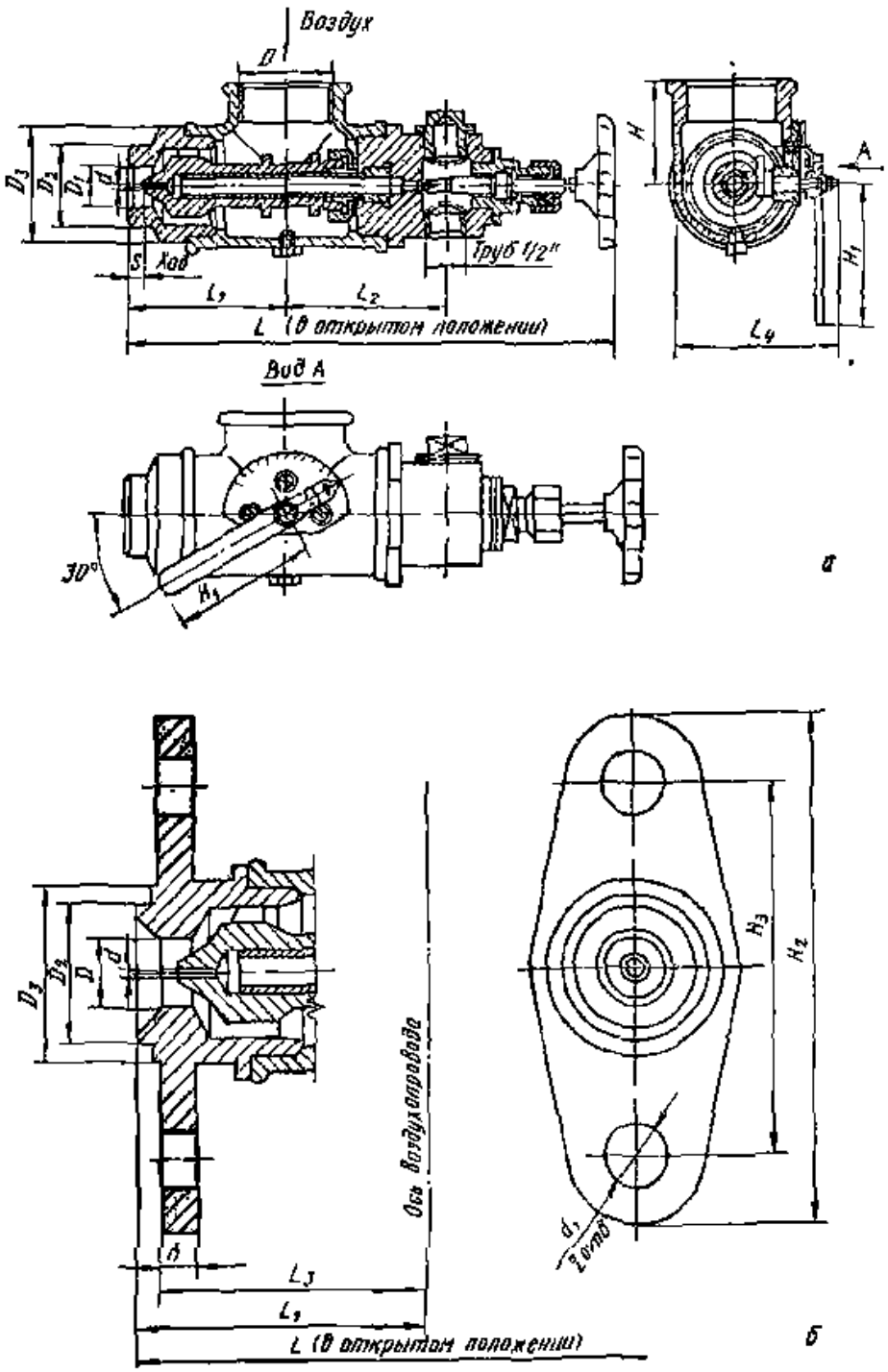


Рис. 8.16. Форсунки низкого давления: *а* — с бесфланцевой головкой, *б* — с фланцевой головкой

Оптимальное давление мазута перед форсункой 100—150 кПа, минимальное 50 кПа. Оптимальные условия работы форсунки соответствуют пределам регулирования 1 : 2. При уменьшении количества подаваемого мазута до $^1/_3$ от максимального резко ухудшаются условия его распыливания.

Разработано 6 типоразмеров форсунок низкого давления с подводом воздуха от $D_у$ = 40 мм ($1^1/_2$") до $D_у$ = 200 мм (8").

Форсунки с подводом воздуха $D_у$ = 70 мм ($2^1/_2$") и 100 мм (4") выполнены в двух вариантах, отличающихся диаметрами носика.

Каждый типоразмер форсунки выполнен с двумя типами головки: без фланца (рис. 8.16, *а*) и с фланцем (рис. 8.16, *б*), кроме типоразмеров с подводом воздуха $D_у$ = 150 мм (6") и 200 мм (8"), головки которых не имеют фланца.

Для регулирования подачи воздуха мазутное сопло форсунки выполнено перемещающимся вдоль оси форсунки, что позволяет изменять сечение для выхода воздуха. Перемещение производится вручную с помощью воздушного клапана, управляющая рукоятка которого выведена на боковую стенку форсунки. В зависимости от того, на какую боковую стенку выведена рукоятка воздушного клапана, различают ее левое и правое расположение (на рис. 8.16 показано левое расположение рукоятки воздушного клапана).

Установка форсунок низкого давления показана на рис. 8.17. Форсунки с бесфланцевой головкой крепят к воздухоподводящей трубе (рис. 8.17, *а*), а с фланцем — к форсуночной плите (рис. 8.17, *б*). Форсунку следует устанавливать так, чтобы подвод воздуха был расположен над форсункой, так как при подводе снизу в нем возможно скопление мазута, вытекающего при неполном закрытии мазутного крана во время отключения форсунки. Ось трубки для мазута должна совпадать с осью воздухопровода, что дает возможность поворачивать форсунку для прочистки сопла.

В обозначение форсунок низкого давления конструкции Стальпроекта входит условный диаметр подвода воздуха, выраженный в миллиметрах или в дюймах, номер исполнения форсунки (см. табл. 8.5) в зависимости от типа головки и направления вывода рукоятки воздушного клапана, а для форсунок с $D_у$ = 70 мм ($2^1/_2$") и $D_у$ = 100 мм (4") и от диаметра носика.

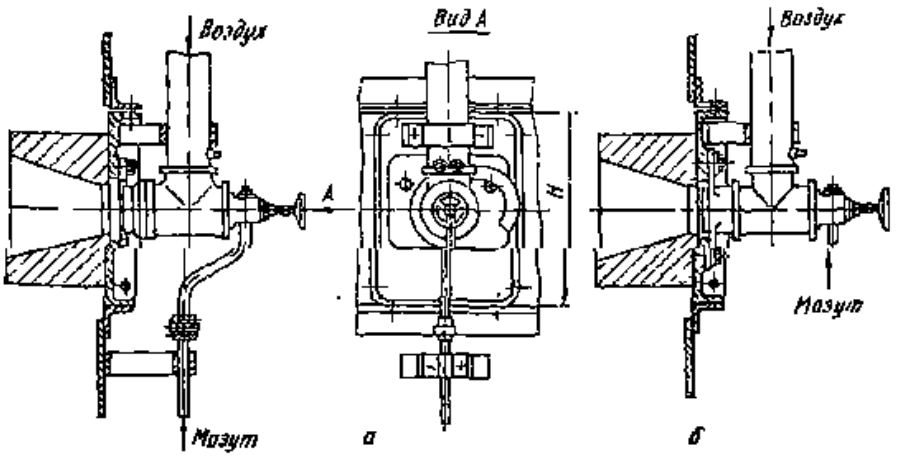


Рис. 8.17. Установка форсунок низкого давления: *а* — с бесфланцевой головкой; *б* — с фланцевой головкой

Конструктивные размеры (мм)* форсунок низкого давления (рис. 8.16)

Обозначение форсунки	Тип головки	Исполнение** форсунки		D	D_1	D_2	D_2	d	d_1	H	H_1	H_2	H_3	h
		левое	правое											
D_y40	Без фланца	I	II	$1^1/_2$"	21	40	55	2	—	50	70	—	—	—
($1^1/_2$")	С фланцем	III	IV	$1^1/_2$"	21	40	50	2	18	50	70	150	110	10
D_y70	Без фланца	I	III	$2^1/_2$"	30	75	95	3		69	135	—	—	—
($2^1/_2$")	С фланцем	V	VII	$2^1/_2$"	30	75	95	3	18	69	135	250	200	12
	Без фланца	II	IV	$2^1/_2$"	40	75	95	3	—	69	135	—	—	—
	С фланцем	VI	VIII	$2^1/_2$"	40	75	95	3	18	69	135	250	200	12
D_y100	Без фланца	I	III	4"	52	110	135	4	—	96	135	—	—	—
(4")	С фланцем	V	VII	4"	52	110	135	4	22	96	135	280	220	15
	Без фланца	II	IV	4"	60	110	135	4	—	96	135	—	—	—
	С фланцем	VI	VIII	4"	60	110	135	4	22	96	135	280	220	15
D_y125	Без фланца	I	II	5"	75	110	155	5	—	125	135	—	—	—
(5")	С фланцем	III	IV	5"	75	110	140	5	22	125	135	280	220	15
D_y150 (6")	Без фланца	I	II	6"	95	160	215	5	—	125	150	—	—	—
D_y200 (8")	«	I	II	8"	125	180	240	4	—	160	230	—	—	—

* Кроме указанных особо.

** Имеется в виду расположение рукоятки воздушного клапана.

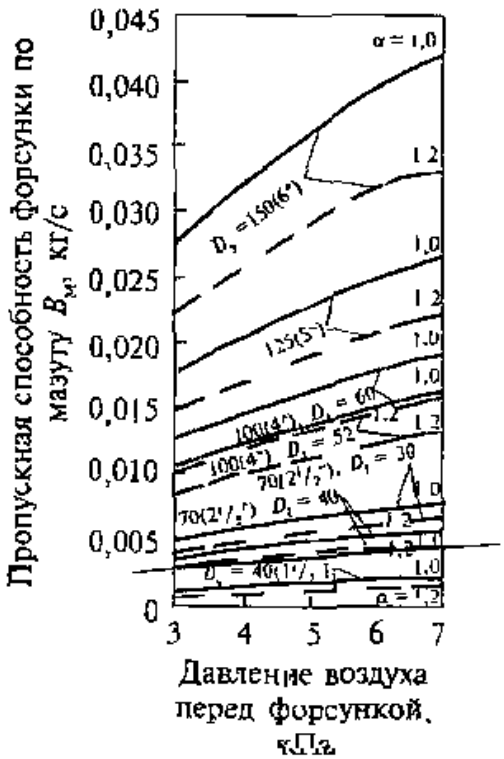


Рис. 8.18. Пропускная способность по мазуту форсунок низкого давления



Рис. 8.19. Пропускная способность по воздуху форсунок низкого давления при различном положении рукоятки воздушного клапана.

Таблица 8.5

L	L_1	L_2	L_3	L_4	s	Масса форсунки, кг
253	78	79	—	79	6	3,0
259	84	79	77	79	6	3,4
327	117	104	—	123	13	6,8
335	125	104	115	123	13	7,9
327	117	104	—	123	13	6,7
335	125	104	115	123	13	7,9
399	161	132	—	160	16	14,6
407	169	132	159	160	16	15,7
399	161	132	—	160	16	14,7
407	169	132	159	160	16	15,8
487	205	187	—	194	35	24,1
495	213	187	203	194	35	25,6
499	205	176	—	245	32	39,0
565	240	206	—	275	42	56,0

Например, «Форсунка низкого давления $D_у$ 70 ($2^1/_2$") исполнение V» означает: форсунка низкого давления с условным диаметром подвода воздуха $D_у$ 70 мм ($2^1/_2$"), диаметром носика D_1 = 30 мм, имеющая головку с фланцем и левое расположение рукоятки воздушного клапана.

Выбор форсунок низкого давления осуществляют по графику (рис. 8.18) в зависимости от заданной пропускной способности форсунки по мазуту, давления воздуха перед форсункой и коэффициента расхода воздуха. График построен для полностью открытого воздушного клапана.

При снижении нагрузки на форсунку регулирование производится вручную с помощью воздушного клапана. Для удобства регулирования рукоятка воздушного клапана снабжена стрелкой-указателем, которая перемещается по циферблату, фиксируя воздушный клапан в шести положениях. На рис. 8.19 показаны пропускная способность форсунки по воздуху в процентах от максимальной и линейный ход воздушного клапана для различных типоразмеров форсунок в зависимости от показания стрелки воздушного клапана на циферблате.

Возможно также подрегулирование и перекрытие подачи мазута путем перемещения вдоль оси форсунки мазутной иглы, управляющий маховик которой выведен на торец форсунки.

Пример. Подобрать форсунку низкого давления для сжигания $B_м$ = = 0,015 кг/с мазута. Давление воздуха перед форсункой 6 кПа, коэффициент расхода воздуха 1,2.

По графику (см. рис. 8.18) находим, что этим условиям отвечает форсунка низкого давления $D_у$ 100 (4") с диаметром носика D_1 = 60 мм. Если требуется форсунка с бесфланцевой головкой и правым расположением рукоятки воздушного клапана, то по табл. 8.5 выбираем форсунку низкого давления $D_у$ 100 (4"), исполнение IV.

8.8. РАСЧЕТ АКУСТИЧЕСКИХ ФОРСУНОК

Расчетная схема акустической форсунки показана на рис. 8.20. Параметры, задаваемые при расчете, такие же, как при расчете форсунки высокого давления (раздел 8.1). Изложение порядка расчета форсунки описано в работе [3].

Скорость истечения топлива из отверстий форсунки определяется по выражению (8.1). Коэффициент расхода форсунки M принимается равным 0,55—0,8.

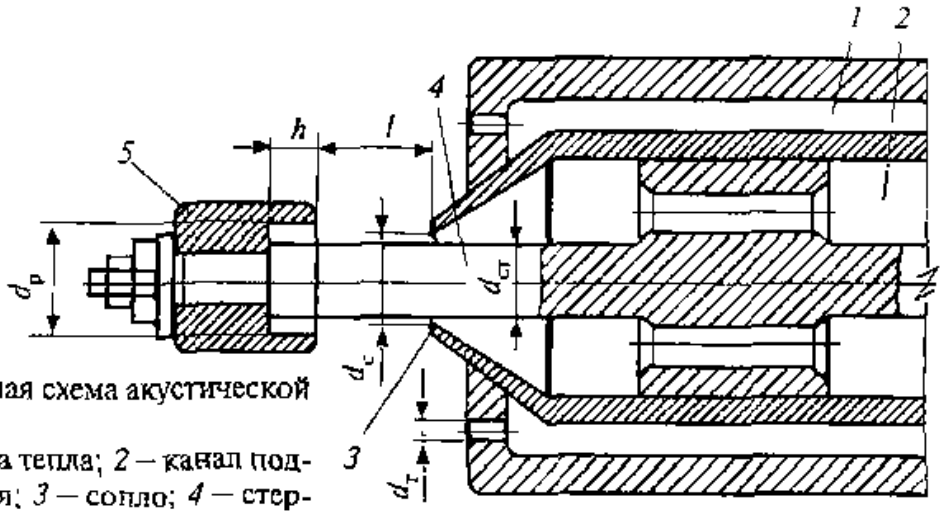


Рис. 8.20. Расчетная схема акустической форсунки:
1 — канал подвода тепла; *2* — канал подвода распылителя; *3* — сопло; *4* — стержень; *5* — резонатор

Диаметр топливных отверстий с учетом их количества определяется по выражению (8 2).

Удельный расход распылителя q (водяного пара или сжатого воздуха) принимается в диапазоне 0,1÷0,2 кг/кг топлива.

Расход распылителя принимается по выражению

$$G_р = B_м \cdot q, \text{ кг/с},$$

где $B_м$ — пропускная способность форсунки по мазуту, кг/с.

Площадь кольцевого сечения для выхода из конического или сходящегося сопла распыливающего агрегата $F_с$ определяется из уравнения

$$F_с = \frac{G_р}{\mu_с \sqrt{2g \frac{k}{k+1}\left(\frac{1}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot \frac{P_0}{V_0} \cdot 10^4}}, \qquad (8.22)$$

где k — показатель адиабаты (для воздуха — 1,4; для сухого насыщенного пара — 1,135; для перегретого пара — 1,3); P_0 — абсолютное давление распыливающего агента, кг/см^2; V_0 — удельный объем распыливаемого агента, м^3/кг; $\mu_с$ — коэффициент расхода сопла излучателя, равен 0,4÷0,56 [3].

Диаметр сопла излучателя $d_с$ определяется по выражению:

$$d_с = \sqrt{F_с / 0.785 + d_{ст}^2} \text{ м}. \qquad (8.23)$$

где $d_{ст}$ — диаметр стержня излучателя, определяется в зависимости от требуемой частоты излучения.

Расстояние l от сопла до резонатора для диапазона изменения $d_с$ = 5÷ +14 мм и $d_{ст}$ = 2÷12 мм определяется из соотношения [4]

$$l = (1{,}1 d_с - 0{,}08 d_{ст}^2 - 0{,}15 d_{ст}) \sqrt{P - 0{,}9}, \text{ мм}. \qquad (8.24)$$

Диапазон изменения частотных характеристик излучателя при избыточном давлении распылителя 2÷3,5 кг/см^2 может быть определен из уравнения [4]

$$f = \frac{C}{4[h + 0{,}4l + (d_p - d_{ст})(0{,}4 - 0{,}2h/d_c)]} \text{ кГц}, \qquad (8.25)$$

где h — глубина резонатора, мм (рекомендуемое значение h = 4—6 мм); C — скорость распространения звука в среде распыливающего агента, определяемая из выражения

$$C = \sqrt{kgRT} \text{ м/с}, \qquad (8.26)$$

где R — универсальная газовая постоянная распыливающего агента, Дж/кг · град; T — температура распыливающего агента, К.

Акустическую мощность излучателя можно определить из выражения [4]

$$W = 10{,}9 \cdot 10^3 (d_c - d_{ст}) \sqrt{P - 49 \cdot 10^3} \text{ Вт}. \qquad (8.27)$$

8.9. МЕХАНИЧЕСКИЕ ФОРСУНКИ

8.9.1. Форсунки типа ОН-521 и ОН-547

Механические форсунки разработаны НПО ЦКТИ и предназначены для распыливания топочного мазута в топках стационарных паровых котлов. Однако эти форсунки успешно применяются в металлургии и в топках различных тепловых агрегатов

Общий вид форсунок показан на рис. 8.21. Форсунки малой мощности ОН-521 выпускаются длиной от 400 до 2000 мм, средней мощности ОН-547 – длиной от 400 до 4 м.

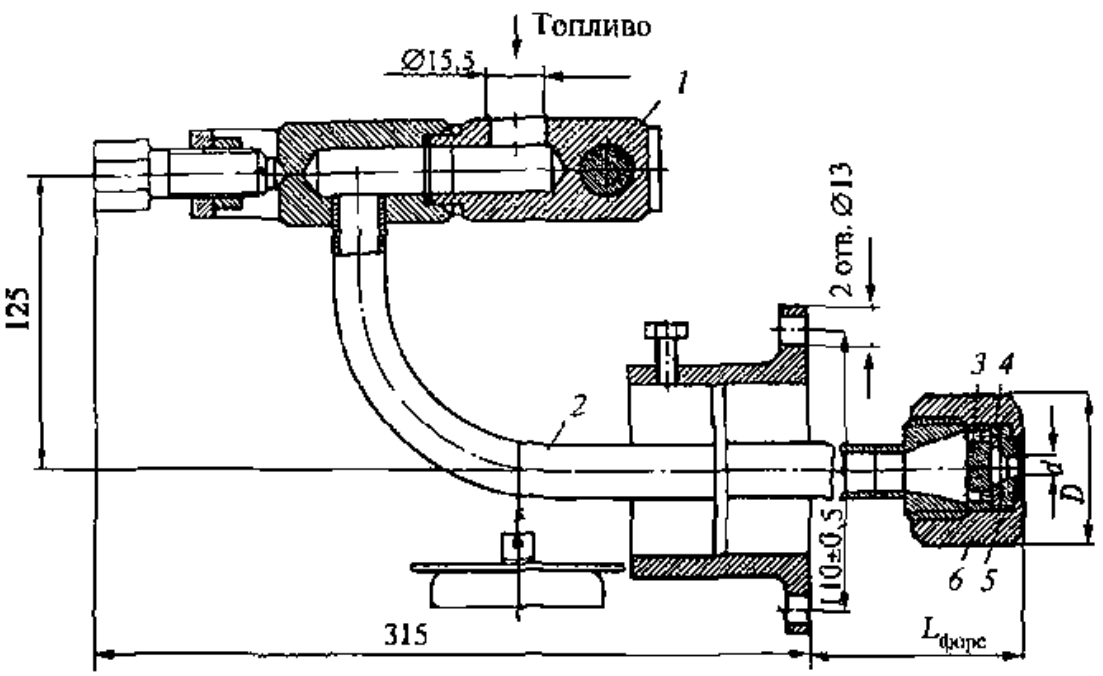


Рис. 8.21. Форсунка механическая средняя типа ОН-547
1 — колодки; *2* — ствол; *3* — распределитель; *4* — завихритель, *5* — сопло; *6* — гайка накидная

Таблица 8.6

Характеристика форсунок ОН-521 и ОН-547 (рис. 8.21)

Типоразмер	Характерный размер, мм		Пропускная способность по мазуту кг/ч при ВУ° = 2–3 и P = МПа
	d	D	
ОН-521–01	–	47,3	80
ОН-521–02	–	–"–	120
ОН-521–04	–	–"–	210
ОН-521–05	–	–"–	250
ОН-521–08	–	–"–	400
ОН-521–10	–	–"–	*660*
ОН-547–01	2,5	63,5	440
ОН-547–02	3,5	63,5	600
ОН-547–03	4,5	63,5	850
ОН-547–04	5,0	–"–	1140
ОН-547–05	6,0	–"–	1520
ОН-547–06	7,0	–"–	1850

Технические и конструктивные характеристики этих форсунок приведены в табл. 8.6.

Пропускная способность форсунок при давлении мазута, отличающемся от указанного в табл 8.6, может быть определена по выражению

$$B = B_н \sqrt{P / P_н}, \qquad (8.28)$$

где $P_н$, $B_н$ – давление и пропускная способность по табл. 8.6; P – рабочее давление мазута. Снижение давления мазута менее 1,0 МПа не допускается. Топливо перед подачей в форсунку должно быть профильтровано. Размер ячейки фильтра должен быть 0,5 × 0,5 мм для форсунок с соплом менее 2,5 мм и 1 × 1 мм для форсунок с соплом, равным 2,5 мм и более

8.9.2. Механические форсунки с обратным сливом топлива

Механические форсунки разработаны ПО «Уралмаш» для горелок обжиговых машин. Общий вид форсунки с расходом мазута 900 кг/ч показан на рис. 8.22.

Форсунка состоит из трех коаксиально расположенных труб. Наружная труба является направляющей, которая имеет коллектор для подвода охлаждающего воздуха и перфорированный стабилизатор. Средняя труба служит для подвода мазута в камеру завихрения, центральная — для слива топлива. На выходном торце форсунки размещена монтажная втулка, в которой установлены завихритель и выходной наконечник. Эти два элемента имеют притертые контактирующие поверхности и прижимаются к днищу монтажной втулки при помощи гайки. На торцевой поверхности завихрителя выполнены тангенциальные щелевые каналы, касательные к поверхности камеры завихрения, расположенной на оси выходного наконечника. В центральной части завихрителя на его оси выполнен канал, соединяющий камеру завихрения со сливной трубой.

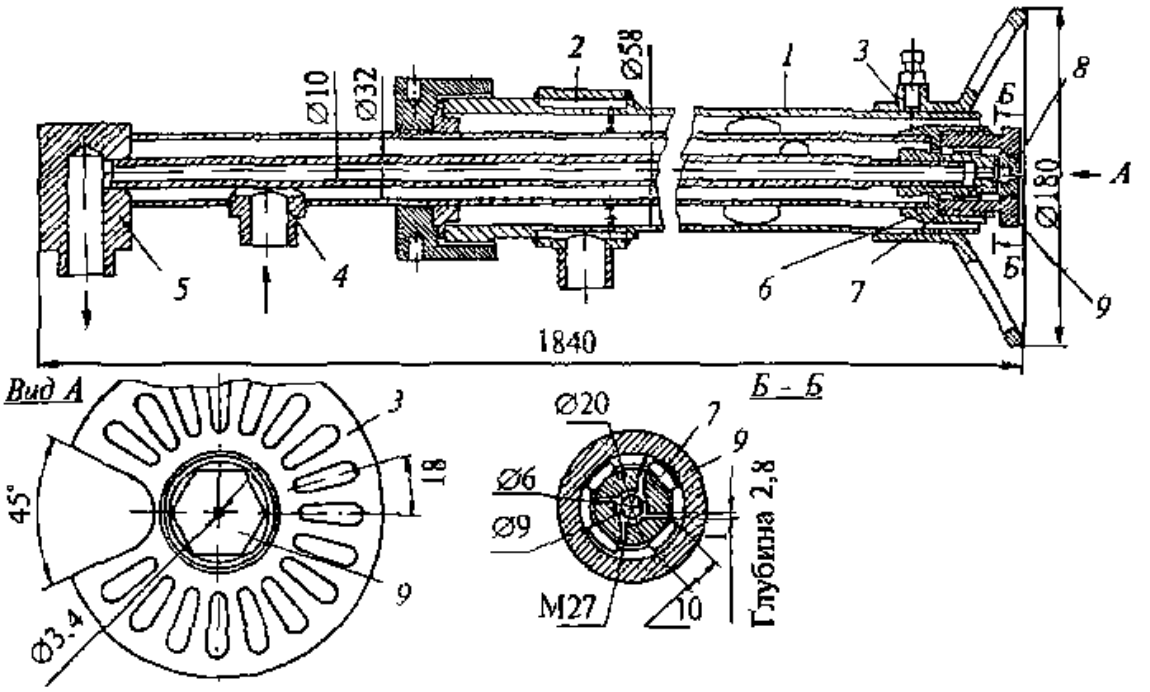


Рис. 8.22. Механическая форсунка с обратным сливом топлива:
1 – направляющая труба; 2 – коллектор охлаждающего воздуха; 3 – стабилизатор; 4 – патрубок подвода топлива; 5 – то же, слива топлива; *6* – монтажная втулка; *7* – завихритель; *8* – выходной наконечник; *9* – гайка прижимная

При работе форсунки мазут через напорный патрубок подводится в кольцевой коллектор, образованный наружной поверхностью завихрителя и внутренней стенкой прижимной гайки. Из кольцевого коллектора через тангенциальные шлицы мазут нагнетается в камеру завихрения, где, получив вращательное движение, вытекает через выходное отверстие наконечника в рабочий объем горелки за стабилизатор.

Регулировка пропускной способности форсунки обеспечивается за счет изменения расхода мазута, отводимого из камеры завихрения в сливной канал. При этом общий расход мазута, нагнетаемого в форсунку, остается постоянным в результате постоянного давления мазута в линии нагнетания на уровне 3,5 МПа. Это обеспечивает постоянные скорости мазута в камере завихрения, постоянный угол раскрытия топливного факела при выходе топливной пленки из отверстия наконечника и высокое качество распыливания.

Расходные характеристики форсунок с обратным сливом показаны на рис. 8.23. Форсунка с производительностью 300 кг/ч имеет диаметр отверстия в наконечнике 1,7 мм.

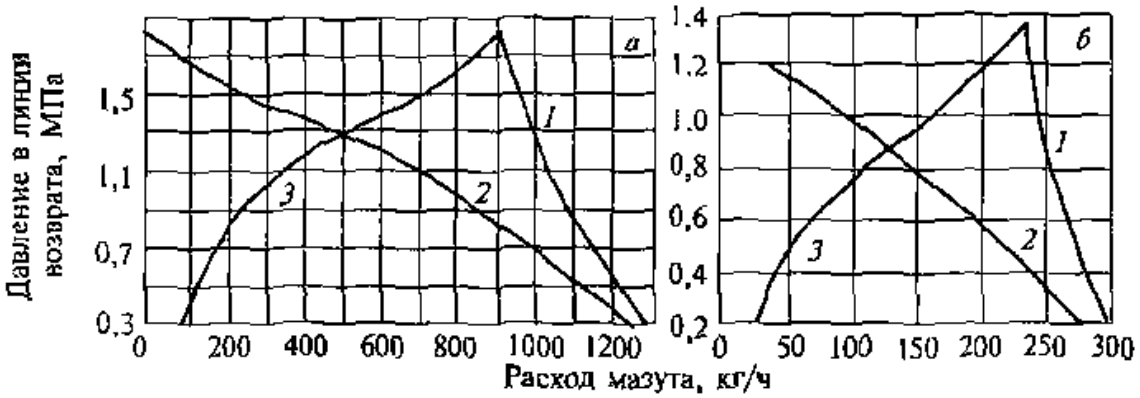


Рис. 8.23. Расходные характеристики механических форсунок ПО "Уралмаш" с обратным сливом производительностью 900 кг /ч (*а*); 300 кг /ч (*б*); *1* – общий расход мазута, *2* – расход сливаемого мазута; *3* – расход мазута на распыливание

8.10. ПАРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ФОРСУНКИ

Паромеханическая форсунка (рис 8.24) выполнена в виде концентрически расположенных труб, образующих каналы для прохода мазута и пара, на входной стороне соединенных с колодкой и штуцерами для подвода энергоносителей, на выходной стороне — с распыливающей головкой. Штуцера к колодке прижимаются скобой и винтом.

Распыливающая головка форсунки (рис. 8.25, *а*) состоит из топливного и парового завихрителей, распределительной шайбы и накидной гайки, прижимающей все элементы ко втулке центральной трубы.

Общий вид основных элементов распыливающей головки показан на рис 8.25, *б* и рис. 8.26, геометрические размеры при давлении топлива 1,6 МПа приведены в табл. 8.7.

При работе на номинальной нагрузке давление мазута перед форсункой поддерживается на уровне 1,6÷2,0 МПа, при этом пар в форсунку не подается. При входе в распыливающую головку мазут через отверстия в распределительной шайбе попадает в кольцевую приемную камеру топливного завихрителя. Далее по тангенциальным каналам мазут попадает в камеру завихрения, где приобретает вращательно-поступательное движение, и вытекает из сопла в виде тонкой пленки, распадаясь на капли.

При нагрузке горелки ниже 70 % от номинальной в форсунку подается пар при давлении 0,1÷0,2 МПа. Пар по наружной трубе форсунки через

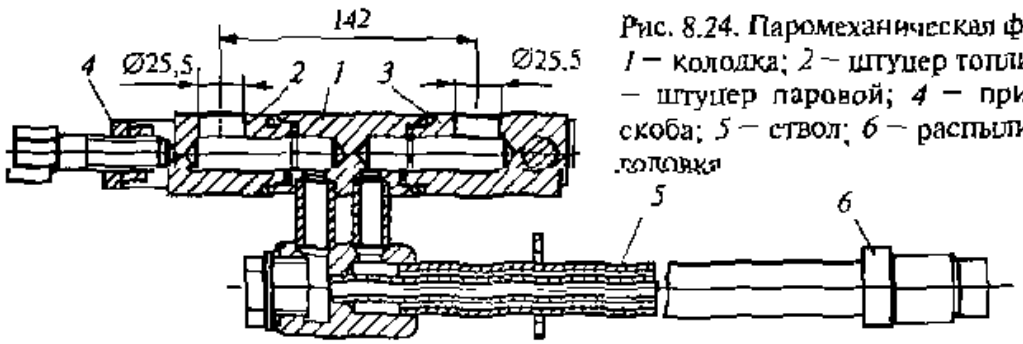


Рис. 8.24. Паромеханическая форсунка: *1* – колодка; *2* – штуцер топливный; *3* – штуцер паровой; *4* – прижимная скоба; *5* – ствол; *6* – распыливающая головка

Таблица 8.7

Геометрические размеры (мм) элементов паромеханических форсунок (рис. 8.25)

Характерный размер	Номинальный расход мазута, кг/ч					
	165	220	435	530	651	1170
	Топливный завихритель					
D	22,7	22,7	26,7	26,7		
D_1	20	20	24	24		
D_2	14	14	16	18		
D_3	7	7	9	9		
D_4	1,8	2,0	2,8	3,0	3,2	4,4
D_5	3,5	3,5	5,0	6,0		
D_6	—	—	14	14		
D_7	15	15	20	20		
D_8	17	17	22	22		
D_9	6,5	6,5	8,5	8,5		
H	9	9	12,5	13.5		
H_1	3	3	5	5		
H_2	0,5	0,5	1,0	1,0		
H_3	1,7	1,7	2,7	2,7		
H_4	2	2	3	4		
H_5	1,2	1,5	2	2		
b	1,5	1,5	2	2		
$n_{шт}$	3	3	3	3	4	4
	Шайба распределительная					
D	23	23	27	27		
D_1	17	17	20	20		
D_2	2,5	2,5	3	3	3	3
$n_{шт}$	8	8	12	12	12	12
	Паровой завихритель					
D	23	23	27	27		
D_1	15	15	20	20		
D_2	5	6	7,2	8,8	6,4	10,4
D_3	17	17	20	24		
D_4	14,5	14,5	19,5	19,5		
H	8	8	10	10		
H_1	2	2	3	3		
H_2	1,8	2	2,4	3,6		
H_3	2	2	4	4		
H_4	2	2	3	3		
b	2	3	3	3		
$n_{шт}$	3	3	3	3		
	Накидная гайка					
D_1	39	39	49	49	42	50
D_2	М30×1,5	М30×1,5	М39×2	М39×2		
D_3	28	28	35	35		
D_4	17	17	20	20		
D_5	23,5	23,5	27,5	27,5		
D_6	34	34	42	42		
H	51	51	73	73		
H_1	30	30	36	36		
H_2	25	25	33	33		
H_3	3	3	4	4		
H_4	1	1	2	2		
H_5	2	2	3	3		
H_6	3	3	4	4		
H_7	36	36	46	46		

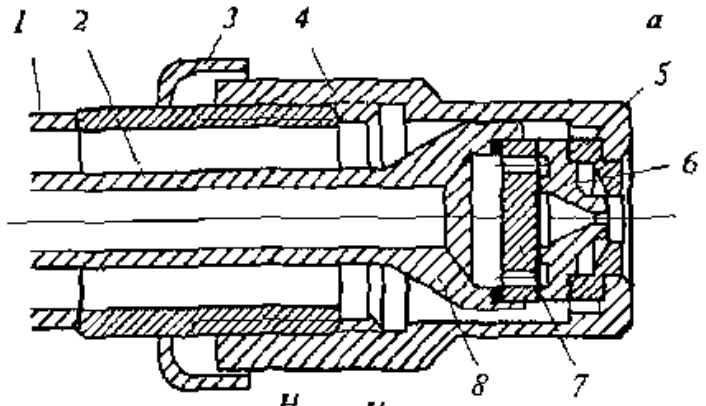
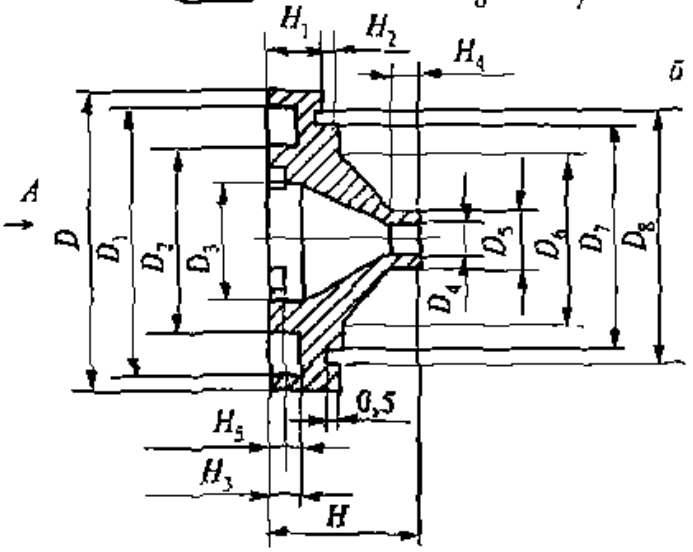
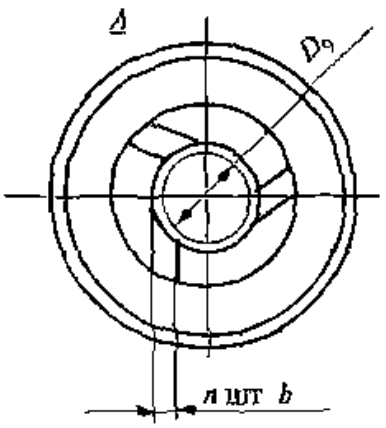
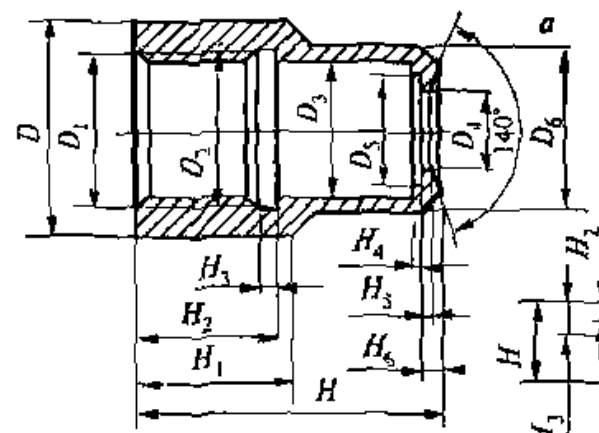
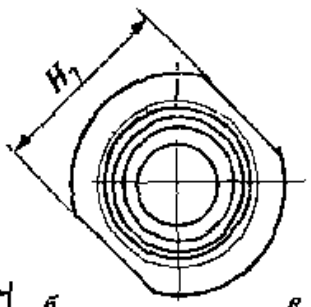


Рис 8. 25. Головка паромеханической форсунки:
а — общий вид; б — топливный завихритель:
1 — ствол; *2* — топливная труба; *3* — ограничитель, *4* — гайка накидная; *5* — завихритель паровой, *6* — завихритель топливный; *7* — шайба распределительная; *8* — втулка









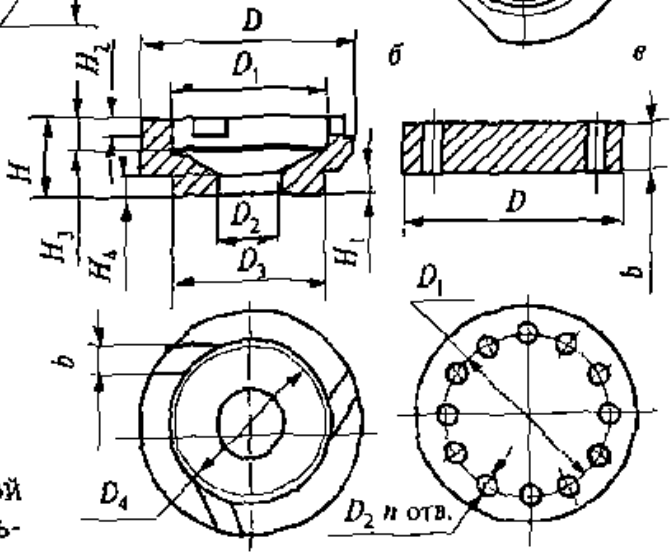


Рис. 8.26. Элементы паромеханической форсунки:
а — накидная гайка; *б* — завихритель паровой; *в* — распределительная шайба

щели между втулкой и накидной гайкой попадает сначала в кольцевой коллектор, а затем проходя через каналы парового завихрителя и выходя закрученным потоком через сопло, принимает участие в распыливании мазута.

Глава 9. ГАЗОМАЗУТНЫЕ ГОРЕЛКИ

В печных агрегатах металлургии газомазутные горелки применяют в тех случаях, когда при газовом отоплении необходимо иметь мазутный резерв. Одновременное сжигание газа и мазута не практикуется. Поэтому для отопления применяют, как правило, сочетание газовой горелки типа «труба в трубе» и вставленной в нее форсунки.

Наиболее простым конструктивным решением является размещение форсунки в газовом сопле горелки типа «труба в трубе». Такая конструкция позволяет быстро перевести отопление с газа на мазут и наоборот. Если в качестве газовой горелки используют горелки типа ДВБ, ДНБ, ДВС или ДНС — диаметр газового сопла горелки увеличивают с тем, чтобы сохранить расчетное сечение, а конструкцию колена меняют для крепления на нем фланца форсунки. Примеры размещения форсунок высокого давления в горелках типа «труба в трубе» показаны на рис. 9.1.

При такой конструкции газомазутной горелки форсунку нельзя вынимать из газового сопла, так как при этом изменится проходное сечение для газа. Постоянное нахождение форсунки в горелке при работе на газе требует регулярного ухода за форсункой для поддержания ее в работоспособном состоянии.

Форсунку необходимо систематически продувать распылителем для удаления мазута, протекающего через неплотную запорную арматуру. После работы на мазуте из форсунки необходимо удалить остатки мазута, иначе при работе на газе носик форсунки закоксуется и ее дальнейшая эксплуатация будет невозможной без чистки.

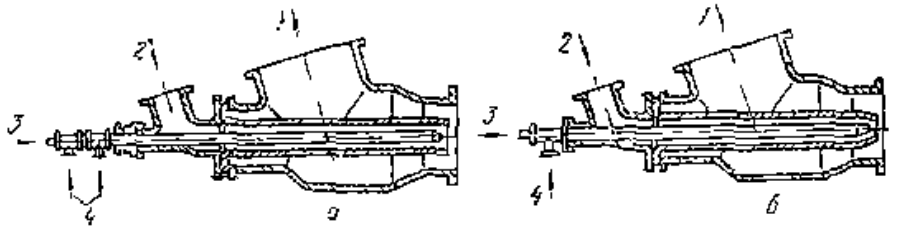


Рис. 9.1. Размещение форсунок высокого давления в газовых горелках типа «труба в трубе»: *а* — форсунка типа ФВД, *б* — форсунка типа ФК; *1* — воздух, *2* — газ; *3* — мазут, *4* — распылитель

Для того чтобы устранить этот недостаток, форсунку высокого давления размещают в специальной трубе, проходящей по центру газового сопла. В этом случае газовый и мазутный узлы горелки независимы и при работе на газе форсунку можно вынимать из горелки, а при переходе на мазут вставлять ее обратно. Недостатком такого размещения форсунки является значительное увеличение поперечных размеров горелки. Примером газомазутной горелки с размещением форсунки высокого давления в спе-

циальной трубе является конструкция газомазутных горелок для нагревательных печей московского металлургического завода «Серп и молот».

9.1. Горелки нагревательных печей завода «Серп и молот»

Газомазутные горелки, разработанные Стальпроектом для нагревательных печей завода «Серп и молот», показаны на рис. 9.2, *а*, а их конструктивные размеры приведены в табл. 9.1.

Горелки предназначены для сжигания холодной смеси природного и коксового газов с теплотой сгорания 28,0 МДж/м^3. Разработаны 3 типоразмера горелок с номинальной пропускной способностью по газу 0,11; 0,17 и 0,28 м^3/с.

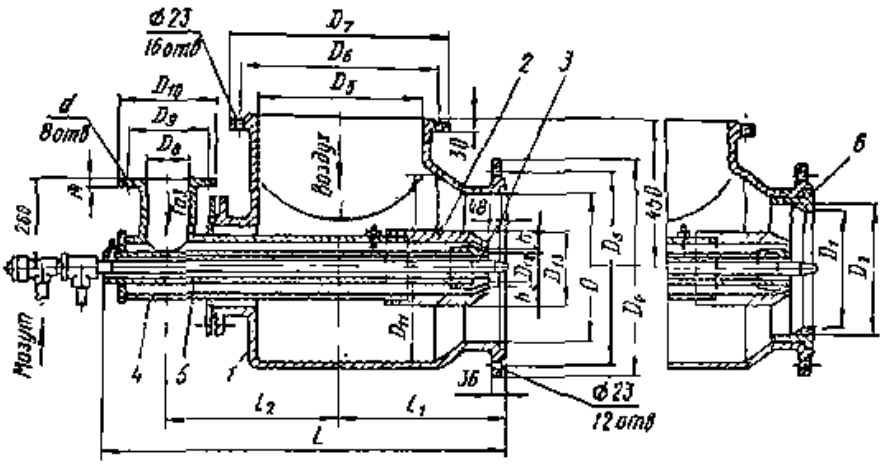


Рис. 9.2. Газомазутные горелки для нагревательных печей завода «Серп и молот».
1 — корпус горелки; *2* — газовое сопло; *3* — форсунка высокого давления; *4* — газопроводящая труба, *5* — центральная труба, *6* — воздушная насадка

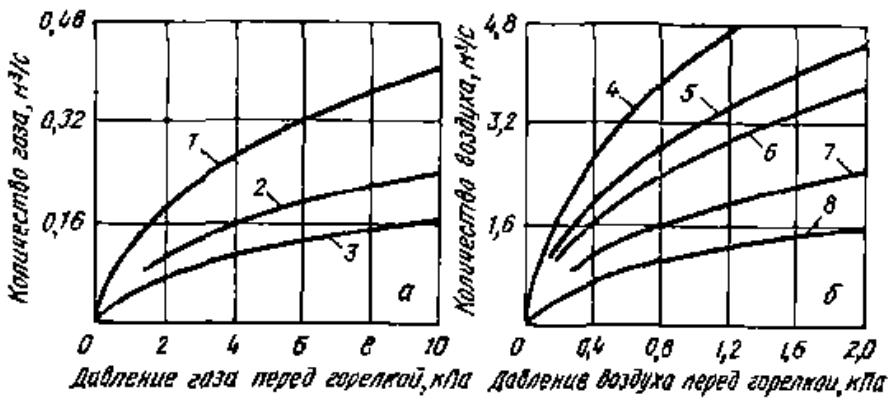


Рис 9.3. Пропускная способность газомазутных горелок для нагревательных печей завода "Серп и молот" по газу (*а*) и по воздуху (*б*) для горелок с номинальной пропускной способностью, м^3/с:
1 — 0,28; *2* — 0,17; *3* — 0,11; *4* — 0,28, вариант I; *5* — 0,28, вариант II; *6* — 0,17, вариант I; *7* — 0,17, вариант II и 0,11, вариант I, *8* — 0,11, вариант II

Таблица 9.1

Конструктивные размеры (мм) газомазутных горелок для нагревательных печей завода «Серп и молот» (рис. 9.2)

Номинальная пропускная способность горелки по газу м³/с	Вариант	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}	D_{13}	d	h	L	L_1	L_2	Масса горелки, кг
0,11	I		260	320	490	550	400	495	535	120	210	245	460	104	190	18	4	1088	480	440	400
	II		260	280	490	550	400	495	535	120	210	245	460	104	190	18	4	1088	480	440	400
0,17	I	370	—	—	490	550	400	495	535	120	210	245	460	100	190	18	6	1088	480	440	350
	II	—	260	320	490	550	400	495	535	120	210	245	460	100	190	18	6	1088	480	440	350
0,28	I	450		—	570	630	500	600	640	139	240	280	560	100	200	22	10	1198	500	510	430
	II	—	370	400	570	630	500	600	640	139	240	280	560	100	200	22	10	1198	500	510	430

Номинальная пропускная способность определена при давлении газа перед горелкой 5 кПа. В эти горелки вставляют форсунки высокого давления, соответственно, ФВД-300, ФВД-400 и ФВД-600. Каждая горелка выполнена в двух вариантах с различным выходным сечением для воздуха. Выходное сечение для воздуха изменяют с помощью насадок.

На графиках рис. 9.3 показана пропускная способность газомазутных горелок по газу и воздуху в зависимости от их давления перед горелкой. Графики построены для холодного (20 °С) газа с теплотой сгорания 28,0 МДж/м³ и плотностью 0,65 кг/м³ и для холодного (20 °С) воздуха. При других условиях выбор горелок следует производить по расчетному количеству газа и воздуха, как при выборе горелок типа «труба в трубе».

9.2. Горелки типа ГКВГ

Газомазутные комбинированные горелки высокоинтенсивного горения типа ГКВГ (рис. 9.4, табл. 9.2), разработанные Волгоградским ВНИИТмашем, предназначены для сжигания природного газа и мазута с холодным воздухом. Горелки дают короткий и широкий факел.

Давление воздуха перед горелкой должно быть не менее 3 кПа, мазута — не менее 150 кПа, температура мазута не ниже 80 °С. Пределы регулирования горелки по газу 1 : 5, по мазуту 1 : 2.

Разработано 5 типоразмеров горелок с номинальной пропускной способностью по природному газу от 0,0042 до 0,0278 м³/с. Номинальная пропускная способность определена при давлении газа перед горелкой 30 кПа.

Воздух, поступающий в горелку, разделяется на два потока и вводится тангенциально через несколько отверстий в малую и большую вихревые камеры, образуя в них вихревые потоки.

Во время работы горелки на природном газе газ через тангенциальные отверстия в газовой трубе поступает в малую вихревую камеру, где встречается и интенсивно перемешивается с вихревым потоком воздуха. Дальнейшее перемешивание происходит в эжекторе. На выходе из горелки газо-

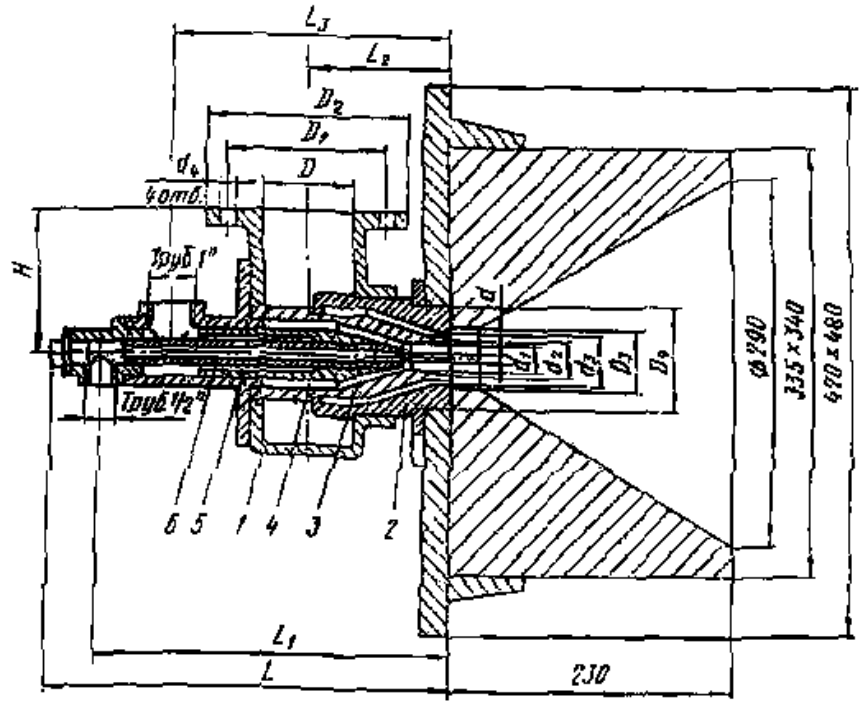


Рис. 9.4 Газомазутные горелки типа ГКВГ

1 — корпус, *2* — насадка; *3* — большая вихревая камера; *4* — малая вихревая камера с эжектором; *5* — газовая трубка; *6* — мазутная труба

Таблица 9.2

Конструктивные размеры (мм) газомазутных горелок типа ГКВГ (рис. 9.4)

Обозначение горелки	Номинальная пропускная способность по газу, $м^3/с$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	d	d_1	d_2	d_3	d_4	H	l_1	L_1	L_2	L_3	Масса, кг		
																	горелки	горелочной плиты	горелочного камня
ГКВГ-15	0,0042	70	130	160	45	75	2,0	23	30	40	14	110	324	282	112	225	11,0	26,3	37,7
ГКВГ-25	0,0069	80	150	185	70	85	2,0	32	38	50	18	110	334	292	117	235	16,0	26,1	37,5
ГКВГ-50	0,0139	100	150	185	75	100	2,5	44	52	68	18	140	386	344	149	277	19,5	25,7	37,0
ГКВГ-75	0,0208	120	170	205	85	115	3,0	54	62	80	18	150	418	376	169	309	23,0	25,3	33,0
ГКВГ-100	0,0278	140	200	235	100	130	3,2	62	72	95	18	170	440	398	181	331	26,6	24,9	33,0

воздушная смесь подхватывается закрученным потоком вторичного воздуха, выходящим из большой вихревой камеры. Образуется широкий короткий закрученный факел. Во время работы горелки на мазуте последний на выходе из сопла попадает в эжектор малой вихревой камеры, где встречается с закрученным воздушным потоком.

Из-за большой разницы скоростей этих потоков происходит дробление мазутной струи на капли и интенсивное смесеобразование. На выходе из горелки мазуто-воздушная смесь перемешивается с потоком вторичного воздуха и сгорает в коротком широком факеле.

При работе горелки в центре вихревого факела создается разрежение, которое препятствует закоксовыванию мазутного сопла, а после окончания работы на мазуте очищает мазутное сопло от остатков топлива.

Обозначение горелок состоит из индекса типа горелок и через дефис цифры, характеризующей номинальную пропускную способность горелки по газу, например ГКВГ-50·

горелка комбинированная высокоинтенсивного горения с номинальной пропускной способностью по газу 0,0139 м^3/с.

Выбор газомазутных горелок типа ГКВГ производится по графикам (рис. 9.5 и 9.6). Кривые на рис. 9.5 построены для природного газа с $Q_н^р$ = = 33,5 МДж/м^3; $\rho_{0г}$ = 0,742 кг/м^3 при α = 1,02. Кривые на рис. 9.6 построены для мазута марки 100 с $Q_н^р$ = 39,8—40,4 МДж/кг, подогретого до 80 °С (ВУ-15.5), α = 1,1.

При выборе горелок сначала по графику на рис. 9.5 определяют необходимый типоразмер горелки. Затем для выбранного типоразмера по графику на рис. 9.6 находят давление воздуха перед горелкой.

Пример. Подобрать газомазутную горелку типа ГКВГ для сжигания $V_{0г}$ = 0,02 м^3/с природного газа с теплотой сгорания $Q_н^р$ = 33,5 МДж/м^3. Давление газа перед горелкой $p_г$ = 35 кПа. Горелка должна сохранять теплопроизводительность при работе на мазуте $Q_н^р$ = 40,0 МДж/кг

По графику (см. рис. 9.5) находим, что заданной пропускной способности по газу и располагаемому давлению газа отвечает газомазутная горелка ГКВГ-75.

Необходимая пропускная способность горелки по мазуту

$$B_м = V_{0г} \cdot (Q_н^р)_г/(Q_н^р)_м = 0{,}02 \cdot 33{,}5/40{,}0 = 0{,}0168 \text{ кг/с}.$$

По графику на рис. 9.6 находим, что для обеспечения необходимой

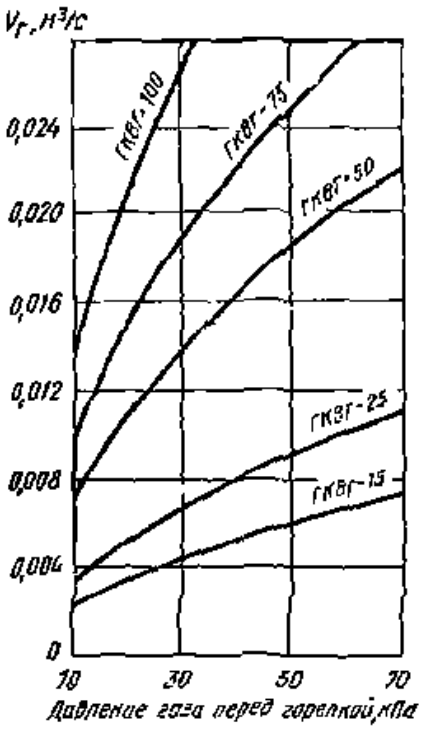


Рис. 9.5. Пропускная способность по газу газомазутных горелок типа ГКВГ

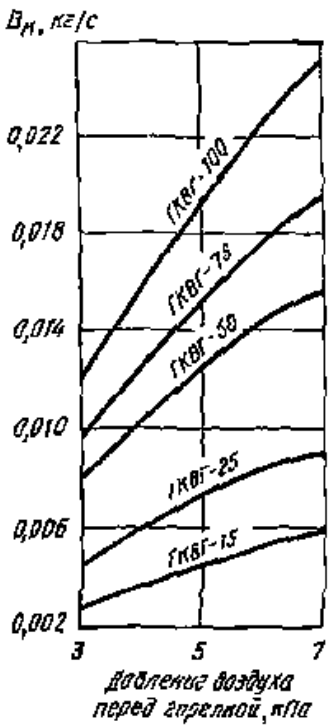


Рис. 9.6. Пропускная способность по мазуту газомазутных горелок типа ГКВГ

пропускной способности горелки ГКВГ-75 по мазуту давление вентиляторного воздуха перед горелкой должно быть 5,6 кПа.

Технические характеристики горелок, полученные при испытании во ВНИИТмаш на стенде-печи, приведены в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Основные технические характеристики горелок ГКВГ (рис. 9.4), полученные при испытании

Технические характеристики	Размерность	ГКВГ-15	ГКВГ-25	ГКВГ-50	ГКВГ-75	ГКВГ-100
При работе на газе						
Номинальная тепловая мощность	кВт	149	287	514	776	1020
Номинальный расход газа	м³/ч	15	28,6	51,3	77,5	100
Номинальное давление газа	кПа	28,5	40,0	40,0	40,0	36,3
Номинальный расход воздуха	м³/ч	145	257	461,7	700	1015
Номинальное давление воздуха	кПа	4,20	4,70	3,18	4,90	3,14
Коэффициент расхода воздуха	–	1,02	1,03	1,04	1,03	1,04
Диапазон рабочего регулирования:						
по расходу газа	м³/ч	3,3–17,6	6,2–28,6	9,15–51,3	14,6–77,5	21–117
по расходу воздуха	м³/ч	32–172	56–257	82,3–461,7	130–700	209–1182
Коэффициент рабочего регулирования	–	5,3	4,61	5,6	5,3	5,6
Длина факела	м	0,8				0,4
При работе на мазуте						
Номинальная тепловая мощность	кВт	150	290	554	697	1010
Номинальный расход мазута	кг/ч	14,0	26,0	49,6	62,4	88,0
Номинальное давление мазута	кПа	1,96	3,00	3,50	2,00	5,40
Номинальный расход воздуха	м³/ч	167	260	496	624	1057
Номинальное давление воздуха	кПа	3,92	5,45	5,85	5,78	3,90
Коэффициент расхода воздуха	–	1,06	1,06	1,05	1,02	1,07
Диапазон рабочего регулирования:						
по расходу мазута	кг/ч	8,1–16,1	17,5–26	30,7–49,6	34,7–62,4	41,5–103,5
по расходу воздуха	м³/ч	100–194	175–260	307–496	347–624	503–1246
Коэффициент рабочего регулирования	–	2,0	1,49	1,6	1,8	2,5
Длина факела	м	1,2	–	–	–	0,8

9.3. ГОРЕЛКИ ТИПА КГМГ-А

Газомазутные комбинированные горелки с акустическим излучателем типа КГМГ-А, разработанные Волгоградским ВНИИТмашем (рис. 9.7, табл. 9.4), предназначены для сжигания природного газа и мазута с холодным или подогретым до 400 °С воздухом.

Давление вентиляторного воздуха перед горелкой должно быть не менее 3 кПа, мазута от 50 до 300 кПа, компрессорного воздуха не менее

Таблица 9.4

Конструктивные размеры (мм)* газомазутных горелок типа КГМГ-А (рис. 9.7)

Обозначение горелки	Номинальная пропускная способность по газу, м³/с	D	D_1	D_2	D_3	D_4	d	d_1	H	L	L_1	L_2	L_3	Число отверстий n	Масса, кг		
															горелки	горелочной плиты	горелочного камня
КГМГ-А1	0,0042	65	130	160	40	75	1"	13	100	320	280	218	100	4	7,5	26,5	37,5
КГМГ-А2	0,0069	80	150	185	48	90	1"	17	100	390	350	278	136	4	13,6	26,0	37,5
КГМГ-А3	0,0139	90	170	205	60	120	1"	17	120	403	372	300	155	4	24,0	25,4	37,5
КГМГ-А4	0,0208	120	200	235	70	130	1"	17	140	437	397	325	165	4	23,3	25,0	37,0
КГМГ-А5	0,0278	130	200	235	80	140	1"	17	150	476	436	359	190	8	25,0	27,2	37,0
КГМГ-А6	0,0347	140	225	260	90	150	1"	17	160	491	451	374	200	8	28,4	26,9	37,0
КГМГ-А7	0,0417	160	225	260	100	160	1"	17	190	511	471	394	210	8	36,0	30,5	40,0
КГМГ-А8	0,0556	180	255	290	115	180	1¼"	17	220	555	515	432	230	8	42,0	30,0	40,0

* *Кроме указанных особо*

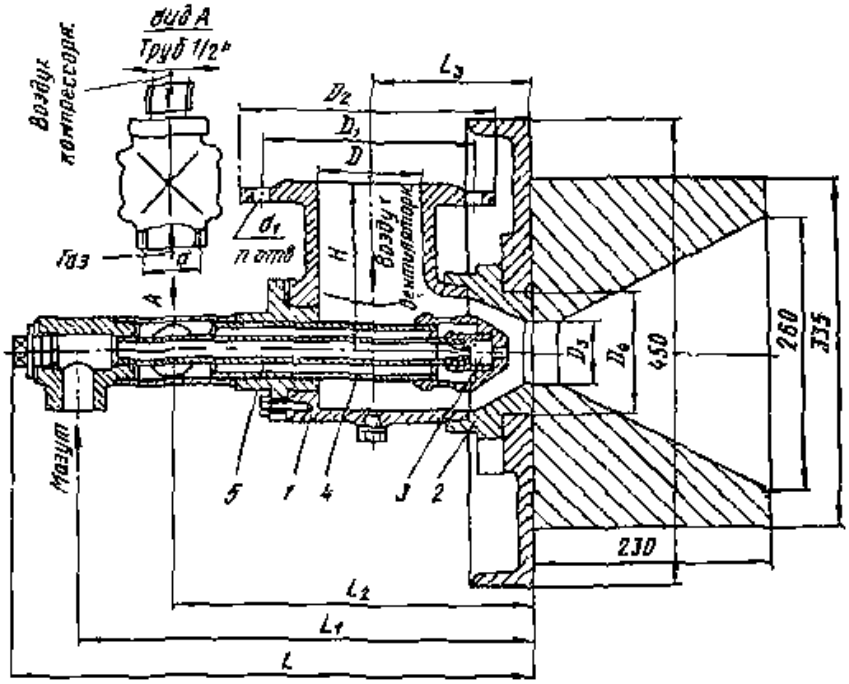


Рис. 9.7. Газомазутные горелки типа КГМГ-А:
1 — корпус; *2* — насадка; *3* — акустический излучатель; *4* — газовая труба; *5* — мазутная труба

100 кПа, температура мазута не ниже 80 °С. Пределы регулирования горелки по газу и мазуту примерно 1 : 5; количество компрессорного воздуха 0,8 м³/кг мазута. При работе на газе компрессорный воздух не подают.

Разработано 8 типоразмеров горелок КГМГ-А1–КГМГ-А8 с номинальной пропускной способностью по газу от 0,0042 до 0,0556 м³/с. Номинальная пропускная способность определена при давлении газа перед горелкой 60 кПа.

При работе горелки на мазуте компрессорный воздух подается в горелку по газовой трубе и через тангенциальные отверстия попадает в акустический излучатель, где создает вихревые потоки. Выходя из сопла акусти-

ческого излучателя, вихревые потоки создают акустическое поле, которое улучшает распыление мазута, интенсифицирует процессы перемешивания топлива с воздухом и горения.

Кроме того, акустический излучатель защищает мазутное сопло от воздействия высоких температур, а создающиеся в нем вихревые потоки имеют разрежение по оси, что препятствует закоксовыванию мазутного сопла.

При работе на газе, проходя через акустический излучатель, вихревые потоки газа также создают акустическое поле, которое улучшает перемешивание газа с воздухом.

Выбор горелок КГМГ-А производят по графикам (рис. 9.8 и 9.9), на которых приведена зависимость пропускной способности горелок соответственно по газу и воздуху от их давления перед горелкой. Кривые построены для тех же условий, что и на рис. 9.5 и 9.6.

При подогреве воздуха на графиках следует откладывать расчетное количество газа и мазута, которое определяют так же, как для горелок типа «труба в трубе».

Пример. Для условий предыдущего примера выбрать газомазутную горелку типа КГМГ-А. Давление газа перед горелкой 55 кПа. Воздух нагрет до $t_в = 200$ °С. Расчетное количество газа

$$V_г^{расч} = V_{0г} k_t = 0{,}02 \cdot 1{,}27 = 0{,}0254 \text{ м}^3/\text{с},$$

где поправка на температуру k_t определяется по формуле, приведенной выше, или по графику на рис. 4.8 при температуре воздуха $t_в = 200$ °С.

По графику (см. рис. 9.8) находим, что расчетному количеству газа и

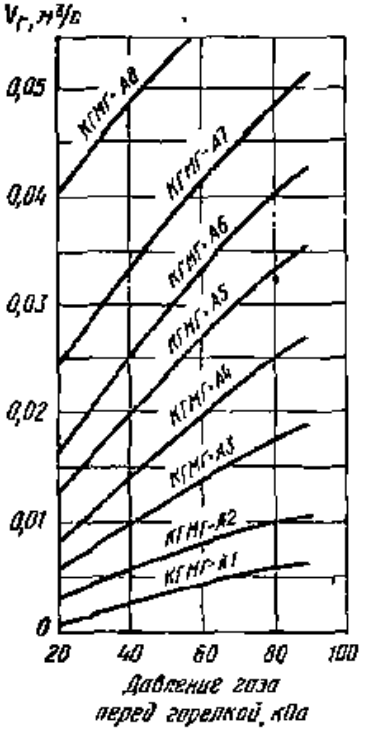


Рис 9.8. Пропускная способность по газу газомазутных горелок типа КГМГ-А

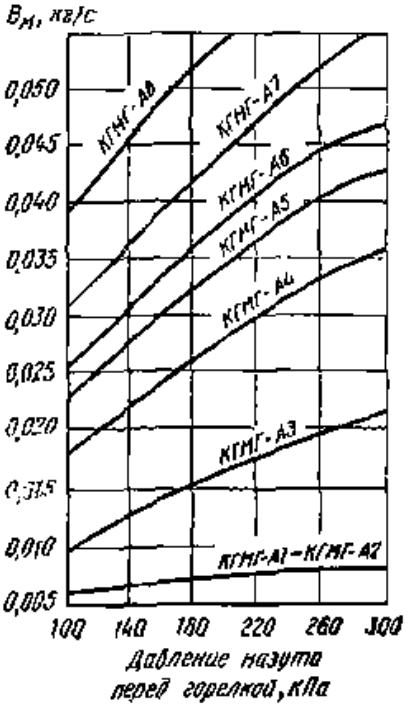


Рис. 9.9. Пропускная способность по мазуту газомазутных горелок типа КГМГ-А

давлению газа перед горелкой соответствует газомазутная горелка КГМГ-А5. Расчетное количество мазута

$$B_м^{расч} = B_м k_г = 0{,}0168 \cdot 1{,}27 = 0{,}0213 \text{ кг/с}.$$

По графику (см. рис. 9.9) находим, что для обеспечения такой пропускной способности горелки по мазуту его давление перед горелкой должно быть равно 90 кПа.

Таблица 9.5

Технические характеристики горелок КГМГ (рис. 9.7), полученные при *испытании*

Технические параметры	Размерность	Типоразмер				
		КГМГ-А1	КГМГ-А2	КГМГ-А3	КГМГ-А5	КГМГ-А7
При работе на газе						
Номинальная тепловая мощность	кВт	130	310	467	960	1520
Номинальный расход газа	м³/ч	13	31,0	46,7	96,0	152
Номинальное давление газа	кПа	58,9	64,0	52,0	90,0	55,0
Номинальный расход воздуха	м³/ч	126	280	432	900	1520
Номинальное давление воздуха	кПа	0,61	1,06	1,68	5,20	4,22
Коэффициент расхода воздуха	—	1,01	1,03	1,02	1,03	1,05
Диапазон рабочего регулирования:						
по расходу газа	м³/ч	2,6—15,2	6,8—31	9,7—46,7	18,5—96	32,5—178
по расходу воздуха	м³/ч	26—148	61—280	96—432	170—900	317—1743
Коэффициент рабочего регулирования		5,8	4,6	5,8	5,2	5,5
Длина факела	м	1,0				0,5
При работе на мазуте						
Номинальная тепловая мощность	кВт	130	433	613	793	1516
Номинальный расход мазута	кг/ч	12,0	38,8	54,9	71,0	132
Номинальное давление мазута	кПа	29,40	45,00	55,00	36,00	44,15
Номинальный расход дутьевого воздуха	м³/ч	129	264	500	660	1540
Номинальное давление дутьевого воздуха	кПа	0,45	1,20	2,90	3,43	4,30
Номинальный расход компрессорного воздуха	м³/ч	10	21	44	57	106
Номинальное давление компрессорного воздуха	кПа	98,0	100,5	107,0	106,0	88,3
Коэффициент расхода воздуха	—	1,03	1,08	1,02	1,08	1,10
Диапазон рабочего регулирования:						
по расходу мазута	кг/ч	3,5—14,0	7,7—28,3	8,5—54,9	14,3—71	30—159
по расходу дутьевого воздуха	м³/ч	49—151	77—264	80—500	120—660	330—1865
Коэффициент рабочего регулирования	—	4,0	3,7	6,4	5,0	5,3
Длина факела	м	1,2	—	—	—	0,5

Для распыления мазута в горелку необходимо подать $V_{комп} = 0{,}8B_м = 0{,}8 \cdot 0{,}0168 = 0{,}0134$ м^3/с компрессорного воздуха.

Технические характеристики горелок КГМГ-А, полученные при испытании горелок в стендовых условиях во ВНИИмаш на стенде-печи, представлены в табл. 9.5.

9.4. КОМБИНИРОВАННАЯ ГОРЕЛКА ГКНД

Комбинированная газомазутная горелка низкого давления ГКНД разработана НПО «ВНИИмаш» для сжигания природного газа в качестве основного топлива и мазута в качестве резервного. Горелка имеет встроенный регулятор, позволяющий изменять качество смешения газа с воздухом и длину газового факела.

Общий вид горелки показан на рис. 9.10, технические и конструктивные характеристики, полученные при испытании во ВНИИмаш, приведены в табл. 9.6.

Горелка ГКНД состоит из корпуса *1*, газовой трубы *2* с отверстиями для выхода газа *3*, вихревой камеры *4*, имеющей два ряда тангенциальных каналов для ввода воздуха *5*, носика горелки *6*, мазутной трубы *7*, сопла *8*.

При сжигании газа топливо, пройдя через отверстия *3* газовой трубы *2*, попадает в вихревую камеру *4*, где смешивается с закрученным потоком воздуха, поступающим из корпуса *1* через тангенциальные каналы *5*. Частично подготовленная газовоздушная смесь, выходя из вихревой камеры *4*, смешивается с прямоточным потоком воздуха, подающимся из кольцевой щели, образованной вихревой камерой и носиком горелки *6*.

Регулирование длины газового факела осуществляется путем передви-

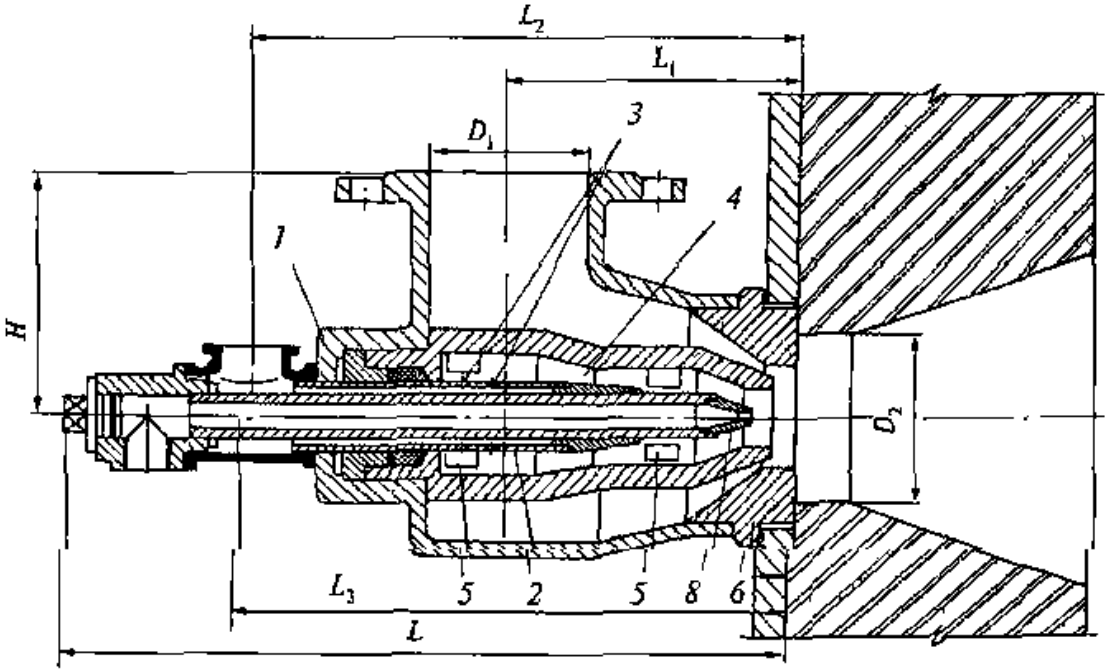


Рис. 9.10. Комбинированная горелка ГКНД:
1 — корпус, *2* — газовая труба; *3* — отверстия для выхода газа; *4* — вихревая камера; *5* — тангенциальный канал; *6* — носик; *7* — мазутная труба; *8* — сопло

Таблица 9.6

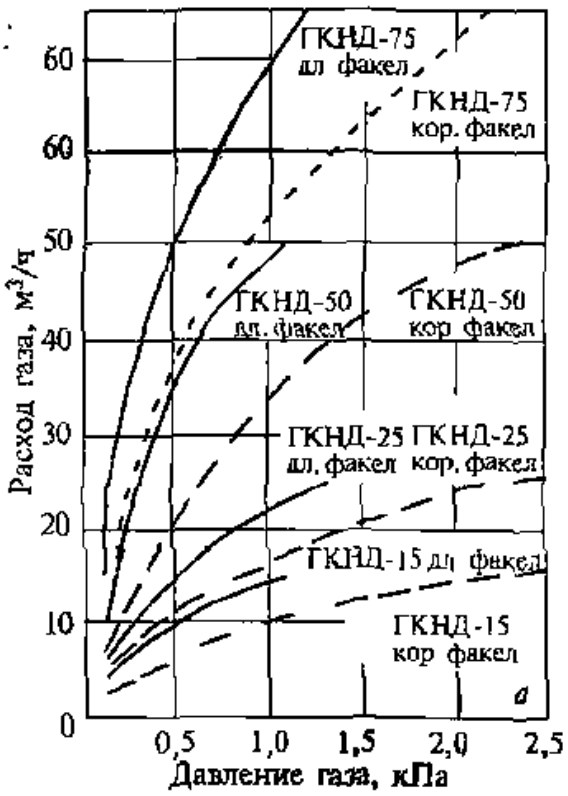
Техническая характеристика горелок ГКНД (рис. 9.10)

Технические характеристики	Размерность	ГКНД-15		ГКНД-25		ГКНД-50		ГКНД-75	
		длинный факел	короткий факел	длинный факел	короткий факел	длинный факел	короткий факел	длинный факел	короткий факел
При работе на газе									
Номинальная тепловая мощность	кВт	150,9	150 9	250	250	503	503	754,5	754,5
Номинальный расход газа	$м^3/ч$	15,0	15,0	25,0	25,0	50,0	50,0	75,0	75,0
Номинаяьное давление газа	кПа	1,03	2,35	1.27	2,45	1,03	2 25	1,18	2,11
Номинальный расход воздуха	$м^3/ч$	148	149	247	247	503	503	758	742
Номинальное давление воздуха	кПа.	1,23	3,14	1,91	3,33	1,32	3,11	2,01	3,33
Коэффициент расхода воздуха		1,03	1,03	1,03	1,03	1,04	1.04	1,05	1,03
Коэффициент рабочего регулирования		3,6	5,4	4,0	7,2	4,8	7.1	4,7	6,6
Длина факела	мм	285	100	513	342	756	420	1050	438
При работе на мазуте марки 100 "В" по ГОСТ 10585–75, температура мазута 80 °С, вязкость $ВУ_{80} = 2,11$									
Номинальная тепловая мощность	кВт	149,1		248,4		490,8		726,6	
Номинальный расход мазута	кг/ч	12,6		21.0		41,5		61,5	
Номинальное даление мазута	кПа	25,5		6.86		8,82		6,9	
Номинальный расход воздуха	$м^3/ч$	154		253		448		730	
Номинальное давление воздуха	кПа	2,65		2,65		2,4		2,4	
Коэффициент расхода воздуха		1,08		1,05		1,03		1,05	
Коэффициент рабочего регулирования		3,2		3,2		3,1		3,3	
Длина факела	мм	170		420		546		756	
Размер.	мм								
D_1		70		90		125		155	
D_2		50		70		100		100	
L		382		414		507		573	
L_1		145		150		210		225	
L_2		283		310		400		440	
L_3		340		372		457		500	
H		110		130		160		200	
Масса горелки	кг	119		122		125		129	

жения вихревой камеры относительно газовой трубы и носика горелки. При расположении вихревой камеры в крайне левом положении основной поток воздуха выходит из горелки через кольцевую щель в виде прямоструйного потока. При этом формируется наиболее длинный факел. При смещении вихревой камеры в сторону носика горелки увеличивается расход воздуха, проникающего в нее через тангенциальные каналы. Это улучшает качество предварительного смешения и укорачивает факел.

При сжигании жидкого топлива мазут подводится по трубе 7 и вытекает через отверстие в наконечнике форсунки. Частичное распыливание мазута осуществляется воздухом, вытекающим из вихревой камеры.

Расходные и регулировочные характеристики горелок ГКНД при сжигании природного газа приведены на рис. 9.11.



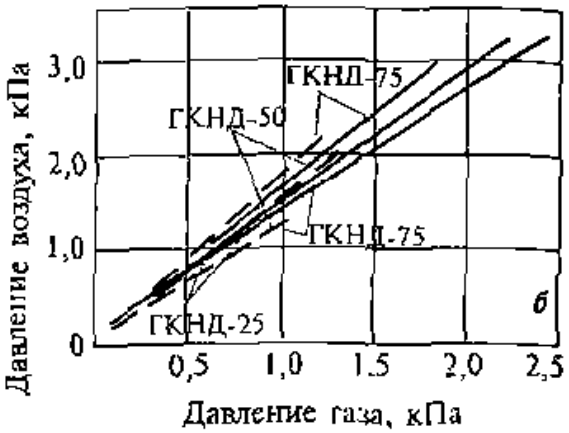


Рис. 9.11 Расходные (*а*) и регулировочные характеристики горелок ГКНД (*б*):
сплошные линии — длинный факел; пунктирные — короткий

9.5. КОМБИНИРОВАННЫЕ ГОРЕЛКИ ВНИИМТ

Комбинированные горелки ВНИИМТ предназначены для сжигания природного газа и мазута с воздухом, подогретым до 300—350 °С. Общий вид горелок показан на рис. 9.12, а технические и конструктивные характеристики приведены в табл. 9.7 [1].

Горелка состоит из корпуса, трубы для подвода газа, оканчивающейся газовым соплом, завихрителя воздуха с втулкой и форсунки. Лопатки завихрителя расположены под углом 45° к его оси, что обеспечивает интенсивное закручивание потока воздуха при относительно небольшом гидравлическом сопротивлении воздушного тракта горелки. Коэффициент расхода воздушного тракта таких горелок приближенно равен 0,54. Втулка установлена для подачи части воздуха вдоль оси горелки без его закрутки. Это способствует снижению интенсивности нагрева газового сопла и раздающего насадка форсунки за счет отдува рециркулирующих высокотемпературных продуктов горения и отвода тепла конвекцией от деталей горелки.

По оси горелки вместо мазутной форсунки может устанавливаться запальное устройство.

Газ из сопла вытекает через цилиндрические отверстия, расположен-

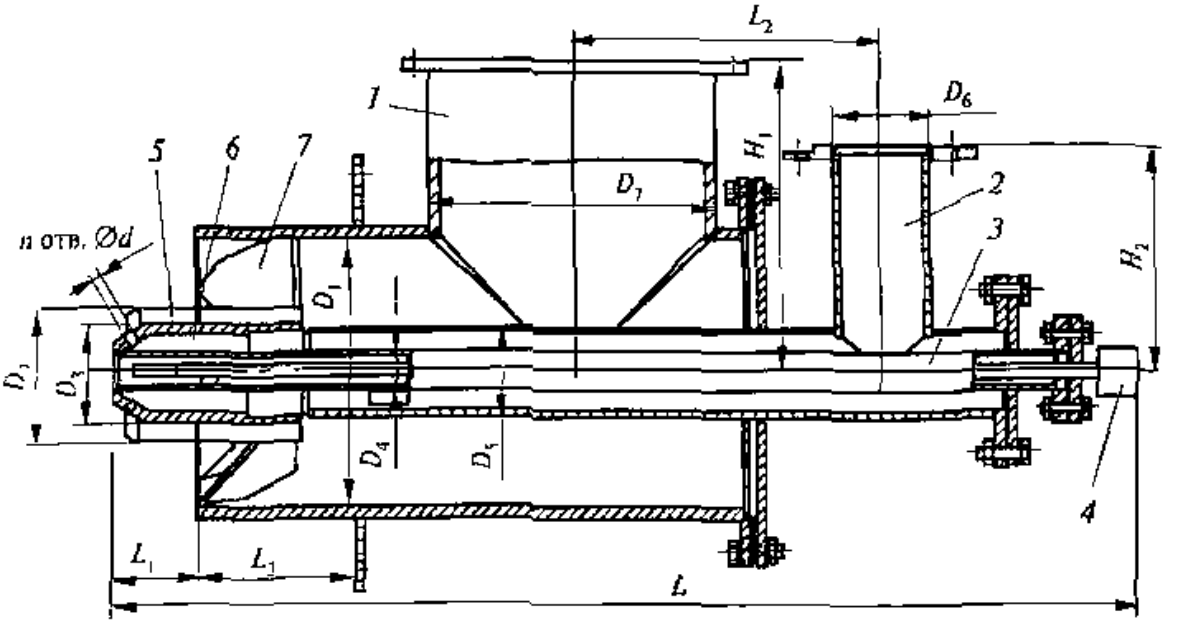


Рис. 9.12. Комбинированная горелка ВНИИМТ:
1 — воздушный патрубок; *2* — газовый патрубок; *3* — направляющая труба; *4* — запальник (форсунка); *5* — газовое сопло; *6* — втулка; *7* — завихритель воздуха

ные равномерно по окружности. Количество газовыпускных отверстий n, диаметр d, угол наклона оси отверстий к оси горелки подобраны из условия интенсивного смешивания газа с воздухом до выхода их из амбразуры. Величина L_3 зависит от толщины кладки теплового агрегата. Для обеспечения идентичности характеристик газового и мазутного факелов в горелке установлена пневматическая форсунка ВНИИМТ (см. рис. 8. 11). Особенностью работы горелки является повышенный коэффициент расхода воздуха 1,5—4,0.

Угол раскрытия факела при выходе из горелочной амбразуры составляет около 110°.

Длина факела существенно зависит от тепловой нагрузки горелки, коэффициента расхода воздуха и находится в пределах 1,0—2,5 м в зависимости от типоразмера. Границу устойчивой работы горелок можно определять по формулам:

$$V_{\text{в}} = 0{,}47 G_{\text{т}} + 0{,}5 \qquad \textbf{(9.1)}$$

и

$$\alpha_{\text{пред}} = k - 0{,}46 V_{\text{в}}, \qquad (9.2)$$

где $V_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{пред}}$ — предельно допустимые расходы воздуха (тыс. м^3/ч) и коэффициент расхода воздуха; $G_{\text{т}}$ — рабочий расход топлива (для работы на природном газе, м^3/ч; для работы на мазуте, кг/ч); k — опытный коэффициент, *при работе на газе* $k = 8{,}0$, *при работе на мазуте* $k = 6{,}5$.

Влияние режимных параметров работы горелки на химический недожог по длине факела при сжигании газа показано на рис. 9.13.

Таблица 9.7

Технические и конструктивные характеристики комбинированных горелок ВНИИМТ (рис. 9.12)

Параметр и характерный размер	Размерность	Тепловая мощность, МВт	
		0,8	0,3
Расход:			
воздуха	тыс. м³/ч	2	5
газа	м³/ч	80	300
мазута	кг/ч	60	250
Давление:			
воздуха	кПа	2,5	2,5
газа	«—«	15	10
мазута	«—«	0,4	0,4
распылителя	«—«	0,4	0,4
Температура:			
воздуха	°С	350	350
газа	«—«	20	20
мазута	«—«	120	120
распылителя	«—«	20—120	20—120
Удельный расход распылителя	кг/кг мазута	0,5	0,3
Коэффициент расхода воздуха		3,5	1,7
Характерный размер	мм		
D_1		189	303
D_2		108	160
D_3		76	115
D_4		48	48
D_5		76	108
D_6		60	108
D_7		203	325
L_1		80	105
L_2		250	450
L		1035	1380
H_1		300	500
H_2		250	250

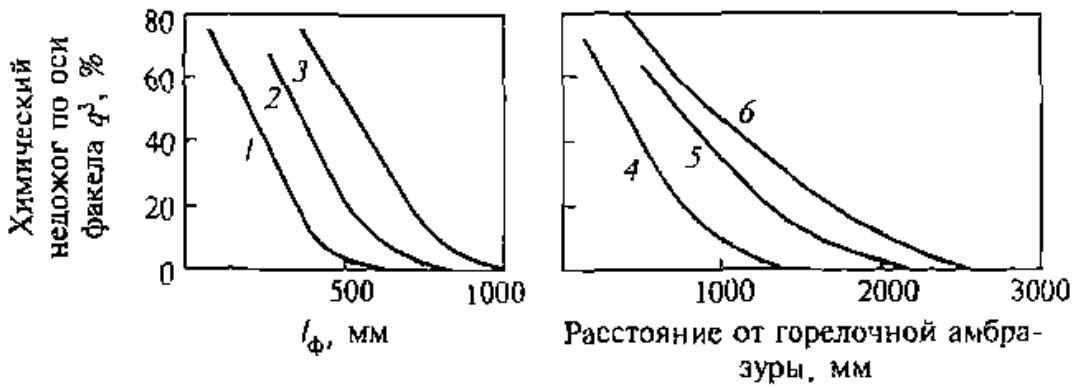


Рис. 9.13. Зависимость химического недожога по оси факела горелки мощностью 0,8 МВт (*а*), 3,0 МВт (*б*) (*1* — $V_г$ = 85 м³/ч, α = 2,5; *2* — $V_г$ = 62 м³/ч, α = 2,3, *3* — $V_г$ = 81 м³/ч, α = 1,75; *4* — $V_г$ = 100 м³/ч, α = 2,6; *5* — $V_г$ = 100 м³/ч, α = 2,0, *6* — $V_г$ = 230 м³/ч, α = 1,7)

9.6. ГАЗОМАЗУТНЫЕ ГОРЕЛКИ ГМР

Газомазутные горелки ГМР разработаны ВНИИпромгазом и Теплопроектом ЛО для сжигания природного газа и мазута применительно к нагревательным и плавильным печам.

Разработаны две модификации горелок с подводом воздуха для горения по двум каналам и с подводом по одному каналу (рис. 9.14). Во всех случаях горелка состоит из двух концентрических кольцевых каналов для подачи воздуха, внутреннего канала для истечения газа и пневматической форсунки. В периферийном канале для истечения воздуха установлены лопаточные завихрители В горелке, имеющей один подвод воздуха, выполнен регулирующий шибер, при помощи которого можно перераспределять воздух между центральным трактом, в котором установлен завихритель, и периферийным прямоструйным каналом. Этот тип горелок выполнен с нако-

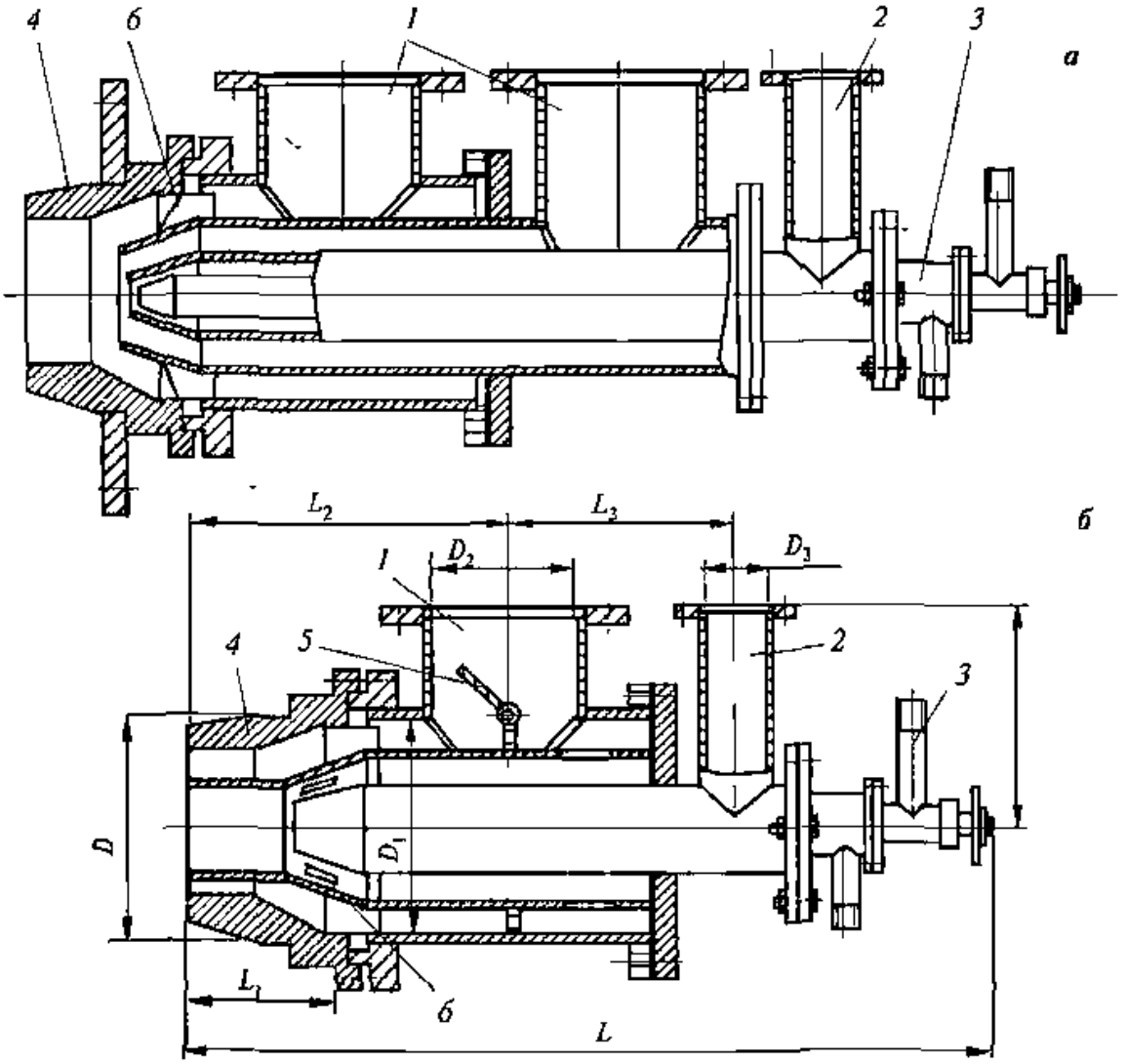


Рис. 9.14 Газомазутные горелки ГМР:
а — с двойным подводом воздуха; *б* — с регулирующим шибером; *1* — подвод воздуха; *2* — подвод газа, *3* — форсунка, *4* — наконечник; *5* — шибер; *6* — завихритель воздуха

нечниками различной длины. Основные размеры горелок ГМР с регулирующим шибером приведены в табл. 9.8

Технические характеристики испытанных ГИЦ ГУ горелок ГМР с регулируемым шибером приведены в табл. 9 9

Технические характеристики горелок с двойным подводом воздуха, испытанных ГИЦ ГУ, приведены в табл. 9.10.

Таблица 9.8

Основные размеры (мм) горелок ГМР (рис. 9.14, б)

Типоразмер	Тепловая мощность, МВт	Размер, мм									Масса, кг
		D	D_1	D_2	D_3	L	L_1	L_2	L_3	H	
ГМР-50-1	0,5	170	159	125	40	765	55	200	200	172	50
ГМР-50-2	0,5	170	159	125	40	1000	287	435	200	172	60
ГМР-100-1	1,0	220	219	150	50	850	60	245	235	200	80
ГМР-100-2	1,0	220	219	150	50	1080	292	416	235	200	105
ГМР-150-1	1,5	273	273	200	65	920	65	200	260	270	115
ГМР-150-2	1,5	273	273	200	65	1150	292	507	260	270	139
ГМР-300	3,0	360	–	250	150	1545	200	450	380	350	178
ГМР-500	5,0	435	–	325	150	1575	200	500	380	450	226
ГМР-700	7,0	505	–	325	150	1715	200	540	450	450	283
ГМР-1000	10,0	530	530	325	150	1600	175	550	450	450	385

Таблица 9.9

Технические характеристики горелок ГМР (рис. 9.14, б)

Параметры	Размерность	ГМР-50-2		ГМР-100-2		ГМР-150-2		ГМР-1000В	
		длинный факел	короткий факел	длинный факел	короткий факел	длинный факел	короткий факел	длинный факел	короткий факел
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
При работе на газе:									
Номинальная тепловая мощность	МВт	0,507	0,507	1,050	1,050	1,529	1,529	10,0	10,0
Номинальный расход газа	м³/ч	50	50	104	104	150	150	1000	1000
Номинальное давление газа	кПа	2,06	1,86	3,43	2,79	4,12	4,26	3,90	3,90
Номинальный расход воздуха	м³/ч	500	510	1000	1050	1530	1530	10000	10000
Номинальное даваение воздуха	кПа	2,45	2,94	3,14	3,82	2,35	3,82	3,90	3,90
Минимально необходимый коэффициент расхода воздуха	–	1,07	1,06	1,07	1,04	1,07	1,05	1,04	1,04
Минимальная тепловая мощность	МВт	0,110	0,121	0,170	0,140	0,290	0,304	2,0	2,0
Коэффициент рабочего регулирования	–	4,5	4,2	6,2	7,5	5,3	5,0	5,0	5,0
Длина факела	мм	1090	480	1740	780	3400	1500	4500	2250
Отношение длин "длинного" и "короткого" факелов	–	2,3		2,2		2,3		2,0	
При работе на мазуте									
Номинальная тепловая мощность	МВт	0,498	0,498	1,080	1,080	1,465	1,465	10,0	10,0
Номинальный расход мазута	кг/ч	42	42	92	92	124	124	950	950
Номинальное давление мазута	кПа	45,08	45,08	41,16	41,16	29,4	29,4	98,0	98,0
Температура подогрева мазута	К	353	353	353	353	353	353	353	353
Номинальный расход вентиляторного воздуха	м³/ч	471	471	937	1004	1429	1429	10000	10000

Продолжение табл. 9.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номинальное давление вентиляторного воздуха	кПа	2,94	3,58	3,82	5,19	3,23	4,41	3,90	3,90
Номинальный расход распылителя (сжатого воздуха)	м³/ч	33	33	92	92	98	98	1000	1000
Номинальное давление распылителя	кПа	59,29	59,29	80,36	80,36	107,8	107,8	196,0	196,0
Минимально необходимый коэффициент расхода воздуха	–	1,06	1,06	1,09	1,11	1,10	1,11	1,15	1,15
Минимальная тепловая мощность	МВт	0,119	0,140	0,152	0,131	0,473	0,473	–	–
Коэффициент рабочего регулирования	–	4,2	3,6	7,1	8,2	3,1	3,1	4,0	4,0
Длина факела	мм	1050	650	1600	800	3050	1600	5000	3330
Отношение длин "длинного" и "*короткого*" факелов	–	1,6		2,0		1,9		1,5	

Таблица 9.10

Тенические характеристики горелок ГМР (рис. 9.14, *а*)

Параметр	Размерность	ГМР-50	ГМР-200
Номинальная тепловая мощность	МВт	0,5	2,0
Расход газа	м³/ч	50	200
Номинальное давление газа	кПа	5,0	4,7
Номинальное давление воздуха для:	кПа		
длинного факела			5,4
короткого факела			6,4
Коэффициент расхода воздуха при номинальной тепловой мощности для	–		
длинного факела		1,07	1,06
короткого факела		1,05	1,1
Диапазон регулирования по давлению газа	кПа	0,25–5,0	0,2–4,7
Коэффициент рабочего регулирования		4,5	4,85
Абсолютная длина факела.	м		
длинного		0,7	4,0
короткого		0,5	2,0

9.7. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГАЗОМАЗУТНЫЕ ГОРЕЛКИ ВНИИМТ

Горелки предназначены для сжигания природного газа и мазута с целью получения продуктов сгорания с температурой от 400 до 800 °С. Общий вид горелок показан на рис. 9.15, а технические и конструктивные характеристики приведены в табл. 9.11.

