GAS ENGINEER'S HANDBOOK

FIRST EDITION

ВСЕСОЮЗНОЕ
НАУЧНОЕ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО НЕФТЯНИКОВ

СПРАВОЧНИК ПО ГАЗОВОМУ ДЕЛУ

ТОМ ВТОРОЙ

Перевод с американского издания

Под общей редакцией В. А. Соколова

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
НЕФТЯНОЙ И ГОРНО-ТОПЛИВНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1940 Ленинград

621.1
С—74

АННОТАЦИЯ

Предлагаемый вниманию советского читателя „Справочник по газовому делу", являясь переводом американского справочника (изд. 1936 г.), представляет собой обширный свод справочных материалов, посвященных как теории, так и практике производства и потребления газа. Для удобства пользования справочником он разделен на два тома: первый том охватывает общую часть (сведения общего характера, свойства газов, воздуха и водяного пара, горение и теплопередача) и производства газа (газ Сименса, генераторный газ, синий водяной газ, карбюрированный водяной газ, нефтяной газ, реформирование естественного газа, жидкие газы, карбонизация угля и каменноугольный газ, очистка газа и т. д.); второй том включает материалы, касающиеся потребления газа и всех связанных с ним отраслей газового дела.

В советском издании весь цифровой номографический и формульный материал пересчитан на метрические меры, что весьма выгодно отличает его от всех до сих пор выпускавшихся в свет изданий по газовому делу.

Справочник является настольной книгой для всех нефтяников и работников угольной промышленности, соприкасающихся в своей работе с научно-исследовательскими и производственными проблемами газового дела, а также ценным пособием для студентов нефтяных и угольных втузов.

ОТ ВНИТО НЕФТЯНИКОВ

Вопросы добычи, переработки и использования газов и их продуктов в народном хозяйстве СССР приобретают все большую и большую остроту.

Советский Союз обладает богатейшими запасами природных газов и имеет большие, непрерывно увеличивающиеся ресурсы промышленных газов.

В настоящее время в связи с ростом промышленности и всех видов транспорта возможно и своевременно приступить к полному использованию газовых ресурсов. В свете этой задачи, имеющей огромное народно-хозяйственное значение, особенный интерес приобретают практические проблемы использования газа, которые в кратчайший срок должны быть решены советскими учеными и техниками. В числе этих проблем — газификация городов, энерго-химический синтез использования газа, транспортные генераторы и т. д.

Нельзя скрывать, что перед нашими учеными и техниками в этом деле стоят немалые трудности. Первая трудность — вытекающая из новизны дела — это отсутствие опыта, почти полное отсутствие научно-технической литературы по вопросам использования газа как в СССР, так и за рубежом.

Выпуском в свет настоящего „Справочника по газовому делу" ВНИТО нефтяников предполагает в значительной степени восполнить этот пробел, помочь нашим специалистам в организации и освоении этой новой отрасли нашего народного хозяйства.

В первом томе „Справочника", вышедшем в свет в 1937 г., приведены сведения общего характера (свойства газов, воздуха и водяного пара) и освещены вопросы производства газа (газ Сименса, генераторный, водяной, нефтяной и др.).

Во второй том, предлагаемый вниманию читателей, включены обширные материалы по вопросам потребления газов (транспорт, распределение, использование). Для облегчения пользования справочником все измерения приведены в метрическом выражении. Общее редактирование указанного справочника осуществлено проф. В. А. Соколовым. Проверка пересчета всего цифрового материала произведена В. В. Кельцевым.

В справочнике приводится большое количество таблиц, формул и номограмм. ВНИТО нефтяников просит читателей все свои замечания об обнаруженных недостатках, а также пожелания по поводу дальнейших изданий по этим вопросам направлять по адресу: Москва, Кировский Почтамт, почтовый ящик № 740, ВНИТО нефтяников.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От ВНИТО нефтяников 5

Глава I. Испытания и измерения

1. Газовый анализ 13
   Вычисления при газовом анализе . . . . . —
   Поглотители 15
   Различные определения 22
   Эффект от длительного воздействия окиси углерода на человеческий организм 45
   Запирающие жидкости для газового анализа 46
   Вычисление удельного веса 47
   Основы промышленной стехиометрии . . . . . —
2. Газовая калориметрия 51
   Общие указания для работы с калориметрами . . . . . —
3. Пирометрия 57
   Термоэлектрические пирометры . . . . . —
   Термометры сопротивления 68
   Оптические пирометры . . . . . —
   Самозаписывающие пирометры и контрольная пирометрическая аппаратура 69
4. Движение жидкостей и газов 72
   Изменения вязкости газов с изменением температуры 91
   Потери на расширение и сжатие 98
   Эмпирические формулы для выражения движения жидкостей 105
   Вычисление емкости обыкновенного трубопровода 106
   Расчет системы трубопроводов, образующих петли между двумя точками 107
   Движение жидкостей и газов последовательно по трубам разных диаметров 108
   Движение газа по трубе постоянного диаметра, имеющей несколько отводов . . . . . —
5. Замер газа и счетчики 110
   Определение единиц замера . . . . . —
   Расчет счетчиков 114
   Отклонение газов от законов Бойля 160
   Трубки Пито 169
   Счетчик Томаса 175
   Испытание счетчиков большой пропускной способности, работающих под высоким давлением 180

Глава II. Транспорт и распределение газа

1. Транспорт 212
   Расчет транзитной линии . . . . . —
   Движение газа по трубам газопровода 213
   Номограммы движения газа в трубах 224
   Экономические соображения при проектировании газопроводов . . . 234
2. Компрессия газа 246

3. Проекты систем распределения газа 259
Применение формул движения газа 262
Таблицы, применяемые при прокладке трубопроводов 275
Эквивалентные длины труб, соответствующие фитингам и другим соединениям . . . . . —
Новый метод исправления утечек из раструбов чугунных труб . . . 281
Чугунные соединения труб . . . . . —
Индикаторы утечки газа 284
4. Регуляторы 285
Регуляторы с уравновешенными клапанами . . . . . —
Пропускная способность регуляторов с уравновешенными клапанами 286
5. Газгольдеры 293
6. Сварка трубопроводов 300
Введение . . . . . —
Процессы и способы сварки . . . . . —
Словарик сварочных терминов 308
Общие технические условия для сварки больших передаточных линий . . . . . —
7. Коррозия труб 310
Электролиз подземных трубопроводов . . . . . —
Сопротивление предохранительных трубных покрытий прохождению электрического тока 322
Методы исследования почвы для определения коррозии 323
Руководство для определения коррозии 330

Глава III. Утилизация газа

1. Расположение газопроводов 333
2. Дымоходы и вытяжные трубы 340
Конструкция вытяжной трубы или выхода для газа 343
3. Газовое оборудование 354
Газовые плиты и устройство для приготовления пищи . . . . . —
Газовые водонагреватели 356
4. Отопление и кондиционирование воздуха 359
Отопление домов . . . . . —
Кондиционирование воздуха 372
5. Течение газа через сопла и расчет горелки 374
Течение газа через сопла . . . . . —
Расчет горелки 376
6. Промышленное применение газа 389
Плавка металла . . . . . —
Тепловая обработка 397
Хлебопечение 405
Получение пара 406
Регенерация отработанного тепла в печах, обогреваемых твердым и жидким топливом . . . . . —
Газовые двигатели 418

ПЕРЕЧЕНЬ ТАБЛИЦ

Таблица 1. Расчет анализа газа 14
Таблица 2. Молекулярные объемы углекислоты при 20°С и различных парциальных давлениях 15
Таблица 3. Молекулярные объемы этана при 0°С и различных парциальных давлениях . . . . . —
Таблица 4. Растворимость углеводородов в абсолютном спирте 22
Таблица 5. Расчет удельного веса газовых смесей 48
Таблица 6. Поправки для приведения барометрических давлений к нормальной температуре (0°С) 52
Таблица 7. Равные значения давления в миллиметрах ртутного и водяного столба . . . . . —
Таблица 8. Поправки на разность между температурой воды, входящей в калориметр, и комнатной температурой 56
Таблица 8а. Поправки на влажность при определении теплотворной способности светильного газа в *кг/Кал* . . . . . —
Таблица 8б. Поправки на влажность при определении теплотворной способности природного газа в *кг/Кал* 57
Таблица 9. Свойства обычных термопар 60
Таблица 10. Температуры кипения и плавления некоторых тел, размещенные в порядке их возрастания 61
Таблица 11. Температуры плавления некоторых огнеупорных материалов . 64
Таблица 12. Металлические и керамические материалы, применяемые для первичной и вторичной защиты термопар 66
Таблица 13. Промышленное применение пирометров 71
Таблица 14. Расход воздуха и коэфициент истечения из отверстий форсунки с углом скоса в 60° 73
Таблица 15. Расход воздуха и коэфициент истечения из отверстий форсунки с углом скоса в 15° 74
Таблица 16. Расход воздуха и коэфициент истечения из отверстий форсунки с углом скоса в 15° в стандартной кухонной плите . . 75
Таблица 17. Стандартные калибры с соответствующими обозначениями диаметров отверстий и их сечения 77
Таблица 18. Величины $\frac{Q}{d^2}$ для разных давлений и отношений давления . 80
Таблица 19. Движение газа по трубам разных размеров 84
Таблица 20. Движение газа по трубам различных диаметров 87
Таблица 21. Движение воды в трубах. Потеря напора на трение. 88
Таблица 22. Эквивалентные длины труб, выраженные в диаметрах основной прямой трубы 100
Таблица 23. Константы Sutherland'a для разных газов 101
Таблица 24. Вязкости наиболее распространенных газов по отношению к воде при 20° С . . . . . —
Таблица 25. Расчет величин q_a 109
Таблица 26. Квадраты абсолютных давлений 111
Таблица 27. Коэфициенты истечения воздуха в диафрагменных счетчиках . 118
Таблица 28. Коэфициенты истечения газа в счетчиках с диафрагмами при фланцевом соединении 120
Таблица 29. Коэфициенты истечения газа в счетчиках с трубными соединениями 121

Таблица 30. Значения C_1. Присоединение в месте сужения 122
Таблица 31. Значения C_2. Присоединение в месте сужения 123
Таблица 32. Значения C_1'. Присоединение в месте сужения . . . . . —
Таблица 33. Значения C_2'. Присоединение в месте сужения 124
Таблица 34. Значения C_m. Присоединение в месте сужения . . . . . —
Таблица 35. Значения C_1. Фланцевое присоединение 125
Таблица 36. Значения C_2. Фланцевое присоединение . . . . . —
Таблица 37. Значения C_1'. Фланцевое присоединение 126
Таблица 38. Значения C_2'. Фланцевое присоединение . . . . . —
Таблица 39. Значения C_m. Фланцевое присоединение 127
Таблица 40. Значения C_1. Трубное присоединение . . . . . —
Таблица 41. Значения C_2. Трубное присоединение 128
Таблица 42. Значения C_1'. Трубное присоединение . . . . . —
Таблица 43. Значения C_2'. Трубное присоединение 129
Таблица 44. Поправочные коэфициенты для вычисления необходимых по договору давлений 130
Таблица 45. Стандартные коэфициенты часового расхода газа в счетчиках с диафрагмами при трубном соединении 131
Таблица 46. Стандартные коэфициенты часового расхода газа в счетчиках при фланцевом соединении 133
Таблица 47. Поправочные коэфициенты на удельный вес газа для счетчиков „Орифайс" с диафрагмами 136
Таблица 48. Температурная поправка для счетчиков „Орифайс" 138
Таблица 49. Множители для диференциального давления в *мм* водяного столба . . . . . —
Таблица 50. Множители для статического давления ниже 1 *кг/см²* . . . 140
Таблица 51. Множители статического давления выше 1 *кг/см²* . . . . . —
Таблица 51а. Пропускная способность счетчика 141
Таблица 52. Значения E в счетчиках с фланцевым соединением (жидкостных) 145
Таблица 53. Значения C_w в счетчиках с фланцевым соединением 146
Таблица 54. Стандартные коэфициенты часового расхода жидкостей в счетчиках с трубным соединением 147
Таблица 55. Поправочные коэфициенты на удельный вес (F_θ) кислотных и соляных растворов 148
Таблица 56. Поправочные коэфициенты на удельный вес (F_G) нефтепродуктов 149
Таблица 57. Поправочные коэфициенты на объем нефтепродуктов (F_T) при температуре хранилища в 15,56° С 150
Таблица 58. Коэфициенты отклонения в расширении для сухого воздуха, не содержащего углекислого газа 163
Таблица 59. Отклонения для сухого природного газа с промысла Кетлмен-Хилс, взятого из абсорбера 164
Таблица 60. Отклонение природного газа (98,7% метана) от закона Бойля . —
Таблица 61. Перевод коэфициентов 165
Таблица 62. Перевод коэфициентов . . . . . —
Таблица 63. Деление сечения труб для отсчетов по трубке Пито 171
Таблица 64. Теплоемкость разных промышленных газов 177
Таблица 65. Сводные данные опытов, произведенных над объемными счетчиками, счетчиками Вентури, счетчиками с электрическим регистрирующим аппаратом и счетчиками Томаса 178
Таблица 66. Стоимость эксплоатации счетчика Томаса в течение трех лет . —
Таблица 67. Стоимость обслуживания счетчика Томаса в течение трех лет . —
Таблица 68. Характеристика счетчиков Томаса 179
Таблица 69. Необходимые для испытания расходы газа, отнесенные к атмосферному давлению и дающие ту же потерю давления в счетчике, какая имеет место в эксплоатационных условиях . . 180
Таблица 70. Таблица величин h в сантиметрах H_2O для контрольного счетчика с одним отверстием 182
Таблица 71. Приблизительная пропускная способность отверстий контрольных скоростных счетчиков для низких давлений 183
Таблица 72. Величины h для контрольных счетчиков со многими отверстиями 186

Таблица 73. Отношение теплоемкостей (разных) газов k 189
Таблица 74. Коэфициенты F для температур и отношений теплоемкости . 190
Таблица 75. Коэфициенты для температуры и отношения удельных теплоемкостей k 191
Таблица 76. Коэфициенты для числовых значений k 192
Таблица 77. Коэфициенты для удельного веса 195
Таблица 78. Процент погрешности для контрольного счетчика с пропускной способностью 0,0566 $м^3$ . . . . . —
Таблица 79. Процент погрешности для контрольного счетчика с пропускной способностью 0,14 $м^3$ 196
Таблица 80. Процент погрешности для контрольного счетчика с пропускной способностью 0,283 $м^3$ 197
Таблица 81. Размеры и характеристики американских счетчиков типа „B", заключенных в корпусе из оцинкованной стали 198
Таблица 82. Размеры и характеристики американских счетчиков типа „A", заключенных в корпусе из оцинкованной стали . . . . . —
Таблица 83. Размеры и характеристики счетчиков, заключенных в цинковые корпуса (J. J. Griffin Co) 199
Таблица 84. Размеры и характеристики счетчиков, заключенных в цинковые корпуса (Lambert Meter Co) . . . . . —
Таблица 85. Размеры и характеристики счетчиков, заключенных в цинковые корпуса (Superior Meter Co) 200
Таблица 86. Размеры и характеристики счетчиков, заключенных в железные корпуса . . . . . —
Таблица 87. Размеры и характеристики счетчиков, заключенных в железные корпуса (American Meter Co) 201
Таблица 88. Размеры и характеристики счетчиков Emco 202
Таблица 89. Размеры и характеристики счетчиков типа Вестингауз . . . . —
Таблица 90. Размеры и характеристики счетчиков типа Connersville, рассчитанных на низкое давление 203
Таблица 91. Размеры и характеристики счетчиков типа Connersville на высокое давление 204
Таблица 92. Пропускная способность объемных мокрых стационарных счетчиков . . . . . —
Таблица 93. Таблица Гесса для вычисления объема газа при различных давлениях и температурах 207
Таблица 94. Сравнительные данные для газопроводов высокого давления . 214
Таблица 95. Рабочие давления в разных трубах при различной толщине стенки и разных напряжениях 215
Таблица 96. Сравнение формул для трубопроводов 216
Таблица 97. Эквивалентные длины труб, которые надо прибавлять к полученным величинам для учета трения в поворотных коленах и тройниках 217
Таблица 98. Пропускная способность газопровода диаметром 1" и длиной 1 *км* при различных давлениях в $м^3$/*сутки* 218
Таблица 99. Множитель диаметр — длина 223
Таблица 100. Множитель температуры удельного веса 224
Таблица 101. Внутренний диаметр труб и значения $d5^1/_8$ . . . . . —
Таблица 102. Поправочные коэфициенты 225
Таблица 103. Дополнительные длины труб от $^1/_4$ до $6^6/_8$" 235
Таблица 104. Эквивалентные длины труб от 4 до 30" . . . . . —
Таблица 105. Стоимость постройки и оборудования компрессорных станций 236
Таблица 106. Вес труб с плоскими концами 247
Таблица 107. Константа Spitzglass'a 262
Таблица 108. Величины R и R^2 263
Таблица 109. Эквивалентность труб 278
Таблица 110. Объемы канав 279
Таблица 111. Излишек земли для канав разных диаметров труб 280
Таблица 112. Ширина канав в зависимости от диаметра труб . . . . . —
Таблица 113. Эквивалентные длины для кранов 281
Таблица 114. Диаметр линии, диаметр гило-трубки и количество потребного бетона 282

Таблица 115. Материалы, требуемые для стыков чугунных труб 283
Таблица 116. Материалы, требуемые для заделки раструбов . . . . . —
Таблица 117. Стандартные газгольдеры низкого давления 293
Таблица 118. Размеры газгольдеров и величины их поверхностей, покрываемых краской 294
Таблица 119. Безводные газгольдеры системы Barlett — Hayward'a 296
Таблица 120. Безводные газгольдеры системы Stacey — Klonne . . . . . —
Таблица 121. Газгольдеры высокого давления (цилиндрические) 297
Таблица 122. Малые газгольдеры высокого давления системы Horton'a . . 298
Таблица 123. Газгольдер высокого давления . . . . . —
Таблица 124. Горизонтальные газгольдеры высокого давления . . . . . —
Таблица 125. Вертикальные газгольдеры высокого давления 299
Таблица 126. Количество, расположение и размер прихваток 305
Таблица 127. Величины *L* для различных размеров труб и углов 307
Таблица 128. Характеристика тока для стальных рельсов 317
Таблица 129. Характеристика тока для стальных труб . . . . . —
Таблица 130. Характеристика тока для труб из ковкого железа 318
Таблица 131. Характеристика тока для стандартных газовых труб (отливка в песчаной форме) . . . . . —
Таблица 132. Характеристика тока для свинцовых труб 319
Таблица 133. Контактный ряд металлов 320
Таблица 134. Ряд электродвижущей силы металлов . . . . . —
Таблица 135. Приблизительная потеря в весе металла от электролиза . . . —
Таблица 136. Спецификация изолирующих соединений для дымовых трубопроводов марки „U. G. I." 321
Таблица 137. Классификация труб по степени коррозии 330
Таблица 138. Материалы для трубного покрытия на 1 *км* трубы 331
Таблица 139. Предохранительные покрытия для подземных труб . . . . . —
Таблица 140. Поток газа в трубах в $м^3/час$ при перепаде давления 5,08 и 12,7 *мм* водяного столба и удельного веса 0,45 (формула Spitzglass'a) 335
Таблица 141. Поток газа в трубах в $м^3/час$ при перепаде давления 5,08 и 12,7 *мм* водяного столба и удельного веса 0,65 (формула Spitzglass'a) 336
Таблица 142. Множители для перевода потока газа удельного веса 0,65 в поток для газа иного удельного веса 337
Таблица 143. Множители для перевода потока газа при перепаде давления 5,08 *мм* водяного столба в поток газа при иных перепадах давления . . . . . —
Таблица 144. Множители для перевода потока газа для трубы длиной *L м* в поток для труб длиной в *N* раз больших . . . . . —
Таблица 145. Длина трубы, добавляемая на каждое колено или тройник на газопроводе . . . . . —
Таблица 146. Длина трубы, добавляемая на каждый вентиль на газопроводе 338
Таблица 147. Расчет ответвлений к приборам . . . . . —
Таблица 148. Метод подсчета минимальных размеров, применяемых для вертикальных труб . . . . . —
Таблица 149. Поток газа (удельный вес 0,45) в трубах при падении давления, составляющего 5% от начального по манометру (формула Spitzglass'a) 341
Таблица 150. Поток газа (удельный вес 0,65) в трубах при падении давления, составляющего 5% от начального по манометру (формула Spitzglass'a) 342
Таблица 151. Количество параллельных горизонтальных газопроводов различных размеров, которым можно заменить один газопровод диаметром, равным диаметру дымохода 347
Таблица 152. Коэфициенты относительной пропускной способности для параллельных вытяжек в бытовых и индустриальных установках (для равного падения давления) 351
Таблица 153. Отрезки дымоходов различных диаметров, имеющие одинаковую пропускную способность для одной и той же разности давлений 354

Таблица 154. Требования, предъявленные к некоторым общепринятым газовым установкам 355
Таблица 155. Пропускная способность нагревателя непрерывного действия в *л/мин* при повышении температуры от 15,5 до 49° С . . . 357
Таблица 156. Количество кранов, которые можно применять одновременно от нагревателей непрерывного действия . . . . . —
Таблица 157. 359
Таблица 158. . . . . . —
Таблица 159. 360
Таблица 160. Число смен воздуха в час, исключая вентиляцию . . . . . —
Таблица 161. 361
Таблица 162. Размер сечения присоединений для холодного воздуха и решеток для возврата воздуха 365
Таблица 163. 374
Таблица 164. Коэфициент истечения. Приближенные сопротивления трубки газовой горелки 381
Таблица 165. Размеры газовой горелки для газов различной плотности и теплотворной способности 386
Таблица 166. Размеры атмосферных трубчатых горелок 387
Таблица 167. Мощность атмосферных трубчатых горелок в *м³/час* 388
Таблица 168. Температурные пределы различных применяемых в промышленности рабочих процессов по нагреву 390
Таблица 169. Выбор приборов для автоматического регулирования температуры 392
Таблица 170. Температура плавления конусов Зегера 396
Таблица 171. Пределы теплового напряжения в печах общепринятых типов . —
Таблица 172. 397
Таблица 173. Термические свойства и веса простых металлов-элементов . 398
Таблица 174. Термические данные по металлическим сплавам 399
Таблица 175. Типичные результаты фактического применения газа для плавки металла 400
Таблица 176. Типичные результаты применения газа к различным рабочим процессам тепловой обработки 403
Таблица 177. Температуры отжига для углеродистых сталей 404
Таблица 178. Температура закалки для углеродистых сталей . . . . . —
Таблица 179. Типичные коэфициенты полезного действия, взятые из испытаний, фактически проведенных на печах 407
Таблица 180. Результаты испытаний парового котла 408
Таблица 181. 415
Таблица 182. 416
Таблица 183. 417
Таблица 184. . . . . . —
Таблица 185. . . . . . —
Таблица 186. 418
Таблица 187. Эквиваленты газа и электричества 420
Таблица 188. Эквиваленты газа и нефти 421
Таблица 189. Эквиваленты газа и угля или кокса 422
Таблица 190. Эквиваленты для естественного газа, нефти и каменного угля в паровых котлах . . . . . —

Глава I

ИСПЫТАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ

(Перевод *М. Г. Гуревича*)

1. ГАЗОВЫЙ АНАЛИЗ

В описываемых методах реагенты для поглощения отдельных газов применялись в следующем порядке:

1) H_2S — поглощается (но не определяется) раствором треххлористого мышьяка, подкисленным соляной кислотой.

2) CO_2, C_2N_2, HCl, SO_2 — поглощаются раствором едкого кали или едкого натра.

3) C_2H_2, C_2H_4, C_3H_6, C_4H_8, C_5H_{10} — поглощаются при отсутствии высших парафинов дымящей серной кислотой или смесью сернокислой меди и β-нафтола.

4) O_2 — поглощается щелочным раствором пирогаллола или хлористым хромом. Если употребляется последний, то O_2 может быть поглощен ранее (2) или (3).

5) CO — поглощается полухлористой медью или смесью Cu_2SO_4 и β-нафтола. Может быть также определена или во взрывной пипетке, или путем сожжения с кислородом, или окислением при пропускании через нагретую окись меди.

6) H_2 — определяется или во взрывной пипетке, или при сожжении с кислородом, или же окислением при пропускании через нагретую окись меди.

7) CH_4 и C_2H_6 — определяются во взрывной пипетке или путем сожжения с кислородом.

8) C_3H_8 и C_4H_{10} — определяются сожжением с кислородом.

9) N_2 и другие инертные газы, встречающиеся в воздухе, определяются по разности.

В случае, если определение отдельных компонентов идет не в указанном выше порядке, возможны ошибки вследствие того, что некоторые растворы будут поглощать не один какой-либо компонент, а несколько. Растворы, употребляемые для поглощения некоторых компонентов, могут поглощать и другие компоненты, как это указано выше. Исключение составляет хлористый хром. Если этот реагент применяется для поглощения кислорода, то последний может быть поглощен раньше или позже углекислого газа. В случае определения CO, H_2, CH_4 и C_2H_6 путем сожжения присутствие других горючих газов, упомянутых выше, мешает анализу.

Когда известно, что один или несколько из приведенных компонентов отсутствует в анализируемой газовой смеси, или когда производство полного анализа не требуется, может быть вполне применен упрощенный порядок газового анализа.

Сведения о приготовлении и свойствах различных реагентов приводятся ниже.

ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРИ ГАЗОВОМ АНАЛИЗЕ

В табл. 1 приведены вычисления, применяемые при анализе газовых смесей.

Исключение погрешностей газового анализа, обусловленных предположением, что молекулярные объемы всех газов равны. Вышеприведенные расчеты основаны на том предположении, что молекулярные объемы всех газов равны. Углекислота и этан уклоняются от этой закономерности. Поэтому, когда пар-

Таблица 1

Расчет анализа газа

Отсчеты объемов газа		Символ	Вычисления	Результаты в процентах объема	
Объем газа, взятого для анализа	100,0	a	—	—	—
Объем после поглощения CO_2	94,1	b	$a - b = 100 - 94,1 = 5,9$	CO_2	5,9
Объем после поглощения непредельных углеводородов . . .	93,5	c	$b - c = 94,1 - 93,5 = 0,6$	Непредельные	0,6
Объем после поглощения кислорода . . .	93,3	d	$c - d = 93,5 - 93,3 = 0,2$	O_2	0,2
Объем после пропускания газа через трубку с окисью меди . . .	74,0	e	$d - e = 93,3 - 74 = 19,3$	H_2	19,3
Объем после поглощения углекислоты, образовавшейся в трубке с окисью меди	70,9	f	$e - f = 74,0 - 70,9 = 3,1$	CO	3,1
Объем газа, взятого для сожжения	30,0	g	—	—	—
Объем кислорода, взятого для сожжения .	90,0	h	$g + h = 30,0 + 90,0 = 120 =$ = общему объему газа перед сожжением	—	—
Объем после сожжения	60,6	k	$g + h - k = 59,4 =$ контракции (уменьшение объема), полученной благодаря конденсации воды при сожжении	—	—
Объем после поглощения углекислоты, образовавшейся при сожжении	27,2	l	$k - l = 60,6 - 27,2 = 33,4 =$ = объему образовавшейся углекислоты	—	—
Объем C_2H_6 в части газа, взятой для сожжения	—	m	$m = 2/3$ (2 объема CO_2 — контракция) $= \frac{2}{3}(2 \cdot 33,4 - 59,4) = 4,93$	—	—
Объем CH_4 в части, взятой для сожжения	—	n	$n =$ объем $CO_2 - 2$ объема $C_2H_6 = 33,4 - 2 \cdot 4,93 = 23,6$	—	—
Объем C_2H_6 в первоначальной пробе газа .	—	p	$p = \frac{mf}{g} = \frac{4,93 \cdot 70,9}{30,0} = 11,6$	C_2H_6	11,6
Объем CH_4 в первоначальной пробе газа .	—	q	$q = \frac{nf}{g} = \frac{23,6 \cdot 70,9}{30,0} = 55,7$	CH_4	55,7
Объем N_2 в первоначальной пробе газа .	—	—	По разности	N_2	3,6
			Итого	—	100,0

циальные давления этих двух газов высоки в газовых смесях, при определении парафиновых углеводородов с помощью сожжения должны быть введены поправки.