Горелки рассчитаны на сжигание топлива с воздухом, подогретым до 250–300 °С. Горелки допускают раздельное и совместное сжигание газа и мазута. Горелка состоит из корпуса, пламенной трубы с лопаточным завихрителем, газового сопла и мазутной форсунки. Пламенная труба изнутри на части длины футерована хромомагнезитовой огнеупорной массой и имеет *отверстия со стороны выхода продуктов сгорания. Воздух, поступающий в* корпус горелки, разделяется на два потока, один поток проходит через

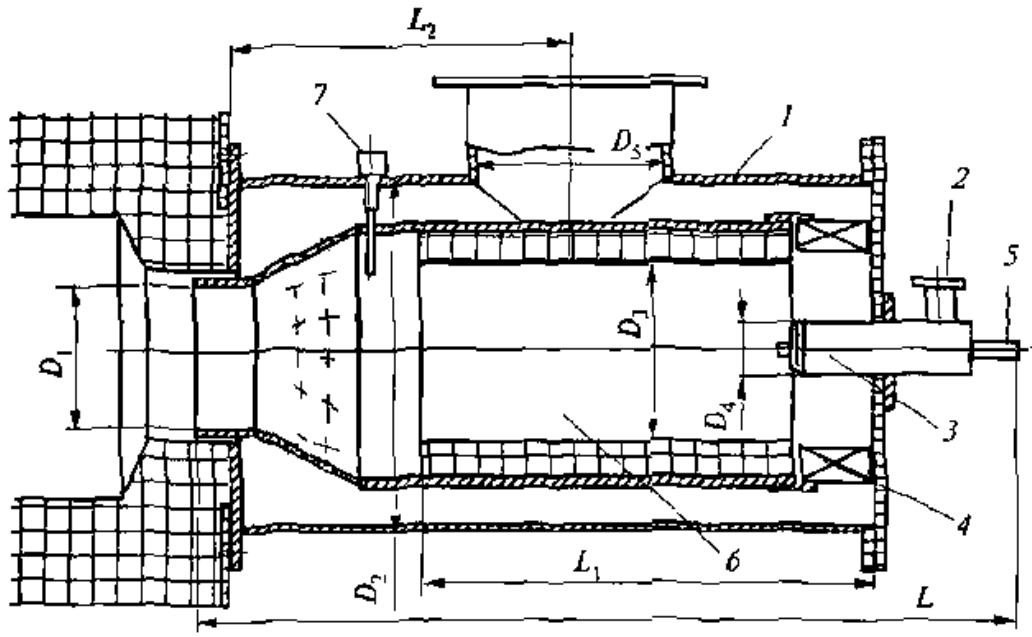


Рис. 9.15. Низкотемпературная газомазутная горелка ВНИИМТ:
1 — корпус; *2* — подвод газа; *3* — газовое сопло; *4* — завихритель; *5* — форсунка; *6* — камера горения; *7* — датчик контроля пламени

Таблица 9.11

Технические и конструктивные характеристики низкотемпературных горелок ВНИИМТ (рис. 9.15)

Параметр и характерный размер	Размерность	Тепловая мощность	
		0,7	2,5
Расход природного газа	м³/ч	70	250
Расход мазута	кг/ч	60	225
Расход воздуха	м³/ч	2000	5200
Давление перед горелкой:	кПа		
газа		14,0	6,0
мазута		250	300
воздуха		2,5	2,0
распылителя (компрессорного воздуха)		300	250
Температура:	°С		
газа		20	20
мазута		120	120
воздуха		350	300
распылителя		50	20
Коэффициент рабочего регулирования		7	–
Коэффициент расхода воздуха номинальный		4,5	2,2
Изменение коэффициента расхода воздуха в диапазоне рабочего регулирования		4–15	–
Характерный размер:	мм		
D_1		325	400
D_2		535	685
D_3		290	460
D_4		76	108
D_5		315	400
L_1		600	970
L_2		400	500
L		1225	1680

завихритель в пламенную трубу, где, взаимодействуя с топливом, обеспечивает его сгорание с $\alpha \approx 1{,}3$. Другой поток проникает через отверстия в пламенной трубе внутрь ее, а также через кольцевой зазор между трубой и торцовым фланцем в туннель. Смешиваясь с продуктами сгорания, этот воздух обеспечивает снижение их температуры до требуемого уровня.

Газ и мазут подаются в зону смешения так же, как и в вихревой горелке ВНИИМТ (рис. 9.12). При сжигани топлива внутри пламенной трубы развивается интенсивный вихревой факел с высокоскоростной зоной осевого возвратного течения. *Это позволяет при работе даже на мазуте вводить* топливо вдоль оси горелки без опасения иметь химический недожог в продуктах сгорания.

9.8. ГОРЕЛКА ГАЗОМАЗУТНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ГКА-100

Комбинированная акустическая горелка разработана Мосгазпроектом для топок котлов. Общий вид горелки показан на рис. 9.16, а техническая характеристика приведена в табл. 9.12.

Газомазутная акустическая горелка ГКА-100 состоит из корпуса, газоподводящей трубы, мазутоподводящей трубы, лопаточного завихрителя воздуха, камеры дробления и стержневого излучателя с обращенным соплом, создающим ультразвуковые колебания. В газоподводящую трубу при работе на мазуте подается распыливающий агент [2].

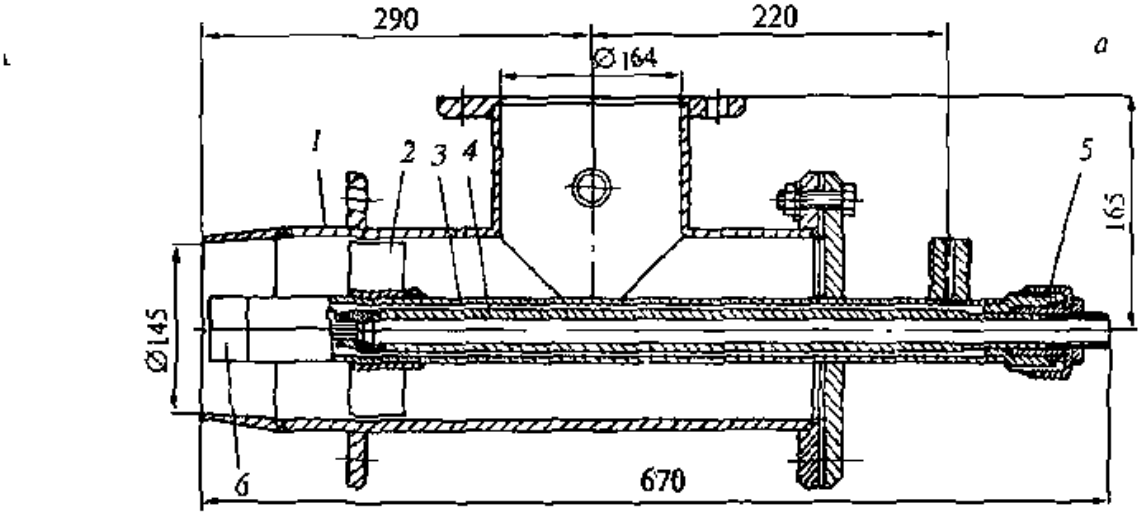
Газ, проходя по газоподводящей трубе, попадает в стержневой излучатель и распределяется через 24 отверстия диаметром 2,7 мм в воздушный *поток, который закручивается с помощью аксиального лопаточного завих*рителя.

При работе на мазуте интенсивное дробление его происходит в специальной камере, в которую с помощью стержневого излучателя с обращенным соплом, создающим ультразвуковые колебания, подводится высокоскоростной поток распыливающего агента Мазут в камеру дробления подается потоком, закрученным в винтовой вставке. При этом обеспечивается равномерное распределение мазута по сечению камеры. Диспергированный мазут поступает в зону горения через ряд отверстий в торцевой поверхности камеры дробления.

Излучатель имеет специальный профилированный стержень, позволяющий получить широкий диапазон колебаний по даалению воздуха от 29,4 до 294 кПа Акустическая мощность излучателя при номинальной нагрузке 120 Вт, частота колебаний — 11 кГц.

Акустические характеристики излучателя зависят от размеров резонирующей камеры h и $d_р$, диаметра сопла $d_с$, диаметров стержня $d_{ст1}$, $d_{ст2}$ *и линейных размеров* l *и* l_1, обозначенных *на рис. 9.16, б.*

Горелка позволяет осуществлять совместное сжигание газа и мазута. В этом случае газ является распыливающим агентом.



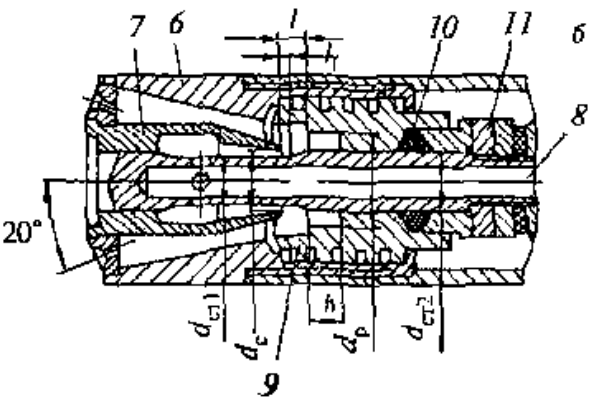


Рис 9 16. Акустическая газомазутная горелка ГКА-100.
а — общий вид горелки, *б* — излучатель; *1* — воздушный корпус, *2* — завихритель; *3* — труба подачи жидкого топлива, *4* — труба подачи распылителя (газа); *5* — уплотнительный узел; *6* — корпус излучателя; *7* — обращенное сопло; *8* — полый стержень; *9* — резонатор с многозаходовым винтом; *10* — сальник; *11* — контргайки

Таблица 9.12

Технические характеристики газомазутной горелки ГКА-100 (рис. 9.16)

Параметр	Размерность	При сжигании газа	При сжигании мазута
Номинальная тепловая мощность	МВт	0,99	1,22
Расход природного газа	м³/ч	104	—
Расход мазута	кг/ч	—	101
Давление топлива	кПа	245	49
Расход воздуха	м³/ч	1030	1051
Давление воздуха	кПа	1,18	1,5
Расход распылителя (сжатого воздуха)	м³/ч	—	29,9
Давление распылителя	МПа	—	0,2
Коэффициент расхода воздуха		1,01	1,02
Диапазон регулирования по:			
расходу газа	м³/ч	19,8–104	—
расходу мазута	кг/ч	—	19,8–101
давлению топлива	кПа	19,6–245	9,8–49
расходу воздуха	м³/ч	209–1030	1205–1051
давлению воздуха	кПа	0,05–1,18	0,05–1,5
Коэффициент рабочего регулирования		5,3	5,0
Длина факела	м	1,16	1,9

9.9. ГОРЕЛКА ТЕПЛОПРОЕКТА ГМП

Горелка предназначена для раздельного сжигания природного газа и мазута, подогретого до температуры не менее 80 °С. Общий вид горелки показан на рис. 9.17, основные конструктивные параметры приведены в табл. 9.13, а технические характеристики, полученные при испытании в ГИЦ ГУ в табл. 9.14.

Горелки ГМП-2 и ГМП-3 состоят из воздухоподводящего корпуса с жаростойким насадком, мазутного сопла, трубопроводов первичного воздуха и газа

При работе на газе газ поступает по трубопроводу первичного воздуха, проходит через четырехходовой винт, смешивается с воздухом в насадке и поступает в туннель.

При работе на мазуте топливо поступает в мазутное сопло, распыляется на выходе из сопла закрученным потоком первичного воздуха и смешивается со вторичным воздухом в насадке.

Таблица 9.13

Конструктивные характеристики горелок Теплопроекта ГМП (рис. 9.17)

Характерный размер, мм	Типоразмер горелки	
	ГМП-2	ГМП-3
D_1	40	50
D_2	71	106
D_3	15	15
D_4	3	3
D_5	12,6	19,6
D_6	40,7	64,5
D_7	140	175
L	418	480

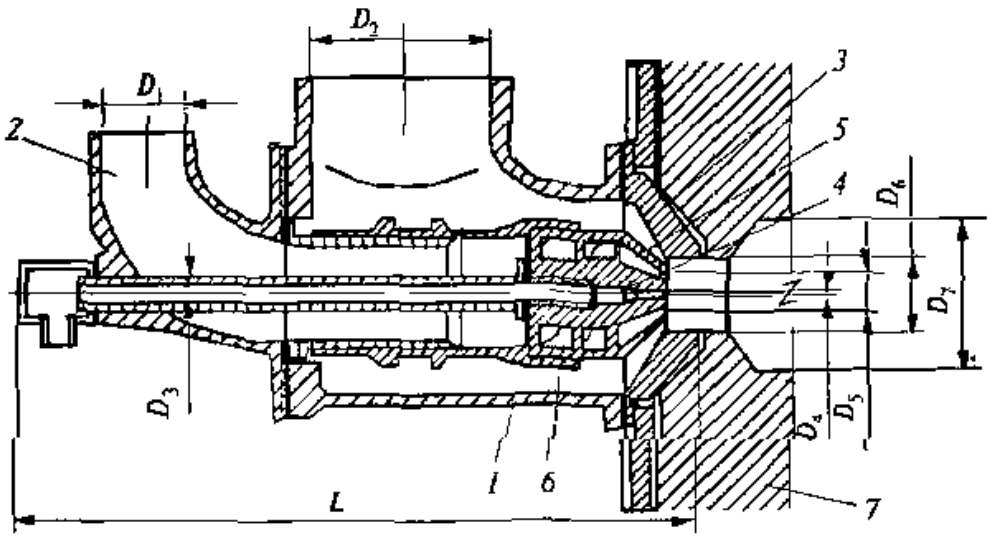


Рис 9.17. Горелка Теплопроекта ГМП:
1 — воздушный корпус; *2* — подвод газа (распылителя); *3* — насадок; *4* — мазутное сопло, *5* — газовое сопло, *6* — завихритель; *7* — туннель

Таблица 9.14

Технические характеристики горелок Теплопроекта типа ГМП (рис. 9.17)

Параметр	Размерность	Типоразмер горелки	
		ГМП-2	ГМ-3
Номинальная тепловая мощность	МВт	0,215	0,59
Показатели при работе на газе			
Расход газа	м³/ч	21,5	58
Давление газа	кПа	3,34	5,59
Расход воздуха	м³/ч	215	575
Давление воздуха	кПа	1,96	6,86
Коэффициент избытка воздуха	–	1,03	1,04
Диапазон рабочего регулирования:			
по расходу газа	м³/ч	3,7–21,5	8–58
по давлению газа	кПа	0,098–3,34	0,098–5,59
по расходу воздуха	м³/ч	35–215	80–575
по давлению воздуха	кПа	0,019–1,96	0,019–6,86
Коэффициент рабочего регулирования	–	5,8	7,2
Длина факела	м	0,52	0,79
Показатели при работе на мазуте М 100			
Расход мазута	кг/ч	18,3	49,5
Давление мазута	кПа	9,8	13,25
Расход вторичного воздуха	м³/ч	139	552
Давление вторичного воздуха	кПа	6,56	6,56
Расход первичного воздуха	м³/ч	23	55
Давление первичного воздуха	кПа	5,2	9,31
Коэффициент расхода воздуха	–	1,05	1,04
Коэффициент рабочего регулирования	–	6,1	5,2
Длина факела	м	0,43	0,74

9.10. ВИХРЕВЫЕ ГАЗОМАЗУТНЫЕ ГОРЕЛКИ ВНИИМТ-УРАЛМАШ

Вихревые горелки разработаны ВНИИМТ и ПО «Уралмаш» для сжигания природного газа и мазута в горнах обжиговых конвейерных машин. Общий вид горелок показан на рис 9.18, а технические и конструктивные характеристики приведены в табл. 9.15.

Горелка состоит из воздушного корпуса, выполненного с внутренней тепловой изоляцией, имеющего входной патрубок с сечением прямоугольной формы У входного торца воздушного корпуса установлен завихритель с тангенциально расположенными лопатками. По оси горелки установлена центральная труба, в которую в зависимости от вида сжигаемого топлива помещают либо газовую трубу с наконечником, либо мазутную форсунку.

В горелке при сжигании газа предусмотрены два варианта газовых сопел. В варианте, показанном на рис. 9 18, газовый наконечник имеет сплошную кольцевую щель для выхода газа по радиусу входного сечения горелочной амбразуры. Торец газового сопла, обращенный в сторону топки, защищен огнеупорной обмазкой Возможна установка газового сопла, выполненного аналогично соплам газовой комбинированной горелки (см. рис. 9.12). В последнем случае облегчается настройка режима сжигания, так как возможно изменять угол встречи струй газа с вихревым потоком воздуха путем замены наконечника.

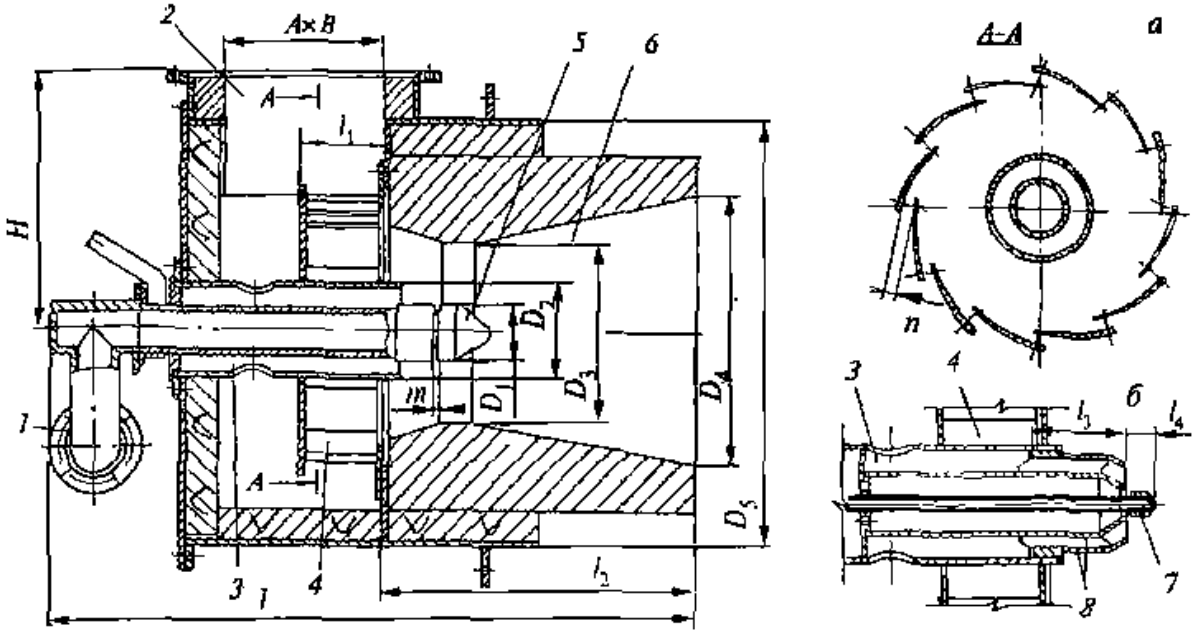


Рис. 9.18. Вихревая газомазутная горелка ВНИИМТ-Уралмаш.
а — общий вид горелки с газовым соплом, *б* — горелочный узел с пневматической форсункой; *1* — подвод газа; *2* — подвод воздуха: *3* — центральная труба; *4* — завихритель; *5* — наконечник; *6* — горелочный туннель; *7* — форсунка; *8* — втулка;

При переводе горелки на сжигание мазута вся газовая часть демонтируется и в центральную трубу устанавливается пневматическая форсунка, конструкция которой показана на рис. 8.11. Для предотвращения перегрева форсунки при работе и коксования ее проходного тракта она обдувается воздухом, который через кольцевой канал, образованный двумя втулками, подводится к ее выходному наконечнику.

Средства розжига и контроля пламени устанавливаются на торцевом съемном фланце горелки.

В горнах обжиговых машин горелки устанавливаются в специальных камерах сгорания (форкамерах), в которые подается дополнительный воздух, предварительно подогретый до 800–1100 °С путем фильтрации его через слой обожженного материала. Таким образом сжигание топлива происходит в две стадии: при смешении топлива с первичным воздухом, нагнетаемым в горелку, и затем на выходе из горелочного туннеля при подмешивании вторичного воздуха. Поэтому характеристики факела зависят от коэффициента расхода первичного воздуха $\alpha_{пер}$, определяющего степень предварительного перемешивания в туннеле, и суммарного коэффициента расхода воздуха, определяющего интенсивность выгорания топлива по длине форкамеры.

Изменение химического недожога по длине факела горелки тепловой мощностью 0,5 МВт при температуре вторичного воздуха 800 °С показано на рис 9.19. При сжигании газа в горелке было установлено сопло с кольцевой щелью для истечения топлива. При сжигании мазута распыливание топлива осуществлялось пневматической форсункой ВНИИМТ. Обращают на себя внимание приближенно одинаковые количественные показатели не-

Таблица 9.15

Технические и конструктивные характеристики вихревых газомазутных горелок ВНИИМТ-Уралмаш (рис. 9.18)

Параметр и характерный размер	Размерность	Тепловая мощность, МВт	
		0,5	6,5
Расход газа номинальный	$м^3/ч$	50,0	650
Расход мазута	кг/ч	46,0	575
Расход воздуха	$м^3/ч$	500	6850
Расход распылителя (компрессорного воздуха)	кг/ч	17,0	380
Давление газа	кПа	25	18,5
Давление воздуха	кПа	3,5	3,0
Давление мазута	МПа	0,15	0,3
Давление распылителя	МПа	0,3	0,3
Коэффициент расхода воздуха	–	1,08	1,1
Диапазон изменения коэффициента расхода воздуха	–	0,75–1,36	1,1–2,5
Коэффициент рабочего регулирования	–	6,0	8,0
Характерный размер:	мм		
D_1		35	135
D_2		60	219
D_3		105	420
D_4		160	630
D_5		225	1020
l_1		50	200
l_2		200	780
l_3		60	230
l_4		15	60
l		360	1500
H		245	620
A		95	380
B		158	630
n		5,5	22
m		0,75	3

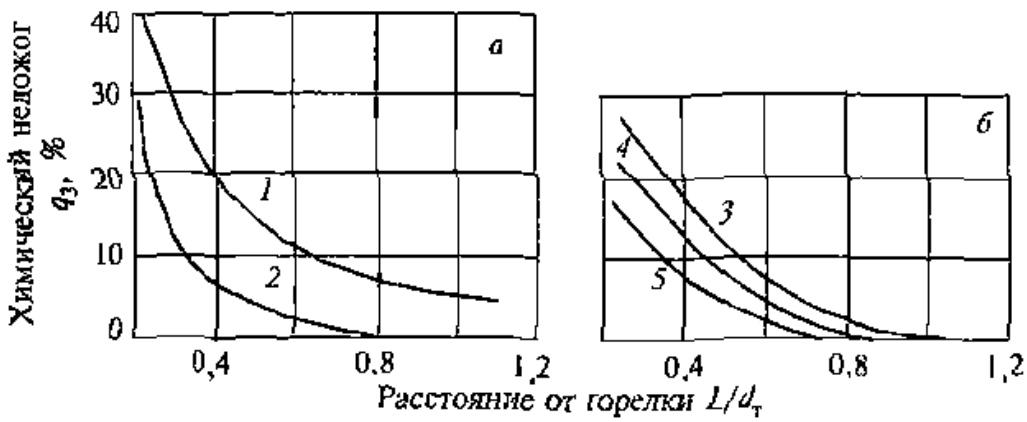


Рис 9.19. Изменение химического недожога по оси факела горелки тепловой мощностью 0,5 МВт.

а — при сжигании природного газа, *б* — при сжигании мазута. *1* — $\alpha_{пер} = 0,74$, $\alpha_{сум} = 2,62$; *2* — $\alpha_{пер} = 1,08$, $\alpha_{сум} = 2,65$; *3* — $\alpha_{пер} = 0,7$, $\alpha_{сум} = 2,5$, *4* — $\alpha_{пер} = 1,0$, $\alpha_{сум} = 3,4$; *5* — $\alpha_{пер} = 1,23$, $\alpha_{сум} = 3,4$

дожога по длине факела независимо от вида топлива. Это достигается благодаря высокой интенсивности распыливания мазута пневматическими форсунками и более высокой интенсивности перемешивания скоростных струй мазутовоздушного аэрозоля как с первичным, так и со вторичным воздухом.

9.11. МАЗУТНАЯ ГОРЕЛКА УРАЛМАШ-ВНИИМТ

Горелка разработана для отопления мазутом крупных обжиговых машин с переточным коллектором.

Общий вид горелки показан на рис. 9.20, а техническая характеристика приведена в табл. 9.16. Конструктивно горелка выполнена по типу горелок для топок котлов и имеет корпус с улиточным вводом воздуха и перегородкой, разделяющей горелку на два канала. Внутри каналов имеются поворотные лопатки, позволяющие изменять степень крутки центрального и периферийного воздушных потоков.

Выходные участки воздушных каналов горелки имеют цилиндрическую форму. Торцевая стенка горелки выполнена съемной и теплоизолированной. Она имеет отверстия для установки направляющей трубы форсунки, электрического запальника, фотодатчика наличия пламени и смотровое отверстие. На ней расположены также рукоятки приводов воздушных завихрителей и механизмы перемещения форсунки и запальника. Электрический или пневматический привод обеспечивает перемещение форсунки и запальника в рабочее положение и вывод из него при отключении подачи топлива.

Направляющая труба форсунки на входном конце имеет узел крепления и патрубок для подвода охлаждающего воздуха. На выходном конце трубы закреплен конусный перфорированный стабилизатор с прорезью для прохода запальника. Горелка

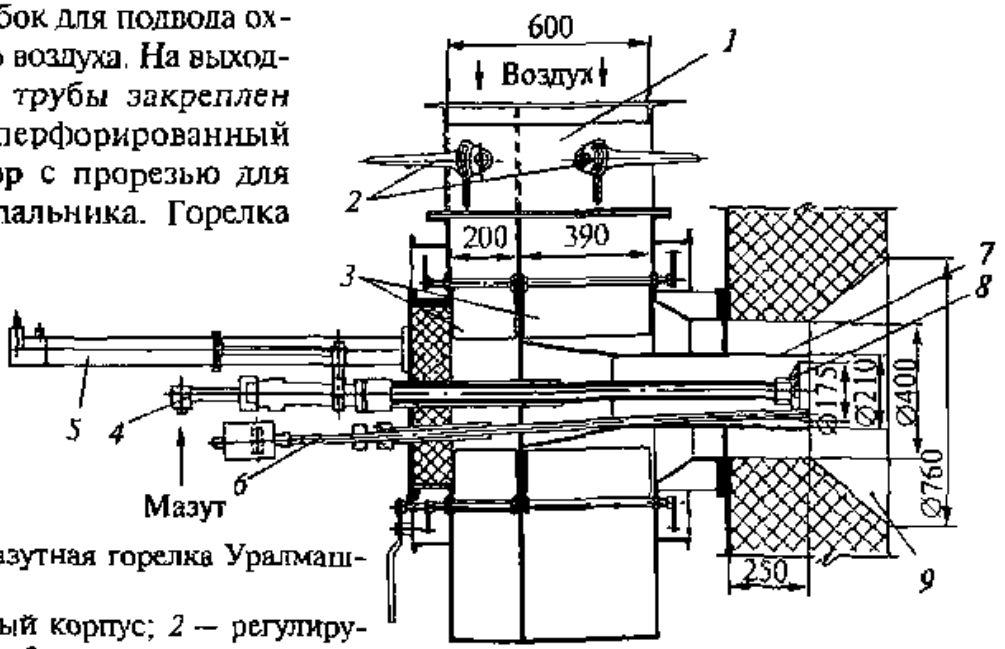


Рис. 9.20. Мазутная горелка Уралмаш-ВНИИМТ:
1 — улиточный корпус; *2* — регулирующий шибер; *3* — завихритель воздуха; *4* — форсунка; *5* — пневмопривод; *6* — электрозапальник; *7* — выходной наконечник; *8* — стабилизатор; *9* — горелочная амбразура

Таблица 9.16

Технические характеристики мазутной горелки Уралмаш-ВНИИМТ (рис. 9.20)

Параметр	Размерность	Величина
Номинальная тепловая мощность	МВт	8,9
Расход мазута	кг/ч	800
Давление мазута перед горелкой	МПа	3,0
Температура мазута	°С	150
Расход воздуха	$м^3/ч$	9330
Температура воздуха	°С	300
Давление воздуха перед горелкой	кПа	4,0
Диапазон регулирования расхода мазута при:		
растопочном наконечнике	кг/ч	40–200
при основом наконечнике	кг/ч	200–800
Коэффициент расхода воздуха (номинальный)	–	1,1
Коэффициент рабочего регулирования	–	4,0
Длина факела,		
вихревого	м	3.0
прямоструйного	м	8,0

имеет центробежную форсунку высокого дааления с обратным слином (см. рис. 8.22)

Форсунка имеет съемные наконечники, предназначенные для работы на номинальной нагрузке (Ø 3,4 мм) и для работы в растопочном режиме (Ø 1,8 мм).

Горелочный туннель выполнен с углом раскрытия $2\alpha = 80°$.

Исследования мазутного факела, выполненные на обжиговой машине с тележкой шириной 4 м при сжигании топлива в форкамере диаметром 1,8 м и длиной около 3,0 м, показали, что аэродинамические характеристики факела существенно зависят от крутки как центрального, так и периферийного воздушных потоков.

При истечении обоих потоков без закрутки или при закручивании только центрального потока наблюдается прямоструйный факел с максимальными скоростями в центре форкамеры и с развитой периферийной зоной обратных токов. Границы факела при этом прямолинейны и угол раскрытия составляет около 24 град (рис. 9 21, *а*). При увеличении крутки периферийного потока воздуха факел значительно расширяется, угол раскрытия его достигает 100 град и появляется внутренняя зона рециркуляции, величина которой определяется степенью крутки центрального потока (рис. 9.21, *б* и *в*).

Степенью крутки 100 % обозначен максимальный угол поворота лопаток тангенциального завихрителя.

При изменении степени крутки обоих потоков существенно меняются температура и характер выгорания топлив. При отсутствии крутки воздуха и расходе мазута *около 600 кг/ч наблюдается растянутое горение и факел* достигает длины около 8 м. Наличие крутки воздуха приводит к ускорению выгорания и сокращению длины факела. При максимальной крутке пер-

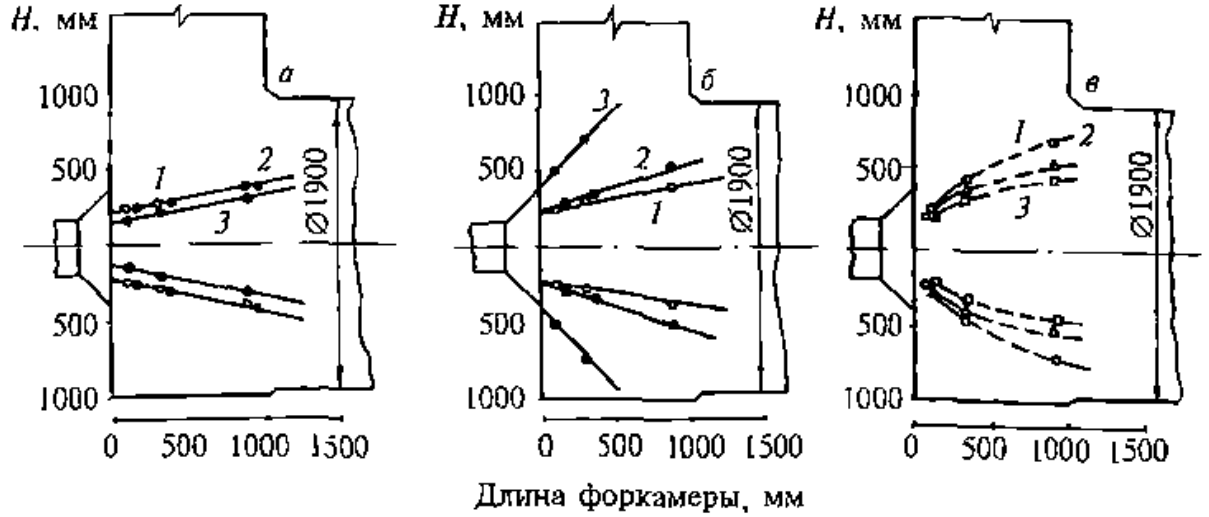


Рис. 9.21. Аэродинамические границы факела мазутной горелки (рис. 9.20):
а — наружные границы прямоструйного факела (*1* — при истечении обоих потоков без закрутки; *2* — при максимальной крутке центрального потока, *3* — закрученный поток, вытекающий только из центрального канала); *б* — влияние степени крутки обоих потоков (*1* — без крутки; *2* — крутка 50 %; *3* — крутка 100 %); *в* — влияние крутки центрального потока на границы внутренней зоны циркуляции при крутке периферийного потока 100 % (*1* — крутка 100 %, *2* — крутка 50 %; *3* — без крутки)

вичного воздуха и коэффициенте его расхода около двух горение мазута практически завершается на длине около 3 м в пределах форкамеры. При этом угол раскрытия факела увеличивается до 100 град.

При изменении степени обоих потоков существенно меняются температура и характер выгорания топлив.

При отсутствии крутки воздуха и расходах мазута около 600 кг/ч наблюдается растянутое горение и факел достигает длины около 8,0 м. Наличие крутки воздуха приводит к ускорению выгорания и сокращению длины факела. При максимальной крутке первичного воздуха и коэффициенте его расхода около двух горение мазута практически завершается на длине около 3 м в пределах форкамеры. При этом угол раскрытия факела увеличивается до 100 град.

При интенсивной крутке воздушного потока процессы горения происходят в основном в периферийных зонах факела. На оси факела находится зона циркуляции продуктов неполного горения. Характерное распределение концентраций газов, химического недожога и коэффициента расхода воздуха в сечении вихревого факела показано на рис. 9.22. Изменение температуры в сечениях факела в различных режимах работы горелки показано на рис. 9.23, а по длине факела — на рис. 9.24.

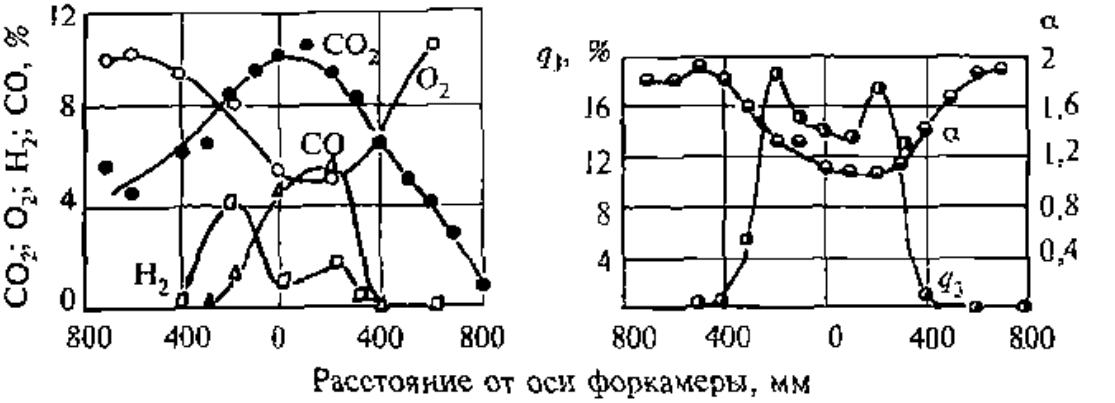


Рис. 9.22. Изменение концентрации газов, химического недожога и коэффициента расхода воздуха в сечении мазутного факела при расходе мазута 540 кг/ч на расстоянии 950 мм от горелки (крутка воздуха 100 %)



Рис. 9.23. Изменение температуры продуктов сгорания по радиусу факела:
а — при изменении степени закрутки воздуха (*1* — 75 %, *2* — 100 %); *б* — при изменении коэффициента расхода воздуха, подаваемого в горелку (*1* — $\alpha = 1{,}15$, *2* — $\alpha = 1{,}5$)



Рис. 9.24. Изменение температуры мазутного факела в форкамере обжиговой машины при расходе топлива 200 кг/ч и различном коэффициенте расхода первичного воздуха: *1* — $\alpha = 1{,}01$; *2* — $\alpha = 1{,}28$; *3* — $\alpha = 1{,}6$; *4* — $\alpha = 2{,}23$

9.12. ГАЗОМАЗУТНЫЕ ГОРЕЛКИ ВОСТ ИО

Газомазутные горелки предназначены для отопления вращающихся трубчатых печей и разработаны в двух вариантах: для совместного сжигания газа и мазута (рис. 9.25, *а*) и для раздельного (рис. 9.25, *б*).

Горелка для совместного сжигания газа и мазута разработана на основе горелки ГВВ. Она предназначена для работы на природном газе и мазуте марок 40–100 с температурой подогрева 90–100° С. Диапазон рабочего регулирования расхода газа от нуля до 4000 м^3/ч, диапазон рабочего регулирования расхода мазута от нуля до 1500 кг/ч. Горелка может работать только на одном природном газе или на смеси газа с мазутом до соотношения 1:1 и содержит внешнюю газовую трубу с патрубком для подвода природного газа. Газовая труба с одного торца заканчивается соплом, с другого торца к ней крепится механизм, служащий для перемещения расширяющегося дросселя. Внутри газовой трубы коаксиально расположена мазутная труба, оканчивающаяся дросселем, в котором выполнены отверстия для выхода мазута. Расположенный с противоположного конца мазутной трубы винтовой регулятор позволяет регулировать расход мазута. Распыливание мазута в этой горелке осуществляется высокоскоростной струей природного газа.

Подводы топлива к горелке выполнены на гибких шлангах.

Горелка для раздельного сжигания топлива (рис 9.25, *б*) позволяет обеспечить отопление печи как на одном природном газе, так и на одном мазуте, а также на их смеси. Отличие данной конструкции горелки от предыдущей заключается в использовании центрального подвода мазута с ме-

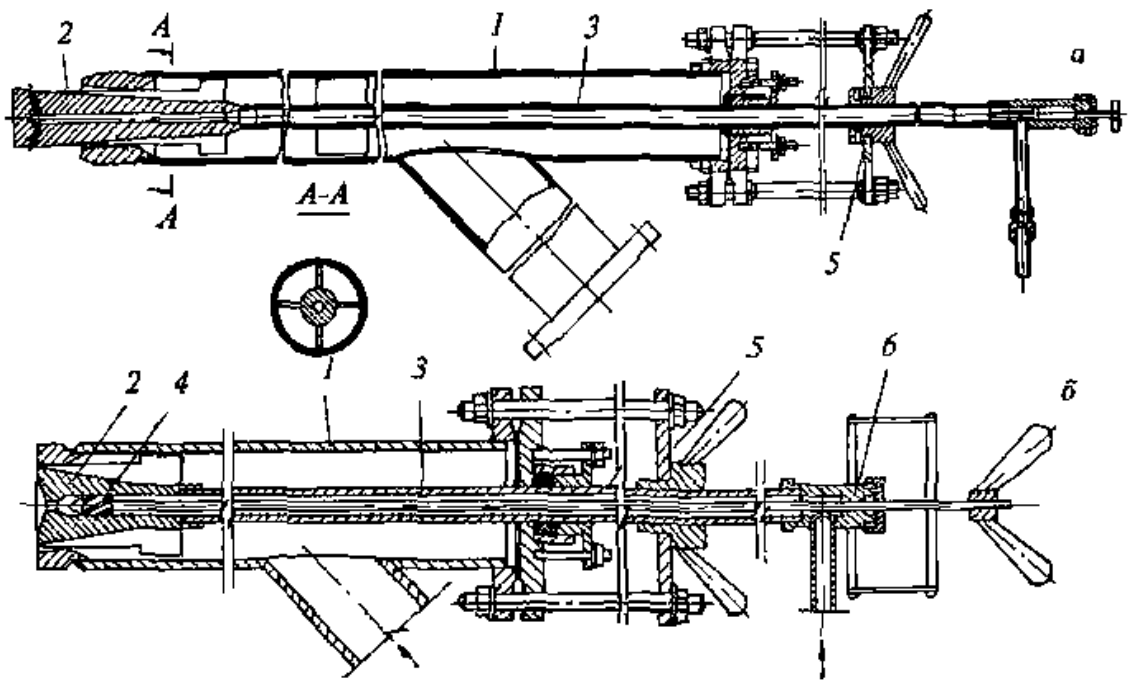


Рис. 9.25. Газомазутные горелки Вост ИО:
а — для совместного сжигания газа и мазута; *б* — для раздельного; *1* — газоподводящий корпус; *2* — дроссель, *3* — мазутная труба; *4* — форсунка; *5* — механизм перемещения дросселя, *6* — механизм перемещения завихрителя форсунки

ханическим распыливанием вместо периферийного подвода с распыливанием природным газом. С этой целью в дросселе вместо периферийных отверстий для выхода мазута выполнено одно центральное отверстие и дополнительно установлены игла с винтовыми канавками и соединенный с ней шток для регулирования положения иглы относительно выходного отверстия мазута.

Подвод и регулирование расхода газа осуществляются так же, как и в первом варианте горелки, а подвод и регулирование расхода мазута, как в форсунках механического распыливания. Диапазон регулирования расхода газа от нуля до 4000 м^3/ч, диапазон регулирования расхода мазута от нуля до 3500 кг/ч.

9.13. ГАЗОМАЗУТНЫЕ ГОРЕЛКИ УГГУ–НПФ «ГОРЕЛОЧНЫЙ ЦЕНТР»

Горелка разработана для отопления мартеновских печей. Для плавильных печей такого типа горелочное устройство является неотъемлемой частью печного агрегата. Воздух для сжигания топлива подводится через головку печи после подогрева в регенераторах. Выходным отверстием топливосжигающего устройства является пламенное окно, перед которым устанавливается топливный узел, размещенный в водоохлаждаемой фурме.

Разработанный топливный узел, являющийся, по существу, газомазутной горелкой, представлен на рис 9.26 Устройство состоит из трех коаксиально расположенных труб, между которыми установлены центрирующие ребра. Центральная труба предназначена для подачи мазута, средняя труба – для распылителя, наружная – для природного газа. На выходной стороне каждая труба заканчивается соплом, обеспечивающим максимальную пропускную способность энергоносителей при заданных давлениях перед горелкой.

В связи с тем, что давление энергоносителей при эксплуатации горелки может отличаться от величин, принятых в расчете, предусмотрено из-

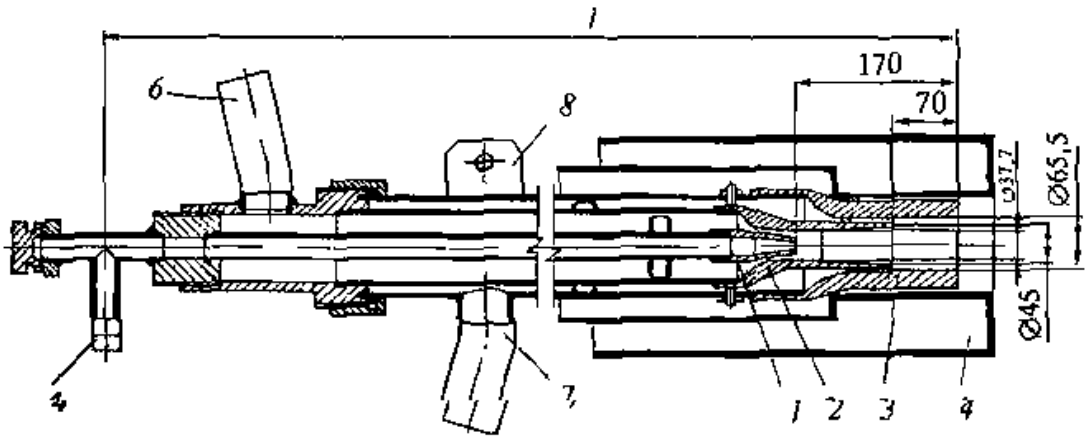


Рис. 9.26 Газомазутная горелка для мартеновской печи УГГУ–НПФ «Горелочный центр» (типа ВВ-25):
1 — мазутное сопло; *2* — сопло распылителя; *3* — газовое сопло; *4* — фурма; *5* — патрубок подвода мазута, *6* — то же, распылителя; *7* — то же, газа; *8* — стопор горелки

менение взаимного расположения сопел Выходные участки сопел для истечения газа и компрессорного воздуха выполнены по типу сопел Лаваля, входные — имеют профиль, обеспечивающий минимальное гидравлическое сопротивление вытекающим средам.

Конструктивное выполнение горелки и соотношение размеров выходных элементов ее сопел позволяет обеспечить постоянство кинетической энергии факела при переменных соотношениях массовых расходов газообразного и жидкого топлива. Независимо от долевого соотношения расходов топлива в тепловой мощности горелки значение относительной удельной кинетической энергии вытекающего потока составляет от 6,5 до 7,4 Вт на кВт тепловой мощности горелки.

При испытании горелки на 60 тонной мартеновской печи получены следующие технические показатели:

номинальная тепловая мощность – 14 МВт,

расходы энергоносителей при номинальной тепловой мощности:

природного газа 745 м^3/ч,

мазута 640 кг/ч;

распылителя 678 кг/ч.

Давление энергоносителей перед горелкой при номинальной тепловой мощности:

природного газа 60 кПа;

мазута 90 кПа,

распылителя 60 кПа;

воздуха для горения (в вертикальном канале печи) 30 Па.

Коэффициент рабочего регулирования – 2,13.

Коэффициент предельного регулирования – 4,00.

При необходимости горелка обеспечивает режим сверхмаксимальной форсировки, применяемый для оперативного воздействия на температуру металла при введении известняка для удаления серы и добавки чугуна для поддержания необходимого содержания углерода. При этом достигнуты параметры:

тепловая мощность 33,1 МВт;

расход природного газа 2350 м^3/ч;

расход мазута 900 кг/ч.

При таком режиме работы горелок обеспечиваются равномерное кипение ванны по всей поверхности металла при поддержании в газовой фазе над ванной слабовосстановительной атмосферы и требуемая скорость нагрева с поддержанием ее в конце доводки на постоянном и максимальном уровне.

9.14. ГАЗОМАЗУТНАЯ ГОРЕЛКА ВНИИМТ ДЛЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Горелка разработана для короткофакельного сжигания природного газа и мазута в отражательных печах. Общий вид горелки показан на рис. 9.27, а техническая характеристика приведена в табл. 9.17.

Горелка состоит из корпуса с тангенциальным патрубком для подвода

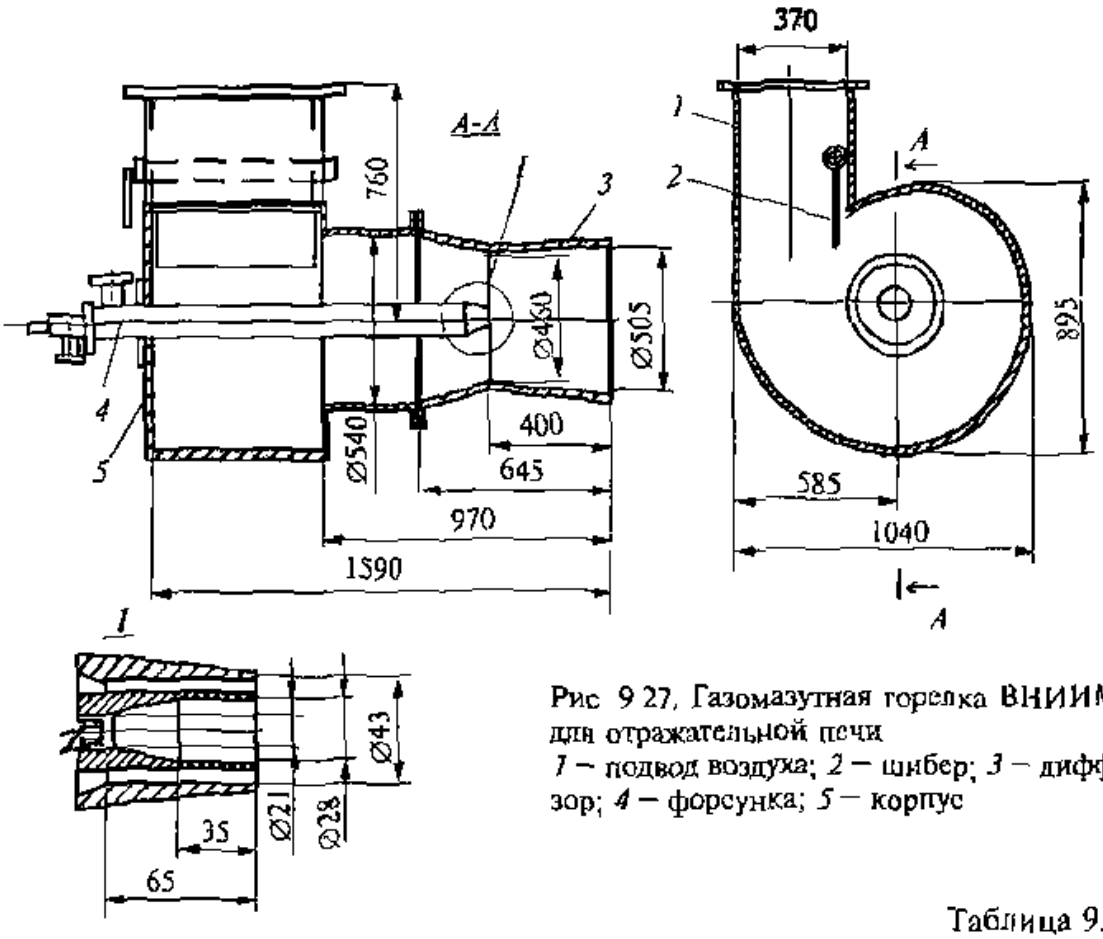


Рис 9 27. Газомазутная горелка ВНИИМТ для отражательной печи
1 – подвод воздуха; *2* – шибер; *3* – диффузор; *4* – форсунка; *5* – корпус

Таблица 9.17

Техническая характеристика горелки ВНИИМТ для отражательной печи (рис. 9.27)

Технические показатели	Размерность	Сжигаемое топливо	
		мазут	газ и мазут
Тепловая мощность	МВт	21,7	20,4
Расход газа	м³/ч	–	1400
Давление газа	МПа	–	0,25
Расход мазута	кг/ч	1800	530
Давление мазута	МПа	0,5	0,25
Температура мазута	°С	95–105	95–105
Расход сжатого воздуха	м³/ч	450	450
Расход основного воздуха	м³/ч	19300	19300
Температура основного воздуха	°С	20	20
Выходная скорость потока из горелки	м/с	35	36
Сопротивление горелки по воздушному тракту	кПа	2,0	2,0

воздуха и газомазутной форсунки. Горелка выполнена сварной из листовой стали. На выходе из горелки установлен диффузор из чугуна, который ограничивает раскрытие факела. В воздухоподводящем патрубке горелки установлен языковый шибер для регулирования степени крутки воздушного потока.

Топливная часть выполнена по типу газомазутных форсунок ДМИ. Она имеет мазутное сопло, встроенное в канал подачи распылителя (сжатого воздуха) и периферийное газовое сопло. Выходной участок газового наконечника выполнен по типу сопла Лаваля.

По данным исследований горелок, установленных на печи, зона высоких температур располагается на расстоянии 4—5 м от горелки [3].

9.15. ГОРЕЛКИ ГМГМ

Горелки этого типа разработаны ЦКТИ и заводом Ильмарине.

Горелка (рис. 9.28, табл. 9.18) состоит из газовоздушной части, паромеханической форсунки, лопаточных завихрителей (регистров) первичного и вторичного воздуха, монтажной плиты и заглушки для закрывания форсуночного канала. Закрутка воздуха в горелке обоими регистрами производится в одну сторону. В зависимости от компоновки применяют завихрители правого или левого вращения. Стабилизатором пламени служит конический керамический туннель.

В горелках ГМГм имеются два ряда газовыпускных отверстий, направленных под углом 90° друг к другу. Отверстия d на боковой поверхности газового насадка выдают газ в закрученный поток вторичного воздуха, отверстия d_1 на торцевой части насадка — в закрученный поток первичного воздуха.

Горелки ГМГм обеспечивают сжигание топлива с $\alpha = 1{,}05$. Подача первичного воздуха в объеме ~ 15 % от общего расхода воздуха на горелку позволяет улучшить смешение газа с воздухом, особенно на малых нагрузках. Во время работы на газе шибер первичного воздуха полностью открыт и его не регулируют.

Розжиг горелки производят при закрытых воздушных шиберах.

Во избежание срыва факела при пуске тепловая мощность горелки не должна превышать 25—50 % от номинальной, а давление газа должно быть больше давления вторичного воздуха. При переходе на жидкое топливо предварительно устанавливают форсунку, подают в нее пар, а затем мазут под давлением 0,2—0,5 МПа. После его воспламенения отключают газ и производят регулировку режима. Для перехода с жидкого на газовое топливо снижают давление мазута до 0,2—0,5 МПа и постепенно подают газ. После воспламенения газа прекращают подачу мазута, устанавливают заланный режим работы на газе, затем удаляют мазутную форсунку и закрывают торцевое отверстие канала заглушкой.

При работе на мазуте в пределах 70—100 % от номинальной тепловой мощности достаточно его механического распыления, а на более низких нагрузках для распыления применяют пар давлением 0,1—0,2 МПа. Расход пара ~0,13 кг/кг. Для распыления не рекомендуется использовать высоковлажный пар и пар с температурой более 200 °С. Угол раскрытия факела 67—75°.

Расходные и регулировочные характеристики горелок ГМГм приведены на рис. 9.29.

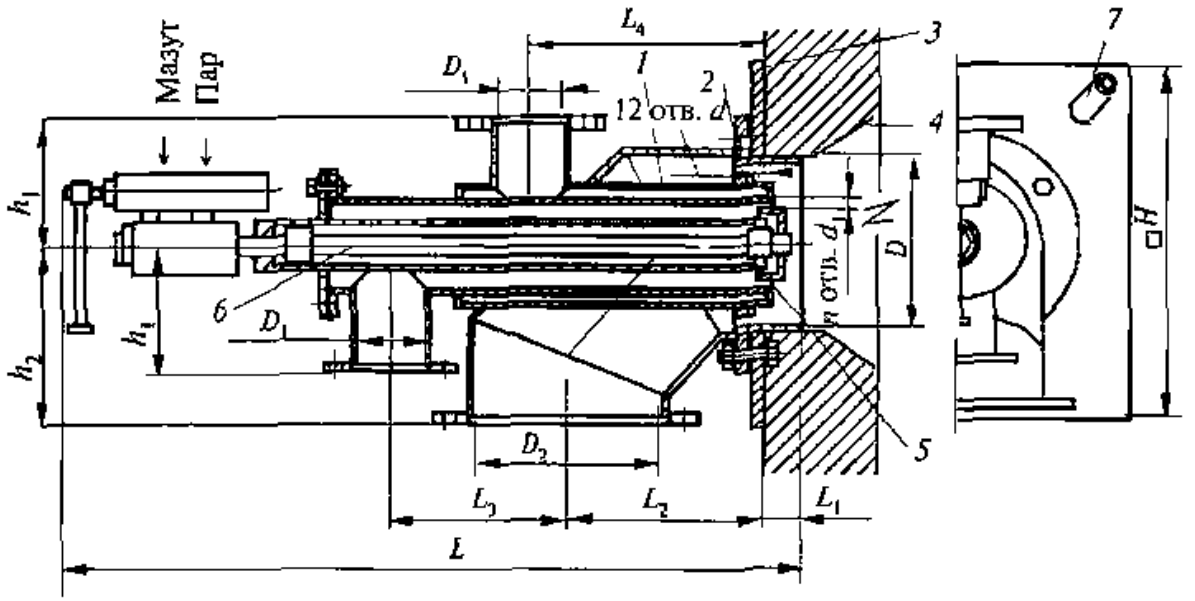


Рис. 9.28. Горелка газомазутная ГМГм:
1 — газовоздушная часть; *2, 5* — лопаточные завихрители вторичного и первичного воздуха; *3* — монтажная плита; *4* — керамический туннель; *6* — паромеханическая форсунка, *7* — стакан для установки ЗЗУ

Таблица 9.18

Основные характеристики горелок ГМГм (рис. 9.28)

Характеристика	ГМГ-1,5м	ГМГ-2м	ГМГ-4м	ГМГ-7м
Номинальная тепловая мощность, МВт	1,85	2,44	4,9	8,2
Номинальный расход газа, м³/ч	185	244	490	820
Номинальное давление:				
газа, кПа	3,5	3,5	3,5	3,5
воздуха первичного, кПа	1,25	1,2	1,2	
воздуха вторичного, кПа	0,75	0,9	0,8	1,1
мазута, МПа	1,25	2,0	2,0	3,0
пара, МПа	0,1–0,15	0,1–0,2		–
Длина факела на мазуте, м	1,1–1,3	1,4–1,6	1,5–2,0	2,0–2,5
Число газовыходных отверстий n диаметром d_1	9	12	12	–
Размеры, мм:				
H	500		600	
D	244	267	374	
D_1	108		159	
D_2	276		375	
L	958		1195	1185
L_1	37	36	52	
L_2	264		375	
L_3	240		318	
L_4	409		428	
h_1	180		235	
h_2	250		360	
d	6,8	8,0	11,5	14,0
d_1	6,5	6,5	8,8	10,0
Масса, кг	70		120	

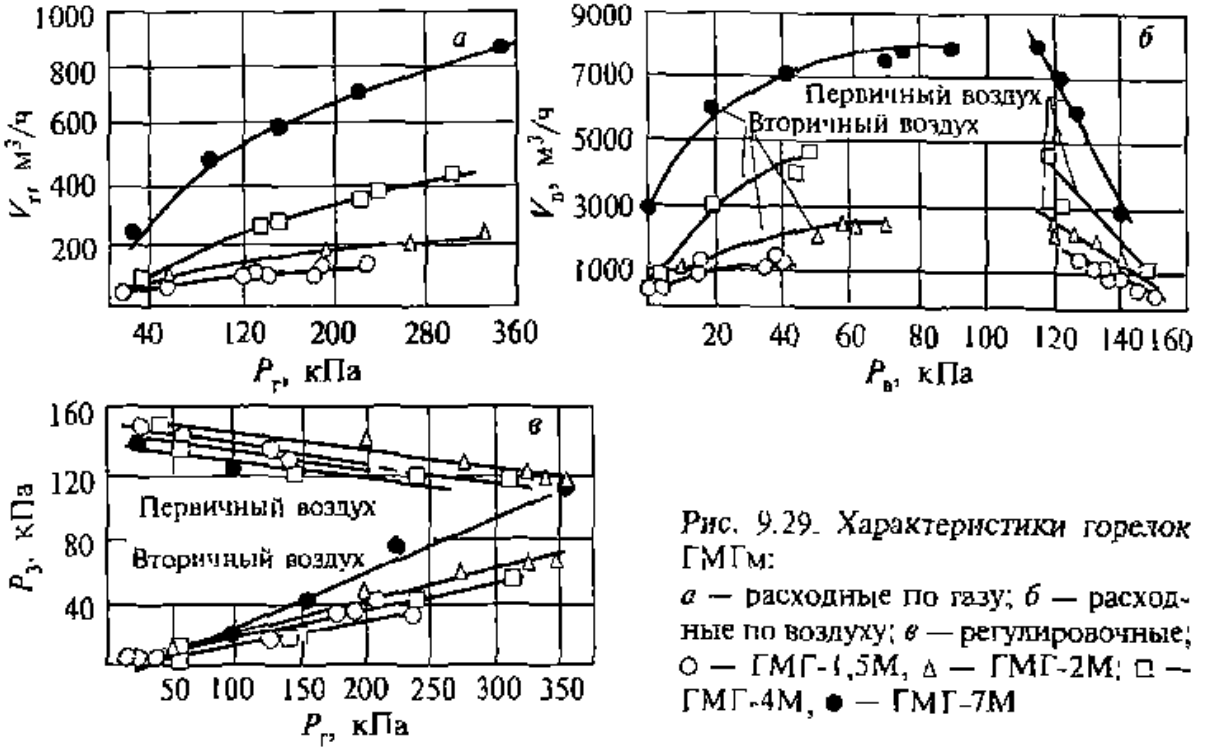


Рис. 9.29. Характеристики горелок ГМГм:
а — расходные по газу; *б* — расходные по воздуху; *в* — регулировочные; ○ — ГМГ-1,5М, △ — ГМГ-2М; □ — ГМГ-4М, ● — ГМГ-7М

9.16. ГАЗОМАЗУТНЫЕ ГОРЕЛКИ ГМГБ

Горелки ГМГБ разработаны ЦКТИ и заводом Ильмарине для топок котлов. Общий вид горелок показан на рис. 9.30, а паспортные данные, составленные по результатам испытаний, приведены в табл. 9.19.

Горелка монтируется на наружной торцевой стенке воздушного короба агрегата, который выполняется общим для нескольких горелок.

Газовая часть горелки состоит из газового ввода и кольцевого коллектора с газовыпускными отверстиями, расположенного у выходного отверстия горелочной амбразуры.

Расходные и регулировочные характеристики горелок ГМГБ приведены на рис. 9.31 и 9.32.

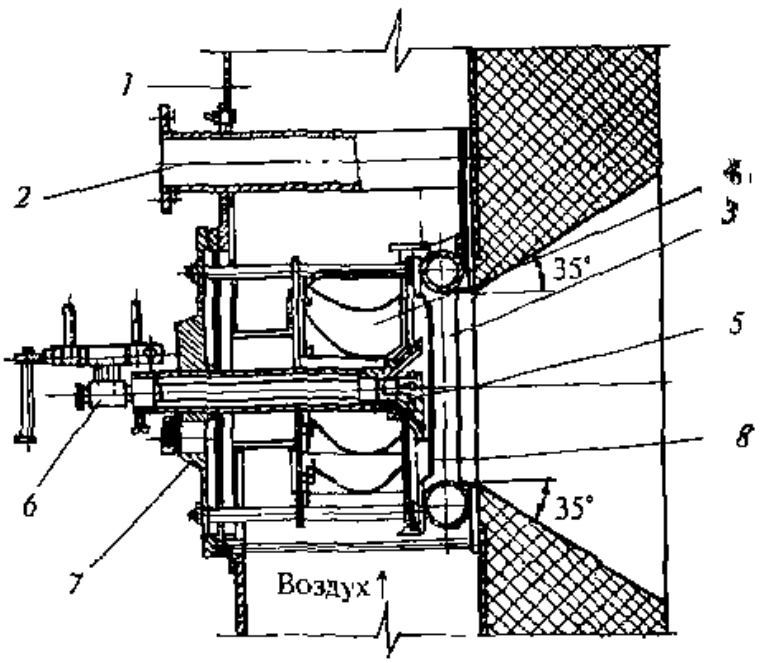


Рис. 9.30. Горелка ГМГБ:
1 — воздушный короб, *2* — газовый ввод; *3* — газовый коллектор, *4* — завихритель воздуха с приводом; *5* — стабилизатор, *6* — форсунка; *7* — откидная крышка; *8* — направляющий конус (пережим)

Таблица 9.19

Паспортные данные горелок ГМГБ

Наименование показателя и размерность	Типоразмер	
	ГМГБ-5,6	ГМГБ-12
Номинальная тепловая мощность, МВт	6,4	14,2
Номинальный расход газа, м³/ч	647	1420
Номинальное давление газа, кПа	4,9	15,5
Номинальное давление воздуха, КПа	1,08	1,20
Номинальный расход мазута, кг/ч	573	1300
Номинальное давление мазута, МПа	2,0	1,4
Коэффициент расхода воздуха при работе на:		
газе	1,1	1,05
мазуте		1,1
Коэффициент рабочего регулирования при работе на:		
газе	3,1	10
мазуте		6,66

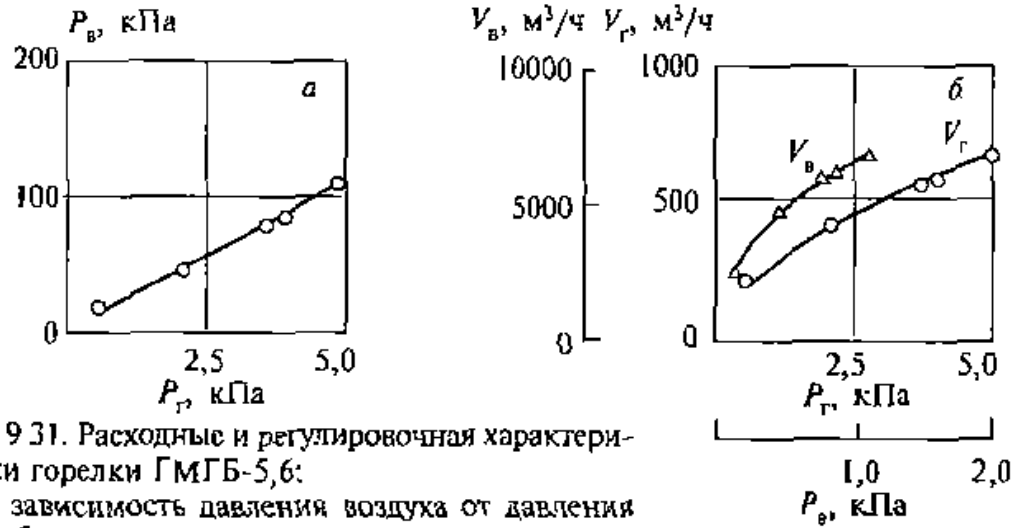


Рис. 9.31. Расходные и регулировочная характеристики горелки ГМГБ-5,6:
а — зависимость давления воздуха от давления газа; *б* — зависимость расходов газа и воздуха от их давления

Завихритель воздуха представляет собой набор профилированных лопастей, имеющих общий привод и смонтированных в виде блока на откидной крышке горелки, закрывающей люк в стенке воздушного короба. На этой же крышке на шпильках установлен направляющий воздушный конус (пережим).

На оси горелки в направляющей трубе, оканчивающейся стабилизатором, устанавливается мазутная форсунка. Стабилизатор выполнен в виде конуса с прорезями для прохода воздуха в его застойную зону.

При сжигании мазута стабилизатор вместе с форсункой устанавливается на уровне пережима или выдвигается вперед не более чем на 60 мм.

При работе на газе стабилизатор с форсункой убираются за пределы лопаточного завихрителя.

Горелка удобна в эксплуатации, так как при ее обслуживании не требуется демонтаж основных элементов. Доступ к внутренним частям горелки обеспечивается при открытии ее откидной крышки.

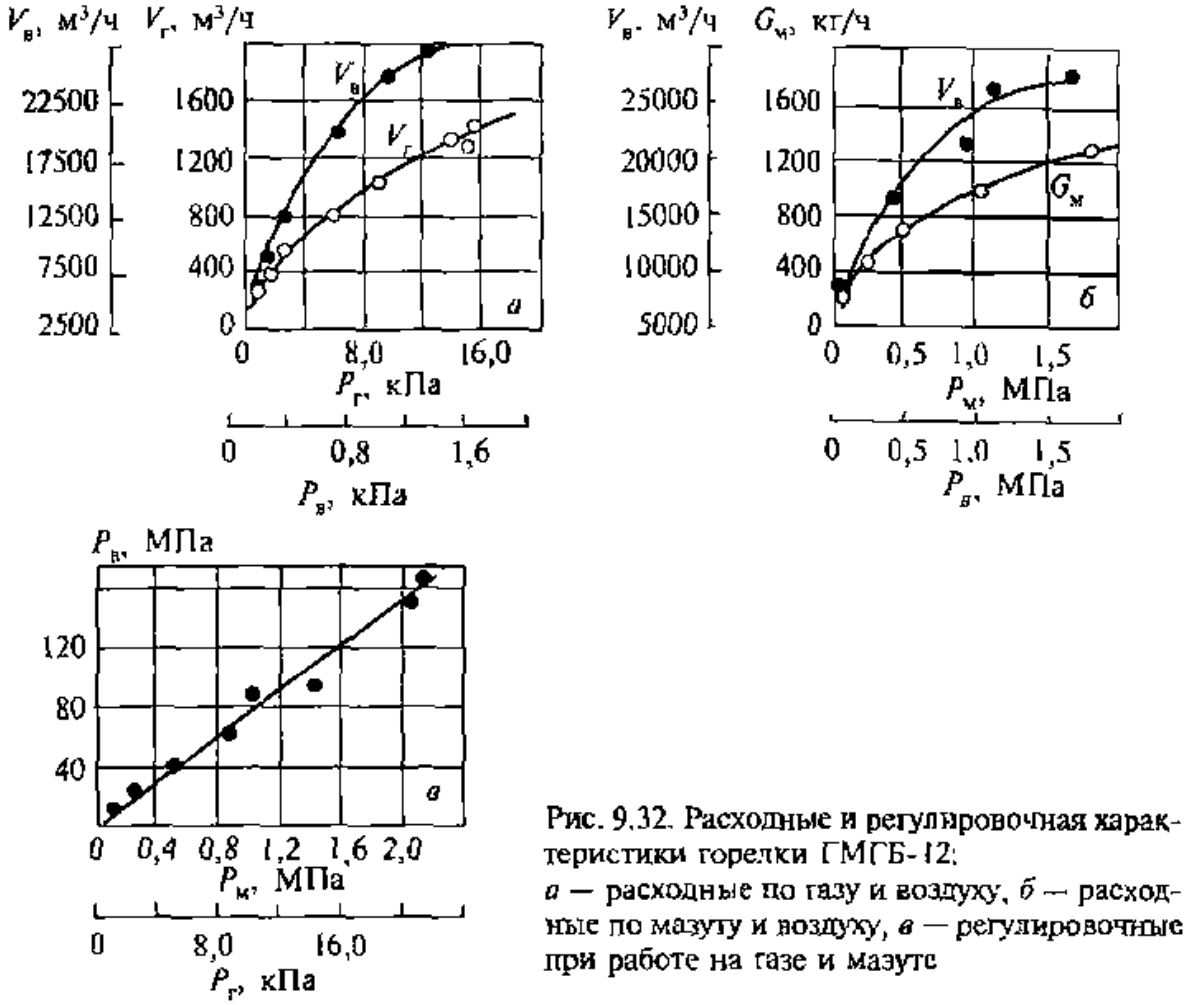


Рис. 9.32. Расходные и регулировочная характеристики горелки ГМГБ-12:
а — расходные по газу и воздуху, *б* — расходные по мазуту и воздуху, *в* — регулировочные при работе на газе и мазуте

9.17. ГАЗОМАЗУТНАЯ ГОРЕЛКА ДКЗ

Горелка разработана Дорогобужским котельным заводом для топок котлов. Общий вид горелки показан на рис. 9.33, а техническая характеристика разработанной серии приведена в табл. 9.20.

Горелка состоит из газовой части, лопаточного регистра для закрутки воздуха, механической форсунки и цилиндрического туннеля-стабилизатора, диаметр которого равен внутреннему диаметру газовой камеры. Газ поступает в закрученный поток воздуха под углом 90° от периферии к центру из двух рядов отверстий в газовой камере, что обеспечивает равномерное распределение газовых струй в потоке воздуха и хорошую подготовку газовоздушной смеси.

Горелка может работать на подогретом воздухе и ее воздухоподводящий патрубок имеет внутреннюю тепловую изоляцию.

При работе горелки в горелочной амбразуре формируется интенсивный вихревой факел с развитой зоной приосевой циркуляции продуктов сгорания. Это может привести к перегреву форсунки. Поэтому форсунка выполняется в водоохлаждаемом корпусе. При сжигании газа форсунка демонтируется.

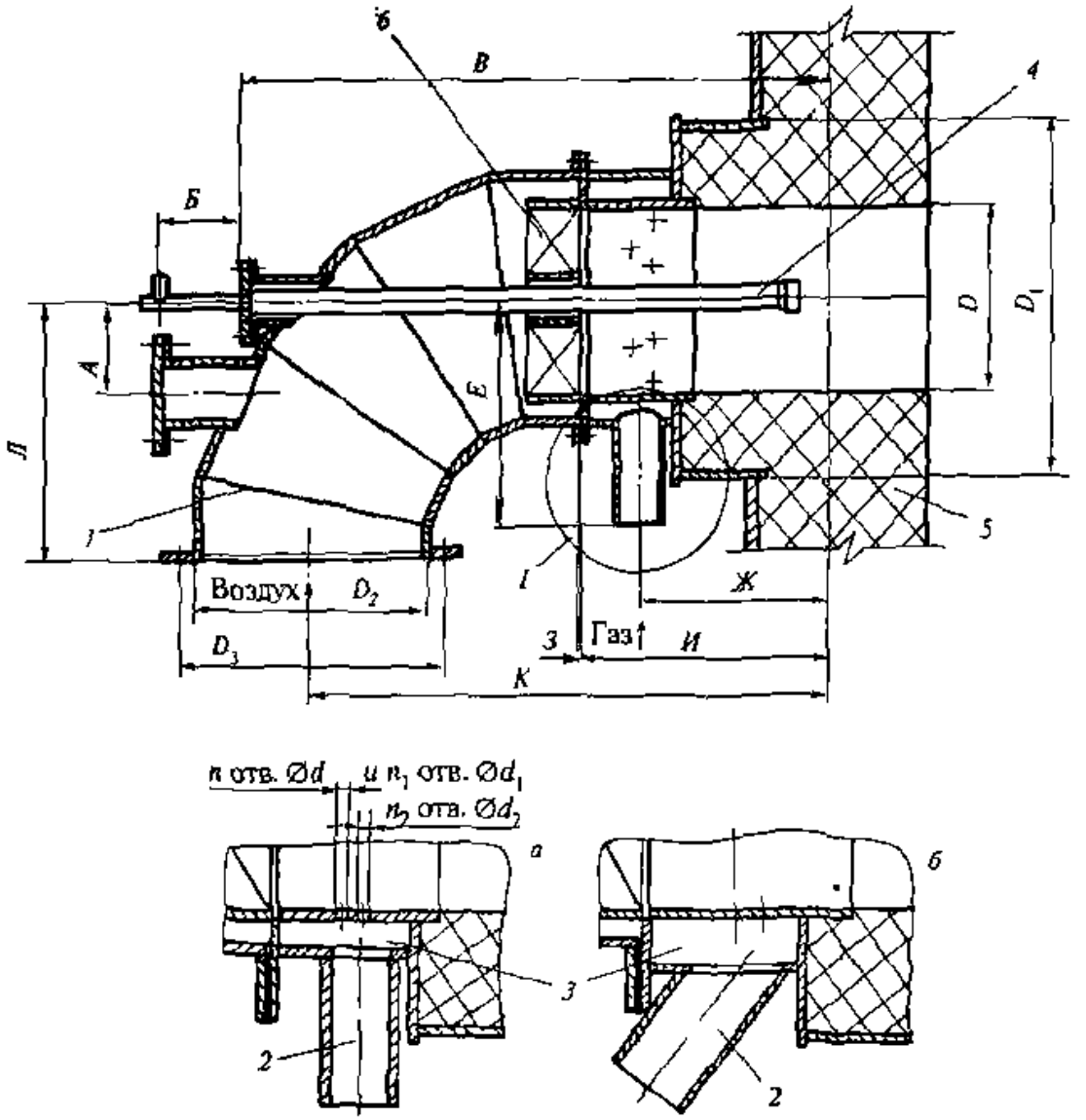


Рис. 9.33. *Горелка газомазутная ДКЗ:*
1 — подвод воздуха; *2* — подвод газа (*а* и *б* — варианты); *3* — газовая камера; *4* — форсунка; *5* — горелочный туннель; *6* — завихритель воздуха

Таблица 9.20

Основные характеристики горелок ДКЗ (рис. 9.33)

Наименование параметра	Обозначение горелки		
	А-6457-1, А-6457-2	А-6457-3	А-6457-4
Номинальная тепловая мощность, (газ/мазут) МВт	6,6/6.2	9,0/8,0	12.65/11.15
Номинальный расход топлива (газ/мазут), $м^3/ч$ (кг/ч)	660/620	900/800	1265/1115
Номинальное давление газа, кПа	17,5	25,0	–
Давление воздуха, кПа	0,5	–	–
Коэффициент расхода воздуха	1,1	1,1	–
Коэффициент рабочего регулирования	4,1	–	–
Количество газовыпускных отверстий:			
n	9	9	9
n_1	3	3	3
n_2	69	69	69
Размер, мм:			
d	10	10	–
d_1	18	18	–
d_2	3	4	–
А	160	160	200
Б	160	160	160
В (от монтажного фланца)	1063	1063	1294
D	346	346	449
D_1	630	630	760
D_2	426	426	529
D_2	465	465	570
Е	405	405	444
Ж	374	374	545
И	464	464	548
К	933	933	1139
Л	466	466	586
Масса, кг (без футеровки)	114,7	118,6	169,3

9.18. ГОРЕЛКИ ГМ И ГМП

Горелки разработаны НПО «ЦКТИ» для топок котлов. Общий вид горелки показан на рис. 9.34, а техническая характеристика в табл. 9.21. Горелки предназначены для раздельного сжигания природного газа и мазута.

Горелка состоит из форсуночного узла с основной форсункой, расположенной по оси горелки, и резервной, расположенной ниже под углом 6° к горизонтали, газовой части, лопаточного завихрителя воздуха (правого или левого вращения), узла захлопок для автоматического закрытия воздушного клапана при снятии форсунок.

Горелка оснащена паромеханической форсункой (см. рис. 8.24, глава 8).

Газовая часть горелки состоит из кольцевого коллектора в сечении прямоугольной формы с одним рядом газовыходных отверстий и коленообразной подводящей трубы. Внутри коллектора приварена разделительная обечайка для равномерного распределения газа по его объему. К торцу коллектора присоединен кольцевой обод полукруглой формы для обеспечения

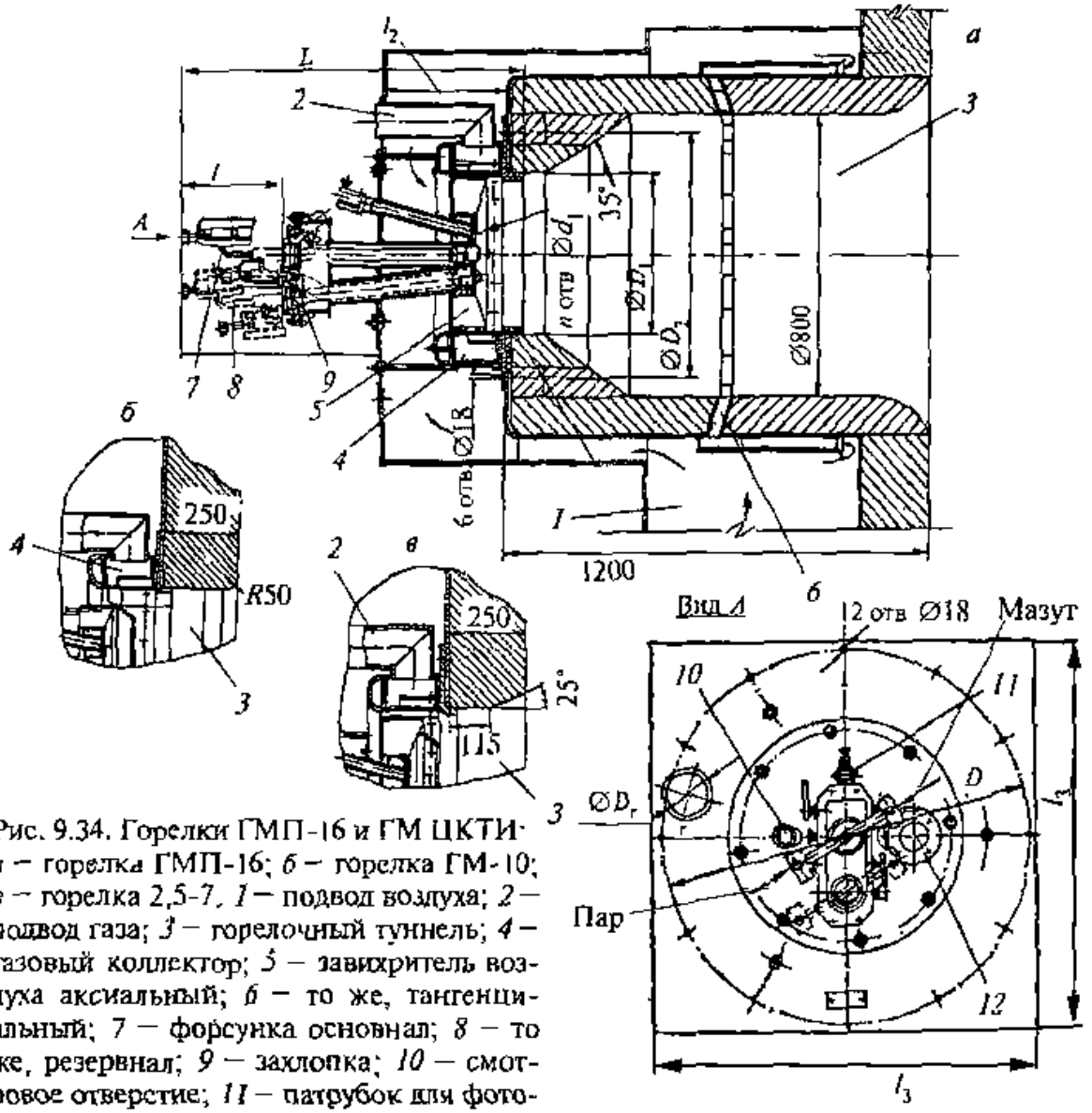


Рис. 9.34. Горелки ГМП-16 и ГМ ЦКТИ:
а – горелка ГМП-16; *б* – горелка ГМ-10; *в* – горелка 2,5-7; *1* – подвод воздуха; *2* – подвод газа; *3* – горелочный туннель; *4* – газовый коллектор; *5* – завихритель воздуха аксиальный; *6* – то же, тангенциальный; *7* – форсунка основная; *8* – то же, резервная; *9* – заслонка; *10* – смотровое отверстие; *11* – патрубок для фотодатчика; *12* – то же, для запальника

плавного входа воздуха в воздухонаправляющее устройство, основным элементом которого является лопаточный завихритель.

Горелки ГМ 2,5-10 работают с цилиндрическими амбразурами. У горелки ГМП-16 амбразура выполнена в виде камеры сгорания с разделением общего потока воздуха по двум каналам. Один поток воздуха (первичный) подается в амбразуру через завихритель в количестве около 70 % от его общего расхода. Этот поток при смешении с топливом формирует первую ступень зоны горения. Остальной воздух подается в камеру горения через периферийный тангенциальный завихритель. Этот поток воздуха способствует интенсификации смешения в амбразуре и дожиганию продуктов неполного горения.

Такая схема организации горения, кроме того, позволяет повысить радиационные характеристики газового факела, что уменьшает различие между теплообменными свойствами факелов при замене вида топлива. Двух-

Таблица 9.21

Основные характеристики горелок ГМ и ГМП (рис. 9.34)

Наименование параметра	ГМ-2,5	ГМ-4,5	ГМ-7	ГМ-10	ГМП-16
Номинальная тепловая мощность, МВт	2,94	5,3	7,42(6,65)	12,56(12,66)	18,8
Номинальный расход топлива, $м^3$/ч (кг/ч)	294	530	780(660)	1264(1110)	1880
Номинальное давление:					
газа, кПа	25	25	25	20	25
мазута, МПа	1,8	1,8	1,5	2,0	1,8
воздуха, кПа	0,8	0,9	0,9(1,05)	1,0(1,1)	3,5
Коэффициент расхода воздуха	1,1	1,1	1,04(1,1)	1,05(1,08)	1,05
Коэффициент рабочего регулирования	5,0	5,0	8,2(7,15)	5,0(6,0)	5,0
Длина факела на мазуте, м	1,8	2,5	3,0	5,4	6,5
Количество газовыпускных отверстий *n*	19	16	16	16	16
Размер, мм					
L	953	962	990	1023	990
l	280	280	300	272	300
l_1	658	630	578	622	578
l_2	256	296	366	366	366
l_3	685	770	885	885	885
$D_г$	57	89	102	102	102
D	642	728	850	850	850
D_1	330	375	434	450	450
D_2	545	630	715	715	715
d_1	6,6	7,5	9	12,8	18
Масса горелки, кг, не более	105	130	145	145	145

ступенчатое сжигание топлива позволяет также снизить концентрацию оксидов азота в продуктах сгорания.

Важным показателем работы горелок является отсутствие коксования горелочной амбразуры. Особое значение это имеет для горелок ГМП-16. Для исключения коксования форкамеры угол раскрытия мазутного аэрозоля на выходе из форсунки (конус распыления) должен быть не более 30°. Давление пара, подаваемого на распыливание мазута, должно быть не менее 2,5 $кг/см^2$ во всем диапазоне изменения тепловой нагрузки горелки.

При пуске горелки давление мазута необходимо поддерживать 0,05—0,07 МПа. Вязкость топлива должна быть не менее 3°ВУ (температура подогрева не ниже 120 °С). Давление газа при пуске горелки должно быть в пределах 0,5—1 кПа.

При необходимости ремонта или обслуживания основной форсунки вставляют в свое место резервную и зажигают мазут от основного факела. Резервная форсунка предназначена только для кратковременной работы на период выключения основной.

В ряде случаев горелки ГМ вынуждены работать при давлении природного газа ниже расчетного. Вариант такой реконструкции горелки ГМ-2,5 для условий работы при давлении газа 3,8 кПа выполнен специализированным монтажно-наладочным управлением (г. Новосибирск). Реконструированная горелка ГМП-2,5 в газовом коллекторе имеет два ряда газовыпускных отверстий с 19 отверстиями в каждом ряду: диаметр отверстий первого ряда 8,4 мм, второго — 4,0 мм.

Испытание горелки, выполненное при работе ее в топке котла ДЕ-4-14-ГМ, показали полное выгорание газа на выходе из топки при $\alpha = 1{,}15$.

Расходные характеристики реконструированной горелки ГМР-2,5 приведены на рис. 9.35.

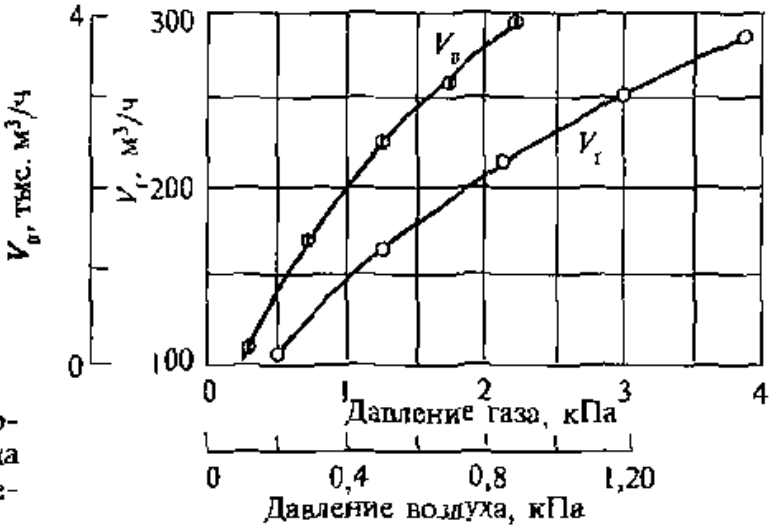


Рис. 9.35. Зависимость расхода газа $V_г$ и расхода воздуха $V_в$ от давления этих сред перед горелкой ГМР-2,5

9.19. ФОРКАМЕРНЫЕ ГАЗОМАЗУТНЫЕ ГОРЕЛКИ ВНИИМТ

Форкамерная газомазутная горелка ВНИИМТ разработана для раздельного сжигания природного газа и мазута с недостатком воздуха с целью получения высокотемпературных продуктов конверсии, используемых в шахтных печах при обжиге известняка. Общий вид горелки показан на рис. 9.36, а техническая характеристика, полученная при испытании, приведена в табл. 9.22.

Горелка состоит из воздухоподводящего корпуса со встроенным огнеупорным блоком, горелочным камнем и камерой сгорания, имеющей выходной пережим.

Между огнеупорным блоком и горелочным камнем установлен тангенциальный завихритель воздуха, между лопатками которого расположены газовые сопла, соединенные с газовым коллектором, выполненным на торцевом фланце горелки. На оси горелки установлена мазутная форсунка типа ФК (см. рис. 8.9), оборудованная дополнительным периферийным каналом с выходным завихрителем, предназначенным для подачи распылителя, при помощи которого регулируется угол раскрытия топливовоздушной струи.

Горелка работает при сжигании холодного газа, воздухом подогретым до 330 °С. Мазут подогревается до 100 °С. В качестве распыливающего агента используется компрессорный воздух и водяной пар.

При работе горелки воздух, омывая огнеупорный блок, вытекает в камеру горения через лопаточный завихритель, создавая вихревое течение вдоль ее стен и зону обратного течения на ее оси. Газ из коллектора распределяется по газовым соплам и нагнетается в вихревой поток между лопат-

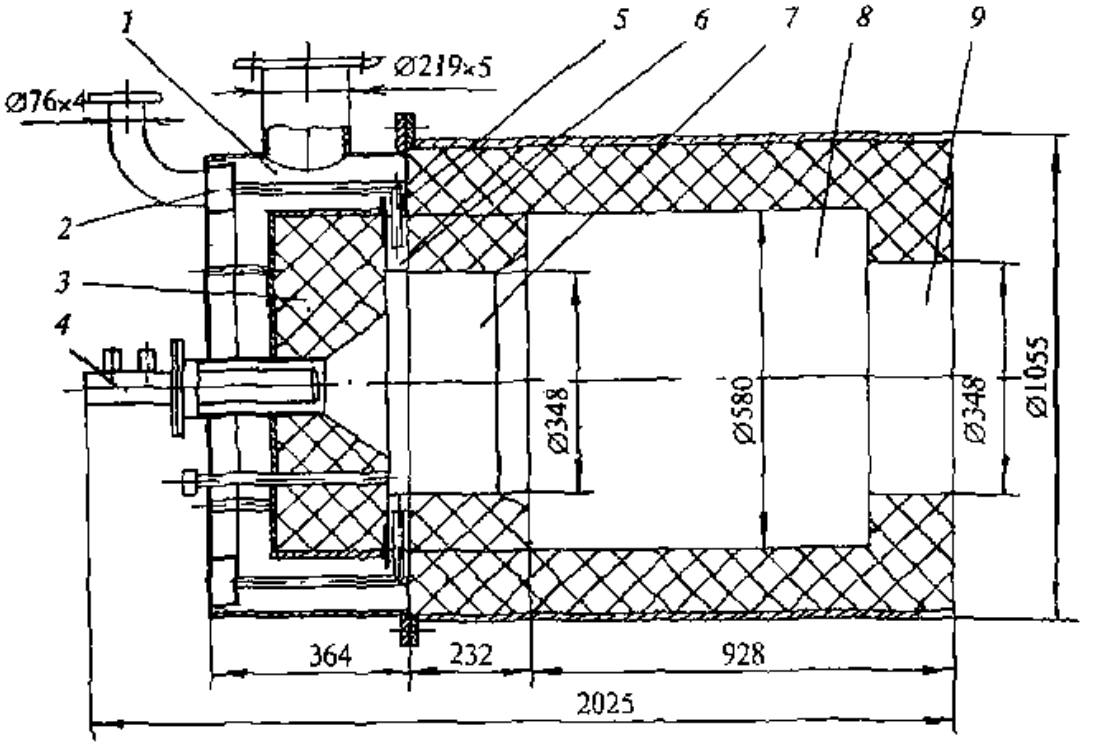


Рис. 9.36. Форкамерная газомазутная горелка ВНИИМТ:
1 — воздухоподводящий корпус; *2* — газовый коллектор; *3* — огнеупорный блок; *4* — форсунка, *5* — газовые сопла; *6* — завихритель воздуха; *7* — горелочный камень; *8* — камера сгорания; *9* — пережим

Таблица 9.22

Техническая характеристика форкамерной горелки (рис. 9.36)

Параметр	Размерность	Сжигаемое топливо	
		газ	мазут
Номинальная тепловая мощность	МВт	1,68	1,68
Расход природного газа	м³/ч	170	
Расход мазута	кг/ч		150
Давление топлива	кПа	5,4	190
Расход воздуха	м³/ч	770	1133
Давление воздуха перед горелкой	кПа	0,34	0,37
Расход распылителя	кг/ч	–	170
Давление распылителя	кПа	–	145
Коэффициент расхода воздуха	–	0,48	0,784
Коэффициент рабочего регулирования	–	4,9	3,7
Содержание в сухих продуктах сгорания в диапазоне рабочего регулирования:			
оксида углерода	%	13,4	10,0
водорода	%	18,65	7,45
метана	%	1,75	0

ками завихрителя. Воспламенение смеси происходит на выходе из горелочного туннеля и в основном завершается в пределах камеры горения. Температура продуктов сгорания на расстоянии от пережима около 200 мм составляет 1200 °С.

Глава 10. РАДИАЦИОННЫЕ ТРУБЫ

Для отопления термических печей, работающих с контролируемой атмосферой, применяют радиационные трубы, назначение которых заключается в муфелировании пламени в печах и обеспечении равномерного теплообмена в рабочем пространстве печей.

Прошли экспериментальную проверку и применялись в печах радиационные трубы различной конструкции. Однако специфика их эксплуатации и различие предъявляемых к ним требований позволяют дать надежные рекомендации по применяемым конструкциям только на основе длительной работы в промышленных условиях

В настоящее время для широкого применения в термических печах прокатного производства можно уверенно рекомендовать ограниченную номенклатуру радиационных труб, прошедших длительную промышленную проверку. К этим трубам относятся следующие:

тупиковые радиационные трубы типа ТРТ, *предназначенные для* горизонтальной установки в печах с рабочей температурой до 900 °С;

тупиковые радиационные трубы типа ТРР с рециркуляцией продуктов сгорания, предназначенные для горизонтальной или вертикальной установки в печах с рабочей температурой до 950° С;

U-образные радиационные трубы с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект.

Из других конструкций радиационных труб, которые после дополнительной доработки конструкции можно применять в термических печах, следует отметить U-образные радиационные трубы типа ТРУ с периферийным сжиганием газа на внутренней стенке излучающей трубы и W-образные радиационные трубы, работающие под разрежением.

10.1. ТУПИКОВЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ТРУБЫ ТИПА ТРТ

Разработанные Стальпроектом и впервые освоенные на печах Череповецкого сталепрокатного завода тупиковые радиационные трубы типа ТРТ имеют диффузионную горелку улучшенного смешения и предназначены для работы на природном газе при положительном давлении внутри трубы.

Труба представляет собой корпус, выполненный из жаропрочной стали (излучающая труба), внутри которой размещены горелка, рекуператор и камера сгорания (жаровая труба).

Конструкция трубы позволяет стабилизировать коэффициент расхода первичного воздуха и другие параметры на уровне, исключающем образование сажи и местные перегревы излучающей трубы и обеспечивающем надежность автоматического регулирования во всем диапазоне расхода газа при групповой работе труб.

Разработаны 4 типоразмера труб для внутренней ширины рабочего пространства 1508, 1740, 1972 и 2320 мм. Каждый типоразмер может иметь газовое сопло диаметром 4 или 5 мм, что определяет диапазон пропускной способности трубы по газу

Тупиковые радиационные трубы типа ТРТ показаны на рис. 10.1, а их конструктивные размеры приведены в табл. 10.1.

Труба работает следующим образом. Воздух, подводимый к радиационной трубе, нагревается в трехоборотном рекуператоре, встроенном в излучающую трубу Природный газ подают через центральную трубу, оканчивающуюся горелкой. Часть горячего воздуха подсасывается к газовому соплу через отверстия в горелочном патрубке, а остальной воздух подается к выходному сечению горелки. Газовоздушная смесь сгорает внутри жаровой трубы и поступает к излучающей трубе частично через цилиндрические отверстия в боковой стенке жаровой трубы, а частично через торцовое отверстие в этой трубе. В пространстве между жаровой и излучающей трубами происходит дожигание газов и осуществляется передача тепла к излучающей трубе.

Отходящие дымовые газы разделяются на два потока: один направляется непосредственно в рекуператор, а другой, смешиваясь со свежей порцией сгоревших газов, поступает обратно в жаровую трубу. Такая рециркуляция обеспечивает равномерное распределение температуры по длине жаровой трубы, снижая ее у корня факела и повышая вследствие увеличения объема продуктов сгорания к торцу радиационной трубы. Подсос части *воздуха к месту истечения газа из сопла и рециркуляция дымовых газов* обеспечивают отсутствие сажевыделения внутри трубы практически при любых пределах регулирования и минимальном избытке воздуха

Таблица 10.1

Конструктивные размеры (мм) тупиковых радиационных труб типа ТРТ (рис. 10.1)

Обозначение трубы	B	L	L_1	L_2	L_3	l	Масса трубы, кг
ТРТ-П-А$d_г$-190/2080	1508	2080	2950	1390	1458	50	330
ТРТ-П-А$d_г$-190/2315	1740	2315	3185	1625	1690	50	350
ТРТ-П-А$d_г$-190/2535	1972	2535	3405	1845	1912	60	380
ТРТ-П-А$d_г$-190/2870	2320	2870	3740	2180	2250	70	430

Конструкция радиационной трубы и техническая документация на нее выполнены так, что труба, состоящая из заменяемых узлов, может быть заказана как в полном комплекте, так по всем основным узлам в отдельности.

Основными заменяемыми узлами тупиковой радиационной трубы ТРТ являются излучающая и жаровая трубы, рекуператор и горелка Все нормализованные Стальпроектом трубы типа ТРТ имеют наружный диаметр излучающей трубы (рис. 10.2), выполненной из стали Х23Н18, равный 190 мм. В зависимости от ширины рабочего пространства печи трубу заказывают четырех различных длин, указанных в табл. 10.1. Излучающая труба включает излучающую часть, фланец для крепления к каркасу печи и опорную

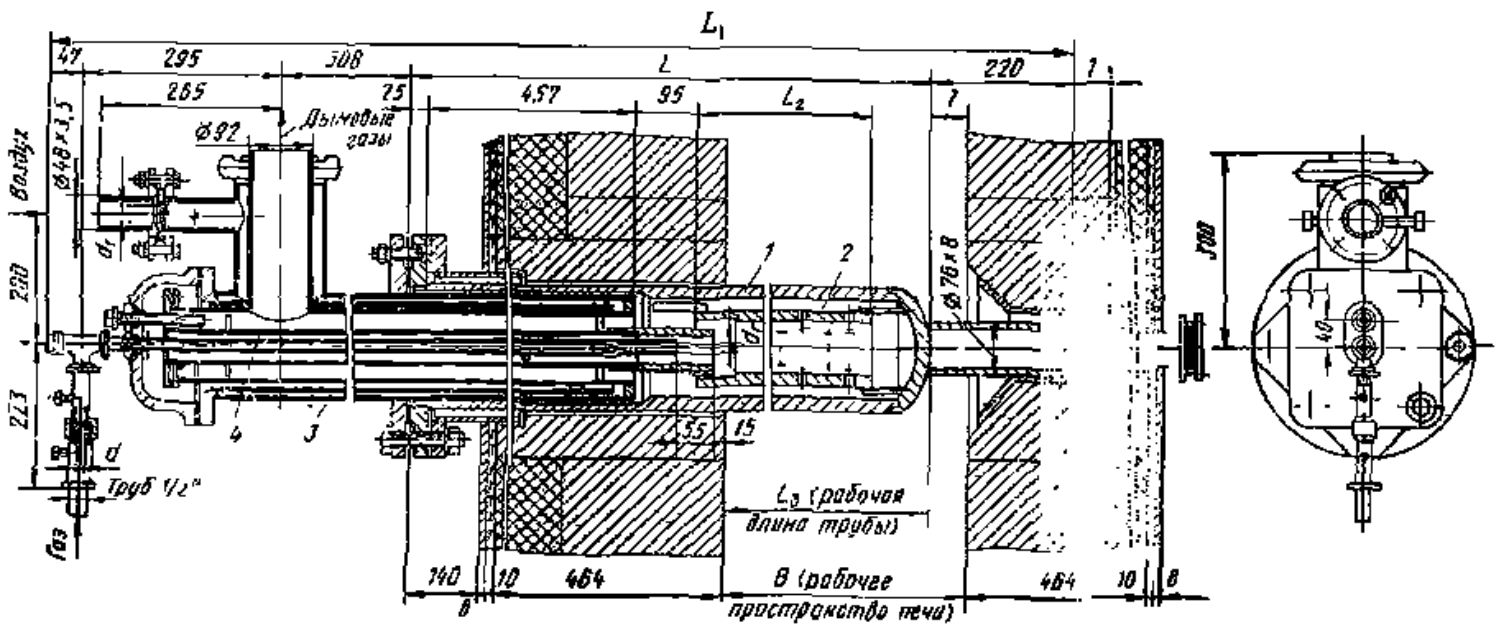


Рис. 10.1. Тупиковая радиационная труба типа ТРТ: *1* — излучающая труба; *2* — жаровая труба; *3* — рекуператор; *4* — горелка

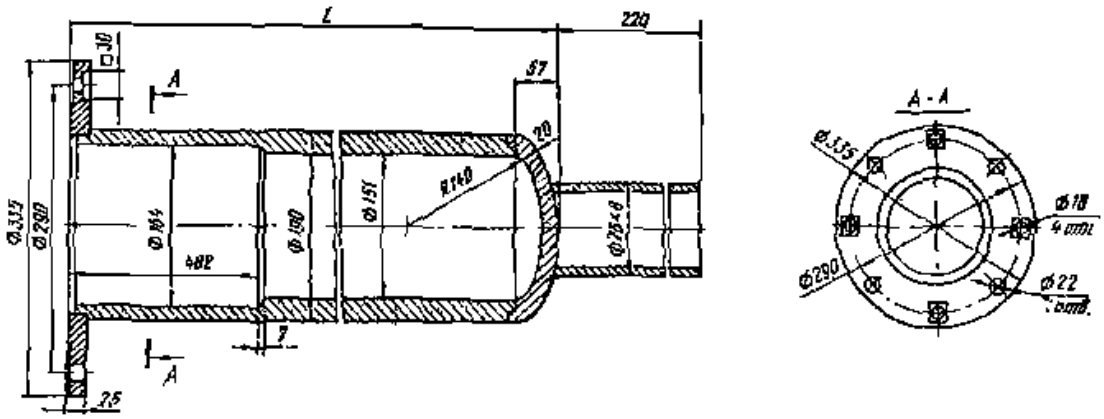


Рис. 10.2. Излучающая труба для тупиковой радиационной трубы типа ТРТ

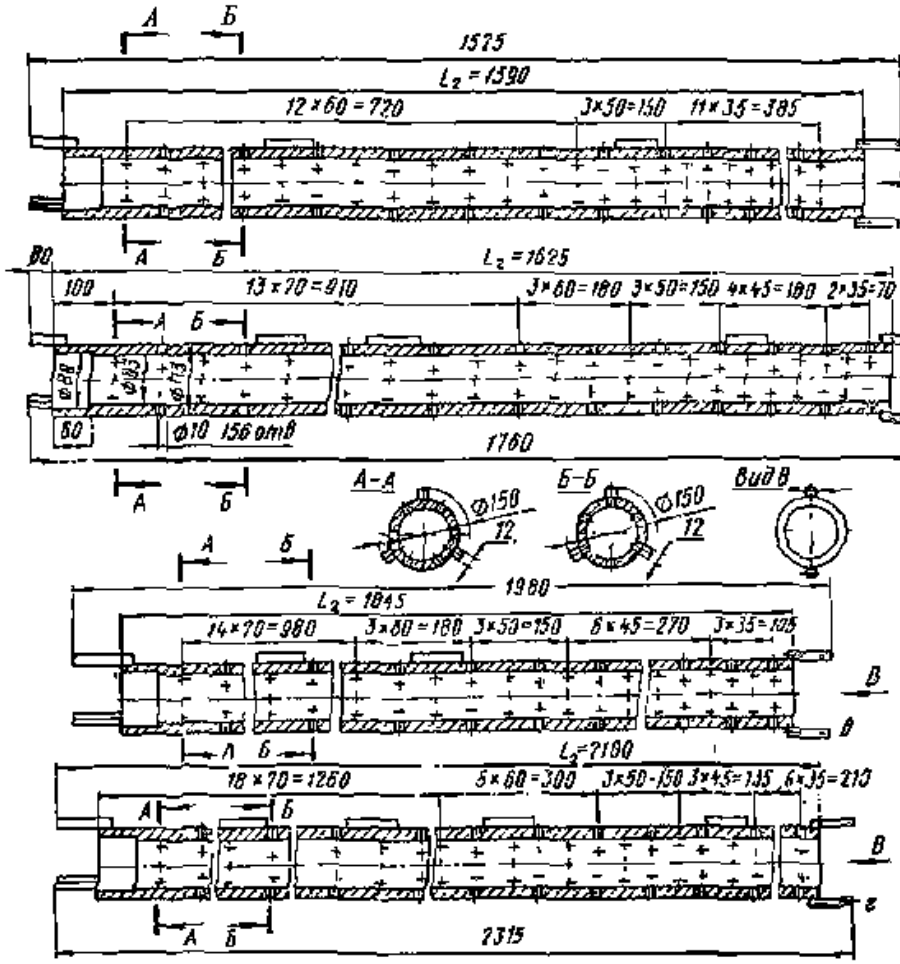


Рис. 10.3. Жаровая труба для тупиковой радиационной трубы типа ТРТ длиной, мм: *а* — 2080, *б* — 2315; *в* — 2535; *г* — 2870

часть. К излучающей трубе крепятся все остальные узлы радиационной трубы. Жаровая труба (рис. 10.3) расположена внутри излучающей трубы соосно с ней и предназначена для формирования факела и распределения продуктов сгорания по длине излучающей трубы. Жаровая труба выполнена из стали Х23Н18 и в зависимости от длины излучающей трубы заказывается

четырех различных длин с различным количеством отверстий по ее образующей

Рекуператор типа «труба в трубе» (рис 10.4) противоточный, гладкостенный; снабжен чечевичным компенсатором. Для всех длин тупиковой радиационной трубы рекуператор имеет одинаковые размеры и располагается внутри излучающей трубы.

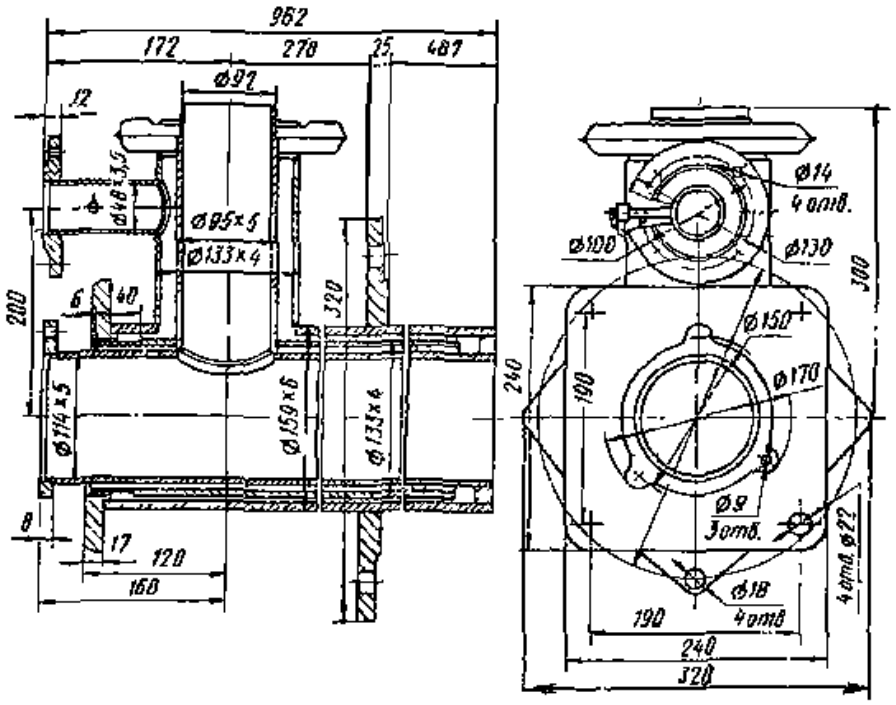


Рис. 10.4. Рекуператор тупиковой радиационной трубы типа ТРТ

Горелка тупиковой трубы показана на рис. 10.5. Назначение всех ее узлов ясно из приведенного выше описания работы трубы. Трубка, проходящая через заднюю крышку горелки, является отверстием для гляделки и прохода запальника. После пуска газа и розжига радиационной трубы запальник вынимается и трубка закрывается колпачком со смотровым стеклом. Горелка располагается внутри рекуператора соосно с ним. В зависимости от заданной теплопроизводительности радиационной трубы горелка имеет газовое сопло диаметром 4 или 5 мм (соответственно максимальная пропускная способность по природному газу 0,00083 и 0,00138 м^3/с). Минимальный расход природного газа принимается равным 0,00028 м^3/с.

Перед радиационной трубой на подводах газа и воздуха предусмотрены дросселирующие шайбы со штуцерами до и после них (см. рис. 10.1). Шайбы предназначены для уравнивания гидравлического сопротивления труб между собой и замера расхода газа и воздуха на каждую радиационную трубу.

Правильный подбор диаметров шайб при наладке позволяет обеспечить при зональном регулировании одинаковые расходы газа и воздуха по всем трубам данной зоны.

Условное обозначение тупиковой радиационной трубы типа ТРТ состоит из букв и цифр, которые расшифровываются так: Т — труба, Р —

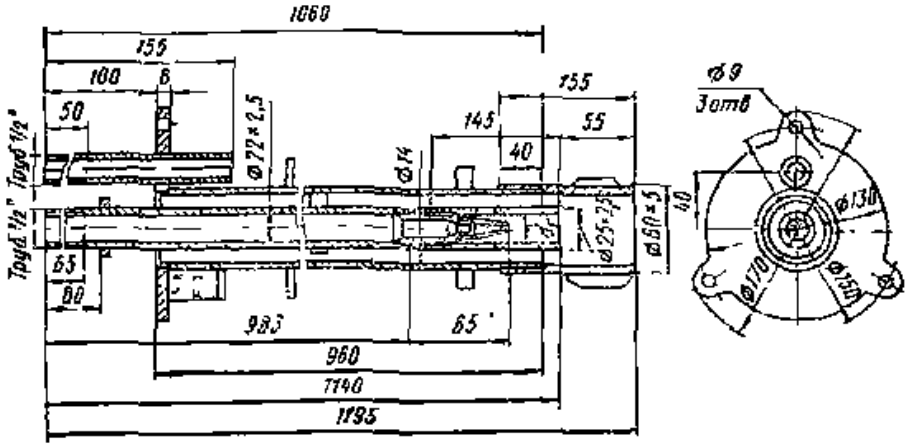


Рис 10.5 Горелка тупиковой радиационной трубы типа ТРТ

радиационная, Т — тупиковая, П — положительное давление внутри трубы, А — обозначение горелки, $d_г$ — диаметр газового сопла, L — длина излучающей трубы, ее наружный диаметр 190 мм

В общем виде обозначение трубы имеет вид ТРТ-П-А $d_г$-190/L.

При заказе радиационной трубы и отдельных узлов вместо букв $d_г$ и L проставляют их численные значения. Например, условное обозначение радиационной трубы ТРТ-П-А5-190/2315 означает: труба радиационная, тупиковая; положительное давление внутри трубы; горелка типа А с газовым соплом диаметром 5 мм; излучающая труба наружным диаметром 190 и длиной 2315 мм.

Пропускная способность по газу и воздуху тупиковой радиационной трубы типа ТРТ в зависимости от их давления перед трубой (без учета дросселирующих шайб) показана на рис. 10.6.

При выборе радиационной трубы типа ТРТ необходимо учитывать, что размеры элементов радиационной трубы соответствуют толщине кладки 464 мм и установочным размерам каркаса печи, показанным на рис. 10.1.

При расчете тупиковой радиационной трубы типа ТРТ следует принимать $\alpha = 1{,}1—1{,}2$.

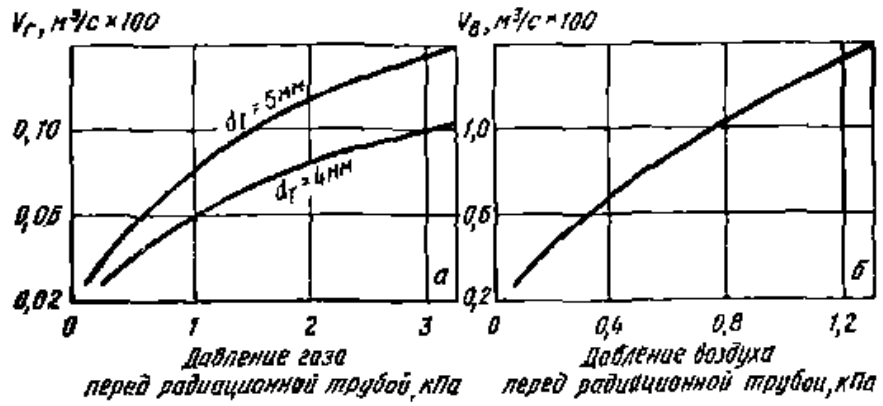


Рис. 10.6. Пропускная способность тупиковой радиационной трубы ТРТ-П-А$d_г$-190/L: *а* — по газу; *б* — по воздуху

Пример. Подобрать радиационную трубу для печи с рабочим пространством шириной 1740 мм, $V_г = 0{,}00028 - 0{,}00083$ м³/с, $\alpha = 1{,}2$.

По табл. 10.1 определяем, что заданной ширине рабочего пространства $B = 1740$ мм соответствует длина излучающей трубы $L = 2315$ мм. По графику рис. 10.6, *а* находим, что заданная пропускная способность радиационной трубы по газу обеспечивается газовым соплом диаметром $d_г = 4$ мм. Таким образом, выбираем тупиковую радиационную трубу ТРТ-П-А4-190/2315. При этом давление газа перед трубой (без учета дросселирующей шайбы) должно быть от 0,25 до 2 кПа.

По рис. 21 приложения 1 находим $L_0 = 9{,}25$ м³/м³ газа.

$V_в = \alpha L_0 V_г = 1{,}2 \cdot 9{,}25\ (0{,}00028 \div 0{,}00083) = 0{,}0031 \div 0{,}0092$ м³/с.

По рис. 10.6, *б* находим, что давление воздуха перед радиационной трубой (без учета дросселирующих шайб) должно быть в пределах 0,08—0,8 кПа.

Технические характеристики радиационной тупиковой трубы ТРТ-П-Ad-190/2315, полученные при испытании, приведены в табл. 10.2

Таблица 10.2

Технические данные трубы ТРТ-П-Ad-190/2315

Параметр	Размерность	При диаметре газового сопла, мм	
		4	5
Полезная тепловая мощность	кВт	22,7	36,5
Расход газа	м³/ч	3,0	5,0
Давление газа перед распределительной шайбой	кПа	3,185	3,33
Расход воздуха	м³/ч	32,0	54,1
Давление воздуха перед распределительной шайбой	кПа	1,274	2,94
Коэффициент расхода воздуха	—	1,1	1,1
Коэффициент рабочего регулирования	–	2,9	4,4
Средняя температура рабочей поверхности излучающей трубы	°С	895	950
Неравномерность распределения температуры по рабочей поверхности трубы	°С/м	25	20
Максимальная температура жаровой трубы	°С	1020	1060
Коэффициент полезного действия	%	59.8	67,5
Удельный теплосъем с излучающей поверхности	кВт/м²	22	35

В настоящее время Стальпроект совместно с Череповецким сталепрокатным заводом и ЗАО «Токкуум» (производитель карбидкремниевых огнеупоров) разработали модификацию тупиковой радиационной трубы ТРТ с керамической жаровой трубой.

Труба имеет три типоразмера с наружным диаметром 152, 168 и 190 мм на тепловую мощность 45, 50 и 55 кВт, соответственно. Каждый типоразмер имеет рабочую длину 1460, 1690 и 1910 мм и устанавливается в печах с толщиной футеровки до 460 мм.

Применение керамической жаровой трубы позволяет повысить рабочую температуру до 1000 °С и в 2—3 раза увеличить стойкость. Это подтверждает опыт эксплуатации трубы на Череповецком сталепрокатном заводе.

10.2. ТУПИКОВЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ТРУБЫ ТИПА ТРР

Тупиковые радиационные трубы типа ТРР разработаны институтом "ВНИИпромгаз" и предназначены для сжигания природного газа. В отличие от других радиационных труб с рециркуляцией продуктов сгорания в *этой радиационной трубе рециркуляция продуктов сгорания осуществля*ется на холодной стороне радиационной трубы.

Разработано 18 типоразмеров труб с наружным диаметром 102, 121, 152, 168 и 190 мм, длиной рабочей части трубы от 1050 до 2000 мм и номинальной теплопроизводительностью от 11 до 30 кВт. Предпочтительно применение этих радиационных труб при удельном теплосъеме с их рабочей поверхности до 30 кВт/м^2.

Каждой радиационной трубе присваивается смешанный буквенно-цифровой индекс, включающий: название радиационной трубы (Т — труба, Р — радиационная); номинальную теплопроизводительность радиационной трубы в кВт; размеры радиационной трубы в виде дроби, числитель которой соответствует диаметру излучающей трубы D (мм), а знаменатель — длине рабочей части трубы L_1 (мм).

Пример условного обозначения радиационной трубы ТРР номинальной тепловой мощностью 23,3 кВт, диаметром излучающей трубы D = 168 мм и длиной рабочей части L_1 = 2000 мм. ТРР-23,3-168/2000

Общий вид тупиковой радиационной трубы ТРР показан на рис. 10.7, схема ее установки — на рис. 10.8 Конструктивные размеры радиационных труб ТРР приведены в табл. 10.3, а их характеристики— в табл. 10.4.

Пропускная способность тупиковых радиационных труб ТРР по газу и вторичному воздуху дана на рис. 10.9. Радиационная труба ТРР состоит из наружной излучающей трубы *1* (см. рис. 10.7) с патрубком для отвода продуктов сгорания, внутренней жаровой трубы *2* с рекуператором *3*, газовой трубки *4* и воздушного коллектора *8*. Работа этих радиационных труб осу-

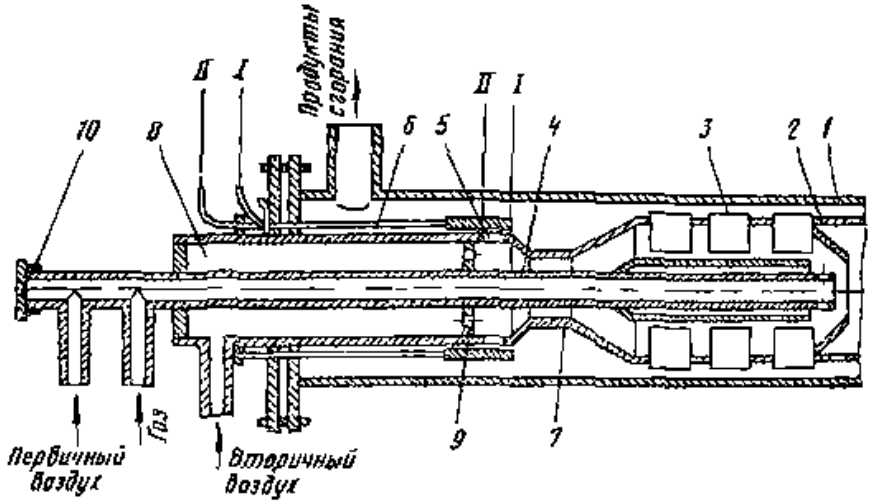


Рис. 10.7. Тупиковая радиационная труба ТРР:
1 — излучающая труба; *2* — жаровая труба, *3* — рекуператор; *4* — газовая трубка; *5* — рабочие окна; *6* — передвижной стакан; *7* — смеситель; *8* — воздушный коллектор, *9* — сопло; *10* — тяга

Таблица 10.3

Конструктивные размеры (мм)* туликовых радиационных труб типа ТРР (рис. 10.7)

Обозначение радиационной трубы	Длина рабочей части	Общая длина радиационной трубы L_1	Диаметр и толщина стенки излучающей трубы $D_1 \delta$	Диаметр отверстий воздушного сопла		Газовая трубка		D_1	D_2	D_3	D_4	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
				большого	малого	диаметр центрального отверстия	диаметр боковых отверстий и количество, шт.									
ТРР-11,0-102/1100	1110	2570	102×5	4,0	2,5	4,0	2,8×6	170	170	102×5	70×4	772	365	131	200	270
ТРР-11,6-121/1050	1050	2575	121×6	4,2	2,5	4,0	2,5×8	170	170	83×4	83×4	1000	193	104	200	270
ТРР-12,5-121/1230	1230	2755	121×6	4,4	2,5	4,0	2,5×8	170	170	83×4	83×4	1000	193	104	200	270
ТРР-14,6-121/1450	1450	2975	121×6	4,8	2,5	4,0	3,0×8	170	170	83×4	83×4	1000	193	104	200	270
ТРР-17,3-121/1650	1650	3175	121×6	5,4	2,5	4,0	3,0×8	170	170	83×4	83×4	1000	193	104	200	270
ТРР-12,8-152/910	910	2185	152×10	4,4	2,5	4,0	2,5×6	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
ТРР-14,0-152/1050	1050	2325	152×10	4,7	2,5	4,0	2,5×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
ТРР-15,4-152/1150	1150	2425	152×10	5,0	2,5	4,0	2,5×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
ТРР-16,7-152/1240	1240	2515	152×10	5,2	2,5	4,0	3,0×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
ТРР-17,3-152/1360	1360	2635	152×10	5,4	2,5	4,0	3,0×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
ТРР-18,7-152/1450	1450	2725	152×10	5,6	2,5	4,0	3,0×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
ТРР-22,2-152/1650	1650	2925	152×10	6,2	2,8	5,0	3,0×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
ТРР-24,9-152/2000	2000	3275	152×10	6,8	2,8	5,0	3,0×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
ТРР-15,4-168/1050	1050	2390	168×8	5,0	2,5	5,0	3,0×8	225	225	121×6	121×6	745	243	152	200	280
ТРР-23,3-168/1650	1650	2990	168×8	6,4	2,8	6,0	3,0×10	225	225	121×6	121×6	745	243	152	200	280
ТРР-27,6-168/2000	2000	3340	168×8	7,2	2,8	6,0	3,0×10	225	225	121×6	121×6	745	243	152	200	280
ТРР-25,6-190/1650	1650	2990	190×20	6,8	2,8	6,0	3,0×10	280	280	121×6	121×6	745	243	152	200	280
ТРР-30,2-190/2000	2000	3340	190×20	7,4	2,8	6,0	3,0×10	280	280	121×6	121×6	745	243	152	200	280

Продолжение табл. 10.3

Обозначение радиационной трубы	l_6	l_7	l_8	l_9	d	d_1	d_2	Число отверстий n	Масса трубы, кг, не более
ТРР-11,0-102/1100	300	170	120	120	18	1 1/4"	1/2"	4	75
ТРР-11,6-121/1050	300	160	120	120	18	1 1/4"	1/2"	4	85
ТРР-12,5-121/1230	300	160	120	120	18	1 1/4"	1/2"	4	90
ТРР-14,6-121/1450	300	160	120	120	18	1 1/4"	1/2"	4	95
ТРР-17,3-121/1650	300	160	120	120	18	1 1/4"	1/2"	4	100
ТРР-12,8-152/910	300	176	120	120	18	1 1/4"	1/2"	8	130
ТРР-14,0-152/1050	300	176	120	120	18	1 1/4"	1/2"	8	135
ТРР-15,4-152/1150	300	176	120	120	18	1 1/4"	1/2"	8	140
ТРР-16,7-152/1240	300	176	120	120	18	1 1/4"	1/2"	8	150
ТРР-17,3-152/1360	300	176	120	120	18	1 1/4"	1/2"	8	160
ТРР-18,7-152/1450	300	176	120	120	18	1 1/4"	1/2"	8	165
ТРР-22,2-152/1650	300	176	120	120	18	1 1/4"	1/2"	8	175
ТРР-24,9-152/2000	300	176	120	120	18	1 1/4"	1/2"	8	185
ТРР-15,4-168/1050	320	240	120	120	18	2"	3/4"	8	160
ТРР-23,3-168/1650	320	240	120	120	18	2"	3/4"	8	200
ТРР-27,6-168/2000	320	240	120	120	18	2"	3/4"	8	240
ТРР-25,6-190/1650	320	330	120	120	18	2"	3/4"	8	330
ТРР-30,2-190/2000	320	330	120	120	18	2"	3/4"	8	350

* Кроме указанных особо

Таблица 10.4

Характеристика тупиковых радиационных труб типа ТРР

Обозначение радиационной трубы	Удельный теплосъем с излучающей поверхности, кВт/м²		Полезная тепловая мощность, кВт		Количество природного газа, м³/с		Количество первичного воздуха, м³/с		Давление первичной газовоздушной смеси после шайбы, кПа		Количество вторичного воздуха, м³/с		Давление вторичного воздуха после шайбы, кПа	
	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло
ТРР-11,0-102/1100	10,6 6,4	13,5	11,0 2,3	4,9	0,00039 0,000078	0,00017	0,00058 0,00011	0,00025	1,65 0,1	0,36	0,0036 0,00072	0,0015	3,15 0,32	2,95
ТРР-11,6-121/1050	28,1 6,3	12,0	11,6 2,6	4,9	0,00042 0,000083	0,00017	0,00061 0,00011	0,00025	1,20 0,04	0,26	0,00325 0,00078	0,0015	3,00 0,28	2,95
ТРР-12,5-121/1230	26 5,7	10,2	12,5 2,7	4,9	0,00044 0,000089	0,00017	0,00044 0,00011	0,00025	1,60 0,06	0,26	0,00405 0,00083	0,0015	3,05 0,18	2,95
ТРР-14,6-121/1450	16,1 5,5	8,7	14,6 3,1	4,9	0,00053 0,00010	0,00017	0,00078 0,08911	0,00025	0,80 0,04	0,12	0,00485 0,00092	0,0015	2,80 0,14	2,95
ТРР-17,3-121/1650	27,0 5,3	7,8	17,3 3,4	5,0	0,00064 0,00011	0,00017	0,00095 0,00017	0,00027	1,05 0 08	0,12	0,00575 0,0010	0,0015	2,90 0,12	2,95
ТРР-12,8-152/910	28,4 6,3	11,1	12,8 2,8	5,0	0,00044 0,000089	0,00017	0,00067 0,00011	0,00025	1,45 0,10	0,28	0,0040 0,00083	0,0015	3,00 0,14	2,95
ТРР-14,0-152/1050	26,9 5,3	9,6	14,0 2,8	5,0	0,0005 0,000089	0,00017	0,00075 0,00011	0,00025	1,80 0,10	0,28	0,0046 0,00083	0,0015	3,10 0,12	2,95
ТРР-15,4-152/1150	27,0 6,0	8,7	15,4 3,4	5,0	0,00056 0,00011	0,00017	0,00083 0,00017	0,00025	2,2 0,14	0,28	0,0050 0,001	0,0015	3,05 0,16	2,95
ТРР-16,7-152/1240	27,4 5,6	8,2	16,2 3,4	5,0	0,00061 0,00011	0,00017	0,00092 0,00017	0,08925	0,86 0,06	0,12	0,0056 0,001	0,0015	3,20 0,24	2,95
ТРР-17,3-152/1360	25,8 5,1	7,5	17,3 3,4	5,0	0,00064 0,00011	0,00017	0,00095 0,08917	0,00025	0,90 0,06	0,12	0,0058 0,001	0,0015	3,10 0,18	2,95
ТРР-18,7-152/1450	26,4 6,0	7,0	18,2 4,2	5,0	0,00070 0,00014	0,00017	0,00103 0,08917	0,00025	1,05 0,10	0,12	0,0063 0,0012	0,0015	3,10 0,25	2,95
ТРР-22,2-152/1650	27,4 6,3	8,1	22,2 5,1	6,6	0,00083 0,00017	0,00022	0,00125 0,00025	0,00033	1,50 0,12	0,16	0,0074 0,0015	0,0021	3,20 0,20	3,05
ТРР-24,9-152/2000	25,7 5,3	6,8	24,9 5,1	6,6	0,00092 0,00017	0,00022	0,0014 0,08925	0,08933	2,90 0,12	0,16	0,0089 0,0015	0,0021	3,20 0,16	3,05
ТРР-15,4-168/1050	27,0 6,0	8,8	15,4 3,4	5,0	0,00056 0,00011	0,00017	0,00083 0,00017	0,00025	0,70 0,06	0,10	0,0058 0,0010	0,0015	3,10 0,22	2,95
ТРР-23,1-168/1650	26,1 5,6	7,3	23,1 5,0	6,5	0,00089 0,00017	0,00022	0,0013 0,00025	0,00033	1,65 0,10	0,14	0,0083 0,0015	0,0021	2,9 0,20	3,05
ТРР-27,6-168/2000	25,6 5,3	6,0	27,6 5,7	6,4	0,0011 0,00020	0,00022	0,0017 0,00028	0,00033	2,40 0,12	0,14	0,010 0,0018	0,0021	3,0 0,12	3,05
ТРР-25,6-190/1650	25,3 5,6	6,3	25,6 5,7	6,4	0,0010 0,08920	0,00022	0,0015 0,00028	0,00033	1,2 0,12	0,08	0,0092 0,0018	0,0021	3,1 0,20	3,05
ТРР-30,2-190/2000	24,7 4,7	5,35	30,2 5,7	6,4	0,00175 0,00020	0 00022	0,0019 0,00028	0 00033	1,8 0,12	0,08	0,011 0,0018	0,0021	3,25 0,12	3,05

Примечание. Для большого сопла: в числителе — номинальный режим, в знаменателе — минимальный.

шествляется следующим образом. Идущий на горение природный газ смешивается у входа в радиационную трубу с первичным воздухом из расчета коэффициента расхода воздуха 0,1—0,2 (соотношение количества газа к первичному воздуху от 1 : 1 до 1 : 2). Истечение первичной газовоздушной смеси происходит в сужающейся части горелки на расстоянии 30 мм от выходного сечения. Вторичный воздух в количестве, необходимом для полного сжигания газа (с учетом первичного воздуха), подается к воздушному коллектору, оканчивающемуся воздушным соплом. Каждая радиационная труба ТРР снабжена двумя воздушными (инжекционными) соплами с четырьмя отверстиями. Одно сопло с большими отверстиями («большое сопло») предназначено для работы с повышенными теплосъемами с рабочей поверхности в зонах нагрева печи. Второе — с меньшими отверстиями («малое сопло») — предназначено для работы с малыми теплосъемами с рабочей

поверхности радиационной трубы в зонах выдержки печи. Инжекционное устройство доступно для осмотра и изготавливается из обычных сталей. Воздух, истекающий из отверстий сопла, инжектирует часть продуктов сгорания, нагревается в рекуператоре до 500—600 °С и постепенно смешивается с центральной струей газовоздушной смеси, образуя растянутый факел внутри жаровой трубы. Продукты сгорания поступают в кольцевой канал между жаровой и излучающей трубами. Пройдя рекуператор, продукты сгорания имеют температуру 300—500 °С; часть из них возвращается с воздухом в камеру горения, а основная часть удаляется через дымоход

Давление воздуха после дросселирующей шайбы (перед соплом) 3,0—3,5 кПа. С увеличением давления коэффициент инжекции увеличивается, а перегрев жаровой трубы относительно излучающей трубы уменьшается.

Диаметры отверстий в соплах рассчитаны из условия давления перед ними около 3,0 кПа. При изменении давления перед соплом (в зависимости от типа применяемого вентилятора) диаметры отверстий пересчитываются по соотношению $d_2 = d_1\sqrt[4]{P_1/P_2}$ и уточняются при пуске печи. В случае, когда требуемый расход газа меньше номинального, диаметры отверстий сопла должны быть пересчитаны по соотношению:

$$d_2 = d_1\sqrt{B_2/B_1}$$

где B_1 и d_1 — соответственно номинальный расход газа и диаметр отверстий сопла; B_2 и d_2 — соответственно требуемый расход газа и диаметр отверстий сопла.

Каждая радиационная труба снабжена тремя дросселирующими шайбами: на подводе газа и подводах первичного и вторичного воздуха. Диаметры шайб, служащих для выравнивания гидравлических сопротивлений труб, уточняются при пуске и наладке радиационных труб отдельной зоны или всей печи. Для надежности розжига радиационной трубы ТРР она снабжена специальным устройством — передвижным стаканом 6 (см. рис 10.7), с помощью которого перекрываются окна для инжекции.

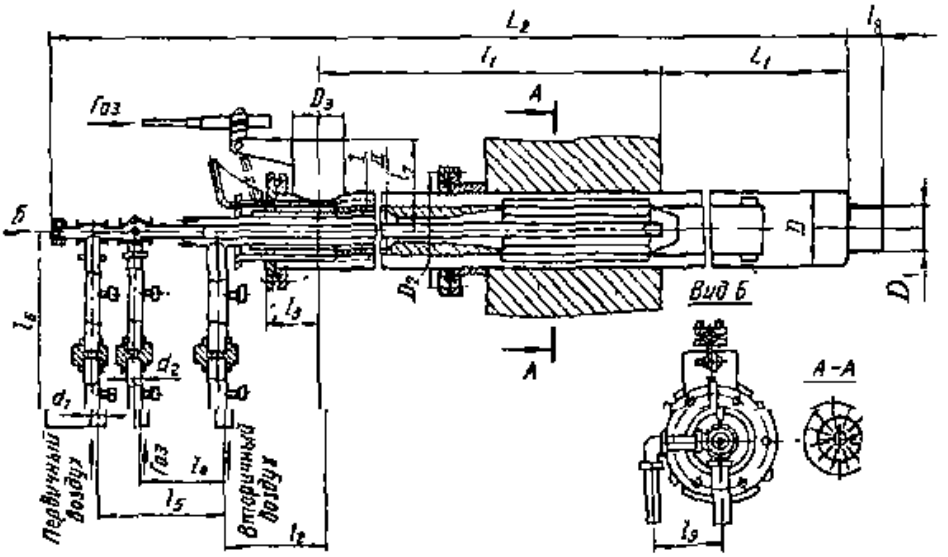


Рис. 10.8. Схема установки тупиковой радиационной трубы ТРР

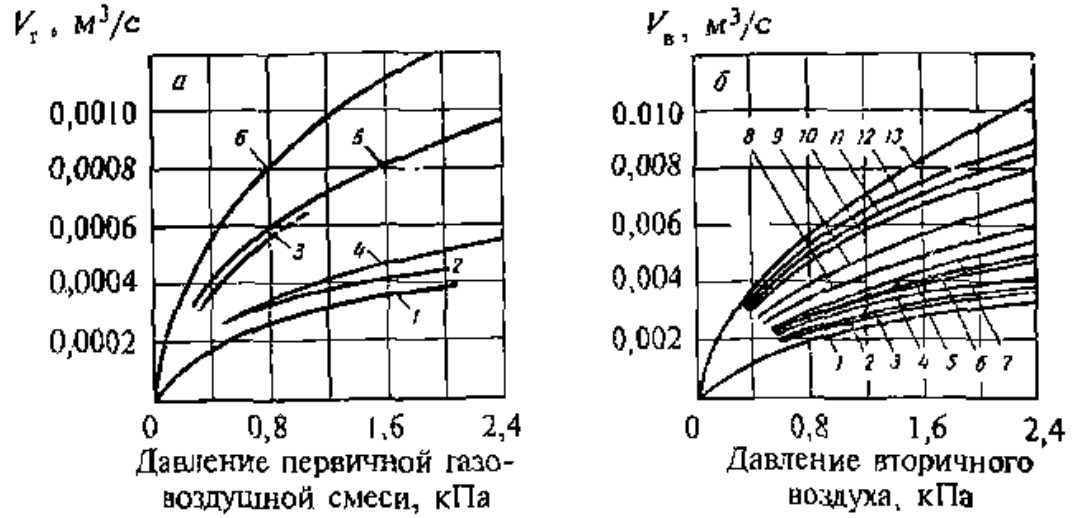


Рис. 10.9 Пропускная способность тупиковых радиационных труб типа ТРР:
а — количество газа для труб: *1* — ТРР-11-102/1100; *2* — ТРР-11,6-121/1050 и ТРР-12,5-121/1230; *3* — ТРР-14,6-121/1450 и ТРР-17,3-121/1650; *4* — ТРР-12,8-152/910; ТРР-14,0-152/1050 и ТРР-15,4-152/1150; *5* — ТРР-16,7-152/1240; ТРР-17,3-152/1360, ТРР-18,7-152/1450, ТРР-22,2-152/1650, ТРР-24,9-152/2000; ТРР-15,4-168/1050, ТРР-23,3-168/1650 и ТРР-27,6-168/2000; *6* —ТРР-25,6-190/1650 и ТРР-30,2-190/2000;
б — количество вторичного воздуха для труб: *1* — ТРР-11,0-102/110; *2* — ТРР-11,6-121/1050; *3* — ТРР-12,5-121/1230 и ТРР-12,8-152/910; *4* — ТРР-14,0-152/1050; *5* — ТРР-14,6-121/1450; ТРР-15,4-152/1150 и ТРР-15,4-168/1050; 6 —ТРР-16,7-152/1240; *7* — ТРР-17,3-121/1650 и ТРР-17,3-152/1360; *8* — ТРР-18,7-152/1450; *9* — ТРР-22,2-152/1660; *10* — ТРР-24,9-152/2000 и ТРР-23,3-168/1650; *11* — ТРР-25,6-190/1650, *12* — ТРР-27,6-168/2000; *13* —ТРР-30,2-190/2000

Розжиг радиационной трубы осуществляется при закрытых рабочих окнах *5* (положение *I*) Рабочее положение стакана — *II*. В случае необходимости эксплуатации радиационных труб при температуре 500—750 °С система рециркуляции должна быть отключена, передвижной стакан устанавливается в положение *I*, а отверстия сопла *9* рассверливаются.

Коэффициент рабочего регулирования радиационных труб ТРР в зависимости от их типоразмера находится в пределах от 5 до 7,8.

10.3. ТУПИКОВАЯ РАДИАЦИОННАЯ ТРУБА ТРН

Радиационная труба с настильным факелом ТРН разработана ВНИИпромгазом для отопления термических печей. Общий вид радиационной трубы типа ТРН показан на рис.10.10, а технические характеристики трех типоразмеров устройств, подвергавшихся испытанию, представлены в табл *10.5*.

Радиационная труба состоит из излучающей и жаровой труб, горелочного устройства и рекуператора.

Воздух, подводимый в трубу, на подводе к ней разделяется на два канала. По одному каналу воздух подается в смеситель, где образуется газовоздушная смесь при коэффициенте избытка первичного воздуха ~ 0,3. Эта

смесь подается в горелочное устройство и, вытекая через его завихритель, установленный на наружней поверхности горелки, движется в виде вихревого настильного потока вдоль жаровой трубы. Основной поток воздуха, подогретый в рекуператоре отходящими газами, перетекает во внутреннюю полость горелки и из нее через ситему отверстий в торцевой стенке вытекает вдоль стенки жаровой трубы. Сгорание газа происходит в настильном факеле по мере подмешивания к первичной газовоздушной смеси струй воздуха.

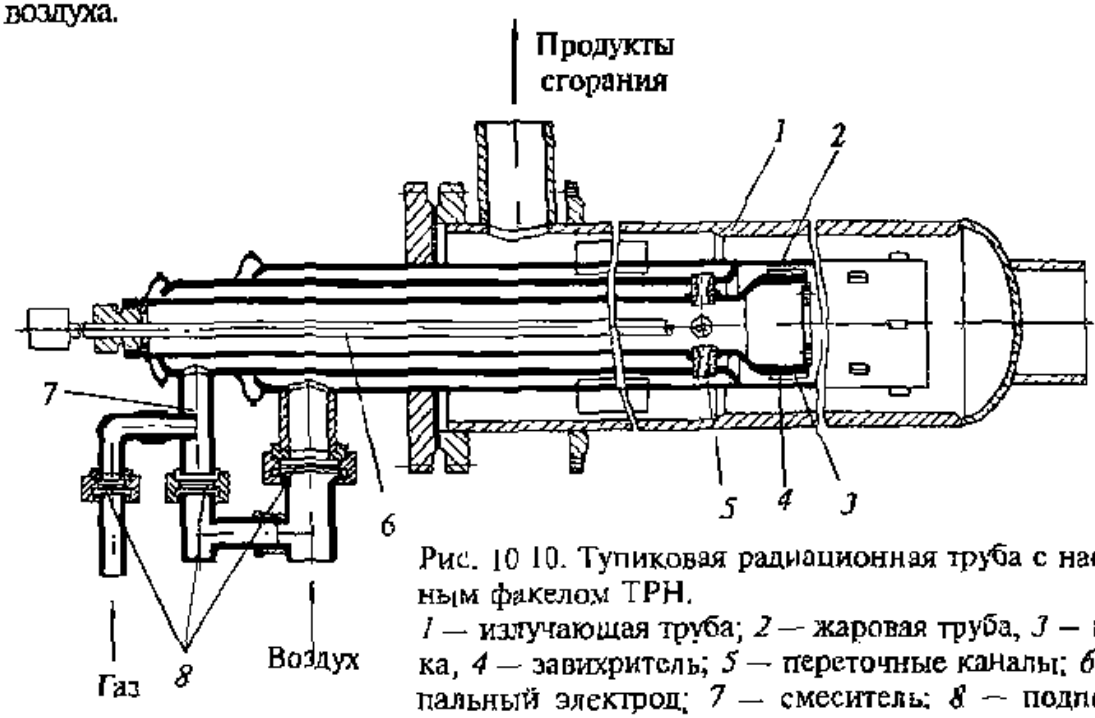


Рис. 10 10. Тупиковая радиационная труба с настильным факелом ТРН.
1 — излучающая труба; *2* — жаровая труба, *3* — горелка, *4* — завихритель; *5* — переточные каналы; *6* — запальный электрод; *7* — смеситель; *8* — подпорные шайбы

Таблица 10.5

Технические характеристики тупиковых радиационных труб ТРН (рис. 10.10)

Параметр	Размерность	Типоразмер		
		ТРН-11,0-102/1100	ТРН-24,9-152/2000	ТРН-30,2-190/2000
Тепловая мощность	кВт	14,6	36,4	46,6
Полезная тепловая мощность	кВт	12,1	27,5	34,7
Удельный теплосъем с излучающей поверхности	кВт/м^2	30,0	28,8	28,9
Номинальный расход газа	м^3/ч	1,4	3,5	4,5
Номинальное давление газа перед шайбой	кПа	2,9	2,6	2,94
Номинальный расход воздуха	м^3/ч	15,5	37,8	49,0
Номинальное давление вторичного воздуха после шайбы	кПа	0,30	0,245	0,84
Коэффициент расхода воздуха:				
первичный		0,32	0,32	0,32
суммарный		1,08	1,05	1,10
Коэффициент рабочего регулирования		5	5	5
Средняя температура излучающей трубы	°С	920	956	982
Неравномерность нагрева излучающей поверхности трубы	°С/м	27	30	12,5
Коэффициент полезного действия	%	82,6	75,5	74,0

10.4. U-ОБРАЗНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ТРУБЫ С ГОРЕЛКОЙ ВНИИМТ — СТАЛЬПРОЕКТ

U-образные радиационные трубы с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект нормализованы Стальпроектом и предназначены для сжигания природного газа.

При разработке U-образных радиационных труб Стальпроектом принята поузловая нормализация отдельных элементов трубы: корпуса, горелки, воздушного рекуператора. В этом случае к одному и тому же корпусу в зависимости от потребности технологии нагрева могут быть присоединены горелки различной конструкции, производительности и пределов регулирования.

Разработаны радиационные трубы четырех диаметров: 121, 152, 180 и 219 мм для рабочего пространства шириной: 1508, 1740 1972, 2320 и 2900 мм и для футеровок толщиной 348 и 464 мм.

U-образные радиационные трубы с горелкой конструкции ВНИИМТ — Стальпроект показаны на рис. 10 11, а их основные конструктивные размеры приведены в табл. 10.6.

Работа U-образной радиационной трубы, оборудованной горелкой ВНИИМТ — Стальпроект с частичным предварительным смешением газа и воздуха, осуществляется следующим образом. Газ поступает в трубу через газовое сопло, расположенное по оси корпуса внутри смесительной трубы. В смесительной трубе на участке, близком к выходному сечению сопла, выполнены отверстия, через которые истекающий из сопла газ инжектирует воздух в количестве, соответствующем $\alpha = 0{,}4-0{,}5$. Смесь газа и первичного воздуха, пройдя смесительную трубу, поступает в горелочную ветвь радиационной трубы. Сгорание газа начинается по выходе из смесительной трубы. Вторичный воздух проходит в зазоре между корпусом и смесительной трубой и входит в рабочее пространство трубы через полуциркульные отверстия по наружной поверхности наконечника-стабилизатора. Кроме того, часть воздуха поступает через кольцевую щель между наружной образующей стабилизатора и внутренней поверхностью корпуса. Двухступенчатая подача воздуха обеспечивает устойчивое горение газа с суммарным $\alpha = 1{,}05-1.1$ без выделения сажи во всем диапазоне изменения расхода газа, т. е. 1 : 6. Диаметры отверстий для истечения смеси газа и первичного воздуха, а также вторичного воздуха подбирают, исходя из скоростей при номинальных расходах 10–15 м/с при нормальных условиях. В этой трубе выгорание горючих в факеле растянуто на всю длину трубы. Максимум температуры газов на оси трубы наблюдается перед поворотным коленом. Воздух, идущий на сгорание газа, подогревается в рекуператоре, встаалленном в отводящую ветвь радиационной трубы. Конструкция рекуператора является типичной для U-образных радиационных труб Дымовые газы проходят в зазор между воздушной трубой рекуператора и корпусом радиационной трубы, а воздух подается по центральной трубе, доходит до торцовой стенки рекуператора и поступает в зазор между его внутренней и наружной трубками.

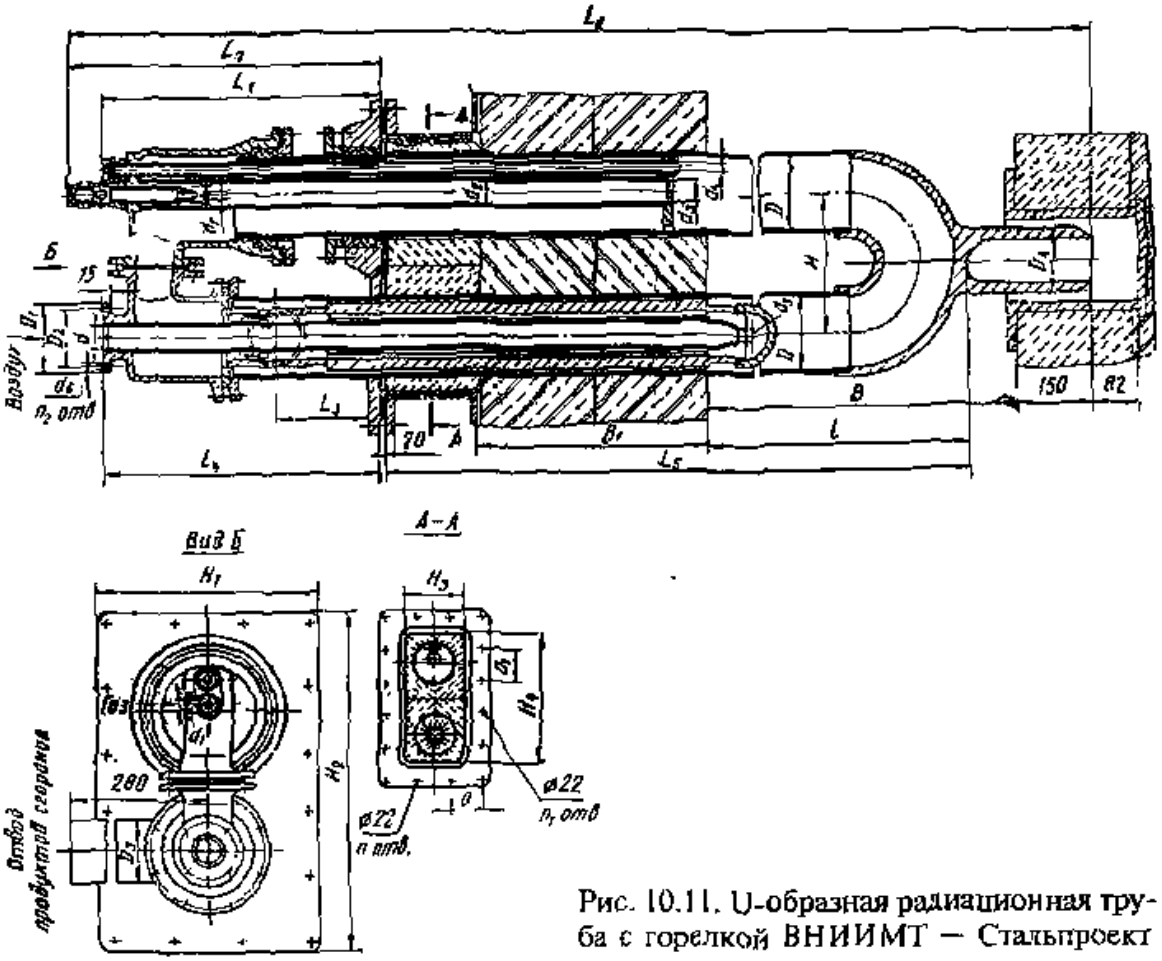


Рис. 10.11. U-образная радиационная труба с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект

Конструктивные размеры (мм)* U-образных радиационных труб с

Обозначение радиационной трубы	a	a_1	B	B_1	D	D_1	D_2	D_3	D_4	$d_г$	d	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
ТРУ-121-1964	120	130	1508	348	121	130	100	121	76	5	41	1/2"	36	30	20	28	13
ТРУ-121-2080	120	130	1508	464	121	130	100	121	76	5	41	1/2"	36	30	20	28	13
ТРУ-121-2196	120	130	1740	348	121	130	100	121	76	5	41	1/2"	36	30	20	28	13
ТРУ-121-2312	120	130	1740	464	121	130	100	121	76	5	41	1/2"	36	30	20	28	13
ТРУ-152-1964	120	130	1508	348	152	140	110	121	120	6	47	3/4"	41	36	22	29	13
ТРУ-152-2080	120	130	1508	464	152	140	110	121	120	6	47	3/4"	41	36	22	29	13
ТРУ-152-2196	120	130	1740	348	152	140	110	121	120	6	47	3/4"	41	36	22	29	13
ТРУ-152-2312	120	130	1740	464	152	140	110	121	120	6	47	3/4"	41	36	22	29	13
ТРУ-152-2428	120	130	1972	348	152	140	110	121	120	6	47	3/4"	41	36	22	29	13
ТРУ-152-2544	120	130	1972	464	152	140	110	121	120	6	47	3/4"	41	36	22	29	13
ТРУ-180-1964	150	160	1508	348	180	150	120	152	150	7	57	1"	45	40	24	30	13
ТРУ-180-2196	150	160	1740	348	180	150	120	152	150	7	57	1"	45	40	24	30	13
ТРУ-180-2428	150	160	1972	348	180	150	120	152	150	7	57	1"	45	40	24	30	13
ТРУ-180-2544	150	160	1972	464	180	150	120	152	150	7	57	1"	45	40	24	30	13
ТРУ-180-2892	150	160	2320	464	180	150	120	152	150	7	57	1"	45	40	24	30	13
ТРУ-180-3472	150	160	2900	464	180	150	120	152	150	7	57	1"	45	40	24	30	13
ТРУ-219-2776	150	160	2320	348	219	160	130	152	170	8	70	1"	50	45	26	32	13
ТРУ-219-2892	150	160	2320	464	219	160	130	152	170	8	70	1"	50	45	26	32	13
ТРУ-219-3356	150	160	2900	348	219	160	130	152	170	8	70	1"	50	45	26	32	13
ТРУ-219-3472	150	160	2900	464	219	160	130	152	170	8	70	1"	50	45	26	32	13

* Кроме указанных особо

При температуре поверхности трубы 800—850 °С температура дымовых газов перед рекуператором 1070—1100 °С, воздух нагревается в рекуператоре до 320 °С. Температура дымовых газов после рекуператора 650 °С. Дымовые газы отсасывают в печной дымопровод, а воздух поступает к горелке.

Рекуператор выполняется или из гладкостенных стальных труб (для радиационной трубы диаметром 121 мм), или из жаростойкого чугуна литым.

Как и для тупиковой радиационной трубы, создана унифицированная конструкция, т. е. можно заказывать изготовителю отдельно корпус трубы, горелку и рекуператор с возможностью замены горелки одной конструкции на другую. Схематически горелка ВНИИМТ — Стальпроект для U-образной радиационной трубы показана на рис. 10.12, а рекуператор этой трубы — на рис. 10.13.

Пропускная способность U-образных радиационных труб с горелкой ВНИИМТ—Стальпроект показана на рис. 10.14. Требуемые для эксплуатации давления газа и воздуха перед радиационной трубой подбираются изменением размеров дросселирующих шайб на подводах газа и воздуха. Для определения истинного давления перед радиационной трубой величина давления, найденная на рис. 10.14, суммируется с перепадом давления на шайбах, рассчитанного для данных расходов газа и воздуха.

Зажигание U-образной радиационной трубы производится с помощью переносного газового запальника, вставляемого в трубку, проходящую через горелку.

Для радиационной U-образной трубы диаметром корпуса 219 мм во ВНИИМТ разработана регенеративная система сжигания, состоящая из двух газовых фурм, двух компактных засыпных регенераторов и двух запально-дежурных горелок. Устройства одинаковы по конструкции и устанавливаются в обеих ветвях U-образной трубы.

Общий вид радиационной трубы с регенеративной горелкой показан на рис. 10.15. Техническая характеристика горелки приведена в табл. 10.7.

Газовая фурма представляет собой две расположенные друг в друге стальные

Таблица 10.6

горелкой ВНИИМТ — Стальпроект (рис. 10.11)

H	H_1	H_2	H_3	H_4	L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	Число отверстий			Масса трубы, кг
												n	n_1	n_2	
280	430	720	248	528	1403	500	580	166	490	1964	2740	3	5	4	250
280	430	720	248	528	1403	500	580	166	490	2080	2856	3	5	4	250
280	430	720	248	528	1635	500	580	166	490	2196	2972	3	5	4	260
280	430	720	248	528	1635	500	580	166	490	2312	3088	3	5	4	260
280	430	720	248	528	1403	540	620	166	530	1964	2825	3	5	4	340
280	430	720	248	528	1403	540	620	166	530	2080	2940	3	5	4	350
280	430	720	248	528	1635	540	620	166	530	2196	3056	3	5	4	350
280	430	720	248	528	1635	540	620	166	530	2312	3172	3	5	4	360
280	430	720	248	528	1867	540	620	166	530	2428	3288	3	5	4	360
280	430	720	248	528	1867	540	620	166	530	2544	3405	3	5	4	370
450	525	900	320	760	1403	560	640	200	545	1964	2845	3	5	4	470
450	525	980	320	760	1635	560	640	200	545	2196	3076	3	5	4	480
450	525	900	320	760	1867	560	640	200	545	2428	3308	3	5	4	490
450	525	900	320	760	1867	560	640	200	545	2544	3425	3	5	4	490
450	525	900	320	760	2215	560	640	200	545	2892	3772	3	5	4	500
450	525	900	320	760	2795	560	640	200	545	3472	4352	3	5	4	520
450	525	900	320	760	2215	570	650	200	555	2776	3666	3	5	4	670
450	525	900	320	760	2215	570	650	200	555	2892	3782	3	5	4	680
450	525	900	320	760	2795	570	650	200	555	3356	4246	3	5	4	710
450	525	900	320	760	2795	570	650	200	555	3472	4362	3	5	4	720

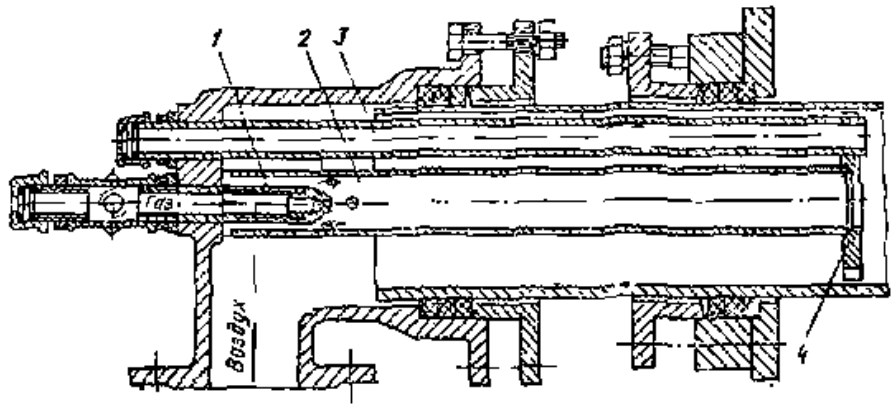


Рис. 10.12. Горелка ВНИИМТ — Стальпроект частичного предварительного смешения для U-образной радиационной трубы.
1 — газовое сопло; *2* — смесительная труба; *3* — труба запальника; *4* — наконечник-стабилизатор

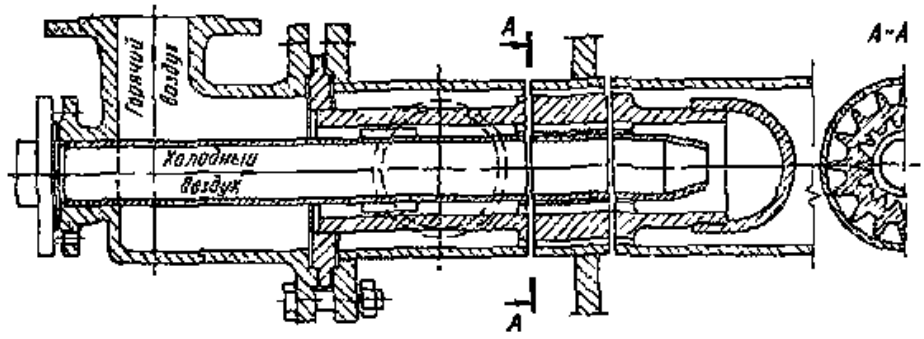


Рис. 10.13. Рекуператор U-образной радиационной трубы с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект

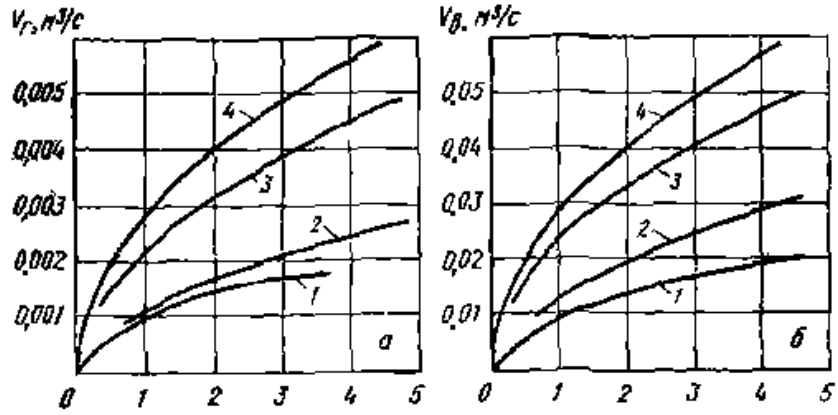


Рис. 10 14. Пропускная способность U-образных радиационных труб с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект.
а — по газу; *б* — по воздуху; диаметры труб. *1* — 121 мм; *2* — 152 мм, *3* — 180 мм, *4* — 219 мм

трубы диаметром 57×3,0 и 45×3,0 мм, в пространство между которыми подается природный газ. На конце труб имеется наконечник с шестью щелями с размерами 3×19 мм, через которые в рабочее пространство U-образной трубы поступает газ со скоростью 10 — 15 м/с.

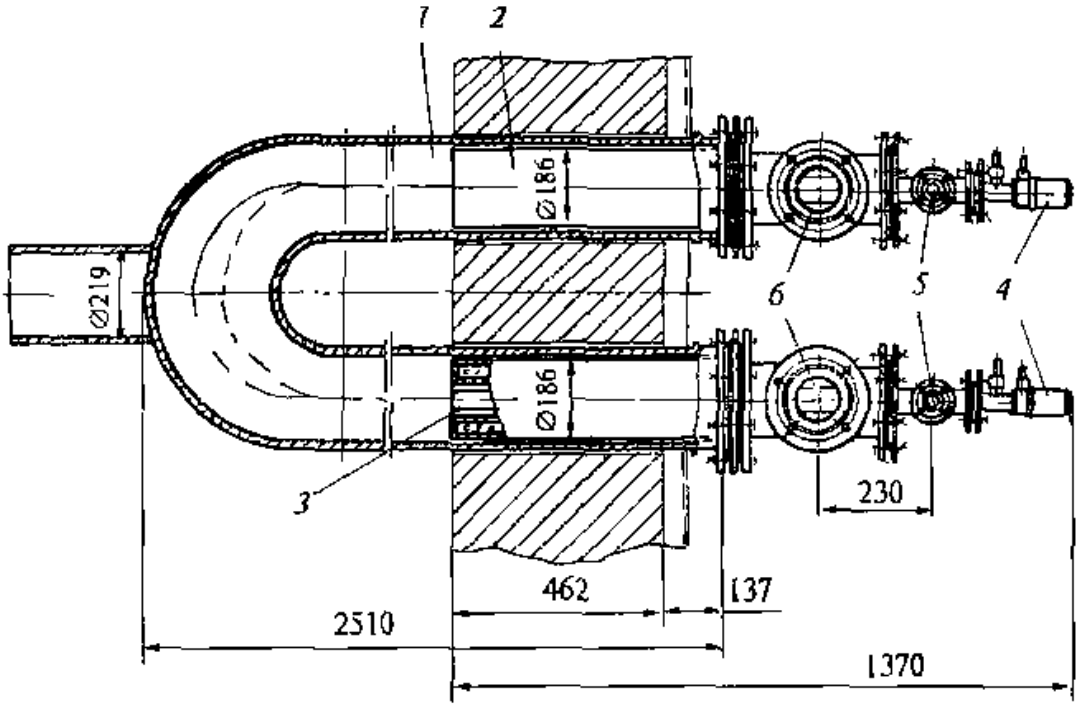


Рис. 10.15. U-образная радиационная труба с регенеративными горелками:
1 — излучающая труба; *2* — регенератор; *3* — газовое сопло; *4* — запаяьно-дежурная горелка; *5* — подвод газа; *6* — подвод воздуха (отвод дыма)

Таблица 10.7

Технические характеристики регенеративной горелки U-образной радиационной трубы (рис. 10.15)

Параметр	Размерность	Величина
Номинальный расход газа на газовую фурму	$м^3/ч$	10
Номинальный расход воздуха через регенератор	$м^3/ч$	125
Номинальное давление газа в газовой фурме	кПа	6
Номинальное давление воздуха на входе в регенератор	кПа	4
Расход газа на запально-дежурную горелку	$м^3/ч$	0.5
Расход воздуха на запально-дежурную горелку	$м^3/ч$	1.2
Давление газа на запально-дежурную горелку	кПа	12
Давление воздуха на запально-дежурную горелку	кПа	10
Температура воздуха до регенератора	°С	50
Температура воздуха после регенератора	°С	1000
Объем продуктов сгорания	$м^3/ч$	135
Температура продуктов сгорания после регенератора	°С	254–285
Время реверсирования потоков	с	30–60
Коэффициент расхода воздуха	–	1,2
Коэффициент рабочего регулирования	–	3,5

Регенератор выполнен в виде кольцевой кассеты с наружным диаметром 180 мм, внутренним – 65 мм и длиной – 400 мм, заполненной корундовыми шарами диаметром 5 мм. Торцы кассеты закрыты перфорированными решетками.

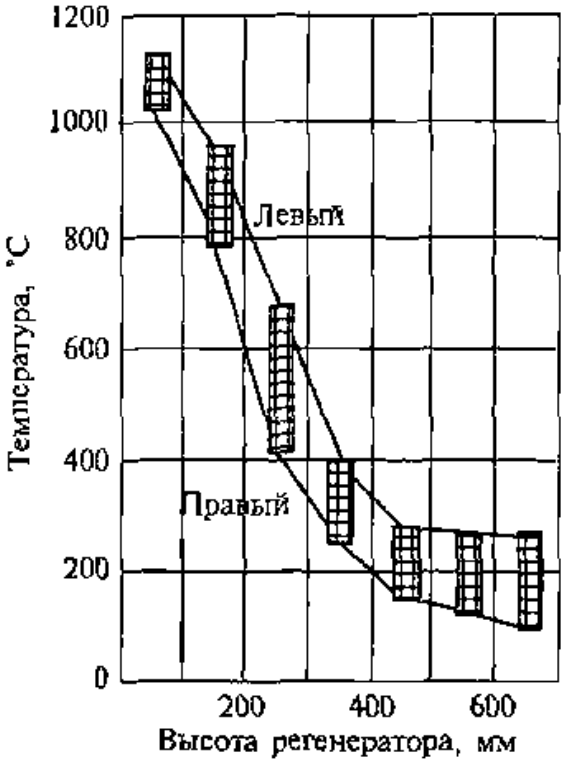


Рис. 10.16. Изменение температуры корундовых шаров по высоте регенераторов

Газовая фурма устанавливается внутри центральной части кассеты таким образом, чтобы срез ее сопла находился на срезе кассеты.

В центральной части кольцевой газовой фурмы устанавливается запально-дежурная горелка, снабженная устройством контроля пламени.

Газ поступает в одну из газовых фурм, на выходе из нее смешивается с нагретым воздухом, прошедшим через регенератор, и поджигается запально-дежурной горелкой. В это время продукты сгорания удаляются через другую регенеративную насадку, расположенную в другой ветви U-образной трубы и нагревают ее. Через определенное время подача газа на первую газовую фурму прекращается, газ начинает поступать на другую газовую фурму, производится реверсирование потоков воздуха и продуктов сгорания с помощью перекидного клапана, воздух начинает подаваться через нагретый регенератор, а продукты сгорания — через остывший. При этом запально-дежурные горелки на обеих газовых фурмах работают непрерывно.

Особенностью работы радиационных труб с регенеративными горелками является высокая равномерность нагрева излучающей поверхности при высокой температуре подогрева воздуха и низкой температуре уходящих продуктов сгорания. Это обеспечивается за счет реверса факела и достигается несмотря на небольшое различие в расходных характеристиках фурм каждой ветви и различие температуры корундовых шаров регенераторов (рис. 10.16).

10.5. U-ОБРАЗНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ТРУБЫ ТИПА ТРУ

U-образные радиационные трубы типа ТРУ, разработанные институтом ВНИИпромгаз, отличаются тем, что смесь газа с первичным воздухом подается в зазор между воздушной трубой и корпусом радиационной трубы, а основное количество воздуха подается по центральной воздушной трубе. Постепенное выгорание газа на поверхности разогретой трубы обеспечивает его устойчивое горение и равномерный теплообмен. Трубы предназначены для сжигания природного газа в печах с рабочей температурой до 1000 °С. Разработано несколько типоразмеров этой трубы диаметром 121, 152, 168 и 190 мм, однако для широкого применения рекомендуется радиационная труба диаметром 168 мм (рис. 10.17), модификации которой различаются длиной рабочей части.

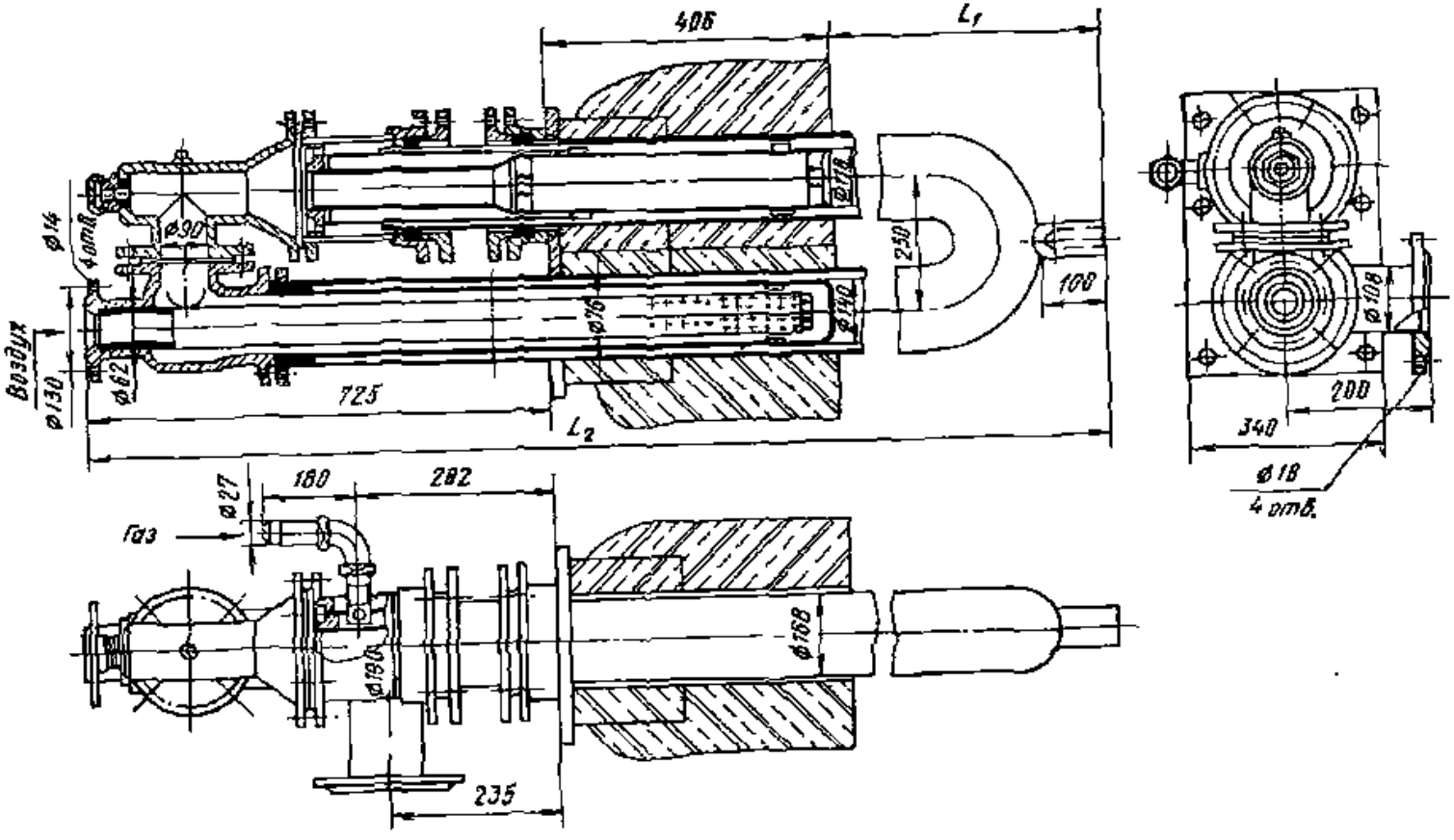


Рис. 10.17. U-образная радиационная труба типа ТРУ диаметром 168 мм

В радиационных трубах типа ТРУ применен рекуператор новой конструкции, в котором истечение воздуха из внутренней трубы происходит через большое количество отверстий, а струйный теплообмен при поперечном обтекании воздухом стенки дымового канала увеличивает коэффициент теплоотдачи и повышает температуру подогрева воздуха.

В табл. 10.8 приведены конструктивные размеры и основные характеристики U-образных радиационных труб типа ТРУ диаметром 168 мм, а на рис. 10.18 — пропускная способность этих радиационных труб по газу и воздуху. Зажигание газа в радиационной трубе осуществляется переносным газовым запальником, вставляемым по центру трубы через смотровое отверстие.

Таблица 10.8

Конструктивные размеры (мм) и основные характеристики U-образных радиационных труб типа ТРУ диаметром 168 мм (рис. 10.17)

Обозначение трубы	L	L_1	L_2	L_3	L_4	Излучающая поверхность, $м^2$	Масса трубы, кг	Номинальная пропускная способность по природному газу, $м^3/с$	к. п. д. при номинальной пропускной способности, %	Номинальная теплопроизводительность, кВт	Температура дымовых газов после рекуператора, °С
ТРУ 5 000-01	975	2105	406	150	0	0,87	253	0,00139	75	36	503
ТРУ 5 000-02	1420	2550	406	150	0	1,34	277	0,00222	72	56	570
ТРУ 5 000	1670	2720	326	120	50	1,62	285	0,00278	70	68	640
ТРУ 5 000-03	2100	3230	406	150	0	2,06	314	0,00333	67	78	670

Примечание. Пределы регулирования 1 : 10

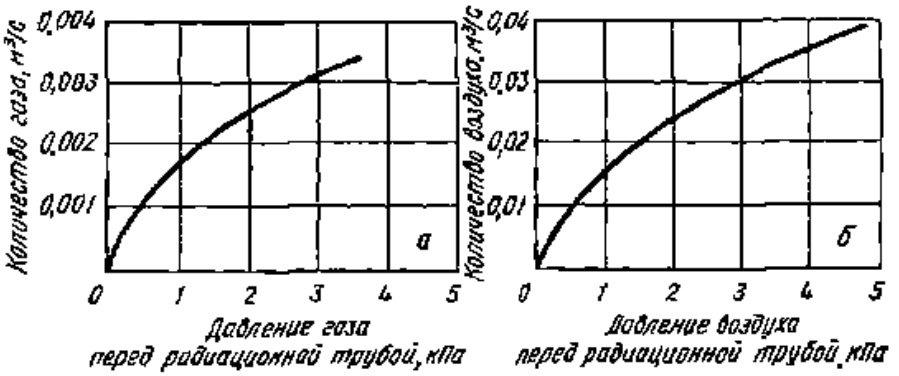


Рис 10.18. Пропускная способность U-образных радиационных труб типа ТРУ диаметром 168 мм: *а* — по газу; *б* — по воздуху

10.8. U-ОБРАЗНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ТРУБЫ ТИПА ТРУН

U-образная радиационная труба с настильным факелом ТРУН разработана ВНПО «Союзпромгаз».

Общий вид радиационной трубы показан на рис. 10.19, а технические данные испытанных образцов в табл. 10.9.

При работе радиационной трубы воздух разделяется на два потока. Основной поток подогретого воздуха подается по центру горелочного устройства. Часть воздуха после предварительного смешения с газом через завихритель вытекает вдоль поверхности излучающей трубы, где происходит горение в настильном факеле при постепенном подмешивании вторичного воздуха.

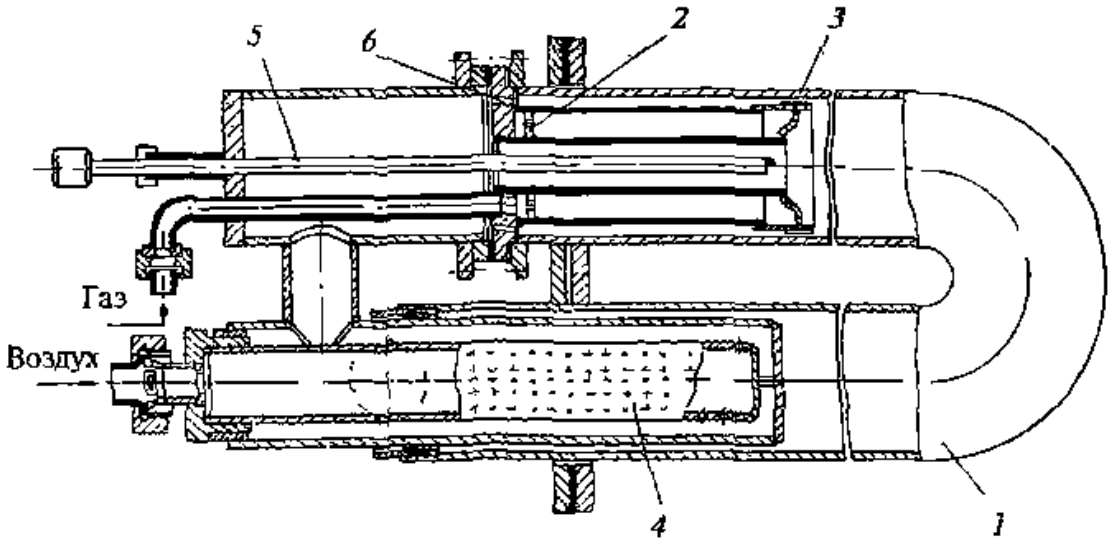


Рис. 10.19. U-образная радиационная труба с настильным факелом ТРУН:
1 — излучающий корпус; *2* — газовая шайба; *3* — завихритель; *4* — рекуператор; *5* — запальное устройство; *6* — воздушная шайба

Таблица 10.9

Технические характеристики радиационных труб типа ТРУН (рис. 10.19)

Параметр	Размерность	Типоразмер		
		ТРУН-57-121/2250	ТРУН-80-152/2250	ТРУН-86-168/2250
Тепловая мощность	кВт	84,8	122,4	125,0
Полезная тепловая мощность	кВт	57	80	86
Удельный теплосъем с излучающей поверхности	кВт/м^2	35	37	36
Номинальный расход газа	м^3/ч	8,1	11,7	12,4
Номинальное давление газа перед шайбой	кПа	3,92	3,92	3,82
Номинальный расход воздуха	м^3/ч	85,0	123	128,5
Номинальное давление воздуха перед шайбой	кПа	4,54	4,51	4,56
Коэффициент расхода воздуха:				
первичный		0,47	0,35	0,45
суммарный		1,05	1,03	1,04
Коэффициент рабочего регулирования		8,1	11,7	10,4
Средняя температура излучающей трубы	°С	957	1020	925
Неравномерность нагрева излучающей поверхности трубы	°С/м	28	24	11
Коэффициент полезного действия	*%*	*71*	*65*	*69*

10.7. U-ОБРАЗНАЯ РАДИАЦИОННАЯ ТРУБА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ РТН

U-образная радиационная труба РТН разработана НПО «ВНИИТмаш». Общий вид радиационной трубы показан на рис. 10.20, а технические характеристики испытанной серии приведены в табл. 10.10

Горелочное устройство этой радиационной трубы выполнено в виде центрального канала для подвода предварительно подготовленной смеси, оканчивающегося стабилизатором с осевым соплом, и периферийного канала для подачи воздуха, подогретого в рекуператоре. Периферийный канал заканчивается диффузором, который формирует щелевой проход для истечения воздуха. Сгорание газа происходит в растянутом факеле.

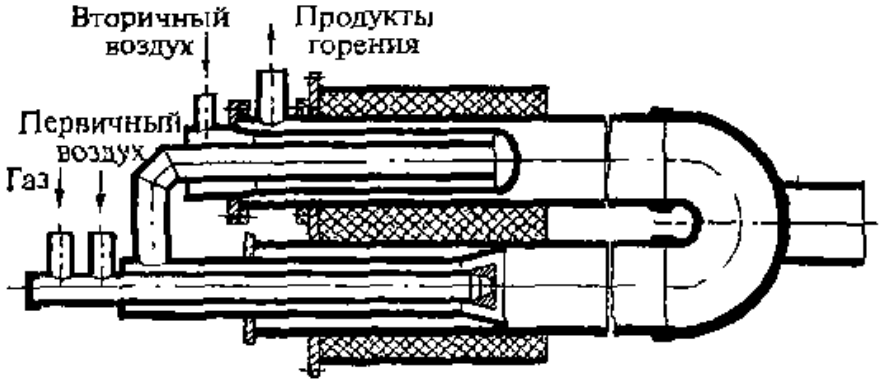


Рис. 10.20. U-образная радиационная труба низкого давления РТН:
1 — излучающая труба, *2* — труба для первичной смеси; *3* — стабилизатор; *4* — рекуператор

Таблица 10.10

Технические характеристики U-образных радиационных труб РТН (рис. 10.20)

Параметр	Размерность	Типоразмер	
		РТН-35/1000	РТН-57/1700
Номинальная тепловая мощность	кВт	36	57
Полезная тепловая мощность	кВт	31,3	42
Удельный теплосъем с излучающей поверхности радиационной трубы	кВт/м^2	38,3	34,8
Номинальный расход газа	м^3/ч	3,5	5,5
Номинальное давление газа в коллекторе (перед шайбой)	кПа	1,34	2,50
Номинальный расход воздуха	м^3/ч	38,2	60,2
Номинальный расход первичного воздуха	м^3/ч	4,8	7,7
Давление первичного воздуха.	кПа		
перед шайбой		1,73	5,29
после шайбы		0,06	0,18
Номинальное давление вторичного воздуха в коллекторе:	кПа		
перед шайбой		2,3	5,9
после шайбы		0,06	0,54
Коэффициент расхода воздуха:			
первичный		0,14	0,14
суммарный		1,1	1,1
Коэффициент рабочего регулирования		5	7,9
Средняя температура излучающей трубы	°С	945	918
Неравномерность нагрева излучающей поверхности радиационной трубы	°С/м	60	12
к.п.д.	%	87	73

10.8. W-ОБРАЗНАЯ РАДИАЦИОННАЯ ТРУБА

На рис. 10.21 показана W-образная радиационная труба, разработанная Стальпроектом и устанавливаемая в вертикальных протяжных печах. Труба работает с разрежением и за счет разрежения, создаваемого дымососом, осуществляется поступление воздуха, идущего на сжигание газа. Особенностью радиационной трубы являются наличие рекуператора, вынесенного из пределов футеровки рабочего пространства, и постоянно уста-

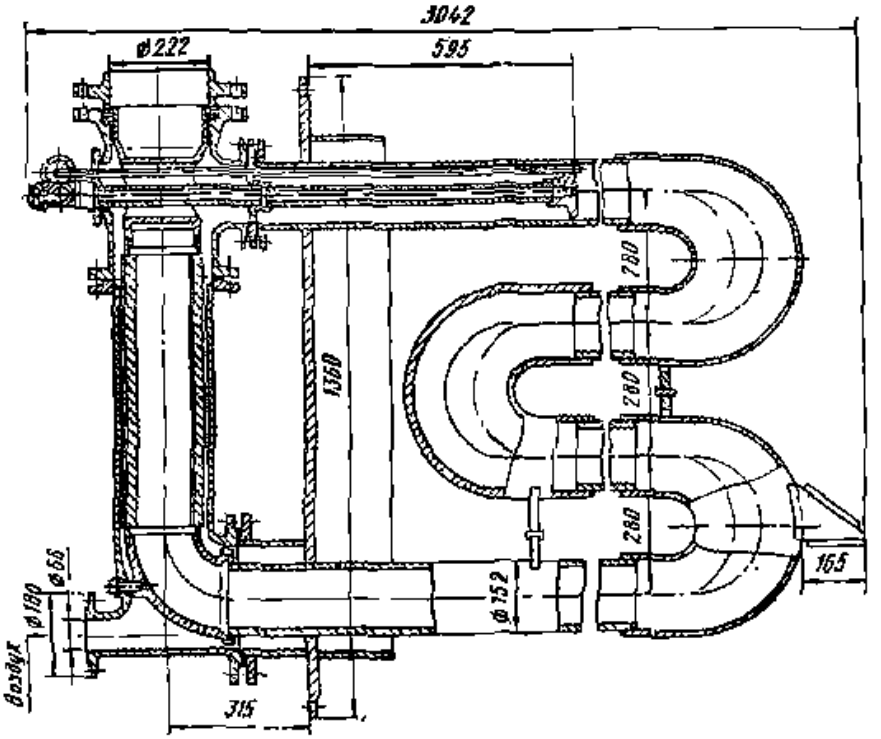


Рис. 10.21. W-образная радиационная труба

новленная дежурная горелка. Труба предназначена для сжигания природного или смешанного газа.

В зависимости от теплоты сгорания газа и требуемой теплопроизводительности меняется диаметр газового сопла.

Глава 11. ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЫ, ГАЗОВЫЕ ОБОГРЕВАТЕЛИ

Теплогенераторы представляют собой устройства для подогрева воздуха, используемого для воздушного отопления, вентиляции помещений, для получения смеси продуктов сгорания и воздуха, применяемого в качестве теплоносителя в сушильных процесах.

В теплогенераторах сжигается в основном природный газ или легкое дизельное топливо Различают два типа теплогенераторов: смесительные воздухонагреватели и рекуперативные. В смесительных воздухонагревателях продукты сгорания топлива смешиваются в определенных пропорциях с нагреваемым воздухом, поднимая его температуру. В воздухонагревателях *рекуперативного типа тепло от продуктов сгорания передается воздуху* через разделяющую стенку.

Теплогенераторы оснащаются либо обычными горелочными устройствами, применяемыми для печей и топок, либо специальными, являющимися неотъемлемой частью воздухонагревателя.

11.1. ГАЗОВЫЙ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЬ ГЦ-70

Газовый воздухонагреватель ГЦ-70 разработан научно-производственными фирмами «Горелочный центр» и «Горизонт».

Общий вид воздухонагревателя показан на рис. 11.1, а технические характеристики при сжигании природного газа приведены в табл. 11.1.

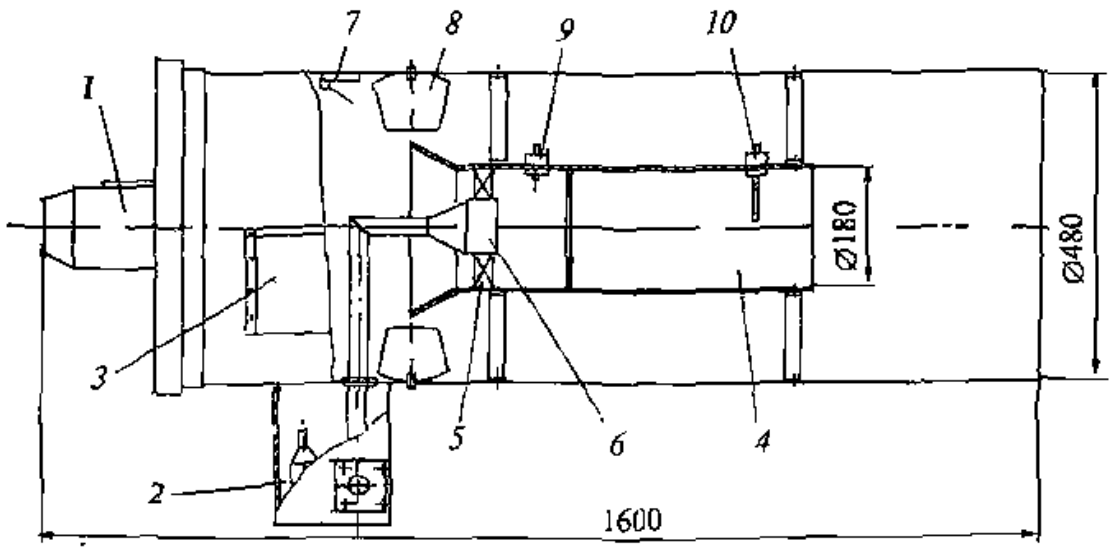


Рис. 11.1. Газовый воздухонагреватель ГЦ-70:
1 — вентилятор с приводом; *2* — сборка газовой арматуры; *3* — пульт управления; *4* — камера сгорания, *5* — завихритель, *6* — газовое сопло; *7* — датчик наличия потока; *9* — электрод зажигания; *10* — датчик наличия пламени

Таблица 11.1

Технические характеристики воздухонагревателей (рис. 11.1)

Наименование параметра	Размерность	Типоразмер	
		ГЦ-70	ГЦ-100
Тепловая мощность номинальная	кВт	70	94
Расход газа номинальный	$м^3/ч$	6,9	9,5
Давление газа перед горелкой номинальное	кПа	0,84	1,21
Коэффициент расхода воздуха на выходе из камеры горения		1,08	1,12
Коэффициент рабочего регулирования		1,7	1,58
Расход воздуха	$м^3/ч$	4000	5000
Температура на выходе из камеры горения	°С	1250	1200
Мощность электродвигателя вентилятора	кВт	0,37	0,57
Масса	кг	40	50

Воздухонагреватель состоит из цилиндрического корпуса, на входной стороне которого установлен осевой вентилятор, камеры сгорания, системы управления и газовой арматуры.

Камера сгорания расположена на оси корпуса воздухонагревателя и разделена подпорной диафрагмой на две части: камеру смешения и камеру горения. Входной участок камеры смешения выполнен в виде конфузора, за которым установлен аксиальный лопаточный завихритель воздуха. Во втулке завихрителя установлено газовое сопло с радиальными отверстиями для выхода газа.

В камере смешения установлена свеча зажигания, в камере горения — датчик контроля пламени ионизационного типа.

Для улучшения охлаждения камеры сгорания ее стенки с наружной стороны имеют продольные ребра.

В кольцевом зазоре между корпусом воздухонагревателя и входным конфузором камеры сгорания установлены поворотные подпорные лопатки. В верхней части кольцевого зазора установлен датчик наличия потока воздуха.

На корпусе *воздухонагревателя крепятся прибор управления и газовая* арматура.

Воздухонагреватель работает в двух режимах: вентиляции и обогрева. *При работе в режиме вентиляции включается только вентилятор.* Нагнетаемый вентилятором воздух разделяется на два потока. Основной поток воздуха движется в кольцевом зазоре между корпусом и камерой сгорания и вытекает в отапливаемое или вентилируемое помещение. Часть потока воздуха заходит в конфузорный участок камеры горения, через завихритель попадает в камеру смешения и горения и затем присоединяется к общему воздушному потоку.

При работе в режиме обогрева после включения вентилятора и поступления сигнала от датчика наличия потока воздуха, который срабатывает под действием динамического напора, включается подача газа в горелку и подается напряжение на свечу зажигания.

Воспламенившаяся смесь газа и первичного воздуха сгорает на длине камеры горения. Образовавшиеся продукты полного горения подмешиваются к основному потоку воздуха, увеличивая его температуру.

Воздухонагреватель работает в автоматическом режиме. Включение и выключение воздухонагревателя производится по сигналу от датчика температуры, установленного в отапливаемой зоне.

11.2. ГАЗОВЫЙ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЬ ГЦ-100

Воздухонагреватель газовый ГЦ-100 разработан совместно научно-производственными фирмами «Горелочный центр» и «Горизонт», г. Екатеринбург.

Общий вид воздухонагревателя показан на рис. 11.2, а техническая характеристика приведена в табл. 11.1.

Принципиально конструкция воздухонагревателя ГЦ-100 аналогична устройству ГЦ-70. Имеющиеся отличия касаются камеры сгорания и горелочного устройства.

При работе осевого вентилятора поток воздуха, нагнетаемый в цилиндрический канал, неравномерный особенно на начальном участке вблизи лопаточного аппарата. Основной поток воздуха движется по периферии канала вблизи его стенок. На оси корпуса наблюдается обратное течение воздуха в сторону вентилятора. Для обеспечения подвода части воздуха, необходимого для сгорания газа, к месту выхода газовых струй из сопла,

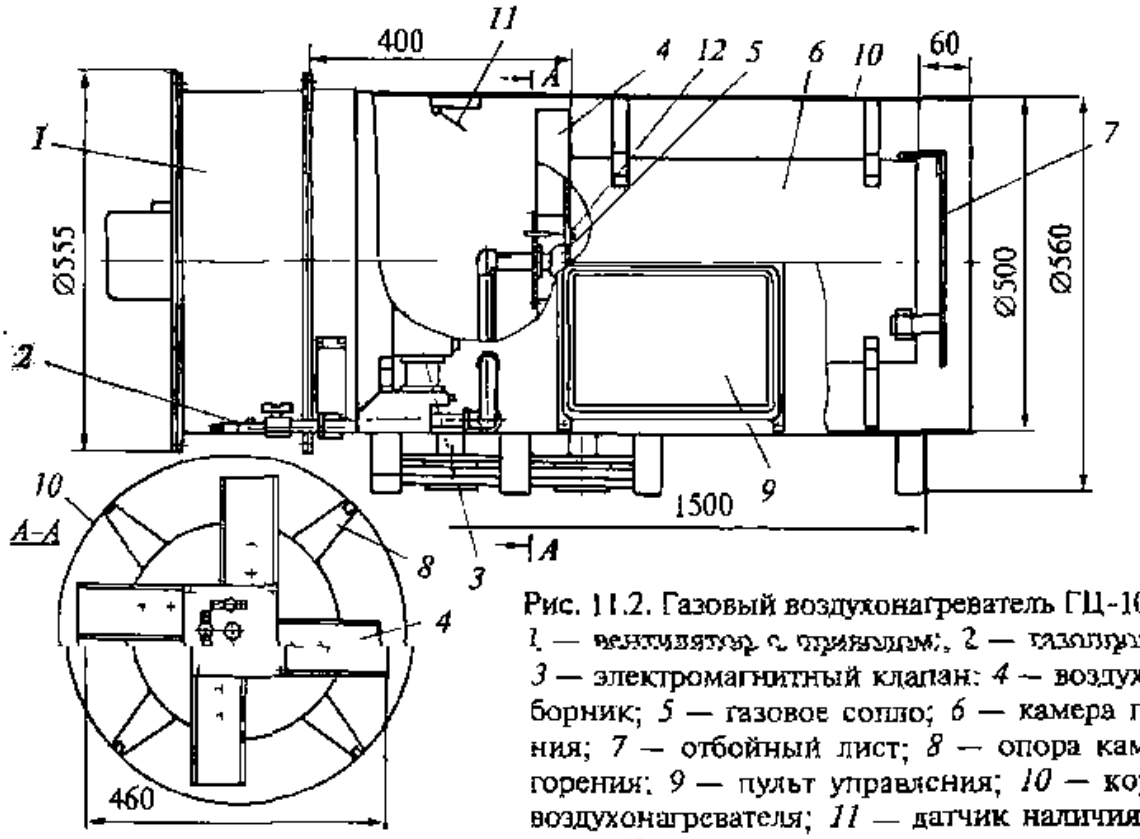


Рис. 11.2. Газовый воздухонагреватель ГЦ-100.
1 — вентилятор с приводом; *2* — газопровод; *3* — электромагнитный клапан; *4* — воздухозаборник; *5* — газовое сопло; *6* — камера горения; *7* — отбойный лист; *8* — опора камеры горения; *9* — пульт управления; *10* — корпус воздухонагревателя; *11* — датчик наличия потока; *12* — электрод зажигания

расположенного на оси камеры сгорания, камера сгорания имеет четыре воздухозаборных устройства. Эти устройства выполнены в виде П-образных приемников, расположенных в кольцевом зазоре между стенкой камеры сгорания и корпусом воздухонагревателя. Выходящие потоки из каждого воздухозаборника тангенциально направляются в горелочное устройство, где создается вихревой поток, способствующий интенсивному смесеобразованию. Воспламенение смеси и контроль наличия пламени осуществляются электродами, установленными на торцевой стенке горелки.