Следующие уравнения позволяют произвести точные вычисления в газовом анализе:

$$C_2H_6 = \frac{d_3C - (d_1 + 2 - d_2)\,CO_2}{d_3\,(d_2 - 0{,}5 - 2d_1)};$$

$$CH_4 = \frac{CO_2}{d_3} - 2C_2H_6,$$

где C_2H_6 — объем этана в части газа, взятой для сожжения (теоретический объем, который занял бы этан, если бы он был идеальным газом);

CH_4 — объем метана в части газа, взятой для сожжения;

d_1 — молекулярный объем метана (объем идеального газа равен единице) при парциальном давлении, под которым он находится в части газа, взятой на сожжение;

d_2 — молекулярный объем этана (объем идеального газа равен единице) при парциальном давлении, под которым он находится в части газа, взятой на сожжение;

d_3 — молекулярный объем углекислоты при парциальном давлении, под которым она находится в газовой смеси, образовавшейся после сожжения;

CO_2 — наблюденная контракция (уменьшение объема) вследствие поглощения углекислоты;

C — наблюденная контракция вследствие конденсации водяных паров.

В табл. 2 и 3 приведены значения для d_2 и d_3 при различных парциальных давлениях. При парциальном давлении, равном 760 *мм*; $d_1 = 0{,}999$. Таким образом, возможно во всех анализах брать величину $d_1 = 1{,}000$ без внесения этим заметных ошибок в аналитические расчеты.

Таблица 2

d_3

Молекулярные объемы (идеальный газ равен 1,000) углекислоты при 20° С и различных парциальных давлениях

Давление в *мм* ртутного столба	Молекулярный объем
100	0,999
200	0,999
300	0,998
400	0,997
500	0,997
600	0,996
700	0,995
760	0,955

Таблица 3

d_2

Молекулярные объемы (идеальный газ равен 1,000) этана при 0° С и различных парциальных давлениях

Давление в *мм* ртутного столба	Молекулярный объем
100	0,999
200	0,997
300	0,996
400	0,995
500	0,994
600	0,992
700	0,991
760	0,990

Бюррель и Зейберт [1] в труде „Ошибки в газовом анализе, происходящие в предположении, что молекулярные объемы всех газов одинаковы", замечают:

„Если парциальные давления метана и углекислоты во время анализа держатся ниже 30%, то ошибки, полученные вследствие отклонения молекулярных объемов от молекулярного объема идеального газа, могут не приниматься во внимание.

ПОГЛОТИТЕЛИ [2]

Поглотители для углекислоты (CO_2). *Едкий кали и едкий натр.* Для определения углекислоты употребляются растворы едкого кали и едкого натра,

[1] „Bur. Mines, Tech. Paper", 54.

[2] Сведения о поглотителях и методах анализа взяты из „Methods of the Chemists of the United States Steel Corporation for the Sampling and Analysis of Gases".

причем одни аналитики отдают предпочтение первому, другие — второму поглотителю. Различными авторами рекомендуются концентрации едкого кали и едкого натра, значительно различающиеся между собой; однако для обычных целей газового анализа лучше всего приготовлять растворы в следующих пропорциях:

Раствор едкого кали

Едкий кали (чистый, электролитический)	360 *г*
Дистиллированная вода в количестве, необходимом для доведения раствора до	1000 *см*^{3}

Раствор едкого натра

Едкий натр (чистый, электролитический)	315 *г*
Дистиллированная вода в количестве, необходимом для доведения раствора до	1000 *см*^{3}

Эти растворы одинаково пригодны для поглощения углекислоты. Существует мнение, что раствор едкого кали обладает бо́льшими поглотительными способностями и большей скоростью поглощения, нежели раствор едкого натра; однако раствор едкого натра значительно дешевле и не образует пены при барботировании через него газа, как это имеет место в случае едкого кали. В обоих случаях должны применяться KOH и NaOH, очищенные электролизом, так как эти же щелочи употребляются и при изготовлении растворов пирогаллола для определения кислорода. Едкие щелочи, очищенные спиртом, заставляют эти растворы выделять окись углерода.

Если газовая смесь содержит компоненты кислотного характера, как-то: двуокись серы, сероводород или циан, то эти компоненты должны быть удалены раньше, нежели будет определена углекислота; иначе они будут поглощены едкой щелочью и, таким образом, будут приняты за углекислоту. Едкие щелочи также поглощают некоторые непредельные углеводороды (в частности, бензол) до насыщения.

Едкий барий. Когда количество углекислоты, содержащейся в анализируемом газе, очень невелико и приближается к содержанию углекислоты в воздухе, некоторые аналитики предпочитают поглощение углекислоты баритовой водой вместо поглощения более сильными щелочами. Этот поглотитель обычно употребляется в тех случаях, когда нужно произвести определение углекислоты титрованием. В большинстве случаев этот метод позволяет произвести определение с большой точностью. Употребляющийся для этих целей раствор содержит в литре 14 *г* гидрата окиси бария и 1 *г* хлористого бария; последний вводится для обеспечения лучшей конечной точки анализа. 1 *см*^{3} этого раствора равнозначен приблизительно 1 *см*^{3} углекислоты, измеренной при нормальных условиях. Раствор стандартизуется щавелевой кислотой, приготовляемой путем растворения 5,3653 *г* чистой кристаллической щавелевой кислоты в 1 *л* свежекипящей дистиллированной воды. В качестве индикатора употребляется фенолфталеин. В сосуд, содержащий 1 *л* (или больше) газа, вводят через капельную воронку точно измеренное количество гидрата окиси бария и хорошо встряхивают. Избыток гидрата бария оттитровывается щавелевой кислотой.

Поглотители для непредельных углеводородов (этилен, пропилен, ацетилен, бутилен, бензол и более тяжелые углеводороды). ***Дымящая серная кислота.*** Если нет необходимости в отдельном определении каждого из компонентов, то употребляется дымящая серная кислота. Для большей надежности определений свежая кислота должна содержать избыток в 15—20% SO_3.

Кислота может быть или покупной, или приготовляться путем нагревания концентрированной кислоты в реторте, соединенной с охлаждаемым приемником, содержащим чистую концентрированную серную кислоту. Таким образом, SO_3, поступающий из реторты в приемник, абсорбируется находящейся в нем серной кислотой. Реагент годится для употребления только до тех пор, пока в нем имеется избыток SO_3, показателем чего служит сильное выделение дыма.

Реагент поглощает также и высшие углеводороды парафинового ряда, как-то: пентан (C_5H_{12}) и гексан (C_6H_{14}), так как последние растворяются. Олефины, как этилен (C_2H_4) и пропилен (C_3H_6), ароматические углеводороды, как бензол (C_6H_6), а также ацетилен (C_2H_2), поглощаются вследствие химической реакции. При этом этилен переходит в $C_2H_6S_2O_7$, бензол — в $C_6H_4SO_2$, а ацетилен — в $C_2H_4SO_4$. При

продолжительном соприкосновении кислота поглощает этан, но в обычных условиях количество поглощенного этана незначительно, исключая те случаи, когда процентное содержание этана велико. При прохождении газа через пипетку с дымящей серной кислотой некоторое количество SO_3 уносится вместе с проходящим газом. Поэтому после этой операции необходимо пропустить газ через пипетку с едкой щелочью.

Бром. Для поглощения непредельных углеводородов некоторые аналитики применяют бром, но он неудобен для употребления в пипетках. При необходимости применения брома для других целей его приготовляют растворением 5 *г* бромистого калия в 100 *см*³ дистиллированной воды и добавлением брома до полного насыщения раствора. Бром поглощает этилен, переходящий в бромистый этилен ($C_2H_4Br_2$), и пропилен, переходящий в бромистый пропилен ($C_3H_6Br_2$). Бром не поглощает бензол полностью подобно дымящей серной кислоте. Как и при дымящей серной кислоте, некоторое количество брома увлекается вместе с газом из пипетки. Поэтому после пипетки с бромом газ необходимо пропустить через пипетку со щелочью перед его измерением.

Хлористый палладий. В разбавленном растворе — от 0,5 до 1% — хлористый палладий ($PdCl_2$) восстанавливается до палладия окисью углерода и олефиновыми углеводородами, этиленом и его гомологами. Реакция с окисью углерода такова.

$$PdCl_2 + CO + H_2O = 2HCl + Pd + CO_2.$$

Реакция с этиленом, повидимому, такова:

$$PdCl_2 + C_2H_4 = C_2H_4Cl_2 + Pd.$$

Осажденный палладий черного цвета и легко определяется. Приведенные выше реакции применяются для обнаружения малых количеств окиси углерода или олефинов и дают возможность заметить 0,2% любого из этих соединений при медленном пропускании 100 *см*³ газа через 30—40 *см*³ раствора. Раствор хлористого палладия медленно поглощает также водород; поэтому пользоваться им можно только для качественных определений водорода. Опыты показывают, что раствор хлористого палладия не может быть употреблен для анализа в пипетке, если даже отсутствует водород.

Растворы для разделения непредельных. Единственным точным методом разделения непредельных является фракционная разгонка. Для разделения этилена, пропилена и бутилена на фракции при отсутствии окиси углерода горное бюро использовало достаточно удовлетворительно растворы серной кислоты различной крепости в присутствии сернокислого серебра и сернокислого никеля в качестве катализаторов [1]. Эти растворы следующие: серная кислота плюс 10% воды, серная кислота обычной концентрации (удельный вес 1,84) и серная кислота обычной концентрации, содержащая 10% дымящей серной кислоты (20% избытка SO_3). Все эти растворы насыщены сернокислым никелем и сернокислым серебром. Первая смесь служит для поглощения бутилена, вторая — для поглощения пропилена и третья — для поглощения этилена. Эти растворы не поглощают высшие парафины, но поглощают пары бензола и некоторое количество окиси углерода в том случае, если эти газы присутствуют. Отсюда следует, что эти смеси не пригодны для употребления в обычных условиях в поглотительной аппаратуре. При наличии окиси углерода наиболее удовлетворительные результаты были получены при пропускании газа через серную кислоту с удельным весом 1,62 для поглощения бутилена, через серную кислоту с удельным весом 1,70 — для поглощения пропилена и через обычную кислоту, содержащую 10% дымящей серной кислоты, — для поглощения этилена. Действие этих кислот несколько замедлено, и разделение бутилена и пропилена происходит не очень точно.

Поглотители для кислорода. Для поглощения кислорода наиболее часто употребляются сильнощелочные калиевые или натриевые растворы пирогаллола и желтый фосфор в палочках. Однако наиболее быстрым способом поглощения, а в некоторых случаях и наиболее точным является поглощение кислорода хлористым бромом. Существует много рецептов для приготовления раствора пирогаллола. Обычно раствор приготовляется по способу, приводимому ниже.

Раствор пирогаллола в едком кали. Раствор едкого кали приготовляется растворением 600 *г* электролитического едкого кали в воде с последующим

---

[1] P. E. Frey and W. P. Yant, Seperation of Individual Saturated and Unsaturated Hidrocarbons in Coal Gas by Fractional Distillation, „Ind. Eng. Chem.", т. 19, № 4, апрель 1927.

прибавлением воды до 1000 *см*³. Точно так же раствор пирогалловой кислоты приготовляется растворением 300 *г* чистой пирогалловой кислоты в 800 *см*³ воды с последующим добавлением воды до 1000 *см*³. Для приготовления пирогаллового раствора, идущего на анализ, берут (в зависимости от емкости пипетки) 40—50 *см*³ раствора пирогалловой кислоты, помещают в поглотительную пипетку и доливают в нее $3^1/_2$ объема (140—175 *см*³) раствора едкого кали. Пипетка должна быть закрыта резиновой пробкой для предохранения от влияния воздуха, после чего оба раствора тщательно перемешиваются.

Раствор пирогаллола в едком натре. Этот раствор приготовляется растворением 1 части чистого едкого натра в 1 части воды и прибавлением $2^1/_2$ объемов (150—160 *см*³, в зависимости от емкости пипетки) этого раствора к 1 объему (60—65 *см*³) раствора пирогалловой кислоты, приготовленного по вышеописанному способу.

Оба указанных раствора пирогаллола — прекрасные поглотители кислорода, и при применении их свежеприготовленными процесс поглощения идет весьма быстро. После поглощения 8—10 объемов кислорода действие их ослабевает. Их активность зависит также от температуры. При температуре около 0° С поглощение идет очень медленно. Наиболее благоприятной температурой для поглощения является приблизительно 20° С. Употребление едкого натра или едкого кали, очищенных спиртом, запрещается, так как возможно выделение растворами окиси углерода. Некоторые считают, что окись углерода выделяется только после того, как раствор поглотит 8—10 объемов кислорода, в то время как другие полагают, что если раствор достаточно концентрирован, т. е. насыщен, то он не выделяет окиси углерода. Будучи сильнощелочными, эти растворы поглощают все те газы, которые поглощаются растворами едких щелочей. Они поглощают также небольшие количества непредельных углеводородов.

Желтый фосфор широко применяется для поглощения кислорода в некоторых газах. Для анализа его отливают небольшими палочками диаметром 4—6 *мм*. Приготовляются палочки следующим образом. Желтый фосфор помещают под водой в пробирку, которую затем опускают в водяную баню с температурой около 50° С. Стеклянная трубка необходимого внутреннего диаметра погружается в расплавленный фосфор, который втягивается в трубку всасыванием до нужной высоты, после чего трубка вынимается и немедленно погружается в сосуд с холодной водой. Затвердевший фосфор выталкивают стеклянной палочкой в пипетку, наполненную водой. Необходимо следить за тем, чтобы фосфор не приставал ко дну. Когда фосфор находится в употреблении, следует менять воду в пипетке для удаления окислов фосфора. Это необходимо делать всякий раз, когда дым в пипетке поглощается медленно или неполностью в течение одной — двух минут. Пипетка, содержащая фосфор, должна быть закрыта черной бумагой во избежание перехода желтого фосфора в красный под влиянием света. Помимо того что желтый фосфор небезопасен в обращении, он имеет еще тот недостаток, что не может быть употреблен для определения кислорода при его большом содержании в газе, например в воздухе, так как в этом случае фосфор выделяет настолько большое количество тепла, что расплавляется. Желтый фосфор не может быть использован для анализа газов, содержащих следы этилена, бензола, спиртов, нефтяных паров или аммиака, так как они препятствуют действию фосфора на кислород. Действие желтого фосфора замедляется с падением температуры ниже 15° С. Замедление реакции наступает также при содержании в анализируемом газе больших количеств метана и этана.

Хлористый хром. Несмотря на то, что хлористый хром является наиболее быстро действующим поглотителем кислорода и применялся для этого еще 35 лет тому назад, он все же не может быть широко использован для поглощения кислорода, так как обладает свойством быстро восстанавливаться и приготовление, а также хранение его в восстановленном виде представляют большие трудности. Приготовление хлористого хрома можно разбить на три этапа. Хромовую кислоту обрабатывают соляной кислотой или же хлорный хром растворяют в воде и подкисляют соляной кислотой. Кислотный раствор переводят в колбу, откуда воздух вытесняется свободным от кислорода газом; колба должна быть закрыта пробкой с двумя отверстиями, имеющей бунзеновский кран и соединительную трубку. Хлорный хром восстанавливается прибавлением металлического цинка. Когда вся соль восстановится до хлористого хрома, раствор переводят в насыщенный раствор уксуснокислого натра, причем выпадает красноватый осадок нерастворимого уксуснокислого хрома, являющегося более устойчивым. После промы-

вания уксуснокислого хрома разбавленной уксусной кислотой и водой он при прибавлении соляной кислоты переходит в хлористый хром. Приготовленный таким образом хлористый хром поглощает только кислород и газы, растворимые в воде. Сероводород, углекислота и другие газы проходят через раствор хлористого хрома без изменения их объемов.

Более простой метод приготовления хлористого хрома состоит в том, что в раствор хлорного хрома, находящийся в пипетке, добавляют соляную кислоту и восстанавливают до хлористого хрома цинком в атмосфере, лишенной кислорода.

Приготовленный таким путем раствор быстро поглощает кислород и в присутствии избытка соляной кислоты не поглощает сероводород и углекислоту, но медленно выделяет свободный водород. Если избыток кислоты невелик и температура держится около 20° С, то количество выделяющегося свободного водорода невелико и не может быть замерено в бюретках обычного типа.

При нейтрализации раствора избытком цинка раствор может поглощать небольшие количества сероводорода и углекислоты. Но поскольку сероводород и углекислота определяются перед определением кислорода, это обстоятельство не имеет значения. Устойчивые растворы в количествах, достаточных для заполнения пипетки, лучше всего приготовлять восстановлением соля по Джонсу или амальгамированным цинком. Для приготовления восстановителя 5 *г* ртути растворяются сначала в разбавленной азотной кислоте (1 : 1); полученный раствор доводят до 250 *см*³ и помещают в литровый сосуд. 500 *г* гранулированного цинка (просеянного на сите, имеющем 20 отверстий на линейный дюйм) помещают в сосуд, взбалтывают несколько минут и оставляют стоять 10—15 мин., после чего цинк промывается водой декантацией. В трубку восстановителя насыпают слой стеклянных бус; последние покрываются стеклянной ватой, а поверх ваты кладут тонкий слой асбеста.

Держа все время цинк под водой, помещают амальгаму на асбестовый слой, промывают 5-процентным раствором серной кислоты и затем водой до освобождения от кислоты. Потом раствор из 75 *г* хлорного хрома в 190 *см*³ воды, подкисленной 10 *см*³ соляной кислоты, приливается к восстановителю до окрашивания воды на две редуктора. После этого дно редуктора закрывают резиновой пробкой с небольшим бунзеновским краном, ведущим к задней камере пипетки, наполненной коксовым или другим газом, свободным от кислорода, куда капля по капле и спускают остаток раствора, проходящий при этом через восстановитель. Пипетку наполняют таким образом до соответствующего уровня. Вслед за тем пипетку немедленно соединяют с прибором, и раствор надежно изолируют от воздуха. Этот раствор не выделяет водород и поглощает весь кислород из воздуха при 2—4 прокачках воздуха через барботирующую пипетку.

Гидрат закиси марганца. Применение гидрата закиси марганца для определения малых количеств кислорода, не могущих быть определенными ни фосфором, ни другими обычными способами, впервые было указано Phillips'ом [1]. Свежеприготовленный гидрат закиси марганца прекрасно поглощает кислород в виде белого осадка в водном растворе, окисляясь до гидрата окиси марганца, имеющей коричневый цвет. При обработке гидроокиси иодистым калием и серной кислотой освобождается иод, и раствор окрашивается в розовый цвет. При взбалтывании раствора с 100 *см*³ газа легко определяются следы кислорода. Определение может быть не только качественным, но и количественным. Для этого свободный иод оттитровывается тиосульфатом натрия. Подробно этот способ описан в руководствах по анализу природного газа. Вследствие нерастворимости этот реагент не годится для пипеточного анализа.

Поглотители для окиси углерода. Для определения окиси углерода применялись до сих пор аммиачный раствор полухлористой меди и солянокислый раствор полухлористой меди. Но в 1924 г. M. Damiens [2] открыл, что Cu_2O, взвешенная в серной кислоте, также поглощает окись углерода. В 1925 г. H. P. Lebeau и C. H. Bedel нашли, что, вводя в реагент Damiens'a фенол, можно значительно повысить его качества.

Приводим способы приготовления и свойства реагентов для поглощения окиси углерода.

---

[1] Francis and Phillips „Am. chem. J.", т. 16, стр. 268, 1894.
[2] „Gas World", т. 82, № 2116, стр. 101, 7 февраля 1925.

Аммиачный раствор полухлористой меди

Хлористый аммоний (химически чистый)	300 г
Полухлористая медь	270 „
Вода	1 000 *см*³

Чтобы приготовить раствор для поглощения CO, требуется 1 объем NH_4OH (удельный вес 0,90) на 3 объема раствора полухлористой меди.

Аммиачный раствор поглощает кислород из воздуха. Поэтому лучше всего растворить соль в воде, а затем в пипетке приливать к раствору аммиак в соответствующей пропорции. Закрыв поглотительную часть пипетки, заполняют компенсационную ее часть раствором и приливают аммиак до тех пор, пока выпавший бежый осадок не начнет исчезать при взбалтывании. Благодаря избытку аммиака последний в виде паров легко уходит вместе с газом после поглощения. Поэтому необходимо после поглощения окиси углерода пропускать газ через пипетку с кислотой для поглощения паров аммиака. По этой причине многие аналитики предпочитают употреблять кислотный раствор вместо аммиачного.

Кислотный раствор полухлористой меди приготовляется следующим образом:

Кислотный раствор полухлористой меди

Полухлористая медь (химически чистая)	75 г
Соляная кислота (химически чистая, концентрированная)	600 *см*³
Вода в количестве, необходимом для доведения раствора до	1 000 „

Упругость паров этого раствора не превышает упругости паров воды; но для предохранения газа от паров соляной кислоты, выделяющихся в поглотительной пипетке, необходимо после поглощения окиси углерода пропустить газ через пипетку со щелочью. Кислотный раствор полухлористой меди также поглощает кислород; поэтому необходимо предохранять его от влияния атмосферного воздуха.

Оба раствора полухлористой меди — и кислотный и аммиачный — обладают большой способностью к окислению; поэтому необходимо хранить их в восстановительной среде. Несколько кусочков медной проволоки или медной стружки, положенных в раствор и компенсационную часть пипетки, предохраняют полухлористую медь от окисления. Кислотный раствор должен иметь желто-зеленый или соломенный цвет, и несколько капель раствора, влитые в воду, должны дать белый осадок. В качестве восстановителя кислотного раствора можно употреблять вместо меди раствор хлористого олова. Раствор хлористого олова приготовляется растворением 25 г $SnCl_2$ в 100 *см*³ разведенной соляной кислоты (1:1). Полученный раствор медленно приливается к раствору полухлористой меди, который необходимо при этом встряхивать до приобретения раствором соломенного цвета. Это условие обязательно, потому что если раствор окрашен в зеленоватый цвет, то он будет поглощать, кроме окиси углерода, и другие газы.

Действие этих растворов обусловлено образованием нестойкого соединения, имеющего формулу $Cu_2Cl_2 \cdot 2CO$. Свежеприготовленные растворы поглощают нацело окись углерода. Однако после поглощения некоторого количества окиси углерода соединение становится весьма нестойким и отдает окись углерода при малом ее содержании в газе. Это обстоятельство заставляет пропускать анализируемый газ через 2—3 пипетки с поглотителем. Когда последняя пипетка поглотит 10 *см*³ окиси углерода, необходимо заменить ее пипеткой со свежим раствором, а остальные пипетки передвинуть на одну. Кроме кислорода и окиси углерода, раствор поглощает также ацетилен, этилен и другие газы. Поэтому упомянутые газы должны быть поглощены до определения окиси углерода; помимо того, необходимо сделать несколько предварительных контрольных анализов. Это правило обязательно для обоих растворов (кислотного и аммиачного) как свежеприготовленных, так и бывших в употреблении. Вместо двух или трех пипеток с полухлористой медью можно употреблять одну пипетку с полухлористой медью в сочетании с пипеткой, содержащей смесь сульфата меди (Cu_2SO_4) и β-нафтола. Газ пропускают сначала через пипетку с полухлористой медью, где поглощается большая часть окиси углерода, а затем остальная часть поглощается во второй

пипетке, содержащей указанную выше смесь, которая приготовляется следующим образом.

Смесь сульфата меди с β-нафтолом. Достаточное для помещения в пипетку количество смеси приготовляется в следующих пропорциях:

Закись меди (химически чистая, приготовленная мокрым способом)	20 *г*
Серная кислота (химически чистая, удельный вес 1,84)	200 *см*³
Дестиллированная вода	25 „
β-нафтол (химически чистый)	25 *г*

Кислоту приливают к воде и дают ей остыть. Закись меди помещают в фарфоровую ступку и, приливая понемногу разбавленную кислоту, быстро и хорошо смешивают их, растирая пестиком до тех пор, пока вся окись не будет взвешена. Тогда приливают β-нафтол и таким же способом производят смешение. После фильтрации смеси через стеклянную вату для удаления несмешавшихся частиц β-нафтола смесь готова к употреблению. Ее необходимо тотчас же перевести в пипетку и защитить от воздействия воздуха, так как она постепенно поглощает из него кислород. Смесь нужно держать при температуре выше + 15° С, потому что нафтол при более низкой температуре отделяется от смеси.

Для получения наилучших результатов закись меди должна быть приготовлена мокрым способом, так как в случае приготовления ее сухим способом она дает смесь, медленно поглощающую окись углерода. Поскольку продаваемая закись меди в большинстве случаев приготовляется сухим способом, желательно приготовлять ее в лаборатории. Наиболее удобно приготовить закись меди путем обработки уксуснокислой меди глюкозой. К 1000 *см*³ воды, налитой в 2-литровый сосуд, добавляют 100 *г* уксуснокислой меди, нагревают до растворения ацетата в воде и, если необходимо, отфильтровывают нерастворившиеся частицы. В то же время растворяют 60 *г* глюкозы в 400 *см*³ воды и добавляют этот раствор в кипящий раствор уксуснокислой меди. Кипячение производят до тех пор, пока голубая окраска несколько побледнеет, после чего раствор оставляют стоять до выпадения осадка красной закиси меди. Осадок декантируется, собирается на фильтр, промывается декантацией несколько раз водой, а потом один раз спиртом. Приготовленная таким образом закись меди высушивается при 90—100° С, лучше всего в вакуум-эксикаторе. Готовую закись меди хранят в закрытом сосуде.

Необходимое количество глюкозы может быть получено из обычного тростникового сахара растворением 60 *г* его в 400 *см*³ воды; затем к раствору добавляют 3 капли серной кислоты и кипятят его в течение 5 мин. Избыток кислоты нейтрализуют углекислым кальцием, после чего отфильтровывают раствор.