Для улучшения перемешивания продуктов сгорания с транзитным потоком воздуха на выходе из камеры горения установлен съемный отбойный лист.

11.3. ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЫ ТИПА ТЛ

Теплогенераторы ТЛ-0,14 и ТЛ-0,7 являются устройствами смесительного типа. Они разработаны НПФ «Горелочный центр» для получения теплоносителя с температурой 400–800 °С.

Общий вид теплогенератора ТЛ-0,14 показан на рис. 11.3. Воздухоподводящий корпус с тыльной стороны закрыт фланцем, на котором при помощи шпилек крепится кольцевой газовый коллектор. К передней стенке коллектора приварены лопатки завихрителя воздуха, между которыми ус-

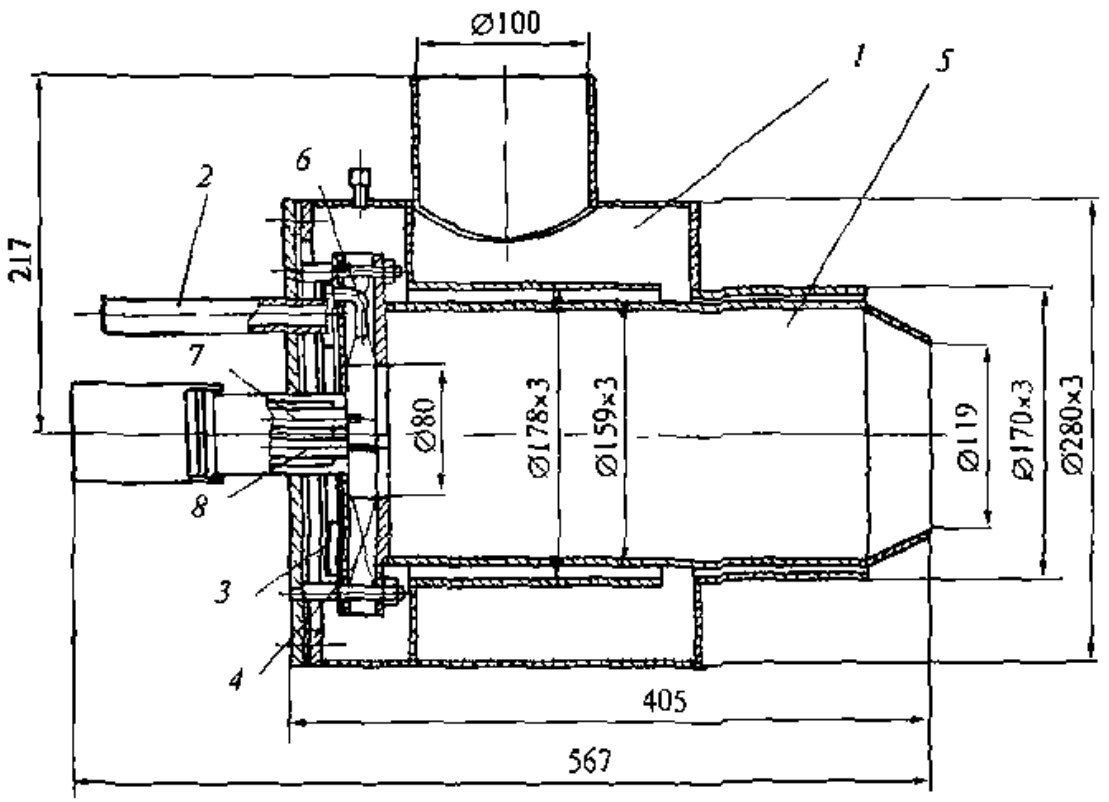


Рис. 11.3. Теплогенератор ТЛ-0,14.
1 — воздухоподводящий корпус; *2* — газовый патрубок; *3* — газовый коллектор; *4* — завихритель воздуха, *5* — камера горения; *6* — газовое сопло, *7* — электрод зажигания; *8* — датчик контроля пламени

тановлены газовые сопла. К завихрителю примыкает камера сгорания. На торцевом фланце теплогенератора установлены электроды для зажигания смеси и контроля наличия пламени.

При работе теплогенератора воздух, подводимый в корпус, разделяется на два потока. Один поток, охлаждая встречным движением стенку камеры сгорания, заходит в воздушный завихритель и смешивается с газом, вытекающим из сопел. Вторая часть воздуха прямотоком охлаждает выходной торец камеры сгорания и подмешивается к продуктам полного горения. Окончательное перемешивание потоков происходит в газоходе для подачи теплоносителя.

Теплогенератор ТЛ-0,7 выполнен аналогично теплогенератору ТЛ-0,14, но имеет две камеры сгорания (рис. 11.4). В первой камере происходит смешение потоков и их неполное горение. Во второй камере благодаря подводу воздуха через дополнительный завихритель происходит дожигание остатков горючих компонентов.

Природный газ в зону смешения с воздухом подается через сопла периферийного газового коллектора и через аксиальный лопаточный завихритель, установленный на оси теплогенератора в месте размещения запального устройства.

Такая схема подачи газа и воздуха позволяет повысить качество сжигания топлива и расширить диапазон регулирования теплопроизводительности и температуры теплоносителя.

Технические характеристики теплогенераторов ТЛ-0,14 и ТЛ-0,7, полученные при испытаниях, приведены в табл. 11.2.

Расходные характеристики теплогенераторов ТЛ-0,14 и ТЛ-0,7 по газовому и воздушному трактам приведены на рис. 11.5.

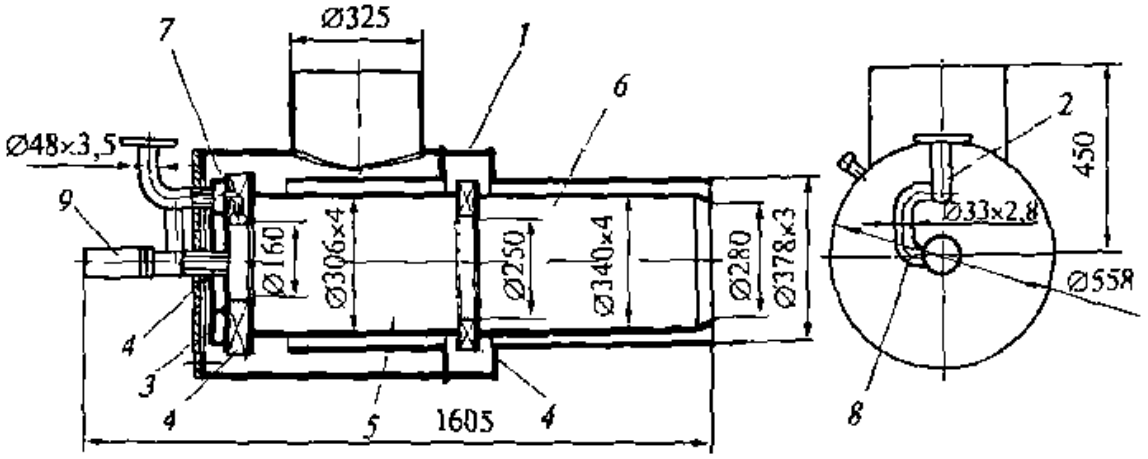


Рис. 11.4. Теплогенератор ТЛ-0,7:
1 — воздухоподводящий корпус; *2* — газовый патрубок; *3* — газовый коллектор; *4* — завихритель; *5* — камера горения; *6* — камера дожигания; *7* — газовое сопло; *8* — газовая перемычка; *9* — запальное устройство

Таблица 11.2

Технические характеристики теплогенераторов ТЛ-0,14 и ТЛ-0,7 (рис. 11.3, 11.4)

Наименование параметра	Размерность	Типоразмер	
		ТЛ-0,14	ТЛ-0,7
Тепловая мощность номинальная	кВт	140	700
Расход газа номинальный	м³/ч	14	70
Номинальное давление газа	кПа	2,46	2,05
Расход воздуха номинальный	м³/ч	424	2765
Наименование давления воздуха	кПа	1,22	1,2
Диапазон изменения коэффициента расхода воздуха	—	2,85÷4,2	3,8÷4,6
Максимальная тепловая мощность	кВт	175	820
Коэффициент рабочего регулирования	—	5	5
Коэффициент предельного регулирования	—	7,6	7,6
Температура теплоносителя	°С	600–800	400–600



Рис. 11.5. Расходные характеристики теплогенераторов:
а — ТЛ-0,14; *б* — ТЛ-0,7; *1* — по газовому тракту, *2* — по воздушному тракту

11.4. ГОРЕЛОЧНЫЙ БЛОК ГБТ-2000

Горелочный блок ГБТ-2000 разработан научно-производственной фирмой «Горелочный центр», г. Екатеринбург. Блок предназначен для сжигания природного газа в потоке воздуха с целью получения теплоносителя, используемого в процессе сушки, например при получении кирпича. Горелочный блок монтируется непосредственно в воздуховоде.

Техническая характеристика горелочного блока ГБТ-2000:

Номинальная тепловая мощность, МВт 2
Давление газа перед блоком, кПа 30
Расход природного газа, м³/ч 200
Коэффициент рабочего регулирования 3,0
Расход подогреваемого воздуха, тыс м³/ч 85
Температура подогрева воздуха, °С 120
Разрежение в воздуховоде (теплогенераторе), Па 250

Общий вид горелочного блока показан на рис. 11.6.

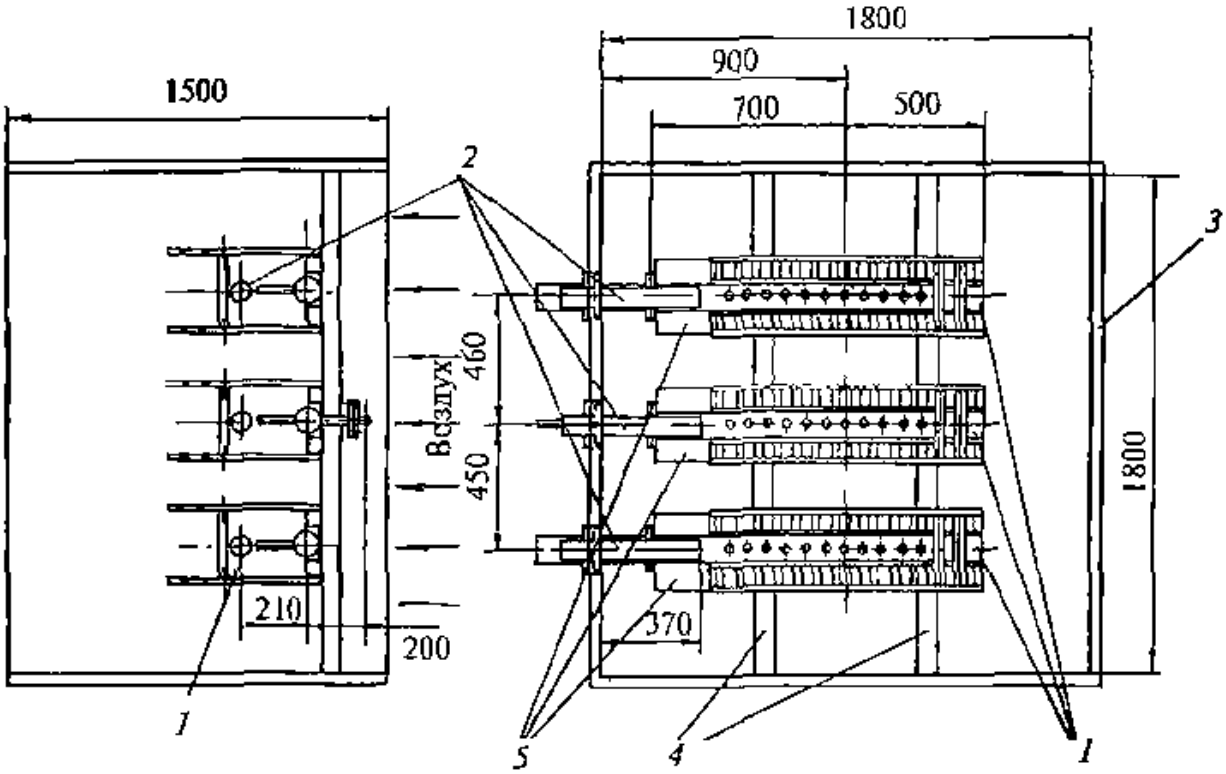


Рис. 11.6. Горелочный блок ГБТ-2000
1 — инжекционная горелка; *2* — запальная горелка ЗИГ-26И; *3* — кожух-воздуховод; *4* — монтажная стойка; *5* — экран

Горелочный блок ГБТ-2000 состоит из трех блочных инжекционных горелок, каждая из которых снабжена запальной инжекционной горелкой ЗИГ-26И с электророзжигом и ионизационным датчиком контроля пламени. Горелочный блок размещается внутри несущего металлического кожуха теплогенератора размерами 1.8×1,8×1,5 м, при этом блочные инжекционные горелки крепятся к монтажным стойкам внутри кожуха в горизонтальном положении в три яруса по высоте, а запальные горелки — на боковой стенке теплогенератора на одном уровне с блочными инжекционными горелками. Запальная горелка располагается внутри кожуха теплогенератора, снаружи остаются монтажный фланец с клеммной коробкой и газоподводящий штуцер. Для предохранения факела запальной горелки от сносящего воздействия потока воздуха около выходного наконечника каждого запальника установлен защитный экран.

Все блочные инжекционные горелки одинаковы по конструкции. Горелка среднего яруса имеет самостоятельный подвод газа для работы блока в режиме «минимальное пламя».

Блочная инжекционная горелка (рис. 11.7) представляет собой газовый коллектор (труба $D_y = 70$ мм), в который ввернуты 13 газовых смесителей, обеспечивающих предварительное смешение газа с воздухом.

Газовые смесители представляют собой цилиндры внутренним диаметром 27 мм и длиной 114 мм. Торцевая стенка выточена заодно с газовым соплом внутренним диаметром 3,0 мм, что обеспечивает соосность газового сопла и смесителя и исключает возможность утечек газа через разъемные соединения. На начальном участке смесителя просверлены два ряда отаер-

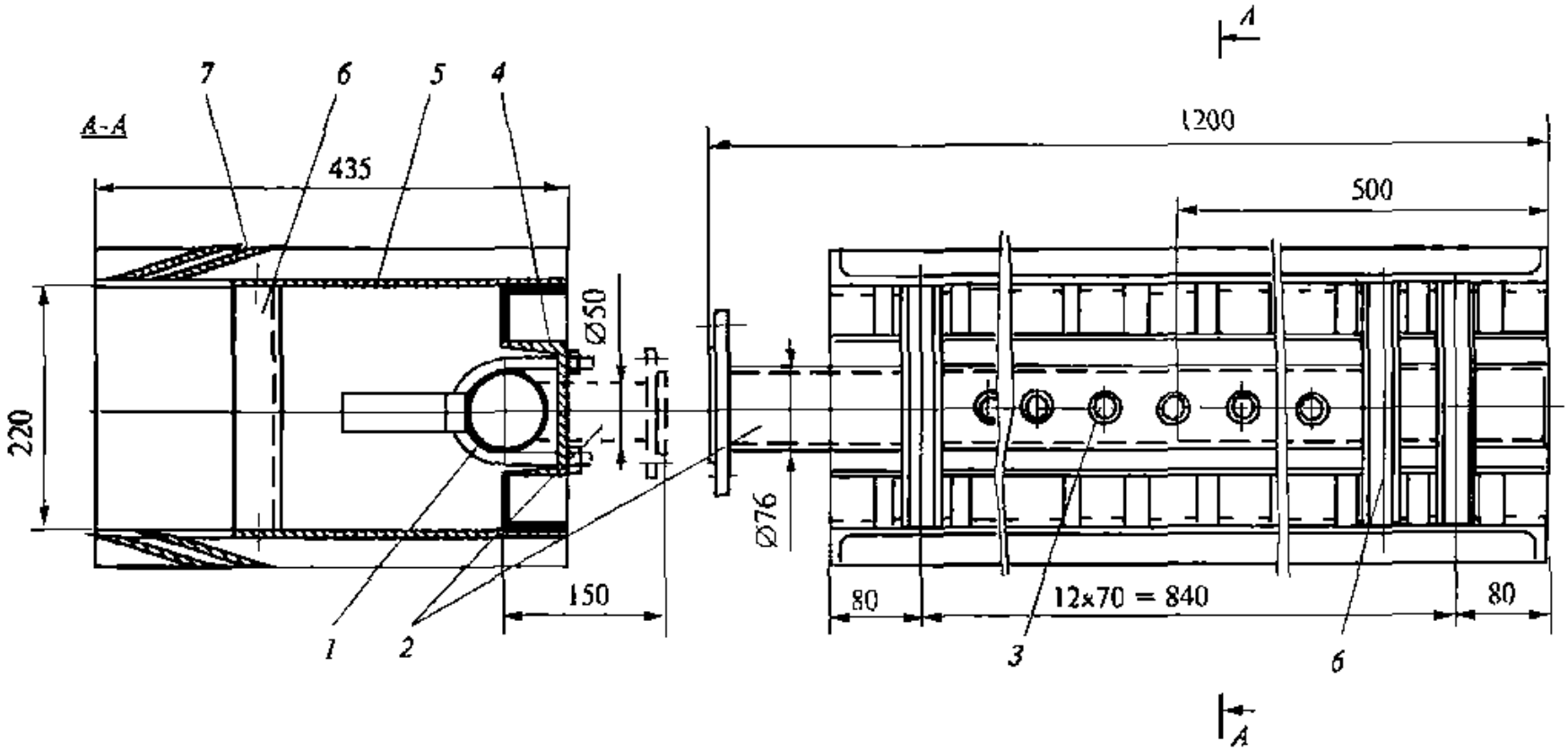


Рис. 11.7. Инжекционная горелка блока ГБТ-2000:
1 — газовый коллектор; *2* — патрубок подвода газа; *3* — смеситель; *4* — кожух; *5* — экран; *6* — стабилизатор; *7* — жалюзи

стий по 8 штук в каждом диаметром 8 мм в первом и 6 мм во втором ряд для подсоса воздуха в смеситель.

Коллектор крепится хомутами к монтажным стойкам внутри кожуха теплогенератора. К этим же монтажным стойкам крепится кожух горелки, обеспечивающий распределение воздушного потока для наилучшей стабилизации воспламенения, полного выгорания топлива и смешения продуктов горения с остальным воздухом. Фронтальная часть кожуха изготовлена из уголков с прорезями для прохода необходимой части воздуха к смесителям. На этих уголках закреплены верхний и нижний экраны с жалюзи для прохода воздуха в хвостовой части экранов.

Для обеспечения жесткости кожуха верхний и нижний экран соединены между собой уголками-рассекателями, расположенными напротив каждого смесителя. Уголки ориентированы вершиной к срезу смесителя и являются стабилизаторами воспламенения газовоздушной смеси.

Смесители, кожухи и стабилизатор изготовлены из жаростойкой стали.

Конструкция теплогенератора предусматривает три режима работы горелочного блока: розжиг, работа на малом огне и работа на большом огне.

При наличии факелов запальных горелок осуществляется розжиг блока на малом огне. При этом газ подается только в горелку среднего яруса по газопроводу малого огня. Истекая через газовые отверстия смесителей, струя газа присасывает необходимое количество первичного воздуха через отверстия на боковых стенках смесителя. Смесь истекает внутрь корпуса инжекционной блочной горелки и, обтекая уголки-рассекатели, воспламеняется от пламени запальной горелки. Стабилизация пламени осуществляется в застойных зонах за уголками-рассекателями. Пламя передается от ближних к запальнику смесителей к дальним огневой эстафетой. Горящие факелы присасывают вторичный воздух, необходимый для полного сжигания газа, который поступает через щелевые отверстия системы жалюзи в кожухе и с боковых сторон горелки. На выходе из инжекционной блочной горелки продукты сгорания смешиваются с остальным воздухом, просасываемым вентилятором через теплогенератор.

Дальнейшее увеличение тепловой мощности теплогенератора осуществляется переходом на большой огонь. При этом, аналогично вышеописанному, происходит розжиг блочных инжекционных горелок верхнего и нижнего ярусов, коллекторы которых подсоединены к газопроводу большого огня. При работе в этом режиме горелка среднего яруса работает при максимальном давлении в газопроводе малого огня, а давление в газопроводе большого огня изменяется оператором в зависимости от необходимой температуры теплоносителя и его расхода. При этом увеличивается или уменьшается расход газа на горелки верхнего и нижнего ярусов.

Горелочный блок работает практически без шума, так как он весь находится внутри кожуха в потоке воздуха.

Коэффициент рабочего регулирования горелочного блока — 3. Видимая длина факела не превышает 1 м.

11.5. ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЫ ВОСТИО

Восточным институтом огнеупоров разработана серия теплогенераторов, предназначенных для получения теплоносителя с температурой от 100 до 1000 °С. Теплогенераторы используются в основном для отопления сушил огнеупорной промышленности. Теплогенераторы выпускаются по индивидуальному заказу.

Теплогенератор состоит из воздухоподводящего корпуса и встроенной футерованной камеры горения. Габаритные размеры теплогенераторов и соотношение размеров их элементов зависят от требуемой температуры и количества теплоносителя

Разработаны две серии теплогенераторов, отличающихся конструкциями горелочных устройств и устройствами для ввода воздуха.

В теплогенераторе, показанном на рис 11.8, *а* применяются специальные горелочные устройства и имеется общий подвод воздуха.

Воздух от вентилятора поступает в теплогенератор через трубопровод *1* сплошным потоком, который затем разделяется на два параллельных потока патрубком *2*. Воздух, движущийся по патрубку, через коническую распределительную решетку *3* поступает в камеру горения для сжигания топлива. Количество воздуха, подаваемого на горение, регулируется дросселем *5*. Топливо подают в горелку (форсунку) *6*. Футеровку *7* выполняют из термостойких огнеупорных материалов. На выходе топочная камера имеет стабилизирующую решетку Воздух на разбавление топочных газов движется по трубе *1* и в камере *9* смешивается с продуктами полного сгорания. Расход воздуха на разбавление регулируют дросселем *10*. Розжиг теплогенератора осуществляют запальником через люк *11*. Напряжение топочного объема до $6{,}4 \cdot 10^6$ Вт/м^3.

В теплогенераторе, показанном на рис 11.8, *б*, применяются нормализованные горелочные устройства, устанавливаемые на торцевой стенке камеры горения с индивидуальным подводом воздуха для сжигания топлива и горелочным туннелем.

Основные технические характеристики теплогенераторов с выносной горелкой, приведены в табл 11.3.

Таблица 11.3

Технические характеристики теплогенераторов ВостИО (рис. 11.8, б)

Номинальный расход природного газа, м^3/ч	Тип горелки	Внутренний диаметр камеры горения, мм	Длина камеры горения, мм
10	ГНП-2	350	800
20	ГНП-3	464	1280
30	ГНП-4	580	1300
60	ГНП-6	850	1500
80	ГНП-7	850	1800
150	ГНП-9	925	1800
200	ГМГ-2М	1045	1900

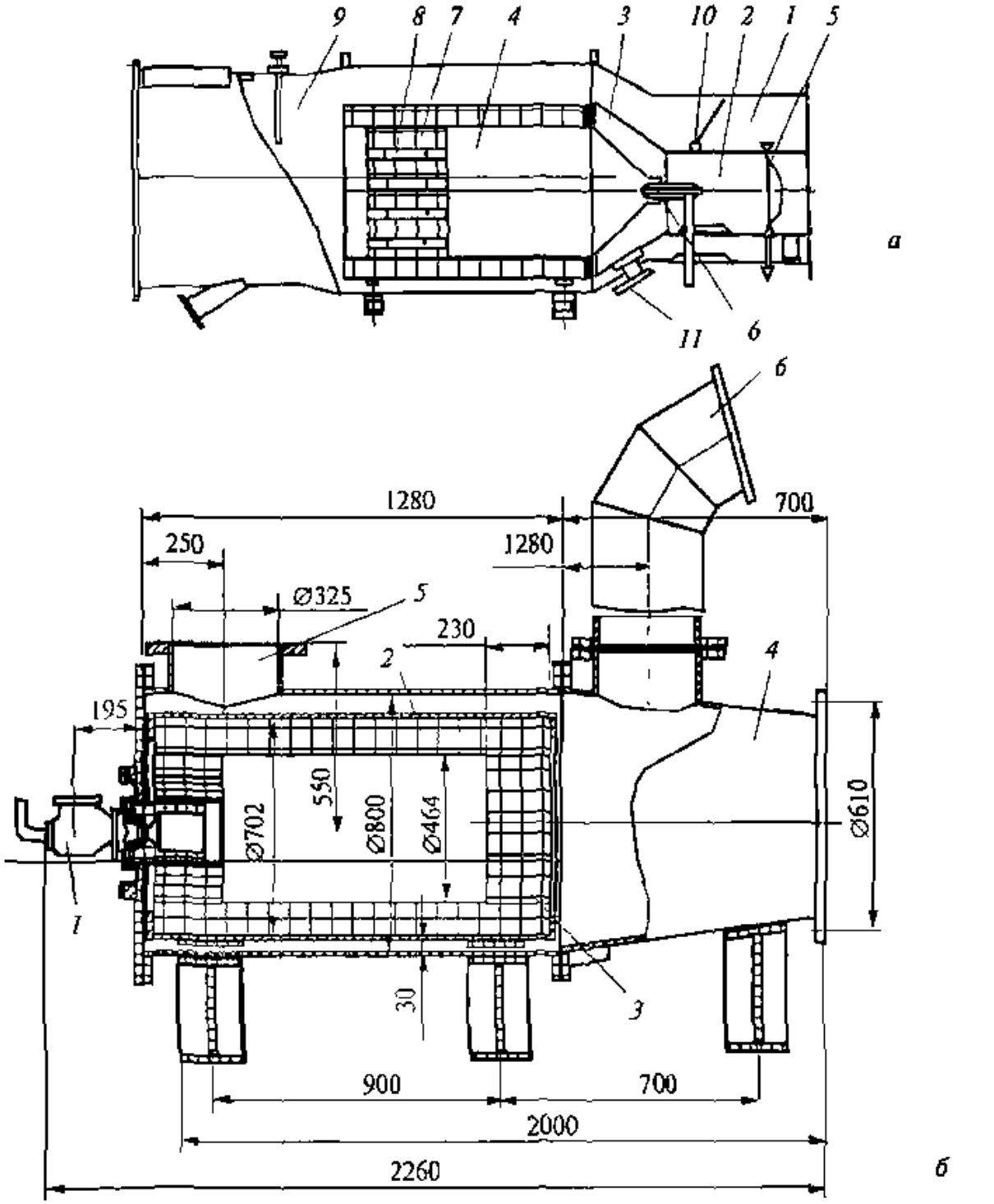


Рис. 11.8 Теплогенератор ВостИО.
а — со встроенной горелкой (обозначения приведены в тексте); *б* — с выносной горелкой; *1* — горелка, *2* — камера горения; *3* — перфорированная стенка; *4* — камера смешения, *5* — ввод воздуха-разбавителя; *6* — взрывной клапан

11.6. ГАЗОВОЗДУШНЫЙ КАЛОРИФЕР ГВК-0,3

На ряде предприятий эксплуатируются газовоздушные калориферы **ГВК**-0,3, разработанные Средазэнергошветметом.

Теплогенератор может работать как под давлением в камере горения,

так и под разрежением. Общий вид теплогенератора показан на рис. 11.9.

Теплогенератор состоит из входного воздухорегулирующего устройства, газовой горелки и камеры горения. Воздухорегулирующее устройство выполнено в виде цилиндрического патрубка, разделенного втулкой на центральный и периферийный каналы. В каждом канале установлен лопаточный шибер, состоящий из 8 лопаток, объединенных общим приводом.

Горелочное устройство имеет газовый коллектор, расположенный внутри воздушного корпуса, в котором смонтированы входные участки трех смесительных труб. На боковой поверхности труб наклонно к их оси расположены отверстия для истечения в их внутреннюю полость природного газа. Внутри смесительных труб коаксиально установлены дополнительные трубы. На входной стороне смесительные и дополнительные трубы открыты для входа воздуха. На выходной стороне смесительных труб установлены завихрители, которые способствуют закрутке как воздуха, так и газовоздушного потока. Торцевая стенка горелки имеет обмазку из огнеупорного материала.

Камера горения имеет жаровую трубу, промежуточную обечайку и наружный корпус. Для улучшения перемешивания продуктов горения, вытекающих из жаровой трубы, и воздуха в корпусе установлены шнековые завихрители.

При работе теплогенератора регулирование качества горения обеспечивают за счет регулирования расхода воздуха, подаваемого в горелку. Регулирование температуры теплоносителя обеспечивают изменением расхода воздуха, проходящего через периферийный канал воздухораспределителя.

Розжиг теплогенератора осуществляют электрогазовым запальником, контроль пламени — оптическим или ионизационным датчиком.

При работе теплогенератора под давлением патрубки для установки датчиков и смотровые лючки в корпусе выполнены газоплотными. При работе теплогенератора под разрежением герметичность корпуса не требует-

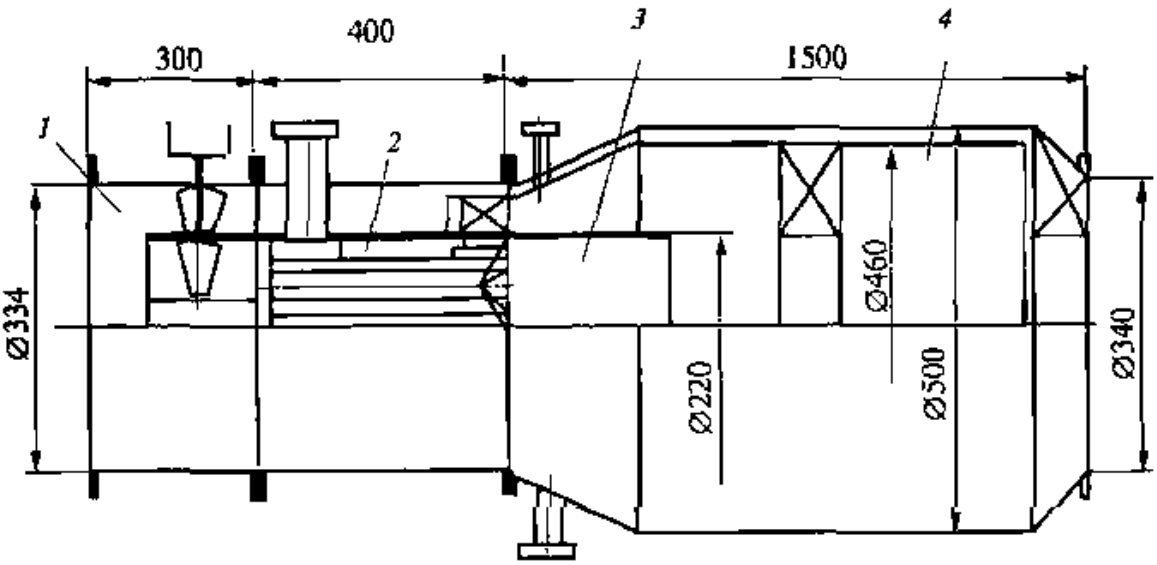


Рис. 11.9. Газовоздушный калорифер ГВК-0,3:
1 — воздухораспределитель; *2* — горелка; *3* — камера горения; *4* — камера смешения

ся, однако тепловая мощность и возможность регулирования параметров теплоносителя существенно зависят от газодинамического режима агрегата, на котором установлен теплогенератор.

На некоторых режимах при работе теплогенераторов наблюдается проскок пламени в смесительные трубы и разогрев завихрителей горелок. При форсировках возможен отрыв пламени от торцевой стенки горелки и пульсационный режим горения.

Газовоздушный калорифер ГВК-3, работающий при подаче воздуха на сжигание природного газа и на разбавление продуктов горения за счет разрежения в тепловом агрегате ~ 0,3 кПа имеет следующие технические характеристики.

Номинальная тепловая мощность, кВт 195
Расход природного газа, м^3/ч 19,7
Давление газа перед горелкой, кПа 5,2
Температура теплоносителя, °С 270–280

11.7. ГАЗОВОЗДУШНЫЙ КАЛОРИФЕР ГВК-10

Для получения теплоносителя с температурой не более 500 °С и в количестве около 45 тыс. м^3/ч Средазэнергоцветметом разработан смесительный газовоздушный калорифер ГВК-10, показанный на рис. 11.10. Калорифер ГВК-10 применяется в установках для сушки концентратов руд цветных и черных металлов и других материалов.

Калорифер состоит из воздухоподводящего корпуса, горелочного устройства и механизма перераспределения потока воздуха.

Корпус воздухоподводящий является составной частью газохода, подающего воздух от дутьевого вентилятора до сушильного агрегата.

Газовая горелка расположена на оси воздушного корпуса. Она включает в себя газовый коллектор с подводящим патрубком, газопередающие трубы, оканчивающиеся соплами, и центральную воздушную полость с выходными патрубками, в каждом из которых установлен завихритель. Торцевой фланец горелки футерован огнеупорным бетоном.

Механизм перераспределения потока воздуха состоит из воздухоприемного конуса, подвижного клапана и привода, имеющего зубчатую рейку, шестерню и штурвал, установленный на боковой поверхности воздухоподводящего корпуса.

Вблизи торцевой стенки горелки установлен отражательный конус.

В связи с тем, что выход газовоздушной смеси рассредоточен на большой кольцевой площади торца горелки, розжиг ее рекомендуется производить при помощи двух одновременно работающих запальных устройств.

Газоход для подачи теплоносителя после калорифера выполняется футерованным. Этот участок газохода выполняет функцию камер горения и смешения.

При работе калорифера природный газ через газопередающие трубы подводится к выходным патрубкам. Истечение газа происходит через отвер-

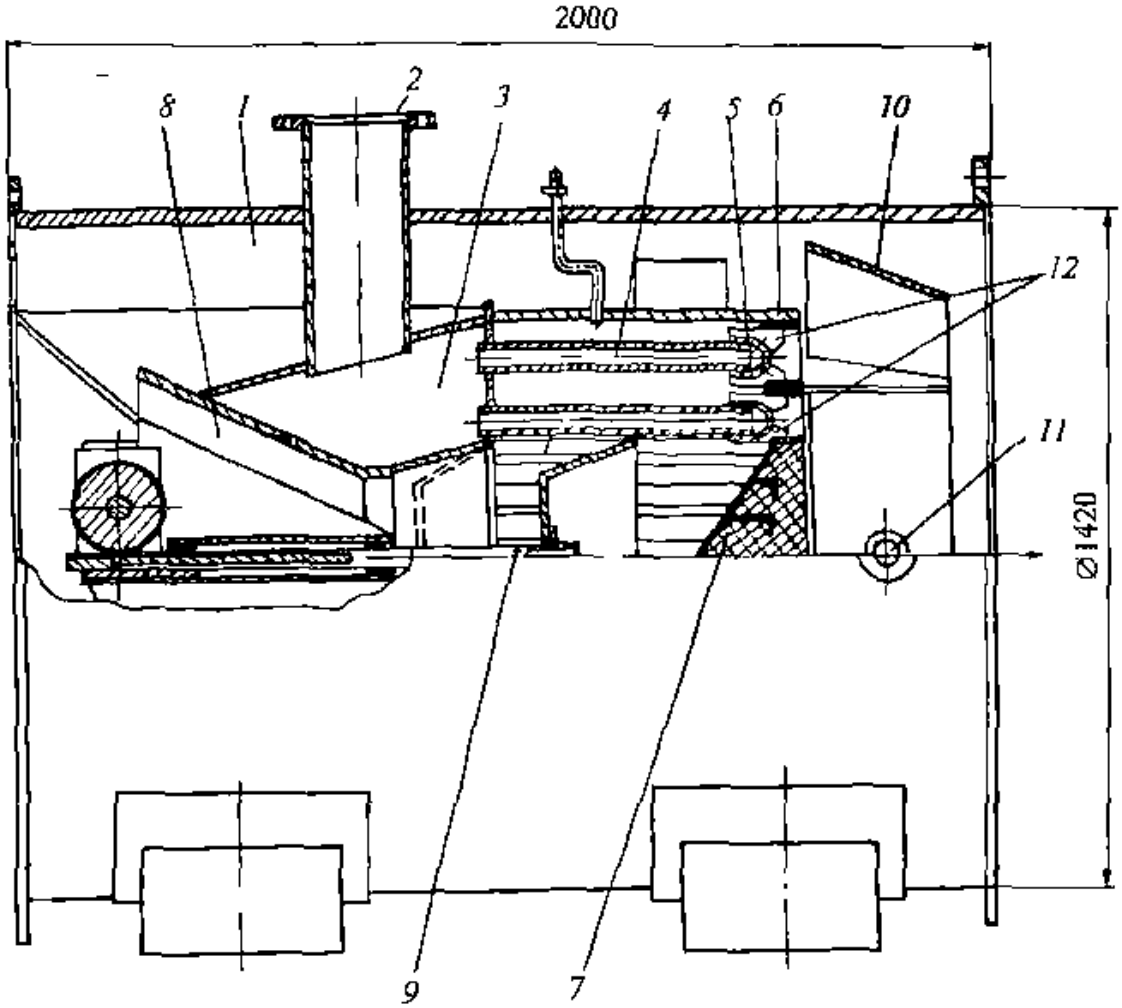


Рис. 11.10. Газовоздушный калорифер ГВК-10:
1 — воздухоподводящий корпус, *2* — патрубок подвода газа, *3* — газовый коллектор; *4* — газовые трубы; *5* — газовые сопла, *6* — обечайка; *7* — огнеупорная стенка; *8* — воздухоприемный конус; *9* — подвижный клапан; *10* — отражательный конус; *11* — отверстие для ввода запальника, *12* — завихрители

стия сопел в вихревые потоки первичного воздуха, который заходит во внутреннюю полость горелки через воздухоприемный конус и отверстие, открытое подвижным клапаном.

Образовавшаяся смесь воспламеняется и образует систему вихревых микрофакелов, расположенных по периферии выходного торца горелки.

Воздух, движущийся вдоль стенок корпуса калорифера, частично прямоструйным потоком перетекает в газоход, частично отклоняется отражательным конусом непосредственно в зону горения за торцом горелки.

Изменение соотношения первичного и основного потоков воздуха осуществляется путем изменения положения подвижного клапана.

Техническая характеристика газовоздушного калорифера ГВК-10:

Номинальная тепловая мощность, МВт	11,6
Расход природного газа, м^3/ч	1200
Давление газа перед горелкой, кПа	0,90
Давление воздуха на входе в калорифер, кПа	1,0

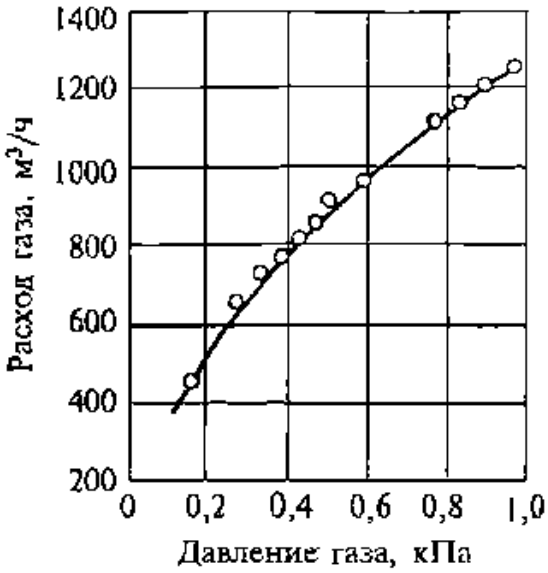


Рис. 11.11. Расходная характеристика калорифера по газовому тракту

Расходная характеристика калорифера по газовому тракту приведена на рис. 11.11.

При работе калорифера около его торцевой стенки возникает застойная зона шириной около 600 и длиной не более 300 мм. Размеры этой зоны, а также низкая температура футеровки не обеспечивают надежную стабилизацию пламени, что приводит к возникновению пульсаций на некоторых режимах.

Несмотря на разделение газового потока, выходящего из горелки, на многочисленные струи, перемешивание потоков происходит неинтенсивно. Качество горения определяется расходом первичного воздуха. Вторичный воздух, идущий прямоструйным потоком, в горении практически не участвует. Характерное распределение концентрации газов в потоке теплоносителя на расстоянии ~ 5,0 м от торцевой стенки калорифера приведено на рис. 11.12.

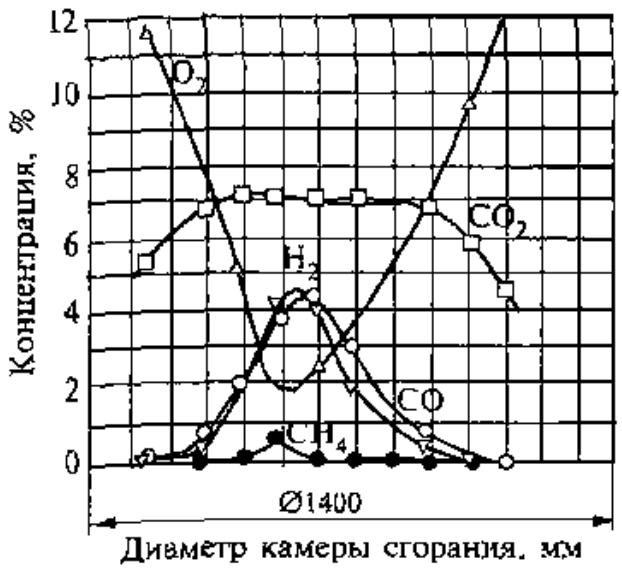


Рис. 11.12. Состав продуктов горения в сечении факела теплогенератора ГВК-10 на расстоянии от горелки 5 м при V_1 = 1000 м³/ч, $\alpha_{пер}$ = 1,05 и общем расходе воздуха около 40 тыс. м³/ч

11.8. ТЕПЛОГЕНЕРАТОР С ЖИДКОТОПЛИВНОЙ ГОРЕЛКОЙ ТГ-0,8 ДТ

Теплогенератор ТГ-0,8 дт разработан институтом ВНИИМТ и фирмой МТТ и предназначен для получения газообразного теплоносителя за счет сжигания легкого жидкого топлива и разбавления продуктов сгорания воздухом. Теплогенератор используется для установки сушки зернистого материаяа в кипящем слое, но может быть применен и для других технологий.

Общий вид теплогенератора показан на рис. 11.13, а техническая характеристика при работе без противодавления приведена ниже:

Номинальная тепловая мощность, Мвт 0,88
Топливо — соляровое масло, керосин

Расход топлива номинальный, кг/ч 75
Давление топлива перед механической форсункой, МПа ..... не менее 1
Общий расход воздуха, м³/ч 20000
Давление воздуха перед горелкой, Па 860
Давление воздуха перед камерой смешения, Па 520
Температура теплоносителя, ° С 110–165
Масса без футеровки, кг 2500

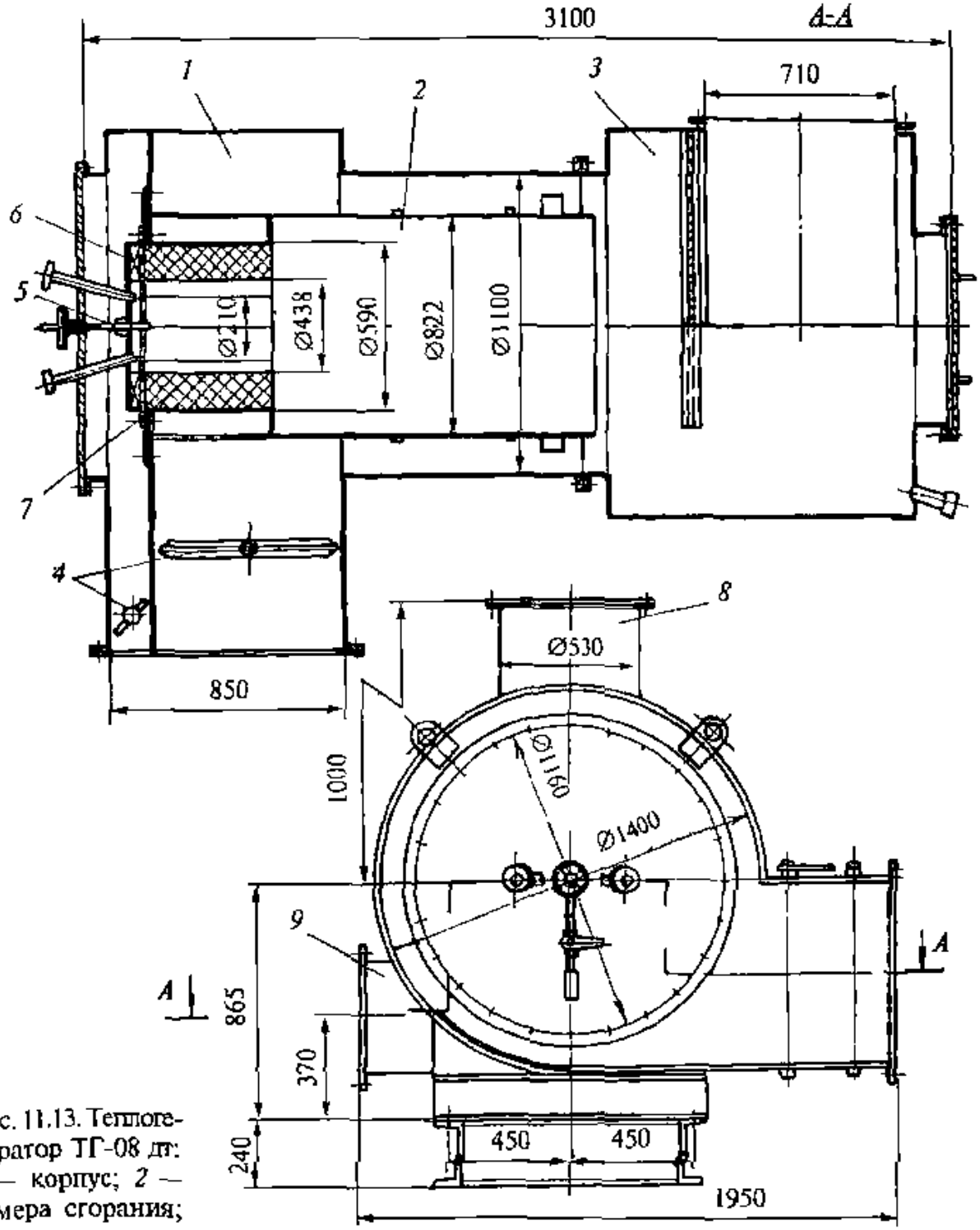


Рис. 11.13. Теплогенератор ТГ-08 дт: *1* — корпус; *2* — камера сгорания; *3* — камера смешения; *4* — шибер; *5* — форсунка; *6* — завихритель воздуха; *7* — горелочный туннель; *8* — взрывной клапан; *9* — выходной патрубок

При работе теплогенератора в составе установки ЗС-10, предназначенной для сушки зерна в кипящем слое, диапазон возможного изменения давления воздуха перед горелкой составляет 1,5—5,0 кПа, перед камерой смешения — 1,4—4,9 кПа.

Входной воздушный патрубок корпуса разделен перегородкой на два канала, в каждом из которых установлен регулирующий шибер. Один канал предназначен для подачи воздуха на горение топлива, другой — для охлаждения стенок камеры горения и смешения с продуктами полного сгорания.

На оси корпуса установлена камера сгорания, имеющая на входной стороне горелочный туннель, футерованный огнеупорным кирпичом, и горелочное устройство.

Горелочное устройство состоит из тангенциального лопаточного аппарата, имеющего пережим в выходном сечении, и механической форсунки центробежного типа (см. рис. 8.21) с диаметром сопла 1,0 мм.

В камере смешения вблизи выходного сечения асимметрично установлен отбойный лист. За отбойным листом выполнены тангенциально расположенный патрубок для отвода теплоносителя, взрывной клапан разрывного типа и лаз, закрытый заглушкой.

На торцевой стенке воздушного корпуса установлены патрубки для крепления форсунки, датчика контроля пламени и запального устройства.

11.9. ГАЗОВЫЙ ОБОГРЕВАТЕЛЬ

Газовые обогреватели разработаны ОАО «Уралмаш» и НПФ «Горелочный центр» и предназначены для местного газового отопления рабочих мест производственных помещений. Разработаны два типаразмера обогревателей тепловой мощностью 9,3 и 23,3 кВт. Общий вид газового обогревателя показан на рис. 11.14.

Газовый обогреватель выполнен в виде замкнутой камеры горения, изготовленной из труб ∅ 108 и 159 мм, имеющей инжекционное горелочное устройство с форкамерой, сбросной трубопровод и систему автоматизированного розжига и контроля пламени. Обогреватель изготавливается в виде единого блока, смонтированного на напольной или подвесной опоре. Горелочное устройство может располагаться вертикально вверх в поворотном колене камеры горения либо наклонно. В последнем случае обогреватель может располагаться под оконными проемами вместо обычных радиаторов водяного отопления.

Горелочное устройство представляет собой газоподводящую трубу, оканчивающуюся соплом, смеситель с регулирующим устройством для подачи воздуха и форкамеру. На выходе из горелки у торцевого среза форкамеры установлены запальная свеча и ионизационный датчик контроля пламени.

При работе обогревателя природный газ, вытекая из сопла под давлением 70 кПа, инжектирует в обогреватель воздух из окружающего помещения. Образовавшаяся смесь сгорает в форкамере. Догорание топлива происходит в растянутом факеле при подмешивании в поток, выходящий из форкамеры, газов, циркулирующих в камере горения.

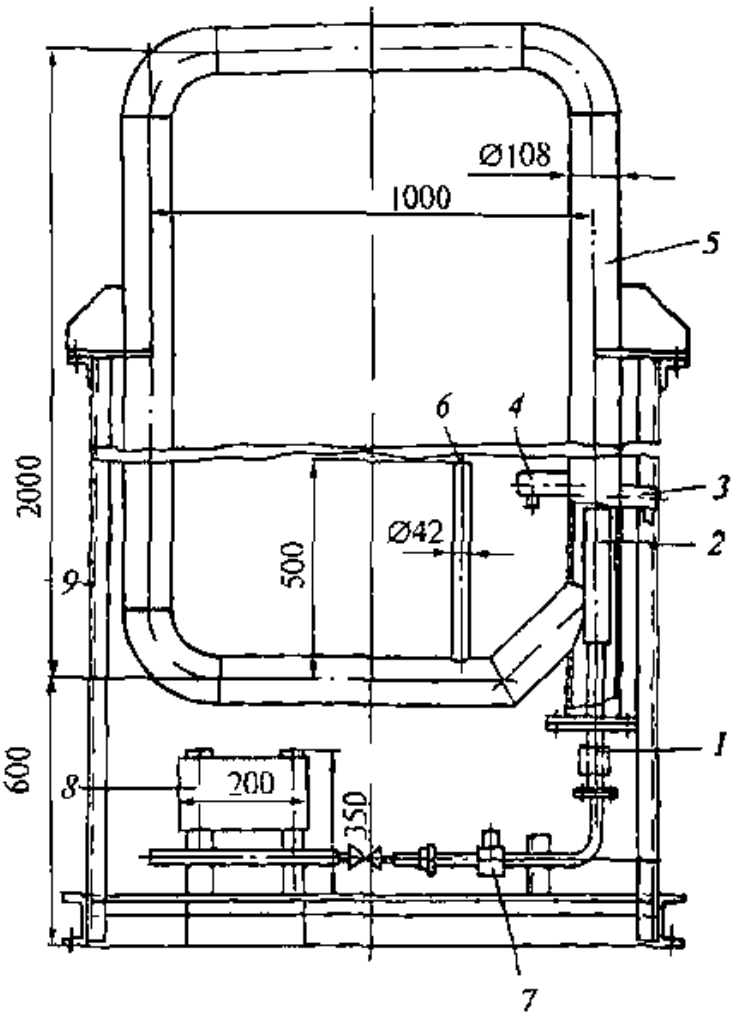


Рис. 11.14. Газовый обогреватель: *1* — горелка; *2* — камера горения; *3* — свеча зажигания; *4* — контрольный электрод; *5* — нагреваемая труба; *6* — сбросной патрубок; *7* — электромагнитный клапан; *8* — пульт управления; *9* — опора

Отработанные охлажденные продукты полного сгорания отводятся через сбросной трубопровод под зонт.

Обогрев рабочих мест осуществляется за счет теплоотдачи конвекцией от стенок камеры горения окружающему воздуху. Регулирование температуры в рабочей зоне осуществляется отключением части работающих обогревателей.

Технические характеристики газовых обогревателей приведены в табл. 11.4

Таблица 11.4

Технические и конструктивныехарактеристики газовых обогревателей (рис. 11.14)

Наименование параметра	Размерность	Типоразмер	
		ГО-1	ГО-2
Номинальная тепловая мощность	кВт	9,3	23,2
Номинальный расход газа	м³/ч	0,93	2,3
Давление газа перед горелкой при номинальной тепловой мощности	кПа	70	70
Коэффициент рабочего регулирования	—	4	4
Коэффициент расхода воздуха на выходе из камеры горения	—	1,05	1,05
Температура поверхности обогревателя	°С	120–300	110–360
Конструктивные характеристики:	мм		
наружный диаметр		108	159
длина обогревающей поверхности		6,0	8,9
диаметр газового сопла		0,9	1,4
диаметр смесителя		28	34
диаметр форкамеры		60	89
длина форкамеры		300	400
длина горелки		600	800

11.10. ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ЗАВЕС

Для получения теплоносителя, применяемого в тепловых завесах открытых проемов производственных помещений и приточных установок,

ОАО «Уралмаш» разработал газовую горелку, работающую в спутном потоке воздуха ГИ-СПВ.

Горелочное устройство состоит из отдельных горелочных элементов (горелок), каждое из которых имеет газовый патрубок с соплом, смеситель и камеру горения (рис. 11.15, *а*)

Такие горелки компонуются в блок, состоящий из нескольких элементов, который устанавливается либо перед всасывающим патрубком дутьевого вентилятора, либо в напорный воздуховод, в котором скорость воздуха не менее 1 м/с (рис. 11.16, *а*).

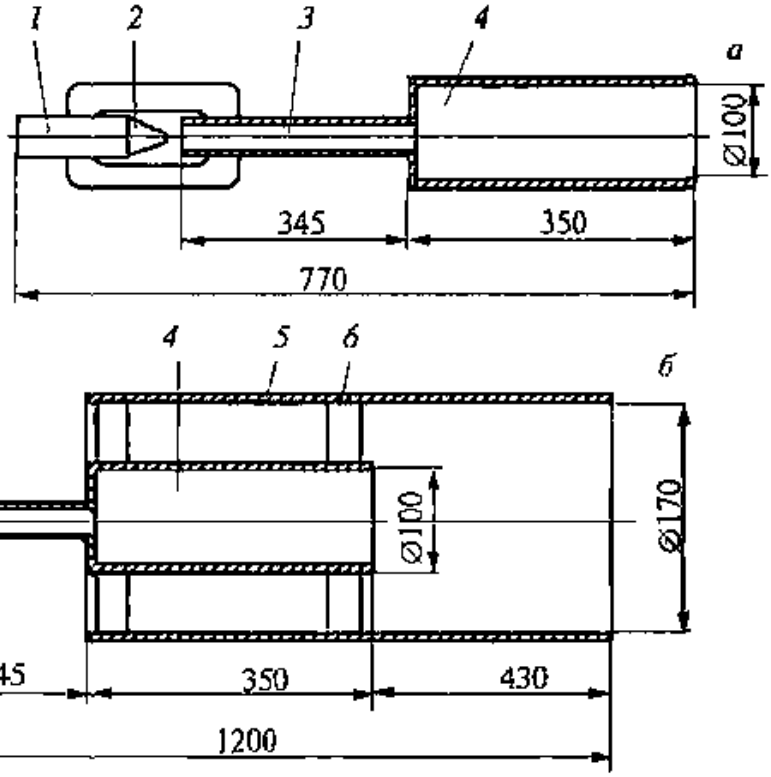


Рис. 11.15. Горелочные устройства для тепловых завес: *а* — без камеры дожигания, *б* — с камерой дожигания; *1* — газовый патрубок; *2* — сопло; *3* — смеситель; *4* — камера горения; *5* — камера дожигания; *6* — ребро

При работе горелки воздух в смеситель нагнетается как за счет кинетической энергии вытекающей струи природного газа, так и за счет струйного течения, в которое помещается горелка. Воспламенение газа происходит на начальном участке камеры горения, стенки которой интенсивно разогреваются, а дожигание остатков горючих — на длине ~ 300–400 мм от ее торца.

При работе горелки в условиях отсутствия спутного потока воздуха дополнительно устанавливают камеру дожигания (рис. 11.15, *б*), обеспечивающую повышение разрежения в зоне горения и увеличение подсоса воздуха в смеситель. Камера дожигания может быть выполнена индивидуальной для каждой горелки или общей для всего блока (рис. 11.16, *б*).

Особенностью работы горелки является повышенный шум, что требует применения дополнительных средств для защиты обслуживающего персонала.

Кроме того, наличие спутного потока воздуха между горелочными элементами способствует значительному уменьшению угла раскрытия факела каждой горелки. Это уменьшает возможность пламяпереброса между торцами камер горения и, соответственно, снижает надежность взаимной стабилизации отдельных факелов в общем блоке. Поэтому для безопасной

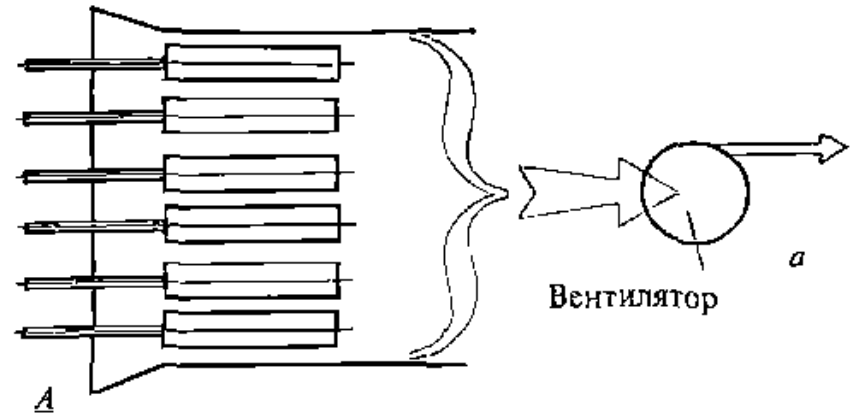


Рис. 11.16 Варианты компоновок горелок в воздухоприемных устройствах:
а — во всасывающем канале вентилятора;
б — в общей камере дожигания

эксплуатации каждый горелочный элемент должен быть оснащен средством контроля пламени.

Технические характеристики газовой горелки ГИ-СПВ:

Номинальная тепловая мощность, кВт 85
Номинальный расход газа, м^3/ч 8,6
Номинальное давление газа, кПа 80
Номинальный коэффициент расхода воздуха на выходе из камеры дожигания . 2,33
Коэффициент рабочего регулирования 1,56

11.11. ТЕПЛОГЕНЕРАТОР ДЛЯ СЖИГАНИЯ КОКСОВОГО ГАЗА

Для сжигания коксового газа в сушильном агрегате аммиачно-сульфатного производства Сибирским отделением института «Гипрококс» (г. Новокузнецк) разработан теплогенератор, схема которого показана на рис. 11.17

Теплогенератор состоит из воздухоподводящего корпуса и встроенной камеры сгорания. Камера сгорания выполнена из системы обечаек, установленных с кольцевыми зазорами при помощи центрирующих прокладок. На входной стороне камеры установлены: газовое сопло, диафрагма, регулирующая вход воздуха в зону горения, и поворотные лопатки завихрителя. Такие же завихрители воздуха с углом поворота лопаток 30° установлены в кольцевом зазоре между корпусом теплогенератора и камерой сгорания. Розжиг горелки осуществляется электроискровым запальником.

При работе теплогенератора первичный воздух, проникающий в камеру горения через входную диафрагму, интенсивно закручивается и, перемешиваясь с потоком газа, выходящим из сопла, создает газовоздушную смесь, которая воспламеняется от искры запальника. Устойчивое горение газа обеспечивается за счет интенсивной закрутки потока воздуха.

Стенки камеры горения предохраняются от перегрева настильным потоком вторичного воздуха, который проникает в камеру горения через кольцевые зазоры между обечайками Подмешивание этого воздуха в факел

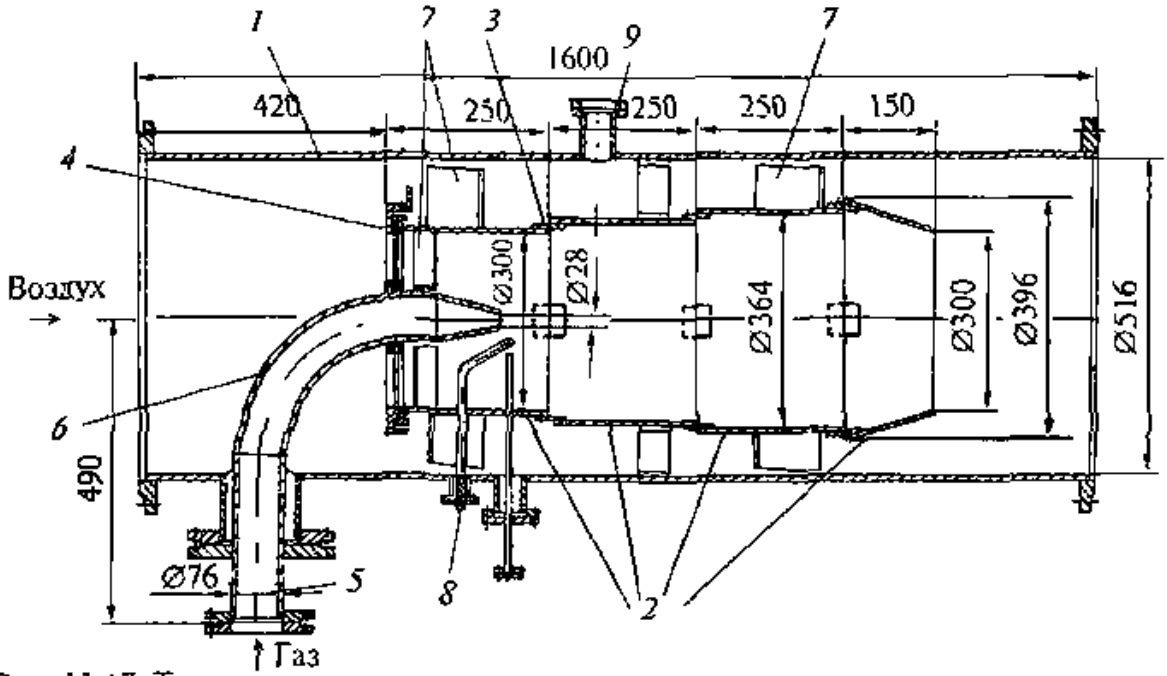


Рис. 11.17. Теплогенератор для сжигания коксового газа:
1 — корпус; *2* — система обечаек; *3* — центрирующие прокладки; *4* — входная диафрагма; *5* — газовая труба; *6* — газовое сопло; *7* — воздушные завихрители; *8* — запальный электрод; *9* — смотровой патрубок

происходит в основном в выходном сечении камеры горения.

Вторичный воздух, закрученный лопаточными завихрителями в кольцевом зазоре, охлаждает стенки камеры горения, предотвращает перегрев корпуса теплогенератора и затем интенсивно разбавляет продукты сгорания на выходе из последней конической обечайки.

Испытание теплогенератора выполнены Уральским испытательным центром промышленных горелочных устройств при сжигании коксового газа с теплотой сгорания 16,0 МДж/м^3 (3800 ккал/м^3) при объемной концентрации компонентов, %: CH_4 — 23,9; H_2 — 59,8; CO — 6,7; C_2H_6 — 0,1; CO_2 — 2,2; O_2 — 1,7; N_2 — 5,6.

Технические характеристики теплогенератора при сжигании холодного газа и воздуха и полностью открытой диафрагме на входе в камеру горения:

Номинальная тепловая мощность, квт	443
Номинальный расход газа, м^3/ч	100
Номинальное давление газа, кПа	5.7
Номинальный расход воздуха, м^3/ч	3415
Номинальное давление воздуха, кПа	4,6
Коэффициент расхода воздуха	9,0
Максимальная тепловая мощность, кВт	487
Коэффициент рабочего регулирования	5,2
Коэффициент предельного регулирования	5.7
Изменение температуры теплоносителя в диапазоне рабочего регулирования	От 100 до 290°С
Содержание оксида углерода в сухих продуктах сгорания в пересчете на α = 1,0, %	0,05
Потери тепла от химической неполноты горения	0,2

11.12. ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЫ «ЮМАС»

Межотраслевой творческой группой «ЮМАС», лабораторией «Газодинамика и горение» Казанского филиала Московского энергетического института и ЗАО «Кулон» разработана серия теплогенераторов тепловой мощностью от 0,17 до 1,1 МВт. Теплогенераторы предназначены для получения теплоносителя путем сжигания природного газа и разбавления продуктов горения рециркулирующими дымовыми газами.

Принципиальная схема теплогенератора показана на рис. 11.18 на примере устройства с тепловой мощностью 0,6 МВт.

На торцевом фланце корпуса теплогенератора установлено горелочное устройство, амбразура которого соединена со встроенной камерой горения. Стенки камеры горения, так же как у теплогенератора для сжигания коксового газа (см. рис. 11.17), выполнены из системы обечаек, установленных с кольцевым зазором. Камера смешения имеет щелевые каналы с регуляторами, позволяющими регулировать качество смешения продуктов горения и продуктов рециркуляции.

При работе теплогенератора сжигание природного газа производится при помощи двухпроводной горелки, в которую вместе с газом подается первичный воздух. Стенки камеры горения интенсивно охлаждаются с двух сторон: с внешней стороны подводимым потоком вторичного воздуха или рециркулята, с внутренней стороны — воздушной завесой, сформированной потоком, вытекающим через кольцевой зазор между обечайками.

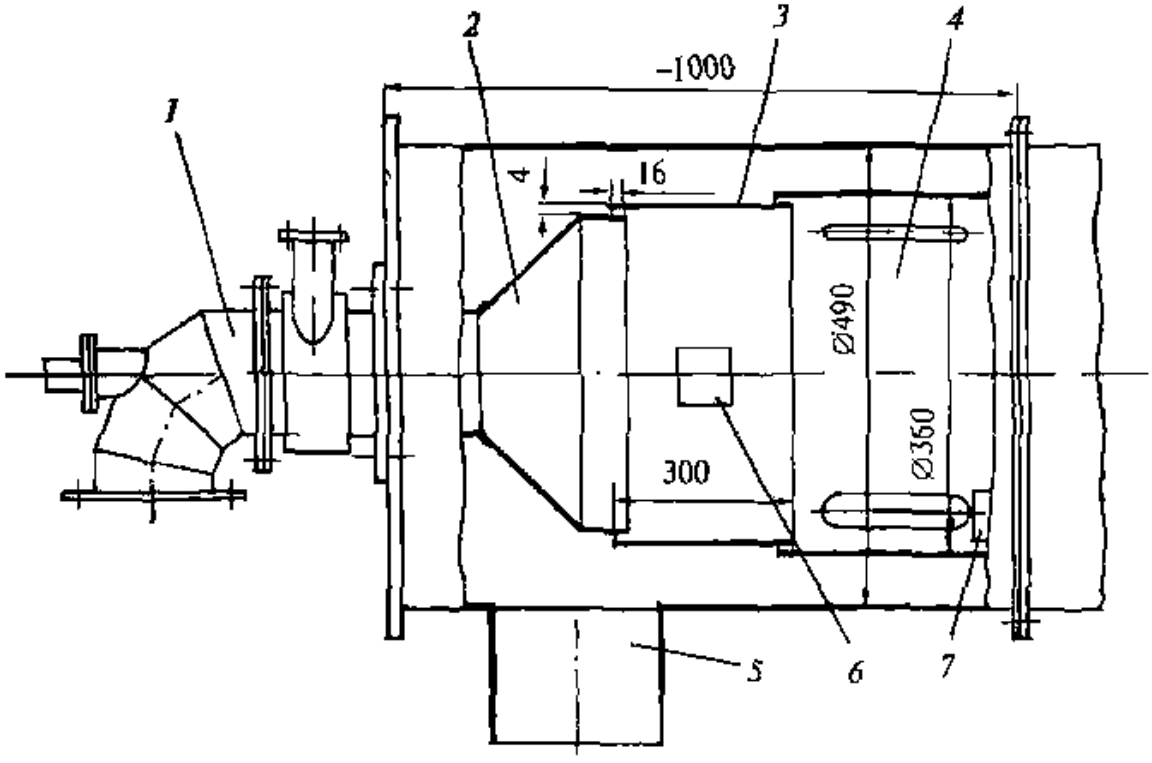


Рис. 11.18. Теплогенератор «ЮМАС» с тепловой мощностью 0,6 МВт:
1 — горелка; *2* — камера горения; *3* — охлаждаемая стенка; *4* — камера смешения; *5* — подвод рециркулята; *6* — интенсификатор горения; *7* — регулятор смешения

Сжигание газа в камере горения происходит при коэффициенте расхода воздуха 1,05. Регулирование качества горения осуществляется при помощи специального интенсификатора, позволяющего изменять интенсивность турбулентности в хвостовой части факела, разбавленной балластирующими продуктами

Регулирование смешения продуктов полного горения и рециркулирующих газов осуществляется регуляторами, изменяющими глубину проникновения струй рециркулята в поток продуктов горения. Это позволяет получить поток теплоносителя с равномерным полем температур 180 °С.

Коэффициент рабочего регулирования теплогенератора — 3. Давление газа и первичного воздуха перед теплогенератором определяется характеристиками применяемых горелочных устройств.

Основные технические характеристики теплогенераторов «ЮМАС» приведены в табл. 11.5.

Таблица 11.5

Характеристики теплогенераторов «ЮМАС» (рис. 11.18)

Наименование параметра	Размерность	Типоразмер			
		ЮМАС-0,2	ЮМАС-0,4	ЮМАС-0,6	ЮМАС-1
Номинальная тепловая мощность	кВт	170	420	610	1100
Объемный расход вентиляторного воздуха (теплоносителя)	$м^3/ч$	7000	14000	21000	35000
Габаритные размеры	мм	1500×830×1200	2100×1260×1700	2600×1320×1850	3300×1500×2450

Глава 12. СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ И КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ ГОРЕЛОК

Запальные устройства и запальные горелки применяют в печах периодического действия при большом количестве горелок на агрегате, а также в том случае, если основные горелки эксплуатируются при таких режимах, когда они работают неустойчиво. Запальные горелки могут быть переносными и стационарными.

Запально-защитные устройства должны устанавливаться на горелках, работающих в печах с температурой ниже температуры воспламенения, или же при двухпозиционном регулировании в случае полного прекращения подачи газа в горелки.

Из переносных запальных горелок наибольшее распространение получили газовые запальники конструкции Ленгипроинжпроекта и Мосгазпроекта, из стационарных запальных горелок — пилотно-запальное устройство типа ПЗУ-1 конструкции Теплопроекта и дежурнал электрозапальная горелка конструкции ВНИИМТа, из запально-защитных устройств — пилотно-защитное устройство типа ПЗУ конструкции Теплопроекта, запально-защитное устройство типа ЗЗУ завода «Ильмарине», комплект приборов завода «Староруссприбор».

Особую сложность представляет собой розжиг мазутных горелок. В этом случае предусматривают дополнительную подачу сжиженного газа либо используют электрические или плазменные запальные устройства.

12.1. ПЕРЕНОСНЫЕ ЗАПАЛЬНИКИ КОНСТРУКЦИИ ЛЕНГИПРОИНЖПРОЕКТА

Институтом «Ленгипроинжпроект» разработаны переносные газовые запальники: инжекционные однофакельные (рис. 12.1, *а*) и многофакельные (рис. 12.1, *б*) для работы при разрежении в рабочем пространстве печного агрегата, инжекционные однофакельные (рис. 12.1, *в*) для работы при давлении в рабочем пространстве, а также однофакельный двухпроводный запальник с принудительной подачей газа и воздуха (рис. 12.1, *г*), который может работать как при разрежении, так и при даалении в рабочем пространстве печного агрегата. Запальники предназначены для работы на природном газе с $Q_н^р = 35.6$ МДж/м^3 или сжиженном газе с $Q_н^р = 92.1$ МДж/м^3. Основные характеристики переносных запальников конструкции Ленгипроинжпроекта приведены в табл. 12.1.

L по месту
32
~530
~170
44
Ø15,7
Ø12
Ø21
Ø27
Ø34
а
б

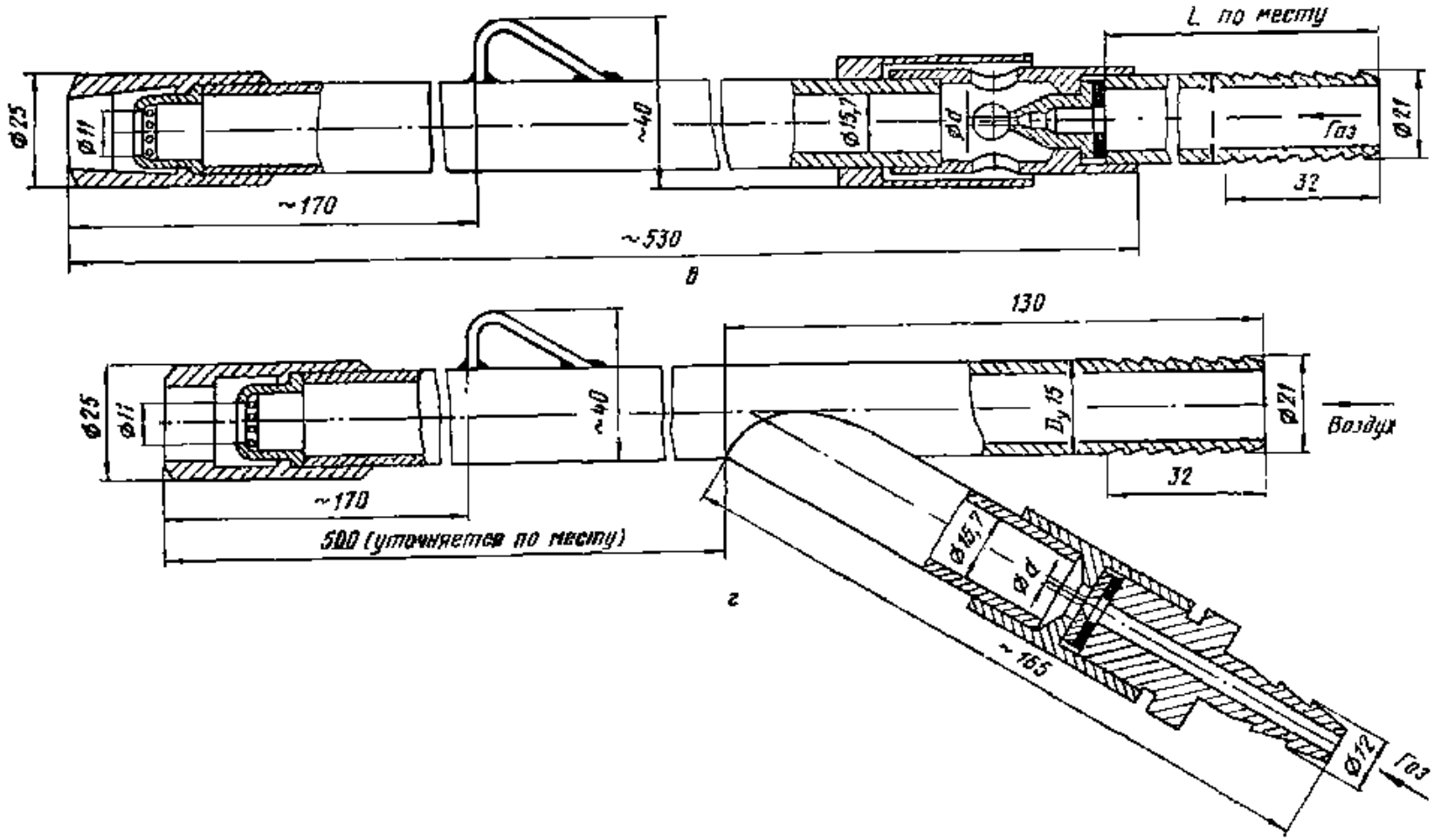


Рис. 12.1. Переносные запальники конструкции Ленгипроинжпроекта; *а* — инжекционный однофакельный для работы при разрежении в рабочем пространстве печи; *б* — то же, многофакельный; *в* — инжекционный однофакельный для работы при избыточном давлении в рабочем пространстве печи; *г* — однофакельный двухпроводный

Таблица 12.1

Основные характеристики переносных запальников конструкции Ленгипроинжпроекта (рис. 12.1)

Наименование запальника	Условия в рабочем пространстве	Теплота сгорания топлива $Q_н^р$, МДж/м³	Давление газа, кПа		Количество газа ($м^3/с \cdot 10^3$) при давлении		Длина факела, мм	Диаметр сопла $d_г$, мм	Масса горелки, кг
			максимальное	минимальное	максимальном	минимальном			
Инжекционный однофакельный (рис. 12.1, *а*)	Разрежение	35,6	5	0,250	0,361	0,078	200—350	2,2	0,8
		35,6	90	5	0,389	0,114	200—350	1,25	
		92,1	5	1	0,089	0,031	250—400	1,25	
		92,1	80	10	0,106	0,044	250—400	0,85	
Инжекционный многофакельный (рис. 12.1, *б*)	То же	35,6	5	0,25	0,444	0,103	80—107	2,50	0,9
		35,6	90	5	0,389	0,114	60—150	1,25	
		92,1	5	1	0,228	0,078	60—110	2,00	
		92,1	80	10	0,106	0,044	80—180	1,00	
Инжекционный однофакельный (рис. 12.1, *в*)	Давление	35,6	90	20	0,075	0,042	100	0,55	1,1
		92,1	80	20	0,031	0,017	100	0,45	
Двухпроводный однофакельный (рис. 12.1, *г*)	Любые	35,6	5*/0,8	1*/0,2	0,131**/1,389	0,058**/0,611	100	1,4	1,2
		92,1	5*/0,8	1,5*/0,2	0,039/1,111	0,017**/0,444	120	0,8	

*В числителе — давление газа, в знаменателе — давление воздуха, кПа.

** В числителе — количество газа, в знаменателе — количество воздуха, $м^3/с \cdot 10^3$.

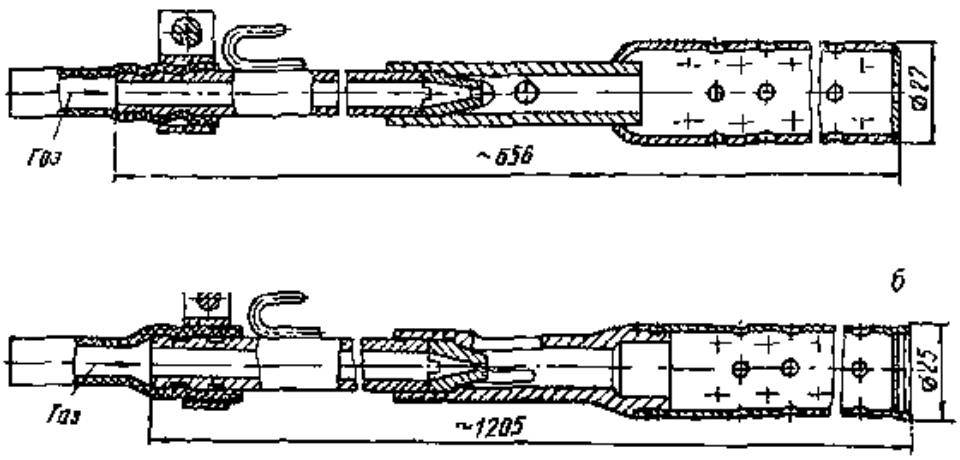


Рис. 12.2. Переносные инжекционные запальники конструкции Мосгазпроекта типа ИПЗ-1 (*а*) и ИПЗ-2 (*б*)

12.2. ПЕРЕНОСНЫЕ ИНЖЕКЦИОННЫЕ ЗАПАЛЬНИКИ ТИПА ИПЗ КОНСТРУКЦИИ МОСГАЗПРОЕКТА

Переносные инжекционные запальники типа ИПЗ, разработанные Мосгазпроектом, предназначены для работы на природном газе ($d_г = 1,5$ мм) и пропан-бутановом газе ($d_г = 1,0$ мм). Номинальнал пропускная способность по природному газу 0,000078 $м^3/с$ при давлении газа перед горелкой 1,3 кПа, по пропан-бутановому газу 0,000031 $м^3/с$ при давлении газа перед горелкой 3 кПа. Пределы регулирования запальника по газу 1 : 4

Переносные инжекционные газовые запальники типа ИПЗ разработа-

ны двух типоразмеров: ИПЗ-1 и ИПЗ-2, различающихся главным образом длиной. Конструктивные размеры переносных инжекционных запальников типа ИПЗ показаны на рис. 12.2.

12.3. ПИЛОТНО-ЗАПАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ТИПА ПЗУ-1

Электрогазовое пилотно-запальное устройство ПЗУ-1, разработанное Теплопроектом, является стационарным двухпроводным запальным устройством, которое герметически крепится к корпусу основной горелки или к горелочной плите и имеет дистанционное электроискровое зажигание.

Пропускная способность пилотно-запального устройства по природному газу составляет от 0,00014 до 0,00028 м³/с. Работа пилотно-запального устройства (рис. 12.3) осуществляется следующим образом.

Газ смешивается с воздухом в смесителе. Газовоздушная смесь разветвляется в корпусе на два потока, один из которых через четыре отверстия диаметром 1,5 мм поступает в камеру зажигания. После поджигания от электрической искры горящая газовоздушная смесь вытекает по центральной трубе пламепровода, выполненной из стали Х18Н10Т. Остальная газовоздушная смесь через основное отверстие диаметром 15 мм проходит по наружному кольцевому зазору пламепровода, загораясь по выходе из насадка. Канал в огнеупорном блоке основной горелки, предназначенный для установки ПЗУ-1, одновременно является его горелочным туннелем. Наблюдения за горением осуществляются через кварцевое стекло гляделки

Дежурная электрозапальная горелка, разработанная ВНИИМТом (рис 12.4), представляет собой видоизмененную конструкцию ПЗУ-1 Для стабилизации факела в выходном сечении горелки предусмотрена диффузорная корундовая труба, примыкающая к горелочному туннелю, основной горелки. Электрозапальная горелка предназначена для работы в качестве постоянно действующей дежурной горелки

Номинальная пропускная способность горелки по газу 0,00028 м³/с при

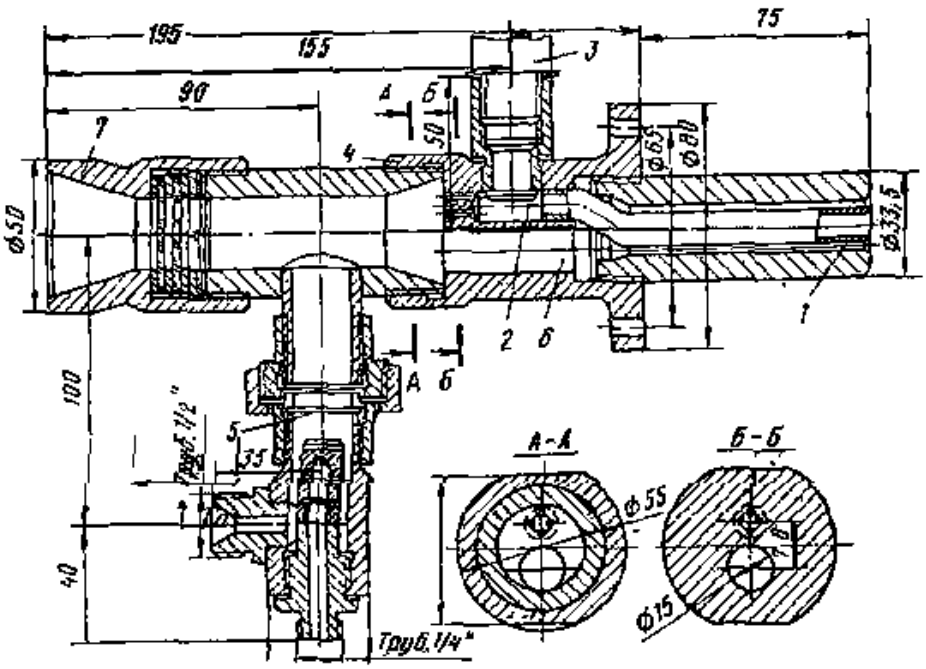


Рис. 12.3. Пилотно-запальное устройство типа ПЗУ-1: *1* — пламепровод; *2* — камера зажигания; *3* — автомобильная свеча; *4* — корпус запальника, *5* — смеситель; *6* — основное отверстие; *7* — гляделка

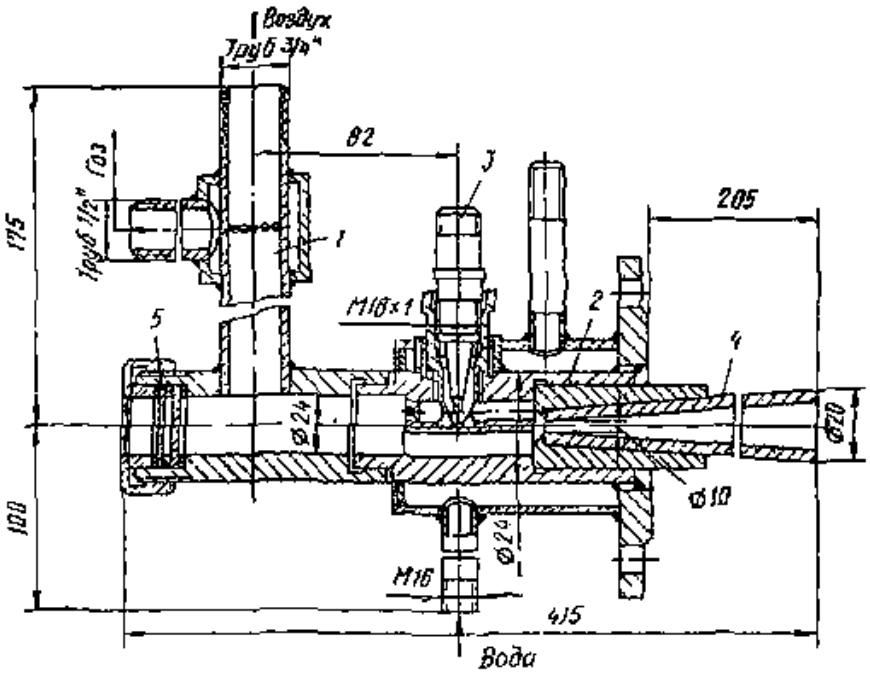


Рис. 12.4. Дежурная электрозапальная горелка конструкции ВНИИМТа:
1 — газовоздушный смеситель; 2 — корпус; 3 — электрическая свеча; 4 — диффузорная корундовая труба; 5 — гляделка

давлении перед горелкой газа 0,5, воздуха 0,45 кПа, $\alpha = 0{,}9$. Пределы регулирования по газу 0,00014—0,00042 м^3/с. Масса горелки 4 кг

Розжиг дежурной горелки производится встроенной в нее электрической свечой, подключенной к стандартной индукционной катушке, питание которой осуществляется постоянным током напряжением 24 В.

12.4. ПИЛОТНО-ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО ТИПА ПЗУ

Разработанное Теплопроектом пилотно-защитное устройство типа ПЗУ (рис. 12.5) отличается от пилотно-запального устройства ПЗУ-1 наличием контрольного электрода, служащего для контроля факела пилотной горел-

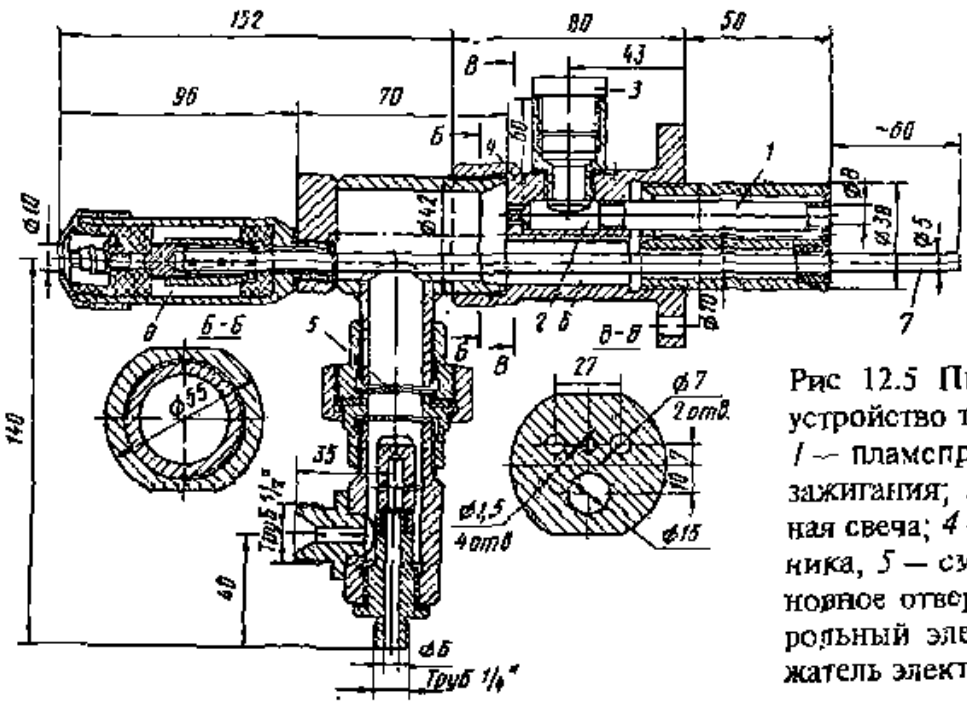


Рис 12.5 Пилотно-защитное устройство типа ПЗУ:
1 — пламепровод; 2 — камера зажигания; 3 — автомобильная свеча; 4 — корпус запальника, 5 — смеситель, 6 — основное отверстие; 7 — контрольный электрод; 8 — держатель электрода

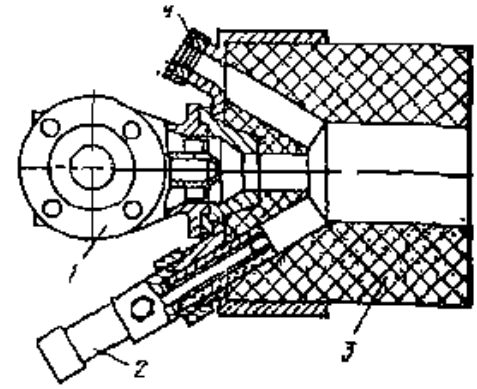


Рис 12.6. Схема установки ПЗУ с горелкой типа ГНП:
1 — горелка типа ГНП; *2* — ПЗУ; *3* — горелочный камень; *4* — гляделка

ки. Электрод представляет собой стержень диам. 6 мм, выполненный из дисилицида молибдена. Электрод крепится в держателе, к которому подсоединяется провод внешней сети. Схема установки ПЗУ с горелкой типа ГНП показана на рис. 12.6.

12.5. ЗАПАЛЬНО-ЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА ТИПА ЗЗУ ЗАВОДА «ИЛЬМАРИНЕ»

Запально-защитные устройства типа ЗЗУ завода «Ильмарине» предназначены для дистанционного розжига горелок, работающих на жидком или газообразном топливе. Входящий в комплект управляющий прибор с датчиком пламени осуществляет контроль за наличием пламени в топке. Запально-защитное устройство включается в общую схему автоматики или работает самостоятельно.

Разработаны устройства ЗЗУ-1, ЗЗУ-3, ЗЗУ-4, ЗЗУ-6 и ЗЗУ-7, которые отличаются принципом получения сигнала и комплектностью.

Основные характеристики запально-защитных устройств типа ЗЗУ приведены в табл. 12.2. Принципиальная функциональная схема запально-защитного устройства ЗЗУ-4 показана на рис. 12.7.

Управляющий импульс одновременно открывает электромагнитный вентиль на газовой линии запальника и подает напряжение на источник высокого напряжения (бобину или высоковольтный трансформатор). Образовавшееся высокое напряжение поступает на центральный электрод запальника, между электродом и корпусом появляется искра, которая зажи-

Таблица 12.2

Основные характеристики запально-защитных устройств типа ЗЗУ завода «Ильмарине»

Тип запально-защитного устройства	Назначение			Способ контроля
	розжиг	контроль факелов		
		основного	запального	
ЗЗУ-1 ЗЗУ-6	Дистанционный	Совместный		Фотодатчиком
ЗЗУ-3	То же			
ЗЗУ-4 -	«-«	Нет	Есть	Ионизационный
		Есть	То же	Ионизационный с фотодатчиком
ЗЗУ-7	Дистанционный розжиг горелок ГМГ на котлах ДКВр	Наличие пламени в топке		Управляющим прибором с фотодатчиком

Примечание. Для ЗЗУ-7 поочередный розжиг горелок с соответствующим переключением фотодатчиков к прибору.

гает газ. Импульс от появления факела передается от датчика на управляющий прибор, где сигнал усиливается, и в результате срабатывает выходное реле управляющего прибора. Сигнал используется как разрешение для подачи газа в основную горелку. В процессе работы фотодатчик осуществляет контроль за факелом основной горелки.

По сравнению со схемой для ЗЗУ-4 (см. рис. 12 7) устройства ЗЗУ-1, ЗЗУ-6 и ЗЗУ-7 отличаются отсутствием ионизационного датчика с управляюшим прибором к запальнику, а устройство ЗЗУ-3 — отсутствием фотодатчика с управляющим прибором к основной горелке.

Запальник к ЗЗУ показан на рис. 12.8. Запальники изготовляют со стволом длиной L = 350; 500, 700; 1000; 1500; 2000, 2500; 3000; 3500; 4000, 4500 и 5000 мм. Запальник в комплекте ЗЗУ-7 изготовляют длиной ствола L = = 350 мм.

Запальник может работать на любом горючем газе с теплотой сгорания от 14,65 до 121,4 МДж/м^3.

Однако при использовании доменного, газогенераторного, ферросплавного или коксового газов несмотря на принимаемые меры по их очистки от пыли, смол и нафталина возможны отказы в работе запальников.

На рис. 12 9 показана пропускная способность запальника при работе на природном и пропан-бутановом газе в зависимости от давления газа перед горелкой и диаметра дроссельной шайбы, установленной на подводе газа. В комплект поставки входят три дроссельные шайбы диаметром 1,2; 1,5 и 2 мм. Оптимальная пропускная способность запальника по газу от 0,00042 до 0,0011 кг/с.

Центральный электрод запальника заключен в керамическую изоляцию и помещен в ствол запальника, заканчивающийся наконечником. В наконечнике имеются три винта для центровки и регулировки положения центрального электрода и искрового промежутка. Центральный электрод выводится наружу через торцовую часть запальника для присоединения провода высокого напряжения. Газ проходит через ствол запальника и воспламеняется на выходе из наконечника от электрической искры, возникающей в искровом промежутке между хвостовиком центрального электрода и кольцевым электродом наконечника.

Для обеспечения устойчивого горения газа запальник должен располагаться внутри специального канала в потоке воздуха, направленного параллельно оси запальника. Возможна установка запальника в общей трубе с мазутной форсункой, но при этом существует опасность загрязнения и заливания его мазутом. Поток воздуха обеспечивается путем подачи вентиляторного или компрессорного воздуха, а также может создаваться за счет разрежения в рабочем пространстве печи.

Установочная труба для запальника может располагаться параллельно оси горелки на возможно более близком расстоянии к ней Возможно и направление установочной трубы под углом относительно оси горелки. При этом ось установочной трубы должна пересекать ось горелки вблизи корня факела. Для сохранения запальника от излучения топки наконечник его должен быть утоплен на 250—400 мм от торца установочной трубы. Ско-

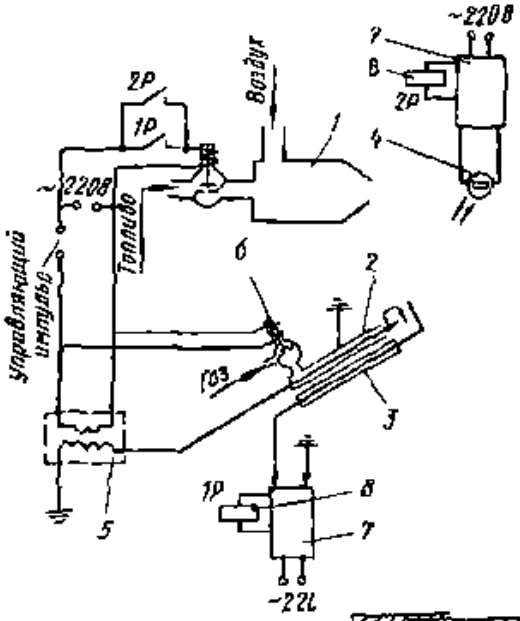


Рис 12.7. Принципиальная функциональная схема запально-защитного устройства ЗЗУ-4:
1 — основная горелка; *2* — запальник; *3* — ионизационный датчик; *4* — фотодатчик; *5* — высоковольтный трансформатор, *6* — электромагнитный вентиль СВФ-10; *7* — управляющий прибор; *8* — реле

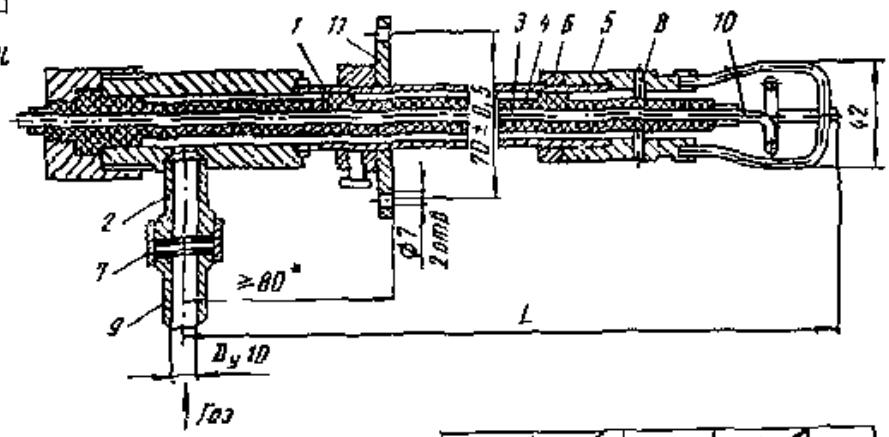


Рис. 12.8. Запальник к ЗЗУ:
1 — ствол, *2* — штуцер; *3* — центральный электрод; *4* — керамическая изоляция; *5* — наконечник, *6* — контргайка; *7* — дроссельная шайба; *8* — регулировочный винт; *9* — штуцер; *10* — хвостовик центрального электрода; *11* — фланец

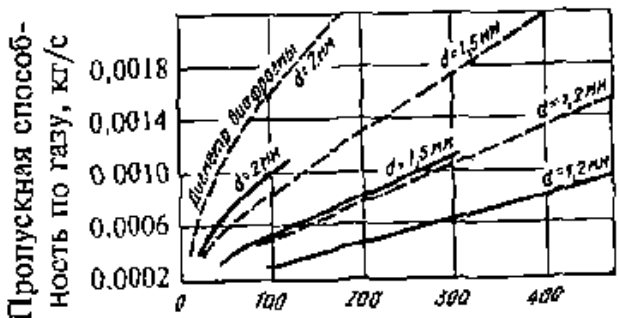


Рис. 12.9. Пропускная способность по газу запальника к ЗЗУ:
— — *природный газ*, $\rho_{0г} = 0{,}72$ кг/м³;
——— — пропан-бутановый газ, $\rho_{0г} = 1{,}86$ кг/м³

рость воздуха в установочной трубе рекомендуется выбирать в пределах 0,5—12 м/с, при больших скоростях воздуха существует опасность отрыва факела запальника. В таких случаях факел можно поддерживать при помощи включенной искры, что требует постоянной работы высоковольтного трансформатора. При нормальных воздушных режимах в этом нет необходимости. Высоковольтный трансформатор после появления факела запальника целесообразно выключать.

Длительность работы запальника определяется условиями прогрева рабочего пространства печи и достижения устойчивого горения газа основных горелок.

В устройствах ЗЗУ-3 и ЗЗУ-4 в общей установочной трубе с запальником располагается ионизационный датчик (рис. 12.10), передающий изме-

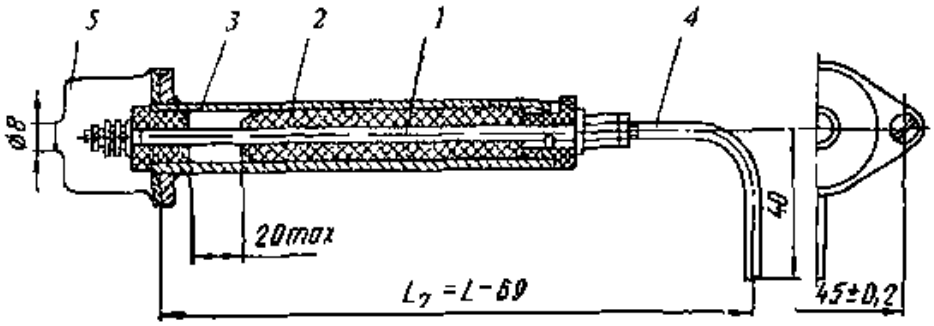


Рис. 12.10. Ионизационный датчик к ЗЗУ-4:
1 — стержень; *2* — керамическая изоляция; *3* — экранная труба; *4* — электрод; *5* — колпачок

нение проводимости запального факела к управляющему прибору. Ионизационный датчик крепится к стволу запальника при помощи фланца и хомутов. Электрод датчика должен омываться пламенем запальника. Расстояние от электрода до наконечника запальника должно быть 10—20 мм. Минимальный внутренний диаметр установочной трубы с ионизационным датчиком 70 мм.

В зависимости от воздушного режима факел запальника может иметь разный характер. Надежный сигнал от ионизационного датчика можно получить от желтого пламени.

При применении ЗЗУ с ионизационным датчиком (ЗЗУ-3 и ЗЗУ-4) следует учесть, что максимально допустимая температура в зоне установки электрода не должна превышать 600 °С.

Электромагнитный вентиль СВФ-10 устойчиво работает при давлении газа перед ним от 100 до 1300 кПа. При меньших давлениях ухудшается уплотняющая способность вентиля. Контроль факела в ЗЗУ-1, ЗЗУ-6, ЗЗУ-7, а также в ЗЗУ-4 осуществляется с помощью фотодатчика (рис. 12.11).

Место установки фотодатчика выбирают в зависимости от типа ЗЗУ. Фотодатчики ЗЗУ-1 и ЗЗУ-6 устанавливают обычно на фланце установочной трубы, что обеспечивает попадание в его поле зрения запального и основного факелов. Фотодатчик должен устанавливаться на специальном кронштейне в зоне додустимых температур. Максимальная температура для фотодатчика 50 °С. Необходимо предусмотреть условия, исключающие попадание копоти, влаги и топлива на защитное стекло.

Место установки фотодатчика на горелках, где применяется ЗЗУ-4, нужно выбирать так, чтобы в поле зрения фотодатчика не мог попасть факел запальника. Пример компановки ЗЗУ с газомазутными горелками показан на рис.12.12.

Такая компоновка пригодна только для топок, работающих под разрежением. В топках, работающих под даалением, запальник устанавливается в

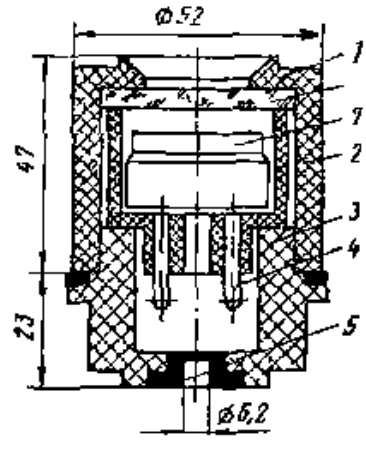


Рис. 12.11 Фотодатчик к ЗЗУ:
1 — крышка; *2* — панель; *3* — корпус; *4* — лепесток; *5* — уплотнение; *6* — стекло; *7* — фоторезистор

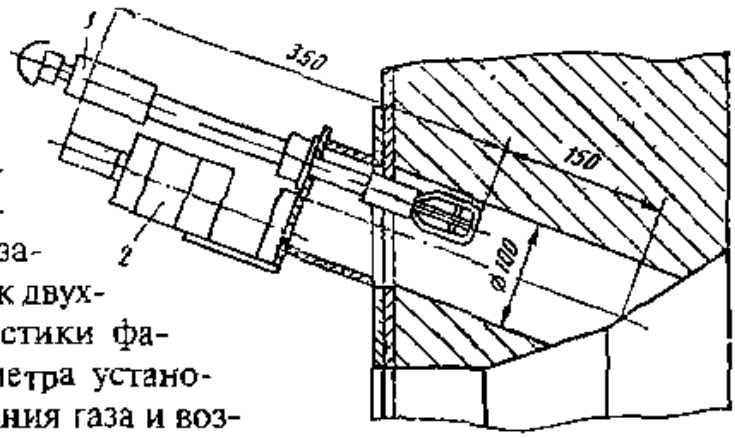


Рис. 12.12. Компоновка ЗЗУ с газомазутными горелками:
1 — запальник; *2* — фотодатчик

направляющей трубе, размещенной в горелочной амбразуре или горелке. В этом случае запальное устройство работает как двухпроводная горелка, характеристики факела которой зависят от диаметра установочной трубы и режима истечения газа и воздуха. При установке запальника и контрольного электрода в направляющей трубе длиной 100 мм с подачей в нее воздуха наиболее жесткий и хорошо стабилизированный факел наблюдается при коэффициентах расхода воздуха от 1,5 до 2,5 и при различном расходе газа (рис. 12 13). Снижение коэффициента расхода воздуха существенно ухудшает характеристики факела. Он становится коротким и деформируется относительно продольной оси под воздействием гравитационных сил сразу же на выходном торце трубы.

С увеличением расхода природного газа на запальную горелку при $\alpha =$ = const существенно возрастает длина факела. Однако при коэффициентах расхода воздуха от 0,6 до 1,1 с увеличением расхода газа с 6,5 до 8,3 м³/ч наблюдается снижение температуры у торца трубы до 300–600 °С. В этом случае факел легко отрывается от горелки при колебаниях давления газа и воздуха и иных посторонних возмущениях. При коэффициенте расхода воздуха на запальную горелку 1,4–2,58 температура факела 950–1200 °С достигается практически на выходе из трубы. Стабилизация горения при этом

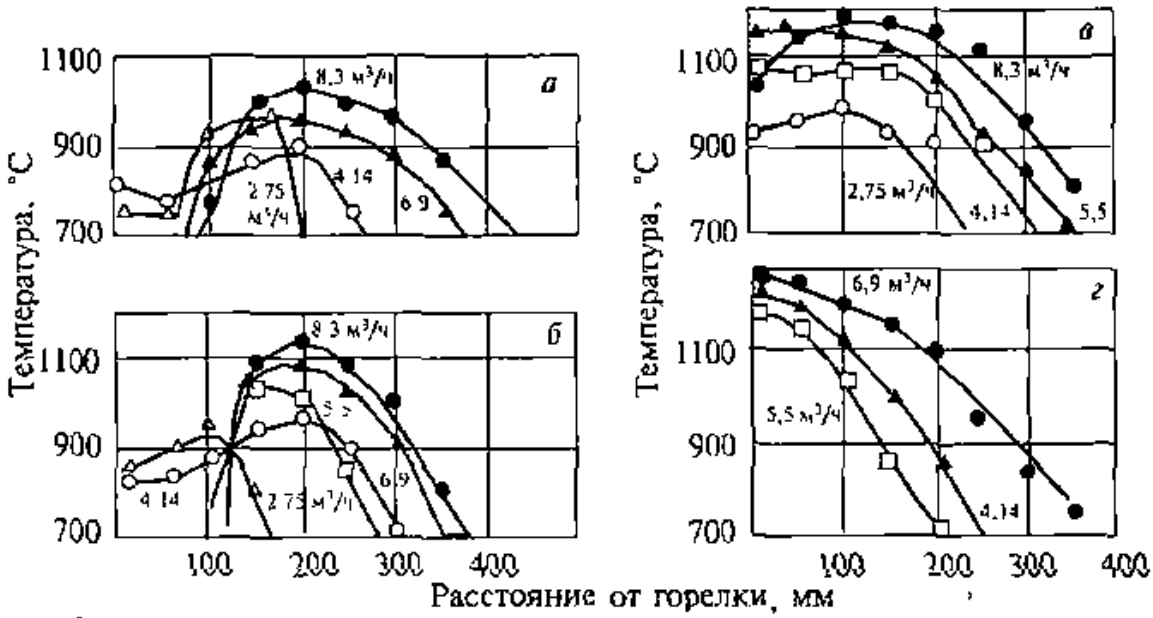


Рис. 12.13. Изменение температуры по оси факела запальной горелки «Ильмарине» в зависимости от расхода газа, цифры у кривых, м³/ч, и коэффициента расхода воздуха: *а* — $\alpha = 0{,}7$; *б* — $\alpha = 1{,}0$; *в* — $\alpha = 1{,}5$; *г* — $\alpha = 2.5$; при установке запальника в трубе диаметром 100 мм

более надежная, но длина факела, особенно при малых расходах газа, уменьшается и оказывается недостаточной для воспламенения топлива основной горелки.

Таким образом, устойчивое горение достигается в сравнительно узком диапазоне изменения расхода воздуха в установочной трубе. На режимах с хорошей стабилизацией длина факела находится в пределах от 150 до 300 мм.

Использование запальников «Ильмарине» с установочными трубами диаметром 100 мм сопряжено со сложностью компоновки, особенно для горелок, имеющих малые габариты. Попытка уменьшить диаметр установочной трубы до 54 мм без внесения в конструкцию запальника дополнительных изменений не приводит к успешной работе. Обнаружилась и неустойчивость воспламенения от искрового разряда, и отрыв факела от торца направляющих трубы при расходах природного газа более 2 м^3/ч. Для повышения надежности воспламенения и стабилизации пламени на стволе запальника между наконечником и стопорной гайкой необходимо установить подпорную шайбу в виде диска с отверстиями диаметром 8 мм. Кроме того, дополнительно необходимо установить центральную шайбу на высоковольтном электроде в месте выхода газа, диаметр которой должен быть больше внутреннего диаметра ствола (рис. 12.14).

Испытания, выполненные во ВНИИМТ показали, что при работе такого варианта запальника вытекающая из кольцевого канала струя, встречаясь с центральной шайбой, отклоняется к стенкам установочной трубы за подпорную шайбу. За подпорной шайбой при движении по трубе воздуха возникает зона циркуляции, в которой интенсивно перемешиваются газ и воздух. Такие дополнения к запальнику существенно расширяют пределы его устойчивой работы и позволяют работать с расходом газа до 10 м^3/ч.

Границы устойчивой работы запальника зависят от соотношения расходов газа и воздуха (рис. 12.15, *а*). Воспламенение смеси происходит в широком диапазоне изменения расходов газа и воздуха. Причем при всех

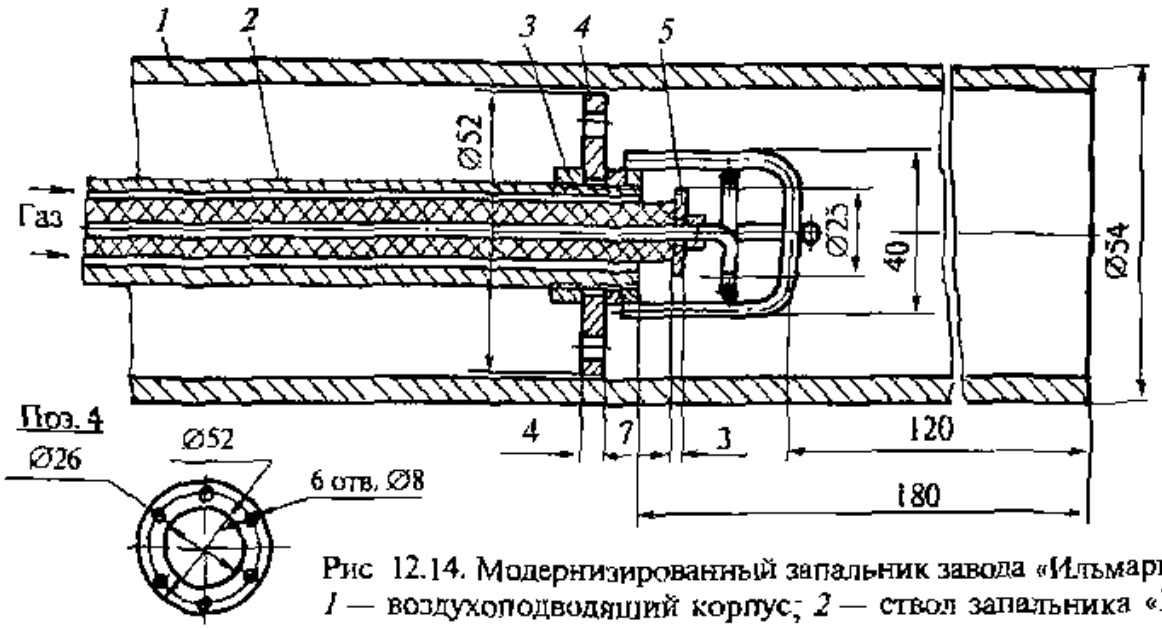


Рис 12.14. Модернизированный запальник завода «Ильмарине»: *1* — воздухоподводящий корпус; *2* — ствол запальника «Ильмарине». *3* — стопорная гайка; *4* — подпорная шайба; *6* — стабилизирующая шайба

нагрузках, лежащих левее прямой *1*, пламя стабилизируется непосредственно за подпорной шайбой. При длительной работе на таком режиме происходит разогрев наконечника и высоковольтного электрода. При нагрузках, лежащих между линиями *1* и *2*, происходит также устойчивое зажигание, но факел стабилизируется на торцевых элементах наконечника ствола. На всех нагрузках, лежащих правее линии *2*, факел от искрового разряда не воспламеняется, или происходит его срыв. Однако если пламя возникло на меньших нагрузках, то расход газа может быть увеличен в пределах, ограниченных линией *3*, без заметного изменения места стабилизации. При дальнейшем увеличении расхода газа факел стабилизируется только на конце запальника. В этом случае он может быть легко сорван потоком воздуха основной горелки. При устойчивом режиме работы длина факела в зависимости от расхода газа и воздуха приближенно может быть определена из рис. 12.15, *б*.

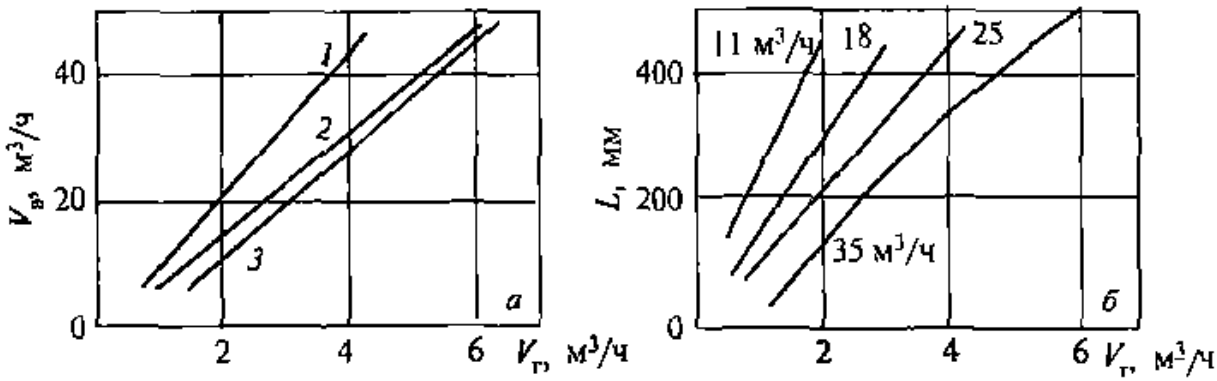


Рис. 12.15. Характеристики работы модернизированного запальника завода «Ильмарине»:

а — зависимость пределов воспламенения от расхода газа ($V_г$) и воздуха ($V_в$); *1* — фронт пламени за подпорной шайбой; *2* — то же, на контуре заземления; *3* — то же, на торце запальника, *б* — зависимость длины факела от расхода газа и воздуха (м³/ч)

12.6. КОМПЛЕКТ ПРИБОРОВ ЗАВОДА «СТАРОРУССПРИБОР»

Старорусский приборостроительный завод «Староруссприбор» разработал и серийно выпускает систему автоматизации отопительных котельных типа АМКО, КСУ и комплекты розжига и контроля. Входящие в эти системы газовый электрозапальник типа ЭЗ и прибор контроля факела «Пламя» (контрольный электрод типа КЭ для газового пламени и фотодатчик типа ФД для мазутного пламени) могут применяться не только в топках котлов, но и на нагревательных и термических печах.

Газовый электрозапальник типа ЭЗ (рис. 12.16) имеет следующие основные технические характеристики: диапазон давления газа, подводимого к электрозапальнику, *1* — 50 кПа; максимальная температура газа, поступающего в запальник, +50 °С; пропускная способность по природному газу при давлении 40 кПа 0,0014 кг/с; допустимые колебания напряжения, подводимого к электрозапальнику для воспламенения газа, 6—12 кВ; температура окружающего воздуха при относительной влажности до 80 % от 5 до 50 °С.

Электрозапальник выпускается в четырех исполнениях, различающихся длиной *L* (рис. 12.16):

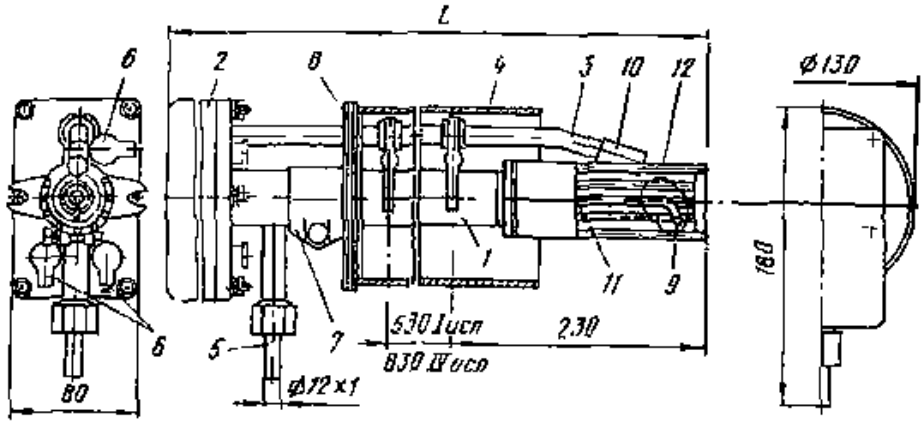


Рис. 12.16. Газовый электрозапальник типа ЭЗ завода «Старорусприбор»:
1 — труба запальника; *2* — коробка; *3* — контрольный электрод, *4* — ограждающий корпус; *5* — штуцер для подвода газа; *6* — клеммы; *7* — хомут; *8* — фланец ограждающего корпуса; *9* — стабилизатор пламени; *10* — жиклер контрольного электрода, *11* — сопло трубы запальника; *12* — наконечник

Исполнение	*L*, мм	Масса, кг
I	500	**6,2**
II	800	**9,5**
III	1400	**10,0**
IV	2000	**12,5**

При открывании электромагнитного газового клапана КГ-10, установленного на газопроводе к запальнику, газ, поступающий к запальнику, через штуцер попадает в коробку, откуда поступает в трубу запальника и в трубку контрольного электрода Истечение газа происходит через жиклер контрольного электрода и сопло трубы запальника Возникающая между наконечником и стабилизатором пламени искра воспламеняет газ. Напряжение подается от трансформатора зажигания ТЗ-2.

Контроль наличия собственного факела запальника осуществляется на принципе детектирующего свойства пламени, возникающего в цепи. контрольный электрод — пламя — стабилизатор пламени. Сигнал наличия факела поступает на блок управления розжига и сигнализации Воздух для сжигания газа запальника подается через воздухопровод основной горелки или же за счет разрежения в рабочем пространстве печного агрегата. Примерные варианты взаимного расположения газового электрозапальника типа ЭЗ с основной горелкой показаны для дутьевой горелки на рис. 12.17, *а*, для инжекционной горелки — на рис 12 17, *б* Электрозапальник должен быть расположен относительно горелочного устройства таким образом, чтобы обеспечивался его надежный розжиг. Благодаря наличию скользящего фланца электрозапальник может перемещаться в ограждающем корпусе закладной детали).

Для контроля факела основной горелки предусмотрено применение контрольного электрода или фотодатчика.

Контрольный электрод типа КЭ (рис. 12.18) предназначен для работы в качестве чувствительного элемента в схемах защиты и сигнализации при погасании газового факела основных горелок печного агрегата. Заводом

«Старорусприбор» контрольные электроды КЭ выпускаются в четырех исполнениях, отличающихся длиной:

Исполнение	Размеры, мм		Масса, кг
	L	*l*	
I	490	258	0,9
II	690	458	1,2
III	950	718	1,6
IV	1200	968	2,0

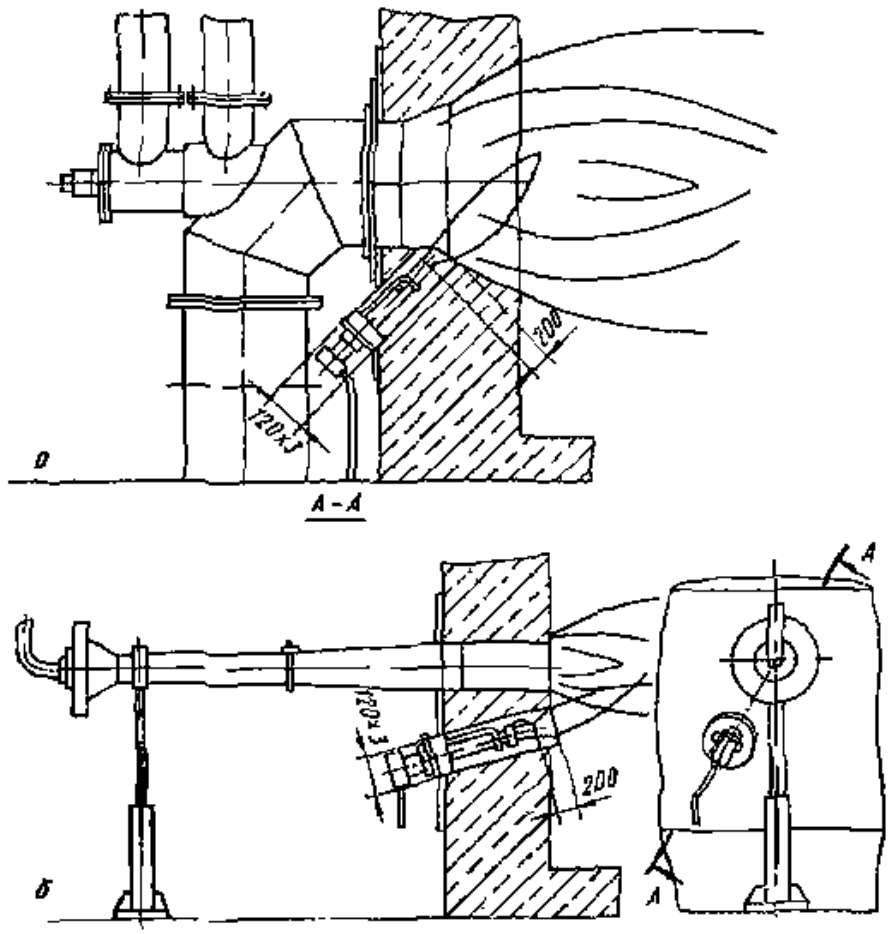


Рис 12.17. Установка газового электрозапальника типа ЭЗ:
а — на дутьевой горелке; *б* — на инжекционной горелке

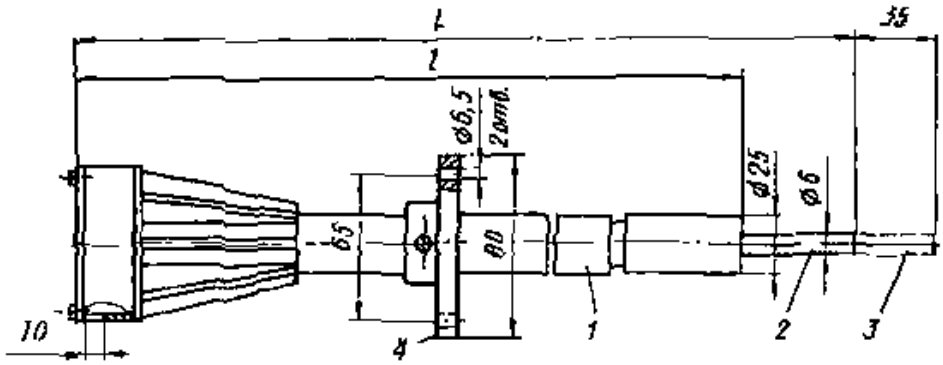


Рис. 12 18. Контрольный электрод типа КЭ
1 — труба, *2* — держатель; *3* — чувствительный элемент; *4* — подвижной фланец

Контрольный электрод устанавливается под углом 40—60° к оси основной горелки, причем расстояние от выходного сечения горелки до конца электрода должно быть не более 80 мм.

Фотоэлектрический датчик типа ФД (рис. 12.19) предназначен для работы в качестве чувствительного элемента в комплекте с автоматом контроля пламени, который применяют в схемах защиты и сигнализации при погасании мазутного факела в печном агрегате.

Фотодатчик типа ФД устанавливают таким образом, чтобы он был ориентирован на светлую (периферийную) часть факела (рис. 12.20). Фотодатчик можно крепить на специальном тубусе, установленном либо в огнеупорной футеровке агрегата, либо на самой горелке, но не далее чем в 1,0—1,2 м от ее выходного сечения.

При необходимости снижения чувствительности фотодатчика (во избежание реакции на излучение огнеупорной футеровки) он может быть задиафрагмирован шайбами необходимого диаметра, которые поставляются с фотодатчиком.

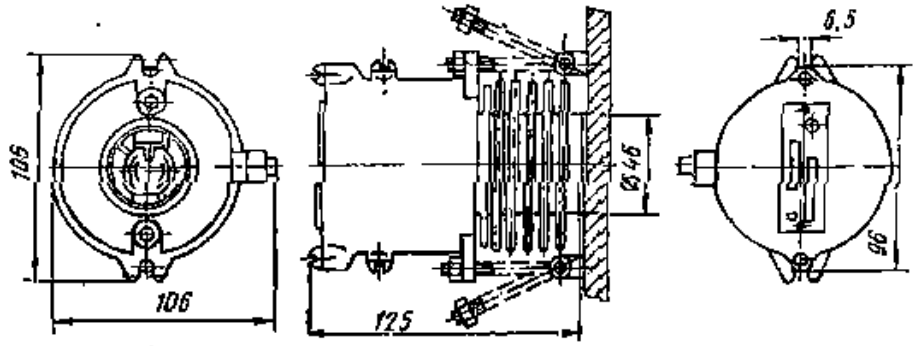


Рис. 12.19. Фотодатчик типа ФД

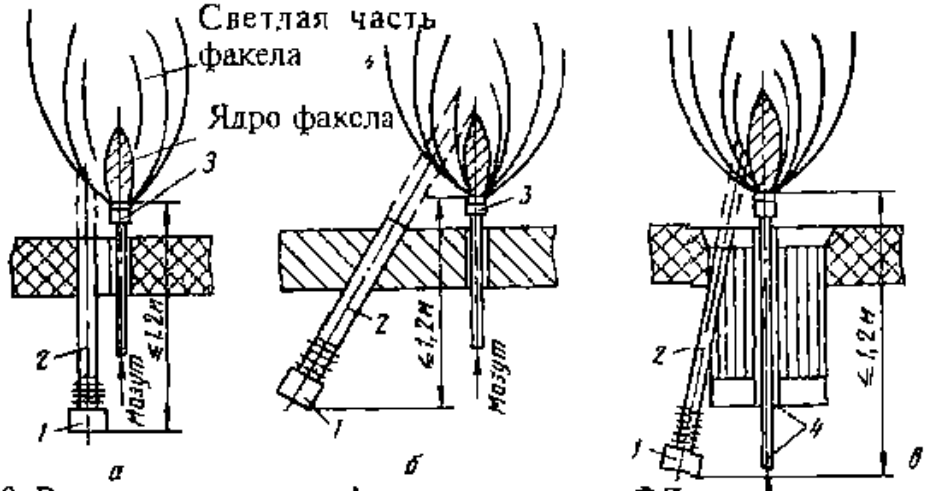


Рис. 12.20. Варианты установки фотодатчиков типа ФД:
а — параллельно оси форсунки, *б* — под углом к оси форсунки; *в* — в газомазутной горелке; *1* — фотоэлектрический датчик типа ФД; *2* — тубус; *3* — мазутная форсунка; *4* — газомазутная горелка

12.7. ДВУХПРОВОДНЫЙ ЗАПАЛЬНИК ВНИИМТ

В институте ВНИИМТ разработан и изготавливается двухпроводный электрогазовый запальник наружным диаметром 36÷40 мм. Длина запаль-

ника выбирается в зависимости от размеров основного горелочного устройства и компоновки его на стенке теплового агрегата.

Разработано несколько модификаций запальников, отличающихся конструктивным выполнением его внутренних элементов. Во всех случаях запальник имеет воздухоподводящий корпус, стабилизирующий наконечник, выполненный из жаростойкой стали, газовую часть и клеммную коробку (рис. 12.21).

Газовая часть горелки имеет газоподводящий штуцер с газовой удлинительной трубкой и гнезда для крепления высоковольтного и контрольного электродов в керамических изоляторах.

На торце удлинительной трубки выполнены сменное газовое сопло и подпорная решетка, в которой имеются каналы для прохода электродов и отверстия с завихрителями воздуха.

Если запальник при работе должен обеспечивать контроль только собственного пламени, датчик контроля выполняется укороченным длиной до пережима стабилизирующего наконечника. При необходимости контроля пламени основной горелки торец контрольного электрода выводят за пределы запальника с тем, чтобы он омывался основным пламенем.

Сменное газовое сопло имеет отверстия для выхода газа вдоль стенки подпорной решетки в зону выхода потоков воздуха и одно отверстие для *выхода газа вдоль оси горелки.*

Мощность запальника изменяется в пределах от 5 до 40 кВт. При этом давление газа и воздуха перед ним находится в пределах от 1 до 10 и от 0,5 до 0,7 кПа соответственно. Следует отметить, что с уменьшением размеров запальника повышаются требования к качеству его изготовления, так как незначительные отступления от проектных размеров приводят к существенному изменению расходных характеристик и области устойчивой работы. Для подстройки расходных характеристик горелки под давления в воздушной и газовой сети агрегата в корпусе запальника и на его подводящих штуцерах выполнены регулировочные винты.

Пределы устойчивой работы запальника существенно зависят от размеров и положения выходных газовых отверстий, типа наконечника, положения искрообразующего элемента в камере зажигания.

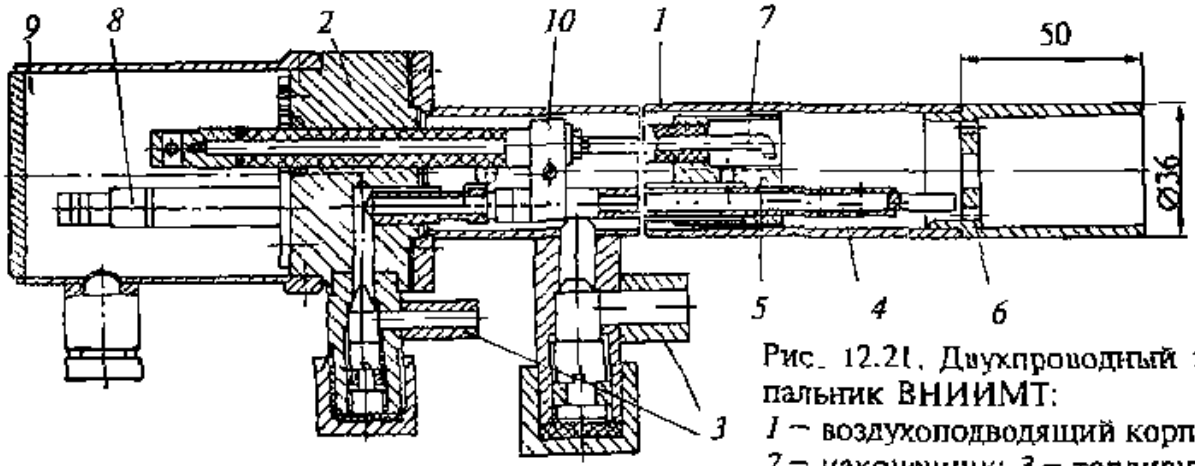


Рис. 12.21. Двухпроводный запальник ВНИИМТ:
1 – воздухоподводящий корпус; *2* – наконечник; *3* – топливный штуцер; *4* – газовая трубка; *5* – газовое сопло, *6* – подпорная решетка; *7* – электрод высоковольтный; *8* – то же, контрольный; *9* – изолятор, *10* – клеммная коробка

Длина факела в зависимости от тепловой мощности изменяется от 50 до 400 мм.

Длина корпуса горелки практически не влияет на характеристики факела, так как при удлинении корпуса все соотношения размеров основных элементов в месте встречи струй газа и воздуха не изменяются.

12.8. ГОРЕЛКА ЗАПАЛЬНО-ЗАЩИТНАЯ ЗЗГ

Разработанная ВНИИпромгазом горелка ЗЗГ предназначена для автоматического розжига дутьевых промышленных горелок и контроля за наличием факела. Конструкция горелки предусматривает струйную подачу газа в поток воздуха. Газовоздушная смесь поджигается запальной свечой и выбрасывается в виде факела через огневую розетку и стабилизирующую насадку. Фотодатчик контроля пламени, установленный в торце ствола горелки, подает сигнал на вторичный прибор устройства контроля факела УКФП1, который воздействует на запорный орган, и начинается подача газа к основной горелке. После розжига основной горелки подача газа к ЗЗГ прекращается и фотодатчик начинает вести контроль за факелом основной горелки. При его погасании происходит отключение подачи газа и подаются аварийные сигналы.

Запально-защитная горелка ЗЗГ имеет следующие технические характеристики:

Номинальная тепловая мощность, кВт	15
Номинальное давление газа, кПа	1,2
Номинальное давление воздуха, кПа	2,0
Коэффициент расхода воздуха при номинальном режиме	1,05
Длина факела при номинальной тепловой мощности, мм	300
Коэффициент рабочего регулирования	1,5

Общий вид запально-защитной горелки ЗЗГ приведен на рис. 12.22.

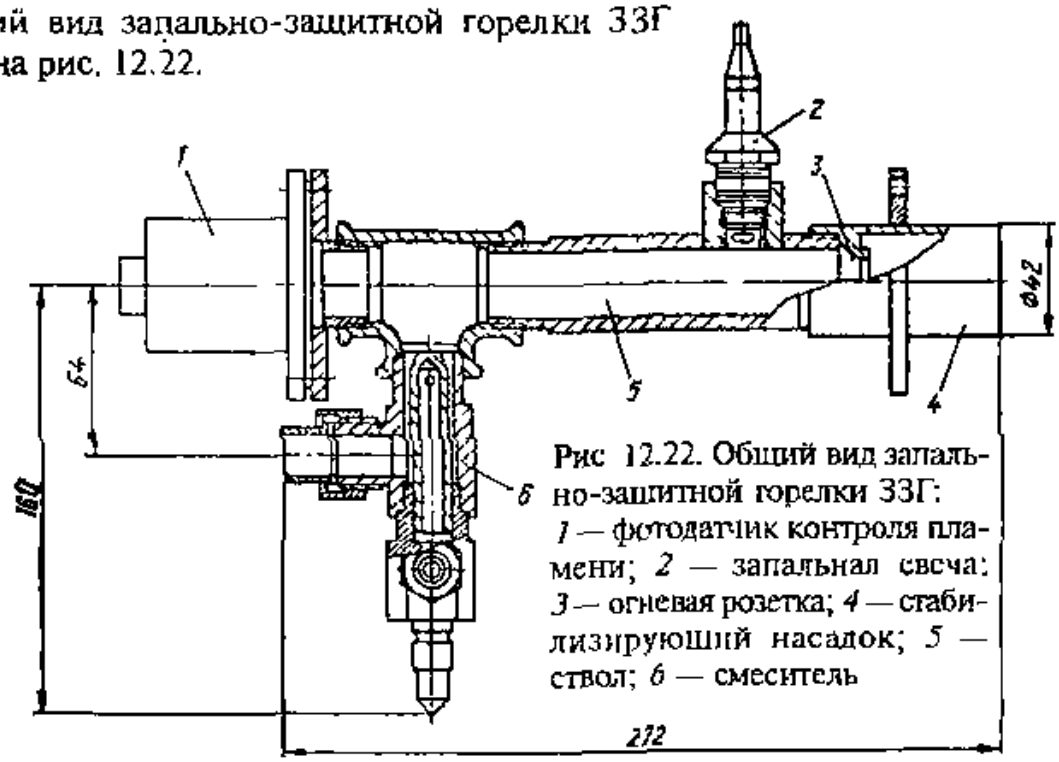


Рис. 12.22. Общий вид запально-защитной горелки ЗЗГ: *1* — фотодатчик контроля пламени; *2* — запальная свеча; *3* — огневая розетка; *4* — стабилизирующий насадок; *5* — ствол; *6* — смеситель

12.9. ЗАПАЛЬНО-СИГНАЛИЗИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ТИПА ЗСУ-П

Запальные сигнализирующие устройства разработаны и изготавливаются Казанским предприятием «Энерготеплоавтоматика».

Устройство предназначено для розжига газовых и мазутных горелок котельных агрегатов, топок печей и работает на природном и сжиженном газе. Устройство обеспечивает воспламенение топлива, подаваемого в запальник и основную горелку, при работе топок под давлением и разрежением.

В комплект устройства входит: горелка запально-сигнализирующая, блок искрового розжига, блок управления, вентиль электромагнитный, свеча зажигания.

Разработанная серия запально-сигнализирующих устройств различается в основном конструкцией газовых запальников. Для всех типоразмеров диаметр ствола запальника составляет 60 мм. Длина корпуса L зависит от размеров основного топочного устройства и изменяется от 0,5 до 5,0 м.

Запально-сигнализирующее устройство имеет следующие технические характеристики:

Номинальная тепловая мощность, кВт	Около 50
Давление газа перед запальником, кПа	Не более 40
Давление воздуха, кПа	0,6–5,0
Длина факела, мм	~800
Быстродействие на наличие (отсутствие) пламени, с	Не более 1

Особенностями всех запальных горелок являются:

- разделение подводимого газа на два потока. Один поток направляется для образования первичной газовоздушной смеси, другой поток по трубопроводам подается непосредственно к выходному отверстию горелки;
- в качестве стабилизатора горения применяется диск, расположенный в стволе запальника,
- зажигание газовоздушной смеси производится в детонационной трубе переменного диаметра с выбросом пламени в застойную зону за стабилизатор.

В запально-сигнализирующем устройстве ЗСУ-П применен струйный вихревой сигнализатор горения запального газа с первичным выходным сигналом в виде знака перепада давления и вторичный преобразователь в виде дифференциального реле давлений. Принцип работы сигнализатора горения основан на изменении давления в вихревом модуле в зависимости от наличия или отсутствия горения за стабилизатором.

При отсутствии горения струи воздуха или газовоздушной смеси, вытекающие в вихревой модуль, создают в нем разрежение. При воспламенении газа разрежение в вихревой камере пропадает и в ней возникает давление. Это изменение через прогиб мембраны датчика-реле преобразуется в сигнал, который передается в блок управления.

В запально-сигнализирующем устройстве ЗСУ-ПИ1 применен ионизационный сигнализатор горения, встроенный в вихревую камеру. Схема устройства ЗСУ-ПИ1 показана на рис. 12.23.

Устройство состоит из корпуса *1* (труба Ø57×3,5), на огневом конце

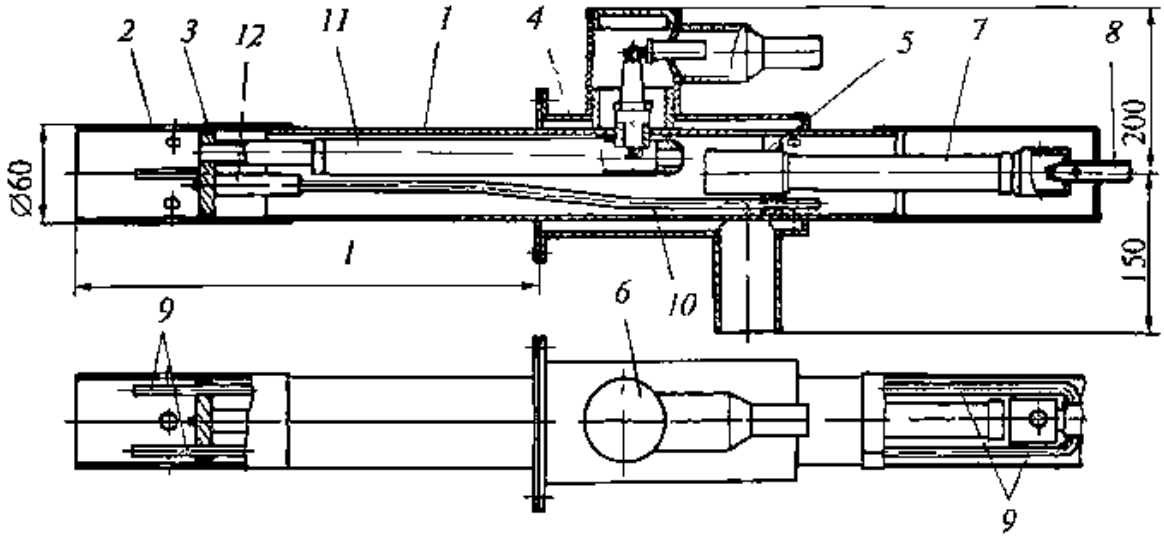


Рис. 12 23. Запально-сигнализирующее устройство ЗСУ-ПИ1 (обозначение в тексте)

которого расположен насадок *2*. Внутри насадка расположен диск *3*, выполненный в виде плохообтекаемого тела, служащий стабилизатором горения. Насадок и диск образуют сопловой блок, которыи преимущественно определяет гидравлическое сопротивление воздушного тракта запальника. Диск установлен соосно насадку с кольцевым равномерным зазором 4 мм. На «холодном» конце запальника расположен воздушный корпус *4*, в центральной части которого расположены окна перепуска воздуха *5* и свечной патрубок *6*. На внешнем конце корпуса расположен эжектор *7* со штуцером подвода газа *8*. Эжектор закреплен на кольцевой приставке со сквозными отверстиями для прохода газовых перепускных трубок *9* и защитной трубки сигнализатора горения *10*. Внутри корпуса расположена детонационная трубка *11*, на конце которой, обращенном к эжектору, расположены огнепреградитель и свеча зажигания, к которой подведен высоковольтный провод. Насадок детонационной трубки выведен через диск в первичную зону горения внутри насадка. На диске соосно с ним расположен вихревой насадок *12*, внутри которого на керамических изоляторах установлен контрольный электрод, электрически соединенный со специальным разъемом (на рис. 12.23 не показан).

Устройство работает следующим образом. Воздух, подводимый к патрубку запальника, через перепускные окна проникает в корпус запальника, где расположен эжектор. Благодаря тому, что межкорпусный объем сообщается с полостью установочной трубы запальника через перепускные окна, давление воздуха на входе в эжектор мало отличается от давления на огневом торце запальника. Это благоприятно сказывается на стабильности качества смеси (стабильности коэффициента расхода воздуха смеси) при изменениях давления воздуха и давления газа в широких пределах (более чем на 2 порядка), в том числе и при изменениях вышеназванных давлений с большой скоростью.

Газ, подводимый ко входному штуцеру, разделяется на два потока. Один поток отводится в перепускные трубы *9*, другой через сопло штуцера вытекает в эжектор, где образуется газовоздушная смесь.

После некоторого малого отрезка времени внутренний объем корпуса заполняется газовоздушной смесью, и она истекает в виде кольцевой струи через щелевой канал между насадком и стабилизатором. Одновременно малая

часть смеси протекает через 8 тангенциальных сопел вихревого насадка, образуя вблизи контрольного электрода закрученную струю с большими радиальными и продольными градиентами скорости. Часть газовоздушной смеси проходит через огнепреградитель и заполняет детонационную трубку. После подачи высокого напряжения на свечу смесь в детонационной трубке зажигается и в зону за диском подается импульс пламени, который и зажигает смесь в первичной зоне горения. Горение в этой зоне устойчиво благодаря существованию за диском рециркуляционной малоскоростной зоны и экранному эффекту насадка, защищающего первичную зону горения от внешнего потока. Струи газа, истекающие из перепускных трубок, зажигаются от пламени первичной зоны и образуют вторичную зону горения. Следует иметь в виду, что для вторичной зоны горения воздух забирается из окружающей эту зону среды (из потока вторичного воздуха разжигаемой горелки). От первичной зоны горения зажигается закрученный поток смеси, истекающий из вихревого насадка и омывающий контрольный электрод. Благодаря крутке струи вблизи электрода положение фронта пламени относительно электрода практически не изменяется в широком диапазоне изменения давления смеси. Сигнал в виде изменения электрического сопротивления промежутка «электрод—корпус запальника» через разъем и экранированный провод передается на щиток управления.

Запальник ЗСУ-ПИЗ имеет увеличенную длину корпуса и сужение торца на участке после стабилизирующего диска. Запальник оснащен пульсационным сигнализатором наличия пламени. Действие датчика основано на различии в спектрах амплитуды давления, которое генерируется гидравлическим трактом запальника в зависимости от наличия или отсутствия горения газа.

Пульсационный сигнализатор состоит из импульсной трубки, расположенной в корпусе запальника и выведенной на торец соплового блока, электродинамического преобразователя пульсаций давления в электрический сигнал, соединяемого с импульсной трубкой дюритовым шлангом диаметром 4 и длиной 2—10 м, фильтра низких частот и амплитудного детектора. Данный вариант запально-сигнализирующего устройства имеет более высокую надежность работы сигнализатора, однако требует давления газа более 30 кПа (чем больше давление газа, тем больше давление газовоздушной смеси и тем больше амплитуда первичного сигнала).

Запальник ЗСУ-ПИ4 предназначен для работы в запыленных условиях. Конструктивно он выполнен так же, как запальник ЗСУ-ПИЗ (с пульсационным сигнализатором). Отличия заключаются в том, что детонационная трубка имеет широкий входной торец, не защищенный огнепреградителем, а вместо двух перепускных труб выполнен один газовый канал, оканчивающийся соплом и дополнительным эжектором.

12.10. ЭЛЕКТРОГАЗОВЫЙ ИНЖЕКЦИОННЫЙ ЗАПАЛЬНИК

Электрогазовый инжекционный запальник разработан НПФ «Горелочный центр» и предназначен для розжига горелок теплогенераторов, устанавливаемых в воздуховодах, и ионизационного контроля пламени.

Общий вид запальника показан на рис. 12.24, техническая характеристика приведена ниже.

Запальная горелка состоит из инжекционного смесителя с камерой горения, высоковольтного и контрольного электродов и клеммной коробки.

Инжекционный смеситель с камерой горения предназначен для нагнетания в горелку природного газа, подсоса воздуха и устойчивого горения. Он состоит из газовой подводящей трубки диаметром 20 мм, оканчивающейся соплом с диаметром 2,0 мм, входного диффузора, смесителя, наконечника и камеры горения.

Входной диффузор выполнен в виде перфорированного канала и крепится при помощи резьбового соединения на втулке монтажного фланца. Перфорация, состоящая из 4 отверстий диаметром 15 мм, может перекрываться полностью или частично кольцом, которое имеет три фиксирующих винта.

Выходной наконечник крепится к инжекционному смесителю при помощи резьбового соединения. Он имеет осевое отверстие для прохода газовоздушной смеси диаметром 16 мм и 8 отверстий диаметром 2,2 мм, расположенных под углом к оси горелки.

Камера сгорания выполнена из жаропрочного металла в виде цилиндра диаметром 50 мм и длиной 130 мм. Она устанавливается на выходной наконечник инжекционного смесителя и жестко крепится к нему при помощи трех стопорных винтов. На наружной поверхности камеры горения приварены два сегмента с отверстиями под изоляторы. На одном из сегментов установлен прижимной винт со скобой.

Контрольный и высоковольтный электроды выполнены из нихромовой проволоки диаметром 4 мм, защищенной в местах соприкосновения с металлом-изолятором.

В месте соприкосновения электродов с крепежным фланцем они проходят через две втулки, выполненные из стеклотекстолита. Эти втулки крепятся при помощи клеммы и прижимной гайки.

Изоляторы, установленные на наружной поверхности камеры горения, выполнены из корунда, покрытого глазурью, и жестко крепятся при помощи прижимного винта.

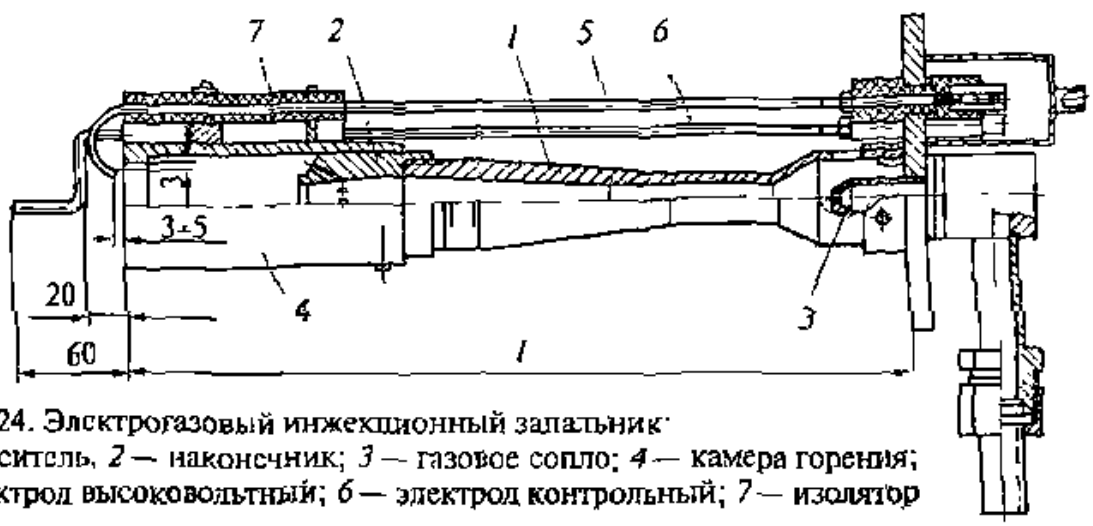


Рис. 12.24. Электрогазовый инжекционный запальник:
1 — смеситель, *2* — наконечник; *3* — газовое сопло; *4* — камера горения; *5* — электрод высоковольтный; *6* — электрод контрольный; *7* — изолятор

Клеммная коробка крепится к монтажному фланцу при помощи двух винтов и служит для защиты обслуживающего персонала от случайного соприкосновения с токоведущими проводами. На монтажном фланце выполнена клемма для заземления запальной горелки. Газоподводящий штуцер может быть повернут в любую удобную для монтажа сторону или выполняться соосно с корпусом горелки.

Запальная инжекционная горелка имеет следующую техническую характеристику:

Номинальная тепловая мощность, кВт 26,3
Номинальное давление газа, кПа 80
Допустимое давление в воздуховоде (теплогенераторе), кПа ..... ≤0,20
Коэффициент рабочего регулирования 6

Эксплуатационные характеристики запальной горелки приведены на рис. 12.25.

При монтаже запальная горелка устанавливается на стенке воздуховода и на всю длину вводится в рабочий объем, по которому движется поток воздуха, подогреваемый теплогенератором. Этот же воздух в качестве первичного подсасывается струей вытекающего газа в смеситель горелки.

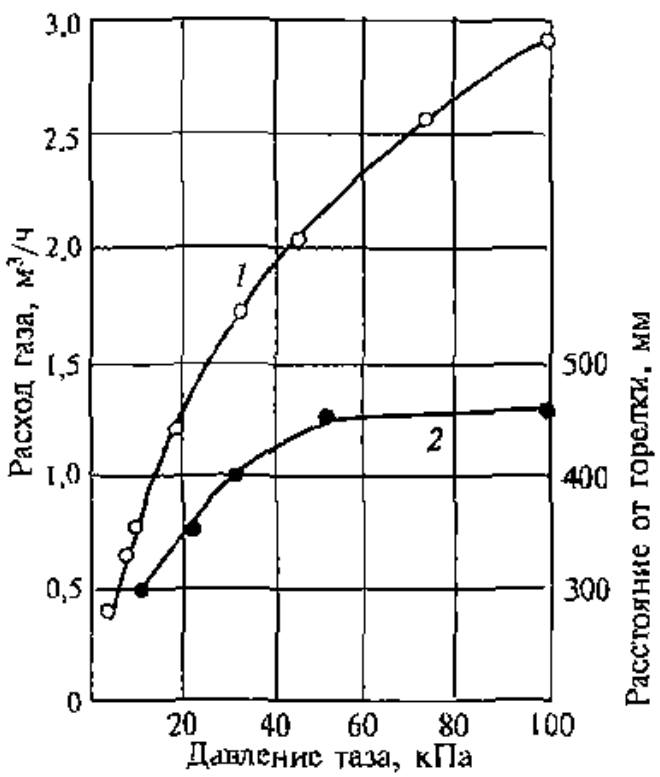


Рис. 12.25. Эксплуатационные характеристики инжекционной запальной горелки:
расходная характеристика (*1*); длина видимого факела в зависимости от давления газа (*2*)

При скоростях сносящего воздушного потока в воздуховоде более 10 м/с возможно искривление оси факела, вытекающего из запального устройства. Это может привести к отказам в контроле запального факела и в розжиге основной горелки. Для исключения таких ситуаций в районе развития запального факела со стороны набегающего потока воздуха необходимо устанавливать защитный экран.

12.11. ПЛАЗМЕННЫЙ ЗАПАЛЬНИК КОНСТРУКЦИИ НИИТЯЖМАША ОАО «УРАЛМАШ»

НИИтяжмаш ОАО «Уралмаш» разработал специальную установку плазменного розжига, выполненную на основе стандартного блока плазменной резки металла. Она состоит из собственно силового блока и плаз-

мотрона. В зависимости от типа агрегата и расположения в нем горелочных устройств возможны различные варианты комплектации. Например, на одну сторону печи устанавливается один силовой блок, соединенный кабельными коммуникациями с плазмотронами горелок.

Силовой блок состоит из смонтированных в одном корпусе источника питания и блока коммутации. Источник питания представляет собой трехфазный выпрямитель, который содержит силовой трансформатор с подвижными первичными катушками, выпрямительный кремниевый блок, возбудитель дуги, пусковую и защитную арматуру. Коммутационный блок состоит из реле и кнопочных выключателей по количеству плазмотронов.

Питающее напряжение установки 380 В, номинальное рабочее напряжение на дуге 140 В при токе 50 А, потребляемая мощность 14,5 кВт.

В качестве плазмообразующего газа применяется осушенный воздух с давлением не более 60 кПа при расходе 1–1,5 м^3/ч.

Запальник состоит из трубы диаметром 22 мм, внутри которой расположен стержень, центрируемый изоляторами (рис. 12.26). На головном конце стержня установлен завихритель, оканчивающийся катодом. Торец трубы оканчивается медным анодом с отверстием для прохода воздуха. Между торцом трубы и катодом установлен изолятор. Такой же изолятор установлен в хвостовой части запальника, имеющей клеммную коробку. Ввод воздуха в запальник выполнен через патрубок. Для крепления запальника в корпусе горелки предусмотрен фланец с сальниковым уплотнением. Подсоединение токонесущих проводов выполнено к корпусу запальника и стержню.

При работе запальника в его корпус все время подается воздух, который, проходя завихритель, интенсивно охлаждает катод и анод. Расстояние между катодом и анодом должно быть в пределах 0,5–1,2 мм. Регулируется дуга изменением расхода воздуха. Выдуваемая из запальника плазменная струя с видимой длиной 70–100 мм имеет температуру около 4000 °С.

Запальник работает кратковременно: при токе дуги 5–10 А — не более 15 с; при токе 35 А — не более 10 с при времени пауз между двумя последовательными включениями не более 60 с.

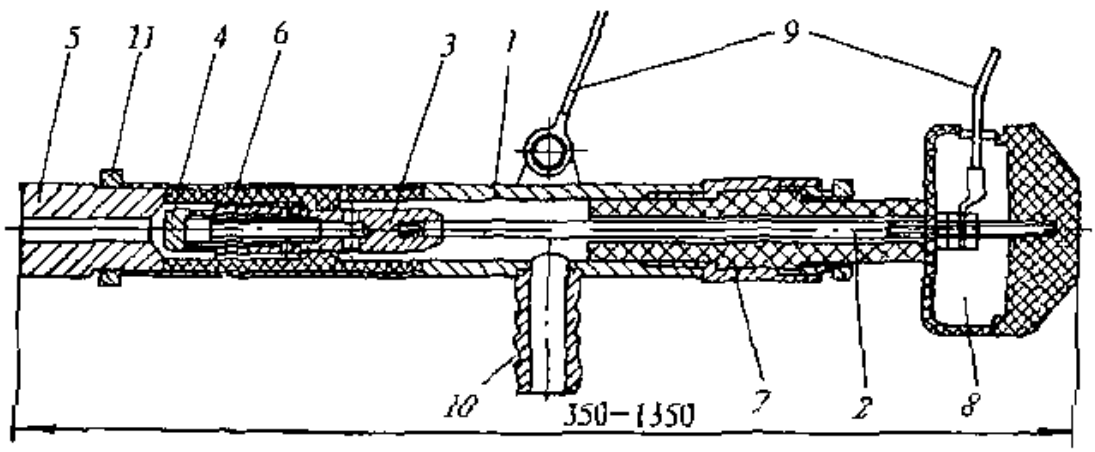


Рис. 12.26. Плазменный запальник НИИтяжмаша ОАО «Уралмаш»:
1 – корпус; *2* – стержень; *3* – завихритель; *4* – катод; *5* – анод; *6* – головной изолятор; *7* – хвостовой изолятор; *8* – коробка клеммная; *9* – коммутационные провода; *10* – патрубок воздушный; *11* – регулировочная гайка

12.12. СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ

Для контроля пламени используются следующие параметры: температура, ионизация и излучение газов

Методы контроля пламени по температуре газов основаны на тепловом воздействии факела на твердое металлическое тело, изменяющее вследствие нагрева дяину и форму. Подобные датчики яаляются, по существу, *датчиками температуры, а не пламени. Датчики для такого контроля вы*полняются в виде устройств прямого действия, у которого чувствительный элемент непосредствеино связан с топливным клапаном.

Такие устройства имеют большое постоянное время срабатывания — около 120 с, а при работе на печах это время увеличивается

В качестве чувствительного элемента для контроля факела используют также термопары. При нагреве спал термопары возникает термо-э. д. с., с помощью которой управляют отсечным клапаном на газопроводе перед горелками.

Основной недостаток термоэлектрического метода — большая инерционность отключения подачи газа после погасания факела.

При сжигании топлива в объеме факела, особенно в зоне интенсивного горения, имеются свободные электроны и ионы. Это используется для контроля факела путем измерения генерируемой пламенем э д с. или его электропроводности. В первом случае при введении в пламя металлических электродов потенциалы, возникающие на границе соприкосновения каждого электрода с пламенем, имеют различные уровни. Разность этих потенциалов является электродвижущей силой межэлектродного промежутка. Электрический сигнал, снимаемый с электродов, является источником информации о наличии пламени.

Недостаток такого способа контроля — разогрев электродов, находящихся в пламени, до высокой температуры, их деформация и разрушение. Кроме того, при использовании этого метода в высокофорсированных топках у которых температура в ядре факела достигает около 2000 °С, вследствие термоэлектронной эмиссии вокруг разогретых электродов находятся не только электроны и ионы, генерируемые пламенем, но и электроны, испускаемые разогретыми электродами. Поэтому если электроды расположены близко друг к другу, то при погасании факела наблюлается большая инерционность спада э. д. с, вследствие медленного уменьшения температуры электродов. Во избежание этого необходимо фиксировать только переменную составляющую э. д. с. или изготавливать электроды водоохлаждаемыми

Для контроля наличия горения по электропроводности используют способность пламени пропускать электрический ток при приложении напряжения к системам «электрод—факел—электрод», «электрод—факел—корпус горелки» или «факел—факел»

*В схемах, в которых контроль пламени осуществляется вследствие по*дачи на электрод и корпус горелки постоянного напряжения, при погасании факела эта электрическая цепь разрывается и снимается питание с клапана, отсекающего подачу топлива. Недостаток схемы — возможность *ложного сигнала наличия факела при постоянном снижении сопротивле-*

ния изоляции между электродом и корпусом горелки в процессе эксплуатации, а также при коротком замыкании во входной цепи.

В системах «электрод—факел—корпус горелки» при подаче переменного напряжения в замкнутой цепи так же, как в однополупериодном выпрямителе импульсы тока протекают только в одном направлении. Достижение такого вентильного эффекта получают из-за разницы площадей поверхности электрода и горелки. Движение тока в цепи направлено от электрода к корпусу горелки. Для повышения долговечности службы электродов их выполняют из дисилицида молибдена, но при сжигании мазута стойкость их тоже небольшая.

Кроме стойкости электродов, важен выбор их расположения в туннеле. При изменении расходов газа и воздуха фронт воспламенения может отодвигаться от горелки, пульсировать, что часто является причиной поступления ложного сигнала.

В системах «факел—факел» в качестве датчика контроля пламени используется постоянно работающая дежурная горелка. В этом случае питающее напряжение подается на корпус основной горелки и на корпус горелки-датчика, выполненой с электроизоляцией от основных конструкций.

Следует отметить, что контроль наличия факела по электропроводности оказывается достаточно надежным только для углеводородных пламен и пламен промышленных топлив и непригодным для контроля пламени водорода. Исследования, выполненные при разработке автоматических горелок, предназначенных для сжигания водорода, используемого в термических печах в качестве защитных сред, показали отсутствие ионизационного контроля при горении чистого водорода. При добавке в поток водорода, вытекающего из горелки, или в поток воздуха углеводородных фракций ионизационный контроль возобновляется.

Топливный факел — источник электромагнитного излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной частях спектра. Кроме того, для определенных режимов горения топлива характерно наличие в объеме факела турбулентных пульсаций, микровзрывов газовоздушной смеси, что приводит к наложению на постоянный уровень излучения факела переменных составляющих. На фиксации этих пульсирующих лучистых потоков основаны фотометрические методы контроля факела.

Факел природного газа излучается главным образом в инфракрасной части спектра. Основная часть излучения мазутного факела приходится на его видимую и инфракрасную области.

Эксплуатационные характеристики и область возможного применения фотометрических устройств контроля пламени различных типов значительно зависит от характеристик используемого приемника излучения. В качестве приемника используют фоторезисторы, фотоэлементы, кремниевые и германиевые фотодиоды и фототриоды. Поток излучения факела контролируемой горелки падает на приемник и вызывает изменение его проводимости, что фиксируется электронной схемой.

Одним из важных критериев отбора приемников излучения для фотометрических устройств контроля факела является, кроме спектральной характеристики и чувствительности, максимально допустимая температура их нагрева.

При регистрации видимого излучения в качестве приемника используются фотосопротивления со спектральными характеристиками в области длин волн 0,4–0,7 мкм (видимый свет). Это позволяет избавиться от инфракрасного излучения стенок топочной камеры. Однако этот приемник непригоден для контроля прозрачных факелов, у которых наиболее интенсивное излучение сосредоточено в инфракрасном диапазоне. Поэтому устройства контроля факела с такими приемниками используют в основном для контроля факела мазутных горелок. Недостаток схемы контроля по излучению в видимой части спектра — влияние температуры окружающей среды и временного старения фотосопротивления на характеристики срабатывания.

Для преобразования пульсаций светимости пламени в области длин волн от 1 до 3,2 мкм в электрический сигнал постоянного тока применяют низкочастотный фотодатчик ФДЧ. Входной сигнал датчика — переменная освещенность преобразуется фоторезистором в переменное напряжение, а затем выходным каскадом обеспечивается изменение выходного сигнала от нуля до 10 В. Быстродействие датчика при включении пульсирующего света от 0,2 до 1,0 с, при выключении — 1÷2 с.

В случае контроля факела по пульсациям освещенности при погасании пламени пульсирующая составляющая исчезает, и на приемник поступает лишь постоянное по интенсивности излучение от накаленного участка стенки топочной камеры. Поэтому после погасания факела входной сигнал усилителя будет равен нулю, несмотря на наличие излучения стенок топки.

В некоторых случаях после погасания факела в зоне обзора приемника может оказаться поток нагреваемого воздуха с переменной плотностью, который, экранируя разогретые стенки топки, генерирует поступление на приемник переменного инфракрасного излучения, что также является источником ложной информации о наличии пламени.

При неудачном расположении любого фотоприемника возможно ложное включение отсечного клапана, например в результате реакции приемника на запальный факел или искровой разряд.

При установке нескольких горелок на печи возможна реакция приемника на факел соседней или противоположной горелки. Поэтому необходим тщательный отбор места установки приемника излучения и диафрагмирование зоны его обзора.

В высокотемпературных топках большой уровень постоянного топочного излучения может вызвать «засветку» приемника и снизить его чувствительность.

В качестве приемников ультрафиолетового излучения применяют различные типы вакуумных фотоэлементов с катодами из чистого металла, так как наличие примесей в материалах электродов приводит к повышению коротковолновой границы фиксируемого ими спектра. Входные окна приемников должны быть выполнены из кварцевого или увиолевого стекла.

Наибольшее распространение получили датчики ФДУ. Они обнаруживают пламя по его ультрафиолетовому излучению в диапазоне длин волн от 200 до 300 нм на фоне инфракрасного и видимого излучения. Датчик не реагирует на излучение топочных стен, нагретых до 1300 °С, а его быстродействие не превышает 2 с.

Глава 13. ОГНЕУПОРНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ ТУННЕЛИ

Огнеупорный горелочный туннель играет существенную роль в организации сжигания топлива: он является дополнительным смесителем, источником зажигания и стабилизатором горения газовоздушной смеси. В ряде случаев при организации факела специальной формы (например, плоского факела) горелочный туннель играет важнейшую роль в создании формы факела и является неотъемлемой частью горелки.

Горелочный туннель образуется в огнеупорном горелочном камне или блоке. Крупные блоки по условиям изготовления, транспортировки и монтажа делают составными из нескольких фасонных огнеупорных кирпичей.

Материал огнеупорных горелочных блоков выбирают в зависимости от условий работы горелочного туннеля. Горелочные блоки, работающие в относительно легких условиях, изготавливают из шамота класса А (28 % Al_2O_3), имеющего плотность 1,9 кг/дм^3, огнеупорность 1730 °С, предельную температуру службы 1300 °С. Для более тяжелых условий работы применяют высокоглиноземистый кирпич, обычно МЛО-62 (62 % Al_2O_3), имеющий плотность 2,4 кг/дм^3, огнеупорность 1800° С, предельную температуру службы 1500 °С. Крупные неразъемные горелочные блоки изготавливают из жароупорного высокоглиноземистого бетона.

Для горелок без предварительного смешения огнеупорный туннель играет роль стабилизатора горения и находится в сравнительно легких условиях, так как зона высоких температур в факеле этих горелок находится на значительном расстоянии от горелки, за пределами туннеля. Горелочный туннель для этих горелок имеет форму факела, т. е. расширяющегося диффузора. Длину и поперечные размеры туннеля выбирают таким образом, чтобы факел касался стенок туннеля в самом его конце, перед выходом в печь. Это улучшает условив работы туннеля, обеспечивая в то же время надежное поджигание газовоздушной смеси. Нормализованы огнеупорные горелочные блоки для горелок типа «труба в трубе».

Для горелок с улучшенным смешением огнеупорный туннель не только стабилизирует горение, но и помогает создать необходимую форму факела. Горелочный туннель для этих горелок работает в более тяжелых условиях, так как в нем в значительной степени происходит сгорание газа. В особенно тяжелых условиях работают горелочные туннели у горелок, образующих плоский факел, так как в этом случае сгорание газа происходит на огнеупорной поверхности туннеля. Нормализованы огнеупорные горелочные блоки для дутьевых горелок типа ГНП и плоскопламенных горелок типов ГР и ГПП.

У горелок с полным предварительным смешением практически все сгорание происходит в туннеле. Огнеупорный туннель в данном случае является не только стабилизатором горения, но и высокотемпературным излучателем. Туннель работает в весьма тяжелых условиях, испытывая воздей-

ствие высоких температур и высокоскоростных потоков. Для надежной стабилизации горения требуется специальная форма туннеля с резким расширением и созданием у корня факела зон циркуляции продуктов сгорания, которые и служат источниками поджигания газовоздушной смеси. Нормализованы горелочные блоки для инжекционных горелок и инжекционно-атмосферных горелок типа ИА.

В некоторых горелках используются охлаждаемые металлические туннели, например у скоростных горелок типа ГВ и горелок с переменным избытком воздуха типа ПИВ. Есть случаи, когда в высокотемпературных печах горелки вообще не нуждаются в горелочных туннелях. Таковы горелки нагревательных колодцев, мартеновских печей и т. д.

В данной главе описываются только нормализованные огнеупорные горелочные блоки.

Для горелок, у которых конфигурация туннеля строго определена (горелки с излучающей чашей типа ГВИЧ, беспламенные панельные горелки типа ГБПщ, горелка полного предварительного смешения для безокислительного нагрева), форма и размеры огнеупорного горелочного туннеля приведены при описании горелок.

Для остальных горелок, а также для мазутных форсунок и газомазутных горелок конфигурация туннеля имеет меньшее значение. В этих случаях пользуются нормализованными горелочными блоками для горелок типа «труба в трубе», для дутьевых горелок типа ГНП или для инжекционных горелок, подбирая их по выходным размерам горелки.

Для горелок большого размера горелочные туннели выполняют из стандартных кирпичей.

13.1. ОГНЕУПОРНЫЕ ГОРЕПОЧНЫЕ БЛОКИ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА ДВБ И ДНБ

Для установки горелок «труба в трубе» типа ДВБ и ДНБ разработано 25 типоразмеров огнеупорных горелочных блоков. Каждый блок может изготавливаться в двух исполнениях: цельном и разъемном. Цельные блоки имеют обозначения от С1 до С25; разъемные обозначаются так же, как и цельные, но в скобках указывается количество кирпичей, из которых состоит блок.

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВБ и ДНБ показаны на рис. 13.1; их конструктивные размеры приведены в табл. 13.1.

Для горелок типа ДВБ и ДНБ с диаметром носика от 200 до 425 мм, устанавливаемых под углом от 12 до 18° к горизонтальной оси, применяют цельные блоки С1—С10 (рис. 13.1, *а*) и разъемные С1(4)—С4(4) (рис. 13.1, *б*) и С5(8)—С10(8) (рис. 13.1, *в*); для горелок с диаметром носика от 200 до 300 мм, устанавливаемых под углом от 20 до 30°,—цельные блоки С11—С15 (рис. 13.1, *г*) и разъемные блоки С11(8)—С15(8) (рис. 13.1, *д*); для горелок с диаметром носика от 200 до 425 мм, устанавливаемых под углом от 0 до ±5°— цельные блоки С16—С25 (рис. 13.1, *е*) и разъемные блоки С16(4)—С19(4) (рис. 13.1, *ж*) и С20(8)—С25(8) (рис. 13.1, *з*).

Принцип нумерации кирпичей в разъемных блоках показан на рис. 13.2. Установка горелок под нужным углом производится с помощью горелочных плит.

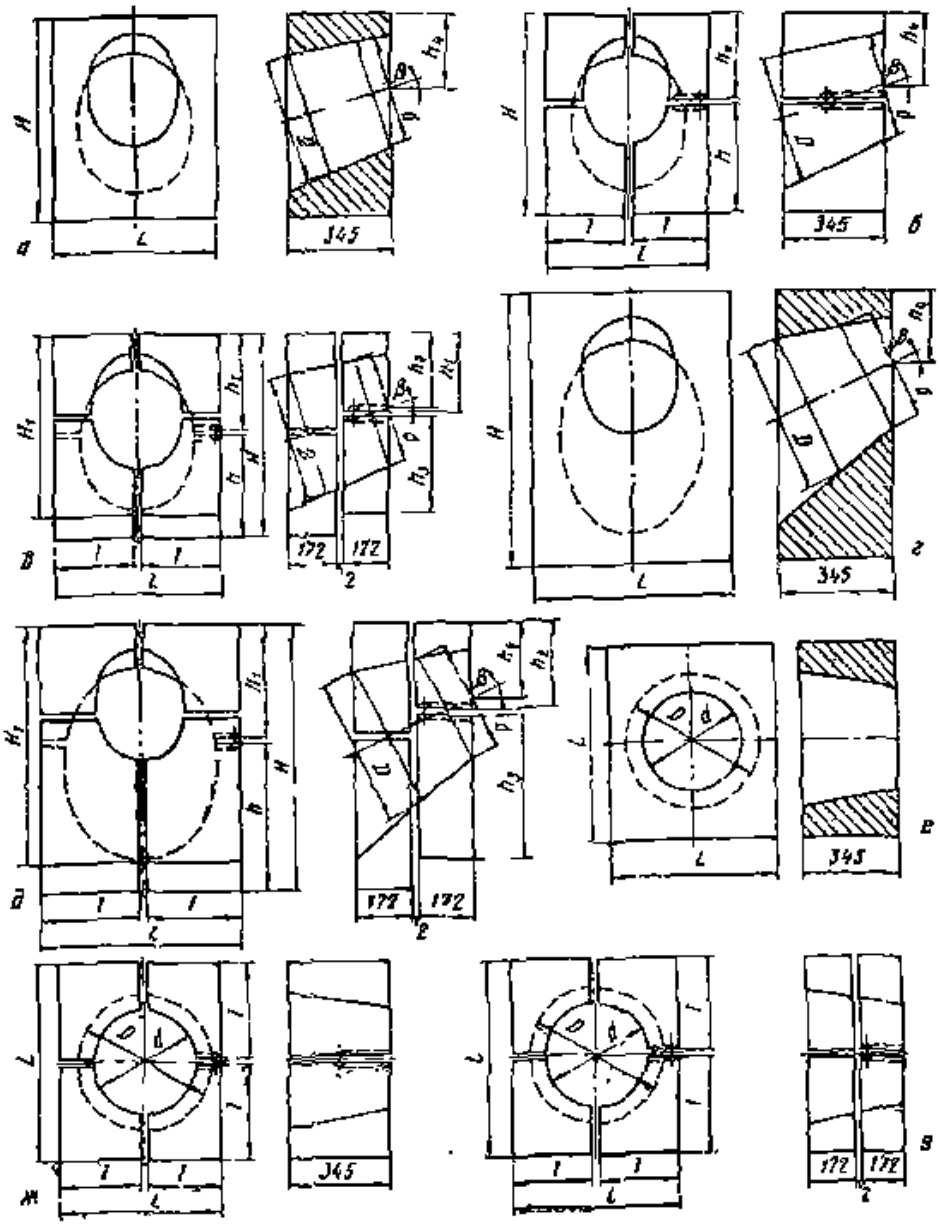


Рис. 13.1. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВБ и ДНБ:
а — цельные блоки С1—С10; *б* — разъемные блоки С1(4)—С4(4); *в* — разъемные блоки С5(8)—С10(8); *г* — цельные блоки С11—С15; *д* — разъемные блоки С11(8)—С15(8). *е* — цельные блоки С16—С25; *ж* — разъемные блоки С16(4)—С19(4); *в* — разъемные блоки С20(8)—С25(8)

Таблица 13.1

Конструктивные размеры (мм) огнеупорных горелочных блоков для горелок типа ДВБ и ДНБ (рис. 13.1)

Тип горелки	Обозначение блока		β, град	D	d	H	H_1	h	h_1	h_2	h_3	h_4	L	l	Число кирпичей в разъемном блоке	Объем блока, дм³	
	цельного	разъемного														цельного	разъемного
ДВБ-200	С16	С16 (4)	—	360	200	—	—	—	—	—	—	—	599	297,5	4	92,7	92,7
ДНБ-200	С1	С1 (4)	16,5	352	200	599	—	377	218	—	—	(68	576	286	4	97,0	97,0
	С11	С11 (8)	28	418	204	733	599	422	307	215	380	171	576	286	8	114,8	101,6
ДВБ-225	С17	С17 (4)	—	360	226	—	—	—	—	—	—	—	599	297,5	4	90,6	90,6
ДНБ-225	С2	С2 (4)	16,5	354	224	599	—	362	233	—	—	181	576	286	4	95,2	95,2
	С12	С12 (8)	28,5	418	218	733	599	410	319	225	370	180	576	286	8	113,5	100,2
ДВБ-250	С18	С18 (4)	—	360	250	—	—	—	—	—	—	—	599	297,5	4	88,6	88,6
ДНБ-250	С3	С3 (4)	17,5	356	244	599	—	347	248	—	—	194	576	286	4	93,2	93,2
	С13	С13 (8)	29	422	244	733	599	393	326	240	365	194	576	286	8	110,5	97,2
ДВБ-275	С19	С19 (4)	—	360	276	—	—	—	—	—	—	—	599	297,5	4	86,5	86,5
ДНБ-275	С4	С4 (4)	17,5	360	274	599	—	332	263	—	—	209	576	286	4	90,2	90,2
	С14	С14 (8)	30	430	262	800	666	441	353	254	408	206	576	286	8	120,8	107,6
ДВБ-300	С20	С20 (8)	—	460	300	—	—	—	—	—	—	—	666	331	8	109,3	109,3
ДНБ-300	С5	С5 (8)	17,5	458	296	666	599	365	297	241	354	215	692	344	8	118,0	110,0
	С15	С15 (8)	28	530	316	867	733	500	363	270	459	226	692	344	8	151,0	135,0
ДВБ-325	С21	С21 (8)	—	460	326	—	—	—	—	—	—	—	666	331	8	106,4	106,4
ДНБ-325	С6	С6 (8)	17,5	462	322	666	599	350	312	256	339	229	692	344	8	115,0	107,0
ДВБ-350	С22	С22 (8)	—	460	350	—	—	—	—	—	—	—	666	331	8	103,5	103,5
ДНБ-350	С7	С7 (8)	18	462	346	733	599	402	321	271	324	244	692	344	8	128,2	112,2
ДВБ-375	С23	С23 (8)	—	460	376	—	—	—	—	—	—	—	666	331	8	100,6	100,6
ДНБ-375	С8	С8 (8)	18	464	370	733	666	387	342	286	176	259	692	344	8	125,3	117,4
ДВБ-400	С24	С24 (8)	—	460	460	—	—	—	—	—	—	—	666	331	8	97,6	97,6
ДНБ-400	С9	С9 (8)	18	466	400	733	666	372	357	300	362	274	692	344	8	121,5	113,6
ДВБ-425	С25	С25 (8)	—	460	426	—	—	—	—	—	—	—	666	331	8	94,2	94,2
ДНБ-425	С10	С10 (8)	18	474	420	733	666	357	372	314	348	286	692	344	8	118,0	110,0

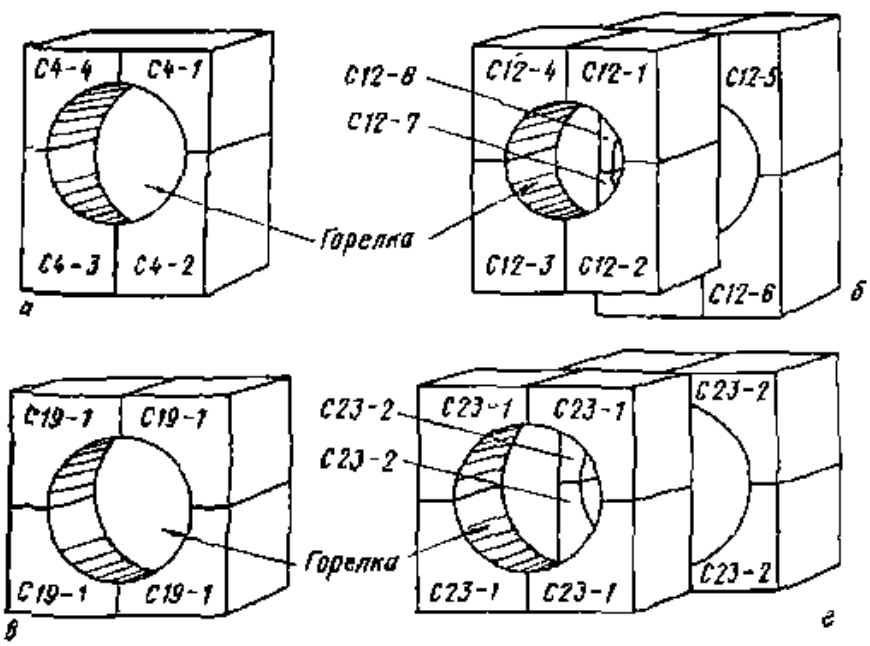


Рис. 13.2. Нумерация кирпичей в разъемных блоках:
а — для блоков С1(4)—С4(4); *б* — для блоков С5(8)—С15(8), *в* — для блоков С16(4)—С19(4); *г* — для блоков С20(8)—С25(8)

13.2. ОГНЕУПОРНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ БЛОКИ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА ДВС И ДНС

Для установки горелок «труба в трубе» типа ДВС и ДНС разработано 18 типоразмеров огнеупорных горелочных блоков, каждый из которых может быть цельным и разъемным. Цельные блоки имеют обозначения с С26 до С43, а разъемные обозначаются так же, как и цельные, но в скобках указывается количество кирпичей, из которых состоит блок.

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВС и ДНС показаны на рис. 13.3, а их конструктивные размеры приведены в табл. 13 2.

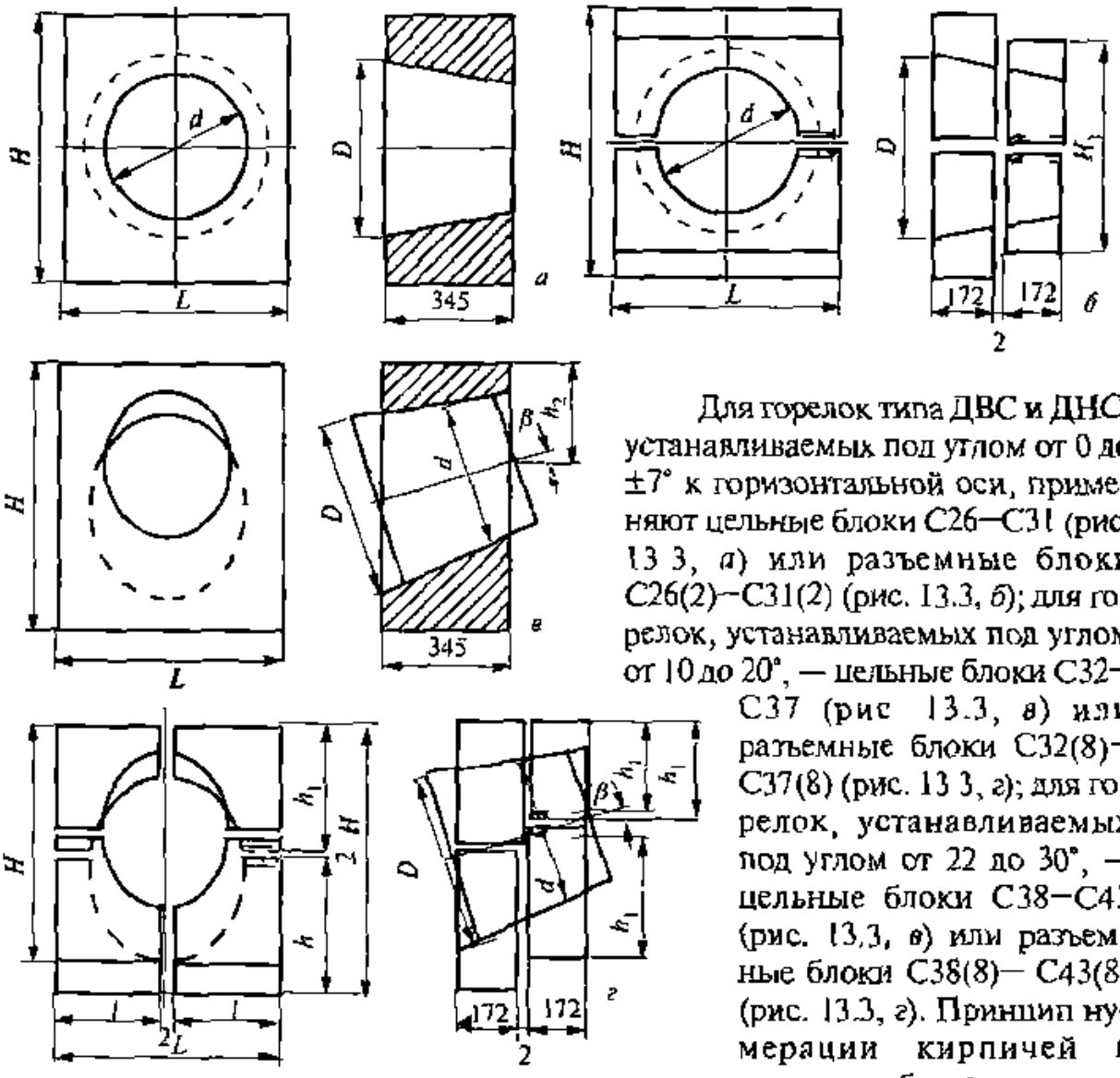


Рис. 13.3. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВС и ДНС:
а — цельные блоки С26—С31; *б* —разъемные блоки С26(2)—С31(2), *в* — цельные блоки С32—С43; *г* — разъемные блоки С32(8)—С43(8)

Для горелок типа ДВС и ДНС, устанавливаемых под углом от 0 до ±7° к горизонтальной оси, применяют цельные блоки С26—С31 (рис. 13 3, *а*) или разъемные блоки С26(2)—С31(2) (рис. 13.3, *б*); для горелок, устанавливаемых под углом от 10 до 20°, — цельные блоки С32—С37 (рис 13.3, *в*) или разъемные блоки С32(8)—С37(8) (рис. 13 3, *г*); для горелок, устанавливаемых под углом от 22 до 30°, — цельные блоки С38—С43 (рис. 13.3, *в*) или разъемные блоки С38(8)— С43(8) (рис. 13.3, *г*). Принцип нумерации кирпичей в разъемных блоках для горелок типа ДВС и ДНС тот же, что и в блоках для горелок типа ДВБ и ДНБ (см. рис. 13.2).

Установка горелок под нужными углами производится с помощью горелочных плит.

Таблица 13.2

Конструктивные размеры (мм) огнеупорных горелочных блоков для горелок типа ДВС и ДНС

Тип горелки	Обозначение блока		β_1, град	D	d	H	H_1	h	h_1	h_2	h_3	h_4	L	l	Число кирпичей в разъемном блоке	Объем блока, дм^3	
	цельного	разъемного														цельного	разъемного
ДВС-60, ДНС-60	С26	С26 (2)	0	314	60	467	333	—	—	—	—	—	462	230	2	62,8	51,6
	С32	С32 (8)	15	300	81	467	333	285	180	104	126	205	462	230	8	63,6	52,0
	С38	С38 (8)	26	303	82	534	400	312	220	91	133	265	462	230	8	74,0	61,2
ДВС-70, ДНС-70	С27	С27 (2)	0	324	70	467	333	—	—	—	—	—	462	230	2	61,7	50,8
	С33	С33 (8)	15	310	91	467	333	280	185	109	131	200	462	230	8	62,5	51,0
	С39	С39 (8)	26	314	96	534	400	306	226	97	138	260	462	230	8	72,7	59,8
ДВС-90, ДНС-90	С28	С28 (2)	0	344	90	467	333	—	—	—	—	—	462	230	2	59,4	48,2
	С34	С34 (8)	15	332	112	467	400	270	195	119	141	257	462	230	8	60,0	53,6
	С40	С40 (8)	26	335	117	601	400	362	237	107	149	249	462	230	8	80,9	62,4
ДВС-110, ДНС-110	С29	С29 (2)	0	364	110	467	333	—	—	—	—	—	462	230	2	56,8	45,8
	С35	С35 (8)	15	354	133	534	400	326	206	129	15	247	462	230	8	67,3	56,4
	С41	С41 (8)	26	357	139	601	467	351	248	118	161	305	462	230	8	78,1	64,6
ДВС-130, ДНС-130	С30	С30 (2)	0	384	130	534	400	—	—	—	—	—	578	288	2	86,1	72,0
	С36	С36 (8)	15	376	154	534	400	315	217	139	161	237	578	288	8	64,3	70,8
	С42	С42 (8)	26	379	163	601	467	339	260	130	171	294	578	288	8	99,0	82,0
ДВС-150, ДНС-150	С31	С31 (8)	0	404	150	534	400	—	—	—	—	—	578	288	2	83,1	69,0
	С37	С37 (8)	15	398	175	534	467	305	227	149	171	294	578	288	8	61,1	75,2
	С43	С43 (8)	26	401	184	668	467	395	271	141	182	283	578	288	8	95,7	84,8

13.3. ОГНЕУПОРНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ БЛОКИ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА ГНП

Разработано 9 огнеупорных горелочных блоков для горизонтальной установки горелок типа ГНП. Блоки для горелок ГНП-1—ГНП-4 разъемные из двух кирпичей, для горелок ГНП-5 и ГНП-6 — из трех, для ГНП-7 и ГНП-8 — из четырех, для ГНП-9 — из восьми кирпичей. Все блоки имеют отверстия диаметром 45 мм для установки запальной горелки и устройства контроля пламени.

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГНП показаны на рис. 13.4, а их конструктивные размеры приведены в табл. 13.3.

13.4. ОГНЕУПОРНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ БЛОКИ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА ГР И ГРВ

Огнеупорные горелочные блоки выполнены для условий установки горелок типа ГР в подвесном своде печей. Разработано 10 типоразмеров *огнеупорных горелочных блоков, каждый из которых предназначен для установки* с соответствующей горелкой ГР. Для горелок ГР-60, ГР-85 и ГР-125 огнеупорные горелочные блоки разработаны в двух вариантах, применение которых зависит от того, как направлен воздушный патрубок горелки: параллельно или перпендикулярно оси печи.