Закись меди образует сульфат меди (Cu_2SO_4), слабо растворимый и очень устойчивый по отношению к употребляющейся серной кислоте. С окисью углерода сульфат образует $Cu_2SO_4 \cdot 2CO$, представляющее собой устойчивое соединение. Эта смесь не выделяет свободной окиси углерода, подобно описанному раствору полухлористой меди, и предел насыщения зависит от количества присутствующего сульфата меди. Вышеописанная смесь может поглотить объем окиси углерода, в восемнадцать раз превышающий ее собственный объем. Ее действие несколько медленнее действия полухлористой меди; после того как она будет насыщена окисью углерода наполовину, действие раствора еще более замедлится, однако, поглощение окиси углерода останется достаточно полным до предела насыщения. Для быстрого анализа можно применить две пипетки: одна из них содержит полухлористую медь, а вторая — сернокислую закись меди.

Газы с большим содержанием окиси углерода могут быть предварительно обработаны полухлористой медью, а затем пропущены через пипетку с сернокислой закисью меди. Медно-сернокислая смесь поглощает этилен, пропилен, бутилен, небольшое количество ацетилена и немного кислорода, но не поглощает метан, другие предельные углеводороды, водород и азот.

Поглотители для пропана и бутана. Единственным поглотителем для пропана и бутана в присутствии метана и этана, исключая дымящую серную кислоту, уже описанную нами, является этиловый спирт; но и этот поглотитель не может считаться достаточно удовлетворительным, поскольку все четыре углеводорода в той или иной степени растворимы в нем. Приблизительная растворимость некоторых из горючих газов в абсолютном спирте при 0° С и 760 *мм* ртутного столба дана в табл. 4.

Таблица 4

Растворимость углеводородов в абсолютном спирте

Наименование газа	Приблизительное количество куб. сантиметров газа, растворяемых 100 *см*³ абсолютного спирта при 0° С и 760 *мм* рт. ст.
Ацетилен (C_2H_2)	680,0
Метан (CH_4)	52,2
Этан (C_2H_6)	150,0
Пропан (C_3H_8)	820,0
Бутан (C_4H_{10})	1 800,0
Пентан (C_5H_{12})	Очень растворим

Из этой таблицы можно заключить, что в отсутствии непредельных углеводородов пропан и бутан с известными предосторожностями могут быть определены в присутствии метана и этана. Эти предосторожности заключаются в следующем: спирт, который должен быть абсолютным, насколько это возможно, сначала насыщают метаном и этаном. Для того чтобы привести в равновесие раствор метана и этана с анализируемым газом, пропускают через раствор две или три порции газа по 100 *см*³ и затем выбрасывают их. После этой операции спирт готов для поглощения всех углеводородов, исключая метан и этан. В случае, если в газе отсутствуют бензол и непредельные углеводороды, уменьшение объема может быть уверенно отнесено за счет поглощения пропана, бутана и пентана. После пропускания через спирт газ перед измерением должен быть промыт водой для удаления паров спирта.

Поглотители для ацетилена, этилена и пропилена. Лучший поглотитель для ацетилена — ацетон, который может растворить 24 объема ацетилена при атмосферном давлении. Другие поглотители — это сильно концентрированный раствор марганцевокислого калия, который окисляет его в щавелевую кислоту, и слабощелочный раствор полухлористой меди или солн серебра; они реагируют с ним до образования твердого осадка. Марганцевокислый калий также окисляет этилен и пропилен, образующие при этом гликоли. Как было указано выше, ацетилен очень хорошо поглощается дымящей серной кислотой, точно так же как непредельные углеводороды и бензол.

РАЗЛИЧНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Определение сероводорода в газах

Метод определения. Количественное определение сероводорода, содержащегося в газе, не может быть произведено обычным путем с помощью поглощения в газоаналитической аппаратуре. Следующий метод дает точные результаты в том случае, если он проведен достаточно тщательно. В основном он заключается в пропускании измеренных порций анализируемого газа через раствор едкого натра или едкого кали или через аммиачный раствор хлористого кадмия или сульфата цинка, подкислении раствора соляной кислотой и титровании иодом освобожденного сероводорода.

Аппаратура. 20 *см*³ поглощающего раствора помещают в колбу Эрленмейера или Флоренса емкостью в 500 *см*³ и разбавляют водой до 200 *см*³. Колбу закрывают резиновой пробкой с двумя отверстиями, куда вставлены две стеклянные трубки для впуска и выпуска газа. Впускная трубка должна быть достаточно длинной, чтобы с одной стороны доходить до дна колбы, а с другой — на 12—15 *см* выступать над пробкой, закрывающей колбу. Выпускная трубка должна иметь внутри колбы короткий конец. Для удобства соединений обе трубки должны быть отогнуты под прямым углом сейчас же по выходе их из пробки наружу. Впускную трубку соединяют небольшой резиновой трубкой с краном магистрали для отбора проб, по которой газ протекает через нее более или менее равномерно. Если таковой не имеется, то труба, из которой отбирается проба газа, должна

быть хорошо промыта сильной струей газа перед присоединением колбы, и газ должен выпускаться через одну или две горелки во все время производства анализа. Если для анализа применяется раствор едкого натра или едкого кали, то выпускная трубка колбы может быть присоединена непосредственно к измерительной аппаратуре; если же в качестве реагента применяется аммиачный раствор, то газ пропускают через небольшую промывную склянку с 5-процентным раствором серной кислоты для удаления паров аммиака, включаемую между колбой с реагентом и измерительной аппаратурой.

Установка для измерения газа. Наиболее удобным для измерений является тщательно проградуированный мокрый счетчик. Четырехлитровый аспиратор и однолитровый градуированный сосуд могут быть применены вместо счетчика. Аспиратор наполняется водой, отверстие закрывается резиновой пробкой с одним отверстием, через которое аспиратор соединен с поглотительным сосудом. Поступающий в аспиратор газ вытесняет из него воду через нижнее отверстие. Об объеме поступившего газа судят по объему вытесненной воды. Для производства анализа достаточно 3 *л* газа. Измеренный объем газа приводят к нормальным условиям путем пересчета температуры и давления (см. таблицы приведения к нормальному объему). Температура измеряется термометром, вставленным в трубку, соединяющую аспиратор и колбу с раствором. Давление измеряется манометром, присоединенным в любом месте трубки, соединяющей измерительную установку и колбу с раствором. В случае применения счетчика давление замеряется по диаметру счетчика.

Показания манометра складываются с показанием барометра; в полученное таким образом общее давление газа вводится поправка на давление паров воды, которые могут в данном случае считаться насыщающими газ.

Титрование сероводорода. После того как описанный выше объем газа пропущен через поглощающий раствор, колба отключается от газовой линии, подающая трубка промывается приблизительно 100 *см*³ воды и разбавленной соляной кислотой (1 : 1); затем в колбу приливают около 5 *см*³ раствора крахмала, раствор подкисляют той же соляной кислотой и немедленно оттитровывают освободившийся сероводород до появления устойчивой синей окраски раствора. Титрование производят децинормальным ($n/10$) раствором иода или иодноватокислой соли, который быстро приливается с легким взбалтыванием. Расчет количества сероводорода ведется, исходя из количества куб. сантиметров раствора, употребленного для титрования. Приводим расчет.

1 *см*³ $n/10$ титрованного раствора иода или иодноватокислой соли соответствует 1,17 *см*³ объема сероводорода. Помножая количество кубических сантиметров титрованного раствора на 1,17, получаем объем сероводорода, содержащегося во взятой пробе газа. Затем определяем полный объем газа. Поскольку углекислота была поглощена вместе с сероводородом, полный объем газа определяется приведением измеренного объема к нормальным условиям, как это указывалось выше, путем прибавления объема сероводорода, найденного титрованием, и деления этой суммы на 100% минус процент углекислоты в газе.

$$\text{Общий объем первоначального газа} = \frac{\text{измеренный объем газа} \times \text{фактор приведения к нормальным условиям} + 1{,}17 \times \times \text{число } см^3 \text{ раствора иода}}{100\% - \text{процент } CO_2}.$$

Процент содержания углекислоты получаем из анализа.

Содержание сероводорода может быть подсчитано по следующим формулам:

$$\text{Количество граммов } H_2S \text{ на 1 } м^3 = \frac{см^3 \text{ раствора иода} \times 0{,}0017}{м^3 \text{ газа, взятого для анализа}};$$

$$\%\ H_2S \text{ по объему} = \frac{г \cdot H_2S \text{ на 100 } м^3}{1460{,}17}.$$

Необходимые реактивы. Крахмальный индикатор. 1) Эмульсия из 6 *г* крахмала в 100 *см*³ холодной воды осторожно приливается к 1 *л* кипящей воды, содержащейся в соответствующем сосуде. После кипячения в течение 5 мин. сосуд и его содержимое охлаждают и для сохранения раствора к нему приливают раствор из 6 *г* хлористого цинка в 50 *см*³ холодной воды. После тщательного смешения раствор оставляют на 24 часа, взбалтывая его время от

времени. После осаждения более тяжелых частиц оставшаяся жидкость декантируется и к ней прибавляется 3 г иодистого калия.

2) К эмульсии, состоящей из 6 г растворенного крахмала в 25 *см*³ холодной воды, осторожно добавляется раствор 1 г едкого натра приблизительно в 10 *см*³ воды; все это размешивается до желатинизации. Образовавшуюся массу переносят в больший сосуд и разбавляют до 1000 *см*³. После добавления и растворения 3 г иодистого калия раствор готов к употреблению.

Аммиачный раствор хлористого кадмия

Хлористый кадмий	5 г
Вода	375 *см*³
Аммиак	625 „

Аммиачный раствор сульфата цинка

Сульфат цинка	10 г
Аммиак	50 *см*³
Вода в количестве, необходимом для доведения раствора до	1 000 „

Раствор едкого кали или едкого натра

Едкий кали или едкий натр	20 г
Вода	1 000 *см*³

Децинормальный раствор иодноватокислого калия

Иодноватокислый калий	3,7 г
Иодистый калий	12 „
Едкий кали	1 „
Вода в количестве, необходимом для доведения раствора до	1 000 *см*³

Иодноватокислый калий, иодистый калий, и едкий кали сначала растворяют в 300 *см*³ воды, а затем разбавляют до 1000 *см*³.

Децинормальный раствор иода

Иод	12,7 г
Иодистый калий	18,0 „
Вода	1 000 *см*³

Иод и иодистый калий помещают в градуированную однолитровую склянку, к ним приливают 50 *см*³ холодной воды и встряхивают склянку до растворения иода. Затем раствор разбавляется водой до 1 *л* и оставляется стоять на время не менее 24 час., после чего устанавливается титр раствора.

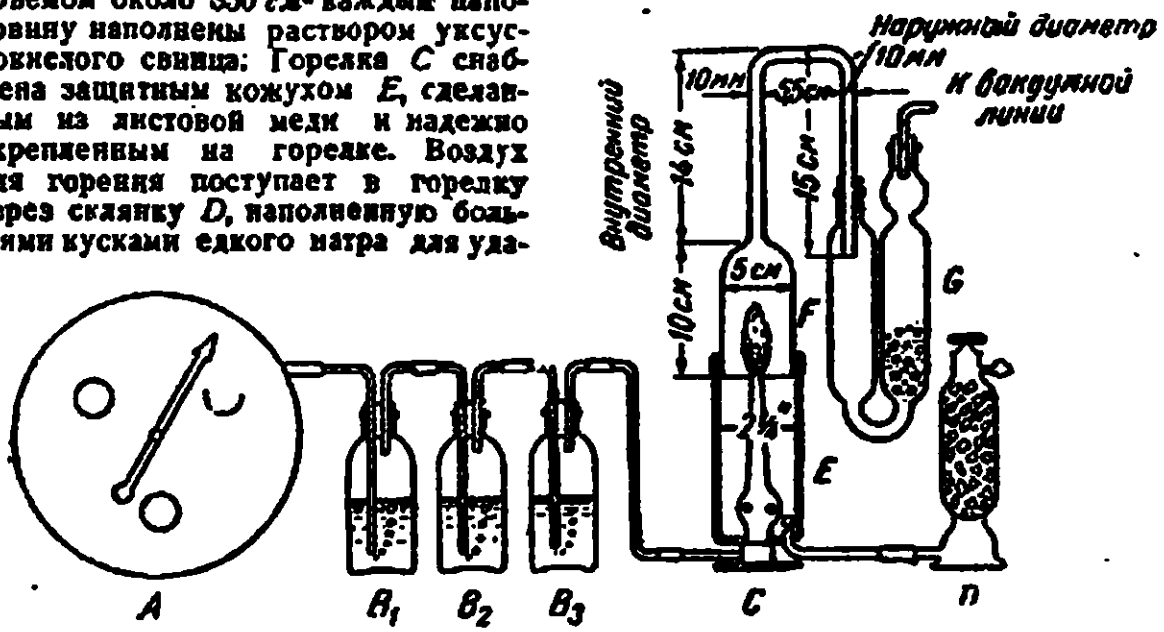
Титрование растворов. Растворы иода или иодноватокислого калия титруются раствором *н*/10 тиосульфата натрия, который в свою очередь титруется *н*/10 раствором марганцевокислого калия. Марганцевокислый калий титруется *н*/10 раствором щавелевокислого натрия. Раствор приготовляется и титруется следующим образом: 3,17 г марганцевокислого калия растворяют приблизительно в 950 *см*³ свежей кипящей воды, оставляют до охлаждения, а затем разбавляют до нужной концентрации свежедистиллированной водой. Точно так же растворяют 6,7 г щавелевокислого натрия в 300 *см*³ воды и разбавляют затем до 1000 *см*³. Для титрования перманганата 50 *см*³ раствора щавелевокислого натрия помещают в стакан емкостью 400 *см*³, содержащий 200 *см*³ воды и 20 *см*³ разбавленной серной кислоты (1 : 1). Содержимое стакана нагревают до 80° С и раствор перманганата вливают в него из бюретки сначала медленно, а затем быстрее до тех пор, пока одна капля не сообщит раствору устойчивую розовую окраску. Перманганат может быть более крепкой концентрации. В этом случае количество приливаемой воды может быть найдено умножением на множитель 19 разницы между 50 и фактическим количеством куб. сантиметров использованного перманганата. Раствор тиосульфата натрия приготовляется растворением 24,82 г этой соли в 400—500 *см*³ воды и разбавляется до 1000 *см*³. Раствор должен быть децинормальным, однако он нуждается в проверке перманганатом; точно так же должны быть проверены растворы иода и иодата.

Проверка производится следующим образом. К 300 *см*³ воды, находящейся в стакане емкостью 600 *см*³, приливают 10 *см*³ соляной кислоты и 10 *см*³ раствора иодистого калия (10-процентного). К ним приливают 25 *см*³ титрованного раствора перманганата и оттитровывают освободившийся иод раствором тиосульфата. Раствор взбалтывается. Когда окраска раствора станет бледнеть, приливают крахмал, а затем медленно приливают тиосульфат до окончательного обесцвечивания. Таким же образом титруют 25 *см*³ нормального раствора иода и иодистого калия. Полученные результаты дают возможность подсчитать нормальность раствора. В случае необходимости устанавливают растворы иода и иодистого калия точно децинормально.

Определение органической серы в газе коксовальных печей

Аппаратура. На фиг. 1 показан прибор для определения органической серы в газе коксовальных печей.

Счетчик *A* градуирован на 0,001 куб. фута (28,3 *см*³). Промыватели B_1, B_2, B_3 объемом около 350 *см*³ каждый наполовину наполнены раствором уксуснокислого свинца; Горелка *C* снабжена защитным кожухом *E*, сделанным из листовой меди и надежно укрепленным на горелке. Воздух для горения поступает в горелку через склянку *D*, наполненную большими кусками едкого натра для удаления из воздуха сероводорода и сернистого газа (двуокиси серы). Труба *F* сделана из стекла „пайрекс" и соединена с кожухом горелки посредством резиновой ленты или прокладки, или же короткого отрезка резиновой трубки большого диаметра. Узкий конец трубы соединен со стандартной пипеткой *G* для определения серы в нефтях. Пипетка наполнена стеклянными бусами. В пипетку наливают 15 *см*³ нормального раствора углекислого натрия. Для засасывания воздуха в горелку через *D* и для пропускания продуктов горения через пипетку последняя соединена с вакуумнасосом или с вакуумной линией.



Фиг. 1. Аппарат для определения органической серы.

A — газовый счетчик мокрого типа; B_1, B_2, B_3 — очистительные склянки, содержащие раствор уксуснокислого свинца; *C* — горелка из прибора Рефера; *D* — очиститель воздуха, наполненный твердым натром; конец трубки, соединяющей очиститель с горелкой, закрыт, а воздух поступает в горелку через отверстия, сделанные в стенке трубки; если воздух поступает через конец трубки, горелка плохо работает; *E* — медный кожух, снабженный в верхнем конце резиновой прокладкой для герметического соединения; *F* — труба, сделанная из стекла „пайрекс" по размерам, указанным на фигуре; *G* — стандартная поглотительная пипетка для поглощения серы, наполненная стеклянными бусами; содержит раствор углекислого натрия.

Ход анализа. Определение производится следующим образом. Для насыщения газом воды, находящейся в счетчике, пропускают через него в течение часа 0,3 *м*³ газа. Затем к счетчику присоединяются промыватели B_1, B_2, B_3. Для насыщения газом уксуснокислого свинца пропускают через промыватели 55—60 *л* газа. После этого к промывателям присоединяют горелку, зажигают ее и быстро подводят к трубке пипетки; продукты горения пропускают через пипетку до тех пор, пока не будут сожжены 14—15 *л* газа. Потом выключают газ. Пропускание же газа через пипетку продолжают еще в течение 2 мин., после чего прибор оставляют охлаждаться до комнатной температуры. С помощью промывной склянки

трубу *F* промывают тонкой струей нейтрального раствора метилоранжа 10 *см*³, содержащего 0,003 г метилоранжа на 1000 *см*³ воды, и сливают его в пипетку с углекислой содой. Не удаляя раствор углекислого натрия из пипетки, избыток углекислого натрия титруют нормальным раствором серной кислоты. Во время титрования жидкость в пипетке следует перемешивать попеременным поднятием и опусканием уровня ее в пипетке с помощью присоединенной резиновой груши. Для определения количества граммов серы в пошедшем на опыт газе нужно вычесть из 15 количество куб. сантиметров использованной кислоты (получаем количество нейтрализованного углекислого натрия) и полученную разницу умножить на 0,0005.

Объем газа приводится к нормальным условиям, и результат высчитывается по формуле:

$$\text{количество граммов } S \text{ в } 1\ м^3 = \frac{см^3\ Na_2CO_3 \times 0{,}0005}{м^3 \text{ газа, взятого для анализа}}.$$

Необходимые растворы

Раствор углекислого натрия

Углекислый натрий (очищенный и просушенный) . . . . . 1,6529 г
Вода в количестве, необходимом для доведения раствора до 1 000 *см*³

Раствор серной кислоты

Этот раствор просто приготовляется разбавлением 31,3 *см*³ нормальной серной кислоты в воде до 1000 *см*³. Раствор титруют раствором углекислого натрия и доводят до необходимой крепости.

Раствор уксуснокислого свинца

Уксуснокислый свинец . . . . . 100 г
Уксусная кислота . . . . . 30 *см*³
Вода в количестве, необходимом для доведения раствора до 1 000 „

Подсчет полного количества серы. Описанный метод без применения промывателей с уксуснокислым свинцом не может быть использован для определения полного количества серы в газе, так как счетчик поглощает некоторое количество сероводорода, прежде чем газ достигнет аппаратуры. Поэтому полное количество серы находят, складывая количество сероводорода с количеством органической серы, определяемым описанным выше методом, и выражая сумму в килограммах на 100 *м*³.

Полное содержание серы на 1 *м*³ газа равно содержанию органической серы на 1 *м*³ газа в граммах плюс содержание H_2S на 1 *м*³ газа в граммах, умноженное на 0,941, где 0,941 — коэфициент для перевода сероводорода в серу.

Определение ацетилена в газах

Ход анализа. 30 *л* газа пропускают через 30 *см*³ свежеприготовленного аммиачного раствора полухлористой меди. Объем газа приводится к нормальным условиям. Осадок фильтруют и промывают водой, содержащей немного аммиака, до тех пор, пока вода не обесцветится. Обрабатывают осадок разбавленным раствором соляной кислоты (1 : 1). Обработку ведут на беззольном фильтре, а затем промывают водой; фильтр сжигают; полученное растворяют в двух каплях азотной кислоты и раствор приливают к раствору соляной кислоты. Этот новый раствор нагревают до кипения; медь осаждают при помощи некоторого избытка едкого натра. Этот осадок отфильтровывают, промывают водой, прокаливают и взвешивают как окись меди.

$$\%\ C_2H_2 = \frac{\text{вес CuO в } г \times 0{,}01485}{\text{число } м^3 \text{ использованного газа, приведенного к нормальному объему}}.$$

Поправочный коэфициент для приведения газа к нормальным условиям находят по табл. 8, помещенной в настоящей главе.

Необходимые растворы. Аммиачный раствор полухлористой меди приготовляется следующим образом. 300 *см*³ кислого раствора полухлористой меди приливают к 4 *л* воды; после декантации раствора полученный осадок переводится в градуированный цилиндр с пробкой емкостью в 250 *см*³. После 2 час.

стояния осадок и жидкость выкачивают из цилиндра с помощью сифона до метки 50 *см*³, а затем доливают в него до метки 230 *см*³ разбавленного аммиака (1 : 3). Цилиндр закрывают пробкой и хорошо встряхивают; после этого раствор оставляют на несколько часов. Затем раствор переводят в пробирки, содержащие кусочки медной проволоки, и сохраняют его закрытым и готовым к употреблению. Для этой цели пригодны пробирки со стеклянными пробками емкостью в 30 *см*³.

Определение цианистой кислоты и циана в газах

Цианистая кислота и циан содержатся во многих газах, получающихся в промышленности, и их определения приобретают все большее и большее значение. В газах коксовальных печей также содержится цианистая кислота. Приводим здесь два метода определения цианистой кислоты в газе коксовальных печей, однако рекомендуем первый метод как более быстрый, точный и удобный.

Метод 1. Цианистая кислота в коксовом газе

Ход анализа. В каждую из двух промывных склянок емкостью около 250 *см*³ помещают 100 *см*³ поглощающего раствора (см. ниже) и присоединяют их к газовой линии или к линии для взятия проб газа. Склянки включают в линию последовательно с мокрым счетчиком. Через промывные склянки пропускают 140 *л* газа со скоростью около 50 *л/час*. После этого содержимое промывных склянок сливают в мерную колбу емкостью в 500 *см*³, и хорошо промывают склянки водой. Мерная колба доливается водой до метки, и ее содержимое тщательно смешивается. Осажденный при этом сернистый свинец отфильтровывают на сухом фильтре и с помощью пипетки переводят 200 *см*³ очищенного фильтрата в стакан для титрования емкостью 400 *см*³. Стакан ставят на лист черной бумаги и вливают в него 5 *см*³ 10-процентного раствора иодистого калия: туда же приливают из бюретки, постоянно помешивая, *n*/10 раствор азотнокислого серебра до появления устойчивой желтой мути. Появление мути считается концом реакции.

Поскольку раствор поглощает сероводород и углекислоту, замеренное количество газа делят на 100% минус процент поглощенных сероводорода и углекислоты; делается это для того, чтобы найти действительный объем газа, взятого для анализа. Этот объем затем приводится к нормальным условиям. Результат анализа подсчитывают затем согласно следующей формуле:

$$\text{Количество граммов HCN на 1 } м^3 = \frac{см^3\ n/10\ AgNO_3 \times 0{,}0054}{м^3 \text{ газа, взятого для анализа}}.$$

Необходимые растворы

Децинормальный раствор азотнокислого серебра

Азотнокислое серебро	16,989 *г*
Вода в количестве, необходимом для доведения раствора до	1000 *см*³

Для проверки этого раствора разбавляют 25 *см*³ до 250 *см*³ в стакане емкостью 400 *см*³. Разбавленная соляная кислота (1 : 5) капля по капле приливается в стакан до тех пор, пока не окончится выпадение осадка. После этого стакан ставят в место, защищенное от света, до осаждения осадка на дно стакана. Затем отфильтровывают хлористое серебро на взвешенное стекло Гуча или в алундовый тигель и промывают его однопроцентной соляной кислотой и дважды холодной водой. Осадок высушивают при 110° С, очень осторожно прокаливают, охлаждают и взвешивают.

Вес хлористого серебра, разделенный на 0,3584, дает количество куб. сантиметров *n*/10 раствора, эквивалентного 25 *см*³ употребленного раствора.

Поглощающий раствор

Едкий натр	150 *г*
Азотнокислый свинец	50 „
Вода	1000 *см*³

Едкий натр растворяют приблизительно в половине воды, предназначенной для приготовления раствора, а в остающейся части воды растворяют азотнокислый свинец. Затем два раствора сливаются вместе и перемешиваются до тех пор, пока не растворится выпавший вначале осадок.

Метод 2

Весовой метод. В этом анализе применяется поглотительная система, состоящая из 6 промывных склянок и счетчика. Первые три склянки содержат по 100 *см*³ раствора уксуснокислого свинца, полученного путем растворения 100 *г* уксуснокислого свинца в 1000 *см*³ воды, содержащих 30 *см*³ ледяной уксусной кислоты. Раствор поглощает сероводород. Последние три склянки содержат по 60 *см*³ *н*/10 раствора едкого кали. Газ пропускается через склянки в течение 4 час. со скоростью 50—80 *л*/*час*. Растворы трех последних склянок переводят в мерную колбу емкостью 500 *см*³, куда добавляют воду до метки, и полученный раствор хорошо перемешивают. Порции по 50 *см*³ обрабатывают нагретым 10-процентным раствором сернокислой окиси железа. Добавляют избыток хлорного железа; при подкислении разбавленным раствором серной кислоты выпадает берлинская лазурь. Осадок фильтруют и промывают горячей водой до удаления серной кислоты, после чего осадок (окись железа) прокаливают и взвешивают. Вес окиси железа множат на 0,8376 и получают эквивалентный вес циана (C_2N_2), который затем переводят в граммы на куб. метры.

Объемный метод. Берлинская лазурь может быть оттитрована сейчас же *н*/50 раствором едкого натра. Раствор едкого натра приливают понемногу до тех пор, пока не разложится берлинская лазурь. Во время приливания раствора едкого натра содержимое сосуда держат горячим для ускорения реакции. Избыток едкого натра титруется *н*/50 раствором кислоты. Жидкость необходимо нагревать и быстро мешать, так как в присутствии избытка едкого натра берлинская лазурь сообщает жидкости зеленую окраску. Когда окраска раствора станет светложелто-зеленой, реакция окончена.

1 *см*³ *н*/50 NaOH = 0,00078024 *г* C_2N_2 или 0,0008105 *г* HCN

Определение легкого масла или бензола

Для определения бензола рекомендуются два метода: метод низких температур и абсорбционный.

Метод низких температур

По этому методу определенный объем газа пропускают через специально тарированный сосуд, охлажденный до —70° С. При этом в сосуде конденсируется легкое масло, вес которого можно найти, взвесив сосуд с конденсатом.

Абсорбционный метод

Ход анализа. Легкое масло определяется абсорбцией его в ректифицированном соляровом масле и последующим взвешиванием. Газ пропускают через очистительную и поглотительную системы и мокрый счетчик. Очистительная и поглотительная системы устроены следующим образом.

Очистительная система. Перед тем как газ попадет в поглотительную систему, необходимо избавиться от содержащихся в нем нафталина, углекислоты, водяных паров и сероводорода. Нафталин быстро поглощается при пропускании газа через насыщенный раствор пикриновой кислоты. Другие возможные компоненты удаляются твердым едким натром. Соответственно этому поглотительная система составляется из двух склянок емкостью по 500 *см*³ предпочтительно типа Дрекселя; в одну из них наливают 300 *см*³ раствора пикриновой кислоты, а в другую насыпают едкий натр в кусках. Поскольку резина поглощает бензол, газ не должен приходить в соприкосновение с резиной на всем пути, начиная от газовой магистрали и кончая поглотителями. Все соединения между склянками делают из стекла и корковых пробок. Когда сделаны все соединения (газовая магистраль — склянка Дрекселя с раствором пикриновой кислоты — склянка с едким натром), медленно пропускают 55—60 *л* газа через всю систему для насыщения раствора и наполнения склянок.

Поглотительная система. Перед началом анализа очищенное масло перегоняется с водяным паром для удаления летучих частей, а затем хорошо осушается чистым сухим воздухом путем продувания его в течение 24 час. Воздух осушается пропусканием его через склянку, наполненную твердым едким натром. В каждую из пяти высоких склянок Дрекселя емкостью по 200 *см*³, составляющих поглотительную систему, наливают по 100 *см*³ приготовленного масла. В случае, если газ содержит очень мало легкого масла или бензола, можно ограничиться четырьмя склянками. Если вместо склянок Дрекселя употребляют колбы, каждая из них снабжается впускной трубкой, доходящей до дна, и выпускной трубкой того же диаметра. Обе трубки согнуты под прямым углом сейчас же по выходе их из пробки наружу, при помощи которой они соединены с колбой. Если применяются склянки Дрекселя, то необходимо позаботиться о том, чтобы пробки были хорошо притерты и не проницаемы для газа, а вес каждой склянки был меньше 100 *г*. Для предохранения масла от разбрызгивания концы трубок заполнены ватой. Для составления поглощающей системы колбы или склянки соединяются друг с другом короткими резиновыми трубками. Концы соединительных трубок и концы колб или склянок соединяются встык так близко, как это возможно. 30 *л* газа, из которого удален бензол, пропускают медленно через всю установку для насыщения масла газом. После этого поглотительные склянки разъединяют, оставляя резиновые соединения на входных трубках, и поднимают пробки для доступа воздуха в склянки. Склянки оставляют открытыми в течение 8—10 мин., после чего пробки вставляют на место, и каждая склянка взвешивается (вес записывается с точностью до миллиграмма).

Производство анализа. Для производства анализа взвешенные склянки снова соединяются, образуя поглотительную систему, и счетчик присоединяется к свободному концу поглотительной системы коротким куском резиновой трубки; все соединения тщательно проверяются на вакуум. Струя газа пропускается через поглотительную систему в соответствующем количестве. Степень абсорбции, а отсюда и точка насыщения масла зависят от скорости газовой струи и от температуры; поэтому необходимо следить, чтобы поглощение составляло выше 99% и количество проскочившего бензола могло быть точно учтено. При точном анализе можно найти, что имеется некоторая зависимость между количествами бензола, поглощенного и поступающего в каждую склянку, и что это отношение примерно одинаково для всех склянок. Например, если отношение абсорбции равно 0,7, а количество легкого масла равно 2,5 *г*, то в первой склянке будет поглощено 1,750 *г*, во второй — 0,525 *г*, в третьей — 0,157 *г*, в четвертой — 0,048 *г* и в пятой — 0,014 *г*. Количество бензола, прошедшее через пятую склянку, составляет 0,006 *г*. Температура, скорость газовой струи и количество газа могут во время опыта регулироваться так, чтобы отношение абсорбции составляло 0,65—0,7; в этом случае количество легкого масла, проходящее через пятую склянку, может быть подсчитано с достаточной точностью, поскольку оно составляет около половины того количества, которое в ней поглощено. Общее количество газа, необходимое для анализа, составляет от 50 до 100 *л* для богатого или неочищенного газа и от 80 до 140 *л* для очищенного газа.

По окончании анализа склянки Дрекселя или колбы разъединяются и в них снова впускается воздух. После этого склянки взвешиваются. Первоначальный вес (до пропускания газа) каждой склянки вычитают из полученного и эту разницу вместе с подсчитанным количеством легкого масла, ушедшего из последней склянки, складывают, находя тем самым общее количество легкого масла во взятом на анализ газе. Объем взятого газа приводят к нормальным условиям, не забывая при этом добавить к нему объем поглощенных сероводорода и углекислоты.

Расчет можно произвести и другим способом: объем измеренного газа приводят к нормальным условиям, делят на 100% минус процент поглощенных сероводорода и углекислоты и таким образом находят общее количество газа, употребленного на анализ. Эти результаты затем представляют в следующем виде.

$$\text{Количество литров легкого масла на тонну коксующегося угля} = \frac{A \cdot B}{WD},$$

где A — найденный вес легкого масла в *г*;

B — количество газа в *л*, приведенного к нормальным условиям, очищенного или лишенного легкого масла и образующегося из 1 *т* коксующегося угля;

W — вес 1 *л* легкого масла в *г*;

D — общее количество газа в *л*, употребленного на анализ (после приведения его к нормальным условиям).

Вес 1 *л* легкого масла в граммах (W) неодинаков на различных производствах; поэтому не может быть дан стандартный вес 1 *л*.

Поскольку легкое масло содержит 70—80% бензола и его компоненты трудно отделимы, принято считать его состоящим только из бензола, подсчитанного в объемных единицах. Отсюда окончательные результаты полученные при помощи этого метода, переводятся в килограммы и делятся на число литров газа, употребленного на анализ (приведенного к нормальным условиям). Этот результат затем делят на вес 1 *л* газообразного бензола (приведенного к нормальным условиям) и множат на 100, находя объемное процентное содержание бензола в газе.

Определение нафталина

Сравнительный метод

Этот метод предназначен для газов с очень малым содержанием нафталина. Он основан на сравнении мутности выпавшего осадка пикрата нафталина, полученного из определенного количества нафталина (эталон), с мутностью осадка, полученного из измеренного объема испытуемого газа. Для этого употребляют насыщенный водный раствор пикриновой кислоты. Стандартные образцы (эталоны) приготовляют по нижеприводимому способу.

Приготовление эталонов. 30-граммовая широкогорлая склянка снабжается резиновой пробкой с двумя отверстиями. В пробку вставляются две стеклянные трубки, согнутые под прямым углом, для впуска и выпуска газа. Впускная трубка достигает дна склянки. Склянка заполнена на две трети химически чистым нафталином, поверх которого накладывают вату, занимающую верхнюю треть.

Сухой газ, не содержащий нафталина, медленно пропускается через склянку с нафталином в течение 5—10 мин. Затем склянка отделяется, и концы впускной и выпускной трубок закрываются с помощью коротких резиновых трубок и стеклянных палочек. Это делается весьма тщательно для того, чтобы в склянке при всех взвешиваниях всегда находилось по возможности одинаковое количество газа. Склянку точно взвешивают. Определение количества времени, необходимого для того, чтобы, например, 0,0004 *г* нафталина было унесено газом, производится до включения склянки в установку. После того как это время определено, газовая струя регулируется так, чтобы быть, насколько это возможно, постоянной. Для стандартов берут 60-граммовые склянки со стеклянными пробками. Склянки заполняются почти до горла раствором пикриновой кислоты, и каждая из них присоединяется соответствующими соединениями к склянке с нафталином для пропуска через нее газа.

Склянку, предназначенную для первого эталона, помещают непосредственно после взвешенной склянки с нафталином и пропускают через нее газ в течение такого времени, чтобы испарилось 0,0004 *г* нафталина. Точное количество нафталина, улетучивающегося из склянки, определяется взвешиванием. Это количество помечается на эталоне. Таким путем приготовляются эталоны от 0,0004 до 0,0020 *г*, по возможности с интервалом в 0,0002 *г*. Эталоны с содержанием нафталина больше 0,0020 *г* приготовляются лишь в случае высокого содержания нафталина в газе. Все эталоны заполняются до одного уровня насыщенным раствором пикриновой кислоты и заливаются парафином или воском.

Ход анализа. С приготовленными вышеописанным образом эталонами анализ производят следующим образом: присоединяют к газовой линии склянку точно таких же размеров и с тем же уровнем раствора, как и склянки с эталонами; счетчик ставится после склянки; после этого пропускают газ до тех пор, пока не выпадет осадок; показания счетчика записываются и корректируются. Сравнение с ближайшими эталонами производится перед источником света, причем перед сравнением обе склянки (стандартная и сравниваемая) хорошо встряхиваются.

$$\text{Количество граммов нафталина на 1 } м^3 = \frac{\text{эталон}}{м^3 \text{ газа, взятого для анализа}}$$

Метод титрования

Ход анализа. Две пробирки 22×176 *мм* снабжаются резиновыми пробками с двумя отверстиями, через которые проходят впускная и выпускная трубки. В каждую из них наливают по 20 *см*³ насыщенного раствора пикриновой кислоты и после этого соединяют друг с другом и с мокрым газовым счетчиком. Свободный конец этих пробирок соединяют стеклянной трубкой с помощью резиновой пробки с магистралью. Трубка входит в магистраль на 125—130 *мм*. При соединении необходимо концы трубок соединять встык для того, чтобы свести до минимума соприкосновение газа с резиновыми трубками. Затем пропускают газ со скоростью около 110—120 *л/час*. Пропускание газа производят до осаждения в пробирках около 0,05 *г* нафталина, что в пересчете на газ составляет примерно 55—56 *л* неочищенного газа или 425 *л* очищенного. Соединительная трубка убирается из магистрали, и в случае, если в ней сконденсировался нафталин, ее продувают воздухом с одновременным нагреванием для перевода его в пробирки с раствором пикриновой кислоты.

Пробирки разъединяются; содержащийся в них осадок переводят на 11-сантиметровый бумажный фильтр и тщательно промывают 1/120-нормальным раствором пикриновой кислоты. После того как осадок промыт, фильтр сушат воздухом (просасывая его через фильтр) и помещают в колбу Эрленмейера емкостью 250 *см*³. В колбу приливают около 100 *см*³ воды, после чего ее хорошо встряхивают до тех пор, пока фильтр не будет порван. Жидкость в колбе нагревают до кипения и приливают туда несколько капель фенолфталеина; заканчивают анализ титрованием *n*/20 раствором едкого натра. 1 *см*³ *n*/20 раствора едкого натра соответствует 0,0064 *г* нафталина. Объем газа, употребленного на производство анализа, приводят к нормальным условиям и подсчитывают количество граммов нафталина на 1 *м*³ газа.

$$\text{Количество граммов нафталина в 1 } м^3 = \frac{см^3\ n/20\ \text{NaOH} \times 0{,}0064}{м^3 \text{ газа, взятого для анализа}}.$$

Необходимые растворы

Стандартный *n*/20 раствор едкого натра

Едкий натр	2,1 *г*
Вода	1000 *см*³

Раствор с фенолфталеином в качестве индикатора титруется *n*/20 раствором серной кислоты, которая приготовляется и титруется чистым углекислым натрием.

n/120 раствор пикриновой кислоты

Пикриновая кислота	1,95 *г*
Вода	1000 *см*³

Определение пыли в газах

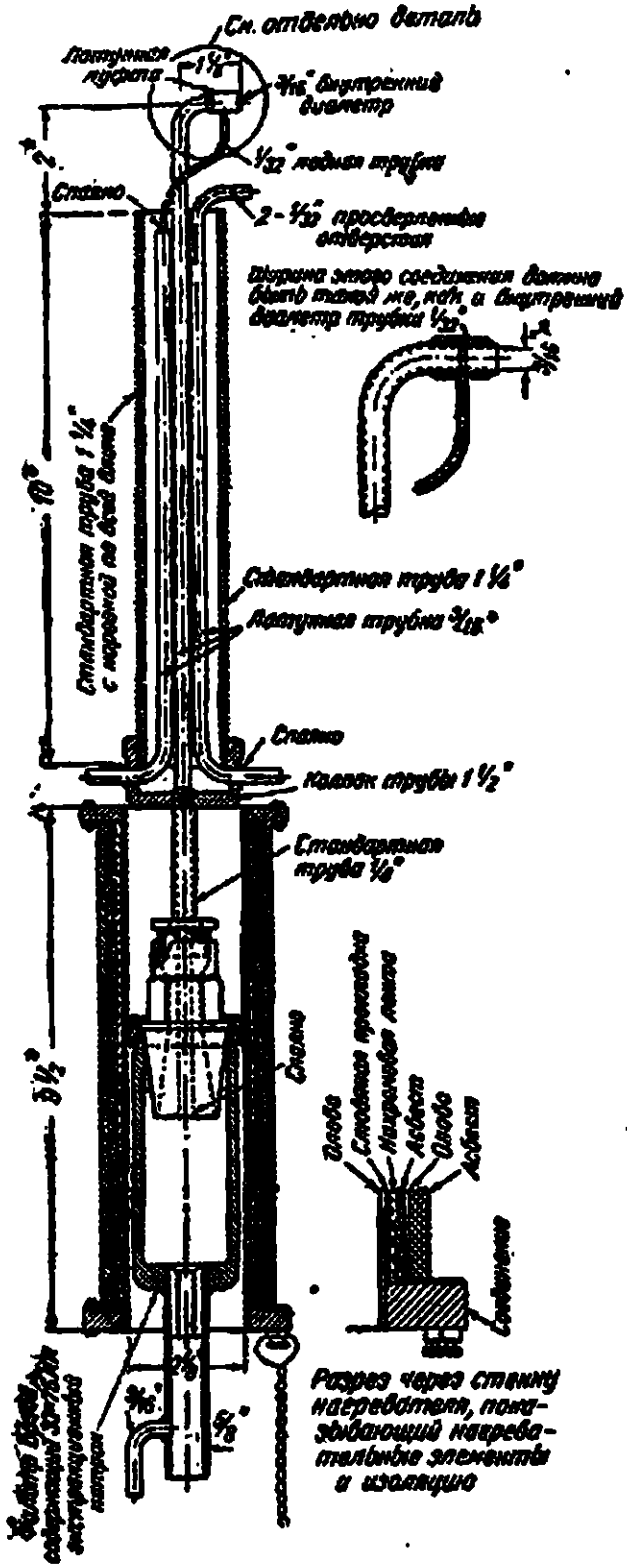
Меры предосторожности. Определение количества пыли в газах производится путем фильтрации и взвешивания пыли из измеренного объема газа. При этом необходимо, беря пробу газа, наблюдать за тем, чтобы скорость газа оставалась неизменной, иначе вследствие инерции твердых частиц могут получиться в измерениях большие ошибки. Так например, Brady и Touzalin [1] показали, что когда скорость газа в отводной трубе (для взятия проб газа) составляет половину скорости в газопроводе, результаты определений преувеличены на 44%.

Аппаратура. Прибор для определения пыли в газах показан на фиг. 2. Труба для отбора пробы должна иметь внутренний диаметр от $^5/_{32}$ до $^3/_{16}$" (4—5 *мм*). Ее помещают в магистраль отверстием против струи газа в точке средней скорости газа, находящейся приблизительно на расстоянии одной четверти радиуса по направлению от стенки к центру. Установка снабжена двумя трубками для измерения давления: одна — для измерения статического давления газа в магистрали и другая — для определения статического давления газа в трубе для отбора пробы. Эти трубки соединены с чувствительным манометром.

Во время производства анализа газовая струя в трубе для отбора проб регулируется при помощи аспиратора так, чтобы стрелка манометра держалась на нуле. Это положение стрелки свидетельствует об отсутствии разности давлений

[1] „J. Ind. Eng. Chem.", сентябрь 1911.

в магистрали и трубе для отбора проб и тем самым показывает, что скорости газа в них одинаковы. Трубя для отбора проб и трубки манометров вставляются в стандартную трубу диаметром $1^1/_4$" (32 *мм*), нарезанную во всю длину для ввертывания через переходную втулку в магистраль на глубину до 255 *мм*. Медная или чугунная пробка, навернутая на эту трубку, служит переходом к втулке, ввернутой в магистраль.



Фиг. 2. Аппарат для определения в газе взвешенных частиц.

А — отверстие в выходном конце трубки, служащее для установки термометра; *В* — патрубок, через который профильтрованный газ поступает в счетчик.

Некоторые аналитики предпочитают употреблять уплотняющую гайку; в этом случае трубка не нарезается и остается гладкой. Для закрывания отверстия служит сплошная пробка. В выходной конец трубы для отбора проб ввертывается фильтр Брэди, содержащий экстракционный патрон (33 × 75 *мм*), служащий фильтром. Этот фильтр помещен в цилиндрический электрический нагреватель, служащий для испарения попавшей в фильтр или сконденсировавшейся воды и содержания фильтра в сухом состоянии. Фильтр имеет два отверстия: одно большое, диаметром $^5/_8$" (около 15,5 *мм*), для термометра и одно меньшее, диаметром $^3/_8$" (около 9,5 *мм*), служащее выходом для газа, направляющегося в счетчик.

Ход определения. Перед началом определения вставляют в цилиндр сухой, взвешенный фильтровальный патрон, присоединяют манометр и счетчик и включают электрический ток. Когда патрон нагреется до нужной температуры (обычно около 100° С), открывают трубу, присоединяющую счетчик, удаляют из магистрали пробку и возможно быстрее вставляют в магистраль трубу для отбора пробы таким образом, чтобы конец ее находился под прямым углом к газовой струе. В том случае, когда производится определение пыли в доменных или в других промышленных газах, аналитик должен принять меры к тому, чтобы не дышать этими газами. Во избежание этой опасности анализ не должен производиться в закрытом помещении, и аналитик должен быть снабжен газовой маской. Тотчас же после того как труба вставлена в магистраль, ее повертывают по направлению к газовой струе, открывая одновременно отверстие для впуска газа в фильтр и включая насос для установки стрелки манометра на нуле. Перед впуском газа в счетчик газ охлаждают до точки росы или до атмосферной температуры. Количество газа, которое необходимо пропустить через аппарат, зависит от количества находящейся в нем пыли и регулируется аналитиком, который должен

иметь надлежащий навык в регулировании газовой струи в аппарате. Аспиратор включается по мере надобности для установления стрелки манометра на нуле. Если стрелка манометра не может дольше удерживаться на нуле, необходимо прекратить определение и удалить трубу для отбора пробы. После этого экстракционный патрон вынимают из аппарата, осушают его и взвешивают. Способ осушения зависит от состава пыли. Если пыль состоит из минеральных частиц, то осушение производится нагреванием патрона до 100—105° С; если же пыль содержит смолу или другие летучие вещества, осушение производится над концентрированной серной кислотой. Количество пыли подсчитывается в граммах на куб. метр сухого газа, приведенного к нормальным условиям.

Смола и твердая минеральная пыль в газе коксовальных печей и в других газах

Метод 1. Употребление фильтра для пыли и экстракционного патрона

Этот метод пригоден для определения в газе смоляного тумана и твердых частиц, причем здесь применяется та же труба для отбора проб, что и при определении количества пыли (фиг. 2). В этом случае метод определения также неизменен. Экстракционный патрон перед определением осушается в эксикаторе серной кислотой до постоянного веса. Во время производства определения экстракционный патрон нагревается до температуры, необходимой для поддержания его в сухом состоянии, достаточном для пропускания газа. Вместе с тем должны быть приняты и меры предосторожности против перегрева патрона во избежание потерь некоторых смоляных масел, нафталина и т. п. После того как счетчик зарегистрирует необходимое количество газа, прошедшее через аппарат и зависящее от содержания в газе смолы и других твердых частиц, определение прекращается. Вынутый из аппарата фильтр просушивается над серной кислотой до постоянного веса так же, как это было сделано перед определением. Затем промывают химически чистым бензолом трубу, причем бензол должен стекать во взвешенную фарфоровую чашку. Далее, током сухого воздуха (при комнатной температуре) испаряют бензол и остаток взвешивают. Если газ не содержит угля и минеральных частиц, то результаты взвешивания прибавляют к полученным ранее результатам взвешивания патрона и таким образом получают общий вес смолы в измеренном количестве газа.

В случае, если газ содержит частицы угля или минеральную пыль, как это бывает в ряде промышленных газов, смолистые вещества экстрагируются из патрона химически чистым бензолом. Общее количество пыли находят, после осушения патрона током сухого воздуха, вторичным взвешиванием его. Вес минеральной пыли находят сожжением экстракционного патрона, взвешиванием золы после сожжения и вычитанием веса золы самого патрона. Вес золы патрона узнают с помощью сожжения нескольких патронов и взвешивания их по отдельности.

Измеренный объем газа приводится к нормальным условиям, и эти результаты представляют в граммах на куб. метр делением веса на приведенный объем.

Метод 2. Применение „смоляной камеры"

При этом методе, применяемом только для определения смолы, установленный объем газа пропускают через бумажный фильтр, и количество смолы вычисляют или взвешиванием фильтра, или же сравнением цвета фильтра с осажденной смолой с цветом стандартного фильтра. Бумажный фильтр укреплен в специальном приспособлении, называемом „смоляной камерой". Камера непосредственно соединена с газовой магистралью, и газ измеряется газовым счетчиком, присоединенным к другому концу камеры. Соединение газового счетчика с камерой осуществляется небольшой резиновой трубкой, имеющей винтовой зажим для регулирования подачи газа в счетчик. Это приспособление непригодно для определения смолы в газах с большим содержанием ее. Для получения достаточно точных результатов газ должен находиться под давлением. Перед тем как начать анализ, производят предварительное определение максимальной скорости газовой струи, могущей пройти через бумажный фильтр (не разрывая его). Эта скорость зависит от содержания в газе водяных паров. В камеру помещают три 11-санти-

метровых бумажных фильтра. Камера соединяется с газовой магистралью и счетчиком, который ставят в этом случае перед камерой. После этого открывают кран магистрали и проходящую через установку газовую струю регулируют винтовым зажимом. После того как опытом установлена подходящая скорость газовой струи, в камеру помещают три бумажных фильтра, используемых при данном определении, и пропускают с установленной скоростью 30 *л* газа. После пропуска этого количества газа закрывают кран и вынимают из камеры бумажные фильтры. Если применяется колориметрический метод, то в колориметре производят сравнение фильтров с эталоном. Если же применяется весовой метод, то фильтры сушат в вакууме и взвешивают их, помещая между двумя часовыми стеклами. Взвешивание производят два раза: перед анализом и после него. Разность весов, отнесенная к приведенному объему пропущенного газа, показывает вес смолы в первоначальном газе.

Определение влажности в газах

Предварительные замечания

Парциальное давление. В смеси водяного пара и других газов каждый из компонентов ее имеет свое парциальное давление, пропорциональное его процентному содержанию в смеси; общее давление последней равно сумме всех парциальных давлений газов, входящих в ее состав. Каждый компонент при своем парциальном давлении занимает объем, равный объему всей смеси. Общее давление газа в газопроводе узнают сложением показаний манометра и показаний барометра. Водяные пары имеют свое давление, увеличивающееся при увеличении температуры и постоянное при данной температуре. Так напримеp, при температуре 0° С давление паров воды равно 0,9652 *мм* ртутного столба, а при 100° С — 760 *мм*. Вода будет испаряться в пространстве независимо от отсутствия или присутствия других газов и их давления до тех пор, пока парциальное давление ее паров не будет равно давлению паров воды, насыщающих пространство при данной температуре.

Точка росы. Температура, при которой пространство насыщено водяными парами, называется „точкой росы" относительно водяных паров, потому что если температура будет понижена без изменения давления, то произойдет выпадение росы. Если температура водяных паров выше точки росы, пары воды называют перегретыми.

„Увлеченная вода". Точка росы указывает количество воды, могущее содержаться в газе в виде пара, но, кроме этого количества, некоторое количество воды может содержаться в газе и в виде тумана. Эта вода называется „увлеченной водой". При определении влажности различают три случая.

Случай I. Газ насыщен водой. Газ или газовая смесь могут быть названы насыщенными водой в том случае, если они, во-первых, собраны под водой, во-вторых, пропущены над водой или через большое ее количество и их температура после соприкосновения с водой не изменилась, в-третьих, были охлаждены ниже точки росы. При этих условиях парциальное давление будет равно давлению паров воды и может быть найдено из температуры смеси (по табл. 29) в I части справочника, где дается вес в килограммах на куб. метр). Объемный процент влажности в газовой смеси может быть найден умножением давления паров воды при набюденной температуре на 100 и делением на общее давление.

Влажность может быть найдена одним из методов, приведенных ниже; при этом нужно соблюдать предосторожность, чтобы во время определения влажности температура не падала, а давление не повышалось.

Случай II. Ненасыщенная газовая смесь. Если газовая смесь не насыщена, ее температура выше точки росы. В этом случае могут быть применены несколько методов определения влажности. Они могут быть разделены на прямые и косвенные; последние известны под названием метода определения точки росы и психрометрического метода, а первые — под названием метода определения веса и объема. Все эти методы в достаточной мере точны, но различаются по удобству анализа и характеру применения. Ниже приводим три наиболее употребительных метода определения влажности.

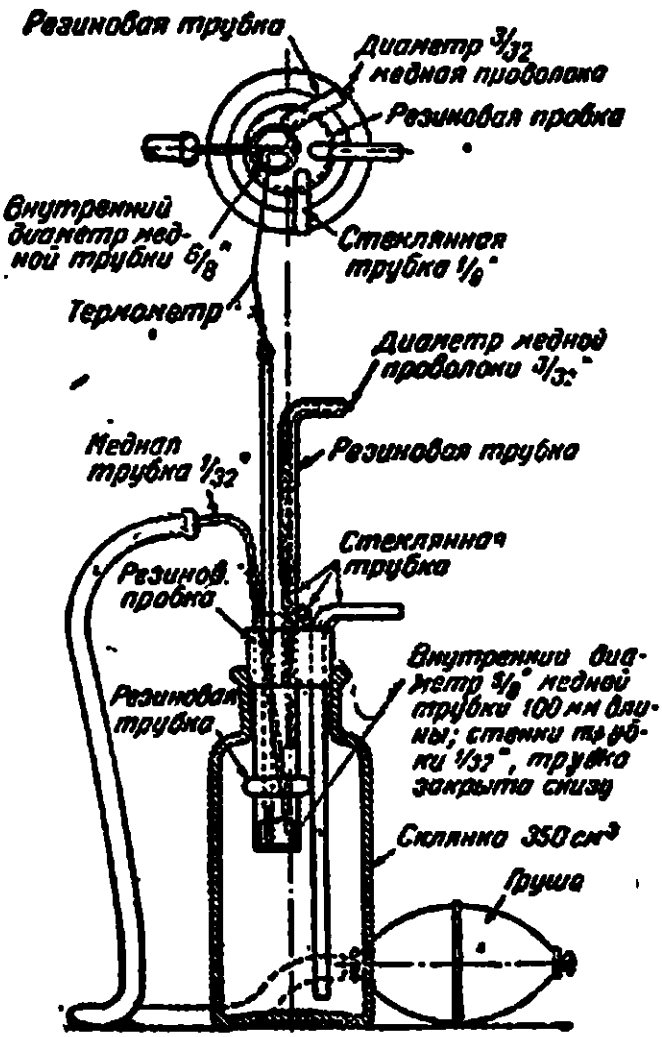
Метод определения точки росы

Принцип и аппаратура. Этот метод состоит в охлаждении газа до температуры, при которой начинают конденсироваться водяные пары. При этом давление

водяных паров является давлением паров, насыщающих пространство, и его находят по табл. 29. Вполне пригодный для нахождения точки росы прибор показан на фиг. 3.