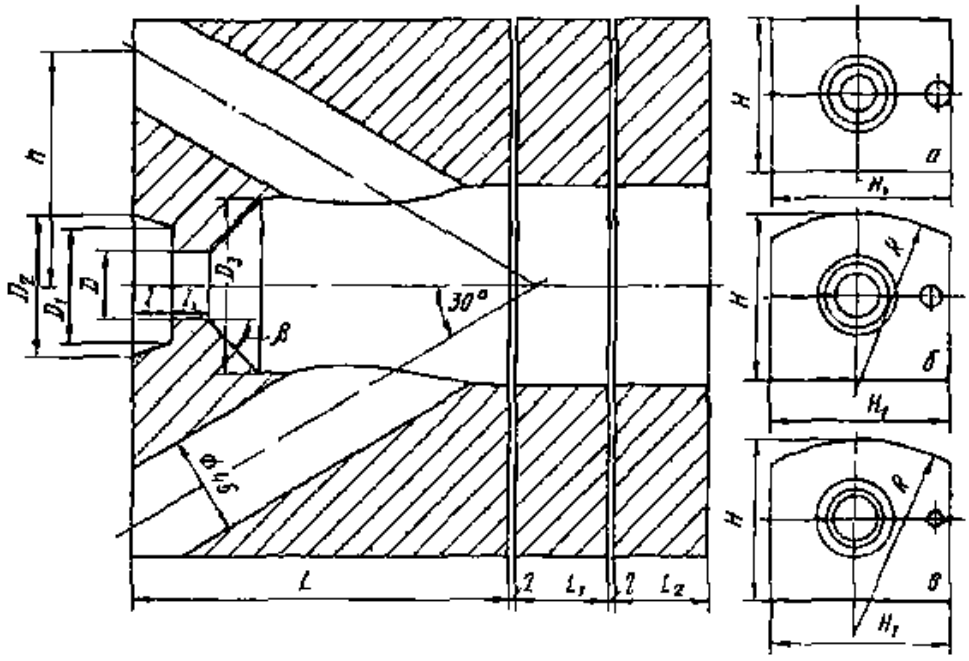


Рис. 13.4. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГНП: *а* — ГНП-1—ГНП-4; *б* — ГНП-6 — ГНП-8; *в* — ГНП-9

Таблица 13.3

Конструктивные размеры (мм) огнеупорных горелочных блоков для горелок типа ГНП

Тип горелки	D	D_1	D_2	D_3	H	H_1	h	L	L_1	L_2	l	l_1	R	β, град	Число кирпичей в блоке	Объем блока, дм³
ГНП-1	28	49	58	70	200	228	100	160	—	—	16	15	—	45	2	6,2
ГНП-2	36	64	78	90	200	228	100	205	—	—	26	15	—	45	2	7,6
ГНП-3	48	84	104	120	200	228	107	250	—	—	38	20	—	45	2	8,5
ГНП-4	58	94	120	145	200	228	120	300	—	—	49	20	—	45	2	9,0
ГНП-5	76	134	170	190	352	344	153	146	242	—	69	20	346	45	3	30,8
ГНП-6	94	134	170	235	352	344	153	159	229	—	69	20	346	45	3	26,7
ГНП-7	112	154	200	280	434	460	185	190	100	100	85	20	460	45	4	47,5
ГНП-8	130	174	230	320	434	460	206	177	140	140	102	20	460	60	4	48,0
ГНП-9	144	184	246	360	518	576	236	196	130	130	115	20	577	60	8	78,7

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГР показаны на рис. 13.5, а их конструктивные размеры приведены в табл. 13.4.

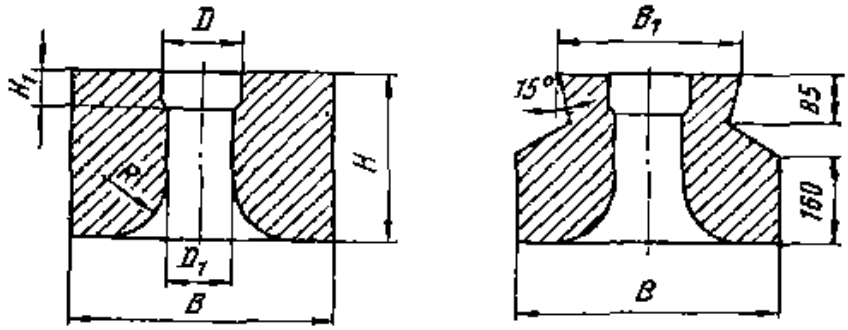


Рис. 13.5. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГР

Таблица 13.4

Конструктивные размеры (мм) огнеупорных горелочных блоков для горелок типа ГР

Тип горелки	Обозначение блока	D	D_1	H	H_1	L	L_1	R	Объем блока, дм^3
ГР-60	ВГ-1*	82	39	290	45	304	290	100	24,4
	ВГ-11	82	39	290	45	458	325	100	52,7
ГР-85	ВГ-2*	88	46	290	45	304	290	100	24,2
	ВГ-12	88	46	290	45	458	325	100	52,4
ГР-125	ВГ-3*	96	54	290	60	304	290	100	23,8
	ВГ-13	96	54	290	60	458	325	100	52,0
ГР-175	ВГ-4	105	63	290	60	458	325	100	51,6
ГР-250	ВГ-5	122	79	290	75	458	325	100	50,3
ГР-350	ВГ-6	136	93	290	75	458	325	110	49,2
ГР-500	ВГ-7	152	108	290	75	458	325	110	48,2
ГР-750	ВГ-8	174	130	350	75	458	325	140	57,5
ГР-1050	ВГ-9	199	155	350	75	458	325	140	55,1
ГР-1500	ВГ-10	240	195	350	75	458	325	140	54,8

* Применяют в тех случаях, когда воздушный патрубок горелки расположен параллельно оси печи.

Конструкции горелочных блоков для горелок ГРВ показаны на рис. 13.6, а размеры их элементов приведены в табл. 13.5.

Таблица 13.5

Конструктивные размеры (мм) огнеупорных блоков для горелок ГРВ

Тип горелки	D_1	D_2	R	α, град	H_1	H_2	A	B
ГРВ-85П	88	46	220	15	45	95	290	458
ГРВ-175П	105	63	200	15	60	100	290	458
ГРВ-250П	122	79	100	0	75	108	285	473
ГРВ-350П	136	93	110	0	75	105	290	458

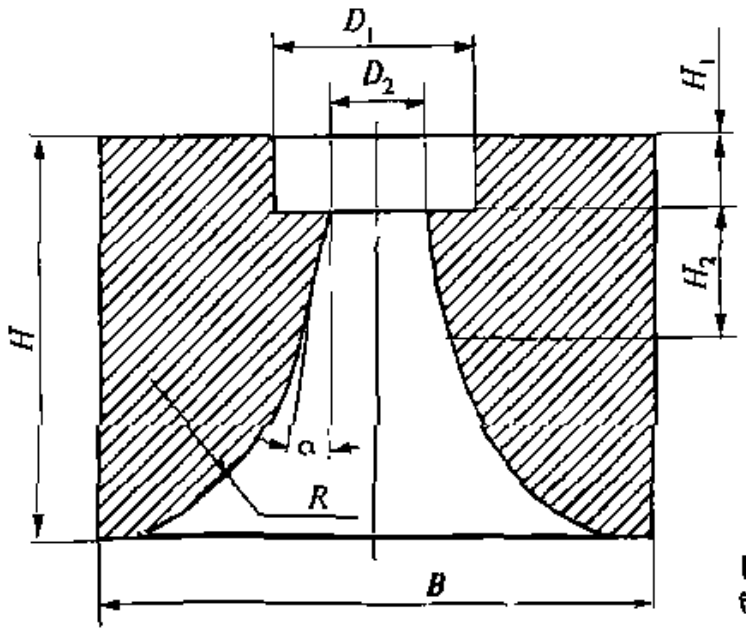


Рис. 13.6. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГРВ

13.5. ОГНЕУПОРНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ БЛОКИ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА ГПП

Огнеупорные горелочные блоки выполнены для условий установки горелок типа ГПП в подвесном и арочном своде печей. Разработаны 3 типоразмера огнеупорных горелочных блоков, каждый из которых предназначен для установки с соответствующей горелкой ГПП. Блоки разработаны в двух вариантах: для установки в подвесном и арочном сводах. Блоки, предназначенные для установки в подвесном своде, имеют прямоугольную форму и обозначаются так же, как и соответствующая горелка. Блоки, предназначенные для арочного свода, имеют клиновидную форму и обозначаются так же, как и соответствующая горелка, с добавлением индекса «с».

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГПП показаны на рис. 13.7, а их конструктивные размеры приведены в табл. 13.6.

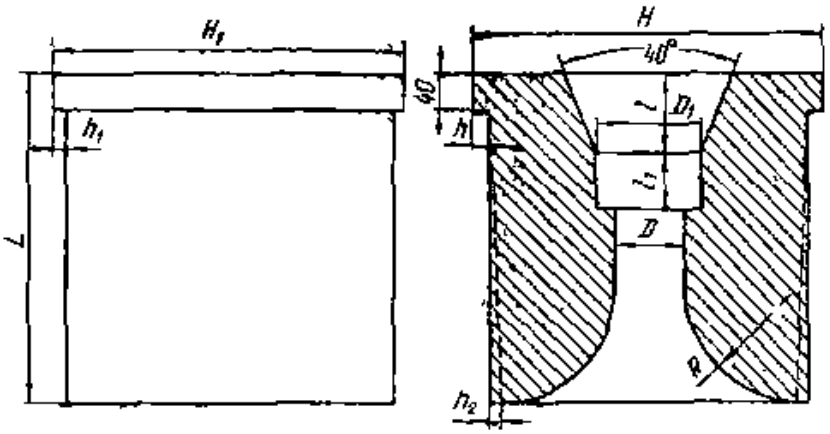


Рис. 13.7. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГПП

Таблица 13.6

Конструктивные размеры (мм) горелочных туннелей для горелок типа ГПП (рис. 13.7)

Обозначение блока	D	D_1	H	H_1	h	h_1	h_2	L	l	l_1	R	Число кирпичей в блоке	Объем блока, дм^3
Тип горелки ГПП-2													
ГПП-2	35	56	290	250	11	11		290	109	47	80	1	19,6
ГПП-2с	35	56	290	250	11	11	9	290	109	47	80	1	19,1
Тип горелки ГПП-3													
ГПП-3	50	78	368	368	16	12		348	150	65	105	2	40,0
ГПП-3с	50	78	368	368	16	12	10	348	150	65	105	2	39,1
Тип горелки ГПП-4													
ГПП-4	75	109	368	368	16	12		348	84	61	120	2	31,9
ГПП-4с	75	109	368	368	16	12	10	348	84	61	120	2	31,1

13.6. ГОРЕЛОЧНЫЙ ТУННЕЛЬ ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК

Для инжекционных горелок по опытным данным приняты следующие соотношения размеров горелочного туннеля:

$$D/d_{н.г} = 2{,}4\text{–}3;\ L/D = 2{,}4\text{–}2{,}7,$$

где D и L — соответственно диаметр и длина туннеля, $d_{н.г}$ — диаметр носика горелки.

Такие соотношения размеров, как показали эксперименты, обеспечивают устойчивую работу горелки и практически полное сгорание газа в туннеле

Рекомендуемая конфигурация горелочного туннеля для инжекционных горелок показана на рис 13.8, а их конструктивные размеры приведены в табл. 13.7.

При проектировании в зависимости от местных условий могут быть приняты размеры, отличающиеся от оптимальных:

длина туннеля для горелок с $d_{н.г}$ = 15÷56 мм не должна быть меньше оптимальной, указанной в табл. 13.7. Однако значительное увеличение длины туннеля приводит к снижению его стойкости;

длина туннеля для горелок с $d_{н.г}$ = 86÷134 мм должна быть не менее 1,5D;

длина туннеля для горелок с $d_{н.г}$ = 154÷270 мм в большинстве случаев не может быть выполнена равной оптимальной и практически принимается 500—700 мм, т. е. равной толщине кладки;

диаметр туннеля не должен быть меньше рекомендуемого в таблице.

Для крупных горелок туннель может выполняться цилиндрическим.

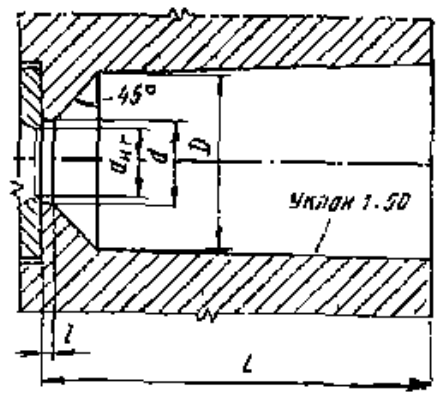


Рис. 13.8. Рекомендуемая конфигурация горелочных туннелей для инжекционных горелок

Таблица 13.7

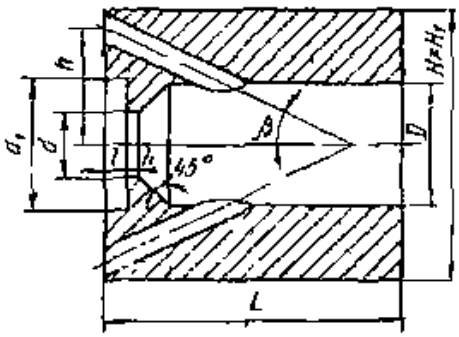
Рекомендуемые размеры (мм) горелочных туннелей для инжекционных горелок (рис. 13.8)

$d_{н.г}$	d	D	l	L		$d_{н.г}$	d	D	l	L	
				оптимальная	минимальная					оптимальная	минимальная
15	20	45	10	120	120	75	95	180	15	450	450
18	25	50	10	130	130	86	110	210	20	500	320
21	30	55	10	140	140	100	130	240	20	600	360
24	35	60	10	150	150	116	150	280	20	700	420
28	40	70	10	170	170	134	175	320	20	800	480
32	45	80	10	200	200	154	200	370	25	900	500—700
37	50	90	15	230	230	178	230	430	25	1050	500—700
42	55	100	15	260	260	205	260	500	25	1200	500—700
48	60	115	15	300	300	235	300	570	25	1400	500—700
56	70	135	15	350	350	270	340	650	25	1600	500—700
65	80	155	15	400	400						

13.7. ОГНЕУПОРНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ БЛОКИ ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК С ДИАМЕТРОМ НОСИКА ДО 100 ММ

Для инжекционных горелок с диаметром носика $d_{н.г}$ от 15 до 100 мм разработано 14 огнеупорных горелочных блоков, каждый из которых предназначен для горизонтальной установки с соответствующей инжекционной горелкой. Все блоки имеют отверстия диаметром 45 мм для установки запальной горелки и устройства контроля пламени.

Блоки изготавливают в двух исполнениях: цельные и разъемные. Разъемные блоки для горелок с $d_{н.г}$ = 15÷42 мм состоят из двух кирпичей, для горелок с $d_{н.г}$ = 48÷100 мм — из четырех кирпичей



Огнеупорные горелочные блоки для инжекционных горелок с диаметром носика до 100 мм показаны на рис. 13.9, а их конструктивные размеры приведены в табл. 13.8.

Рис 13 9. Огнеупорные горелочные блоки для инжекционных горелок с диаметром носика до 100 мм

Таблица 13.8

Конструктивные размеры (мм) огнеупорных горелочных блоков для инжекционных горелок с диаметром носика до 100 мм (рис. 13.9)

Диаметр носика горелки $d_{н.г}$, мм	Обозначение блока		D	d	d_1	H	H_1	h	L	l	l_1	β, град	Число кирпичей в разъемном блоке	Объем блока, дм³
	цельного	разъемного												
15	С44	С44(2)	45	15	65	345	200	94	345	7	10	35	2	22.99
18	С45	С45(2)	50	18	65	345	200	94	345	7	10	35	2	22,89
21	С46	С46(2)	55	21	65	345	200	94	345	7	10	35	2	22,78
24	С47	С47(2)	60	24	85	345	200	122	345	22	10	35	2	22,42
28	С48	С48(2)	70	28	85	345	200	122	345	22	10	35	2	22,14
32	С49	С49(2)	80	32	85	345	200	122	345	22	10	35	2	21,82
37	С50	С50(2)	90	37	105	345	266	130	345	37	15	35	2	29,23
42	С51	С51(2)	100	42	105	345	266	130	345	37	15	35	2	28,84
48	С52	С52(4)	115	48	125	345	266	138	345	52	15	25	4	27,81
56	С53	С53(4)	135	56	125	345	266	138	462	52	15	25	4	26,50
65	С54	С54(4)	155	65	145	462	334	188	462	82	15	25	4	62,58
75	С55	С55(4)	180	75	145	462	334	188	462	82	15	25	4	61,44
86	С56	С56(4)	210	86	225	462	334	200	462	102	20	25	4	56.44
100	С58	С58 (4)	240	100	225	578	334	230	462	102	20	30	4	69,35

13.8. ОГНЕУПОРНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ БЛОКИ ДЛЯ КРУПНЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Крупные инжекционные горелки с $d_{н}$ = 154÷270 мм применяются для торцового отопления нагревательных печей При этом горелки верхних зон отопления устанавливаются под углами 15, 18, 20 и 22°, а нижних — под

углом 5° к горизонтальной оси. Исходя из этих условий, разработано 15 огнеупорных горелочных блоков для крупных инжекционных горелок.

Огнеупорные горелочные блоки для крупных инжекционных горелок нагревательных печей показаны на рис. 13.10, а их конструктивные размеры приведены в табл. 13.9.

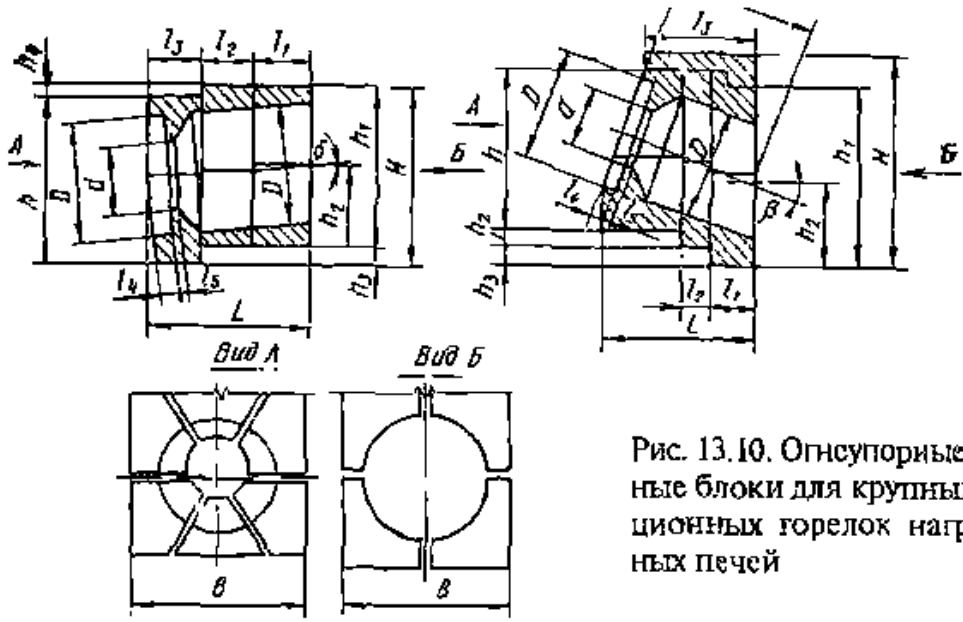


Рис. 13.10. Огнеупорные горелочные блоки для крупных инжекционных горелок нагревательных печей

Таблица 13.9

Конструктивные размеры (мм) огнеупорных горелочных блоков для крупных инжекционных горелок нагревательных печей (рис. 13.10)

β, град	γ, град	D	d	H	H_1	h	h_1	h_2	h_3	h_4	L	l	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
							$d_{н.г} = 154$ мм										
–	5	420	220	630	580	560	630	325	–	70	696	–	232	232	232	90	25
15	–	420	220	840	580	630	700	340	70	70	696	664	174	174	464	100	20
18	–	420	220	770	580	630	630	275	–	70	625	590	174	116	464	80	20
20	–	420	220	840	580	700	700	301	70	–	650	616	174	116	464	60	20
20	–	420	220	840	580	700	700	290	–	70	655	621	260	–	–	100	20
22	–	420	220	840	580	700	700	292	70	–	650	615	174	116	464	60	20
							$d_{н.г} = 178$ мм										
–	5	480	260	700	696	630	–	340	–	70	696	–	232	232	232	100	25
15	–	480	260	910	696	700	770	375	70	70	696	656	174	174	464	100	25
18	–	480	260	840	696	700	700	310	–	70	625	580	174	116	464	80	25
20	–	480	260	910	696	770	700	371	70	70	650	605	174	116	464	70	20
20	–	480	260	910	696	770	700	320	–	70	655	610	260	–	–	100	25
22	–	480	260	910	696	700	770	362	–	70	650	603	174	116	464	60	20
							$d_{н.г} = 235$ мм и $d_{н.г} = 270$ мм										
–	5	520	300	770	718	770	700	340	70	–	696	–	232	232	232	97	25
15	–	520	300	910	696	700	800	375	70	70	696	650	174	174	348	110	25
18	–	520	300	840	696	700	700	322	–	70	625	573	174	116	464	80	25
20	–	520	300	980	696	770	770	406	70	70	650	598	174	116	464	80	25
20	–	520	300	910	704	770	770	350	–	70	655	603	260	–	–	120	25
22	–	520	300	980	696	770	840	397	70	70	650	595	174	116	464	70	25

13.9. ОГНЕУПОРНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ БЛОКИ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА ИА

Для установки горелок типа ИА в горелочном поясе колпаковых печей разработаны два типоразмера горелочных блоков. Каждый блок состоит из двух кирпичей. Блок рассчитан на тангенциальную установку горелок в горелочном поясе. Для розжига горелки предусмотрено отверстие в блоке диаметром 50 мм.

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ИА показаны на рис. 13.11; их конструктивные размеры (мм) приведены ниже:

	ИА-1	ИА-2		ИА-1	ИА-2
A	540	555	*H*	320	240
B	275	290	*F*	115	120
C	130	160	*D*	200	230
G	395	430	Объем, дм^3	12,2	13,4

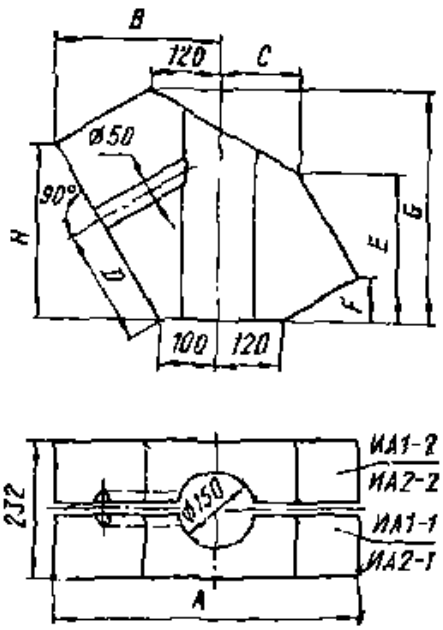


Рис. 13.11 Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ИА

Глава 14. ПРИНЦИПЫ ИСПЫТАНИЯ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

14.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В связи со сложностью комплекса аэродинамических, химических и тепловых процессов, происходящих при сжигании топлива, наиболее надежным инструментом при создании горелочных устройств является испытание. Испытание — это экспериментальное определение качественных и количественных характеристик горелочных устройств и создаваемых ими факелов при работе горелок в стендовых или промышленных условиях. Испытания классифицируются по видам.

На стадии разработки горелочных устройств выполняются исследовательские испытания. При этих испытаниях определяются качественные характеристики горелок, выбираются лучшие режимы их работы и лучшие варианты конструкций, в наибольшей степени отвечающие требованиям технического задания на разработку. Кроме того, определяются существенные факторы, влияющие на характеристики факела. Исследовательские испытания завершаются, как правило, разработкой рекомендаций для создания рабочей документации опытного образца горелочного устройства, которое затем подвергается контрольным испытаниям.

Контрольные испытания горелок разделяются на несколько основных видов приемочные, квалификационные, периодические, типовые, сертификационные и испытания по предписаниям органов государственного надзора. Эти испытания выполняются испытательными центрами, аккредитованными органами стандартизации. Перечень организаций, аккредитованных на право сертификации и испытания газоиспользующего оборудования, приведен в приложении III.

Приемочные испытания опытного образца или опытной партии выполняются с целью определения целесообразности поставки этой продукции на производство или использования по назначению.

Квалификационные испытания горелок выполняются с целью определения готовности производства к выпуску продукции данного типа и в заданном объеме.

Периодические испытания выпускаемой продукции выполняются в объемах и в сроки, установленные нормативно-технической документацией, с целью контроля стабильности качества горелочных устройств и определения возможности продолжения их выпуска. Как правило, их совмещают с сертификационными испытаниями.

Типовые испытания горелок выполняются с целью оценки эффективности и целесообразности вносимых изменений в их конструкцию.

Сертификационным испытаниям подвергаются горелочные устройства с целью установления соответствия их технических характеристик национальным или международным нормативным документам.

Обязательная сертификация предусматривается для следующего горелочного оборудования:

- бытовая аппаратура, работающая на твердом, жидком и газообразном топливе;
- отопительные котлы;
- горелки газовые промышленные;
- горелки промышленные на жидком топливе;
- теплогенераторы для животноводства, птицеводства и кормопроизводства.

Обязательная сертификация распространяется также на все импортируемые горелочные устройства, независимо от типа и назначения. При этом испытания продукции для обязательной сертификации проводятся исключительно испытательными лабораториями и центрами, аккредитованными Госстандартом России в системе ГОСТ Р, а выдача сертификатов соответствия — органами по сертификации, аккредитованными Госстандартом России или региональными центрами стандартизации, метрологии и сертификации (СМиС).

Для проведения обязательной сертификации продукции изготовитель или продавец обращаются в орган по сертификации соответствующей продукции (перечень органов с указанием области их аккредитации (деятельности) публикуется ежегодно Госстандартом России и имеется в региональных центрах СМиС). При желании заказчик может указать испытательную лабораторию или центр, в котором будут проведены испытания для целей сертификации.

Продукция, представленная на сертификацию, должна иметь технические условия, зарегистрированные в установленном порядке, конструкторскую и эксплуатационную документацию.

Если в технических условиях на продукцию по каким-либо причинам разработчик указал более жесткие требования, чем в ГОСТах или правилах, то соответствие требованиям определяется на основе этих технических условий, а не стандартов и Правил

Орган по сертификации определяет испытательному центру и заказчику, на соответствие какого (каких) требований безопасности и стандартов проводится сертификация и в каком объеме (схема сертификации). Эти требования отражаются в специальном документе — Решении о проведении сертификации, которое передается Заказчику и Испытательной лаборатории (центру). Испытательные лаборатории (центры), не имеющие статуса независимых, проводят испытания с участием представителя органа по сертификации или Госстандарта России.

Заказчик имеет право участвовать в испытаниях продукции в качестве наблюдателя.

В необходимых случаях, кроме испытаний продукции, орган по сертификации проводит проверку производства у предприятия-изготовителя продукции.

По результатам испытаний продукции и/или проверки производства орган по сертификации оформляет сертификат соответствия на ограничен-

ную партию продукции или на определенный срок. В течение срока действия орган по сертификации проводит контрольные проверки.

Испытания (техническое освидетельствование) по предписаниям надзорных органов проводятся в объеме предписания. Однако, как правило, они проводятся на соответствие всем требованиям соответствующих типу продукции ГОСТов, а не только требованиям безопасности. В этом плане объем испытаний — больше и требования более жесткие, так как включают и соответствующие требования правил и норм надзорного органа.

Добровольная сертификация и испытание продукции, не подлежащей обязательной сертификации, проводятся по взаимно согласованной методике и программе и их результаты, как и результаты сертификационных испытаний, являются конфиденциальными.

Методы контрольных испытаний определяются стандартами и нормалями в зависимости от типов горелок и их назначения [1—6].

Ниже изложены основные принципы испытания горелок, выполняемые как на стадии разработки новых образцов горелок или реконструкции существующих, так и на стадии постановки горелок на производство.

14.2. ИСПЫТАНИЕ ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК

Горелки общего назначения тепловой мощностью до 10 МВт с ручным, полуавтоматическим и автоматическим управлением, работающие на топливных газах, сжигаемых в смеси с воздухом, а также газовая часть комбинированных горелок, предназначенных для работы и на жидком топливе, должны проходить контрольные испытания с целью установления паспортных характеристик горелок и выявления соответствия их общим техническим требованиям и технической документации разработчика и изготовителя.

Методы контрольных испытаний не распространяются на специальные горелки, на горелки, являющиеся составной частью газоиспользующего оборудования — для быта и предприятий общественного питания, а также на специальные испытания отдельных элементов горелок (электродвигатели, дутьевые вентиляторы, элементы автоматики), по которым должны быть самостоятельные гарантии качества завода-изготовителя.

Эти горелки испытываются по специальным методикам, разработанным с учетом общих требований, определяемых стандартами и техническими условиями.

При проведении контрольных испытаний и обработке их результатов употребляют наименования и обозначения, приведенные в гл. 2.

Перед проведением контрольных испытаний горелочных устройств на основании технической документации и представленного образца определяют:

классификационные признаки;

конструктивность (степень стандартизации и унификации);

технологичность конструкции (количество нормочасов на изготовление, обслуживание и ремонт);

наличие автоматики (систем дистанционного розжига, пропорционирования, обеспечения безопасности, регулирования производительности);

основные размеры (влияющие на рабочий процесс, габаритные и присоединительные);

энергозатраты на привод вентилятора и питание устройств автоматики;

массу горелки;

новизну конструкции;

эстетичность конструкции;

удельную материалоемкость.

Конструктивность горелочных устройств определяется по отношению количества применяемых стандартизованных и унифицированных узлов и деталей к общему количеству узлов и деталей горелочного устройства.

Технологичность конструкции определяется следующими основными показателями:

технологичностью изготовления отдельных деталей;

технологичностью сборки горелки,

технологичностью монтажа и ремонта.

Объем автоматизации горелочного устройства определяется наличными элементами автоматики. Энергозатраты на привод вентилятора и питание средств автоматики определяют по паспортным данным комплектующего оборудования или прямыми замерами. Массу горелки определяют взвешиванием. Новизна конструкции оценивается по патентному формуляру и наличию патента или авторского свидетельства Эстетичность устройства характеризуется современностью форм, целесообразностью компоновки конструктивных элементов и удобством обслуживания. Удельную материалоемкость определяют как отношение массы горелочного устройства в килотраммах к номинальной теплопроизводительности горелки в ваттах, причем удельную материалоемкость определяют отдельно для керамики (огнеупорного материала), черных металлов и жаропрочных сплавов.

В ряде случаев, кроме огневых испытаний горелок, желательно проведение на заводе — изготовителе устройств «холодных» испытаний с целью определения условных эталонных расходных характеристик устройств и коэффициентов гидравлических сопротиалений газового и воздушного трактов

Условные эталонные расходные характеристики горелочных устройств и коэффициенты гидравлических сопротивлений определяются:

для дутьевых горелок — при раздельной продувке газового и воздушного трактов;

для инжекционных горедок и радиационных труб с инжекционным смесителем — при продувке только газового тракта;

для радиационных труб с принудительной подачей воздуха — при совместном течении потоков по газовому и воздушному трактам;

для газомазутных горелок — при продувке газового и воздушного трактов и тракта для распыливающего агента.

При определении условных расходных характеристик продувкой воздухом газ заменяется воздухом в соотношении: 1 м^3 газа равен 1 м^3 воздуха. Соотношение между расходом воздуха и расходом воздуха, имитирующего

газ, принято равным стехиометрическому для данного вида газа.

Коэффициенты гидравлического сопротивления соответственно газового $\xi_г$ и воздушного $\xi_в$ трактов определяют по формулам

$$\xi_г = 2P_{в.г} \cdot 10^3/\rho_{в.г} W_{в.г}^2; \quad \xi_в = 2P_в \cdot 10^3/\rho_в W_в^2, \qquad (14.1)$$

где $P_{в.г}$ — *избыточное давление воздуха, имитирующего газ, на входе в* горелку, кПа; $P_в$ — избыточное давление воздуха перед горелкой, кПа; $W_{в.г}$ и $W_в$ — среднерасходная скорость в характерных сечениях газового и воздушного трактов, м/с.

Для дутьевых горелок

$$W_{в.г} = (V_{в.г}/F_г) \cdot (T_в/273) \cdot [101{,}3/(P_{в.г} + B_0)]; \qquad (14.2,а)$$

$$W_в = (V_в/F_в) \cdot (T_в/273) \cdot [101{,}3/(P_в + B_0)], \qquad (14.2,б)$$

где $V_{в.г}$ — *расход воздуха, имитирующего газ*, м^3/с; $V_в$ — *расход воздуха*, м^3/с.

Для инжекционных горелок с сужающимся соплом при $P_{в.г} < 90$ кПа

$$W_{в.г} = (V_{в.г}/F_г) \cdot (T_в/273) \cdot [101{,}3/(P_{в.г} + B_0)] \cdot [(P_{в.г} + B_0)/B_0]^{1/k}; \qquad (14.3)$$

при $P_{в.г} \geq 90$ кПа

$$W_{в.г} = (V_{в.г}/F_г) \cdot (T_в/273) \cdot [101{,}3/(P_{в.г} + B_0)) \cdot [(k+1)/2]^{1/(k-1)}, \qquad (14.4)$$

где T_0 — температура воздуха, К; B_0 — атмосферное давление, кПа; $\rho_{в.г}$ и $\rho_в$ — *плотность воздуха соответственно в характерных сечениях газового и* воздушного трактов, кг/м^3.

Для дутьевых горелок

$$\rho_в = 1{,}29(273/T_в) \cdot [(P_в + B_0)/101{,}3]; \qquad (14.5,а)$$

$$\rho_{в.г} = 1{,}29(273/T_в) \cdot [(P_{в.г} + B_0)/101{,}3). \qquad (14.5,б)$$

Для инжекционных горелок при $P_{в.г} < 90$ кПа

$$\rho_{в.г} = 1{,}29(273/T_в) \cdot [(P_{в.г} + B_0)/101{,}3)][B_0/(P_{в.г} + B_0)]^{1/k}; \qquad (14.6)$$

при $P_{в.г} \geq 90$ кПа

$$\rho_{в.г} = 1{,}29(273/T_в) \cdot [(P_{в.г} + B_0)/101{,}3][B_0/(P_{в.г} + B_0)]^{1/(k-1)}, \qquad (14.7)$$

где k — показатель адиабаты для воздуха; $F_г$ и $F_в$ — площади характерных сечений соответственно газового и воздушного трактов, м^2.

Для дутьевых горелок характерные сечения оговариваются организацией, проводящей контрольные испытания, ияи задаются организацией — разработчиком горелок. Для инжекционных горелок в качестве характерного сечения газового тракта принимается выходное сечение носика горелки.

Количество точек измерения должно быть не менее пяти. На основе результатов холодных испытаний строят зависимости расхода газа и воздуха от их давлений перед горелкой и зависимости коэффициентов гидравлических сопротивлений по газовому и воздушному пути от чисел Рейнольдса для газового и воздушного потоков в характерных сечениях.

На контрольные испытания представляют образец горелки и техническую документацию, включающую чертежи общих видов, узлов и дета-

лей (непосредственно влияющих на рабочий процесс), технические характеристики, технические условия, инструкции по монтажу и эксплуатации и прочие документы по согласованию между предъявителем и испытательным центром.

Условия проведения испытаний горелки, влияющие на ее режим работы (тепловое напряжение поперечного сечения камеры, давление в камере, степень экранирования, степень стеснения факела), должны быть максимально приближены к эксплуатационным.

Горелку испытывают на всех видах газообразного топлива, для которых она предназначена. Колебания величины числа Воббе не должны превышать ±5 % от средней в процессе испытаний горелки.

Контрольные испытания проводят на специальных стендах. Допускается проведение испытаний горелок тепловой мощностью более 3 МВт на промышленных тепловых агрегатах, для которых эти горелки предназначены.

Методика контрольных испытаний горелок заключается в следующем.

Образец горелки подвергают визуальному осмотру, при котором выявляются внешние повреждения. Проверяют перемещение ходовых частей горелки, при котором выявляют пределы перемещений, а также неисправности, задерживающие перемещение. Определяют массу горелки.

Проводят проверку основных размеров горелки, влияющих на показатели ее работы, а также ответственных размеров, включая габаритные, установочные и присоединительные, на соответствие их указанным на чертежах. При необходимости производят разборку и сборку горелки.

Проверяют плотность рабочих полостей горелки с помощью мыльной пены или другим способом при заданном давлении.

Горелку монтируют на стенд или тепловой агрегат со всеми необходимыми комплектующими приспособлениями согласно инструкции завода-изготовителя

В процессе испытаний определяют химический состав газообразного топлива, его плотность, низшую теплоту сгорания, низшее число Воббе

Испытания проводят на стационарном режиме при плавном увеличении и уменьшении тепловой мощности Момент наступления стационарного режима соответствует для металлических водоохлаждаемых камер горения изменению температуры уходящих газов не более чем на 5 °С за 30 мин, для футерованных камер горения — не более чем на 10 °С за 30 мин.

При испытаниях горелок определяются расходные и регулировочные характеристики согласно табл. 14.1—14.3 (для горелок с автоматическим регулированием характеристики определяют как с включенной, так и с выключенной автоматикой, если это допускает конструкция горелки).

При выполнении испытаний присоединительное давление поддерживают постоянным.

Давление (разрежение) в камере горения необходимо измерять на стенке на удалении от выходного сечения горелки (горелочного туннеля) вне потока, выходящего из нее, в том месте, где поток полностью раскрывается, достигая стенок. При измерении этой величины непосредственно у выходного сечения горелки возможны значительные ошибки из-за эжектирую-

щего воздействия выходящего потока, особенно при скоростных горелках.

Число промежуточных режимов равно: для горелок с многоступенчатым регулированием — числу промежуточных (между номинальной и минимальной рабочей) ступеней регулирования; для горелок с плавным регулированием — не менее 2. Символы «—», «0» и «+» указывают на то, что соответствующая величина при разрежении, атмосферном или избыточном давлении в камере горения.

Параметры, указанные в табл. 14.1—14.3, должны быть определены в диапазоне от минимальной до максимальной тепловой мощности по документации на горелку. Кроме того, следует определить возможные предельные режимы эксплуатации горелки.

Количество контрольных режимов для горелок с ручным управлением, а также для автоматических дутьевых горелок и блочных горелок с плавным регулированием мощности должно быть не менее 5.

Для автоматических инжекционных, дутьевых горелок и блочных горелок со ступенчатым регулированием мощности соответствующие характеристики определяются при указанных в документации уровнях тепловой мощности.

Предельные режимы определяются как режимы, при которых имеет место нарушение устойчивой работы горелки (погасание пламени, изменение локализации пламени, перегрев деталей, отказ элементов горелки).

В процессе испытания достигаются только наименьший верхний и наибольший нижний предельные режимы при повышении или понижении мощности.

Для горелок, работающих с противодавлением (разрежением), производится проверка устойчивости при увеличении противодавления или разрежения в 1,5 раза при $P_т \leq \pm 50$ Па и в 1,2 раза при $P_т > \pm 50$ Па.

Для горелок, применяемых, например, в сушилах ($\alpha > 1$), проверка устойчивости работы производится при значениях коэффициента разбавления или расхода воздуха, устанавливаемых по согласованию между предъявителем и испытательным центром

Предельные режимы работы горелок следует определять не менее пяти раз.

Коэффициент расхода воздуха определяют следующими методами:

для дутьевых горелок — по замерам расходов газа и воздуха или по составу продуктов сгорания;

для инжекционных горелок с полной инжекцией — по составу газовоздушной смеси, отбираемой в конце смесителя, или по составу продуктов сгорания.

Для горелок с раздельной подачей воздуха по зонам смесеобразования должны определяться раздельно коэффициенты расхода воздуха первичного, вторичного и т. д.

Минимально необходимый коэффициент расхода воздуха для горелок всех типов определяется по составу продуктов сгорания при наличии химического недожога, не превышающего норм, и при устойчивом факеле. Отбор проб продуктов сгорания производится в выходном сечении камеры горения.

Таблица 14.1

Характеристики, определяемые при испытании горелок с ручным управлением

Класс горелок	Характеристика горелок	Условия испытаний
1. Инжекционные горелки	Зависимость расхода газа от давления газа перед горелкой (расходная характеристика горелки) $V_г = f(p_г)$. Зависимость коэффициента расхода воздуха от давления газа перед горелкой (регулировочная характеристика горелки) $\alpha = f(p_г)$ (кроме атмосферных горелок)	Давление в камере горения — рабочее ($p_{к.г.раб}$), максимальное ($p_{к.г.макс}$), минимальное ($p_{к.г.мин}$) — поддерживают постоянным на всех режимах. Степень открытия регуляторов расхода первичного воздуха инжекционных горелок устанавливают по документации на горелку. Коэффициент расхода воздуха на номинальном режиме минимальный ($\alpha_{хмин}$)
2. Горелки с принудительной подачей воздуха	Зависимость расхода газа от давления газа перед горелкой $V_г = f(p_г)$ Зависимость расхода воздуха от давления воздуха перед горелкой $p_в = f(p_в)$. Зависимость давления воздуха от давления газа перед горелкой (регулировочная характеристика) $p_в = f(p_г)$.	Давление в камере горения — рабочее ($p_{к.г.раб}$) — поддерживают постоянным на всех режимах. Коэффициент расхода воздуха минимальный ($\alpha_{мин}$)
3. Горелки с принудительной подачей воздуха и независимым регулированием первичного и вторичного воздуха	Дополнительно к характеристикам по п. 2 определяют: зависимость давления первичного воздуха от давления газа $p'_в = f(p_г)$; зависимость давления вторичного воздуха от давления газа $p''_в = f(p_г)$; зависимость расхода вторичного воздуха от расхода первичного воздуха (если это допускает конструкция горелки) $V''_в = f(V'_в)$	Давление в камере горения — рабочее ($p_{к.г.раб}$) — поддерживают постоянным на всех режимах. Коэффициент расхода воздуха минимальный ($\alpha_{мин}$)

Длина факела $l_ф$ определяется по химическому анализу CO_2 в продуктах сгорания. Конец факела определяется наибольшей координатой вдоль оси стенда, где $CO_2/CO_{2т} = 0{,}95$. Длина факела может быть определена по изменению химической неполноты сгорания вдоль оси стенда.

Состав уходящих продуктов сгорания, включая содержание в них окислов азота, определяется по пробам, отбираемым в выходном сечении камеры горения.

Потребляемая мощность электродвигателя вентилятора горелки определяется прямым замером.

Для полуавтоматических и автоматических горелок производится определение времени защитного отключения подачи топлива при розжиге горелки, погасании пламени, аварийном отклонении давлений газа и воз-

Таблица 14.2

План испытаний горелок с двухступенчатым регулированием тепловой мощности

Назначение горелки в зависимости от эксплуатационного давления в камере горения			Контрольные режимы и измеряемые параметры	Условия испытаний			
для избыточного давления и разрежения	для избыточного давления	для разрежения		настройка автоматики регулирования	настройка давления (разрежения) в камере горения	давление в камере горения	коэффициент расхода воздуха
+		+	Второй номин. режим: $V^{-}_{г.ном}$; $\alpha^{-}_{мин}$	На номин. режим при $p_{к.г} = 0$ или при 1,1 $p_{к.г.раб}$	На номин. режим при 1,1 $p_{к.г.раб}$	1,1 раб. разрежения (1,1 $p_{к.г.раб}$)	Миним. $\alpha^{-}_{мин}$
+		+	Второй миним. режим: $V^{-}_{г.мин.раб}$; $\alpha^{-}_{мин}$	То же	То же	Устанавливаются сами при переходе от $V^{-}_{г.ном}$ к $V^{-}_{г.мин.раб}$	
+	+	+	Первый номин. режим: $V^{0}_{г.ном}$; $\alpha^{0}_{мин}$	На номин. режим $p_{к.г} = 0$	На номин. режим $p_{к.г} = 0$	Атмосферное $p_{к.г} = 0$	$\alpha^{0}_{мин}$
+	+	+	Первый миним. раб. режим: $V^{0}_{г.мин.раб}$; $\alpha^{0}_{мин}$	То же	То же	Устанавливаются сами при переходе от $V^{0}_{г.ном}$ к $V^{0}_{г.мин.раб}$	
+	+		Третий номин. режим: $V^{+}_{г.ном}$; $\alpha^{+}_{мин}$	На номин. режим при $p_{к.г} = 0$ или при 1,1 $p_{к.г.раб}$	На номин. режим при 1,1 $p_{к.г.раб}$	1,1 раб. избыт. давления 1,1 $p_{к.г.раб}$	Миним. $\alpha^{+}_{мин}$
+	+		Третий миним. раб. режим: $V^{+}_{г.мин.раб}$; $\alpha^{+}_{мин}$	То же	То же	Устанавливаются сами при переходе от $V^{+}_{г.ном}$ к $V^{+}_{г.мин.раб}$	

духа. Время определяется прямыми замерами при многократно повторяемых (не менее 15 раз) розжигах горелки и проверках работы устройств безопасности в режиме срабатывания с прекращением подачи газа. Время защитного отключения подачи топлива при розжиге горелки проверяется при закрытом ручном кране путем замера интервала времени с момента открытия отсечного клапана до его закрытия. Время защитного отключения подачи топлива при погасании пламени определяется в диапазоне рабочего регулирования путем прекращения подачи газа быстрым закрытием крана, с последующей фиксацией момента срабатывания отсечного клапана. Время защитного отключения подачи топлива при отклонениях давлений газа и воздуха определяется путем поочередного снижения или повышения контролируемых давлений при отключенном устройстве контроля пламени.

Таблица 14.3

План испытаний горелок с многоступенчатым и плавным регулированием тепловой мощности

Назначение горелки в зависимости от эксплуатационного давления в камере горения			Контрольные режимы и измеряемые параметры	Условия испытаний			
для избыточного давления и разрежения	для избыточного давления	для разрежения		настройка автоматики регулирования	настройка давления (разрежения) в камере горения	давление в камере горения	коэффициент расхода воздуха
+		+	Второй номин. режим: $V^{-}_{г.ном}$; $\alpha^{-}_{мин}$	На номин. режим при $p_{к\,г} = 0$ или при 1,1 $p_{к\,г\,раб}$	На номин. режим при 1,1 $p_{к\,г.раб}$	1,1 раб разрежения (1,1 $p_{к\,г.раб}$)	Миним. $\alpha^{-}_{мин}$
+		+	Промежуточные режимы	То же	То же	Устанавливаются сами при переходе от $V^{-}_{г\,ном}$ к $V^{-}_{г\,пром}$	
+		+	Второй миним. раб. режим: $V^{-}_{г\,мин\,раб}$; α^{-}	«-«	«-«	То же, от $V^{-}_{г\,пром}$ к $V^{-}_{г\,ном}$	
+	+	+	Первый номин. режим: $V^{0}_{г}$; $\alpha^{0}_{мин}$	На номин. режим $p_{к\,г} = 0$	На номин. режим $p_{к\,г} = 0$	Атмосферное $p_{к\,г} = 0$	$\alpha^{0}_{мин}$
+	+	+	Промежуточные режимы	То же	То же	Устанавливаются сами при переходе от $V^{0}_{г.ном}$ к $V^{0}_{г\,пром}$	
+	+	+	Первый миним. раб режим: $V^{0}_{г.мин.раб}$; α^{0}	«-«	«-«	То же от $V^{0}_{г\,пром}$ к $V^{0}_{г\,ном}$	
+	+		Третий номин. режим: $V^{+}_{г\,ном}$; $\alpha^{+}_{мин}$	На номин. режим при $p_{к\,г} = 0$ или при 1,1 $p_{к\,г\,раб}$	На номин. режим при 1,1 $p_{к\,г\,раб}$	1,1 раб. избыт. давления 1,1 $p_{к.г.раб}$	Миним. $\alpha^{+}_{мин}$
+	+		Промежуточные режимы	То же	То же	Устанавливаются сами при переходе от $V^{+}_{г\,ном}$ к $V^{+}_{г\,пром}$	
+	+		Третий миним. раб. режим: $V^{+}_{г.мин\,раб}$; α^{+}	«-«	«-«	Устанавливаются сами при перехода от $V^{+}_{г.\,пром}$ к $V^{+}_{г\,мин\,раб}$	

Абсолютная погрешность поддержания заданного коэффициента расхода воздуха $\pm \Delta\alpha$ для автоматических и блочных горелок определяется во всем диапазоне рабочего регулирования тепловой мощности как наибольшее положительное и отрицательное отклонение коэффициента расхода воздуха от установленного значения.

После испытания горелки производятся ее повторный осмотр, измерение основных размеров, влияющих на показатели работы

Для контрольных испытаний горелок применяют стенды с футерованными (полностью или частично) и металлическими водоохлаждаемы-

ми камерами горения. Камеры горения стендов выполняются круглыми, прямоугольными, с арочным сводом и плоским подом.

Предпочтительные ряды диаметров металлических камер горения стендов: 200, 280, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500, 1800 мм; футерованных камер горения 400, 500, 600, 1000 мм.

Предпочтительные размеры стороны футерованных камер горения квадратного сечения: 1000, 1500 и 2000 мм.

При установке испытываемой горелки в камере сгорания следует придерживаться требования, чтобы степень стеснения факела (отношение диаметра камеры горения стенда к диаметру горелочного туннеля) при испытании была близкой к величине этого параметра при эксплуатации горелки в промышленных условиях.

Стенды должны быть снабжены окнами для визуального наблюдения за факелом и работой горелки, а также штуцерами для ввода измерительных зондов

Камеры горения для испытания горелок должны быть плотными: изменение коэффициента расхода воздуха по длине стенда за счет присосов должно быть в пределах погрешности определения этого коэффициента.

При необходимости определения интенсивности теплоотводами от факела стенки металлических водоохлаждаемых камер горения выполняют секционными. Каждая секция должна иметь самостоятельный подвод и слив охлажденной воды. Расход охлаждающей воды определяется счетчиком либо взвешиванием контрольной емкости, заполняемой водой в течение фиксированного времени. Температуру воды на сливе с каждой секции калориметра поддерживают приблизительно одинаковой для исключения продольных перетоков тепла между соседними калориметрами.

При проведении контрольных испытаний предъявляют следующие требования к методам и средствам измерений. Приборы для контрольных испытаний должны проходить метрологическую проверку. Использование при контрольных испытаниях нестандартных измерительных средств допускается при условии согласования между предъявителем и испытательным центром.

Измерительные зонды, особенно для отбора проб продуктов горения из факела, должны быть водоохлаждаемыми для исключения догорания горячих компонентов в отбираемой пробе

Измерительные зонды должны иметь минимально возможный диаметр корпуса с целью внесения минимального возмущения в поток, вытекающий из горелки. Это особенно важно при отборе проб вблизи горелочного туннеля.

Типы приборов должны определяться в соответствии с конкретными условиями проведения испытаний. При этом измерения всех параметров следует производить с помощью регистрирующих приборов, приборов с математической машинной обработкой результатов испытаний, а в случае использования показывающих приборов необходимо фотографировать показания.

Показания приборов записываются на специальных бланках, которые

вместе с диаграммами регистрирующих приборов должны составлять единый комплект, заверенный подписями ответственных лиц.

Основные размеры горелки измеряются микрометрическими и штангенинструментами, шаблонами, пробками. Погрешность измерения основных размеров определяется допусками на изготовление и номинальными размерами по ГОСТ 8.051. Масса горелки определяется взвешиванием. Приведенная погрешность измерительного прибора при определении массы горелки не должна превышать ±2%.

Химический состав газообразного топлива, представляющий собой смесь углеводородов и неуглеводородных компонентов (C_nH_m, H_2, CO, CO_2, N_2, O_2, H_2S), определяется газожидкостной и газоадсорбционной хроматографией

Допускается выполнение анализа газовых проб в специальной химической лаборатории; при этом состав проб отобранного газа не должен изменяться и зависеть от метода отбора, хранения и транспортирования.

Расходы газа и воздуха определяются по перепаду давления на диафрагмах, расходомерных соплах или специальных сужающих устройствах. Для измерения расходов газа и воздуха допускается использование расходомеров объемного и турбинного типов, а также пневмометрических трубок. Погрешности измерительных приборов при этом выбираются такими, чтобы относительная погрешность измерения расхода газа или воздуха с использованием регистрирующего дифференциального манометра не превышала ±2,5 %.

Давление окружающей среды измеряется барометром. Погрешность измерения не должна превышать ±100 Па.

Давление газа и воздуха перед сужающим устройством при измерении расходов газа и воздуха, перед испытуемой горелкой и в камере горения измеряют манометрами с упругими измерительными элементами (пружинными или мембранными) или жидкостными. Выбор средств измерения производится в зависимости от требуемых пределов измерения. Приведенная погрешность манометров с упругими измерительными элементами не должна превышать ±0,6 %. Погрешность измерения давления жидкостными манометрами не должна превышать ±0,5 мм высоты столба рабочей жидкости. При измерении давлений газа и воздуха у горелок низкого даления при определении минимальной мощности и в камере горения при давлении до100 Па допускается использовать приборы с абсолютной погрешностью ±10 Па. при давлении до1,0 кПа ±10 Па абс., а при давлении свыше 1 кПа — ±1% отн.

Температура газообразного топлива и воздуха, идущего на горение, измеряется термометром сопротивления или термопарой с автоматическим регистрирующим прибором. Допускается использование стеклянных технических термометров с ценой деления шкалы 1 °С. Приведенная погрешность измерительного прибора не должна превышать ±1 %.

Температура уходящих газов измеряется термопарой с автоматическим регистрирующим прибором с приведенной погрешностью не более ±1 %.

Температура наружных поверхностей горелки и наиболее нагретых внутренних деталей горелки измеряется поверхностной термопарой. Допускается использование пирометров излучения и термоцветных красок. Приведенная погрешность измерительного прибора не должна превышать ±2,5 %.

Температура окружающей среды измеряется стеклянным ртутным термометром с приведенной погрешностью не более ±1 %.

Шумовые характеристики горелки определяются прибором, измеряющим уровни стационарных акустических шумов в определенных пределах. Погрешность измерительного прибора не должна превышать ±2 дБ.

Измерение параметров времени (времени защитного отключения $\tau_р$, $\tau_н$, $\tau_д$) производится секундомером с ценой деления шкалы 0,01 с. Погрешность измерения не должна превышать ±0,03 с.

Определение состава продуктов сгорания (CO'_2, O'_2, CO', H'_2, CH'_4, NO'_x и SO'_2) рекомендуется производить следующими методами:

CO'_2 и O'_2 — волюмометрическим методом путем избирательного поглощения компонентов поглотительными растворами, порог чувствительности метода 0,05 %; погрешность анализа не должна превышать 15 % отн.;

горючие компоненты (CO', H'_2 и CH'_4) — хроматографическим методом с порогом чувствительности, % (объемн.): по CO $1 \cdot 10^{-3}$; по H'_2 $5 \cdot 10^{-4}$; по CH'_4 $1 \cdot 10^{-3}$; относительная погрешность анализа не должна превышать ±15 %;

NO'_x — колориметрическим методом, основанным на измерении интенсивности окраски раствора красителя, зависящей от концентрации окислов азота, порог чувствительности метода $4 \cdot 10^{-6}$ % (объемн.); приведенная погрешность измерительного прибора не должна превышать ±10 %;

SO_2 — колориметрическим методом с индикаторными трубками, основанным на изменении интенсивности окраски красителя, зависящей от концентрации сернистого ангидрида; порог чувствительности метода $4 \cdot 10^{-6}$ % (объемн.); приведенная погрешность измерительного прибора не должна превышать ±10 %.

Состав продуктов сгорания желательно определять автоматическими регистрирующими приборами непрерывного действия для определения каждого компонента анализируемого газа.

При необходимости контроля внутреннего строения факела испытываемой горелки определяют аэродинамические характеристики потока в камере горения, характеристики выгорания и теплообмена.

Аэродинамические характеристики (динамический напор) определяются с помощью пневмометрического зонда и микроманометра. Разрежение, создаваемое потоком, вытекающим из горелочного туннеля в объем камеры горения, определяется измерениями давления (разрежения) на стенке стенда по его длине. Измеренные значения относят к величине давления (разрежения) в конце камеры горения.

Характеристики горения (концентрации газов в объеме факела) определяют по анализу проб продуктов горения.

Температуру в объеме факела определяют с помощью термопары с закрытым спаем и отсосом через нее продуктов сгорания.

Локальную и интегральную теплоотдачу от факела определяют калориметрированием. Подробно методика этих работ изложена в [7].

При обработке результатов испытаний нормальными атмосферными условиями считают барометрическое давление воздуха B_0 = 101,325 кПа; температура воздуха t_0 = 273,15 К; плотность воздуха $\rho_в$ = 1,29 кг/м^3.

Плотность газа ($\rho_г$) в кг/м^3 определяют по таблицам или вычисляют по формуле

$$\rho_г = \sum_{i=1}^{n} \rho_i r_i, \qquad (14.8)$$

где r_i — объемная доля компонента в газе; ρ_i — плотность компонента в газе, кг/м^3,

$$\rho_i = B_0 / R_i t_0, \qquad (14.9)$$

где R_i — газовая постоянная компонента, Дж/(кг · К),

$$R_i = 8310/\mu_i, \qquad (14.10)$$

где μ_i — молекулярная масса компонента, кг/кмоль.

Теплоту сгорания газа низшую ($Q_н$, кДж/м^3) вычисляют по формуле

$$Q_н = 126{,}4CO + 108{,}0H_2 + 359{,}0CH_4 + 644{,}6C_2H_6 + 932{,}0C_3H_8 +$$

$$+1228{,}0C_4H_{10} + 1460{,}8C_5H_{12} + 595{,}2C_2H_4 + 877{,}8C_3H_6 + 1135{,}1C_4H_8 +$$

$$+ 1414C_5H_{10} + 1403{,}4C_6H_6 + 234{,}4H_2S. \qquad (14.11)$$

Число Воббе низшее ($W_{0н}$ кДж/м^3) вычисляют по формуле

$$W_{0н} = Q_н / \sqrt{\rho_г / \rho_в} \qquad (14.12)$$

Тепловую мощность горелки (P, кВт) вычисляют по формуле

$$P = V_г Q_н. \qquad (14.13)$$

Коэффициент предельного регулирования горелки по тепловой мощности вычисляют по формуле

$$k_{пр.р} = P_{max} / P_{min}, \qquad (14.14)$$

где P_{max} и P_{min} — максимальная и минимальная тепловая мощность горелки (кВт) соответственно.

Коэффициент рабочего регулирования горелки по тепловой мощности вычисляют по формуле

$$k_{р.р} = P_{ном} / P_{min}. \qquad (14.15)$$

где $P_{ном}$ — номинальная тепловая мощность горелки, кВт

Коэффициент расхода воздуха α вычисляют по одной из формул

$$\alpha = V_в / (V_г V_0), \qquad (14.16)$$

где

$$V_0 = (1/21)[0{,}5H_2 + 0{,}5CO + 1{,}5H_2S + (m + n/4)C_nH_m - O_2], \qquad (14.17)$$

или

$$\alpha = \frac{N_2 - N_2 / V_{с.г}}{N_2' - N_2 / V_{с.г} - 3{,}76(O_2' - 0{,}5CO' - 0{,}5H_2' - 2CH_4')}, \qquad (14.18)$$

где

$$V_{с.г} = \frac{CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12} + \ldots}{CO_2' + O_2' + CO' + CH_4'} + \frac{+2C_2H_4 + 3C_3H_6 + H_2S}{CO_2' + O_2' + CO' + CH_4'}, \qquad (14.19)$$

или

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2' - 0{,}5CO' - 0{,}5H_2' - 2CH_4'}, \qquad (14.20)$$

$$\alpha = \frac{O_{2max}'}{CO_2' + CO' + CH_4'}. \qquad (14.21)$$

Определение CO_{2max} — см. формулу (14.24) или

$$\alpha = (V_0)^{-1}[(CH_4/CH_{4(об)}^{см}) - 1], \qquad (14.22)$$

где $CH_{4(об)}^{см}$ — объемная концентрация метана в газовоздушной смеси, %.

Длина факела определяется из графика степени выгорания по длине факела как расстояние от выходного сечения туннеля горелки до точки, где CO_2 составляет 95 % от максимального значения.

Длину видимого факела при испытании горелок на открытом стенде определяют визуально.

Изменение степени выгорания факела на оси дается графической зависимостью

$$CO_2'/CO_{2(m)}' = f(l/d), \qquad (14.23)$$

где CO_2' и $CO_{2(m)}'$ — соответственно объемная концентрация CO_2 в заданной точке оси факела и расчетная объемная концентрация CO_2 в продуктах полного сгорания при заданном коэффициенте расхода воздуха, %; l — расстояние от выходного сечения горелки до точки измерения, мм; d — диаметр (гидравлический) выходного сечения, мм.

$$CO_{2(m)}' = CO_2' + CO' + CH_4'. \qquad (14.24)$$

Сумму объемов горючих компонентов в продуктах сгорания, приведенную к $\alpha = 1{,}0/|\Sigma V_{г.к}|_{\alpha=1{,}0}$, вычисляют по формуле

$$|\Sigma V_{г.к}|_{\alpha=1{,}0} = h\Sigma V_{г.к}, \qquad (14.25)$$

где

$$\Sigma V_{г.к} = CO' + H_2' + CH_4'; \qquad (14.26)$$

h — коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания:

$$h = (CO_{2max}' + H_2S)/(CO_2' + CO' + CH_4' + SO_2'); \qquad (14.27)$$

CO_{2max} — расчетная объемная концентрация CO_2 в сухих продуктах полного сгорания при $\alpha = 1{,}0$.

$$CO_{2max} = |V_{CO_2}|_{\alpha=1,0} / |V_{с.г}|_{\alpha=1,0} \cdot 100\ \%. \qquad (14.28)$$

где $|V_{CO_2}|_{\alpha=1,0}$ — объем CO_2 в сухих продуктах сгорания при $\alpha = 1{,}0$ в $м^3/м^3$ газа.

$$|V_{CO_2}|_{\alpha=1,0} = 0{,}01\ (CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12} + 2C_2H_4 + 3C_3H_6), \qquad (14.29)$$

где $|V_{с.г}|_{\alpha=1,0}$ — объем сухих продуктов сгорания при $\alpha = 1{,}0$ $м^3/м^3$ газа.

$$|V_{с.г}|_{\alpha=1,0} = |V'_{CO_2}|_{\alpha=1,0} + 0{,}01H_2S + |V'_{N_2}|_{\alpha=1,0}, \qquad (14.30)$$

где

$$|V'_{N_2}|_{\alpha=1,0} = 0{,}79V_0 + 0{,}01N_2. \qquad (14.31)$$

Потери тепла от химической неполноты сгорания вычисляют по формуле

$$q_3 = V_{с.г}\ [(126{,}4CO' + 108H'_2 + 358{,}20CH'_4)/Q_н] \cdot 100\ \%. \qquad (14.32)$$

При обработке результатов измерений в объеме факела определяется профиль динамического напора в сечениях потока и по его оси.

Аэродинамическую длину факела определяют из графика изменения относительного динамического напора по длине камеры горения. Эта зависимость представляется в виде

$$h_{ос}/h_{ср} = f(l/d), \qquad (14.33)$$

где $h_{ос}$ и $h_{ср}$ — соответственно динамический напор на оси факела на расстоянии от горелки и средний динамический напор в выходном сечении горелки или ее туннеля

По профилю динамического напора определяют угол раскрытия факела. За границу факела, развивающегося в камере горения, принимают линию (поверхность), являющуюся геометрическим местом точек, в которых динамический напор равен нулю или изменяет знак на противоположный. Таким же образом определяют границы внутренних и периферийных зон циркуляции и застойных областей.

По данным измерений динамических напоров, температур и плотности продуктов горения при необходимости определяют интенсивность циркуляции газов в камере, вызванную истечением факела из горелки. Эту зависимость представляют в виде

$$G_ф/G_г = 1 + G_ц/G_г = f(l/d), \qquad (14.34)$$

где $G_ф$, $G_г$ и $G_ц$ — соответственно массовый расход потока, кг/с, в сечении факела, выходном сечении горелки и в зоне обратного течения. Подробно методика получения этой характеристики изложена в [7].

Характеристики выгорания представляют в виде графиков изменения концентраций газов в сечениях и по длине факела. В таком же виде представляется изменение коэффициента расхода воздуха и химической непол-

ноты горения, определяемые по формулам (14.16) и (14.32), в которых объемные концентрации газов взяты по данным измерений в каждом сечении факела

Полученные данные по изменению химического недожога, q_3, %, по длине камеры, представленные в виде зависимости

$$q_3 = f(l/d). \qquad (14.35)$$

также характеризует длину факела.

Однако эта зависимость, так же как и зависимость (14.23), оказывается справедливой только для прямоструйных факелов и непригодной для факелов вихревого типа, плоскопламенных, у которых на оси факела располагается развитая зона циркуляции, заполненная в основном продуктами полного горения.

В этом случае степень выгорания необходимо определять по величине изменения интегрального химического недожога. Методика определения этой величины приведена в [7]

Тепловой поток от факела к стенкам водоохлаждаемых камер определяют по формуле

$$Q_т = G_к c(t_{вых} - t_{вх})/\tau, \text{ кВт} \qquad (14.36)$$

где $G_к$ — расход воды через калорифер, кг; c — теплоемкость охлаждающей воды, кДж/кг · град; τ — время измерения расхода воды, с; $t_{вых}$ и $t_{вх}$ — соответственно температура воды на выходе и входе калориметра, °С.

Удельный тепловой поток определяется по выражению

$$q_т = Q_т/F, \text{ кВт/м}^2, \qquad (14.37)$$

где F — площадь поверхности калориметра, м^2, и представляется в виде зависимости

$$q_т = f(L/d). \qquad (14.38)$$

Суммарная теплоотдача по длине камеры определяется как сумма тепловых потоков на заданной длине камеры.

Относительная суммарная теплоотдача по длине камеры определяется отношением суммы тепловых потоков к тепловой мощности горелки $P_т$, определенной с учетом физического тепла газа и воздуха, и также представляется в виде зависимости

$$\Sigma Q_т/P_т = f(L/d). \qquad (14.39)$$

14.3. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ МАЗУТНЫХ И ГАЗОМАЗУТНЫХ ГОРЕЛОК

Помимо общих требований и характеристик, относящихся к сжиганию газообразного топлива, при контрольных испытаниях газомазутных горелок должна быть учтена специфика сжигания мазута совместно с газом и самостоятельно.

За основные показатели, характеризующие работу газомазутной го-

релки при сжигании мазута, дополнительно к характеристикам сжигания газа принимают:

характеристику мазута (низшая теплота сгорания, элементарный состав, вязкость, влажность, механические примеси, коксуемость);

теплотехнические и аэродинамические характеристики факела как при сжигании смеси газа и мазута, так и при сжигании одного мазута, если это предусмотрено технологией работы газомазутной горелки;

качество распыливания мазута; коксообразование, зольные отложения;

универсальность газомазутной горелки при переходе на газ или мазут другого состава.

При испытаниях газомазутных горелок дополнительно к характеристикам, перечисленным при испытаниях газовых горелок, определяют:

качество распыла мазута (дисперсный состав, равномерность распыливания по сечению, угол распыливания);

аэродинамические и теплотехнические характеристики факела, а именно распределение динамических и статических напоров по длине факела, степень выгорания по длине факела, воспринятый тепловой поток от факела, длина факела;

степень черноты мазутного факела;

наличие коксовых отложений в горелке, коксовых и зольных отложений в камере горения.

При холодных испытаниях газомазутных горелок дополнительно к данным, относящимся к работе на одном газе, определяют расходные характеристики и коэффициенты гидравлического сопротивления тракта для распыливающей среды (пар, компрессорный воздух) продувкой его паром или воздухом высокого давления.

Расходную характеристику по тракту подачи мазута определяют продувкой форсунки мазутом или другой жидкостью, имеющей такую же вязкость, как мазут при рабочей температуре. Распределение мазута в сечении струи и угол распыливания определяют на специальном стенде при помощи моделирующей жидкости (например, парафина при 70° С), при этом измеряют дисперсный состав капель, равномерность распыливания по сечению, угол распыливания. В результате получают зависимости

$$\overline{G}_i = f(d_к); \ \varepsilon = f(G_м) \text{ и } \alpha_0 = f(G_м), \qquad (14.40)$$

где $\overline{G}_i = G_i'/G$ — отношение массы капель заданного диаметра $d_к$ к общей массе пробы; $G_м$ — расход мазута через форсунку, кг/с; α_0 — половина угла раскрытия топливной струи, град.

q_i — плотность топливного факела по радиусу:

$$q_i = G_i(r_{i+1}^2 - r_i^2)/\sum_{i=1}^{n} G_i(r_{i+1}^2 - r_i^2), \qquad (14.41)$$

где G_i — масса топлива в отборной емкости, кг; r — расстояние отборной емкости от оси форсунки;

ε — неравномерность распыливания:

$$\varepsilon = (q_{max} - q_{min})/q_{ср}, \quad q_{ср} = \sum_{i=1}^{n} q_i/n, \qquad (14.42)$$

где q_{max}, q_{min}, $q_{ср}$ — максимальное, минимальное и среднее значение плотности топливного факела.

Перед проведением огневых испытаний на мазуте и совместно на газе и на мазуте определяют химический состав и физические свойства мазута: вязкость, коксуемость, зольность, содержание серы, механических примесей, воды, водорастворимых кислот, щелочей, азотистых соединений (факультативно), асфальтенов, а также температуры вспышки, температуры застывания и плотности.

Для газомазутных горелок с ручным управлением, а также для автоматических горелок с выключенной автоматикой определяют зависимость между давлением дутьевого воздуха, распыливающей среды и мазута при коэффициентах расхода воздуха, минимально необходимых для полного сгорания топлива при рабочем давлении в топочной камере.

При огневых испытаниях газомазутных горелок измеряют:

расход мазута;

температуру и давление мазута перед форсункой;

расход распылителя (пара, компрессорного воздуха);

температуру распылителя непосредственно перед форсункой;

расход вентиляторного воздуха;

температуру и давление вентиляторного воздуха перед горелкой;

барометрическое давление и температуру воздуха вблизи стенда и перед вентилятором;

температуру и состав уходящих газов, отбираемых в последнем сечении камеры горения;

концентрацию сажистых частиц в последнем сечении камеры горения.

Предельные режимы работы горелки на жидком топливе те же, что и на газообразном топливе, с добавлением предельных режимов, при которых наблюдают:

появление сажистых частиц в конце камеры горения в количестве, превышающем установленную норму,

резкое ухудшение качества распыливания, выражающееся в появлении видимой капельной жидкости у выходного сечения горелки.

Потери тепла с механическим недожогом определяют по результатам химического анализа исходного топлива и газообразных продуктов сгорания в последнем сечении камеры горения стенда:

$$q_4 = Q_C C^р (1 - \beta_т/\beta_г), \qquad (14.43)$$

где Q_C — теплота сгорания углерода, равная 32,8 МДж/кг, $C^р$ — содержание углерода в исходном топливе, %; $\beta_т$ и $\beta_г$ — характеристики исходного топлива и газообразных продуктов сгорания соответственно:

$$\beta_т = 3(1 - O_{ок}) \cdot (0{,}125O^р + 0{,}039N^р)/(C^р - 0{,}375S^р);$$

$$\beta_г = 21 - (CO_2 + 0{,}605CO + O_2)/(CO_2 + CO), \qquad (14.44)$$

где $O_{ок}$ — объемная доля кислорода в окислителе; $O^р$, $N^р$, $S^р$ — соответственно содержание кислорода, азота и серы в исходном топливе, %; CO_2, CO, O_2 — содержание компонентов в продуктах сгорания, %.

Потери тепла с механическим недожогом можно определить по концентрации сажистых частиц в последнем сечении камеры горения стенда:

$$q_4 = 3{,}28\bar{C}V_{гор}/Q_н^р, \%, \quad (14.45)$$

где $\bar{C}$ — средняя по последнему сечению камеры горения концентрация сажистых частиц, г/м^3; $V_{гор}$ — удельное количество продуктов сгорания, м^3/кг топлива; $Q_н^р$ — низшая теплота сгорания топлива, МДж/м^3.

Для стехиометрической смеси ($\alpha = 1{,}0$)

$$V_{гор} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O}, \quad (14.46)$$

$$V_{RO_2} = 0{,}0187K^р \text{ м}^3/\text{кг топлива}, \quad (14.47)$$

$$V_{N_2} = 0{,}79V_в + 0{,}008N^р \text{ м}^3/\text{кг топлива}, \quad (14.48)$$

$$V_{H_2O} = 0{,}11H^р - 0{,}012W_р + 0{,}016V_в^0 \text{ м}^3/\text{кг топлива}. \quad (14.49)$$

При сгорании топлива с $\alpha > 1$

$$V_{гор} = (1{,}87K^р/RO'_2) + V_{H_2O}. \quad (14.50)$$

При сгорании с $\alpha < 1$

$$V_{гор} = [1{,}87K^р/(RO'_2 + CO' + CH'_4)] + V_{H_2O}. \quad (14.51)$$

Степень черноты факела ε определяют с помощью оптического пирометра методом Шмидта:

$$\varepsilon = (E_3 + E_1 - E_2)/E_3, \quad (14.52)$$

где E_1 — показание пирометра при излучении пламени на абсолютно черное тело; E_2 — то же, на нагретом неотражаемом фоне со степенью черноты, близкой к 1,0 (абсолютно черное горячее тело), E_3 — показатель пирометра при излучении только горячего фона.

При контрольных испытаниях газомазутных горелок при определении вредных примесей в продуктах сгорания дополнительно по сравнению с испытаниями газовых горелок определяют содержание двуокиси серы SO_2 и сероводорода H_2S.

14.4. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ РАДИАЦИОННЫХ ТРУБ

Контрольные испытания радиационных труб должны учитывать особенности конструкции и эксплуатации радиационных труб, характеризующие их совершенство и возможность работы на различных агрегатах

Помимо величин, указанных в табл. 14.1, при контрольных испытаниях радиационных труб рассматриваются следующие вопросы:

- равномерность распределения температуры по длине и диаметру наружной стенки трубы;
- отсутствие перегрева элементов трубы;
- отсутствие сажеобразования;
- коэффициент полезного действия;
- универсальность при переходе на газ другого состава;

- характеристика объема автоматизации;
- надежность и срок службы.

По сравнению с контрольными испытаниями газовых горелок при испытаниях радиационных труб дополнительно определяют следующие характеристики:

- распределение температуры по длине внешней поверхности рабочей части трубы;
- температуру внутренних элементов трубы;
- распределение статического давления по длине трубы;
- температуру уходящих газов на входе и выходе из рекуператора радиационной трубы;
- сумму горючих компонентов в продуктах сгорания и потери тепла с химическим недожогом в последнем сечении трубы,
- наличие сажи на внутренних элементах трубы;
- специфические для радиационных труб параметры устройств розжига и безопасности (время продувки, время безопасности при пуске, время отключения подачи топлива при погасании факела, время отключения подачи топлива при аварийном падении давления газа или воздуха);
- оптимальный режим розжига;
- характер воспламенения и погасания.

При проведении огневых испытаний радиационных труб, оборудованных газогорелочным устройством инжекционного типа, в том числе и автоматизированных, определяется зависимость коэффициента расхода воздуха от давления газа. Одновременно определяются расходы газа при рабочем давлении (разрежении) в топочном объеме трубы $h_{раб}$ и при заданных разработчиком средней температуре поверхности трубы $t_{ср}$ и удельном теплосъеме $q_т$.

Для радиационных труб с принудительной подачей воздуха и с ручным управлением, а также для автоматизированных труб с отключенной автоматикой определяется зависимость между давлениями воздуха и газа при значениях коэффициента расхода воздуха, минимально необходимых для полного сгорания без сажеобразования при рабочем давлении (разрежении) в топочном объеме трубы и заданном удельном теплосъеме. Одновременно определяются расходы газа и воздуха и по опытным данным строятся соответствующие графические зависимости.

Для радиационных труб с принудительной подачей воздуха и плавным регулированием производительности при включенном устройстве пропорционирования определяются зависимости коэффициента расхода воздуха от нагрузки и расходные характеристики по газу и воздуху. Число режимов, *на которых производятся измерения, должно быть не менее 5.*

Для радиационных труб с позиционным регулированием производительности соответствующие характеристики определяются при заявленных разработчиком уровнях нагрузки.

Каждый режим, при котором проводятся замеры, должен быть установившимся по температуре поверхности трубы. Момент наступления установившегося режима соответствует изменению температуры поверхности трубы не более 10 °С за 30 мин.

В каждом режиме определяют:

- расход газа;
- расход дутьевого воздуха;
- давление и температуру продуктов сгорания на входе в рекуператор;
- давление газа перед трубой и температуру дутьевого воздуха на входе и выходе из рекуператора;
- барометрическое давление и температуру воздуха вблизи стенда и перед вентилятором (при принудительной подаче воздуха);
- температуру и состав уходящих газов на выходе из рекуператора;
- распределение температуры на внешней поверхности рабочей части трубы;
- температуру внутренних элементов трубы;
- распределение статического давления по длине трубы

Для радиационных труб предельными режимами являются:

- срыв пламени;
- погасание пламени,
- возникновение вибрационного горения;
- перегрев металлических деталей;
- проскок пламени (для радиационных труб с инжекционными горелками и горелками с принудительной подачей подготовленной газовоздушной смеси);
- проникновение пламени через носик и «посадка» пламени на металлические детали;
- появление продуктов неполного сгорания в количествах, превышающих допустимые нормы;
- выпадение сажи внутри радиационной трубы;
- повышение коэффициента расхода воздуха выше допустимого.

В процессе проведения опыта необходимо достигать только ближайших предельных режимов при повышении или понижении нагрузки Если предельных режимов не достигают, то производят проверку устойчивости работы при нагрузках 120 % от заявленной при минимально необходимом коэффициенте расхода воздуха, обеспечивающем полное сгорание. Коэффициент расхода воздуха определяется по составу продуктов сгорания, отбираемых в последнем сечении трубы. Минимально необходимый коэффициент расхода воздуха для радиационных труб всех типов определяется по составу продуктов сгорания, отбираемых в последнем сечении трубы на каждом режиме, при наличии химического недожога, не превышающего допустимых норм

Наличие сажи на внутренних частях радиационной трубы определяется ресурсными испытаниями, проводимыми до контрольных при рабочей температуре радиационной трубы.

Коэффициент полезного действия радиационной трубы определяется по формуле

$$\eta = 100 \cdot \{1 - (V_n^0/V_r^0)[t_{yx}\overline{c_p} - q_3/100)\}\ \%, \qquad (14.53)$$

где t_{yx} — температура в последнем сечении трубы, °С; $\overline{c_p}$ — средняя теплоемкость продуктов сгорания при постоянном давлении, Дж/(м^3 · град);

$V_г^0$, $V_п^0$ — расходы соответственно газа и продуктов сгорания, м³/с; q_3 — химический недожог, %

14.5. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ ГАЗОВЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

Воздухонагреватели испытывают на стендах или в помещениях, где они эксплуатируются. Характеристики работы воздухонагревателей проверяют при установившемся режиме, при котором температура нагреваемого воздуха или смеси воздуха с продуктами сгорания на входе из воздухонагревателя изменяется не более чем 2 °С за 5 мин.

Если в воздухонагревателях применяются горелочные устройства, как комплектующие изделия, то они должны испытываться в соответствии с методикой, описанной в разделе 14.2. Если горелка разработана и изготовлена как составная часть воздухонагревателя, то она испытывается в составе общего комплекса. Расходные характеристики воздухонагревателя по газовому тракту определяются так же, как для горелочных устройств

Если в воздухонагреватель воздух нагнетается по специальному каналу, то его расход может либо измеряться стандартными измерительными устройствами, либо рассчитываться по средней скорости потока в его сечении, измеренной с помощью пневмометрических трубок. Если воздухонагреватель оснащен встроенным осевым вентилятором, всасывающим воздух из окружающей среды, то расход его необходимо определять по скорости потока во всасывающем патрубке, установленном перед вентилятором. Патрубок должен иметь выравнивающую решетку для исключения вращения потока в сечении, где определяется поле скоростей.

При пробном пуске воздухонагревателя проверяют: надежность включения, работу всех основных частей в соответствии с назначением; соблюдение последовательности операций согласно программе, отсутствие пульсаций или хлопков.

После достижения стабильного режима работы воздухонагревателя проверяют защитное выключение его путем искусственного создания аварийных ситуаций. При этом контролируются погасание пламени, время защитного выключения подачи газа, включение сигнализации.

Проверку защитного выключения выполняют:

- закрытием запорного органа горелки,
- выключением вводного электрического питания,
- повышением и понижением давления газа перед горелкой;
- отсоединением импульсной трубки в точке отбора давления воздуха или отсоединением контакта от отклоняющего датчика потока воздуха;
- остановкой вентилятора;
- увеличением температуры нагреваемого воздуха или перемещением уставки срабатывания контролирующего температуру прибора.

При испытании рекуперативных воздухонагревателей дополнительно проверяют защитное выключение при превышении давления продуктов сгорания над давлением нагреваемого воздуха. Эту проверку осуществляют путем уменьшения площади сечения канала для выхода продуктов сгора-

ния или отсоединения импульсной трубки в точке отбора импульса давления нагреваемого воздуха.

Если воздухонагреватель оснащен автоматикой регулирования температуры воздуха в отапливаемом помещении, то проверку срабатывания автоматики выполняют путем изменения температуры рабочего конца первичного прибора или путем перемещения уставки срабатывания.

Тепловая мощность воздухонагревателя определяется по формуле (14.13).

Количество теплоты, переданной нагретому воздуху (теплопроизводительность) ($Q_{вн}$, кВт) вычисляют по формуле

$$Q_{в\,н} = G_{н.в} c_p (t_{н.в} - t_{х.в}), \qquad (14.54)$$

где $G_{н\,в}$ — расход воздуха на нагрев, кг/с; c_p — средняя изобарная теплоемкость воздуха в интервале температур от 0 °С до $t_{н.в}$, кДж/кг град; $t_{н\,в}$ — температура воздуха на выходе воздухонагревателя, °С; $t_{х\,в}$ — температура воздуха на входе воздухонагревателя, °С

Потери тепла с уходящими газами, отводимыми в атмосферу (для рекуперативных воздухонагревателей), Q_2, кВт, определяют по формуле

$$Q_2 = G_{пр\,ст} c_{пр\,ст} t_{пр\,ст} - G_{в.г} c_{в\,г} t_{в.г}, \qquad (14.55)$$

где $G_{пр\,ст}$ и $G_{в\,г}$ — расход продуктов сгорания и воздуха, идущего на горение, кг/с; $c_{пр\,ст}$ и $c_{в.г}$ — средняя теплоемкость продуктов сгорания и воздуха, идущего на горение, кДж/кг · град; $t_{пр\,ст}$ и $t_{в.г}$ — средняя температура продуктов сгорания и воздуха, идущего на горение, °С,
ияи

$$q_2 = Q_2 / V_г Q_н \cdot 100\ \%. \qquad (14.56)$$

Потери тепла от химической неполноты горения, q_3 %, определяют по формуле (14.32).

При определении потерь тепла в окружающую среду общую поверхность воздухонагревателя разбивают на несколько участков площадью F_i, м^2 с примерно одинаковой температурой $t_{пi}$, °С. По средним величинам температур рассчитывают потери тепла от каждого участка, а затем определяют сумму этих потерь Q_5, кВт, по формуле

$$Q_5 = \Sigma F_i \alpha_i (t_{пi} - t_0), \qquad (14.57)$$

где α_i — коэффициент теплоотдачи i-того участка, кВт/м^2; t_0 — температура окружающей среды, °С,
или

$$q_5 = (Q_5 / V_г Q_н) \cdot 100\ \%. \qquad (14.58)$$

Коэффициент полезного действия воздухонагревателя определяют как отношение теплопроизводительности к его тепловой мощности по формуле

$$\eta = Q_{вн} / V_г Q_н \cdot 100\ \% \qquad (14.59)$$

или как разность между тепловой мощностью воздухонагревателя и суммой потерь тепла по формуле

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_5). \qquad (14.60)$$

При необходимости оценки коэффициента полезного действия воздухо-

нагревателя с учетом общего расхода энергии к знаменателю в формуле (14 59) прибавляют электрическую мощность, потребляемую приводом вентилятора и приборами управления, определяемую прямыми измерениями.

14.6. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЯ ГОРЕЛОК ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

При испытании газовых горелок с излучающими насадками помимо параметров работы, описанных в разделе 14.2, определяют следующие характеристики:

- среднюю температуру излучающей поверхности;
- равномерность распределения температуры по излучающей поверхности;
- температуру ограждающих поверхностей и элементов ручного управления;
- характер воспламенения и погасания;
- время начального зажигания;
- время повторного зажигания;
- время переходного периода с режима «Большое пламя» на режим «Малое пламя»;
- время закрытия автоматического запорного клапана;
- устойчивость к воздействию ветра.

При испытании горелок и средств их автоматики в диапазоне рабочих давлений газа проверяется:

- возможность дистанционного зажигания при одновременном открытии автоматического запорного устройства;
- контроль горения, а в случае погасания восстановление горения;
- закрытие автоматического запорного устройства при:

– невозможности восстановления горения;
– проскоке пламени в смеситель;
– отключении электроэнергии;
– отключении подачи газа.

В диапазоне рабочего регулирования проверяется зависимость коэффициента расхода воздуха от давления газа перед горелкой. Коэффициент расхода воздуха определяется либо по составу газов в пробе воздушной смеси, либо по составу неразбавленных продуктов горения, отбираемых непосредственно перед излучающей поверхностью.

По анализу продуктов горения перед излучающей пластиной определяют концентрацию окиси углерода, окислов азота и потери тепла от химической неполноты горения.

При испытании горелок на устойчивость к воздействию ветра скорость потока воздуха перед горелкой измеряют анемометром типа Б.

Испытание горелок на работоспособность выполняют при холодном и нагретом их состоянии.

Испытание горелок на стабильность зажигания в холодном состоянии выполняют десятикратным зажиганием их с последующим выключением и

остыванием до температуры окружающей среды. При этом каждый раз должно произойти зажигание.

Испытание горелок на стабильность зажигания в нагретом состоянии выполняется после работы их не менее часа десятикратным выключением. При этом время зажигания не должно превышать 30 с после пятиминутного остывания.

Испытание на восстановление горения выполняют десятикратным закрытием крана перед горелкой до полного погасания и последующим его открытием с фиксированием времени повторного зажигания.

Испытание на закрытие автоматического запорного устройства выполняют путем:

- создания режима плоского пламени;
- десятикратным перекрытием газового потока краном перед автоматическим запорным устройством через каждые 10 мин;
- десятикратным отключением электроэнергии на входе в блок управления через каждые 10 мин.

Лучистый коэффициент полезного действия горелок инфракрасного излучения определяют как отношение количества тепла, излучаемого керамической насадкой, к тепловой мощности горелки и вычисляют по формуле

$$\eta = Q_{изл}/P \cdot 100\ \%\ , \qquad (14.61)$$

где $Q_{изл}$ — количество тепла, излучаемого керамической насадкой, кВт, определяемое прямыми измерениями приемником излучения.

Коэффициент полезного действия может быть определен расчетом по формуле

$$\eta = 4{,}16(T/100)^4(1 - 0{,}59\varphi)/q_0\ , \qquad (14.62)$$

где T — температура излучающей поверхности, К; q_0 — удельная тепловая нагрузка горелки, Вт/см^2; φ — коэффициент живого сечения излучающей поверхности.

Температура излучающей поверхности измеряется оптическими пирометрами.

14.7. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЯ ГОРЕЛОК ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Методика испытания горелок плавильных печей разработана во ВНИИМТ применительно к устройствам для совместного или раздельного сжигания газообразных и жидких топлив с воздухом или смесью воздуха с кислородом. В этой методике сохраняются основные принципы испытаний и обработки опытных данных, применяемые при испытании газовых и жидкотопливных горелок, описанные в разделах 14.2 и 14.3. Особенности испытаний связаны со спецификой работы горелок в плавильных печах и требованиями, предъявляемыми к характеристикам факела.

Испытания выполняются на промышленных тепловых агрегатах, на которых эксплуатируются горелки. Плавильный агрегат приводится в технически исправное состояние, производится ремонт футеровки, регенераторов, ревизия контрольно-измерительной технологической аппаратуры,

подготавливается комплект нестандартных приборов. Все измерения при испытаниях производятся в период плавки, когда допустима работа агрегата с максимальной тепловой нагрузкой.

Номинальная тепловая мощность горелки определяется в следующей последовательности.

При максимальной пропускной способности дымоотводящего тракта устанавливают максимальный по условиям эксплуатации расход топлива на горелку и соответствующие ему расходы воздуха на горение и распылителя. По измерению объемных концентраций продуктов горения на участке дымохода от выхода из печи до регенератора определяются потери тепла от химической неполноты сгорания и коэффициент расхода воздуха. Если эти показатели находятся в соответствии с ГОСТ 21204–97 и ГОСТ 27824–88, то данный режим подтверждается как номинальный.

Если коэффициент расхода воздуха превышает допустимый, то производят, если это возможно по условиям эксплуатации, увеличение расхода топлива до величины, обеспечивающей требования указанных стандартов. Если увеличение расхода топлива по условиям эксплуатации недопустимо, то уменьшают расход воздуха до величины, удовлетворяющей требованиям по величине химической неполноты горения.

Если при этом оказывается превышен допустимый предел по величине потерь тепла от химической неполноты сгорания или содержанию CO, то производят увеличение расхода воздуха до величины, обеспечивающей требования стандарта. Достигнутый режим регистрируется как номинальный.

Если же не удается уменьшить величину недожога, то производят уменьшение расхода топлива до величины, удовлетворяющей указанным требованиям.

При определении минимальной тепловой мощности горелки устанавливается расход топлива на 10 % ниже миниально необходимого по технологическим требованиям. При этом контролируется отсутствие проскока пламени и перегрева деталей горелки. Если работа горелки при указанном режиме не нарушается, то эту тепловую мощность принимают за минимально необходимую. Если происходит нарушение нормальной работы горелки, то расход топлива увеличивают до достижения нормальной работоспособности, а минимальную тепловую мощность принимают на 10 % выше достигнутой.

Расходные характеристики горелок определяются в диапазоне рабочего регулирования согласно табл. 14.4

Теплоту сгорания жидкого топлива определяют по формуле

$$Q^{р}_{нж} = 340C^{р}_{ж} + 1256H^{р}_{ж} - 109(O^{р}_{ж} - S^{р}_{ж}) - 25(9H^{р}_{ж} + W^{р}_{ж}) \text{ кДж/кг}, \quad (14.63)$$

где $C^{р}_{ж}$, $H^{р}_{ж}$, $O^{р}_{ж}$, $S^{р}_{ж}$, $W^{р}_{ж}$ – массовая концентрация компонентов жидкого топлива и его влажность, % (на рабочую массу).

Тепловая мощность горелки при совместном сжигании газообразного и жидкого топлива определяется по формуле

$$P_{т} = (V_{г}Q^{г}_{н} + V_{ж}Q^{р}_{нж})10^{-3} \text{ МВт}, \quad (14.64)$$

Коэффициент расхода воздуха по расходам топлива и воздуха с учетом кислорода, содержащегося в распылителе, определяется по формуле

$$\alpha_{\Sigma} = [V_{в} + V_{р}(1 + 3{,}762\Pi_{O_2})]/(V_{г} - V_{0} + V_{ж} \cdot V_{0ж}), \qquad (14.65)$$

где $V_{в}$ и $V_{р}$ — расход воздуха и распылителя, м^3/ч; $V_{ж}$ — расход жидкого топлива, кг/ч; Π_{O_2} — доля кислорода в кислородно-воздушной смеси по объему; V_0 — стехиометрический объем воздуха для сжигания газа определяется по формуле (14.17); $V_{0ж}$ — стехиометрический объем воздуха для сжигания жидкого топлива, м^3/кг, определяется по формуле

$$V_{0ж} = 0{,}0889(C^{р}_{ж} + 0{,}375S^{р}_{ж}) + 0{,}256H^{р}_{ж} - 0{,}0333O^{р}_{ж}. \qquad (14.66)$$

Приведенную скорость потока газа и распылителя определяют по формуле

$$\lambda_{т(р)} = \sqrt{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}\left[1 - \left(\frac{101{,}325}{P_{т(р)}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}, \qquad (14.67)$$

где показатели адиабаты γ соответственно равны для природного газа — 1,31; для воздуха — 1,4; для пара — 1,33.

Газодинамические функции расхода для газа и распылителя определяются по формуле

$$q(\lambda) = [(\gamma + 1)/2]^{1/(\gamma-1)} \cdot \lambda[1 - (\gamma - 1)/(\gamma + 1) \cdot \lambda^2]^{1/(\gamma-1)}. \qquad (14.68)$$

Критические скорости потоков газа и распылителя определяются по формуле

$$W_{кр\,г(р)} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma + 1} R_{т(р)} T_{т(р)}}, \qquad (14.69)$$

где R = 287 Дж/кг · К для воздуха (распылитель); R = 461,5 Дж/кг · К для пара (распылитель); R = 518,3 Дж/кг · К для природного газа

Расчетная удельная кинетическая энергия потока на выходе из горелки определяется по формуле

$$E_{уд} = [V_{т}\rho_{г}(\lambda_{т} W_{кр\,г})^2 + V_{р}\rho_{р}(\lambda_{р} W_{кр\,р})^2]/P_{т}10^3, \qquad (14.70)$$

где $P_{т}$ определяется по формуле (14.64)

Это значение сравнивается с величиной кинетической энергии потока, полученной по данным испытания горелки. При изоэнтропическом расширении топливного потока удельная кинетическая энергия должна составлять не менее двух кВт на один МВт достигнутой номинальной тепловой мощности горелки

Используя параметры энергоносителей, полученные при испытании, проверяют соотношение проходных сечений для топлива и распылителя. Эти соотношения должны находиться в следующем интервале:

для форсунок с одноступенчатым распыливанием жидкого топлива

$$1 \le \frac{F_{г.у}}{F_{кр\,р}} \le \frac{\sqrt{1 + V_{ж}/(V_{р}\rho_{р})}}{q(\lambda_{р})}, \qquad (14.71)$$

Таблица 14.4

Перечень характеристик и условий испытания

Тип горелки	Характеристика	Условия испытаний
1. Форсунки	1. Зависимость расхода жидкого топлива и тепловой мощности от давления жидкого топлива перед горелкой $V_ж = f(P_ж)$; $V_ж Q_{нж}^р = f(P_ж)$. 2. Зависимость расхода распылителя от расхода жидкого топлива $V_р = f(V_ж)$. 3. Зависимость расхода распылителя от давления его перед горелкой $V_р = f(P_р)$ 4. Зависимость расхода воздуха от давления его перед горелкой $V_в = f(P_в)$.	1 Температурный уровень агрегата — рабочий 2 Давление в агрегате — рабочее. 3. Степень открытия регулятора расхода вентиляторного воздуха 100 % (при расходах не более верхнего расхода шкалы прибора или максимальной величины, установленной инструкцией по эксплуатации агрегата)
2. Газовые горелки	В соответствии с ГОСТ 29134–91 в зависимости от типа газовой горелки	Давление в печи — рабочее. Коэффициент расхода воздуха на номинальном режиме — минимальный
3. Газомазутные горелки	Газовая часть — в соответствии с ГОСТ 28091–89 в зависимости от типа газовой горелки Мазутная форсунка — в соответствии с поз 1 настоящей таблицы	Как в поз 2 настоящей таблицы
4. Топливо-кислородные	Дополнительно к характеристикам поз. 1, поз. 2 или поз. 3 настоящей таблицы в зависимости от типа горелки определяются: — зависимость расхода кислорода от давления кислорода перед горелкой $V_{O_2} = f(P_{O_2})$; — зависимость расхода кислорода от расхода топлива $V_{O_2} = f(V_ж + V_г)$	Как в поз.1, или поз. 2, или поз. 3, в зависимости от типа горелки

для газомазутных горелок и форсунок с двухступенчатым распыливанием

$$0{,}5 \le \frac{F_{г.у}}{F_{кр.р} + F_{кр.г}} < \frac{F_{кр.р}/q(\lambda_р) + F_{кр.г}/q(\lambda_г)}{F_{кр.р} + F_{кр.г}} \sqrt{1 + \frac{V_ж}{V_р\rho_р + V_г\rho_г}}, \qquad (14.72)$$

для газовых горелок

$$1 \le F_{г.у}/F_{кр.г} \le 1/q(\lambda_г), \qquad (14.73)$$

где $F_{г.у}$ — площадь выходного сечения горелки, мм^2; $F_{кр.р}$ и $F_{кр.г}$ — площадь критического сечения сопла распылителя и газового сопла, мм^2.

Основные показатели работы горелок по качеству сжигания топлива, требования безопасности и охраны окружающей среды определяются так же, как и для горелок общего назначения.

Глава 15. ПРИНЦИПЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

На все серийно выпускаемые горелочные устройства разрабатывают технические условия, которые являются неотъемлемой частью комплекта технической документации на данный тип горелочного устройства.

Технические условия содержат вводную часть и разделы, расположенные в следующей последовательности. технические требования, правиэа приемки; методы контроля (испытания, анализа, измерений); транспортирование и хранение; указания по эксплуатации, гарантии поставщика.

Во вводной части указывается, на какие горелки распространяются данные технические условия, для чего предназначены горелки, на каких агрегатах и как они устанавливаются; приводятся теплоты сгорания топлива, температуры подогрева воздуха и газа, а также дается запись примера условного обозначения горелочного устройства. Сведения о теплоте сгорания топлив и температурах подогрева могут быть перенесены в раздел «Технические требования»

В технических условиях должно быть указание, что они разработаны в соответствии со стандартными.

Эти стандарты регламентируют технические требования к горелкам (показатели и условия эксплуатации горелок, качество сжигания топлива, требования к конструкции и материаям, требования к автоматизации), требования безопасности, комплектность, маркировку и условия хранения

Конструкция горелок должна предусматривать возможность ее демонтажа для осмотра и ремонта. Сопла, завихрители и другие детали, засоряющиеся за время работы, должны быть доступны для очистки и замены. Конструкция разъемных соединений должна исключать возможность их неправильной сборки и случайного соединения. Масса съемной детали не должна превышать 50 кг. Детали, работающие в условиях высоких температур и подвергающиеся интенсивным механическим нагрузкам, в том числе абразивному износу, следует изготовлять из специальных материалов, имеющих повышенную термостойкость и прочность.