Ход определения. Для производства анализа газ пропускают через склянку емкостью 350 *см*³ и медную трубку, которую медленно охлаждают, продувая через незначительное количество находящейся в ней легко испаряющейся жидкости (эфир, бензол). Трубка должна иметь полированную поверхность. Температура, при которой выступает роса на трубке, записывается. В дальнейшем газ пропускают уже без охлаждения и записывают температуру, при которой исчезает роса. Таким образом производят несколько определений температурных точек появления и исчезновения росы, после чего берут средние значения из этих определений для каждой из точек. Среднее значение между температурами появления и исчезновения росы считают „точкой росы". Зная точку росы *t*, можно найти в табл. 29 давление и вес воды на 1 *м*³. Объемный процент влажности находят умножением давления при точке росы на 100 с последующим делением на общее давление.

Этот метод может быть применен для нахождения относительной влажности воздуха или других газов. Для этого можно пользоваться табл. 30 и 31 (часть I).



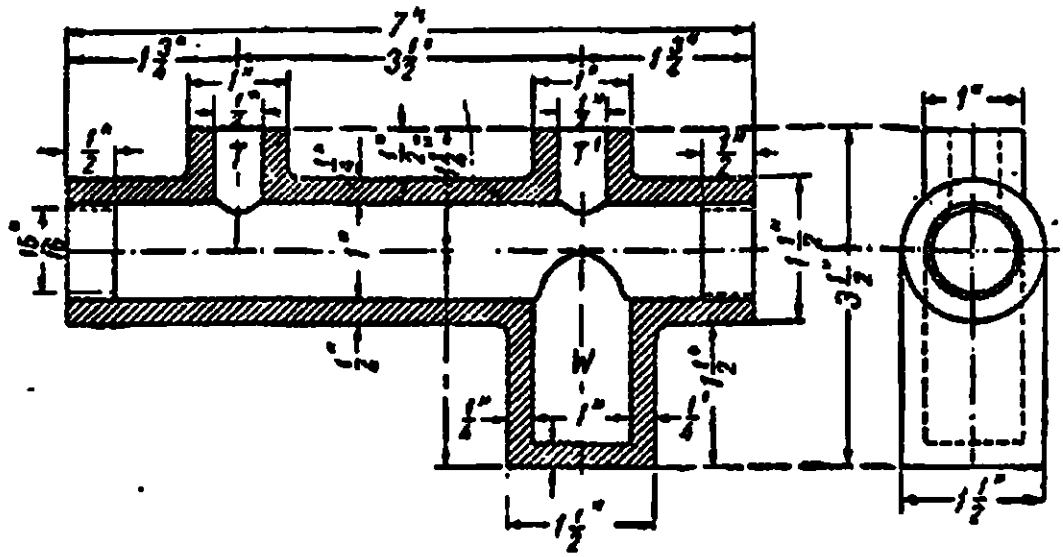
Фиг. 3. Аппарат для определения точки росы.

Психрометрический метод; применение стационарного психрометра

Принцип и аппаратура. Работа психрометра основана на том, что когда газ или газовая смесь и перегретый водяной пар проходят над куском влажной кисеи, вода испаряется и это испарение вызывает падение температуры газа или газовой смеси. Прибор имеет два термометра, укрепленных на трубе, через которую пропускают газ или газовую смесь. Шарики термометров спущены в газовую струю. Первый шарик, мимо которого проходит газ, ничем не покрыт и носит название „сухой шарик". Второй шарик, названный „мокрый шарик", погружен на 100 *мм* в газовую струю и покрыт куском кисеи. Один конец кисеи плотно обернут вокруг шарика термометра и закреплен нитью; второй конец погружен в небольшой резервуар с водой. Фиг. 4 показывает трубу психрометра. Труба имеет отверстие *T*, в котором при помощи резиновой пробки укреплен термометр с сухим шариком; такое же отверстие *T'* служит для укрепления термометра с мокрым шариком. Резервуар *W* предназначен для воды, смачивающей кисею, обернутую вокруг мокрого шарика. Отверстия *E* и *E'* имеют нарезку и служат для соединения прибора с газовой магистралью или газовой линией, а также для выхода газа.

Меры предосторожности. Определение газов, находящихся под давлением, можно производить в приборе весьма простого устройства. Входное отверстие *E* соединяют с газовой магистралью посредством трубы, имеющей кран. Резервуар *W* наполняют наполовину водой. Термометры укрепляют с таким расчетом, чтобы центры их шариков возможно точнее совпадали с центральной линией трубы. Для

получения достоверных результатов должны быть соблюдены некоторые меры предосторожности. Так, если в магистрали газ имеет температуру выше точки росы, прибор может быть непосредственно соединен с магистралью. Соединение должно иметь достаточно большое отверстие для пропуска газовой струи с требующейся скоростью, как это показано выше. Если же газ насыщен или содержит увлеченную воду, то необходимо принять мерм к повышению температуры газа до такого уровня, при котором не было бы осаждения влаги перед впуском газа в прибор. Это нагревание лучше всего достигается с помощью электрической спирали, обернутой вокруг соединительной трубы. Необходимость нагревания может быть установлена опытным путем. До тех пор, пока имеется разность температур мокрого и сухого шариков, нагревание не нужно. Скорость газа, проходящего через прибор, не должна быть ниже 3,0 *м/мин* или выше 610 *м/мин*. Наиболее подходящей скоростью можно считать 180 *м/мин*. Скорость газа может быть найдена из динамического давления газа, уходящего из прибора. Для определения давления держат открытым концом против выходного отверстия



Фиг. 4. Труба психрометра для определения влажности в газах.

1 — стандартная труба; *2* — алюминиевая отливка.

психрометра маленькую трубу, соединенную с чувствительным манометром Если h — динамическое давление в метрах водяного столба, W_g — вес 1 $м^3$ влажного газа при температуре сухого шарика, то скорость газа в метрах в секунду равняется:

$$v = \sqrt{2gH};$$

$$H = h \cdot \frac{W}{W_g},$$

где v — скорость газа в *м/сек*;

g — ускорение силы тяжести в $м/сек^2$;

H — напор, обусловливающий поток газа, измеренный в метрах самого газа;

h — динамическое давление в *м* водяного столба;

W — вес 1 $м^3$ воды при данной температуре;

W_g — вес 1 $м^3$ влажного газа при температуре сухого шарика.

Для получения скорости, выраженной в куб. метрах в минуту, полученный результат множат на 60.

Проведение определений. Когда газовая струя будет проходить через психрометр с необходимой скоростью, начинают записывать показания обоих термометров; это производится до тех пор, пока показания термометров не станут постоянными. Запись выполняются через одинаковые промежутки времени. После этого вычисляют среднее значение температур сухого и мокрого шариков. Средняя температура сухого шарика минус средняя температура мокрого шарика дает среднюю разность показаний. Для нахождения правильной средней разности температур берут поправку, полученную при сравнении температур обоих шариков

в сухом состоянии. Всякие неточности показаний термометров определяются путем сравнения их при разных температурах.

Вычисление влажности газа. Влажность определяют по следующей формуле:

$$W_s = \frac{\frac{r'D'}{F'} - Qf}{r' + C_p(t - t')f},$$

где W_s — вес водяных паров, отнесенных к 1 $м^3$ сухого газа, приведенного к нормальным условиям;

r' — скрытая теплота испарения при температуре t (берется из табл. 32, часть I);

D' — вес 1 $м^3$ водяного пара, насыщенного при температуре t' (берется из табл. 32, часть I);

F' — поправочный фактор для t' и давления $(B + p' - e')$ (см. ниже формулу для F);

Q — количество тепла в 1 $м^3$ газа, приведенного к нормальным условиям между температурами t и t' (подсчитывается по газовому анализу и формуле на стр. 50—54, часть I);

C_p — средняя удельная теплоемкость водяного пара между t и t' в *Кал/кг* (находят на 54 стр., часть I, и более точно по формуле на стр. 51, часть I);

f — поправочный коэфициент, зависящий от скорости газа (находят на фиг. 5). Он равен единице плюс процент ошибки, как показано на чертеже.

Расчет давления водяного пара в газовой магистрали. Имеем два случая: 1) температуру ниже 50° С и 2) температуру выше 50° С.

Когда температура ниже 50° С, то давление водяного пара в магистрали вычисляется из следующего уравнения:

$$e_m = (B + p_m) \cdot \frac{W_s}{W_s + 0{,}76901},$$

где B — барометрическое давление в *мм* Hg;

p_m — манометрическое давление в магистрали в *мм* Hg;

W_s — вес водяного пара в *кг* в 1 $м^3$ газа, приведенного к нормальным условиям.

Вычисление относительной влажности. Относительная влажность находится путем деления e_m на e; e — давление водяного пара, насыщающего пространство при температуре t_m.

Вычисление веса 1 $м^3$ влажного газа при условиях, имеющихся в газовой магистрали. Вес 1 $м^3$ газовой смеси и водяного пара подсчитывают по формуле:

$$W_{gm} = (W_g + W_s) \cdot F,$$

где W_{gm} — вес 1 $м^3$ газовой смеси при данных условиях;

W_g — вес 1 $м^3$ сухого газа, приведенного к нормальным условиям;

W_s — вес водяного пара, относящегося к 1 $м^3$ газа, приведенного к нормальным условиям;

F — поправочный коэфициент:

$$F = \frac{273}{273 + t_m} \cdot \frac{(B + p_m - e_m)}{760}.$$

В этом выражении t_m — температура газа в магистрали; B — приведенное барометрическое давление, p_m — манометрическое давление в магистрали; e_m — давление водяного пара в газе и 760 — миллиметры ртутного столба.

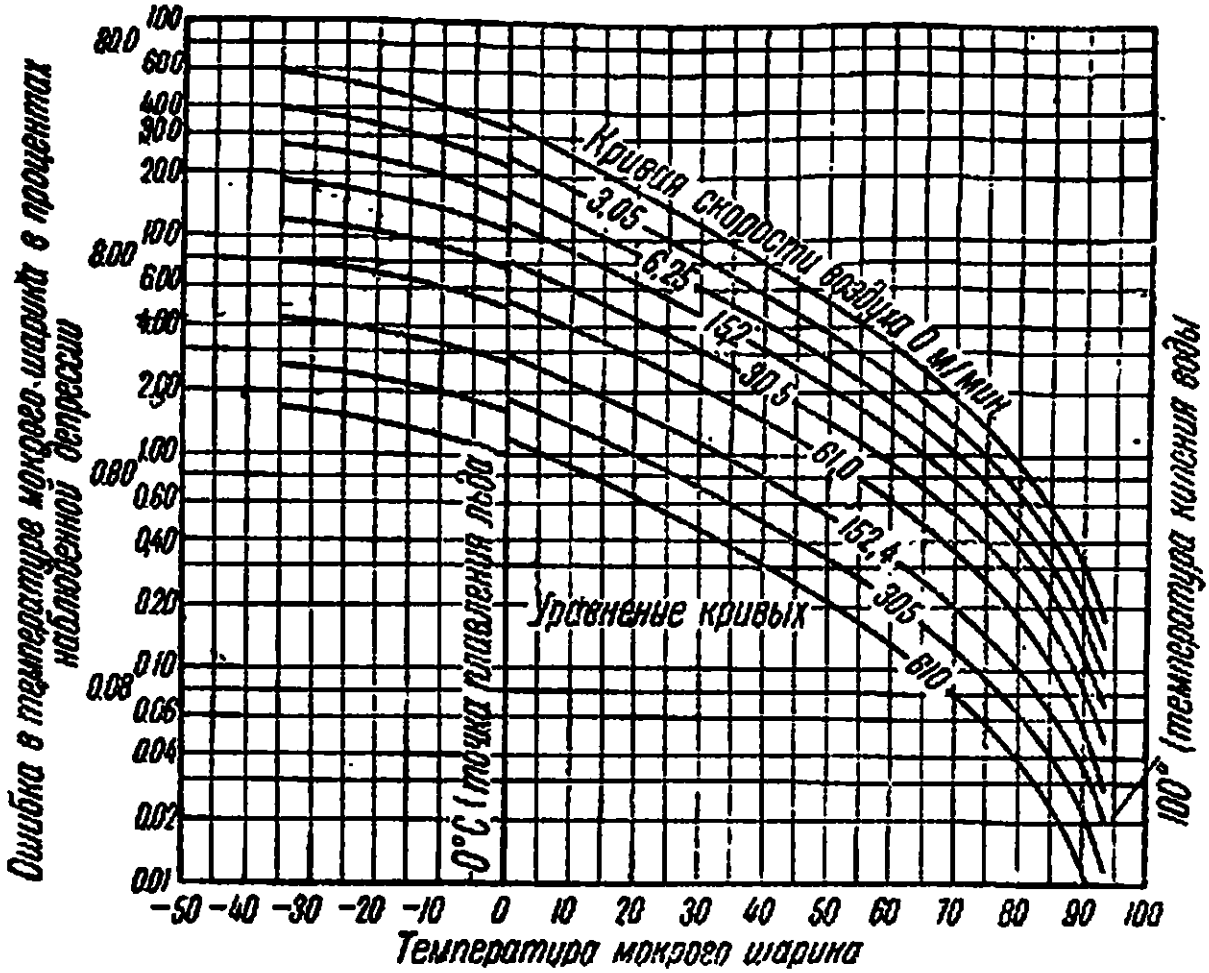
F вычисляется из приведенного выражения.

Вычисление давления водяного пара в газовой магистрали при температуре выше 50° С. Когда температура газа выше 50° С и газ близок к насыщению, возникает небольшая ошибка при применении формулы, приведенной в первом случае. В этом случае приблизительное значение e_m находят из формулы:

$$e_m = B + p_m \cdot \frac{W_s}{W_s + 0{,}7691}.$$

Сравнивая данные фиг. 6 с полученным приблизительным значением e_m, находят истинное значение удельного веса водяных паров при условиях, имеющих место в газовой магистрали, и полученную величину подставляют вместо S_m в следующее уравнение:

$$e_m = B + p_m \cdot \frac{W_s}{W_s + 1{,}24593\, S_m}.$$



Фиг. 5. Номограмма, показывающая ошибку в температуре мокрого шарика термометра. Ошибка выражена в процентах наблюдаемой депрессии мокрого шарика при температуре мокрого шарика от — 15,5 до 93,3° С и при изменении кривых скорости воздуха, протекающего над мокрым шариком, в пределах от 0 до 610 *м/мин* (см. „Trans. A. S. M. E.", 1924, стр. 757).

Примечание. Для пользования этой номограммой нужно перевести наблюденную скорость воздуха в эквивалентную массовую скорость при 21,1° С.

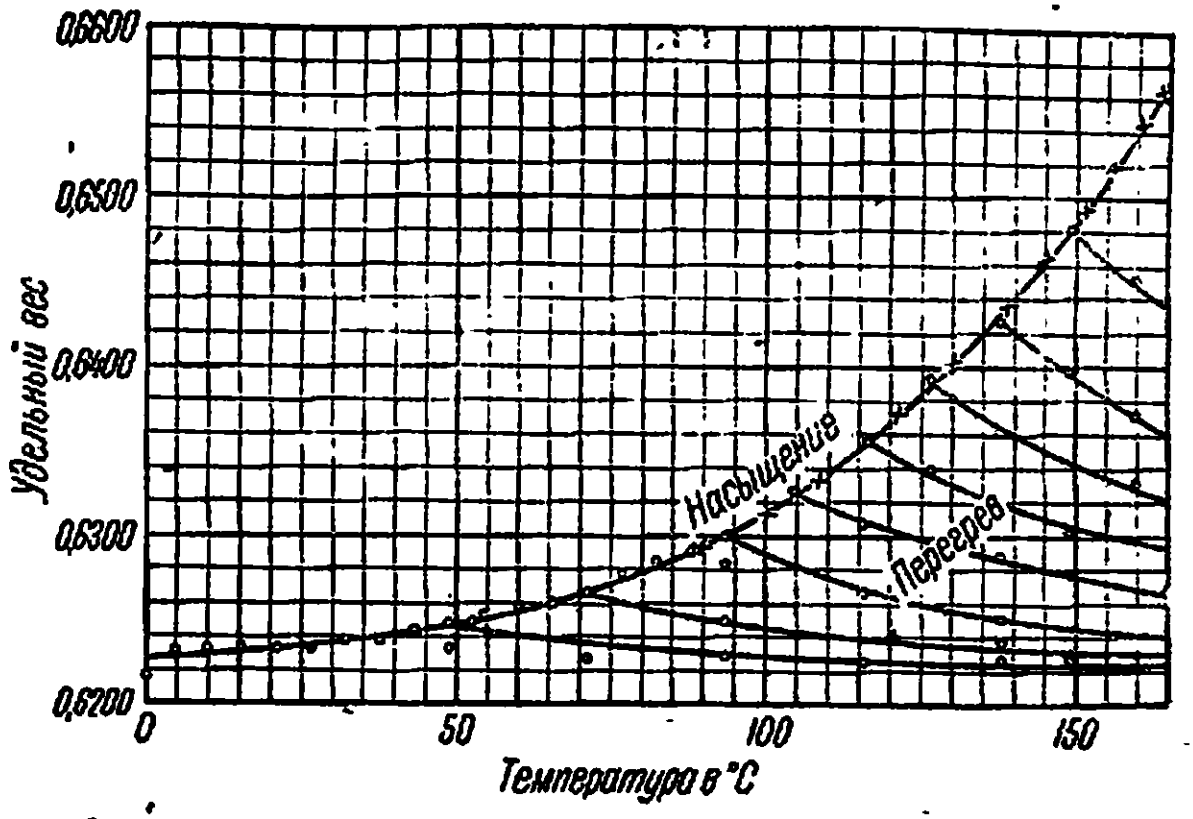
Пример: $V_{21,11} = V_t \frac{273 + 21{,}1}{273 + t}$.

Прямой весовой метод

Ход определения. Этот метод основан на поглощении из определенного количества газа водяных паров каким-либо реагентом, хорошо поглощающим воду, с последующим взвешиванием. Применение в качестве такого реагента фосфорного ангидрида дает очень точные результаты. Фосфорный ангидрид, находящийся в подходящей для этих целей колбочке, помещают между газовой линией и счетчиком. Если точка росы газа высока, газ нужно пропустить сначала через конденсатор. Конденсирующаяся при этом вода собирается в конденсаторе и измеряется или взвешивается. Давление водяных паров, находящихся в газовой линии, находят, пользуясь формулой, приведенной в описании психрометрического метода.

Если в газе присутствуют в значительном количестве смолистые вещества или пыль, то они должны быть удалены до определения влажности. Если необходимо знать только присутствующее количество водяных паров, то газ должен быть пропущен через трубку (фиг. 6), наполненную ватой, причем температура ваты должна быть несколько выше точки росы. Если температура газа значительно выше температуры внешнего воздуха, то лучше всего поместить вату непосредственно в магистрали.

Случай III. Газ содержит увлеченную воду. Если газ содержит большое количество смолистых веществ или пыли, то он должен быть предварительно очищен. При исследовании доменного газа применяют специальные трубки для отбора проб. Конец трубки помещают в газовую магистраль в точке, отстоящей от стенки магистрали на расстоянии одной четверти ее радиуса. Пропуская газ через трубку для отбора проб, доводят скорость входящего в нее газа до скорости



Фиг. 6. Номограмма, показывающая удельный вес водяных паров по сравнению с воздухом при той же температуре (D. C. Lindsay).

струи газа в магистрали. Газ пропускают через экстракционный патрон для удаления взвешенных частиц. После этого нагревают трубку для отбора проб и экстракционный патрон до температуры, достаточной для превращения воды в перегретый пар. После проведения этой операции применяют один из двух описанных методов определения влажности.

Определение малых количеств окиси углерода пиротанниновой кислотой [1]

Этот метод применяется для определения окиси углерода при содержании ее в газе от 0,01 до 0,2% по объему.

Аппаратура. 1) Набор постоянных эталонов, подобранных соответственно цвету крови, имеющей различные содержания CO-гемоглобина (0, 10, 20, 30% и т. д.); эталоны располагают в рамках и между ними оставляют расстояния для помещения такого же размера трубок с образцами исследуемой крови;

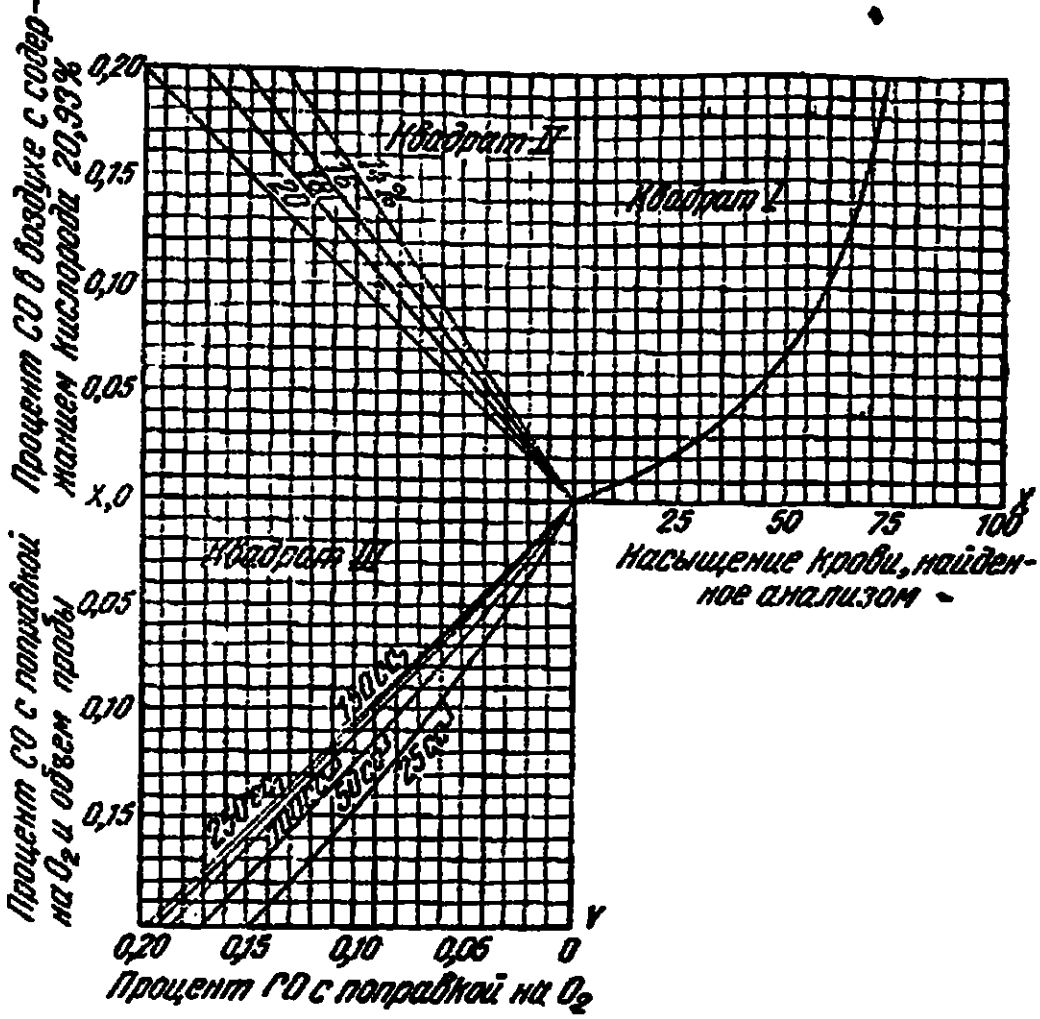
[1] „Опробование и испытание рудничного природного газа", „Bur. Mines Bull.", 197, 1926; R. R. Sayers, W. P. Yant and G. W. Jones, The Pyrotannic Acid Method for the Quantitative Determination of Carbon Monoxide in Blood and Air, „Bur. Mines, Repts of Investigations", 2486, июнь 1923; „Bur. Mines, Tech. Papers", 373, 1926.

2) трубки, имеющие тот же диаметр и сделанные из того же стекла, что эталоны, служат для помещения в них образцов крови, предназначенных для анализа;

3) пипетка для разбавления и измерения количества крови; длинная капиллярная трубка калибрируется на 0,1 *см*³; общий объем ее составляет 2 *см*³, разделенных на 20 частей;

4) игла Франка, которой делают небольшие насечки для получения крови;

5) резинка для обматывания пальца во время взятия пробы крови;



Фиг. 7. Кривые для подсчета процентного содержания окиси углерода, исходя из процента насыщения крови.

6) смесь таннина и пирогалловой кислоты (0,04 *г* смеси 1 : 1) для получения суспензии в разбавленном образце крови;

7) небольшая склянка с водой для разбавления крови.

Ход определения. 0,1 *см*³ крови, взятой из пальца, помещают в пипетку и разбавляют до 2 *см*³ дестиллированной водой. Содержимое пипетки переводят в склянку емкостью 250 *см*³ с испытуемым газом. Склянку закрывают и непрерывно вращают ее 15—20 мин., вследствие чего кровь поглотит из газа окись углерода. После этого выливают раствор крови в пробирку, добавляют немного пиротаннинновой кислоты (количество, помещающееся на кончике лезвия перочинного ножа), закрывают пробирку и перевертывают ее несколько раз для получения надежного смешения. Проделав эти операции, производят сравнение пробирки с эталонами.

Вычисление процентного содержания окиси углерода производят по кривым, изображенным на фиг. 7.

Если количество кислорода составляет 19,0—20,9%, причем объем склянки равняется 250 *см*³ или больше и анализ идет при температуре от 17 до 20° С, то

для определения количества окиси углерода нужно пользоваться квадратом *I* приведенного графика. Например, если найдено, что процент насыщения равен 50, то эту величину отыскивают в квадрате *I* на оси *XX'* и, идя по вертикали до пересечения кривой, находят на оси *YY'* значение 0,07% которое соответствует содержанию окиси углерода.

Если проба содержит меньше 19,0—20,9% кислорода (например 18,0%), то поправка на кислород вводится следующим образом.

Найденное насыщение крови находят на оси *XX'* в квадрате *I*; отыскав по вертикали точку пересечения с кривой, продолжают ее по горизонтали до кривой содержания кислорода, находящейся в квадрате *II*; затем, идя по вертикали, находят в квадрате *III* на горизонтальной оси значение содержания окиси углерода. В данном случае содержание окиси углерода равно 0,06%.

Если объем образца меньше 250 *см*³ (например 50 *см*³), то от величины 50, взятой в квадрате *I* оси *XX'*, проводят вертикаль до пересечения с кривой, а затем проводят горизонталь до пересечения с кривой содержания кислорода (18%), находящейся в квадрате *II*; далее, проведя вертикаль до точки пересечения с кривой объема газа, находящейся в квадрате *III*, и соединив ее горизонталью с осью *YY'*, получают исправленные значения для окиси углерода. В данном примере оно составляет 0,07%.

Определение окиси углерода в дымовых газах аппаратом с пятиокисью иода

Описываемый здесь аппарат является упрощенной модификацией, разработанной аналитической лабораторией Американской газовой ассоциации совместно с Американским бюро стандартов. Аппарат сравнительно прост и позволяет производить анализы достаточно быстро с точностью до 0,002% в обычных условиях. Приводимые ниже описания аппарата и инструкции взяты из доклада, представленного P. E. Vandaveer'ом и R. C. Gregg'ом в 1929 г. Американской химической ассоциации [1].

Комплект аппаратуры, содержащий приспособление для очистки азотом, показан на фиг. 8. Образец газа пропускают через аппарат из склянки *1* с помощью вакуумной установки, присоединенной к капиллярной трубке *2*. Образец последовательно проходит через трубку *3*, сосуды с хромовой кислотой *4* и *5*, V-образную трубку *6*, трубку с пятиокисью иода *7*, трубку Гемберга *8*, содержащую иодистый калий, и ртутный затвор *9* перед вакуумной линией, присоединенной к капиллярной трубке *2*. В то время как образец газа проходит по аппарату, азот выпускается через трубку *10* при закрытом кране *11*. После того как газ наполнил аппарат, закрывают газовый кран *12* и открывают кран *11*. Вследствие этого азот проходит через ртутный затвор *13* и через систему так же, как и образец газа. Скорость прохождения азота регулируется так, чтобы он понемногу выходил и из трубки *10*.

Склянка с образцом газа *1* сделана из стекла и имеет объем около 500 *см*³. Точный ее объем должен быть тщательно определен, и содержащийся в ней газ должен быть приведен вычислениями к нормальным условиям.

Для подогрева пятиокиси иода применяется воздушная баня с электрическим нагревом. Баня состоит из двух латунных коробок *14* и *15*. На внутреннюю коробку поверх изоляции наматывается спираль хромовой (хромель *A*) проволоки 22-го калибра длиной 18,3 *м*. Спираль удерживается на месте асбестовым цементом. Промежутки между стенками *16* заполнены асбесто-фибровой изоляцией. Асбестовая пластинка *17* закрывает баню сверху. Температура бани регулируется реостатом *18* (100 Ω и 1,5 A) с несколькими сериями витков.

Сосуды с хромовой кислотой наполняются через воронки *19* и *20*. Опорожнение их производится с помощью вытяжных склянок, присоединяемых к стеклянным трубкам с кранами *21* и *22*; V-образная трубка *6* содержит в верхней части слой стеклянной ваты, под ней слой твердого едкого кали, затем опять слой стеклянной ваты; остальное пространство трубки заполнено фосфорным ангидридом. Стеклянные пробки *23*, *24* и *25* заливаются парафином.

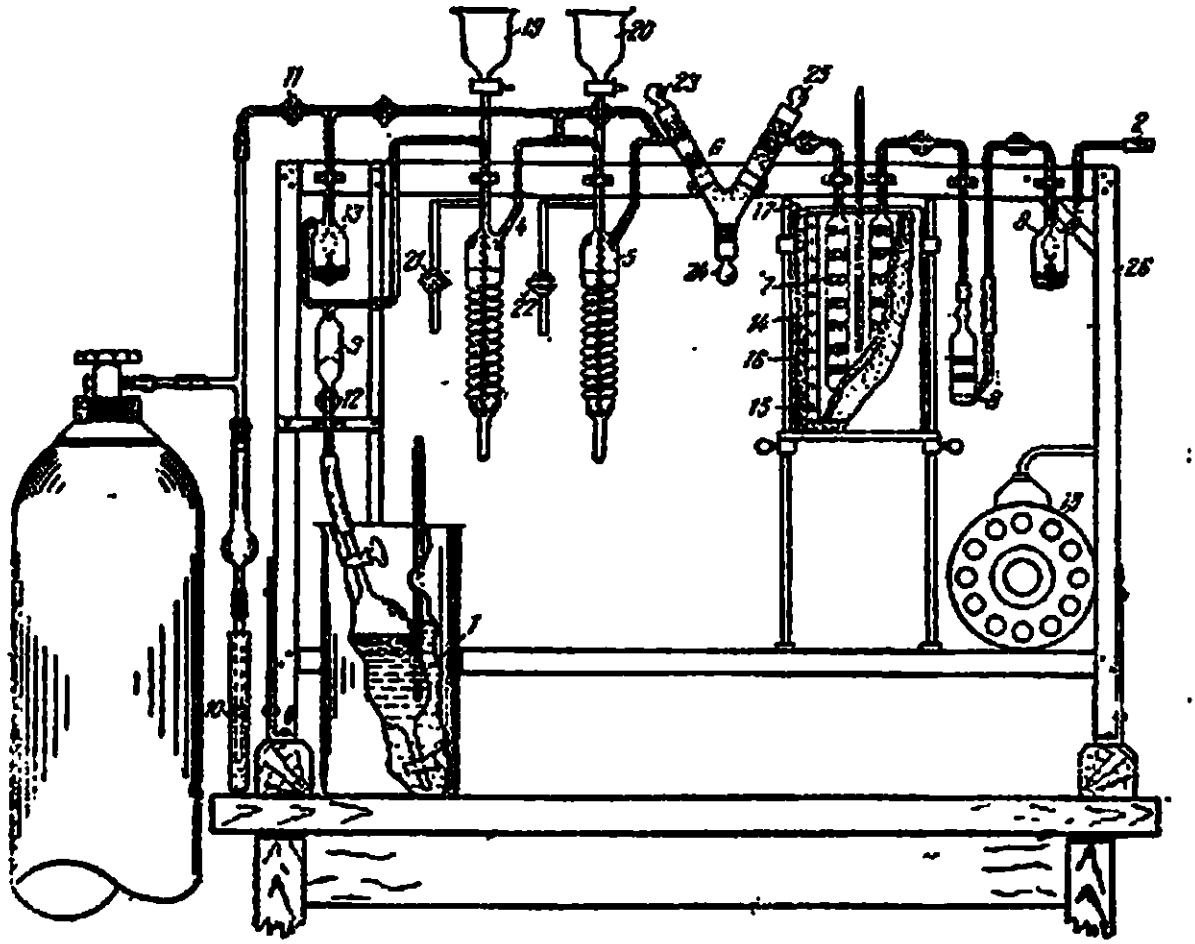
В U-образной трубке *7* помещены перемежающимися слоями стеклянная вата и пятиокись иода толщиной в 13 *мм*.

[1] Опубликовано в „Ind. Eng. Chem.", июль 1929, и в „A. G. A. Monthly", август 1929.

Трубка Гомберга имеет три отделения, наполненные иодистым калием, что обеспечивает достаточную поверхность для поглощения всего иода, выделяющегося в приборе.

Рама *26*, поддерживающая стеклянные части, сделана из 1-дюймового углового железа.

Приготовление и нормализация растворов. Для удаления непредельных углеводородов, альдегидов и некоторого количества водяных паров служат две колонки с хромовой кислотой (приготовленной насыщением концентрированной серной кислоты двухромовым калием). Обычно колонки с хромовой кислотой сохраняют при комнатной температуре; однако, если известно, что в газе присутствует небольшое количество альдегидов или этилена, или хотя бы предполагается их присутствие, то первую хромовую колонку нагревают до 100°С. Для



Фиг. 8. Прибор для определения окиси углерода в дымовых газах при помощи пятиокиси иода.

удаления следов кислоты и небольших количеств углекислоты насыпают сверху в V-образную трубку *6* немного едкого кали и остаток трубки наполняют фосфорным ангидридом. Последний служит для полного осушения газа перед его впуском в трубку с пятиокисью иода.

Пятиокись иода. Трубка с пятиокисью иода сохраняется при температуре 150°С. При этой температуре реакция с окисью углерода происходит значительно быстрее и полнее. Трубки, идущие от колонки с пятиокисью иода к склянке Гомберга, должны быть нагреты; благодаря этому иод в них не конденсируется. Для анализа употребляется пятиокись иода высшей чистоты, известная в продаже как „ангидрид иодной кислоты".

Чистый иодный ангидрид не должен разлагаться ниже 260°С. Однако ангидрид, имеющийся в продаже, обычно содержит низшие окислы иода, иодную кислоту и, возможно, другие компоненты, которые имеют более низкую температуру распада, нежели иодный ангидрид. Для приготовления иодного ангидрида, пригодного для определения окиси углерода, необходимо держать его при темпе-

ратуре 205—215°С около двух дней при пропускании через него достаточного количества воздуха или кислорода. При этой температуре разложатся и уйдут все нестойкие компоненты. Затем температуру снижают до 150°С, и очистка продолжается еще два дня. После этого можно считать иодный ангидрид годным для анализа. После пропускания азота в течение двух-трех часов через ангидрид крахмал, прибавленный в иодистый калий, не должен обнаружить следов иода. Однажды приготовленный, иодный ангидрид может служить в течение 6 месяцев при ежедневной работе. Анализ может быть произведен в 15 мин. (приблизительно).

Азот, употребляемый для очистки аппаратуры. Для очистки аппарата, а также для удаления из трубки с иодным ангидридом свободного иода необходимо, чтобы азот абсолютно не содержал окиси углерода. Воздух в комнате, где сжигается какое-нибудь топливо, и воздух промышленных центров всегда содержат в небольших количествах окись углерода. Поэтому в случае применения воздуха для очистки необходимо предварительно удалять из него окись углерода. Для практического осуществления этого нужно иметь второй аппарат, подобный описанному выше. Применение второго аппарата специально для очистки азота потребовало бы дополнительной затраты труда и времени. Во избежание этого рекомендуется пользоваться чистым азотом в баллонах. Азот, приготовленный способом глубокого охлаждения, совершенно свободен от окиси углерода и не вступает в реакцию с иодным ангидридом.

Раствор иодистого калия. Употребляется раствор из 10% (по весу) иодистого калия и 90% (по весу) дистиллированной воды. Его нужно хранить в темном месте, и при надлежащем приготовлении он не утрачивает своих качеств в течение нескольких недель. При освещении солнечным светом раствор медленно разлагается. Его необходимо проверять, применяя в качестве индикатора крахмал. Свежий раствор не должен вызывать появления синей окраски.

Крахмальный индикатор. Было установлено, что картофельный крахмал является лучшим индикатором для определения свободного иода. Он чувствителен к двум каплям *n*/1000 раствора иода в 20 *см*³ воды. Пшеничный крахмал чувствителен только к трем каплям. Для приготовления раствора 2 или 3 *г* крахмала разбавляют несколькими куб. сантиметрами холодной воды, а затем обваривают кипящей дистиллированной водой в количестве до 200 *см*³. Кипячение продолжают в течение 2—3 мин., а затем охлаждают до комнатной температуры. Каждый день необходимо приготовлять свежий раствор, иначе при титровании иода не может быть достигнут ясный переход от синего до белого цвета. Кроме того, при употреблении старого раствора вместо синего цвета получается розовый, который переходит в белый цвет очень медленно, и, таким образом, конечная точка титрования становится неточной.

Если титруется концентрированный иодный раствор, то крахмал не следует приливать до тех пор, пока большая часть окраски не обесцветится тиосульфатом. Если прилить к концентрированному раствору иода крахмал, то выпадающий при этом хлопьевидный осадок затруднит определение конечной точки реакции.

Раствор тиосульфата натрия. Этот раствор должен быть *n*/1000 или, другими словами, 0,24832 *г* на 1 *л*. Перед титрованием нужно оставить раствор на 1 месяц для установления равновесия. По прошествии этого времени раствор остается весьма устойчивым в течение нескольких месяцев. Аналитическая лаборатория Американской газовой ассоциации в своей практической работе приготовляет свежий раствор ежемесячно и титрует его только по истечении месяца. Титрование раствора тиосульфата натрия производится чистым иодным раствором. Имеющийся в продаже иод должен быть предварительно очищен возгонкой одним из известных способов.

Навеска очищенного двойной возгонкой иода для получения *n*/1000 (приблизительно) его раствора должна быть очень точно взвешена, и полученный из нее раствор считается стандартным. Иод очень гигроскопичен и легко испаряется. Поэтому при взвешивании его нужно принять специальные предосторожности. В стаканчик для взвешивания помещают около 2 *г* иодистого калия и несколько капель воды и взвешивают, затем прибавляют около 2 *г* иода и снова взвешивают. Разница в весе указывает на количество чистого иода. После взвешивания в раствор добавляют дистиллированную воду в количестве до 1 *л*.

В случае необходимости нормальность раствора может быть проверена окисью мышьяка (по Тредвеллу). Для обычных цехей вес иода и его нормальность могут не проверяться.

Раствор тиосульфата натрия титруется полученным раствором иода с применением крахмала в качестве индикатора.

Для расчетов применяется следующая схема вычислений.

Если 0,0974 *г* J_2 взвешены в 1000 *см*³; 1 *см*³ раствора = 0,0000974 *г* J_2; при титровании 10 *см*³ J_2 = 8,37 *см*³ $Na_2S_2O_3$.

то

$$1\ см^3\ Na_2S_2O_3 = \frac{10}{8,37} = 1,195\ см^3\ J_2,$$

или

$$1\ см^3\ Na_2S_2O_3 = 1,195 \cdot 0,0000974 = 0,0001164\ г\ J_2;$$

$$1\ см^3\ Na_2S_2O_3 = \frac{106,400}{238,9} \cdot 0,0001164 = 0,0518\ см^3\ CO$$

при 0°С и 760 *мм* ртутного столба.

Коэфициент для перевода куб. сантиметров $Na_2S_2O_3$ в куб. сантиметры CO выводится следующим образом.

Вывод коэфициента. В приготовленном растворе тиосульфата натрия 1 *см*³ = = 0,000127 *г* иода; из реакции $J_2O_5 + 5\,CO = J_2 + 5\,CO_2$ эквивалент 0,00007 *г* CO получается из уравнения:

$$140 : 253,8 = X : 0,000127,$$

откуда

$$X = 0,00007.$$

1 *см*³ окиси углерода при 0°С и 760 *мм* ртутного столба весит 0,00125 *г*; 0,00007 *г* окиси углерода = 0,056 *см*³ при 0°С и 760 *мм* ртутного столба.

Приводя к 15°С и 760 *мм* ртутного столба, имеем:

$$0,056 : X = 273 : 288;$$

$X = 0,05908$ *см*³ CO при 15° и 760 *мм* ртутного столба (сухой).

Так как взятая проба всегда насыщена водяными парами, то это число должно быть приведено от состояния сухого к насыщенному.

Упругость водяных паров воды при 15°С = 12,79 *мм* ртутного столба:

$$\frac{PV}{T} = \frac{(P' - p)\,V'}{T},$$

где p — упругость водяных паров при 15°С.

Тогда

$$\frac{760 \cdot 0,05908}{288} = \frac{747,21\,V'}{288}.$$

$V' = 0,060091$ *см*³ CO при 15°С и 760 *мм* ртутного столба (насыщенный).

Общий множитель из вышеописанного определится:

$$F = \frac{140 \cdot 288 \cdot 760 \cdot X}{253,8 \cdot 0,00125 \cdot 273 \cdot 747,21},$$

где $X = J_2$ в *г* на 1 *см*³ тиосульфата.

$$F = \frac{30\,643\,200}{64\,715\,297} \cdot X.$$

Так как взятая проба всегда насыщена водяными парами, то полученное число должно быть преобразовано с помощью уравнения:

$$\frac{PV}{T} = \frac{(P_1 - p_1) \cdot V'}{T},$$

где p_1 — давление паров воды при 0° С, равное 4,579 *мм* ртутного столба.

Тогда

$$\frac{760 \cdot 0,056}{273} = \frac{755,42 \cdot V'}{273},$$

откуда V' — объем окиси углерода в *см*³, насыщенной парами воды при 0°С и 760 *мм* ртутного столба.

Исправленная формула для коэфициента:

$$\text{Коэфициент} = \frac{140 \cdot 760 \cdot X}{253{,}8 \cdot 0{,}00125 \cdot 755{,}42},$$

где $X = J_2$ в $г$ на 1 $см^3$ тиосульфата.

$$\text{Коэфициент} = \frac{106\,400}{235{,}9} \cdot X.$$

Описанный метод и аппаратура могут быть применены для обычных анализов продуктов горения при содержании окиси углерода до 0,002%. Азот, кислород и углекислота, содержащиеся в продуктах горения, или малые количества водорода, метана, этана, сероводорода, сернистого ангидрида и окисей азота практически не влияют на точность анализа. Если присутствует формальдегид в количестве свыше 1%, то первая колонка с хромовой кислотой должна быть нагрета до 100°С. Если же присутствует этилен хотя бы и в малых количествах (0,04%), тогда точный анализ невозможен.

ЭФФЕКТ ОТ ДЛИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОКИСИ УГЛЕРОДА НА ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ОРГАНИЗМ

Министерство здравоохранения США опубликовало работу, содержащую сведения об условиях труда на газовых предприятиях, в частности о действии окиси углерода на организм человека в рабочей обстановке.

Воздействию окиси углерода подвергались шесть рабочих в течение 68 дней по 4—7 час. ежедневно. Концентрация окиси углерода в смеси воздуха и выхлопных газов газолинового двигателя составляла 2, 3 и 4 части на 10 000 частей.

При этом было замечено следующее:

1. При воздействии на людей во время отдыха или легкой работы смеси окиси углерода с концентрацией 2 части CO на 10 000 частей воздуха рабочие чувствовали себя хорошо в течение приблизительно двух часов. Головная боль в области лба ощущалась по прошествии $3^1/_2$—4 час. Это наблюдалось больше чем у 50% рабочих. Затылочная боль не наблюдалась даже после $6^1/_2$-часового воздействия. Кровь содержала 20% CO-гемоглобина в период $3^1/_4$—$4^1/_4$ час. и 25% — в период 5—6 час. (при отдыхе или легкой работе).

2. При воздействии окиси углерода с концентрацией 3 части CO на 10 000 частей воздуха легкие симптомы (при отдыхе или легкой работе) наблюдались уже раньше 2 час. и заметная лобовая головная боль при $2^1/_2$—3 час.

Небольшая затылочная головная боль и случаи головокружения появились после 3 час. Больше чем в 65% случаев заметные болезненные признаки появились после 5-часового воздействия. 20% CO-гемоглобина в крови было найдено в период $2^1/_2$—$3^1/_2$ час., 25% — в период 3—4 час. и 30% в период 4—$5^1/_2$ час., в зависимости от субъекта и от того, работает он или отдыхает.

3. Воздействие окиси углерода с концентрацией 4 части CO на 10 000 частей воздуха вызывает у некоторых рабочих лобовую головную боль при $1^1/_2$—2 часовом воздействии. Небольшая затылочная головная боль наблюдается в период $2^1/_2$—$3^1/_2$ час. Наконец, в период от $3^1/_2$—4 час. больше чем 90% рабочих испытывают заметную лобовую головную боль.

Кровь содержит 20% CO-гемоглобина при $1^1/_2$—$2^1/_4$ час., 25% — при $2^1/_4$—$3^1/_4$ час. и 30% — при 3—4 час., в зависимости от субъекта и от того, отдыхает он или совершает легкую работу.

4. В общем, лобовая головная боль начинается у некоторых рабочих при насыщении крови CO-гемоглобином от 18—20%.

Заметная затылочная головная боль, сопровождающаяся головокружением, наблюдается при концентрации в крови CO-гемоглобина от 23—28%.

5. Работа, даже легкая, заметно повышает поглощение кровью окиси углерода и вызывает признаки головной боли после более короткого воздействия.

6. Скорость исчезновения окиси углерода из крови после испытания изменяется прямо пропорционально первоначальному насыщению, но при начальных насыщениях крови CO-гемоглобином в данных опытах скорость исчезновения в некоторых пределах остается постоянной. Иными словами, одна и та же скорость наблюдается, например, при 20—25% насыщения, незначительное изменение в скорости при насыщении в 25—30 или 35%.

После того как было замечено начальное насыщение в 35%, потребовалось приблизительно 1/2 часа для понижения концентрации до 30%, около 1 часа для понижения концентрации до 25%, около 1 1/2 часа — до 20%, около 2 час. — до 15%, около 2 1/2 час. — до 10% и от 3—5 час. — для понижения концентрации до 5%.

После начального насыщения в 35%, рабочие дышали чистым воздухом. Для более низких, чем 35%, начальных насыщений скорость исчезновения окиси углерода примерно остается той же, соответственно величинам, указанным выше.

7. 30-минутная ингаляция кислорода или смеси кислорода с углекислотой при концентрации последней в 5% понижает концентрацию CO-гемоглобина с 35% до < 10%.

В том случае, когда ингаляция производится непосредственно после насыщения крови, болезненные признаки исчезают. Для более низких начальных насыщений этот же эффект наблюдается значительно раньше.

8. Работа или физические упражнения непосредственно после отравления заметно увеличивают скорость удаления CO-гемоглобина из крови. Однако это не рекомендуется при отравлении окисью углерода.

9. Заметных признаков того, чтобы проведенные опыты угрожали здоровью и самочувствию рабочих не было. Недостаток аппетита, изменение веса и мышечной силы не наблюдались.

10. В общем, было замечено сильное увеличение гемоглобина. Это явление сопровождалось увеличением красных кровяных шариков. Также наблюдалось незначительное изменение лейкоцитов.

11. За исключением некоторых случаев присутствия следов сахара, никаких значительных изменений или ненормальностей в моче заметно не было.

Определения на кровяной пигмент были отрицательны.

Сводка физиологических эффектов при воздействии окиси углерода [1]

Время воздействия (мин.) × концентрацию (количество частей на 10 000) = 300	Незначительный эффект
Время воздействия (мин.) × концентрацию (количество частей на 10 000) = 600	Заметный эффект
Время воздействия (мин.) × концентрацию (количество частей на 10 000) = 900	Головная боль
Время воздействия (мин.) × концентрацию (количество частей на 10 000) = 1 500	Опасно

ЗАПИРАЮЩИЕ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ГАЗОВОГО АНАЛИЗА

Так как большинство газов растворяется в воде, то последняя не пригодна в качестве запирающей жидкости в бюретках при газовом анализе.

Химики Американской стальной корпорации рекомендуют в качестве запирающей жидкости 20-процентный раствор сернокислого натра, подкисленный 5% (по объему) серной кислоты, или же насыщенный раствор хлористого натра, подкисленный 2% (по объему) соляной кислоты. Оба раствора должны быть насыщены соответствующими газами до производства анализа, иначе поглощение ими газов во время производства анализа внесет ошибку в результаты анализа.

Ртуть по справедливости считается лучшей запирающей жидкостью, так как имеет низкую упругость пара и не растворяет газов. В случае необходимости в точном анализе или при анализе легко поглощающихся газов (углекислоты), употребление ртути в качестве запирающей жидкости обязательно.

Смазка для стеклянных кранов [2]. Хорошая смазка для стеклянных кранов состоит из смеси чистого каучука, вазелина и пчелиного воска. Смесь приготовляется расплавлением 1 части чистого каучука в соответствующей посуде и добавлением к нему 1 части пчелиного воска с последующим прибавлением к смеси вазелина до тех пор, пока смазка не приобретет необходимую консистенцию.

Другая хорошая смазка приготовляется расплавлением 1 части парафина, растворением парафина в петролейном эфире, прибавлением 1 части тяжелого

---

[1] Из книги Henderson and Haggard, Noxious Gases, McGraw-Hill.

[2] Из „Methods of the Chemists of the United States Steel Corporation for the Sampling and Analysis of Gases".

парафинового масла и нагреванием смеси в паровой бане до испарения петролейного эфира. Консистенция смазки регулируется прибавлением тяжелого парафинового масла или степенью испарения.

Martin Shepherd и P. G. Ledig[1] рекомендуют следующие рецепты смазки:

	Количество частей
Смазка для высоковакуумной работы	
Светлый каучук	31
Вазелин (белый)	24
Парафин (точка плавления 36°C)	5
Смазка для обычной работы (газовый анализ и т. д.)	
Светлый каучук	6
Вазелин	7
Парафин	1
Легкая смазка (краны бюреток и т. д.)	
Темный или светлый каучук	10
Вазелин (белый или желтый)	18
Парафин (точка плавления 30°C)	1

В каждом случае приготовление ведется 190 час. при температуре 155° при постоянном перемешивании. Готовую смазку кладут маленькими порциями в 60-граммовые жестяные банки и немедленно помещают на лед. Через десять дней смазка годна для употребления.

Материалы для притирки стеклянных кранов[2]. Пригодная для притирки стеклянных кранов паста приготовляется из очень хорошей карборундовой пыли, смешанной с вазелином, смазочным маслом или водой. Паста должна иметь консистенцию крема. В качестве наиболее подходящего материала рекомендуется наждачная пыль № 000 или же „Crystalon" № 3F по типу, вырабатываемому фабрикой Нортона. Для притирки кранов пасту наносят тонким слоем на пробку крана и, вставив ее во втулку, повертывают с небольшим нажимом до тех пор, пока не будут устранены замеченные недостатки притирки. Для того чтобы притирка была равномерной, нужно поворачивать пробку очень спокойно, без резких толчков, с таким расчетом, чтобы пробка крана совершала полный круг в три-четыре поворота руки.

ВЫЧИСЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ВЕСА

Пользование приведенной ниже табл. 5[3] облегчает вычисление удельного веса газа в том случае, если известны его составные части.

Пример. Найти удельный вес смеси с содержанием водорода 45,1% и окиси углерода 54,9%.

По таблице находим:

$$(0{,}0278 + 0{,}0035 + 0{,}0001) + 0{,}4835 + 0{,}0387 + 0{,}0087 = 0{,}5623.$$

ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ СТЕХИОМЕТРИИ[3]

Введение. Промышленная стехиометрия представляет собой применение законов о сохранении вещества и энергии, а также законов о соединительных весах к процессам и операциям промышленной химии. Процессы промышленной химии, за исключением нескольких специальных случаев, полностью подчиняются указанным законам,[4] и поскольку все расчеты основаны на этих законах, они не

---

[1] „Ind. Eng. Chem.", т. 19, № 9, сентябрь 1927.

[2] Из „Methods of the Chemists of the United States Steel Corporation for the Sampling and Analysis of Gases".

[3] Взято из книги Lewis and Radasch, Industrial Stoichiometry и Walker, Lewis and Mc Adams, Principles of Chemical Engineering, McGraw-Hill.

[4] Обычная формулировка закона о постоянстве элементов должна быть изменена, конечно, для случая радиоактивных элементов; поправки эти могут, однако, не приниматься во внимание при малой скорости распада радиоактивных элементов. Кроме того, при работе с изотопами необходимо брать соответствующие атомные веса. Очевидно, что в подавляющем большинстве промышленных проблем эти вопросы не затрагиваются.