В комплект горелки должны входить все приспособления и детали, необходимые для ее работы. Конструкция горелок с ручным управлением должна предусматривать возможность их автоматизации.

Внешний вид горелок должен соответствовать современным требованиям промышленной эстетики.

Общие технические требования предусматривают соблюдение условий безопасности, а также удовлетворение санитарно-гигиенических и некоторых конструктивных требований

Правила безопасности при эксплуатации горелок, установленных на тепловых агрегатах, должны соответствовать действующим «Правилам безопасности в газовом хозяйстве» и «Правилам безопасности в газовом хозяйстве заводов черной металлургии».

В разделе «Технические требования» должны быть предусмотрены требования к качеству горелочного устройства, куда относятся показатели технологичности (ГОСТ 18831—73) и надежности (ГОСТ 13377—75).

Ресурс горелок до первого ремонта должен быть не менее 18 тыс. ч (за исключением деталей из огнеупорной керамики и отдельных быстроизнашивающихся сменных элементов), коэффициент технического использования $K_{т.и} = 0{,}97$.

Помимо перечисленных требований, отраженных в ГОСТах, в разделе «Технические требования» излагаются подразделы: основные параметры и размеры; характеристика (свойства); комплектность; маркировка; упаковка.

В подразделе «Основные параметры и размеры» помещают данные об основных параметрах и размерах горелок, их изображения с габаритными, установочными и присоединительными размерами и отклонения в размерах или дают ссылку на конструкторские или другие технические документы с указанием их обозначений.

В подразделе «Характеристики (свойства)» помещают требования к свойствам и параметрам горелок применительно к режимам и условиям их эксплуатации и испытаний.

Могут быть приведены основные характеристики работы горелки: номинальное давление газа и воздуха, номинальный расход газа или номинальная тепловая мощность, а также указаны коэффициент рабочего регулирования горелки по тепловой мощности и коэффициент расхода воздуха при номинальной тепловой мощности.

В этом разделе должно быть указано, что качество применяемых материалов должно соответствовать требованиям действующих стандартов, а в случае их отсутствия — требованиям технических условий; кроме того, все детали и изделия в целом должны также соответствовать техническим условиям на изготовление нестандартного оборудования, которые включены в комплект конструкторских документов каждой горелки.

Следует указать материалы, из которых изготавливают горелки и отдельные их детали, допускаемые отклонения размеров и массы, припуски на механическую обработку отливок с указанием соответствующих государственных стандартов.

Отливки деталей горелок должны быть обрублены и очищены, прибыли и литники удалены. Места удаления литников и прибылей, а также заливы и наросты должны быть зачищены в пределах допусков на отливку. Особенно тщательно должны быть очищены внутренние полости.

Трещины, раковины, пузыри, утяжины, местная сыпь, посторонние включения, снижающие прочность и ухудшающие товарный вид горелок, не допускаются.

Дефекты — единичные и групповые раковины на необрабатываемых поверхностях отливок — допускаются без исправлений, если площадь поражения не превышает 3 % от рассматриваемой поверхности, а глубина их не превышает 15 % от толщины тела отливок, но не более 4 мм. Дефекты — единичные и групповые раковины на необрабатываемых поверхностях отливок, снижающие прочность и ухудшающие их внешний вид, допускает-

ся исправлять заваркой или зачеканкой по технологии завода-изготовителя с предварительной разделкой места заварки до основного материала с зачисткой после заварки. Наплавленный металл должен быть монолитно связан с основной массой металла детали На отливках допускаются отдельные раковины количеством не более двух на площади одного квадратного дециметра.

Обработанные поверхности не должны иметь забоин, задиров и других повреждений. Острые углы и ребра должны быть притуплены, за исключением мест, притупление которых не допускается по чертежу. При наличии водоохлаждаемых заливаемых труб (змеевиков) (например, в водоохлаждаемых головках инжекционных горелок) при отливке таких деталей необходимо перед заливкой металла в форму проверить правильность установки змеевика, а выходные отверстия последнего закрыть во избежание их засорения.

Механическая обработка деталей должна выполняться по размерам, допускам и параметрам шероховатости, указанным на чертежах. При отсутствии на чертежах указаний о предельных отклонениях формы и расположения поверхностей эти отклонения ограничиваются полем допусков на размер в соответствии с действующим стандартом.

Не указанные на чертежах предельные отклонения размеров оговариваются особо (например, отверстий — по H14, валов — по h14, остальных — ± 1T14/2).

Допускаемые отклонения по овальности и конусообразности цилиндрических поверхностей ограничиваются полем допуска на диаметр. Радиальное биение посадочных поверхностей сопрягаемых деталей горелки не должно превышать половины допуска на диаметр Во всех деталях горелки обработку отверстий, нарезание резьбы, обработку цилиндрических и конических поверхностей, а также обточку торцов деталей производить с одного установа детали на станке. Неперпендикулярность отверстий под крепежные детали относительно опорных поверхностей не должна превышать предельного смещения осей этих отверстий от номинального расположения, указанного на чертежах.

В случае необходимости в технических условиях указываются конкретные цифры неперпендикулярности торцовых поверхностей, отклонения от соосности поверхностей и т д. Например, для горелок типа ВП с $d_{н.г}$ = 15—75 мм неперпендикулярность торцовых поверхностей колена, корпуса и носика горелки должна быть не более 0,25 мм, для горелок большего размера — не более 0,5 мм. Допускаемое отклонение от соосности центрирующего выступа корпуса инжекционной горелки и отверстия для сопла составляет при $d_{н.г}$ = 15—48 мм не более 0,5 мм, при $d_{н.г}$ = 56—75 мм — не более 1 мм. Допускаемое отклонение от соосности внутренних поверхностей детаяей относительно центрирующих выступов или впадин для горелок с $d_{н.г}$ = 86—235 мм должно быть не более 0,5 мм.

Суммарное радиальное смещение оси сопла горелок указано ниже:

Тип горелок	Суммарное радиальное смещение оси сопла, мм
Дутьевые* (типа "труба в трубе"), диаметр выходного сечения, мм:	
<30	0,2
40—50	0,5
60—275	1,0
300—425	2,0
Инжекционные**, $d_{н.т}$, мм:	
15—48	1,0
56—75	2,0
86—178	2,0
205—235	3,0

* Смещение относительно оси выходного сечения корпуса горелки
** Смещение относительно оси носика горелки.

Особенно жесткие условия по центровке деталей горелки предъявляются к плоскопламенным горелкам типов ГР, ГПП и др.

Резьбовые соединения должны быть выполнены согласно требованиям соответствующих стандартов и указаниям на чертежах. Сборка горелки должна обеспечить плотность фланцевых соединений. Для этого все болты должны быть затянуты равномерно, чтобы исключить возможность перекоса соединяемых деталей. Все детали и узлы горелки перед сборкой должны быть очищены от загрязнений, ржавчины, стружек, заусенцев и т. п. и приняты ОТК предприятия-изготовителя.

Наружные механически необработанные поверхности горелок должны быть окрашены черным лаком БТ-577 (ГОСТ 5631—70). Внешний вид поверхности покрытия должен соответствовать IV или V классу по ГОСТ 9032—74.

В комплект поставки горелки входят: сама горелка (объем поставки партии и номенклатура определяются договором или наряд-заказом), сменные детали в соответствии с технической документацией; комплект крепежных деталей (шпильки, болты, гайки и шайбы) для крепления горелки на печи. К комплекту прилагается эксплуатационная документация по ГОСТ 2.601—68: паспорт и акт приемки (сопроводительный документ). В акте приемки указывают: наименование организации, в систему которой входит предприятие-изготовитель; наименование и адрес предприятия-изготовителя; наименование и условное обозначение горелочного устройства; номер партии; дату изготовления; дату контроля и испытаний. Акт приемки должен иметь подпись и штамп ОТК.

В соответствии с ГОСТом технические условия должны содержать указания о маркировке и упаковке горелок. Все горелки должны быть замаркированы. На каждой горелке должна быть прикреплена табличка, содержащая:

наименование или товарный знак предприятия-изготовителя; обозначение горелки;

порядковый номер горелки по нумерации предприятия-изготовителя; год и месяц выпуска; номинальные параметры (вид газа, номинальное дав-

ление газа и воздуха, номинальная тепловая мощность, требуемая электрическая мощность, напряжение); обозначение стандарта и технических условий. Табличка, содержащая маркировку, должна быть прикреплена способом, обеспечивающим ее сохранность в течение всего срока службы горелки.

В подразделе «Упаковка» должно быть указано, что каждая горелка подвергается консервации по ГОСТ 9.014—79 как изделие II группы. Горелки должны отгружаться заказчику в собранном виде без упаковки. При необходимости предприятие-изготовитель производит разбивку горелок на упаковочные узлы.

В разделе «Правила приемки» указывают порядок контроля горелок, порядок и условия предъявления и приемки горелок отделом технического контроля завода-изготовителя и потребителем. В этом разделе устанавливают также порядок предъявления на повторный контроль и приемки деталей после исправления дефектов, обнаруженных при первичном контроле или во время испытаний.

В разделе «Методы контроля» указывают методы контроля всех параметров, норм, требований и характеристик, установленных в разделе «Технические требования»

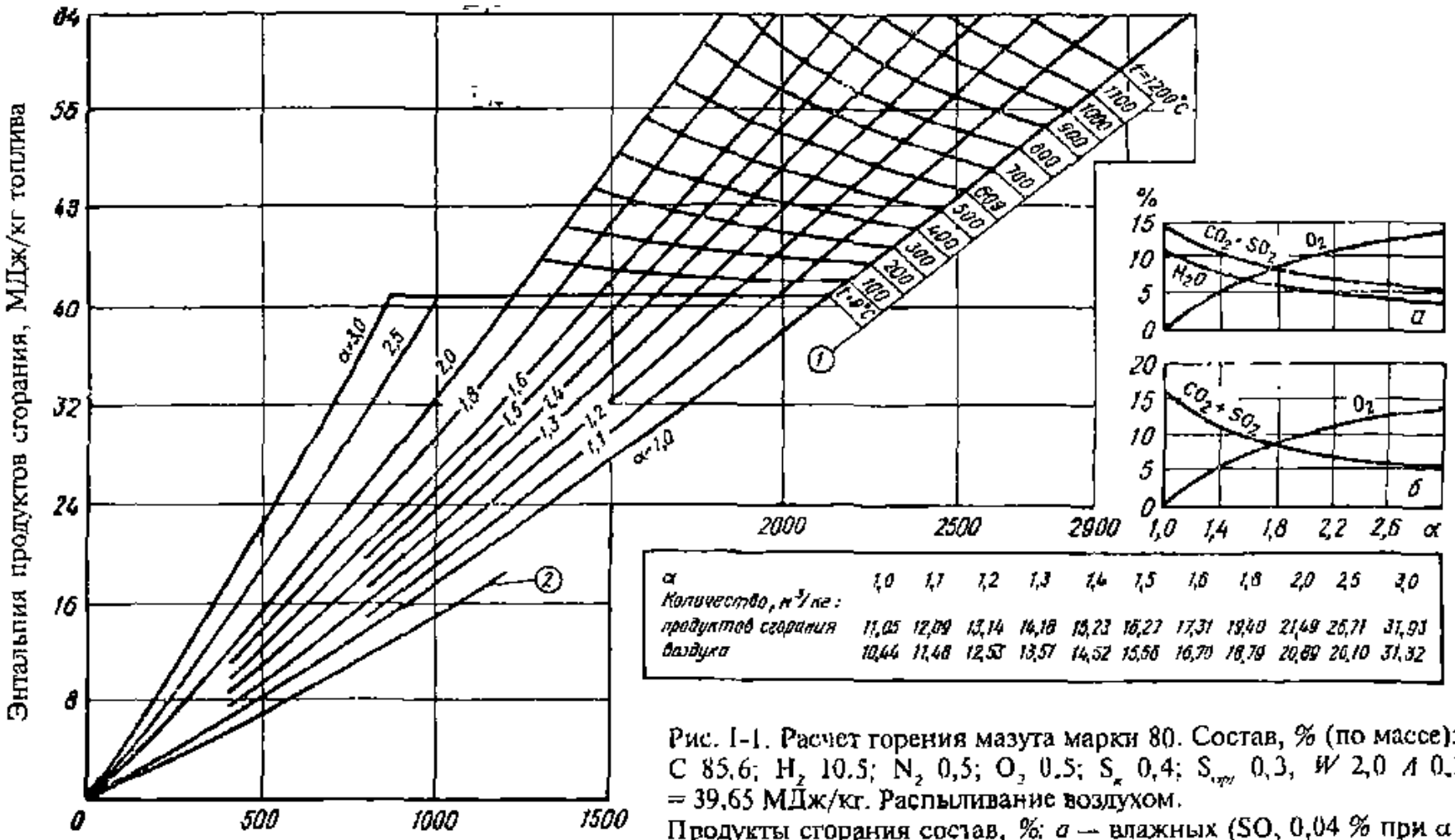
В следующем разделе излагают требования к транспортированию и хранению готовых горелок.

В технические условия входит раздел «Условия по эксплуатации», в соответствии с которым каждое предприятие, эксплуатирующее горелочные устройства, должно иметь применительно к местным условиям инструкции по эксплуатации агрегатов, использующих указанные горелки, и паспорт горелки. Обязательным условием длительной и безотказной работы горелки является ее правильный и тщательный монтаж на месте эксплуатации.

Перед установкой горелки на место эксплуатации необходимо очистить ее полости от мусора и присоединить к трубопроводам. Установку прокладок производить с учетом протекающей среды. При установке горелки щель между кладкой печи и горелкой плотно заделать огнеупорным материалом.

При эксплуатации горелок необходимо регулярно проверять надежность фланцевых соединений с учетом протекающей среды и надежность болтовых соединений. При плановых ремонтах тепловых агрегатов следует производить осмотр горелок и прочищать их от накапливающихся сажи, грязи и пыли.

В технических условиях отражаются гарантии поставщика. Поставщик (изготовитель) гарантирует работоспособность горелок. Срок гарантии устанавливается 18 мес со дня ввода в эксплуатацию, но не более 24 мес со дня отгрузки. Изготовитель в течение гарантийного срока своевременно и безвозмездно устраняет все скрытые неисправности, дефекты и несоответствия технических характеристик, которые не были выявлены в процессе изготовления, контроля и испытаний горелочных устройств при условии соблюдения потребителем правил их эксплуатации.



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, $м^3/кг$:											
продуктов сгорания	11,05	12,09	13,14	14,18	15,23	16,27	17,31	19,40	21,49	26,71	31,93
воздуха	10,44	11,48	12,53	13,57	14,62	15,66	16,70	18,79	20,89	26,10	31,32

Рис. I-1. Расчет горения мазута марки 80. Состав, % (по массе): С 85,6; H_2 10,5; N_2 0,5; O_2 0,5; $S_к$ 0,4; $S_{орг}$ 0,3, W 2,0 A 0,2 $Q_н^р$ = = 39,65 МДж/кг. Распыливание воздухом.

Продукты сгорания состав, %: *а* — влажных (SO_2 0,04 % при $\alpha = 1,0$); *б* — сухих. При $\alpha = 1$ плотность 1,31 кг/м^3:

1— калориметрическая температура сгорания (°С) в зависимости от нагрева воздуха; *2* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 кг мазута при $\alpha = 1$

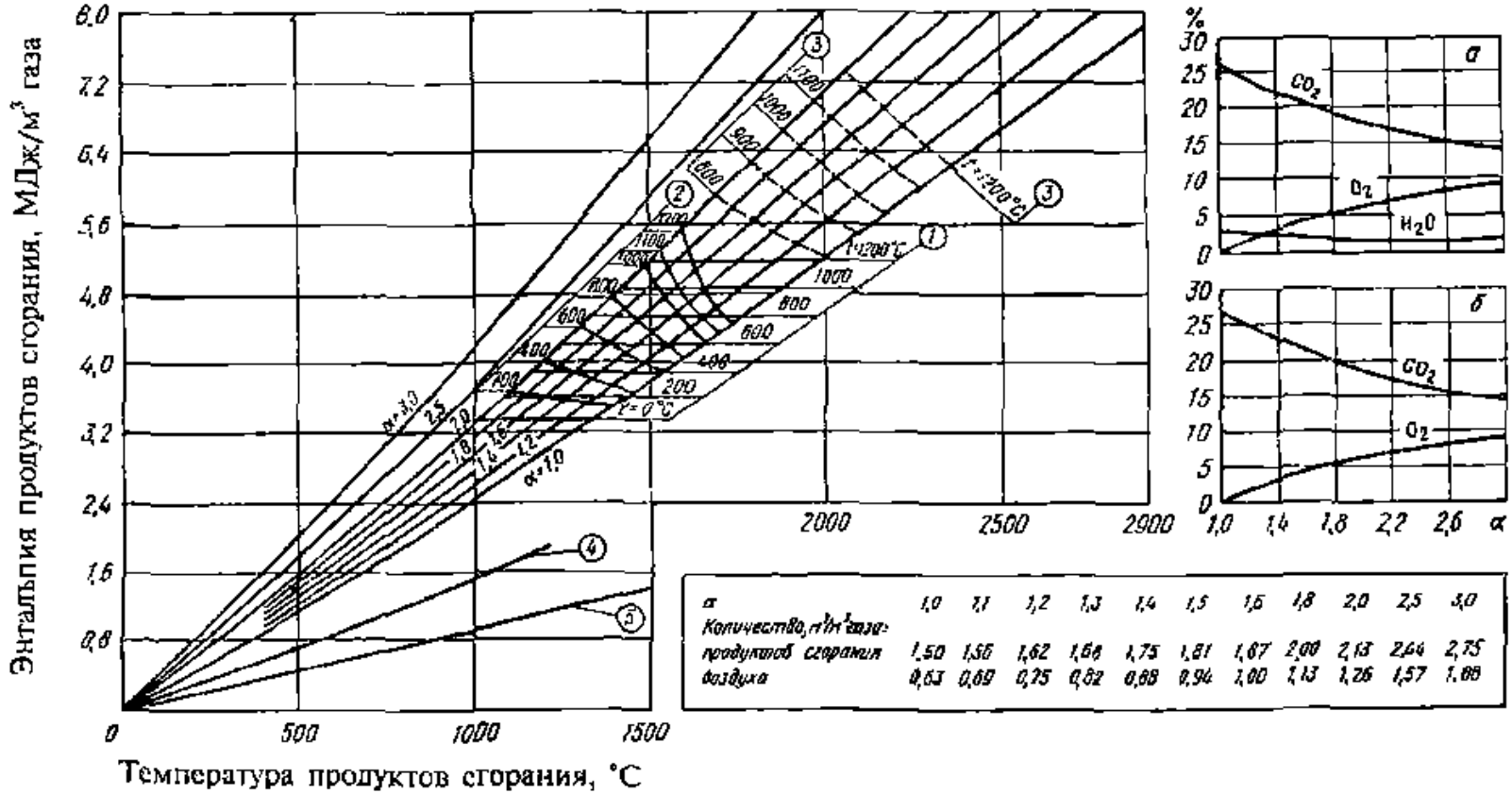


Рис. I-2. Расчет горения доменного газа состава, % (объемн):
CO_2 14,07; CO 25,33; H_2 0,9; CH_4 0,12; O_2 0,18; N_2 57,1; H_2O 2,3; плотность газа кг/м³: влажного 1,34; сухого 1,34. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 3,35; сухого 3,45.
Пролукты сгорания (при $\alpha = 1$): плотность 1,43 кг/м³; состав, %:
а — влажных, *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева газа; *2* — то же, от подогрева воздуха; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$

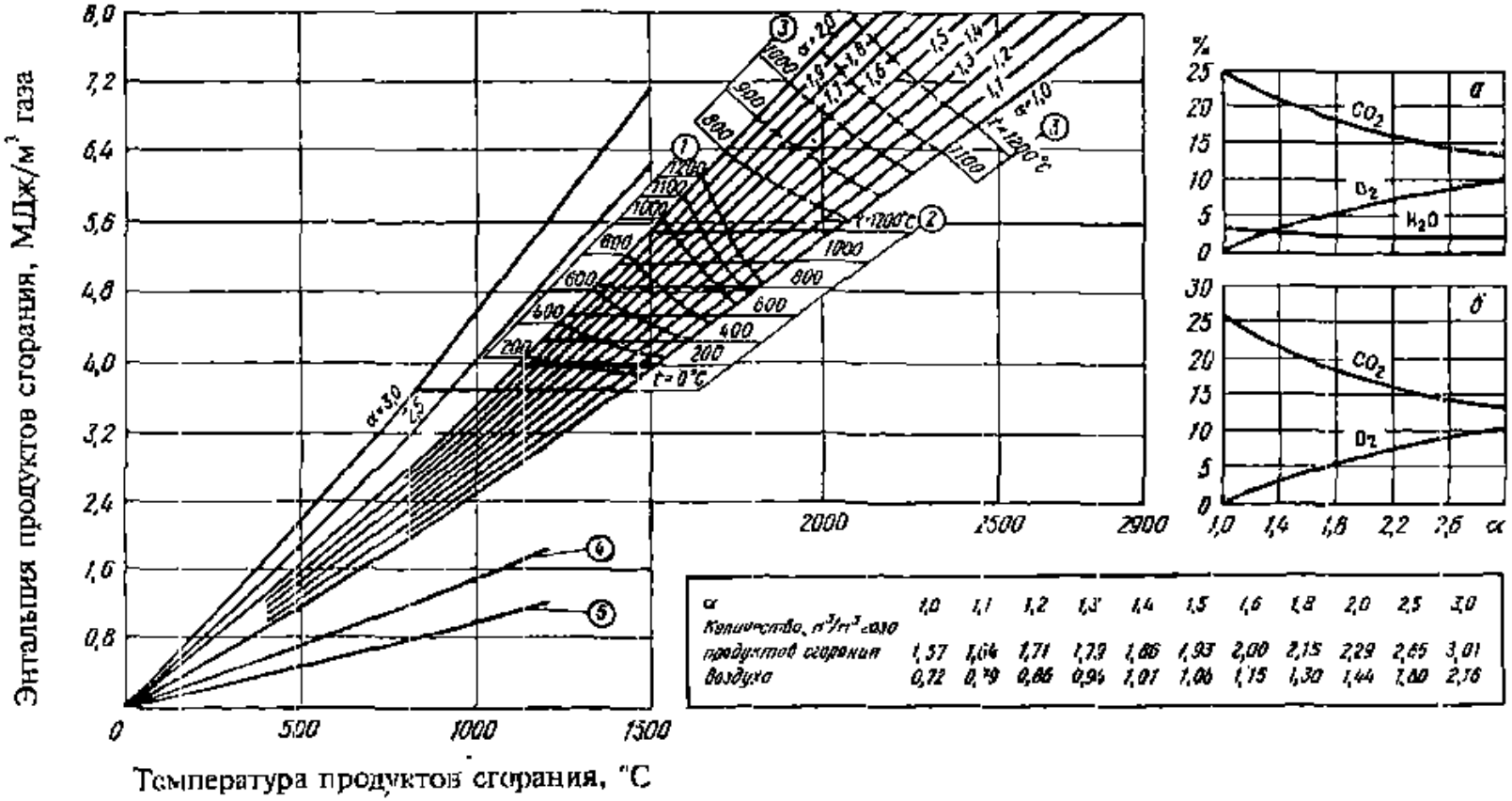


Рис. I-3. Расчет горения доменного газа состава, % (объемн):
CO_2 12; CO 26,6; H_2 2,4; CH_4 0,3; N_2 55,4, H_2O 23. Плотность газа кг/м³: влажного 1,30; сухого 1,31. $Q_н^г$, МДж/м³: влажного 3,73; сухого 3,81.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,42 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — то же, воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1

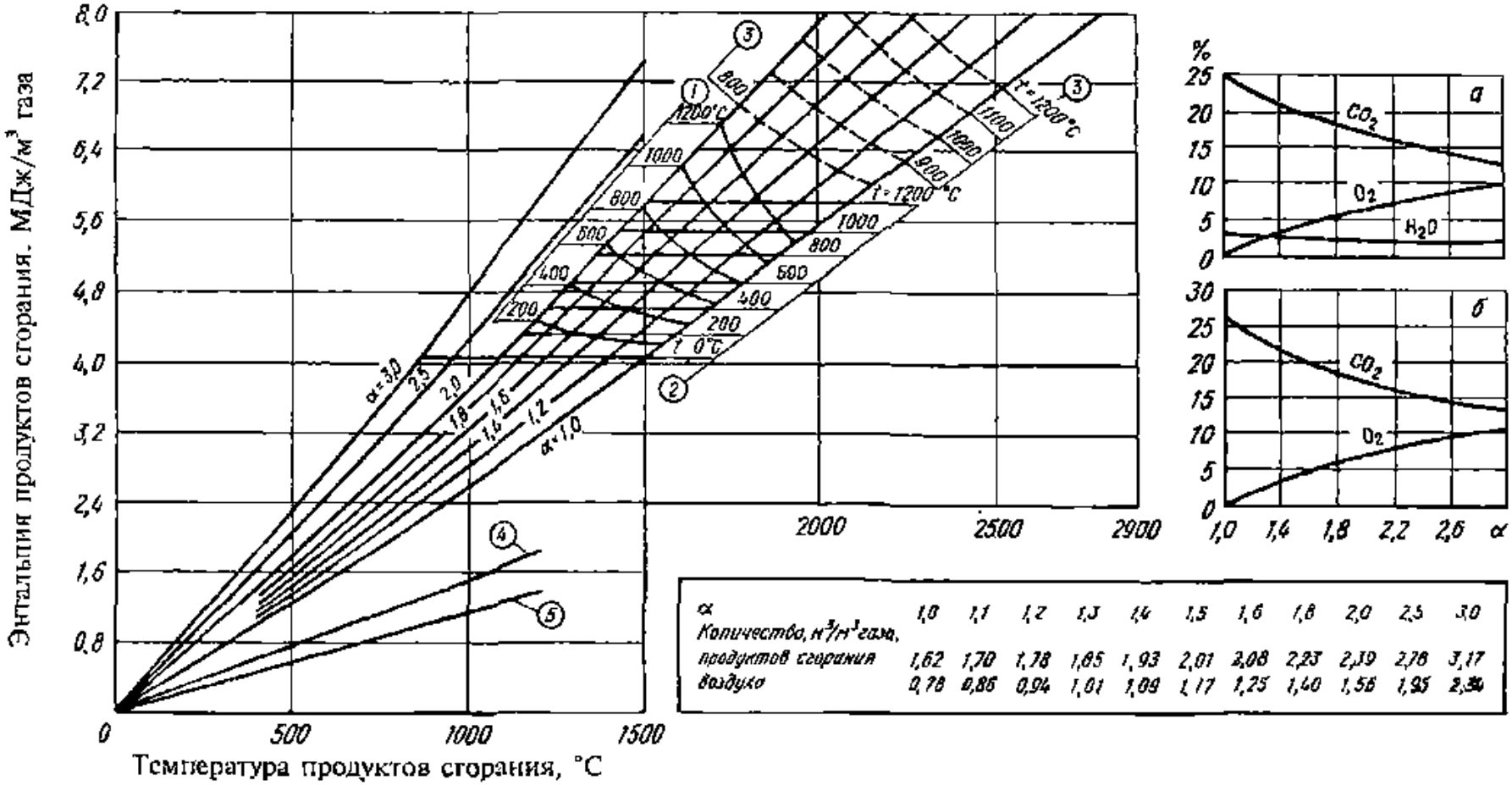


Рис. I-4. Расчет горения доменного газа состава, % (обьемн):
CO_2 10,2; CO 30,1; H_2 2,2; CH_4 0,1; N_2 55,1; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³: влажного 1,29; сухого 1,30. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 4.09, сухого 4,19.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,42 кг/м³, состав, %:
а — влажных, *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха: *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1

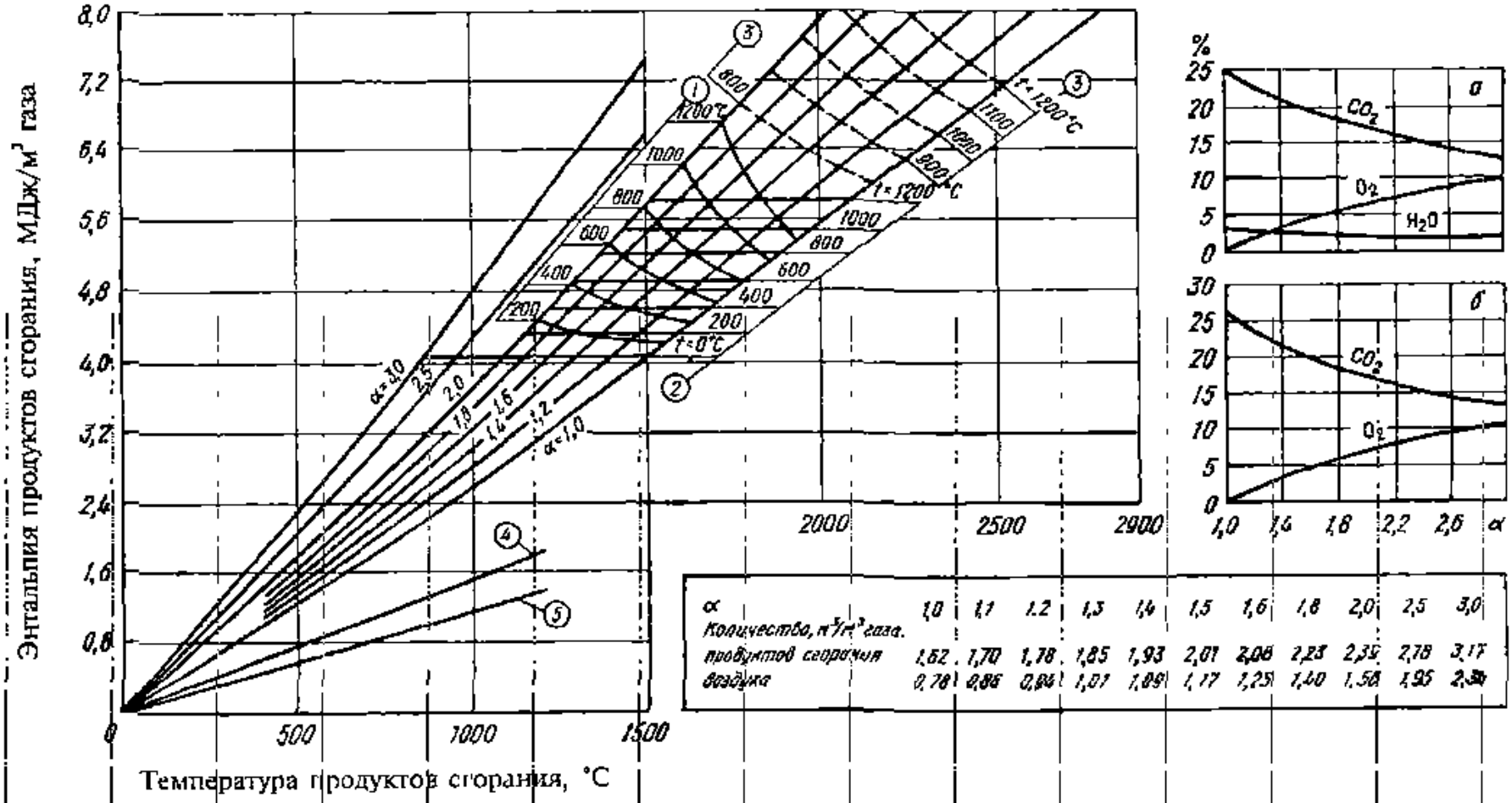


Рис. I-5. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн.):
CO_2 11; CO 24,6; H_2 7,6; CH_4 2,7; C_mH_n 0,2; O_2 0,1; N_2 51,5; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³: влажного 1,22; сухого 1,23. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 5,05; сухого 5,17.
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha = 1$) 1,43 кг/м³; состав, %
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$

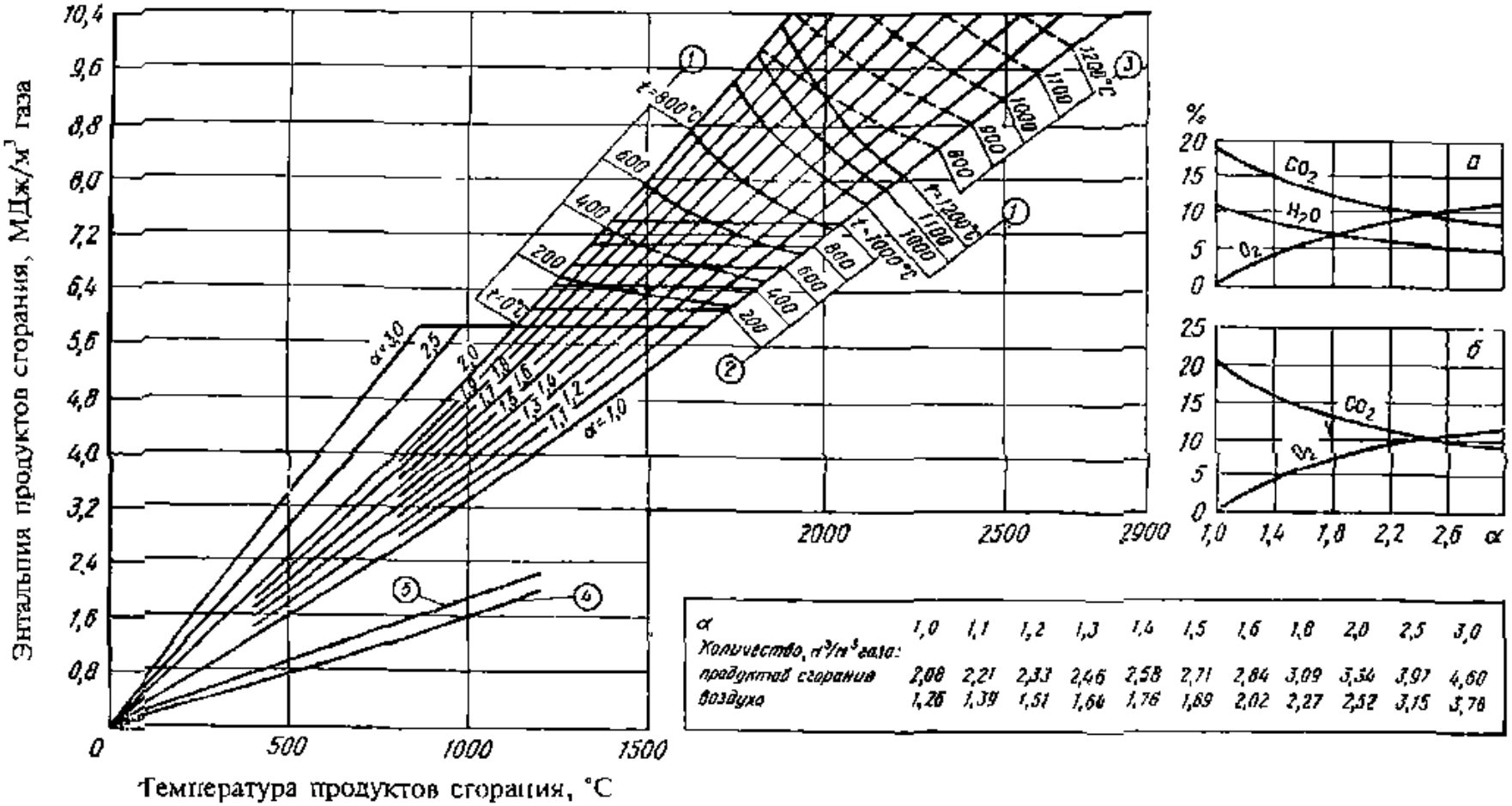


Рис. I-6. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн):
CO_2 10,4; CO 23,4; H_2 10,9; CH_4 4,2; C_mH_n 0,3; O_2 0,1, N_2 48,4; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³: влажного 1,17; сухого 1,17. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 5,86, сухого 6,01.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,34 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха, *2* — то же, от подогрева газа, *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа, *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1

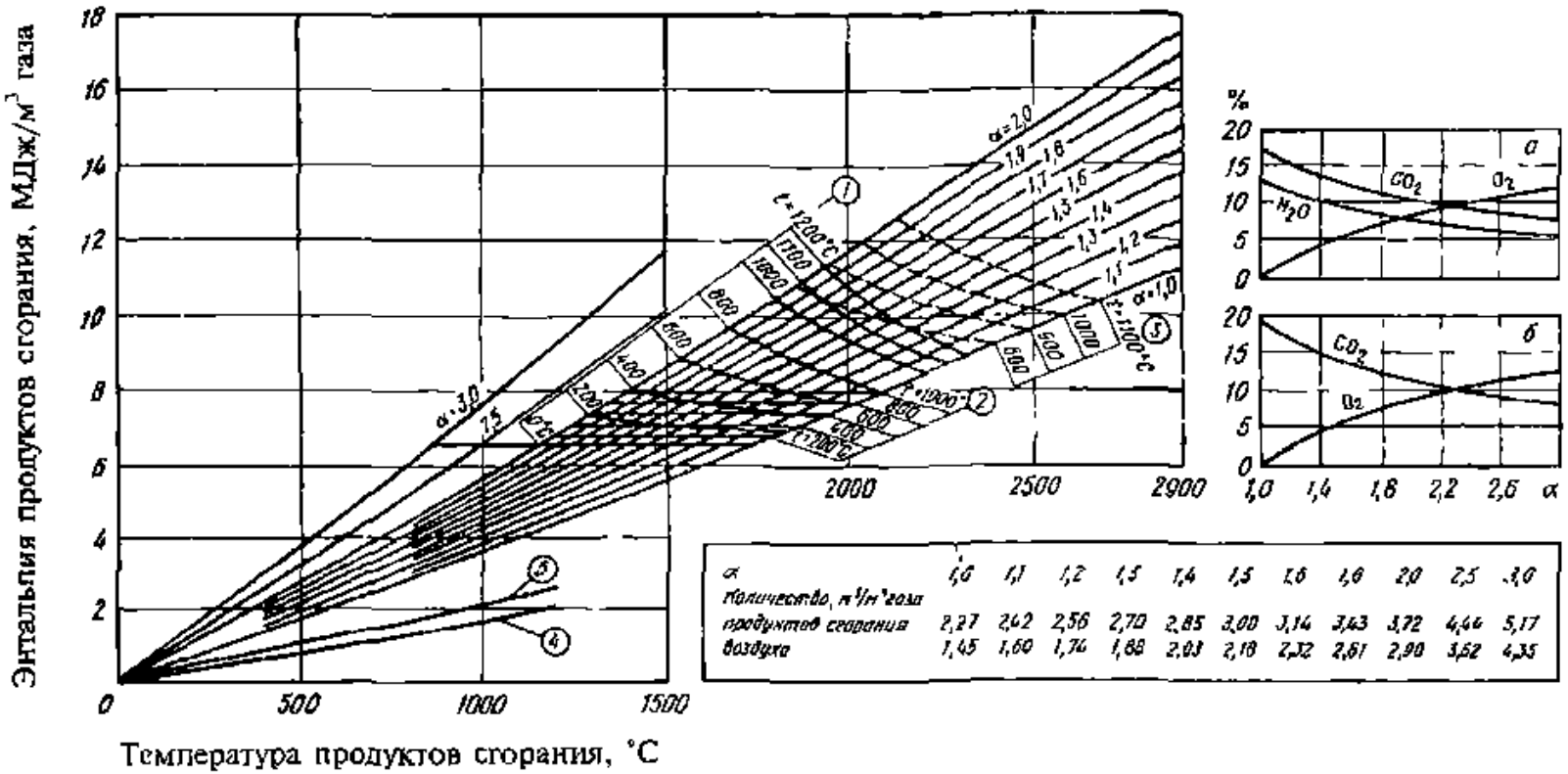


Рис. 1-7. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн):
CO_2 9,8; CO 22,1; H_2 14,2; CH_4 5,7; C_mH_n 0,4, O_2 0,2; N_2 45,3; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³; влажного 1,12, сухого 1,12. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 6,66; сухого 6,82.
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha = 1$) 1,32 кг/м³; состав, %
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева воздуха и газа до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$

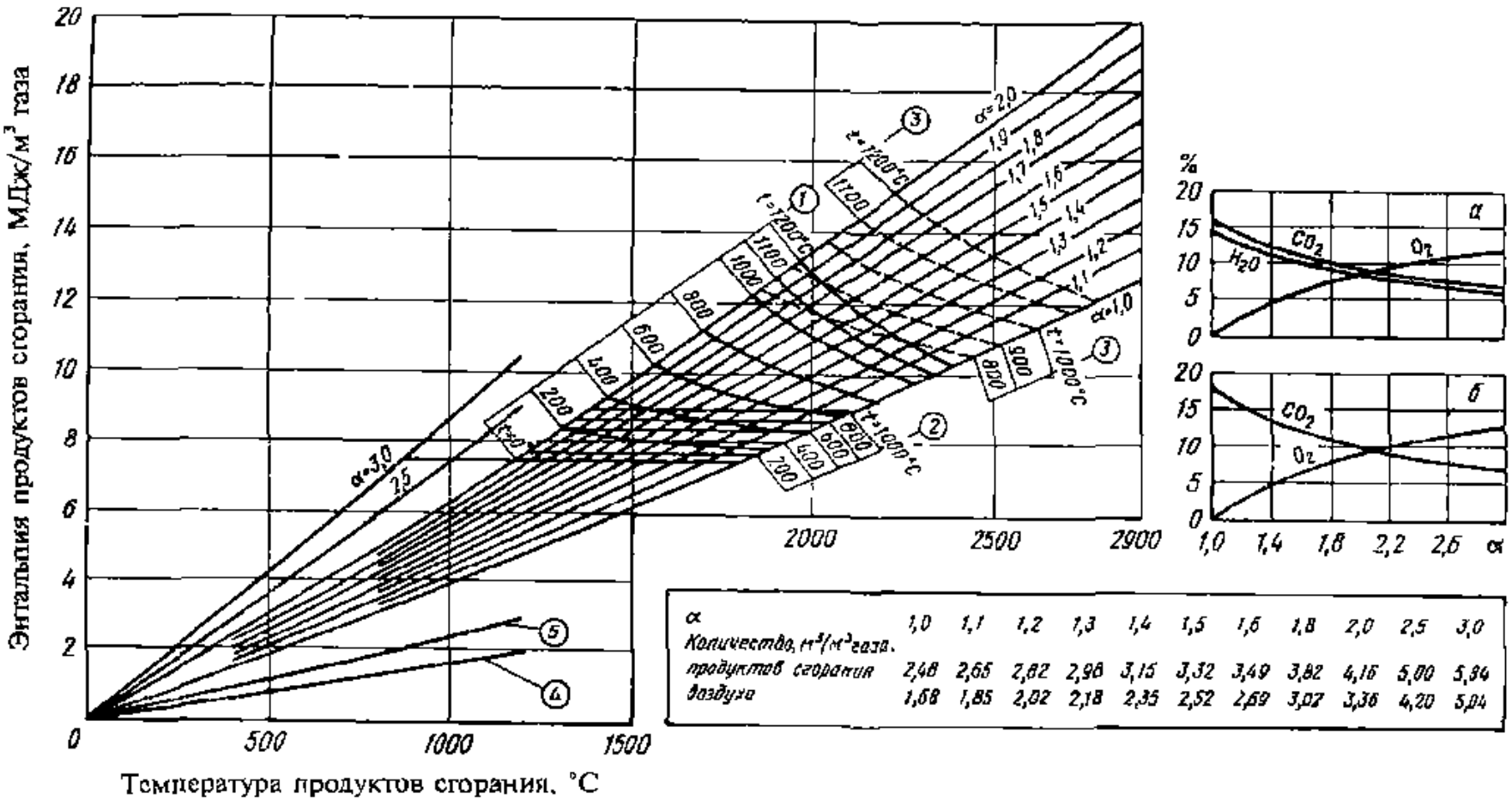


Рис. I-8. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн):
CO_2 9,2; CO 20,8; H_2 17,5; CH_4 7,2; C_mH_n 0,6; O_2 0,2; N_2 42,2; H_2O 2,3 Плотность газа кг/м³· влажного 1,07; сухого 1,07. Q_i^p, МДж/м³: влажного 7,54; сухого 7,73.
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha = 1$) 1,30 кг/м³; состав, %·
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же. от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$

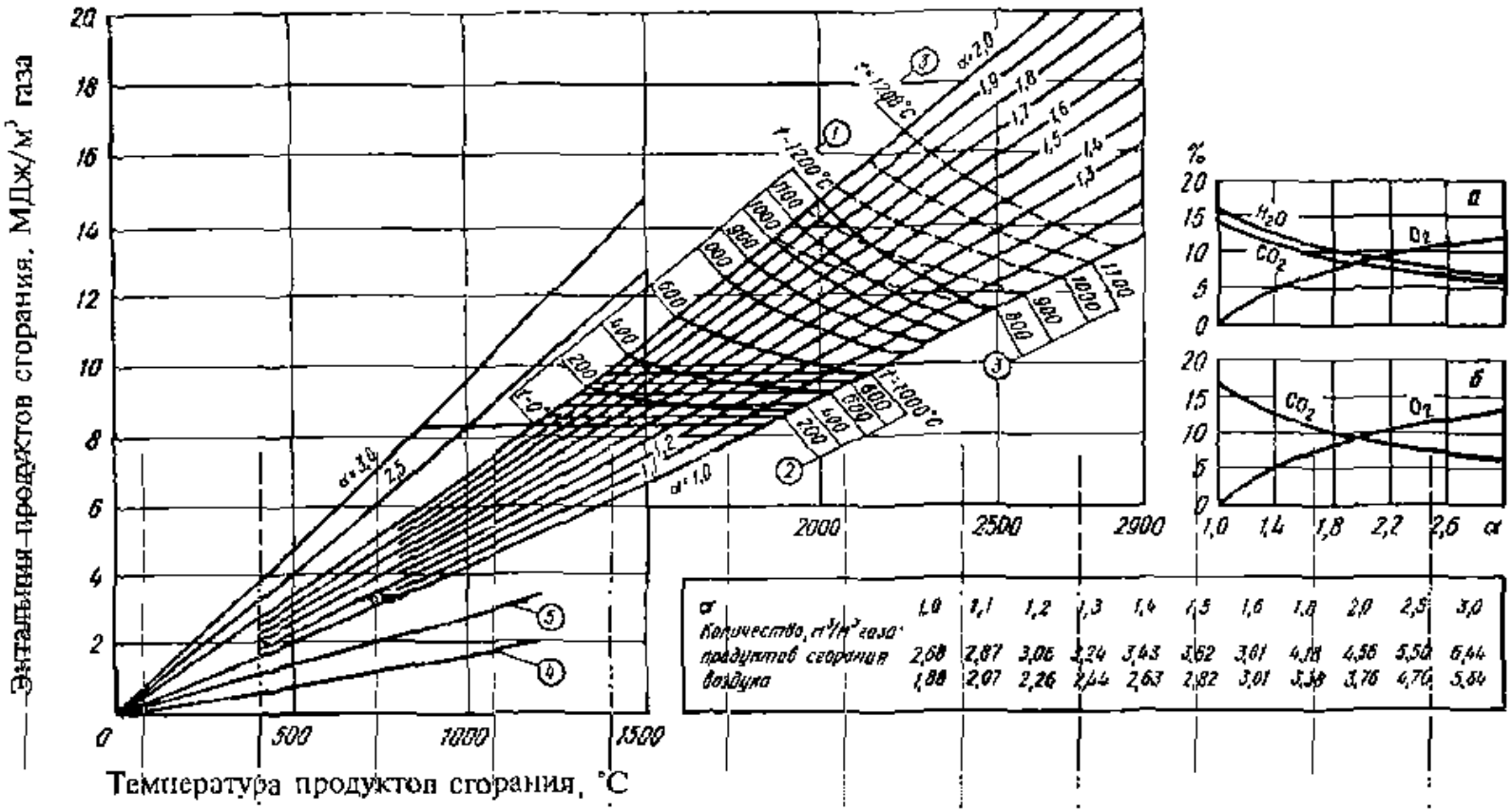


Рис. I-9. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн):
CO_2 9,5; CO 19,6; H_2 20,9, CH_4 8,8; C_mH_n 0,7; O_2 0,3, N_2 38,9; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³ влажного 1,01; сухого 1,01. $Q_н^р$, МДж/м³ влажного 8,40; сухого 8,60.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,28 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1

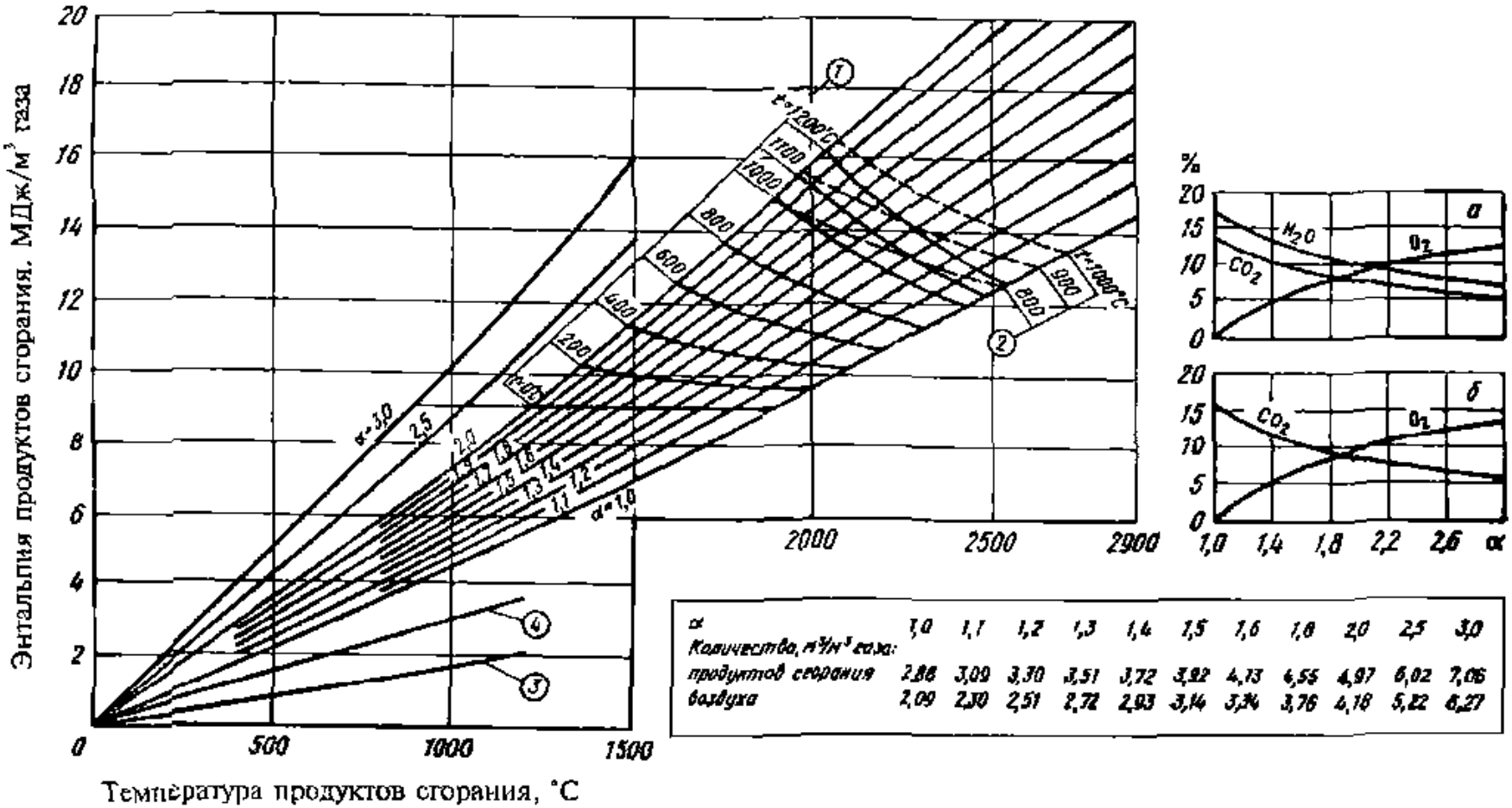
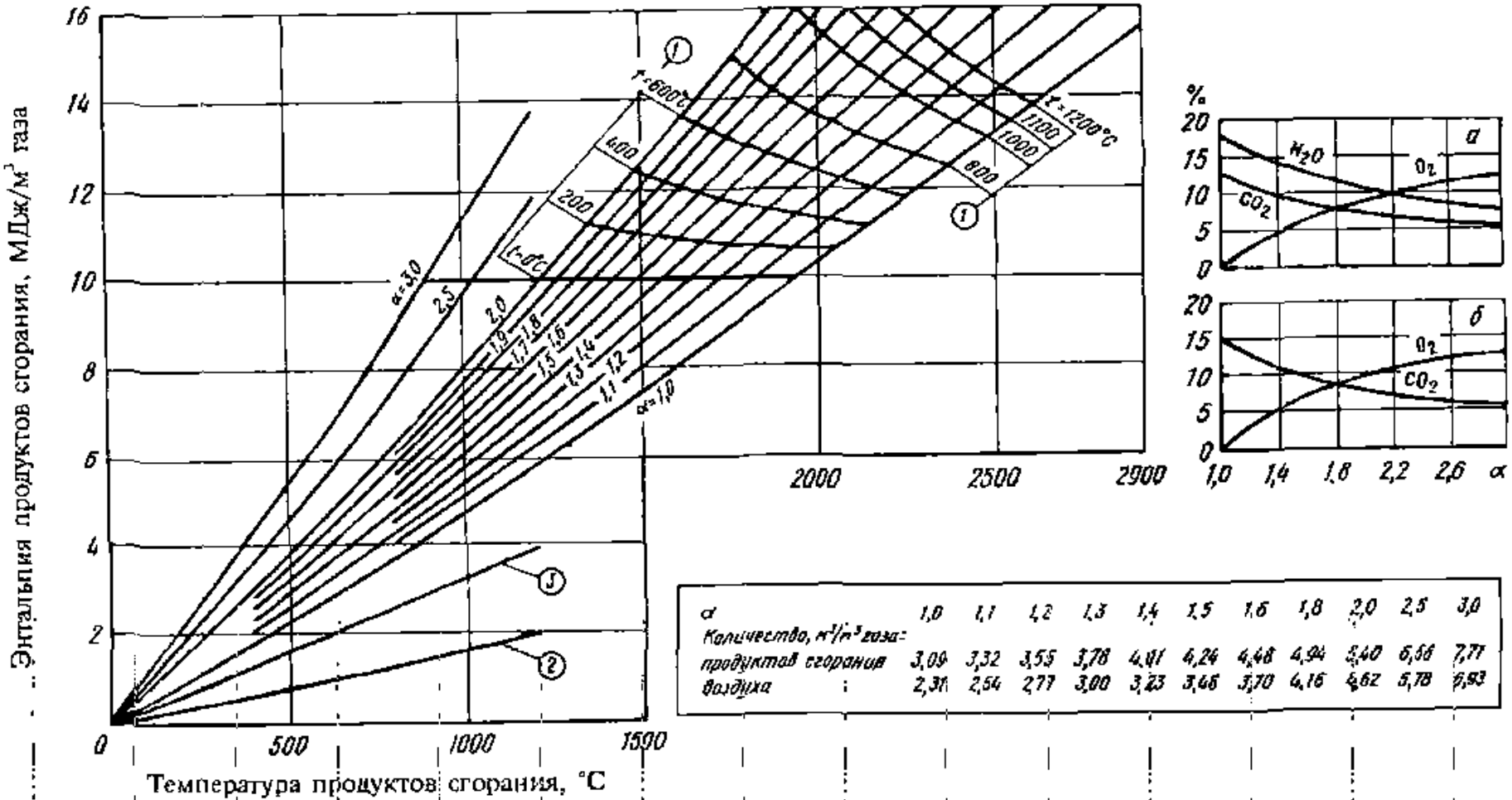


Рис. 1-10. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн).

CO_2 7,9; CO 18,3; H_2 24,2; CH_4 10,3; C_mH_n 0,8; O_2 0,3; N_2 35,9; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³: влажного 0,96; сухого 0,96. $Q_н^р$, МДж/кг: влажного 9,21; сухого 9,42.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha = 1$) 1,27 кг/м³; состав, %:

а — влажных, *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *3* — энтальпия 1 м³ газа; *4* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	3,09	3,32	3,55	3,78	4,01	4,24	4,48	4,94	5,40	6,56	7,71
воздуха	2,31	2,54	2,77	3,00	3,23	3,46	3,70	4,16	4,62	5,78	6,93

Рис. I-11 Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн):
CO_2 7,3; CO 17,0; H_2 27,5, CH_4 11,8; C_mH_n 1,0; O_2 0,4; N_2 32,7; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³: влажного 0,91; сухого 0,91 $Q_н^р$, МДж/кг: влажного 10,07; сухого 10,32.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,26 кг/м³; состав, %.
а — влажных; *б* — сухих, *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа, *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1

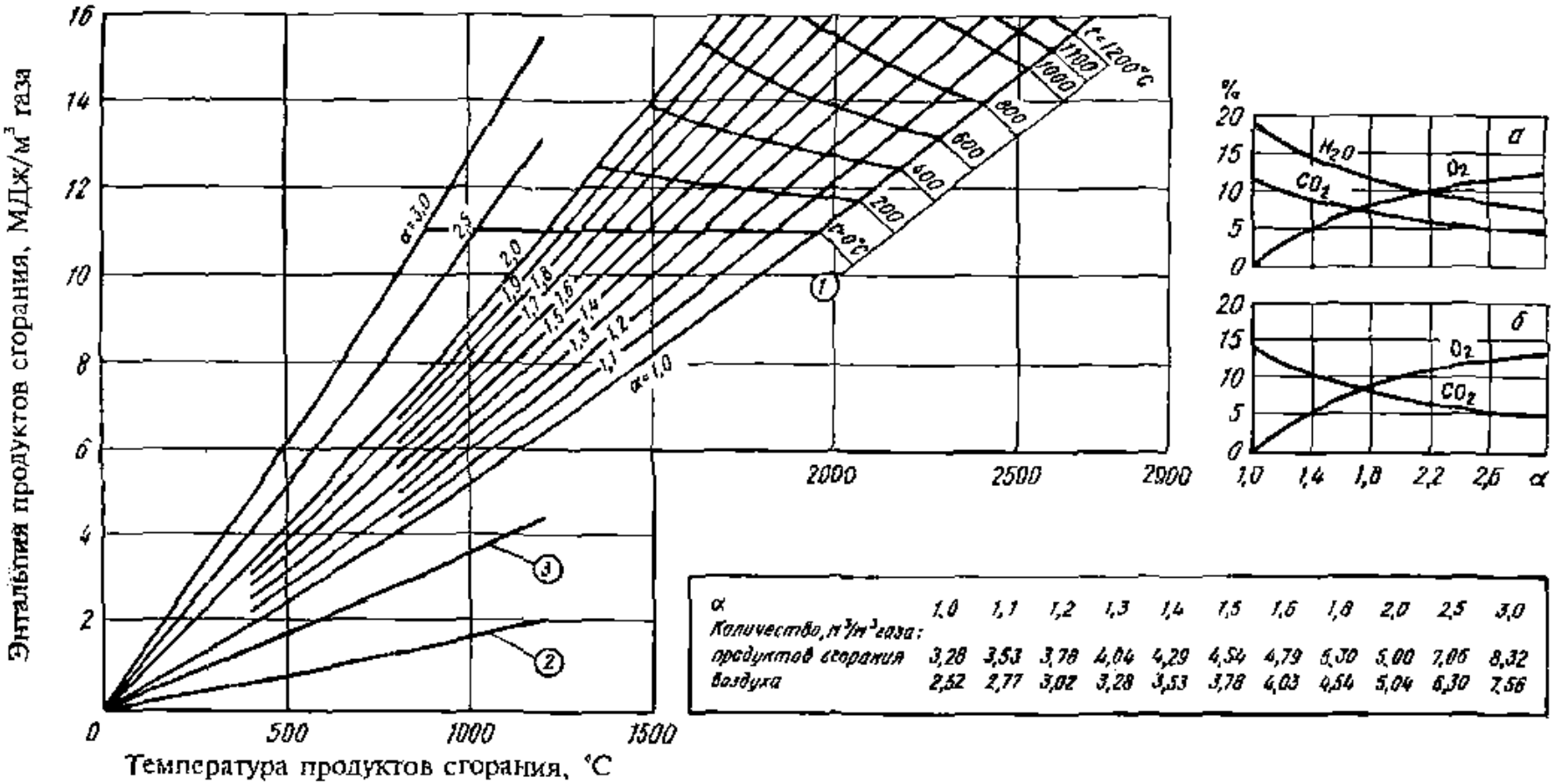


Рис. I-12. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн):
CO_2 6,6; CO 15,8, H_2 30,9; CH_4 13,3, C_mH_n 1,1; O_2 0,4; N_2 29,6; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³. влажного 0,86; сухого 0,86. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного газа 10,91; сухого 11,16.
Продукты сгорания, плотность (при $\alpha = 1$) 1,25 кг/м³, состав, %.
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$

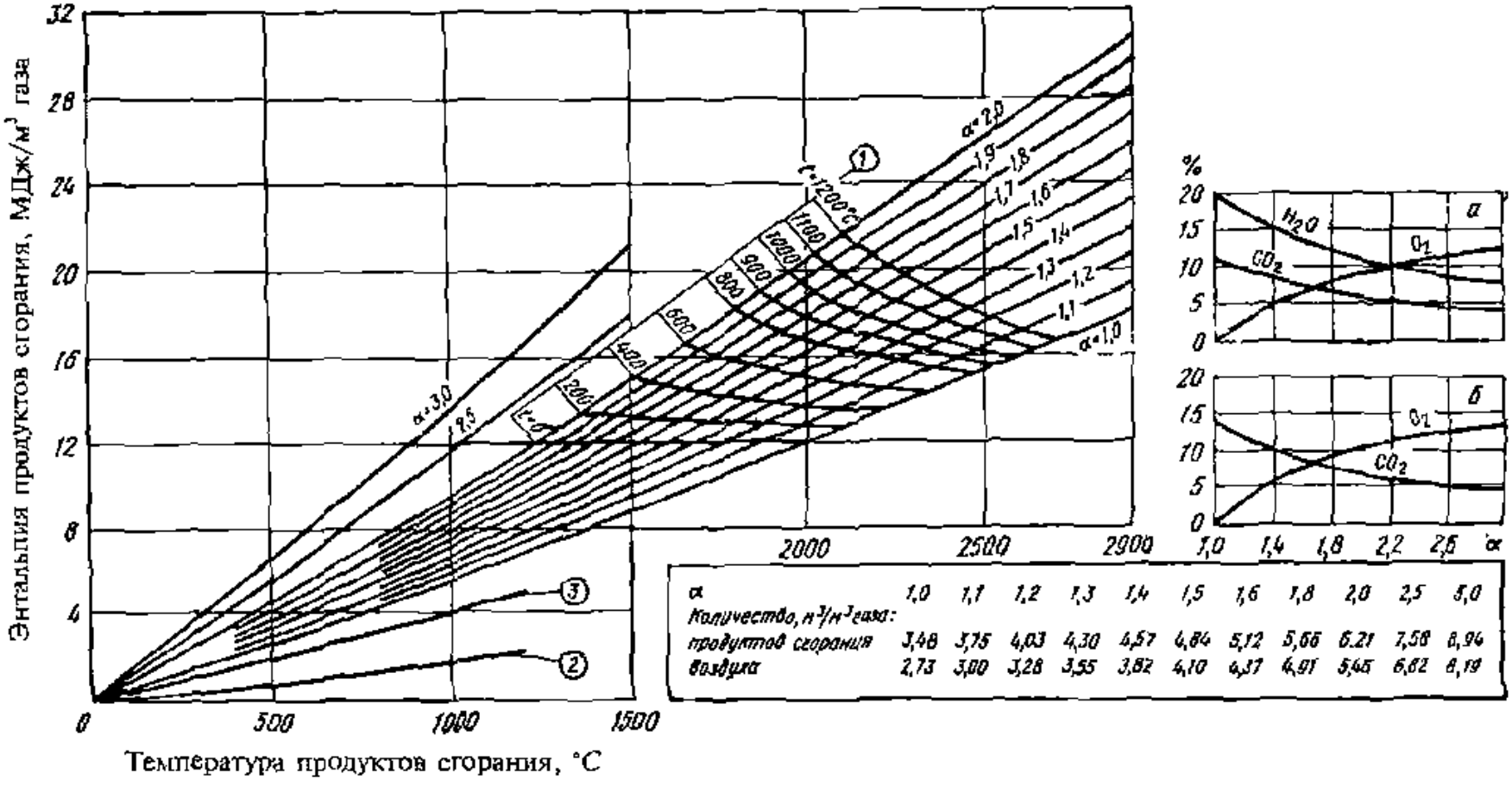


Рис. 1-13. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн)·
CO_2 6,0; CO 14,5, H_2 34,2; CH_4 14,9; C_mH_n 1,2; O_2 0,5, N_2 26,4; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³: влажного 0,81; сухого 0,78 $Q_н^р$, МДж/м³. влажного 11,74; сухого 12,02.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,24 кг/м³, состав, %:
а — влажных; *б* — сухих, *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха, *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1

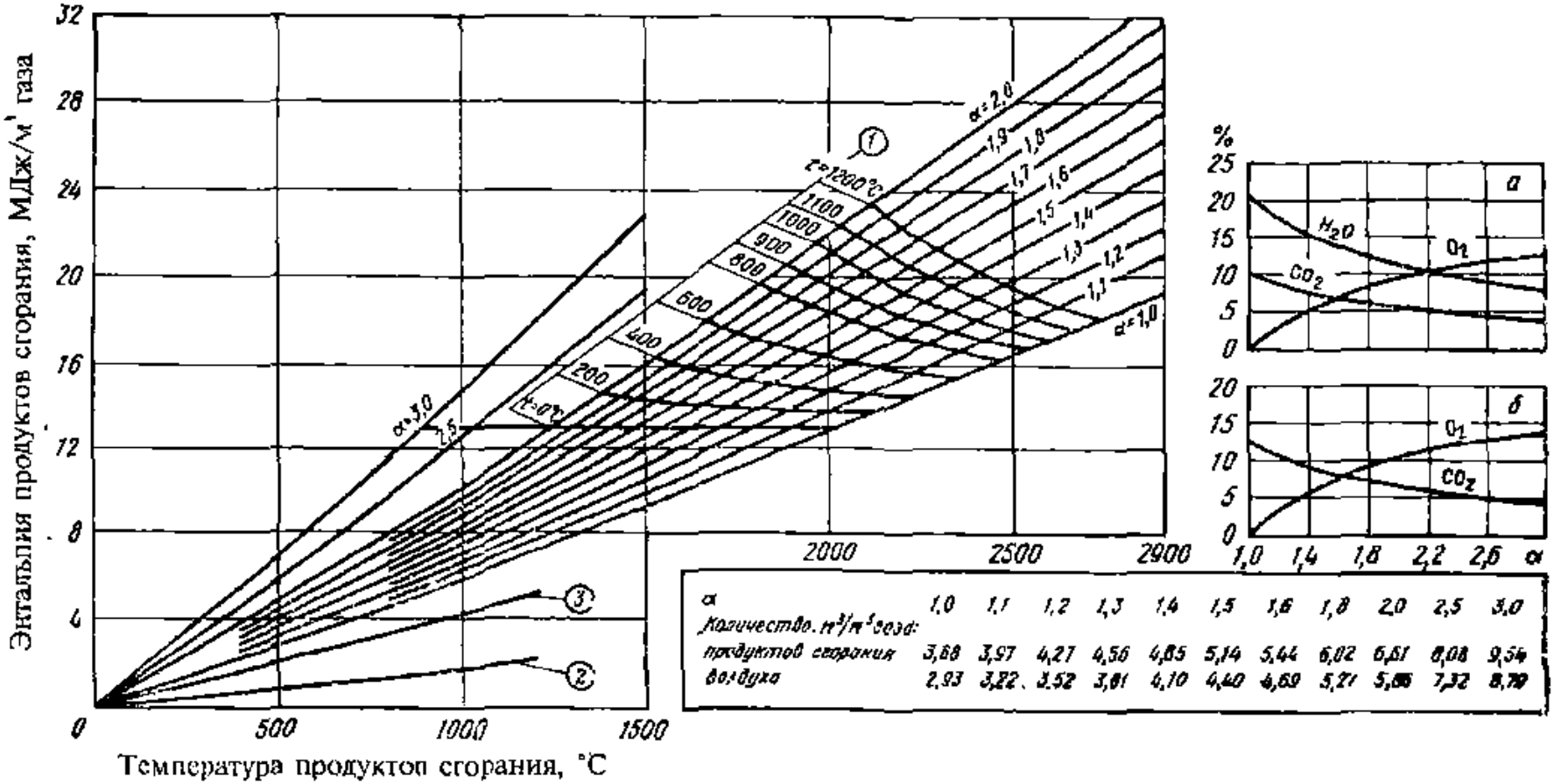
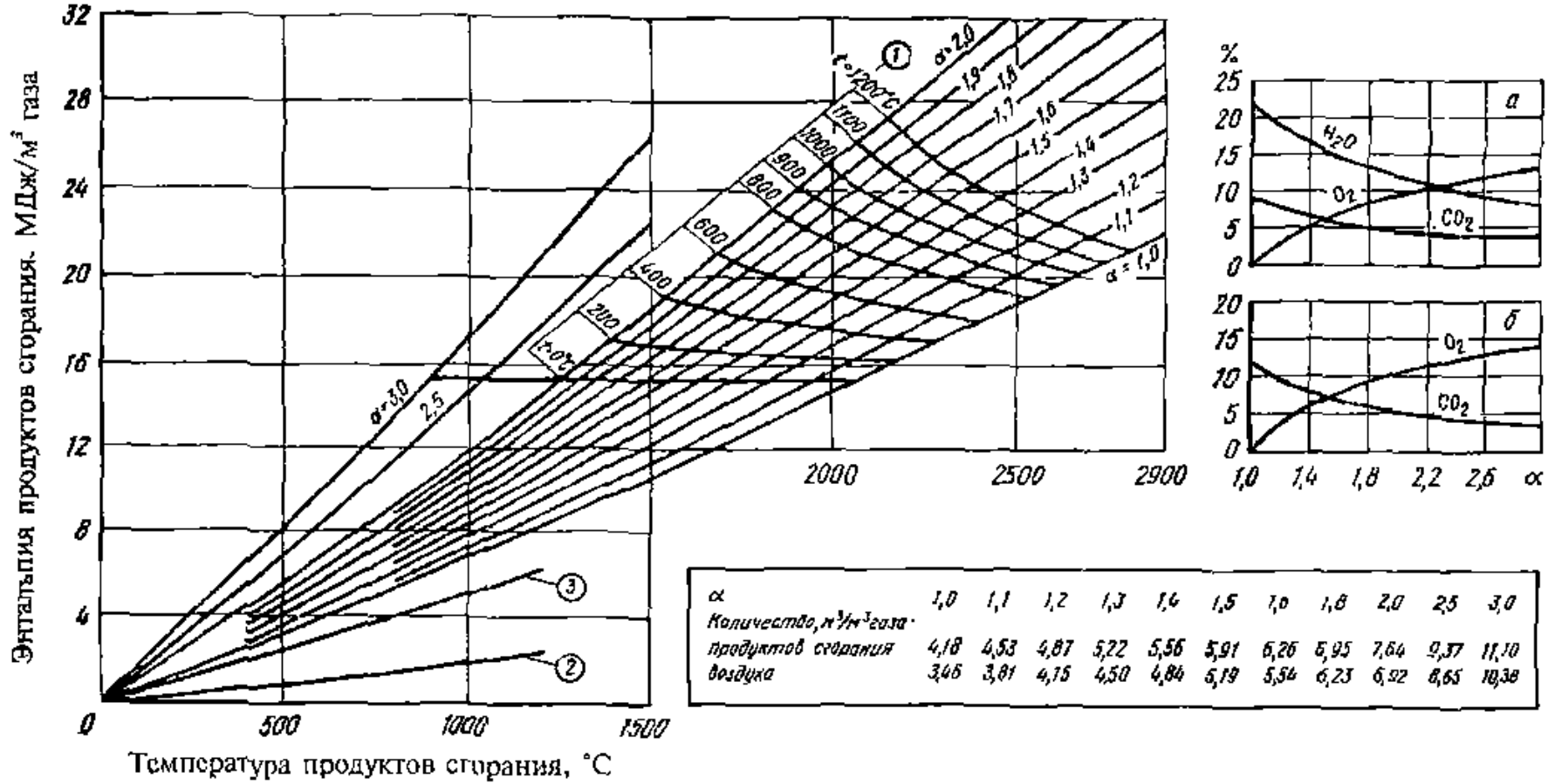
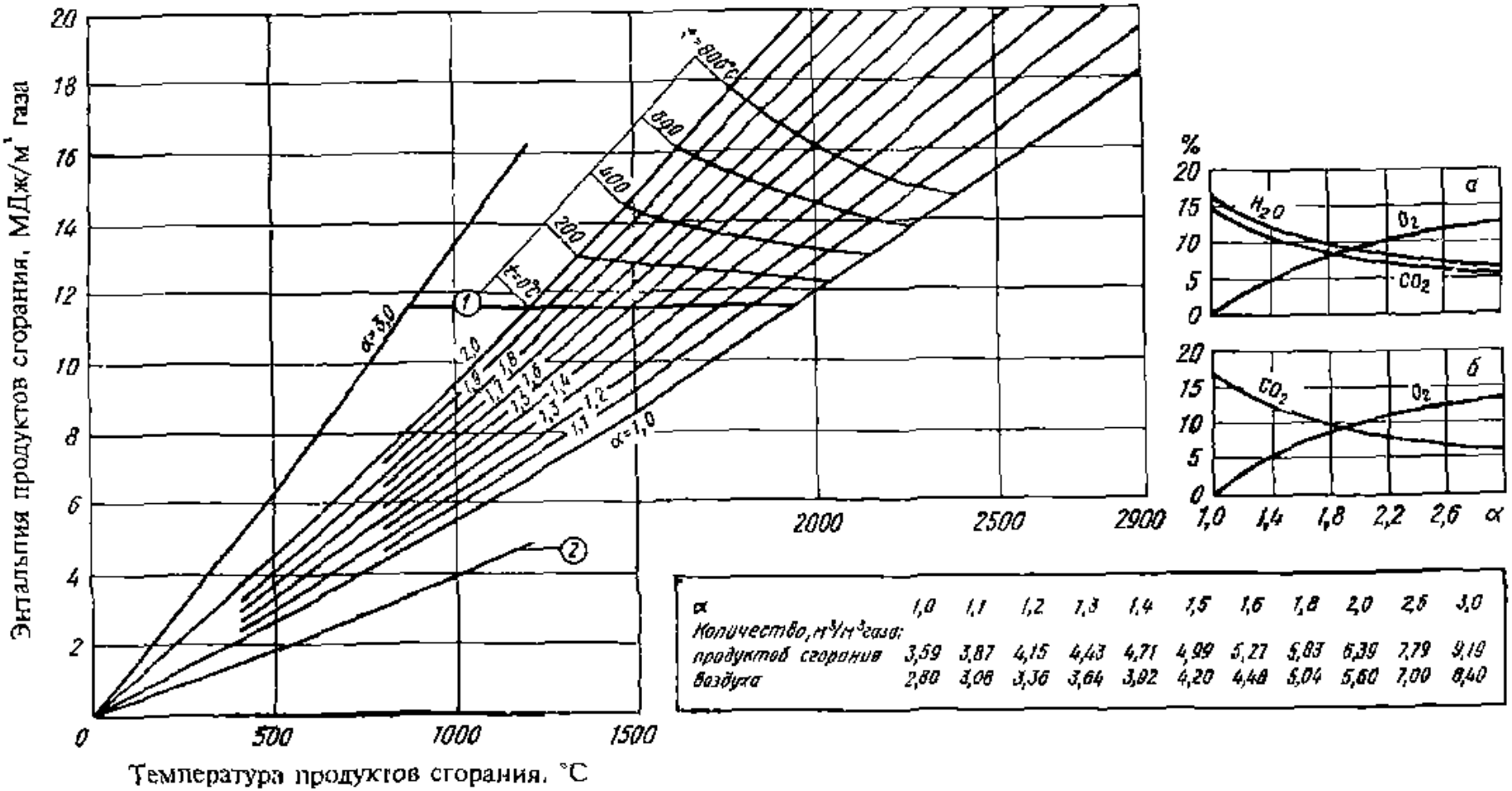


Рис. 1-14. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн):
CO_2 5,4; CO 13,2; H_2 37,6; CH_4 16,4, C_mH_n 1,3; O_2 0,5; N_2 23,3; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³: влажного 0,76; сухого 0,76. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного газа 12,56; сухого 12,85.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,23 кг/м³; состав, %.
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха, *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



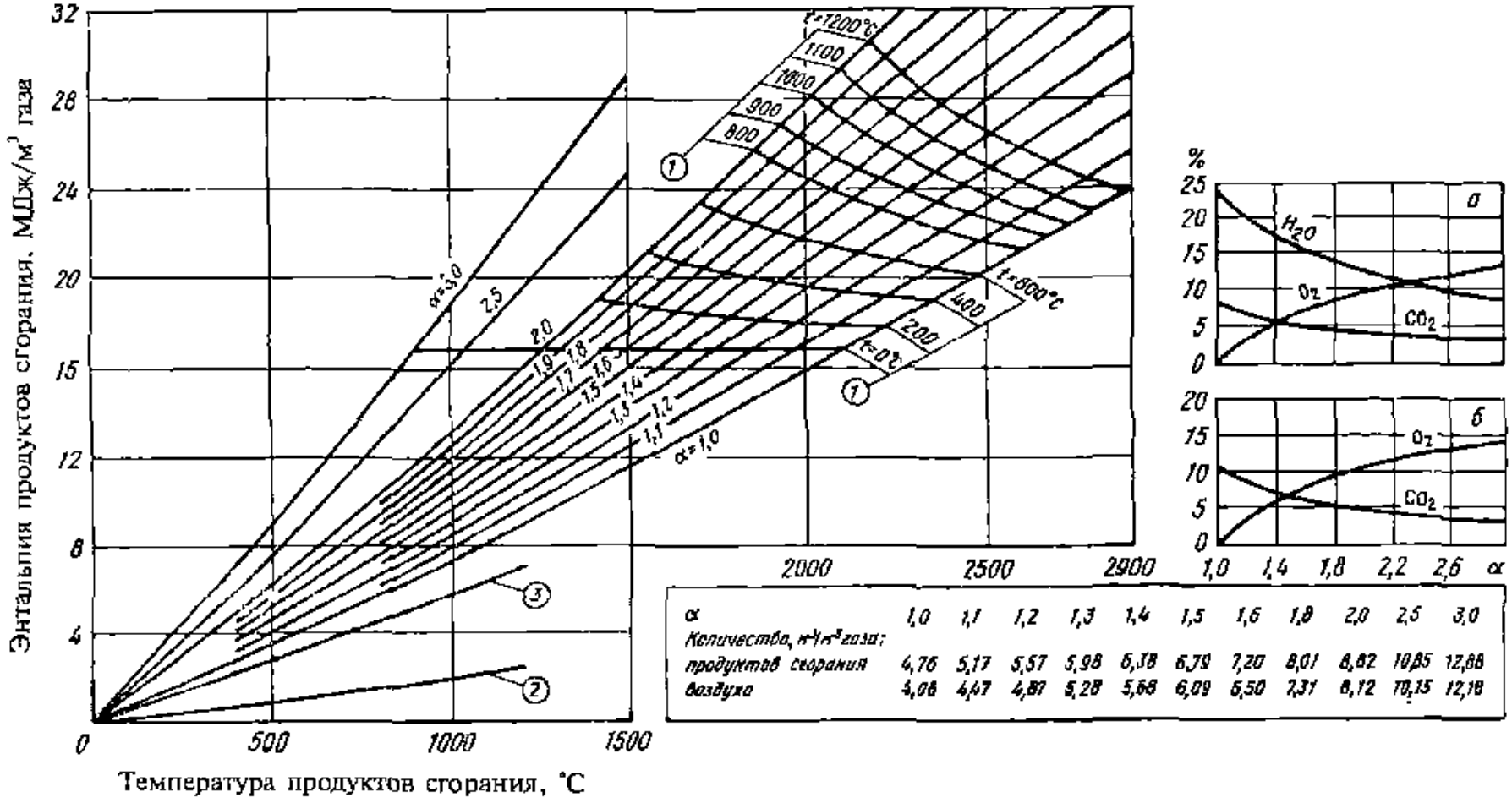
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	4,18	4,53	4,87	5,22	5,56	5,91	6,26	6,95	7,64	9,37	11,10
воздуха	3,46	3,81	4,15	4,50	4,84	5,19	5,54	6,23	6,92	8,65	10,38

Рис. 1-15. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн):
CO_2 3,8, CO 10,1; H_2 45,9; CH_4 20,2; C_mH_n 1,6; O_2 0,6; N_2 15,5; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³: влажного 0,63, сухого 0,63. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного газа 14,63, сухого: 15,00.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,22 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	3,59	3,87	4,15	4,43	4,71	4,99	5,27	5,83	6,39	7,79	9,19
воздуха	2,80	3,08	3,36	3,64	3,92	4,20	4,48	5,04	5,60	7,00	8,40

Рис. 1-16. Расчет горения смеси природного, доменного и коксового газов состава, % (объемн):
CO_2 10,9; CO 21,9; H_2 22,7; CH_4 14,0; C_3H_8 1,0; O_2 0,1; N_2 28,5. Плотность газа 1,0 кг/м³. $Q_н^р$, = 11.80 МДж/м³.
Продукты сгорания. плотность (при α = 1) 1,28 кг/м³, состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха, *2* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	4,76	5,17	5,57	5,98	6,38	6,79	7,20	8,01	8,82	10,85	12,88
воздуха	4,08	4,47	4,87	5,28	5,68	6,09	6,50	7,31	8,12	10,15	12,18

Рис. I-17. Расчет горения коксового газа состава, % (объемн):
CO_2 2,0; CO 6,4; H_2 55,5; CH_4 24,6, C_mH_n 2,0; O_2 0,8; H_2O 2,3; N_2 6,4 Плотность газа кг/м³: влажного 0,48; сухого 0,47. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 17,10; сухого 17,50.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,20 кг/м³; состав, %;
а — влажных; *б* — сухих, *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха, *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1

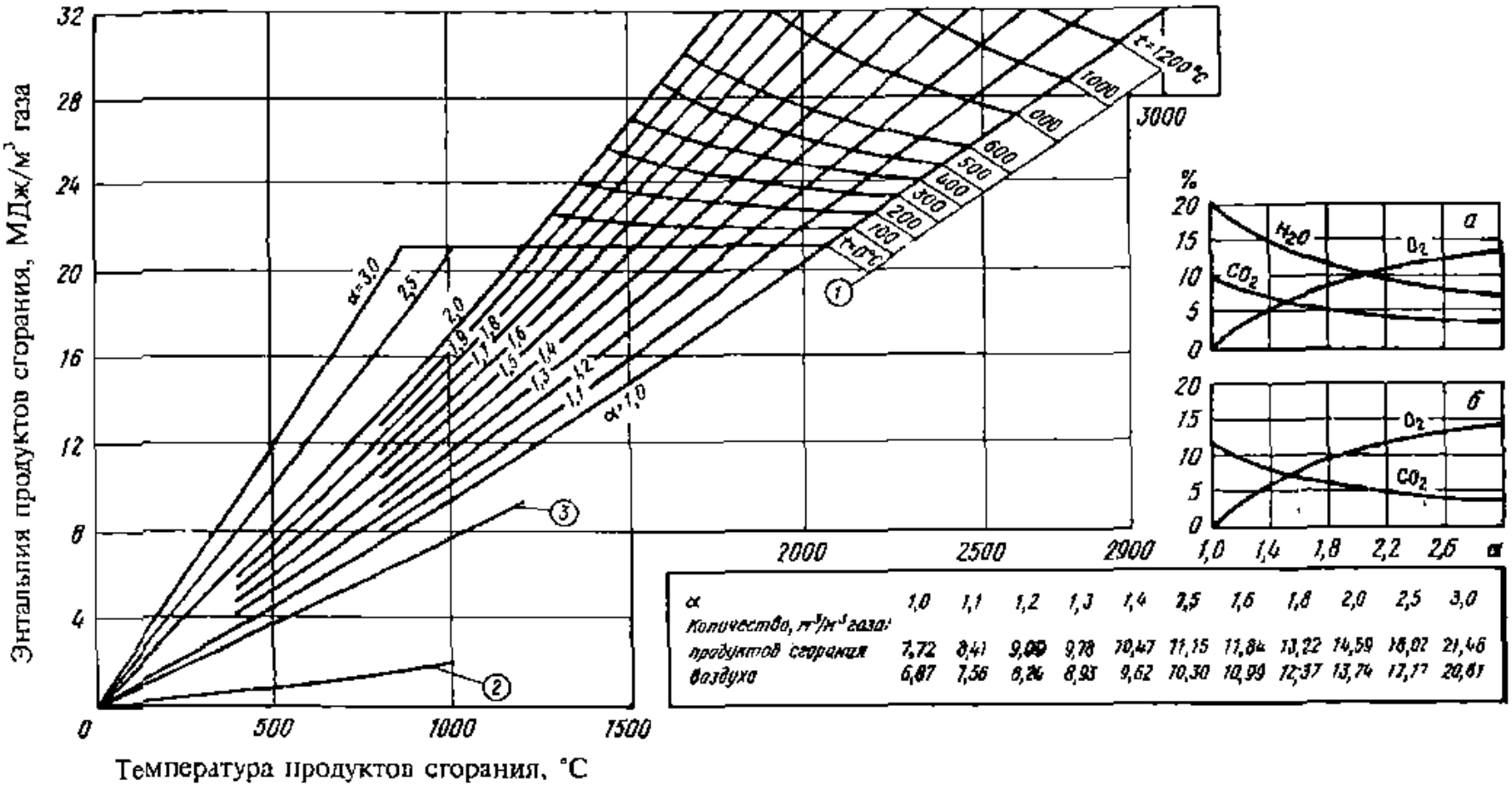


Рис. 1-18. Расчет горения смеси природного и коксового газов состава, % (объемн):
CO_2 1,55; CO 3,7, H_2 30,9, CH_4 56,0; C_2H_4 1,85; C_2H_6 1,55; C_3H_8 0,45; C_4H_{10} 0,35; O_2 0,45; N_2 1,7; H_2O 1,5. Плотность газа кг/м³: влажного 0,505; сухого 0,605. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного газа 26,86; сухого 27,20.
Продукты сгорания плотность (при $\alpha = 1$) 1,23 кг/м³; состав, %;
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — теплосодержание 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$

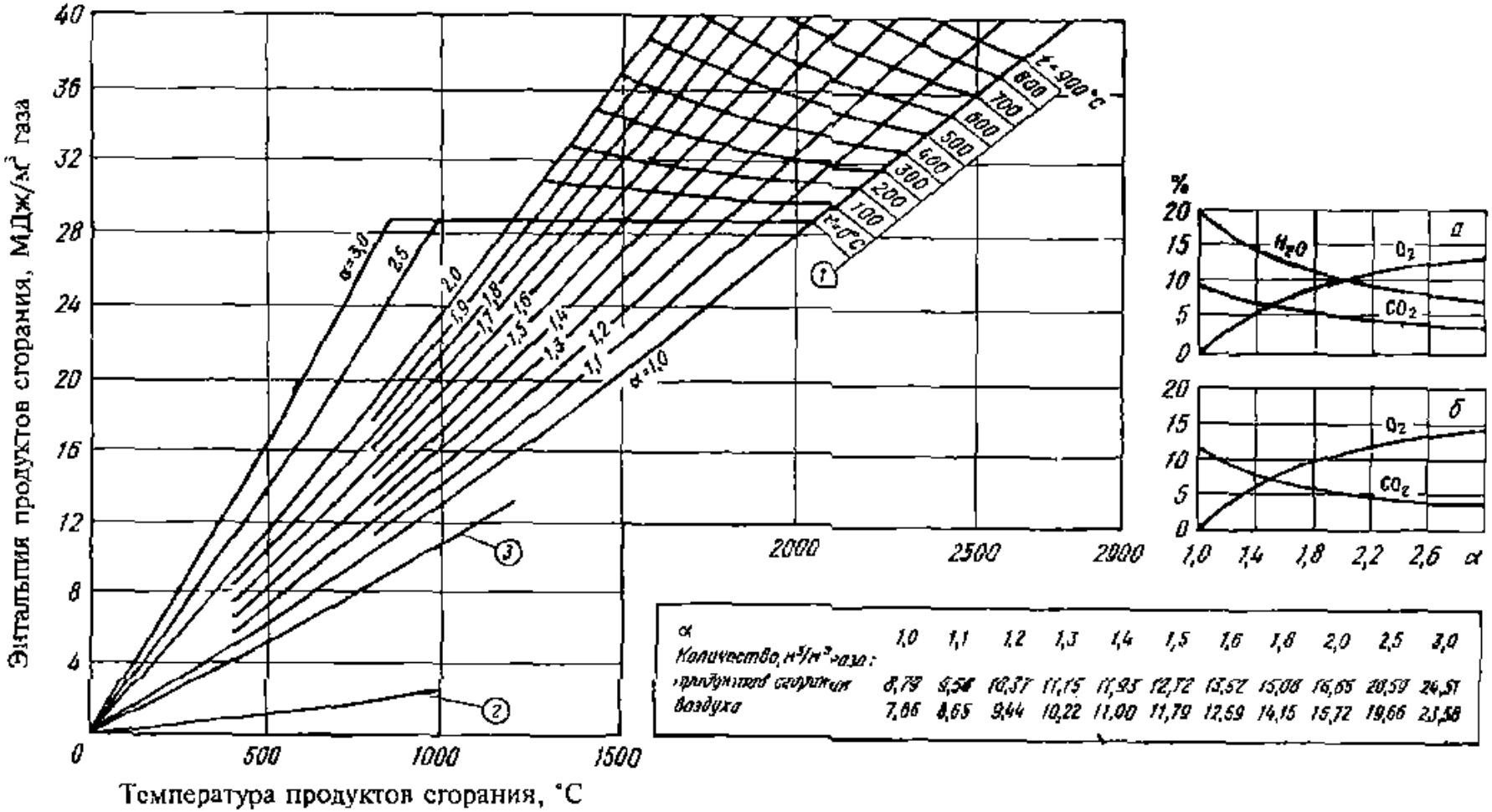


Рис. I-19. Расчет горения смеси природного и коксового газов состава, % (объемн):
CO_2 0,7; CO 1,9, H_2 13,5; CH_4 78,3; C_mH_n 0,5; O_2 0,5; N_2 4.0, H_2O 0,5. Плотность газа кг/м³: влажного 0,68; сухого 0,68
$Q_н^р$, МДж/м³: влажного 30,20; сухого 30,35.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,23 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1

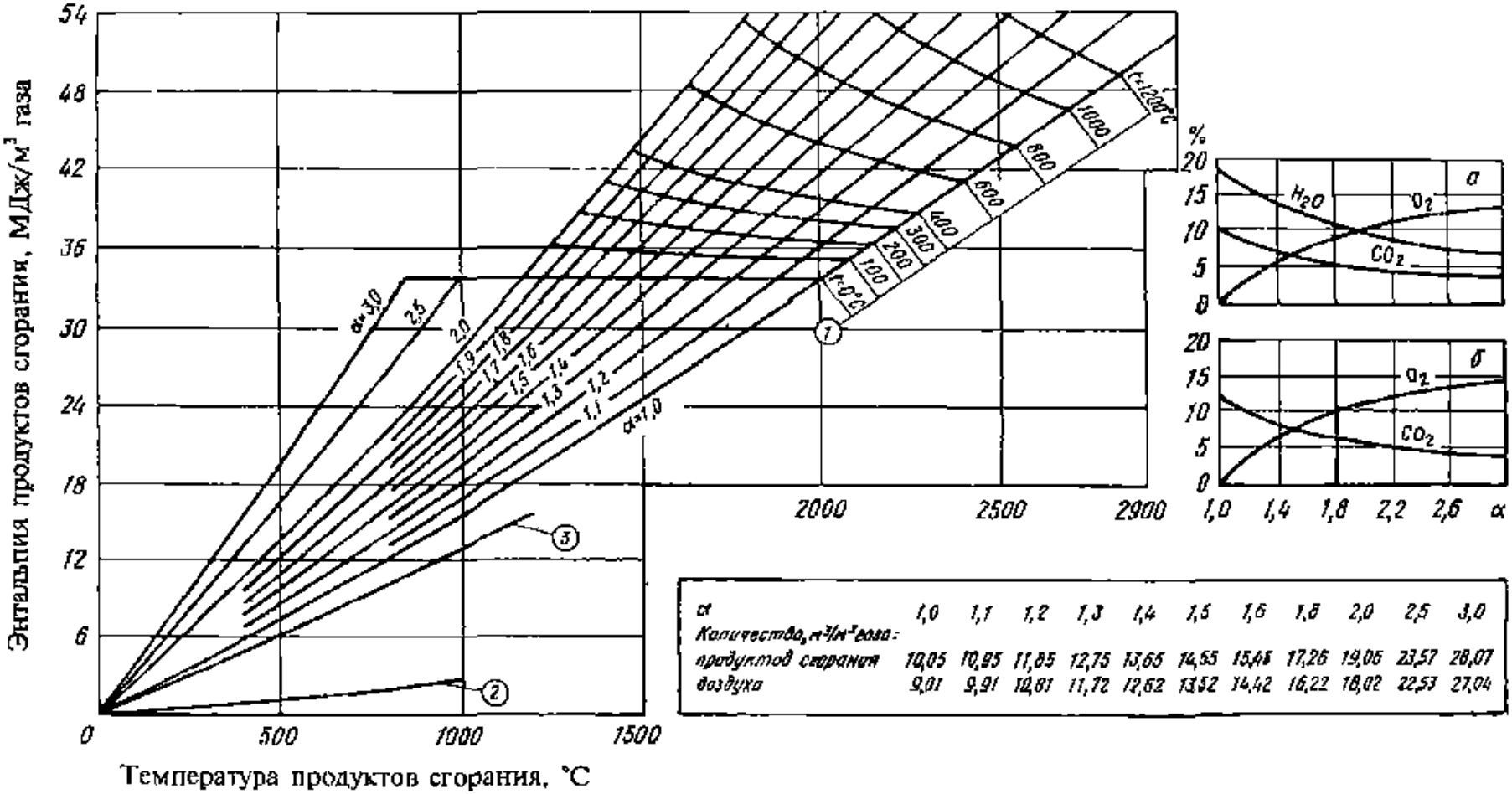
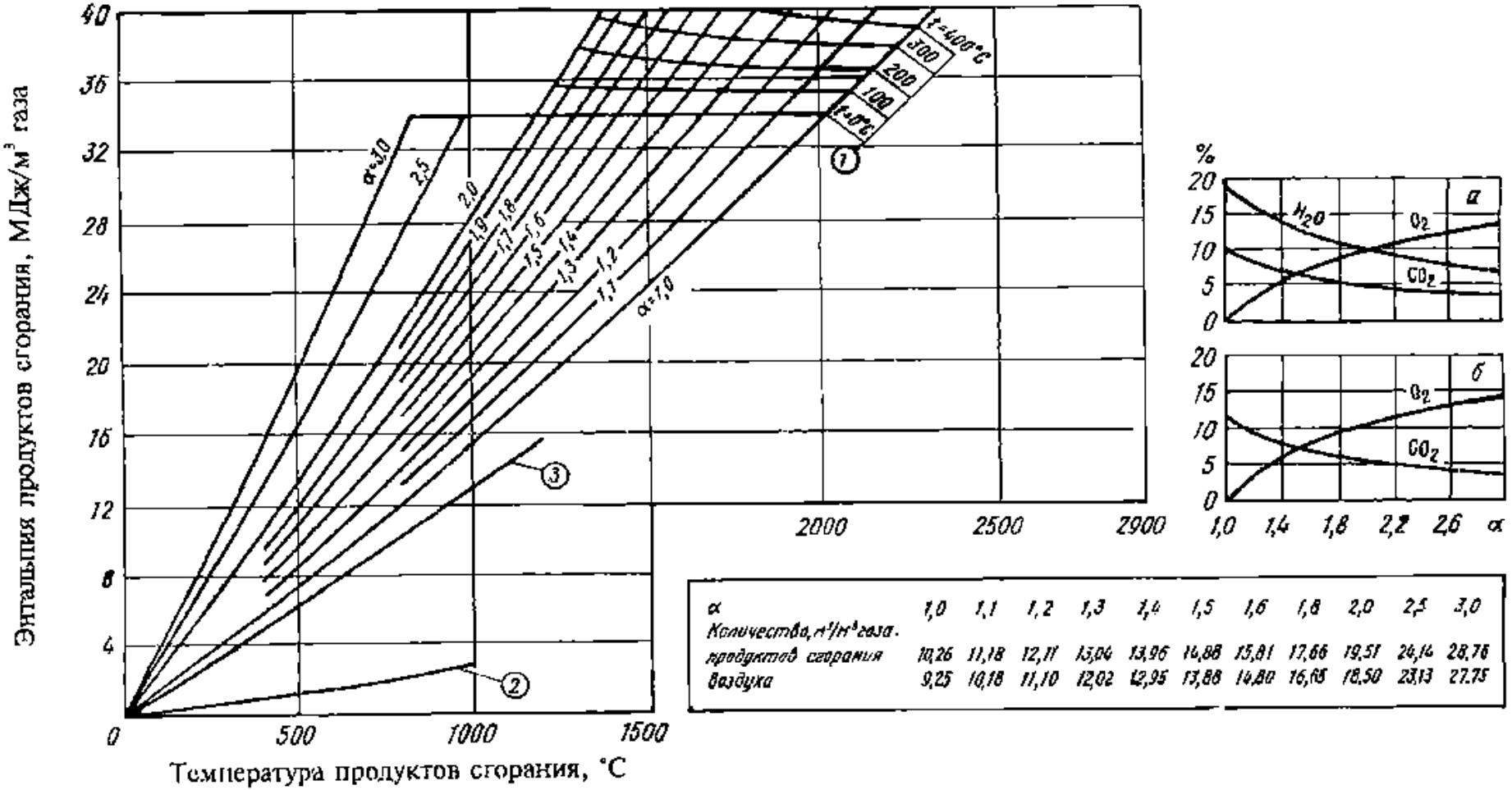
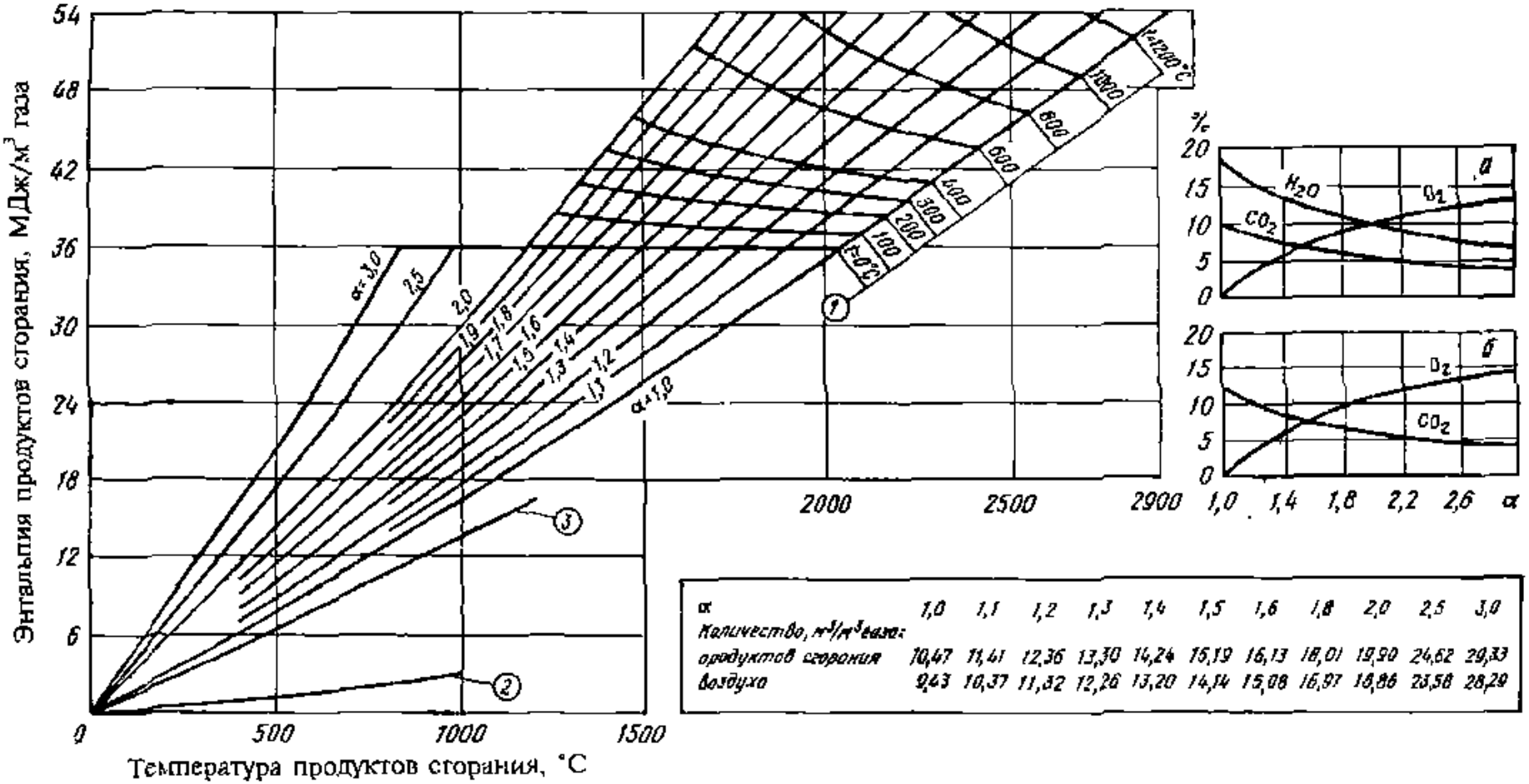