Таблица 5

Расчет удельного веса газовых смесей

Воздух = 1

Процент компонента в смеси	CO_2	C_6H_6	C_2H_4	O_2	CO	H_2	C_2H_6	CH_4	N_2
100,0	1,5290	2,6953	0,9748	1,1053	0,9671	0,0695	1,0492	0,5545	0,9673
90,0	1,3761	2,4258	0,8773	0,9948	0,8704	0,0625	0,9443	0,4990	0,8706
80,0	1,2232	2,1562	0,7798	0,8842	0,7737	0,0556	0,8394	0,4436	0,7738
70,0	1,0703	1,8867	0,6824	0,7737	0,6770	0,0486	0,7344	0,3881	0,6771
60,0	0,9174	1,6172	0,5849	0,6632	0,5803	0,0417	0,6295	0,3327	0,5804
50,0	0 7645	1,3476	0,4874	0,5526	0,4835	0,0347	0,5246	0,2772	0,4836
40,0	0,6116	1,0781	0,3899	0,4421	0,3868	0,0278	0,4197	0,2218	0,3869
30,0	0,4587	0,8086	0,2924	0,3316	0,2901	0,0208	0,3148	0,1663	0,2902
20,0	0,3058	0,5391	0,1950	0,2211	0,1934	0,0139	0,2098	0,1109	0,1935
10,0	0,1529	0,2695	0,0975	0,1105	0,0967	0,0069	0,1049	0,0554	0,0967
9,0	0,1376	0,2426	0,0877	0,0995	0,0870	0,0062	0,0944	0,0499	0,0871
8,0	0,1223	0,2156	0,0780	0,0884	0,0774	0,0056	0,0839	0,0444	0,0774
7,0	0,1070	0,1887	0,0682	0,0774	0,0677	0,0049	0,0734	0,0388	0,0677
6,0	0,0917	0,1617	0,0585	0,0663	0,0580	0,0042	0,0629	0,0333	0,0580
5,0	0,0764	0,1348	0,0487	0,0553	0,0484	0,0035	0,0525	0,0277	0,0484
4,0	0,0612	0,1078	0,0390	0,0442	0,0387	0,0028	0,0420	0,0222	0,0387
3,0	0,0459	0,0808	0,0292	0,0332	0,0290	0,0021	0,0315	0,0166	0,0290
2,0	0,0306	0,0539	0,0195	0,0221	0,0193	0,0014	0,0210	0,0111	0,0193
1,0	0,0153	0,0269	0,0097	0,0111	0,0097	0,0007	0,0105	0,0055	0,0097
0,9	0,0137	0,0242	0,0088	0,0099	0,0087	0,0006	0,0094	0,0050	0,0087
0,8	0,0122	0,0216	0,0078	0,0088	0,0077	0,0005	0,0084	0,0044	0,0077
0,7	0,0107	0,0189	0,0068	0,0077	0,0068	0,0005	0,0073	0,0039	0,0068
0,6	0,0092	0,0162	0,0058	0,0066	0,0058	0,0004	0,0063	0,0033	0,0058
0,5	0,0076	0,0135	0,0059	0,0055	0,0048	0,0003	0,0052	0,0028	0,0048
0,4	0,0061	0,0108	0,0039	0,0044	0,0039	0,0003	0,0042	0,0022	0,0039
0,3	0,0046	0,0081	0,0029	0,0033	0,0029	0,0002	0,0031	0,0017	0,0029
0,2	0,0031	0,0054	0,0019	0,0022	0,0019	0,0001	0,0021	0,0011	0,0019
0,1	0,0015	0,0027	0,0010	0,0011	0,0010	0,0001	0,0010	0,0005	0,0010

Примечание. Таблица составлена W. M. Berry. Данные взяты из „Smithsonian Tables", а для бензола из табл. 9 „House Heating" A. G. A.

вызывают никаких сомнений. Это обстоятельство делает указанные законы совершенно необходимыми в промышленной работе.

Задача стехнометрии — указать правильные методы расчетов, с помощью которых экспериментальные данные могут быть наиболее хорошо применены в заводских условиях.

Молярные единицы веса. Как в аналитической и физической химии, так и в промышленной стехиометрии употребление грамм-молекулы в качестве весовой единицы представляет большие выгоды (грамм-молекула — это вес в граммах, соответствующий молекулярному весу данного вещества).

Химические реакции происходят как между атомами, так и между молекулами, и их выражают в указанных единицах, что помогает расчетам реакций. Так например, уравнение:

$$\underset{12}{C} + \underset{32}{O_2} = \underset{44}{CO_2},$$

показывает, что один атом углерода и одна молекула кислорода образуют одну молекулу углекислоты. Это уравнение также устанавливает, что 12 г углерода, соединяясь с 32 г кислорода, дают 44 г углекислоты. Удобнее соединить эти два понятия и сказать, что грамм-атом углерода, соединяясь с грамм-молекулой кислорода, образует грамм-молекулу углекислоты.

Молярные единицы объема. Согласно принятой гипотезе Авогадро, равные объемы всех газов содержат одинаковое число молекул. Совершенно очевидно,

что возможно выбрать объем газа (при нормальных условиях: 0° С и 760 *мм* ртутного столба), имеющий вес, равный такому числу граммов, которым выражается молекулярный вес. Этот объем, найденный экспериментально, соответствует 22,4 *л* для грамм-молекулы при 0°С и 760 *мм* ртутного столба и называется молекулярным объемом.

Пример. Грамм-молекула или 12 *г* углерода при горении могут образовать грамм-молекулу или 28 *г* окиси углерода, или же грамм-молекулу или 44 *г* углекислоты. Грамм-молекулы образованных газов займут объем, равный 22,4 *л* при 0°С и 760 *мм* ртутного столба.

Предполагаем, что в результате горения углерода продукты сгорания содержат 15% (по объему) CO_2, 5% O_2 и 80% N_2. 1 $м^3$ продуктов сгорания, измеренных при 0°С и 760 *мм* ртутного столба (количество взято для удобства), будет содержать 150 *л* или 150 : 22,4 = 6,7 грамм-молекул CO_2, эквивалентных 6,7 · 44 = = 294,8 *г* CO_2.

Точно так же производится расчет для O_2. В 1 $м^3$ продуктов горения содержится 50 *л* O_2 или 50 : 22,4 = 2,23 грамм-молекулы O_2, эквивалентных 2,23 · 32 = = 71,4 *г* O_2. И, наконец, остающиеся 80% азота будут иметь: 800 : 22,4 = 35,7 грамм-молекулы азота, эквивалентных 35,7 · 28 = 999,6 *г* азота. Общий вес 1 $м^3$ продуктов сожжения будет:

$$294,6\ (CO_2) + 71,4\ (O_2) + 999,6\ (N_2) = 1365,6\ г.$$

Процентное содержание углекислоты (по весу) будет:

$$\frac{294,6 \cdot 100}{1365,6} = 21,6\%$$

Процентное содержание кислорода (по весу):

$$\frac{71,4 \cdot 100}{1365,6} = 5,2\%$$

Процентное содержание азота (по весу):

$$\frac{999,6 \cdot 100}{1365,6} = 73,2\%$$

Приведенные примеры показывают, как легко для всех газов сделать переход от объемного к весовому основанию (и наоборот) без пользования специальными таблицами и константами переводов из весовых единиц в объемные. Для этого необходимо лишь помнить атомные веса элементов, обычно встречающихся в промышленных газах, и химические формулы газов, имеющих большое распространение:

Так например:

Элемент	Химический символ	Атомный вес
Водород	H	1
Углерод	C	12
Азот	N	14
Кислород	O	16
Сера	S	32

Следующий пример показывает, насколько прост расчет при употреблении молярных единиц. Предположим, что 100 *г* угля, содержащие 72% (или 72 *г*) углерода, полностью сожжены в атмосфере воздуха и в образовавшихся дымовых газах анализом определено содержание углекислоты, равное 10% по объему. Каков общий объем дымовых газов, образовавшихся после сожжения? 100 *г* угля

содержат 72 : 12 = 6 грамм-атомов углерода, и поскольку каждый атом образует молекулу углекислоты, получаем 6 грамм-молекул, равных 6 · 22,4 *л* углекислоты, измеренных при 0°С и 760 *мм* ртутного столба; поскольку углекислота составляет только 10% объема всего дымового газа, общий его объем будет:

$$6 \cdot 22{,}4 \cdot 10 = 1\,344\ л = 1{,}344\ м^3$$ (при 0°С и 760 *мм* ртутного столба).

Газ	Формула	Молекулярный вес
Водород	H_2	2
Метан	CH_4	16
Вода	H_2O	18
Окись углерода	CO	28
Азот	N_2	28
Этан	C_2H_6	30
Кислород	O_2	32
Углекислота	CO_2	44
Сернистый газ	SO_2	64

Газовые законы. Поскольку газы очень редко измеряются при нормальных условиях, необходимо знать, как найти молекулярный объем при различных температурах и давлениях. Это может быть сделано с помощью уравнения: $pv = nRT$, где n — число грамм-молекул, данное в задаче, поскольку R — простая константа, числовое значение которой зависит лишь от выбора единиц давления, объема и температуры (p, v, T).

Вместо подстановки в уравнение соответствующих значений для определения объема часто бывает проще найти его умножением объема газа при нормальных условиях на коэфициент.

При пользовании уравнением необходимо помнить, что измеренный объем должен быть умножен на отношение абсолютных температур и на отношение абсолютных давлений.

Для пояснения приводим следующие примеры.

Пример 1. Каков будет объем 100 *л* газа, измеренного при нормальных условиях (0° С, 760 *мм* ртутного столба) после его нагрева до 50° С и давлении 40 *мм* ртутного столба?

$$\frac{\text{Температурная поправка}}{\frac{100 \cdot 323}{273}} \cdot \frac{\text{Поправка на давление}}{\frac{760}{800}} = 112{,}4\ л.$$

Пример 2. Объем 200 *г* природного газа, содержащего 85% метана и 15% этана, при 20° С и 240 *мм* ртутного столба находится следующим образом.

Сначала определяют истинный или средний молярный вес газа, так как процентное содержание компонентов по объему, основанное на 100 единицах, является также и молярным процентным содержанием. 100 *молей* газовой смеси содержат 85 *молей* метана и 15 *молей* этана. Отсюда вес метана: 85 · 16 (молярный вес метана) = 1360 *г*, и вес этана: 15 · 30 (молярный вес этана) = 450 *г*. 100 *молей* смеси должны, таким образом, весить 1360 + 450 = 1810 *г*, и 1 *моль* смеси весит 18,1 *г*, что и является истинным или средним молярным весом. Задача решается следующим образом:

$$\frac{\text{Количество молей смеси}}{18{,}1} \cdot \frac{\text{Литры на моль при 0° С и 760 мм рт. ст.}}{22{,}4} \cdot \frac{\text{Температурная поправка}}{\frac{293}{273}} \cdot \frac{\text{Поправка на давление}}{\frac{760}{1\,000}} = 218{,}9.$$

Пример 3. Сколько грамм углекислоты в 1000 л дымового газа, содержащем 15% CO_2 при 200° С и 700 мм ртутного столба барометрического давления?

Литры при 273° С и 760 мм рт. ст.		Литры при 0° С и 760 мм рт. ст.		Литры при 700 мм рт. ст.		Количество молей газа		Количество молей CO_2		Молярный вес углекислоты	
1 000	•	273	•	700	•	1	•	0,15	•	44	= 156,2 г.
		473	•	760	•	22,4					

Газовыми законами, приведенными выше, можно пользоваться с известной оговоркой: они не могут быть применены без соответствующих поправок к газам, молекулы которых диссоциированы, а также к газам, находящимся под высоким давлением и, в частности, близко к точке насыщения. Однако ошибки, обусловленные применением этих законов к так называемым постоянным газам до 15 или 20 *ат* или к насыщенным парам от 1 до 2 *ат* не превышают 2—3% и в большинстве процессов химической промышленности могут не приниматься во внимание.

Молярная теплоемкость газов. Молярная теплоемкость вещества — это количество тепла, необходимое для нагревания 1 *моля* вещества на 1° С. Для некоторой группы газов молярная теплоемкость одинакова или во всяком случае весьма близка. Так например, для одноатомных постоянных газов $MC_p = 5{,}0$ в основном зависит от температуры. Для постоянных двухатомных газов $MC_p = 6{,}5 + 0{,}001\ T$, где T — абсолютная температура в °К (°С абс.). Для газов с более сложной структурой формулы изменяются. При стехиометрических расчетах принимают во внимание не столько теплоемкость, сколько общее количество тепла, соответствующее данному изменению температуры. Поскольку эти вычисления произведены, они могут быть для удобства представлены графически (фиг. 3 и 4, часть I). Количество тепла, соответствующее данному изменению температуры, равно разнице ординат этих диаграмм.

Взяв в качестве примера углекислоту, находим количество тепла, потребное для нагрева 1 *моля* от 21 до 480° С, вычитанием теплосодержания при 21° С из теплосодержания при 480° С. Удельная теплоемкость находится путем деления полученной величины на молекулярный вес углекислоты (44).

Вещество и энергетический баланс. Поскольку промышленная стехиометрия основана на законе сохранения вещества и энергии, то расчеты чаще всего сводятся к составлению баланса. Там, где это возможно, подобный баланс выводится для каждого входящего элемента, так же как и для энергетического эффекта. Кроме того, каждое из этих равенств зависит от остальных. Самое важное в технике промышленной стехиометрии — это уменье оперировать с подобного рода балансами.

Надежность результатов. Стехиометрические расчеты, основанные на указанных выше законах, зависят лишь от точности и полноты данных. Стехиометрические методы дают возможность контролировать промышленные данные и избегать ошибок и неправильных выводов. Само собой разумеется, что данные, на которых основаны расчеты, должны быть собраны с достаточной тщательностью. Пробы, взятые на анализ, должны действительно представлять среднее содержание испытуемого вещества. Анализы должны быть сделаны с достаточной точностью. Ни один источник потери не должен быть пропущен или не принят во внимание. При соблюдении этих условий можно иметь полную уверенность в правильности расчетов и выводов.

2. ГАЗОВАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С КАЛОРИМЕТРАМИ

1. Перед опытом очистить линию от находящегося в ней старого газа и держать зажженной одну горелку во все время производства опыта.
2. Наблюдать за температурой лаборатории.
3. Отрегулировать газовый счетчик (температура, ватерпас, положение стрелки, уровень воды, насыщение воды газом).
4. Испытать установку на утечку газа.
5. Отрегулировать температуру воды в снабжающем резервуаре.

6. Начать пропускание воды через калориметр и вытеснить воздух из циркуляционной водяной системы.

7. Зажечь газ, отрегулировать расход газа, отрегулировать воздушный смеситель горелки и вставить горелку в калориметр.

8. Отрегулировать течение воды и установить заслонку.

9. Выждать время для установления температурного равновесия.

10. Приготовить лист для записи и произвести предварительные наблюдения за температурой и высотой барометра, давлением и температурой газа в счетчике, показаниями термометров, температурой отходящих продуктов и временем оборота стрелки счетчика.

11. Начать собирание конденсата и записать показания счетчика.

12. Первую серию наблюдений расположить следующим образом: сделать предварительную заметку температуры воды, сменить воду, заметить температуру воды, сменить воду, произвести дополнительное наблюдение температуры воды, взвесить воду.

13. Произвести вторую серию наблюдений, третью и т. д.

14. Остановить накопление конденсата и записать показания счетчика и количество конденсата.

15. Повторить предварительные наблюдения операций (10).

16. Выпустить газ в воду.

Барометрические поправки

Таблица 6

Поправки для приведения барометрических давлений к нормальной температуре (0° С)

Температура t° С	Наблюденное барометрическое давление в мм ртутного столба			
	610	660	710	760
5,0	0,76	0,76	0,76	0,76
7,5	1,02	1,02	1,02	1,27
10,0	1,27	1,27	1,27	1,52
12,5	1,52	1,52	1,78	1,78
15,5	1,78	1,78	2,03	2,29
18,5	2,03	2,29	2,29	2,54
21,0	2,29	2,54	2,79	2,79
24,0	2,54	2,79	3,05	3,30
26,5	2,79	3,05	3,30	3,56
29,5	3,05	3,30	3,56	3,81
32,0	3,30	3,56	4,06	4,32
35,0	3,56	4,06	4,32	4,57
37,5	3,81	4,32	4,57	4,83

Примечание. Приведенные величины должны вычитаться из показаний барометра с латунной шкалой.

Таблица 7

Равные значения давления в миллиметрах ртутного и водяного столба

Вода	25	30	35	50	60	70	75
Ртуть	1,84	2,2	2,6	3,7	4,4	5,15	5,5

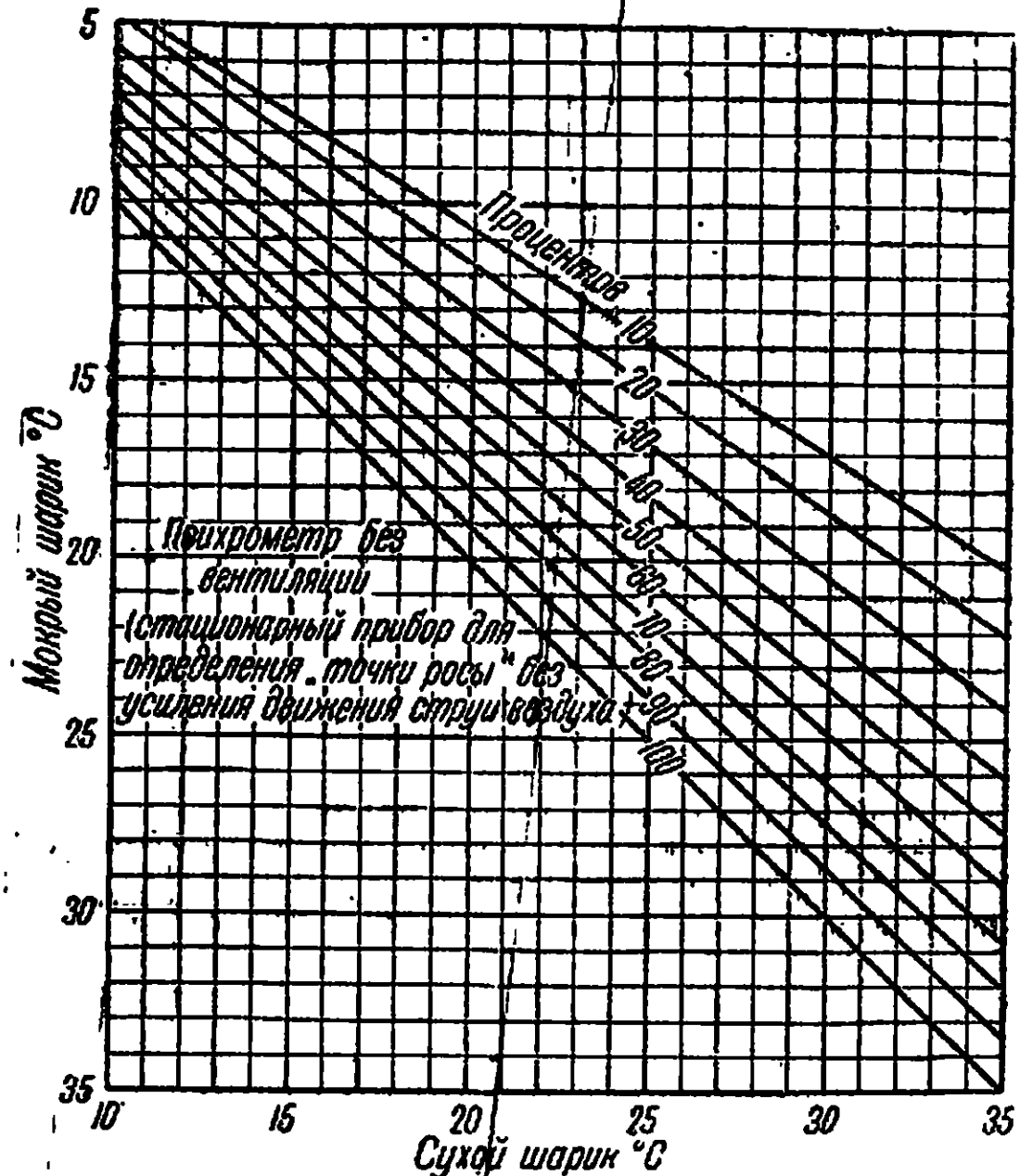
Образец записи частичных поправок

Частичные поправки:

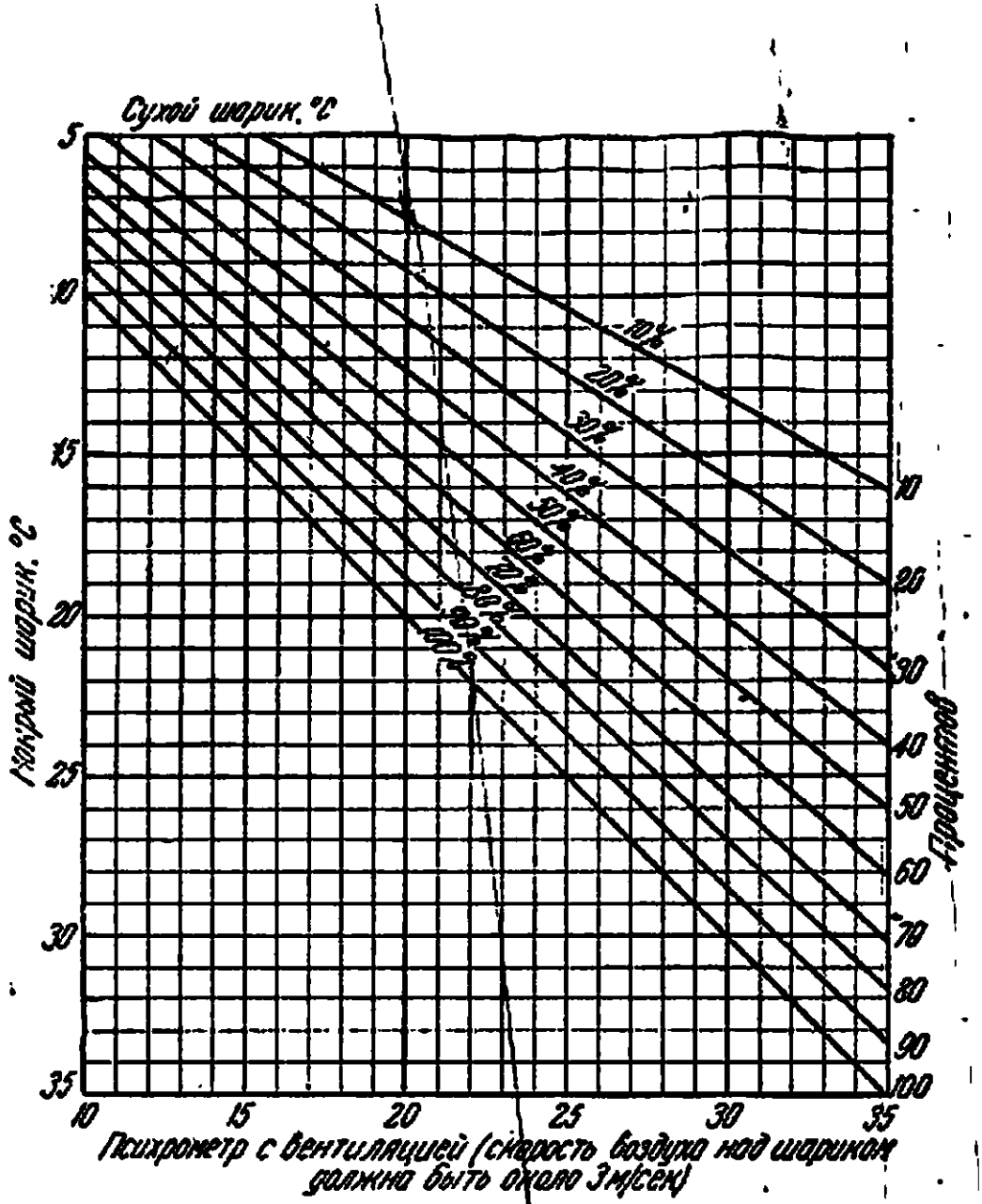
Дата	Разница (градусы)

Калибрование счетчика

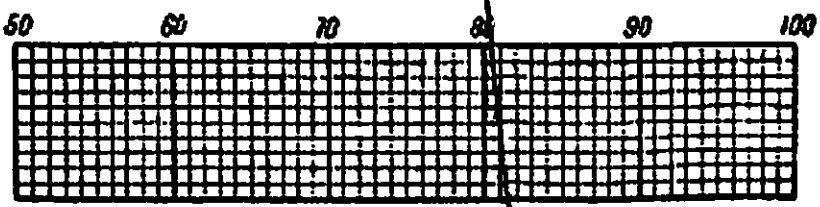
Дата	Один оборот счетчика равен:
	$м^3$
	$м^3$



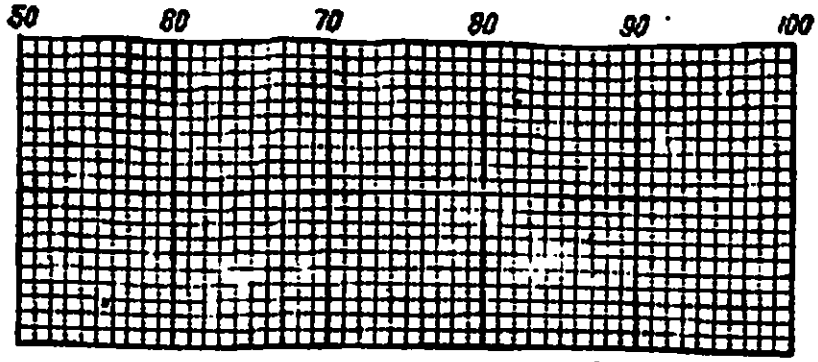
Фиг. 9. Относительная влажность в неподвижном воздухе по показаниям мокрого и сухого шариков термометров (подсчитана для барометрического давления в 755 *мм* ртутного столба). На высотах 1800 *м* и выше понижение барометрического давления при очень низкой влажности вызывает ошибку в 5% и больше.



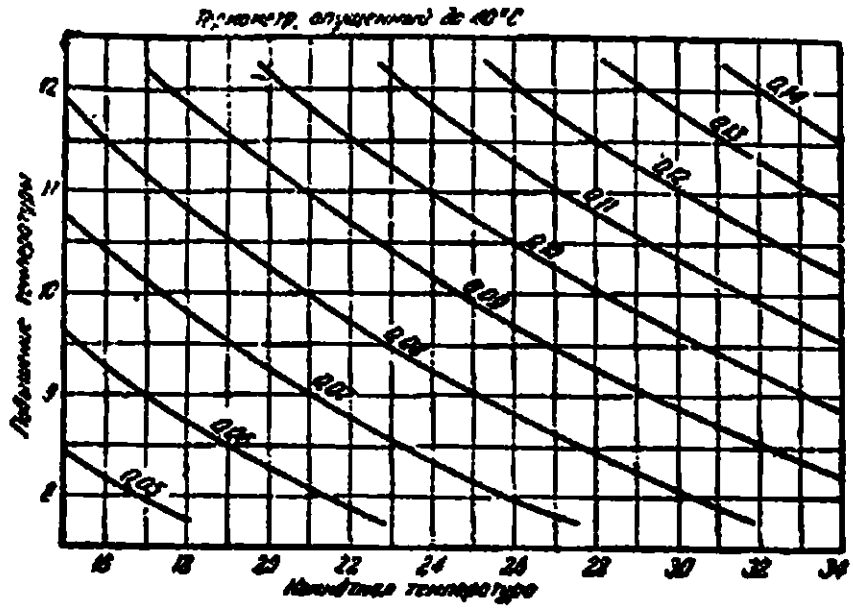
Фиг. 10. Относительная влажность для психрометров с быстрым потоком воздуха по показаниям мокрого и сухого шариков термометров (подсчитана для барометрического давления 755 *мм* ртутного столба). На высотах 1800 *м* и выше понижение барометрического давления при очень низкой влажности вызывает ошибку в 5% и больше.