Рис. I-20 Расчет горения природного газа состава, % (объемн):
CO_2 0,05; C_2H_6 3,57; C_3H_6 0,99; CH_4 84,12 ;C_4H_{10} 0,50; N_2 9,92; H_2O 0,80, C_5H_{12} 0,05. Плотность газа кг/м³: влажного 0,82; сухого 0,82. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 34,0; сухого 34,25
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,24 кг/м³; состав, %:
а — влажных, *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



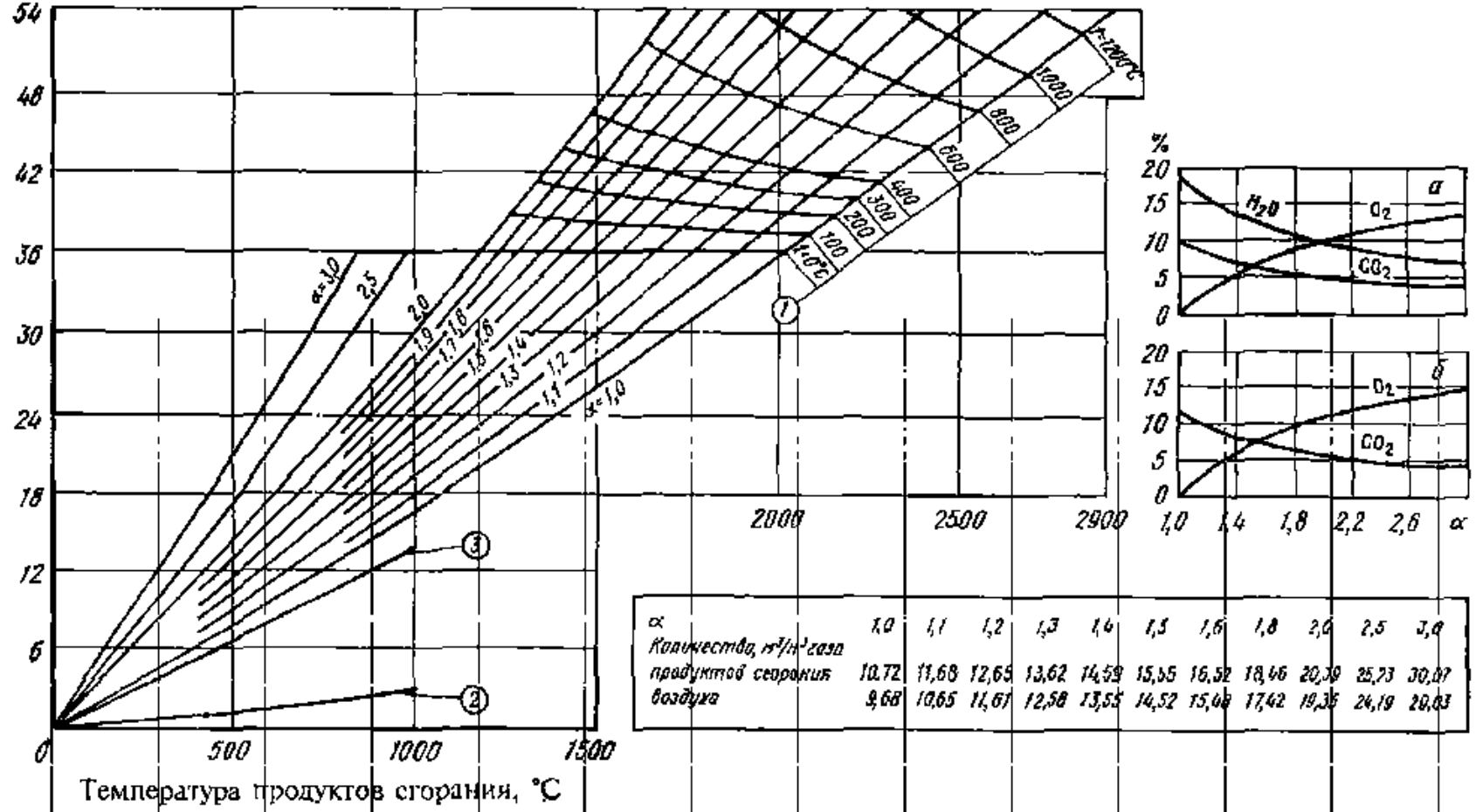
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	10,26	11,18	12,11	13,04	13,96	14,88	15,81	17,66	19,51	24,14	28,76
воздуха	9,25	10,18	11,10	12,02	12,95	13,88	14,80	16,65	18,50	23,13	27,75

Рис. I-21. Расчет горения природного газа состава, % (объемн):
CH_4 92,3; C_2H_6 0,7; C_4H_{10} 0,5; H_2O 0,5; N_2 5,3. Плотность газа кг/м³: влажного 0,77; сухого 0,77. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного газа 34,96; сухого 36,15.
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha = 1$) 1,23 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$



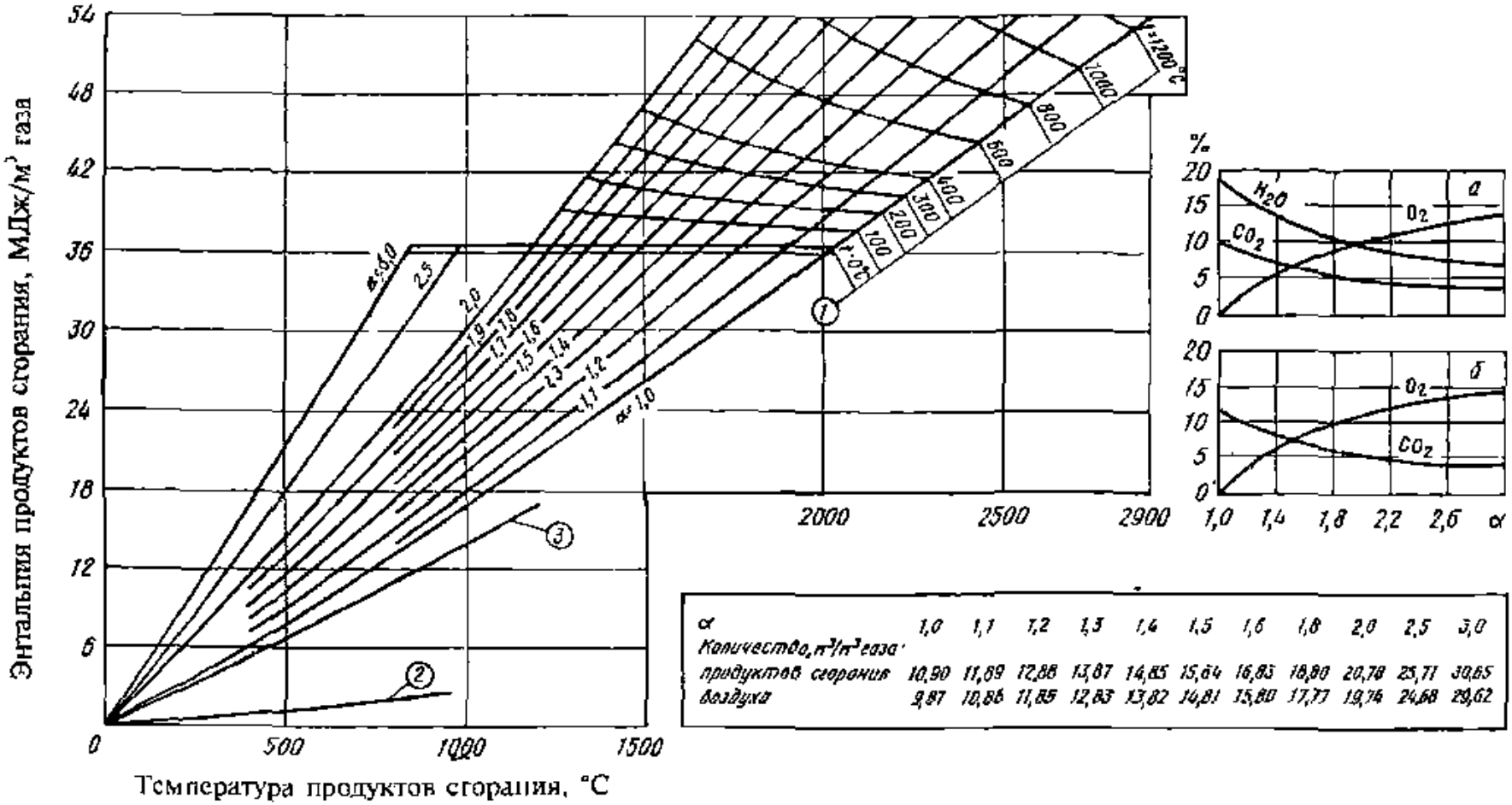
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	10,47	11,41	12,36	13,30	14,24	15,19	16,13	18,01	19,90	24,62	29,33
воздуха	9,43	10,37	11,32	12,26	13,20	14,14	15,08	16,97	18,86	23,58	28,29

Рис. 1-22. Расчет горения природного газа состава, % (объемн).
CO_2 4,39, CH_4 88,37; C_2H_6 2,72, C_3H_8 0,92; C_4H_{10} 0,74, O_5H_{12} 0,31; H_2O 0,50, N_2 2,05 Плотность газа кг/м³. влажного 0,83; сухого 0,83. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 35,60, сухого 35,75
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,24 кг/м³; состав, %:
а — влажных; б — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



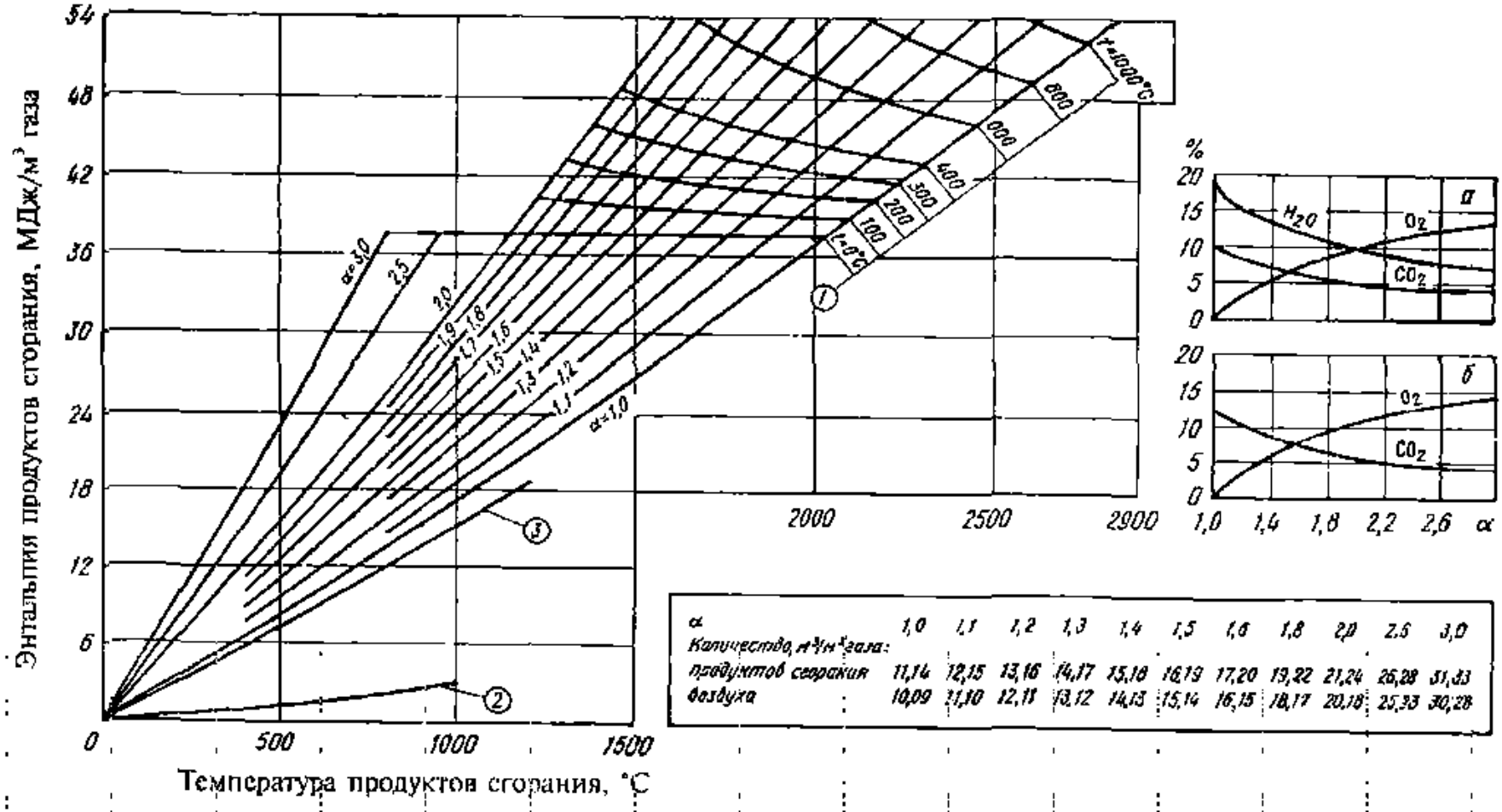
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа продуктов сгорания	10,72	11,68	12,65	13,62	14,59	15,55	16,52	18,46	20,39	25,23	30,07
воздуха	9,68	10,65	11,61	12,58	13,55	14,52	15,48	17,42	19,35	24,19	29,03

Рис. I-23. Расчет горения природного газа состава, % (объемн):
CO_2 0,07; CH_4 92,26; C_2H_6 2,98; C_3H_8 0,69; C_4H_{10} 0,47; C_5H_{12} 0,23; N_2 2,50; H_2O 0,80. Плотность газа кг/м³: влажного 0,78; сухого 0,78. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 36,47; сухого 36,80.
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha = 1$) 1,24 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	10,90	11,69	12,88	13,87	14,85	15,64	16,83	18,80	20,78	25,71	30,65
воздуха	9,87	10,86	11,85	12,83	13,82	14,81	15,80	17,77	19,74	24,68	29,62

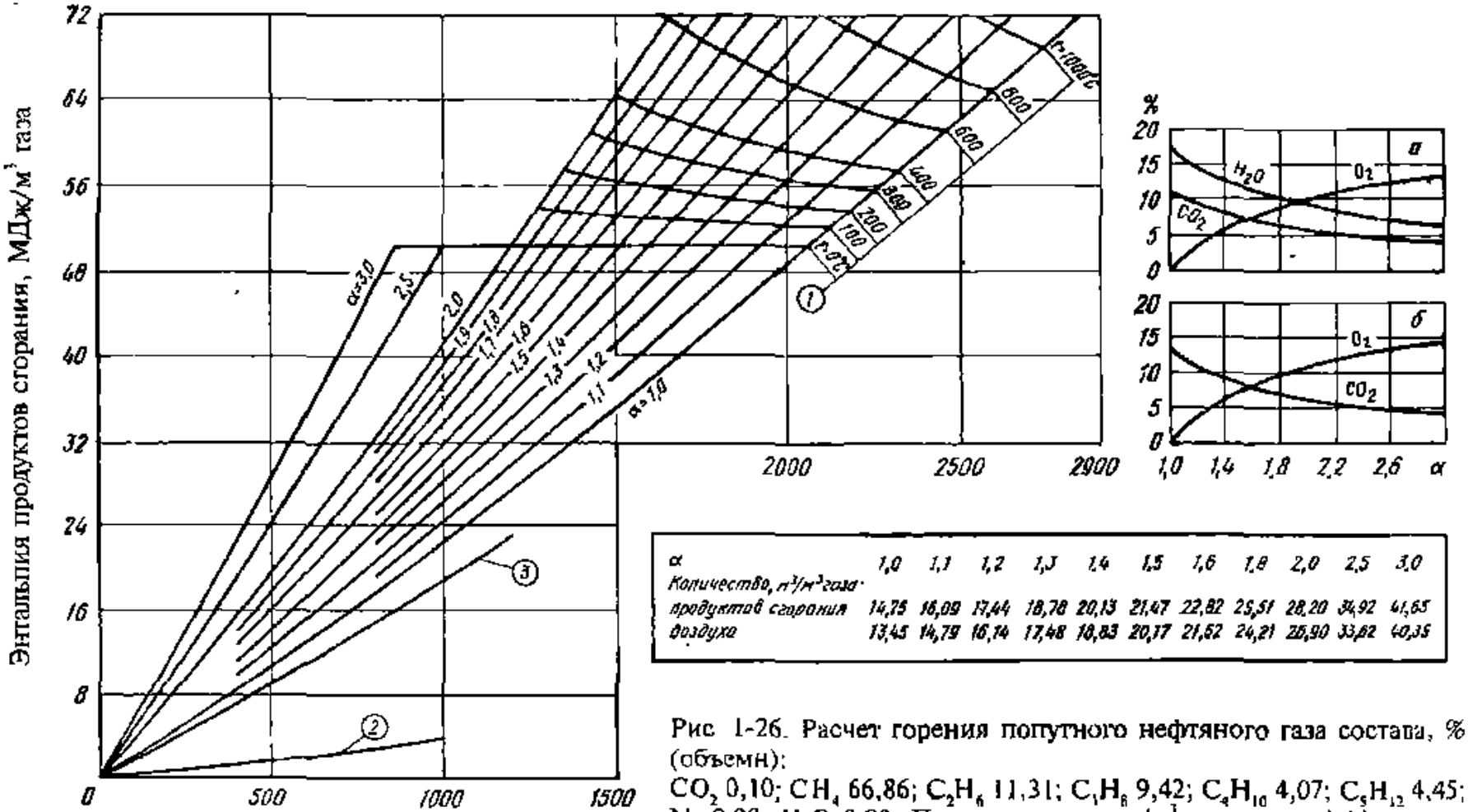
Рис. I-24. Расчет горения природного газа состава, % (объемн):
CO_2 0,12; CH_4 91,95; C_2H_6 3,87; C_3H_8 1,29; C_4H_{10} 0,40; C_5H_{12} 0,11; N_2 1,46, H_2O 0,80. Плотность газа кг/м³: влажного 0,78; сухого 0,78. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 37,22; сухого 37,51.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,24 кг/м³; состав, %:
а — влажных, *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	11,14	12,15	13,16	14,17	15,18	16,19	17,20	19,22	21,24	26,28	31,33
воздуха	10,09	11,10	12,11	13,12	14,13	15,14	16,15	18,17	20,18	25,23	30,28

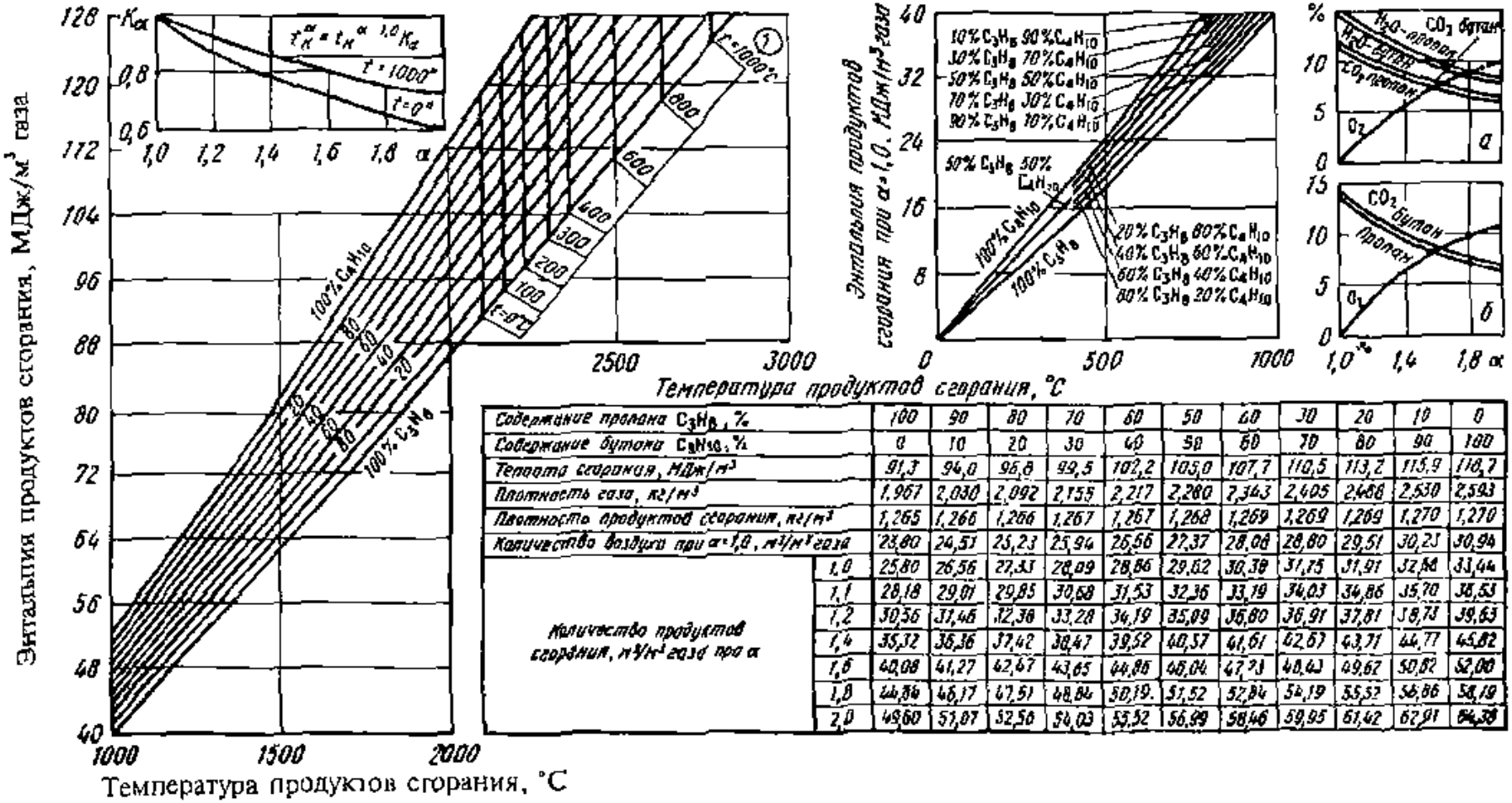
Рис. I-25. Расчет горения природного газа состава, % (объемн): CO, 0,60; CH_4 90,90; C_2H_6 5,00; C_3H_8 1,50; C_4H_{10} 0,74; C_5H_{12} 0,05; N_2 1,21. Плотность сухого газа 0,78 кг/м³. $Q_н^р$ сухого газа 39,10 МДж/м³.

Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,24 кг/м³, состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



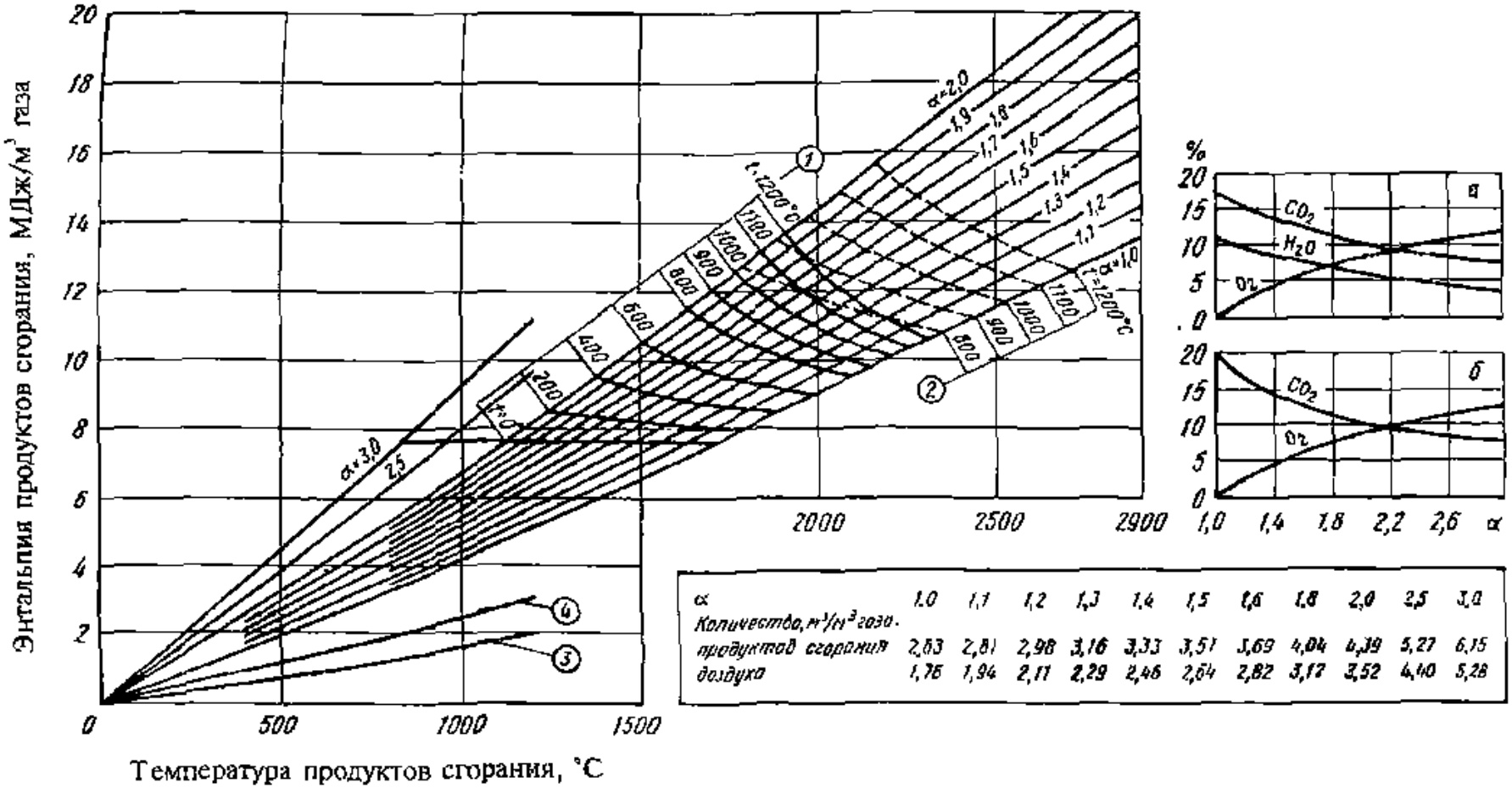
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	14,75	16,09	17,44	18,78	20,13	21,47	22,82	25,51	28,20	34,92	41,65
воздуха	13,45	14,79	16,14	17,48	18,83	20,17	21,52	24,21	26,90	33,62	40,35

Рис 1-26. Расчет горения попутного нефтяного газа состава, % (объемн):
CO_2 0,10; CH_4 66,86; C_2H_6 11,31; C_3H_8 9,42; C_4H_{10} 4,07; C_5H_{12} 4,45; N_2 2,98, H_2O 0,80. Плотность газа кг/м³: влажного 1,11, сухого 1,12 $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 51,12; сухого 51,54.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,25 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



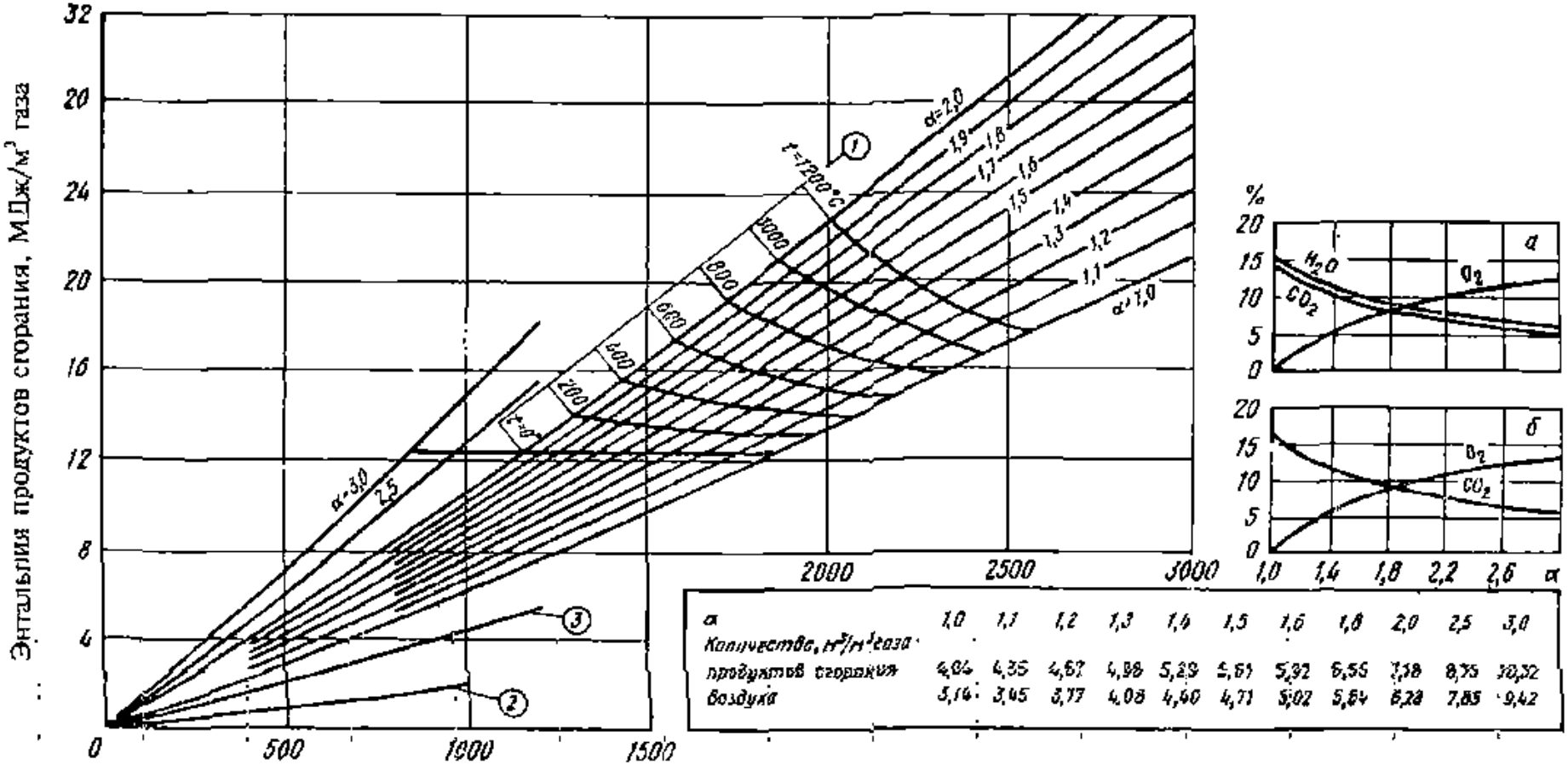
Содержание пропана C_3H_8, %	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Содержание бутана C_4H_{10}, %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Теплота сгорания, МДж/м³	91,3	94,0	96,8	99,5	102,2	105,0	107,7	110,5	113,2	115,9	118,7
Плотность газа, кг/м³	1,967	2,030	2,092	2,155	2,217	2,280	2,343	2,405	2,468	2,530	2,593
Плотность продуктов сгорания, кг/м³	1,265	1,266	1,266	1,267	1,267	1,268	1,269	1,269	1,269	1,270	1,270
Количество воздуха при α=1,0, м³/м³ газа	23,80	24,51	25,23	25,94	26,66	27,37	28,08	28,80	29,51	30,23	30,94
Количество продуктов сгорания, м³/м³ газа при α: 1,0	25,80	26,56	27,33	28,09	28,86	29,62	30,38	31,15	31,91	32,68	33,44
1,1	28,18	29,01	29,85	30,68	31,53	32,36	33,19	34,03	34,86	35,70	36,53
1,2	30,56	31,46	32,36	33,28	34,19	35,09	36,00	36,91	37,81	38,73	39,63
1,4	35,32	36,36	37,42	38,47	39,52	40,57	41,61	42,67	43,71	44,77	45,82
1,6	40,08	41,27	42,47	43,65	44,86	46,04	47,23	48,43	49,62	50,82	52,00
1,8	44,84	46,17	47,51	48,84	50,19	51,52	52,84	54,19	55,52	56,86	58,19
2,0	49,60	51,07	52,56	54,03	55,52	56,99	58,46	59,95	61,42	62,91	64,38

Рис 1-27 Расчет горения смеси пропан—бутан:
состав продуктов сгорания: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха



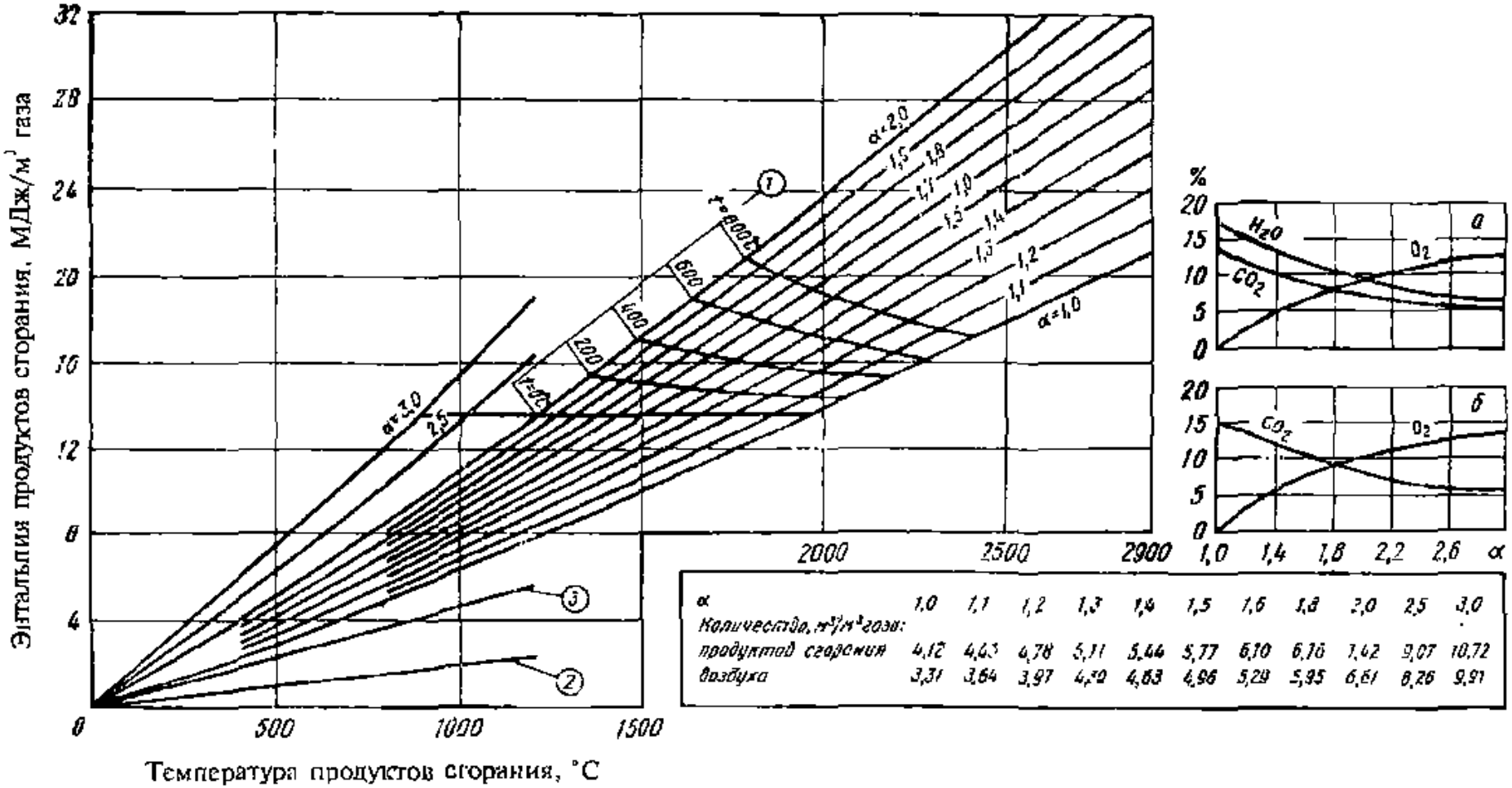
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	2,63	2,81	2,98	3,16	3,33	3,51	3,69	4,04	4,39	5,27	6,15
воздуха	1,76	1,94	2,11	2,29	2,46	2,64	2,82	3,17	3,52	4,40	5,28

Рис. I-28. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн):
CO_2 10,5; CO 23,3, CH_4 11,8; C_nH_n 0,2; N_2 50,0; H_2O 2,1. Плотность газа кг/м³: влажного 1,23; сухого 1,24. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 7,54; сухого 7,70.
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha = 1$) 1,33 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева воздуха и газа до одинаковой температуры; *3* — энтальпия 1 м³ газа; *4* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	4,04	4,35	4,67	4,98	5,29	5,61	5,92	6,55	7,18	8,75	10,32
воздуха	5,14	5,45	5,77	6,08	6,40	6,71	7,02	7,64	8,28	9,85	11,42

Рис. 1-29. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн):
CO_2 8,6, CO 9,1; H_2 1,7; CH_4 26,4; C_2H_6 0,2, C_3H_8 0,1; C_5H_{12} 0,1, N_2 41,9; H_2O 1,8 Плотность газа кг/м³: влажного 1,15; сухого 1,15. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 12,56; сухого 12,80.
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha = 1$) 1,28 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	4,12	4,43	4,78	5,11	5,44	5,77	6,10	6,76	7,42	9,07	10,72
воздуха	3,31	3,64	3,97	4,30	4,63	4,96	5,29	5,95	6,61	8,26	9,91

Рис. 1-30. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн):
CO_2 10,0; CO 19,7; CH_4 18,5; C_2H_6 1,3, C_3H_8 1,2; C_4H_{10} 0,2, O_2 0,1, N_2 25,4; H_2S 0,1; H_2O 2,0. Плотность газа кг/м³: влажного 0,98; сухого 0,98 $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 13,50; сухого 13,80.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,27 кг/м³ газа; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1

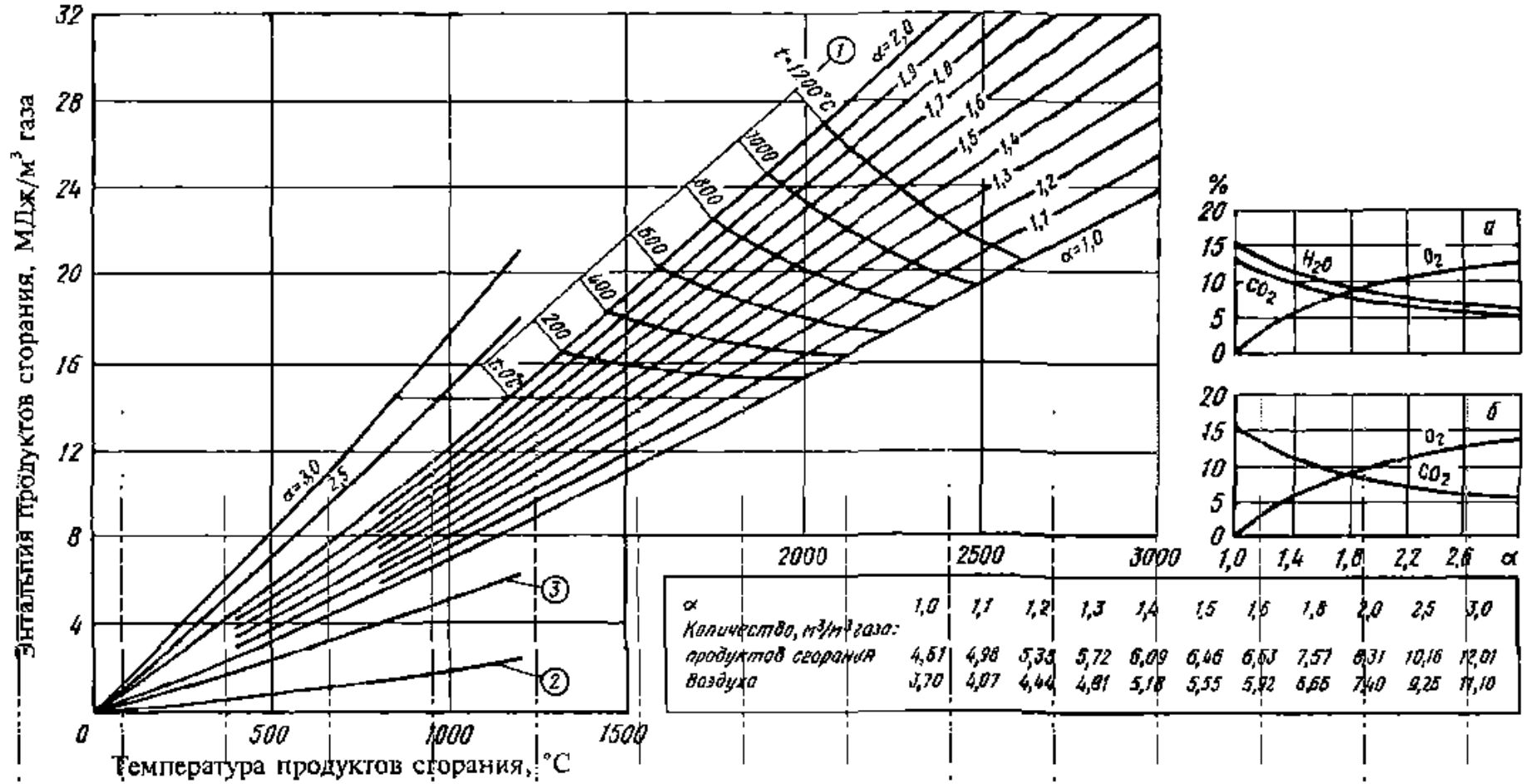
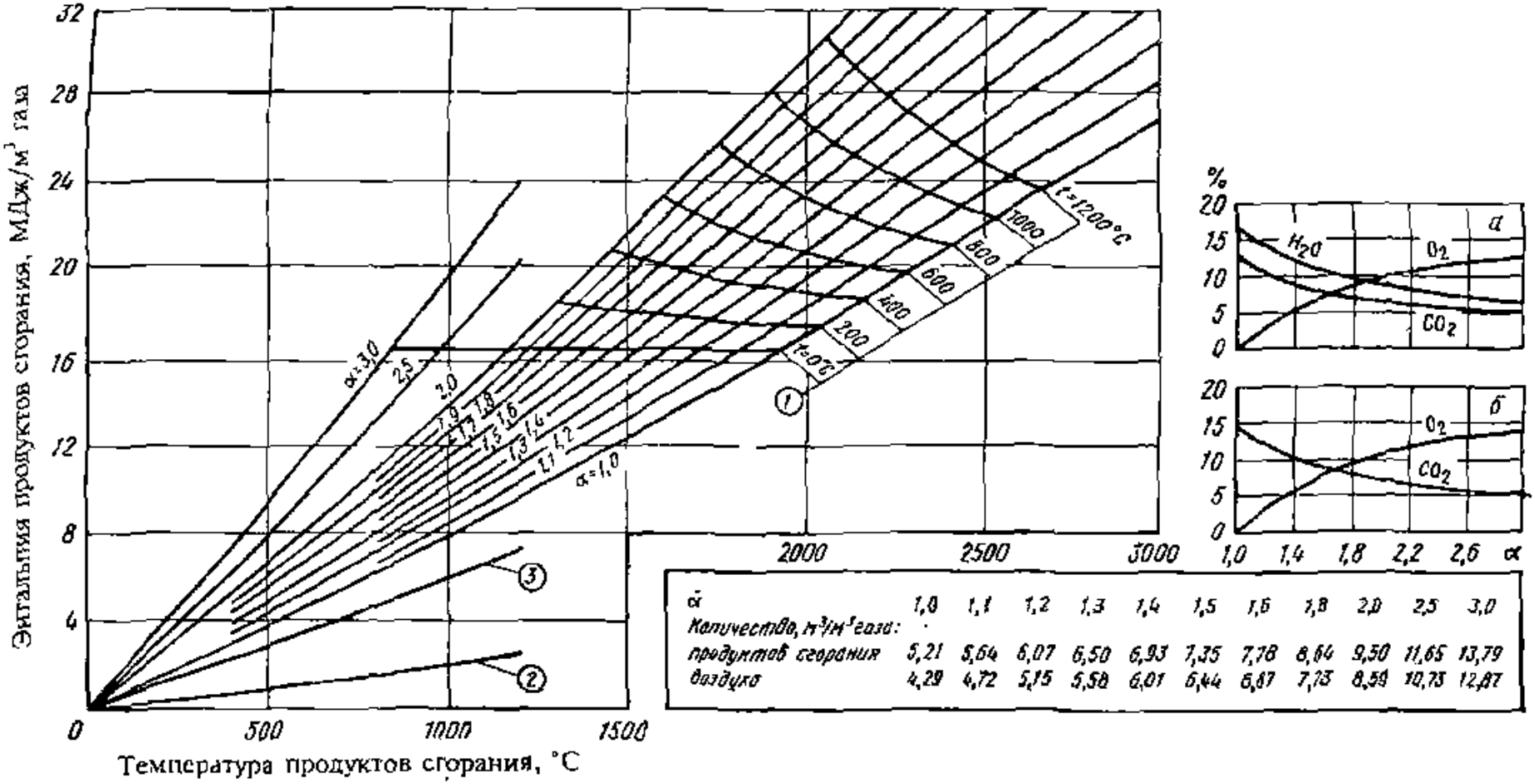
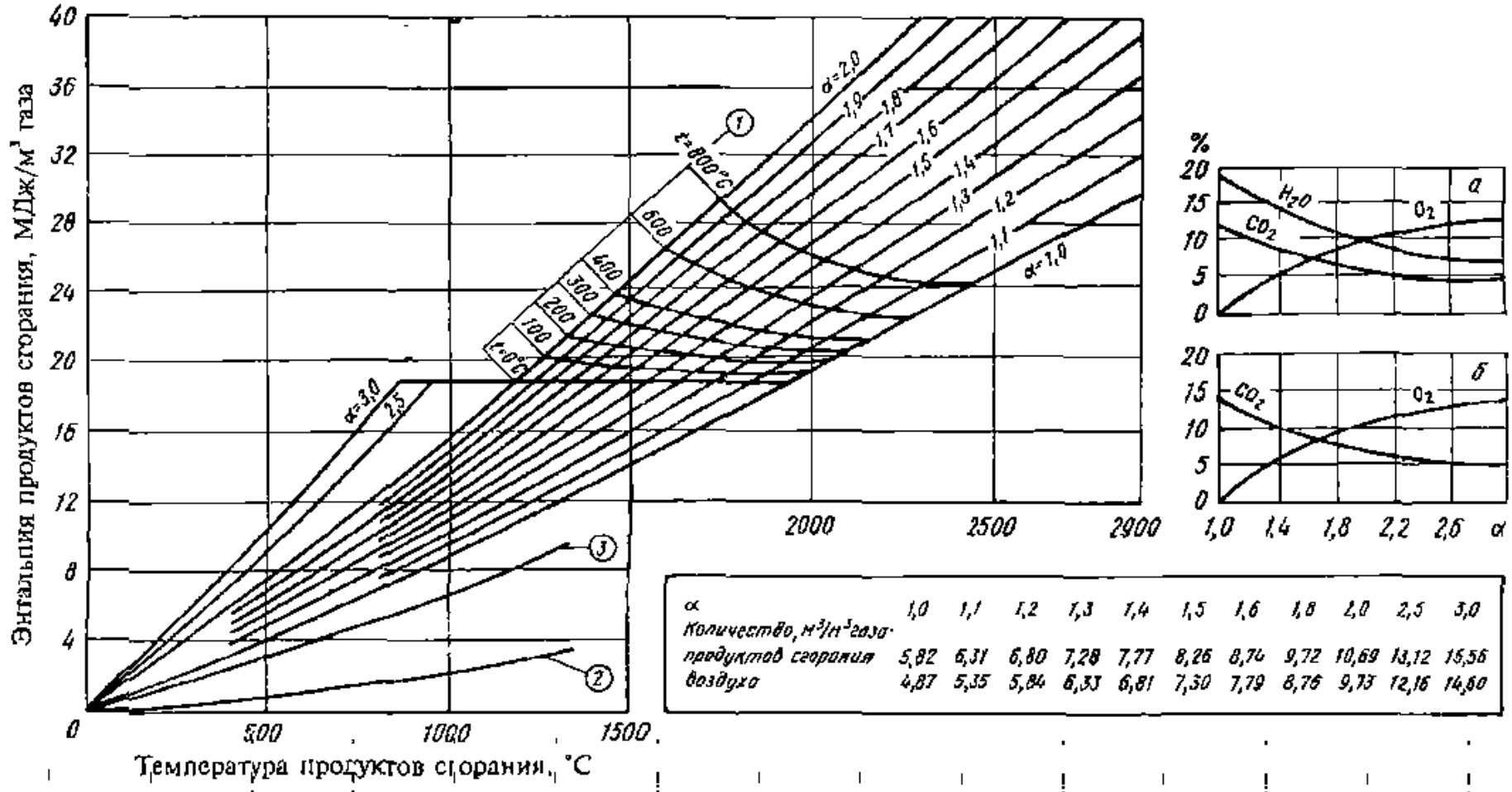


Рис. I-31. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн).
CO_2 7,8; CO 17,3; CH_4 32,5; C_2H_6 0,2; C_3H_8 0,8; C_4H_{10} 0,2; C_5H_{12} 0,1; N_2 38,5; H_2O 1,7. Плотность газа кг/м³: влажного 1,11; сухого 1,12; $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 14,65; сухого 15,00.
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha = 1$) 1,27 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$



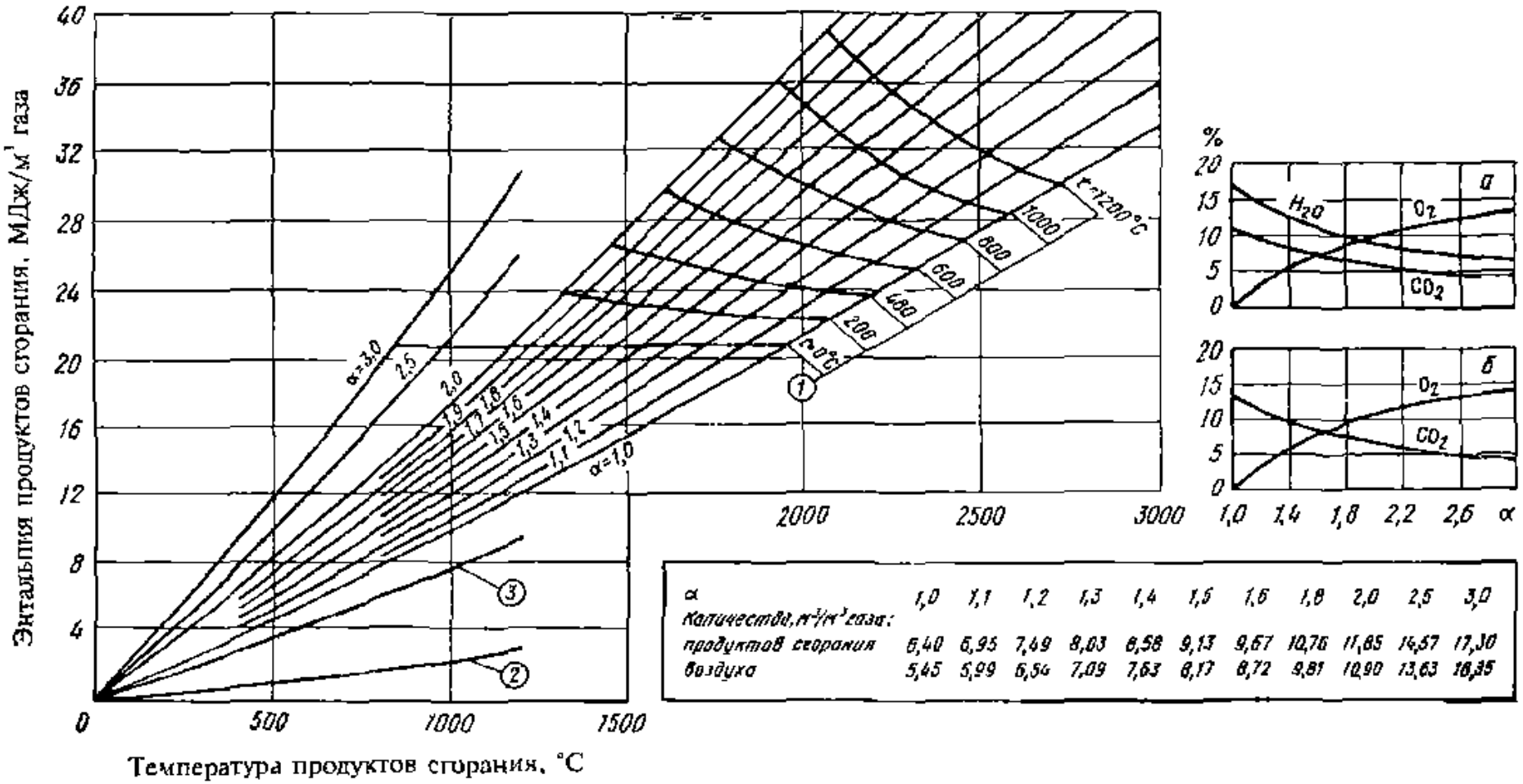
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	5,21	5,64	6,07	6,50	6,93	7,35	7,78	8,64	9,50	11,65	13,79
воздуха	4,29	4,72	5,15	5,58	6,01	6,44	6,87	7,73	8,59	10,75	12,87

Рис I-32. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн).
CO_2 7,0, CO 15,5, H_2 1,4; CH_4 38,8; C_2H_6 0,3; C_3H_8 0,2; C_4H_{10} 0,2; N_2 35,0; H_2O 1,5. Плотность газа кг/м³: влажного 1,07; сухого 1,08.
$Q_н^р$, МДж/м³: влажного газа 16,70; сухого 17,00.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,27 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



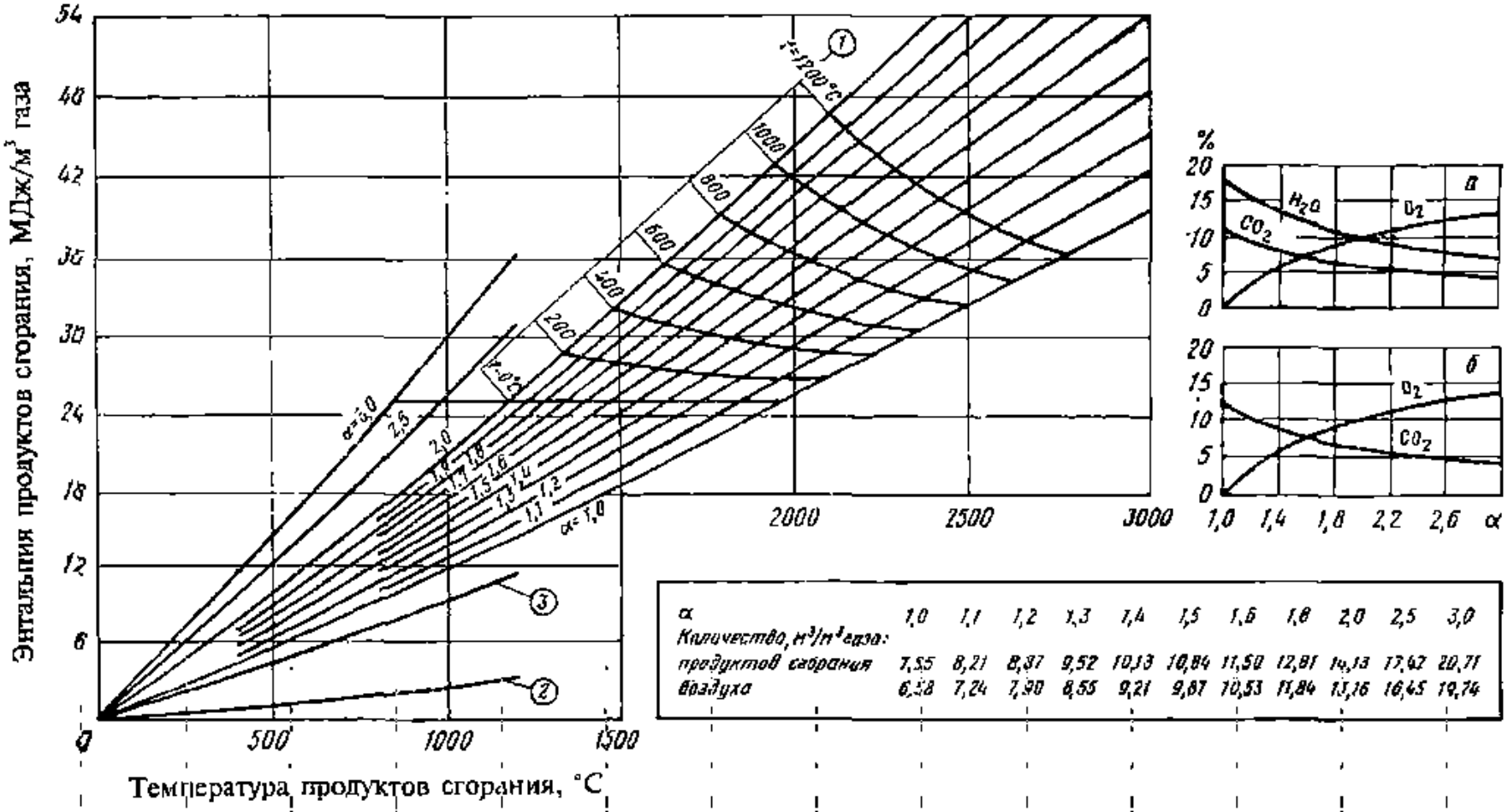
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	5,82	6,31	6,80	7,28	7,77	8,26	8,74	9,72	10,69	13,12	15,56
воздуха	4,87	5,35	5,84	6,33	6,81	7,30	7,79	8,76	9,73	12,16	14,60

Рис. 1-33. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн):
CO_2 6,03; CO 13,30; H_2 1,2; CH_4 42,21; C_2H_6 1,78; C_3H_8 0,49; C_4H_{10} 0,25; C_5H_{12} 0,03; N_2 33,16, H_2O 1,55. Плотность газа кг/м³: влажного 1,06; сухого 1,06. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного газа 18,80; сухого 19,20.
Продукты сгорания: плотности (при $\alpha = 1$) 1,26 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$



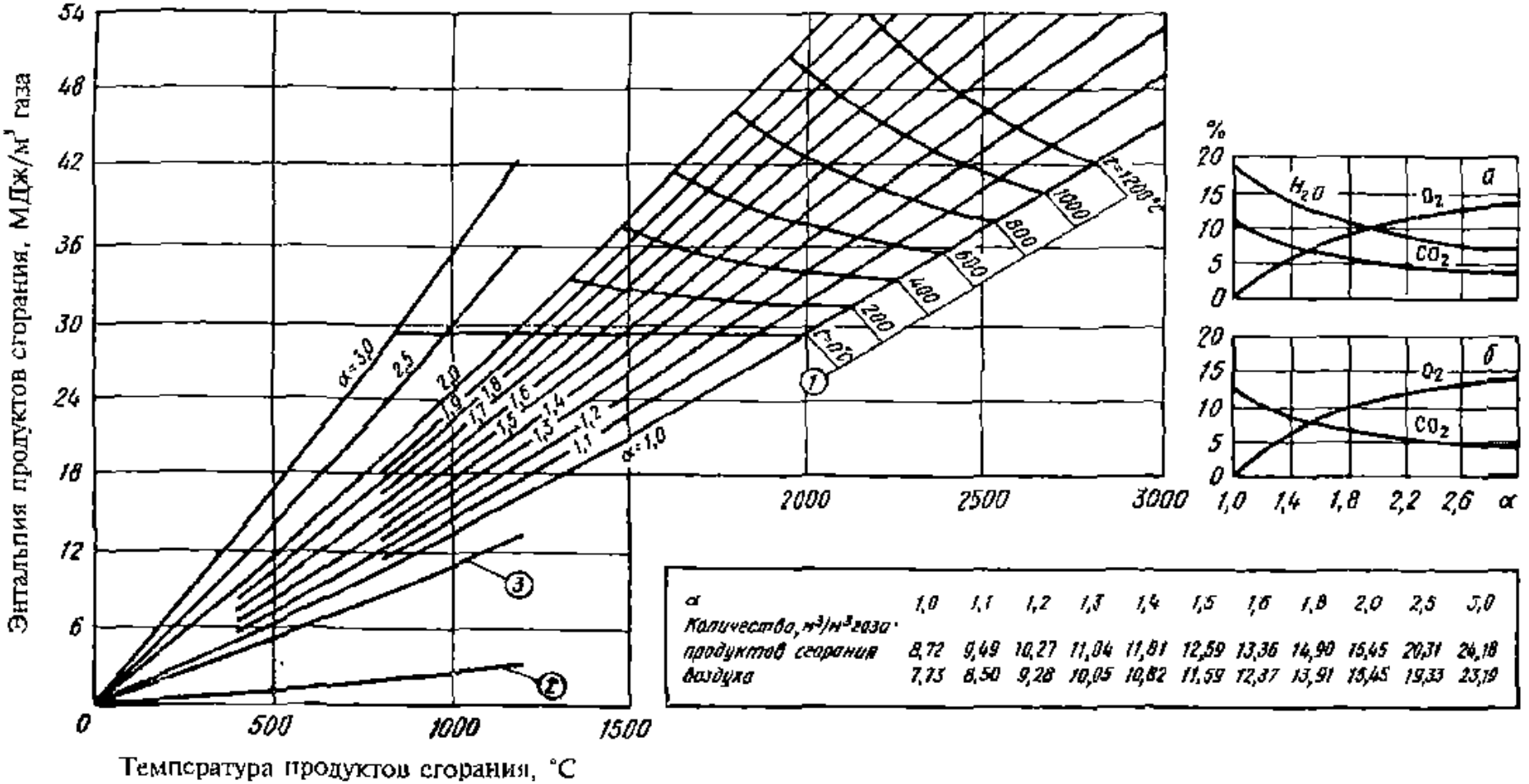
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	6,40	6,95	7,49	8,03	8,58	9,13	9,67	10,76	11,85	14,57	17,30
воздуха	5,45	5,99	6,54	7,09	7,63	8,17	8,72	9,81	10,90	13,63	16,35

Рис. 1-34. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн):
CO_2 5,3; CO 11,9; H_2 1,1; CH_4 51,2; C_2H_6 0,4; C_3H_8 0,8, C_4H_{10} 0,3; C_5H_{12} 0,1; N_2 28,1; H_2O 1,3. Плотность газа кг/м³: влажного 1,00; сухого 1,01. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного газа 21,00; сухого 21,30.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,25 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих, *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха, *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



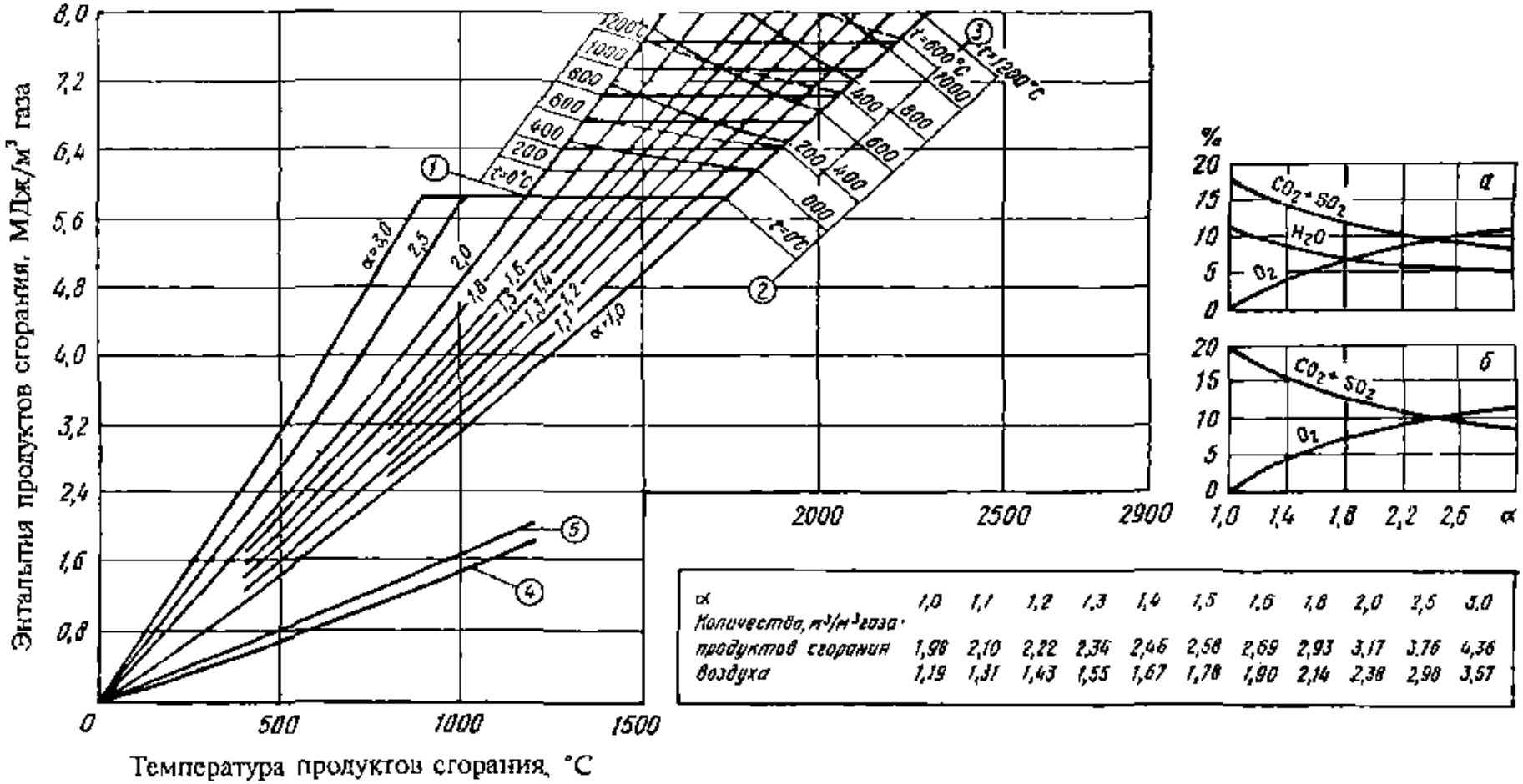
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	7,55	8,21	8,87	9,52	10,13	10,84	11,50	12,81	14,13	17,42	20,71
воздуха	6,58	7,24	7,90	8,55	9,21	9,87	10,53	11,84	13,16	16,45	19,74

Рис. 1-35. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн):
CO_2 3,8; CO 8,3; H_2 0,8; CH_4 63,5; C_2H_6 0,5; C_3H_8 0,3; C_4H_{10} 0,3; C_5H_{12} 0,1; N_2 21,3; H_2O 1,1. Плотность газа кг/м³: влажного 0,93; сухого 0,94. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 25,12; сухого 25,25.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,24 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



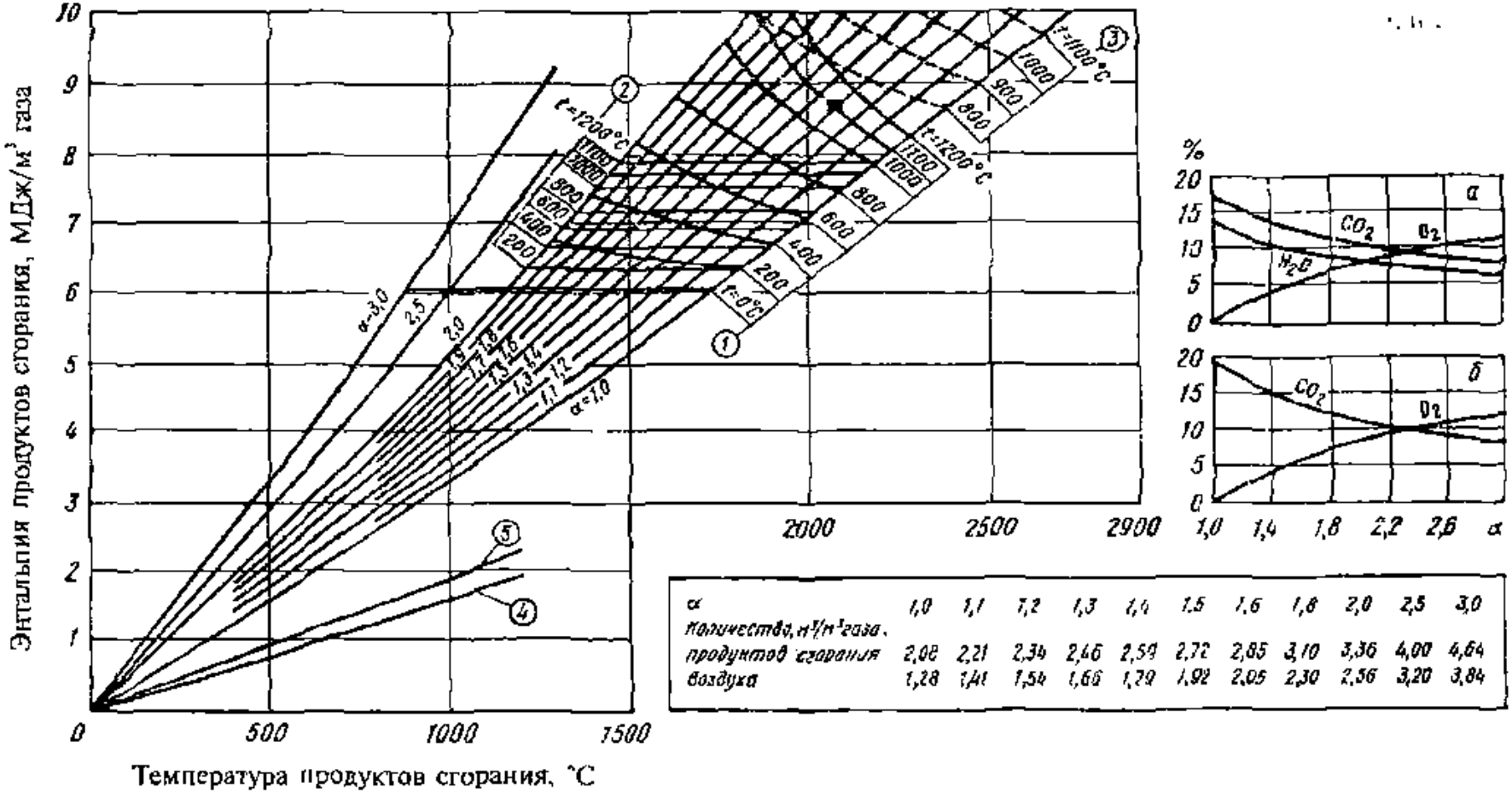
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	8,72	9,49	10,27	11,04	11,81	12,59	13,36	14,90	16,45	20,31	24,18
воздуха	7,73	8,50	9,28	10,05	10,82	11,59	12,37	13,91	15,45	19,33	23,19

Рис. I-36. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн):
CO_2 2,1; CO 4,7, H_2 0,4; CH_4 76,0; C_2H_6 0,6; C_3H_8 0,4; C_4H_{10} 0,4; C_5H_{12} 0,2; N_2 14,4; H_2O 0,8. Плотность газа кг/м³: влажного 0,86; сухого 0,85. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного газа 29,31, сухого 29,52.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1) 1,24 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха, *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1



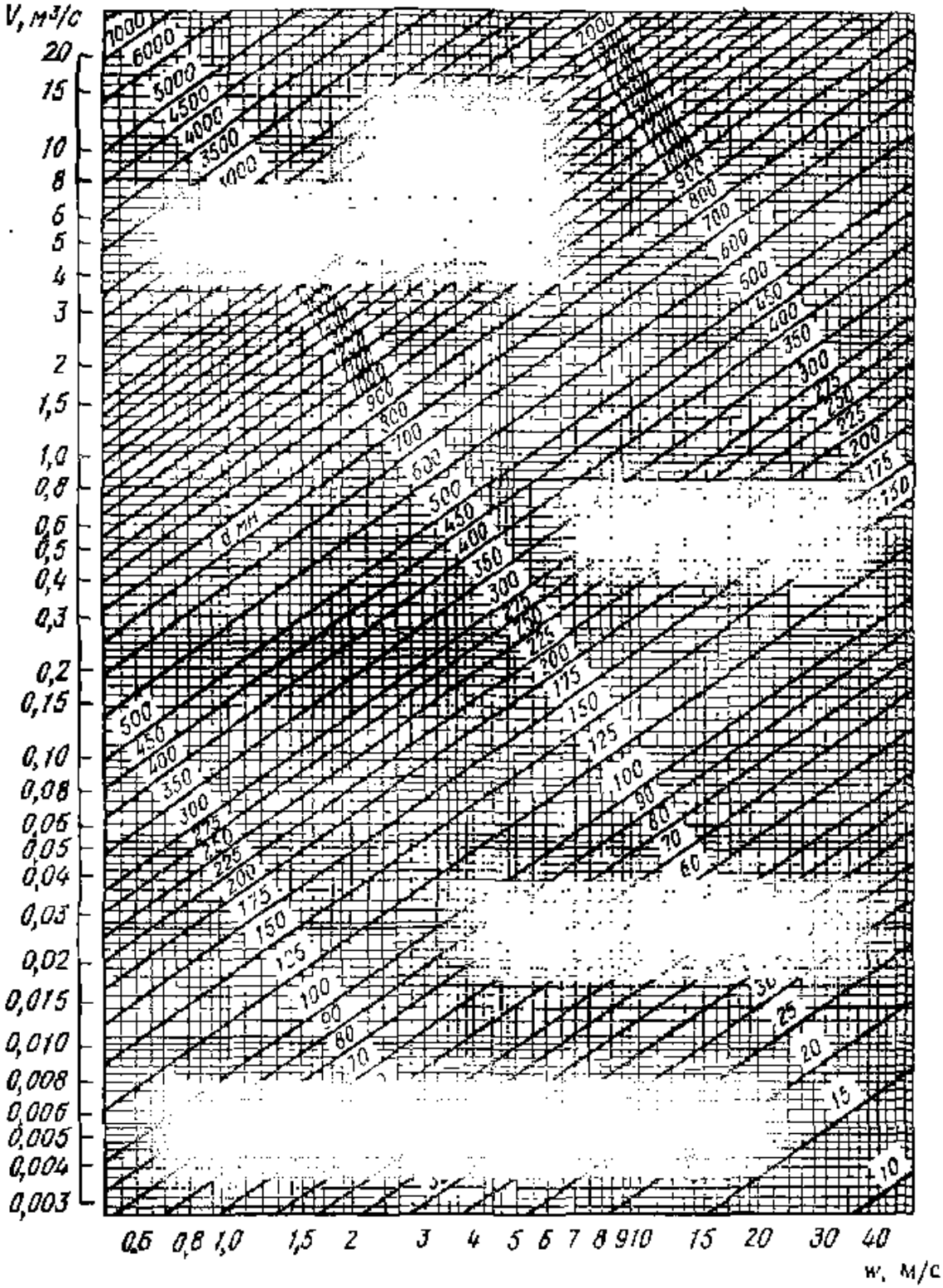
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	1,98	2,10	2,22	2,34	2,46	2,58	2,69	2,93	3,17	3,76	4,36
воздуха	1,19	1,31	1,43	1,55	1,67	1,78	1,90	2,14	2,38	2,98	3,57

Рис. I-37. Расчет горения генераторного газа состава, % (объемн).
CO_2 4,3; CO 28,3; H_2 12,9; CH_4 1,9; C_nH_m 0,2; O_2 0,2; H_2S 0,1, N_2 47,9, H_2O 4,2. Плотность газа кг/м³: влажного 1,10; сухого 1,12. $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 5,82; сухого 6,07.
Продукты сгорания: плотность (при α = 1)),33 кг/м³; состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева газа; *2* — то же, от подогрева воздуха, *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α = 1 (содержание во влажных продуктах сгорания SO_2 ≈ 0,02 % при α = 1)



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количества, м³/м³ газа, продуктов сгорания	2,08	2,21	2,34	2,46	2,59	2,72	2,85	3,10	3,36	4,00	4,64
воздуха	1,28	1,41	1,54	1,66	1,79	1,92	2,05	2,30	2,56	3,20	3,84

Рис. I-38. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн).
CO_2 8,5, CO 23,1; H_2 16,8; CH_4 2,9; C_mH_n 0,4; O_2 0,2; N_2 43,8; H_2O 4,2. Плотность газа кг/м³: влажного 1,03; сухого 1,10 Q_i^p, МДж/м³: влажного 6,07; сухого 6,32
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha = 1$) 1,32 кг/м³, состав, %:
а — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha = 1$



Зависимость между количеством пропускаемого газа V, скоростью газа w и диаметром трубопровода d

ПЕРЕЧЕНЬ

органов по сертификации (ОС) продукции и испытательных лабораторий (ИЛ), аккредитованных в области газоиспользующего оборудования* по состоянию на 01.07.1998 г.

1. ОС бытовых аппаратов и технологического оборудования, работающего на газообразном, жидком и твердом видах топлива АНО «ЦС ВНИИНМАШ»
123007, Москва, ул. Щеногина, 4 Тел.: (095) 256-04-49.

2. ОС отопительного оборудования фирма «Санрос» — предприятие общественного международного объединения «Советская ассоциация качества».
127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. Тел.: (095) 482-44-01.

3. ИЛ «Тест-С.-Петербург» — Центр испытательный и сертификации.
108103, С.-Петербург, ул. Курляндская, 1. Тел.: (812) 251-39-50.

4. Уральский ИЦ промышленных горелочных устройств.
620137, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 16. Тел./факс: (3432) 497-476/742-330.

5. ИЦ горелочных устройств и газоиспользующего оборудования Каменского опытного завода АО «Промгаз».
346300, Каменск-Шахтинский, Ростовской области. Тел.: (86363) 53-724.

6. Московский ИЦ горелочных устройств АО ВТИ и ВНИИпромгаз ДАО «Промгаз».
109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23. Тел.: (095) 275-24-23.

7. ИЦ энергетического оборудования АО «Фирма ОРГРЭС».
105023, Москва, Семеновский пер., 15. Тел.: (095) 369-05-71

---

* Справочник. Система сертификации ГОСТ Р. Органы по сертификации и испытательные центры. — М.. «Стандарты и качество», 1998 г.

ПЕРЕВОДНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ В МЕЖДУНАРОДНУЮ СИСТЕМУ ЕДИНИЦ

Количество тепла	1 ккал = 4,187 кДж
Тепловая мощность, теплопроизводительность	1 ккал/ч = 1,163 Вт
Энтальпия (теплосодержание), удельный расход тепла, теплота сгорания топлива	1 ккал/м^3 *или* ккал/кг = = 4,187 кДж/м^3 *или* кДж/кг
Плотность теплового потока, удельный тепловой поток	1 ккал/м^2 · ч = 1,163 Вт/м^2
Теплоемкость	1 ккал/м^3 · град *или* ккал/кг · град = = 4,187 кДж/м^3 · К *или* кДж/кг · К
Теплопроводность, коэффициент теплопроводности	1 ккал/м · ч · град = = 1,163 Вт/м · К
Коэффициент теплопередачи (теплоотдачи)	1 ккал/м^2 · ч · град *или* ккал/м^2 · ч · град^4 = = 1,163 Вт/м^2 · К *или* Вт/м^2 · К^4
Давление	1 мм вод. ст. = 9,8 Па 1 атм = 101,4 Па

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Глава 1.

1. Доменные воздухонагреватели / *Ф. Р.Шкляр, В. М. Малкин, С. П. Каштанова и др.* — М.. Металлургия, 1982. — 176 с.

2. *Винтовкин А. А., Удилов В. М.* Горелочные устройства обжиговых агрегатов металлургического производства. — Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1991 — 334 с

Глава 2.

1. Горелки на газообразном и жидком топливе. Термины и определения. ГОСТ 17356—89.

2. Газодинамика. Буквенные обозначения основных величин. ГОСТ 23199—78.

3 Горелки газовые промышленные. Классификация. Общие технические требования, маркировка и хранение. ГОСТ 21204—97.

4. Горелки промышленные на жидком топливе. Общие технические требования. ГОСТ 27824—88.

5. Горелки блочные. Технические требования. ГОСТ 25800—83

6. Форсунки механические и паромеханические Общие технические требования. ГОСТ 23689—79.

Глава 3.

1 *Арсеева Н. В., Арсеев Д. В., Китаев Б. И.* Исследование свободных затопленных струй Сб Теория и практика сжигания газа. Вып. 3. — Л : Недра 1969. С. 56—69

2. *Шакиров К Ш., Эшкабилов Х Б.* Инжектирующая способность струи газа. Реф. сборник, Л 12, Использование газа в народном хозяйстве. ВНИИЭгазпром, — М.: 1974.

3. *Ахмедов Р. Б.* Дутьевые горелочные устройства. — М.: Недра, 1970. — 172 с.

4. *Арсеева Н. В. Арсеев А. В., Китаев Б. И* Исследование закономерностей строения горящей свободной струи газа. Сб. Теория и практика сжигания газа. Вып. 3. — Л.: Недра. 1969. С. 84—103

5. Исследование факела природного газа применительно к условиям стеклоплавильных печей / *В. Г. Лисиенко, Г. В. Воронов, Б И. Китаев, Н И. Какарев* — М.: 1970. (Одиннадцатый международный газовой конгресс Москва. 1970, NIGU. E. 24—70.

6. *Воронов Г В.* Исследование высокоскоростного турбулентного факела природного газа Березовско-Игримского месторождения, Диссертация на соискание уч. степени канд. техн. наук. — Свердловск.: 1970.

7. *Лисиенко В Г., Бондаренко В. В, Воронов Г В., Китаев Б. И. и др.* Исследование эжекционной способности смесителей, частично ограничивающих струю и факел. // Теория и практика сжигания газа. Вып 5. — Л.. Недра. 1972. С. 56—59.

8. *Монастырев А. В., Александров А. В.* Печи для производства извести. Справочник, — М.: Металлургия, 1979, — 232 с.

Глава 4.

1. *Арсеев А В и др.* Работа горелки ДВБ-250 на природном газе Использование газа в народном хозяйстве. Реф. сб ВНИИЭгазпрома. 1972. № 6. С. 13—17.

2. *Арсеев А. В. и др.* Опытные характеристики работы промышленных горелок. // Теория и практика сжигания газа. — Л : Недра, 1972. С. 191—211
3. *Арсеев А., В. и др.* Влияние на характеристики работы горелок степени стеснения и охлаждения факела и размеров газосжигающих устройств. // Теория и практика сжигания газа — Л : Недра, 1972. С. 211—223
4. *Винтовкин А. А., Арсеев А. В.* Стабилизация факела при сжигании природного газа в длиннопламенных горелках. Реф сб Использование газа в народном хозяйстве. Вып 1 — М. ВНИИЭГазпром, 1975. С. 3-8.
5. *Винтовкин А.А., Удилов В. М.* Горелочные устройства обжиговых агрегатов металлургического производства. — Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение, 1991. — 336 с

Глава 5.

1. Доменные воздухонагреватели (конструкции, теория, режимы работы)/*Ф. Р. Шкляр, В. М. Малкин, С. П. Каштанова и др.* — М.: Металлургия, 1982. — 176 с,
2. *Арсеев А. В* и др. Инжекционные и короткофакельные горелки для сжигания природного газа Научно-технический обзор (серия Использование газа в народном хозяйстве) ВНИИЭгазпром, 1973. — С. 34.
3. *Спиридонов Ю. А* Математическое моделирование процессов при поперечных струйных течениях. Сб Интенсификация тепло- и электроэнергетических процессов. 1995. С 38—46.
4. *Спиридонов Ю. А.* Экономичность, экология и стабильность характеристик в перспективных энергетических технологиях. Материалы докладов Международного конгресса «Развитие мониторинга и оздоровление окружающей среды». 1995. С. 115—121.
5. *Спиридонов Ю. А., Спиридонов А. Ю., Спиридонов М Ю.* (КФМЭИ), *Гуляев М. Н.* (ФПК «Энергорос»), *Кафпатуллин Р. А.* (КПЭО, РПО «Таткоммунэнерго»), *Трофимов А. М , Андреев И. С , Розенгауз Б. М.* (АО НПО ЦКТИ) Типоразмерный ряд горелок «КМАС» серия «С»; проблемы, перспективы. Материалы докладов конференции «Основные направления развития тепло- и электроэнергетики». 1995. С. 79—87.
6. *Спиридонов Ю А., Спиридонов А. Ю., Спиридонов М. Ю* (КФМЭИ), *Сотников В. Г.* (ТОО «Луас»), *Тугов А. Н.* (АО ВТИ). Огнетехнические устройства «ЮМАС», новые технологии. Материалы докладов конференции «Проблемы энергетики» 1996. С. 105—111

Глава 6.

1. *Арсеев А. В. и др.* Горелки длиннопламенные и с регулируемой длиной факела для природного газа / Научно-технический обзор. (Серия: Использование газа в народном хозяйстве) / ВНИИЭгазпром. 1973 — 40 с.
2. *Михеев В. П и др.* Газовая горелка с регулируемой геометрией факела В сб. Теория и практика сжигания газа Вып. 4. — Л.: Недра, 1968.
3. *Винтовкин А. А., Удилов В. М.* Горелочные устройства обжиговых агрегатов металлургического производства. — Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение. 1991. — 336 с.

Глава 7.

1. *Арсеев А В и др.* Инжекционные и короткофакельные горелки для сжигания природного газа. Научно-технический обзор. (Серия: Использование газа в народном хозяйстве) / ВНИИЭгазпром. 1973. — 34 с.
2. *Пестряев А. С., Каратаев В. Л., Дружинин Г. М и др* Отработка горелочных блоков для камер нагрева цинковальных агрегатов // Сталь 1980. № 3. С. 253—255.

Глава 8.

1. *Лисиенко В. Г., Китаев Б. И., Кокорев Н. И., Каничев А. Г.* Усовершенствование методов сжигания мазута в мартеновских печах. — М.: Металлургия, 1967. — 246 с
2. *Удилов В. М., Хорошавцев В. В., Лаптева Л. В.* К методике расчета и конструирования эмульсионных форсунок ВНИИМТ // Промышленная энергетика. 1981. № 1. С. 41—44.
3. *Рудаков Я. Д., Гапоненко А. М., Рудаков Г. Я.* Расчет акустических форсунок. Реф. сб. Использование газа в народном хозяйстве. Газовое оборудование и аппаратура. Вып. 6. 1974. С. 15—18
4. *Борисов Ю. Я.* Газоструйные излучатели звука гартмановского типа. // Источники мощного ультразвука. —М.: Наука, 1967. С. 9—110

Глава 9.

1. *Винтовкин А. А., Удилов В. М.* Горелочные устройства обжиговых агрегатов металлургического производства. — Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1991. — 336 с.
2. *Шуркин Е. Н.* Комбинированная акустическая горелка с обращенным соплом. Теория и практика сжигания газа. Вып. VII. —Л.: Недра, 1981. С. 246—252.
3. *Баженов Л. Н., Стрижов Т. Ф., Бакшиева М. Я., Ананьин Е. Н.* Применение природного газа для отопления отражательных печей. Теплофизика и теплотехника в металлургии. Сб. научн. трудов ВНИИМТ. № 9. 1969. С. 291—298.

Глава 14.

1. Горелки газовые промышленные. Методы испытаний. ГОСТ 29134—91.
2. Горелки промышленные на жидком топливе. Методы испытаний ГОСТ 28091—89.
3. Оборудование промышленное газоиспользующее. Воздухонагреватели. ГОСТ Р 50670—94.
4. Горелки газовые инфракрасного излучения. Общие технические требования и приемка. ГОСТ 25696—83.
5. Автоматика зажигания и контроля горения горелок инфракрасного излучения. ГОСТ 21309—75.
6. Горелки промышленные для высокотемпературных плавильных печей. Рабочая методика испытаний. — Свердловск: ВНИИМТ, 1985.
7. *Маслов В. И., Винтовкин А. А., Дружинин Г. М.* Рациональное сжигание газообразного топлива в металлургических агрегатах. — М.: Металлургия, 1987. —112 с.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Винтовкин
Анатолий Александрович

1939 года рождения, заведующий лабораторией сжигания жидкого топлива ВНИИМТ, главный инженер научно-производственной фирмы «Горелочный центр», кандидат технических наук.

Окончил Уральский политехнический институт. С 1967 года и по настоящее время работает в научно-исследовательском институте металлургической теплотехники (ВНИИМТ г. Екатеринбург), в котором последние 17 лет руководит лабораторией сжигания жидкого топлива.

Основное направление научной и производственной деятельности — исследование процессов сжигания газообразного и жидкого топлива, разработка, совершенствование и испытания топливосжигающих устройств для промышленных печей и топок. Под его руководством выполнена серия работ по совершенствованию систем отопления вращающихся трубчатых печей, горнов конвейерных обжиговых и агломерационных машин. Среди этих работ можно отметить создание горелочных устройств для сжигания природного газа с целью получения контролируемых атмосфер в горнах обжиговых машин, форкамерных горелок для сжигания газа и мазута при подогреве воздуха до 1000 °С.

Разработанные А.А. Винтовкиным горелочные устройства работают на многих предприятиях России, Украины, Казахстана, а также в Индии (г. Рукела) и Китае (г. Кунмин).

Автор 130 печатных трудов, в том числе трех монографий и 50 изобретений.

Ладыгичев
Михаил Григорьевич

1951 года рождения, старший научный сотрудник лаборатории метрологии и государственных испытаний горелочных устройств ВНИИМТ, директор научно-производственного объединения «Теплоэнергетик», кандидат технических наук.

Окончил Уральский политехнический институт. С 1979 года по настоящее время работает в научно-исследовательском институте металлургической теплотехники (ВНИИМТ, г. Екатеринбург), старший научный сотрудник.

Основное направление научной и производственной деятельности: исследование процессов сжигания твердого топлива над слоем и в фильтруемом слое, разработка топливосжигающих устройств для промышленных печей и топок. Наряду с научной деятельностью проводил педагогическую работу.

Автор 10 изобретений и 50 печатных трудов, в том числе монографии, учебника для вузов и учебного пособия.

Гусовский
Виктор Львович

1934 года рождения, начальник технического отдела ОАО «Институт Стальпроект», кандидат технических наук.

Окончил Московский институт стали. С 1957 года работает в ОАО «Институт «Стальпроект». Занимается вопросами разработки и расчета печных агрегатов прокатного производства и их основных систем, в том числе горелочных устройств.

Автор более 100 печатных трудов, в том числе шести монографий и 28 изобретений.

Калинова
Тамара Васильевна

1946 года рождения, начальник отдела нагревательных и термических печей ОАО «Институт Стальпроект». Окончила Московский институт Стали и Сплавов. С 1970 года работает в ОАО «Институт Стальпроект».

Руководит разработками нагревательных и термических печей для металлургического производства, а также других отраслей промышленности.

Автор более 20 печатных трудов, в том числе 5 изобретений.

Справочное издание

ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ТОПОК
(конструкции и технические характеристики)

Анатолий Александрович Винтовкин
Михаил Григорьевич Ладыгичев
Виктор Львович Гусовский
Тамара Васильевна Калинова

Корректор Ю.И. Королева
Компьютерная верстка О.А. Москвина

Лицензия код 221 ЛР № 090171 от 17.04.97.

Подписано в печать 18.11.99 г. Формат издания 70×100 1/16
Бумага офсетная Печать офсетная
Усл.печ.л. 45,5 Усл. кр.-отт. 45,5 Уч.-изд. л. 42,23
Тираж 1000 экз. Заказ № 1362 Изд. № А-00И5/99

ООО "Интермет Инжиниринг"
103006, Москва, Старопименовский пер., д. 8, стр. 1-1А

Отпечатано с оригинал-макета в ППП «Типография «Наука»
121099, Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 5-89594-029-3
9 785895 940297