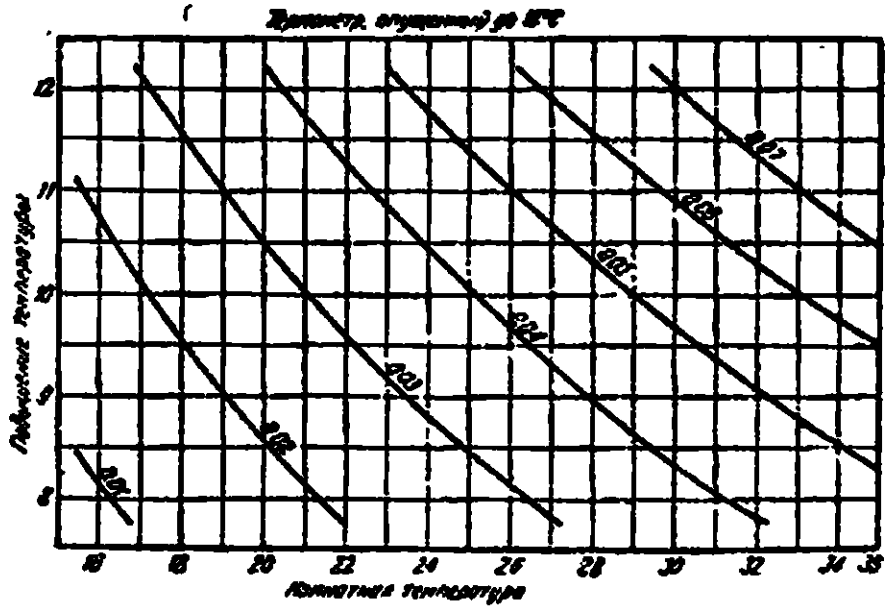


Фиг. 11. Шкала поправок. Измерение термометра №...



Фиг. 12. Шкала поправок для термометра №...
(калибровая . . . . .).





Фиг. 13. Поправка показаний термометра, стеклянная трубка которого погружена в выходящую из калориметра воду, для различных делений, указанных на трубке (применяется в том случае, когда температура входящей в калориметр воды приблизительно равна комнатной температуре).

Таблица 8

Поправки на разность между температурой воды, входящей в калориметр, и комнатной температурой [1]

Комнатная температура в °С	Поправка в *Кал* на 1° С	
	высшая теплотворная способность	низшая теплотворная способность
10	0,23	0,18
15	0,15—0,27	0,18
20	0,18—0,32	0,18
26	0,20—0,36	0,18
32	0,23—0,40	0,23
38	0,25—0,45	0,23

Таблица 8а

Поправки на влажность при определении теплотворной способности светильного газа в *кг/Кал*

Т-ра комнаты в °С	Относительная влажность в %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	+0,50	+0,50	+0,25	+0,25	+0,25	+0,25	0	0	0	—0,25
8	+0,50	+0,50	+0,50	+0,25	+0,25	+0,25	0	0	0	—0,25
10	+0,75	+0,75	+0,50	+0,50	+0,25	+0,25	0	0	0	—0,25
13	+0,75	+0,75	+0,75	+0,50	+0,25	+0,25	+0,25	0	0	—0,25
15	+1,00	+1,00	+0,75	+0,50	+0,50	+0,25	+0,25	0	0	—0,25
18	+1,25	+1,00	+1,00	+0,75	+0,50	+0,50	+0,25	0	—0,25	—0,25
21	+1,50	+1,25	+1,00	+0,75	+0,75	+0,50	+0,25	0	—0,25	—0,50
24	+1,75	+1,50	+1,25	+1,00	+0,75	+0,50	+0,25	0	—0,25	—0,50
27	+2,00	+1,75	+1,50	+1,25	+1,00	+0,75	+0,25	0	—0,25	—0,50
29	+2,50	+2,25	+1,75	+1,50	+1,00	+0,75	+0,50	0	—0,25	—0,75
32	+3,00	+2,50	+2,25	+1,75	+1,25	+1,00	+0,50	0	—0,50	—0,75
35	+3,50	+3,00	+2,50	+2,00	+1,50	+1,00	+0,50	0	—0,50	—1,00

[1] В этой таблице даны поправки для определения высшей и низшей теплотворной способности в тех случаях, когда температура входящей в калориметр воды несколько разнится от температуры помещения. Выяснено, что эти поправки могут быть применены без внесения заметной ошибки при работе с большинством калориметров, исключая калориметр Doherty. При этом допустим предел теплотворной способности горючих газов 4200 *Кал*. Если температура входящей в калориметр воды выше температуры помещения, то поправка прибавляется; если же температура воды ниже температуры помещения, поправка вычитается.

Таблица 86

Поправки на влажность при определении теплотворной способности природного газа в *кг/Кал*

Т-ра комнаты в °С	Относительная влажность воздуха в %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	+ 1,00	+ 0,75	+ 0,75	+ 0,50	+ 0,50	+ 0,25	+ 0,25	0	0	— 0,25
8	+ 1,00	+ 1,00	+ 0,75	+ 0,75	+ 0,50	+ 0,25	+ 0,25	0	0	— 0,25
10	+ 1,25	+ 1,25	+ 1,00	+ 0,75	+ 0,75	+ 0,50	+ 0,25	0	0	— 0,25
13	+ 1,50	+ 1,50	+ 1,25	+ 1,00	+ 0,75	+ 0,50	+ 0,25	0	— 0,25	— 0,25
15	+ 2,00	+ 1,75	+ 1,50	+ 1,00	+ 0,75	+ 0,50	+ 0,25	0	— 0,25	— 0,50
18	+ 2,75	+ 2,00	+ 1,75	+ 1,25	+ 1,00	+ 0,75	+ 0,50	0	— 0,25	— 0,50
21	+ 2,75	+ 2,25	+ 2,00	+ 1,50	+ 1,25	+ 0,75	+ 0,50	+ 0,25	— 0,25	— 0,50
24	+ 3,25	+ 2,75	+ 2,50	+ 2,00	+ 1,50	+ 1,00	+ 0,75	+ 0,25	— 0,25	— 0,75
27	+ 3,75	+ 3,25	+ 2,75	+ 2,25	+ 1,75	+ 1,25	+ 0,75	+ 0,25	— 0,25	— 0,75
29	+ 4,50	+ 4,00	+ 3,25	+ 2,75	+ 2,25	+ 1,50	+ 1,00	+ 0,25	— 0,50	— 1,00
32	+ 5,25	+ 4,75	+ 4,00	+ 3,25	+ 2,50	+ 1,75	+ 1,00	+ 0,25	— 0,50	— 1,25
35	+ 6,25	+ 5,50	+ 4,75	+ 3,75	+ 3,00	+ 2,00	+ 1,25	+ 0,25	— 0,50	— 1,50

3. ПИРОМЕТРИЯ[1]

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПИРОМЕТРЫ

Свойства термопар

Термопары, употребляющиеся в промышленных предприятиях, должны обладать рядом качеств. Некоторые из них перечислены ниже.

1. Электродвижущая сила должна быть прямолинейной функцией температуры. Это даст возможность калибровки термопары только по двум точкам. Такая зависимость облегчает также поправку результатов для различных температур на холодном конце термопары.
2. Устойчивость против окисления и антикоррозийность.
3. Образование сравнительно больших электродвижущих сил.
4. Постоянство калибровки.
5. Возможность воспроизводства пары.

Фиг. 15 показывает зависимость между электродвижущей силой и температурой для различных металлов, употребляющихся при изготовлении термопар. Каждая кривая сопровождается названием металла и представляет зависимость между электродвижущей силой и температурой при соединении в термопару этого металла с платиной при том условии, что холодный конец пары имеет температуру 0° С. Электродвижущая сила для какой-либо данной температуры, возникающая при употреблении каких-нибудь двух металлов, представлена расстоянием между двумя соответствующими кривыми при данной температуре. Так например, из фигуры видно, что термопара, составленная из меди и константана при температуре 400° С, дает электродвижущую силу около 20 mV.

Некоторые из перечисленных в табл. 9 термопар могут быть приобретены с предохранительными трубами или без них. Скрепление элементов термопары

[1] Материалы для этого отдела взяты главным образом из „Пирометрической практики" (Pyrometric Practice, „Bur. Standards Tech. Paper", 170) и из Wood and Cork, Pyrometry, Mc. Graw-Hill.

Определение теплотворной способности

Учреждение: *Бюро стандартов*. Дата: *Окт. 8, 1913*. Время: *10 час.* Газ: *Городской газ*. Калориметр №: *Т 1209*. Счетчик №: *6312*. Термометр №: впускной *5781-А*; выпускной *5781-В*. Газопровод прочищен: Да. Счетчик отрегулирован: Да. Утечка проверена: Да. Водяной вентиль: *65*. Регулятор тяги: *Закрыт*. Поправки дифференциального термометра определены: *Окт. 1, 1913*. Последняя калибровка счетчика: *Сент. 6, 1913*.

	Начало	Конец
Температура барометра	67°	68°
Отсчет по барометру	29,52	29,51
Поправка по паспорту	−0,01	
Поправка температуры	−0,10	
Исправленная высота барометра	29,40	
Давление в счетчике (*мм* водяного столба)	1,5	
Эквивалент (*мм* ртутного столба)	0,11	
Общее давление газа	29,51	
Отсчет по термометру измерителя	69,1	69,3
Поправка по паспорту	−0,3	
Температура счетчика	67,9	
Фактор пересчета F	0,963	
Психрометр: влажный шарик	63,0	63,0
Психрометр: сухой „	63,0	63,3
Влажность	85%	
Температура продуктов горения	69	
Время 1 оборота счетчика	62 мин.	
Эквивалентная скорость (куб. фут/час)	6,9	

Конденсированная вода

	1-й опыт	2-й опыт
Отсчет по счетчику: начало	18,1	19,4
Отсчет по счетчику: конец	19 1	20,6
Конденсат (*см*³)	21,6	21,2
на куб. фут. (60°, 30 дм.)	22,3	21,9
Среднее A	22,1	

Низшая теплотворная способность

Средняя наблюденная теплотворная способность	644
Поправка на потерю тепла	+1
Приведение к низшему значению (A × 2,3)	−51
Низшая теплотворная способность	594
Правильность удостоверена аналитик	

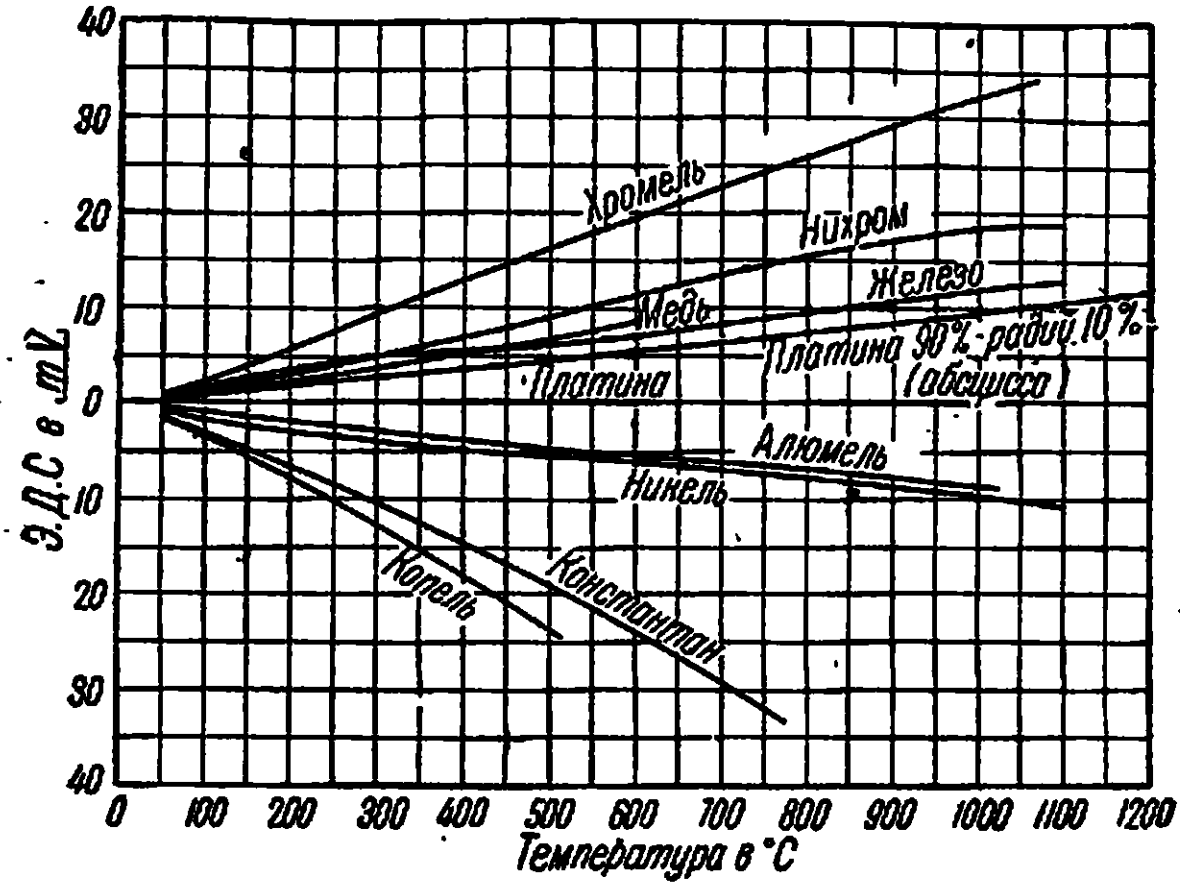
	Серия № 1 впуск	Серия № 1 выпуск	Серия № 2 впуск	Серия № 2 выпуск	Серия № 3 впуск	Серия № 3 выпуск
Предварительная запись	67,94	86,54	67,93	86,60	67,90	86,60
		86,50		86,45		86,45
Средние значения		86,50		86,49		86,48
		86,43		86,40		86,40
		86,36		86,43		86,39
		86,43		86,47		86,43
		86,54		86,[illegible]		86,49
	67,93	86,49	67,93	86,[illegible]	67,90	86,52
		86,50		86,41		86,50
		86,50		86,40		86,40
		86,47		86,45		86,42
		86,40		86,39		86,45
Проверочная запись	67,93	86,49	67,92	86,41	67,90	86,46
		86,36		86,11		86,47
Средняя	67,93	86,46	67,93	86,45	67,90	86,45
Поправка по паспорту	−0,15	−0,25				
Дифференциальная поправка		−0,02	−0,18	−0,19	−0,18	−0,19
Поправка для термометра		+0,03				
Исправленная температура	67,75	86,27	67,75	86,26	67,72	86,26
Разность температуры T	18,52		18,51		18,54	
Нагретая вода W	6,74		6,74		6,72	
Число оборотов счетчика	2					
Калибровка 1 оборота	0,1016					
Объем газа V	0,2012					
Наблюденная теплотворная способность $\frac{W \cdot T}{V \cdot F}$	644		644		643	
Поправка на потерю тепла	+1					
Поправка на атмосферную влаж.	+4					
Общая теплотворная способность	649		649		648	
Среднее	649 брит. тепл. ед. на куб. фут (60°, 30 дм.)					

Фиг. 14.

может быть осуществлено с помощью электросварки или автогенной сварки. Старые термопары легко могут быть восстановлены. Для этого отрезают негодное соединение и оба элемента легко сваривают.

Когда свариваются простые металлы термопары, проволоки должны быть сначала нагреты до светлокрасного каления и посыпаны порошком буры. Эта операция должна повторяться до тех пор, пока вокруг соединения не образуется толстый слой прозрачной буры.

После этого элементы могут быть спаяны без окисления их. Бура при спайке платиновых термопар не применяется. Термопары из хромеля или алюмеля свариваются автогенной сваркой в кислородном пламени.



Фиг. 15. Зависимость электродвижущей силы от температуры для металлов и сплавов, применяемых обычно для изготовления термопар.

Калибровка термопар

При промышленной калибровке термопары из простых металлов сравниваются с термопарами, сделанными из благородных металлов, или же с термопарами из простых металлов, предварительно откалиброванными погружением в чистые вещества с хорошо известными точками кипения или затвердевания.

При сравнении двух термопар большие трудности представляет сохранение одинаковой температуры для нагреваемых концов этих термопар. Сказанное одинаково относится как к термопарам, сделанным из простых металлов, так и к термопарам, из которых одна сделана из редких, а вторая — из простых металлов. Для производства прецизионной калибровки конец термопары, сделанной из редких металлов, помещают в небольшую прорезь, выполненную в нагреваемом конце термопары, изготовленной из простых металлов. Конец термопары с прорезью сжимают зажимом до обеспечения хорошего термического контакта. Небольшие термопары из простых металлов могут быть непосредственно припаяны к термопаре из редких металлов. Нагреваемые концы термопар, сделанных

Таблица 9

Свойства обычных термопар

Наименование термопары	Материал, употребляющийся для изготовления термопары	Пределы температуры	Примечание
Платина — иридий	(—) [1] Очень чистая платина (+) Платина 90% Иридий 10%	От 300 до 1700° С	Употребляется при работе с очень высокими температурами или если необходима большая точность результатов
Платина — родий	(—) Очень чистая платина (+) Платина 90% Родий 10%	От 300 до 1700° С	Употребляется в тех же случаях, что и платиново-иридиевая термопара
Хромель — алюмель	(—) Алюмель: никель 94% алюминий 2% марганец 3% кремний 1% (+) Хромель: никель 90% хром 10%	При непродолжительном употреблении до 1315° С. При продолжительном употреблении до 1094° С	Термопара широко применяется; очень устойчива против окисления атмосферой, но должна быть предохранена от влияния окиси углерода при высоких температурах
Железо — константан	(—) Константан: медь 60% никель 40% (+) Железо очень чистое	До 982° С	Эта термопара должна быть хорошо защищена от возможного окисления
Медь — константан [2]	(—) Константан: медь 60% никель 40% (+) Медь чистая	От —237 до 537° С (термопара должна быть предохранена от окисления и перегрева)	Эта термопара широко применяется для измерения температур, близких к точке кипения воды и для более низких

[1] (—) означает отрицательный электрод, (+) означает положительный электрод.

[2] Для этой пары значения электродвижущей силы при очень низких температурах можно найти у L. H. Adams, Pyrometry Symposium, Am. Inst. Mining Met. Eng., стр. 165, 1920.

Таблица 10

Температуры кипения и плавления некоторых тел, размещенные в порядке их возрастания

Многие из них могут служить точками для калибрирования и стандартизации пирометров

Вещество	Символ	Температура кипения в 0° С
Гелий	He	—268,9
Водород	H	—252,7
Азот	N	—195,8
Кислород	O	—183,0
Углекислота	CO_2	— 78,5
Аммиак	NH_3	— 33,4
Сероуглерод	CS_2	+ 46,3
Четыреххлористый углерод	CCl_4	+ 76,8
Вода	H_2O	+100,0
Нафталин	$C_{10}H_{18}$	217,9
Ртуть	Hg	356,9
Сера	S	444,5
Селен	Se	688,0
Кадмий	Cd	767,0
Цинк	Zn	907,0
Магний	Mg	1 115,0
Висмут	Bi	1 450,0
Свинец	Pb	1 620,0
Алюминий	Al	1 800,0
Марганец	Mn	1 900,0
Серебро	Ag	1 950,0
Олово	Sn	2 260,0
Медь	Cu	2 300,0
Золото	Au	2 600,0
Никель	Ni	2 900,0
Молибден	Mo	3 700,0

Вещество	Символ	Температура плавления в 0° С
Гелий	He	Ниже —272,2
Водород	H	—259,1
Кислород	O	—218,4
Азот	N	—209,8
Хлор	Cl	—101,6
Ртуть	Hg	— 38,8
Вода	H_2O	0,0
Нафталин	$C_{10}H_{18}$	80,1
Азотнокислая медь	$Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	114,5
Олово	Sn	231,8
Висмут	Bi	271,0
Кадмий	Cd	320,9
Свинец	Pb	327,5
Цинк	Zn	419,4
Хлорный свинец	$PbCl_2$	501,0
Сурьма	Sb	630,5
Магний	Mg	651,0
Алюминий	Al	660,0
Хлористый кальций (безводный)	$CaCl_2$	772,0
Хлористый натр	NaCl	801,0
Серебро	Ag	960,0
Золото	Au	1 063,0
Медь	Cu	1 083,0
Сернистый свинец	PbS	1 114,0
Фтористый барий	BaF_2	1 280,0
Фтористый кальций	CaF_2	1 360,0
Никель	Ni	1 452,0
Железо	Fe	1 535,0
Палладий	Pd	1 553,0
Платина	Pt	1 755,0
Молибден	Mo	2 620,0
Тантал	Ta	2 850,0
Вольфрам	W	3 370,0
Углерод	C	3 600,0

из редких металлов, защищаются на протяжении нескольких миллиметров фарфоровой трубкой. Последнюю прикрепляют к нагретому концу термопары, заливая ее конец небольшим количеством каолина или цементом из жидкого стекла, или же заплавляют стеклом „пайрекс". Это предохраняет термопару из редких металлов от загрязнения (исключая небольшой кусок в 2—3 *мм*). Если печь нагрета одинаково по всему объему, то небольшое загрязнение не создает ошибки. Для калибровки термопар из простых металлов, соединенных сжатием или сваркой, применяют также двойной потенциометр.

1. Применение муфельной печи. Несколько термопар из простых металлов и эталонную термопару из редких металлов, помещенную в непористую фарфоровую трубку, складывают вместе и стягивают возможно сильнее асбестовой лентой, чтобы не было просветов между термопарами. Связку помещают в очень тяжелую железную трубу с закрытым концом таким образом, чтобы нагревающиеся концы термопар вошли в трубу. Открытый конец трубки плотно забивают асбестом. Железная труба с термопарами помещается в печь. Измерение электродвижущей силы производят после того, как наступит температурное равновесие. Если муфельная печь имеет достаточную длину, защитную трубу все-таки не следует удалять. Наиболее удобными размерами муфельной печи считают 200 × 200 × 750 *мм*. Для прецизионной калибровки этот метод непригоден.

Даже при соблюдении всех предосторожностей разница температур между термопарами, лежащими у противоположных стенок трубы, достигает 10—20° С. Однако подобные результаты считаются удовлетворительными для многих промышленных процессов. Этот способ может быть значительно улучшен использованием вместо защитной трубы медного блока с высверленными в нем дырами для нагревающихся концов термопар.

2. Применение бани с расплавленным металлом. Применение бани с расплавленным металлом для калибрования термопар из простых металлов дает вполне удовлетворительные результаты. Железный тигель диаметром около 300 *мм* и глубиной около 400 *мм* наполняют оловом или свинцом, покрытыми сверху слоем графитового порошка. Тигель нагревают в газовой или электрической печи с обмоткой из нихрома или хромеля. В оловянную баню устанавливают шесть железных труб, закрытых с нижнего конца и погруженных в олово на 300 *мм*. Трубы должны быть достаточной длины, для того чтобы в них можно было свободно поместить термопары из простых металлов с защитными трубами. Стандартную термопару из редких металлов помещают в одну из описанных труб, а калибруемые термопары из простых металлов — в остальные. После установления температурного равновесия, о чем судят по стандартной термопаре из редких металлов, принявшей температуру бани, производят измерение электродвижущей силы. Таким способом можно прокалибровать много термопар из простых металлов, повторяя каждый раз эту операцию с новой группой термопар. Калибровка всякий раз идет при другой температуре. Оловянная баня дает хорошие результаты в пределах от 300 до 1000° С, так как олово обладает малой летучестью. Полученные с помощью этого способа данные наносятся на график, и вычерченная на их основании кривая температур и электродвижущих сил для каждой термопары служит калибровкой термопары. Для некоторых типов термопар, изготовленных из простых металлов, кривая принимает S-образную форму с точкой перегиба, близкой к критическим точкам металлов, входящих в термопару. Для прецизионной работы калибровка должна производиться в небольшом температурном интервале, находящемся вне критической области.

3. Калибровка по одной точке или контрольная точка. Часто бывает необходимо проверить термопару из простых металлов по одной точке. Если термопара дает показания величины электродвижущей силы при данной температуре на 2% выше, нежели эталонная термопара, то принято считать, что показания этой термопары выше на 2% при всех температурах. Этот метод можно принять только как приблизительный, так как экспериментально доказано, что часто термопара, дающая ошибку в 2% при температуре 500° С, дает правильные показания при температуре 1000° С.

Калибровка по одной точке пригодна лишь для контроля поведения термопары в небольшом температурном интервале.

Удобным стандартом температуры для калибровки служит точка плавления химически чистой поваренной соли. Поваренная соль плавится при температуре 801° С. Поваренная соль помещается в тигель из дюрарона (кислотостойкий

сплав, состоящий из 14% Si + 0,25% Mn + 0,2% C + 0,16% P + 0,05% S + 85,34% Fe). Тигель нагревают в газовой или электрической печи. Термопару из простых металлов без защитной трубы погружают в тигель на глубину 100—150 *мм*. Наблюдение точки плавления производят по способу, изложенному выше. Вследствие малой теплопроводности соли кривая имеет небольшой наклон. Отрезок кривой, представляющий истинную точку плавления соли, получают в момент образования кристаллов соли на термопаре около места погружения термопары в расплавленную соль. При этом термопара в продолжение процесса измерения служит мешалкой. Если соль не была предварительно сплавлена, то при нагревании тигель нужно сначала закрыть, так как из-за связанной воды соль при нагревании разлетается во все стороны. После первой плавки это явление уже не наблюдается. Расплавленная соль реагирует с простыми металлами, составляющими термопару, но реакция настолько слаба, что не отражается на металле термопар. При нагревании железа в контакте с солью в течение нескольких часов было замечено небольшое смещение точки плавления соли.

4. Проверка термопар, находящихся в стационарных установках. Довольно часто возникает необходимость проверки показаний термопар без вынимания их из печи, в которой они установлены. Проверка подобного рода чаще всего бывает необходима в заводских условиях. При этом точность последней значительно меньше точности проверки, достигаемой в лабораторных условиях. Необходимо заметить, что в простых металлах, составляющих термопару, после продолжительного нагревания развивается гетерогенность.

Наличие гетерогенности может быть установлено с помощью гомогенных испытаний, но эти испытания представляют интерес главным образом для исследовательской работы, так как даже при установлении гетерогенности метод не дает указаний, как исправить этот недостаток. Эти испытания показывают, что термопара для дальнейшего использования как будто непригодна, в то время как в постоянной установке она может еще служить. Удаление термопары вследствие появления гетерогенности дорого и ненужно за исключением тех сравнительно редких случаев, когда требуется очень большая точность. Степень развития гетерогенности зависит от типа установки, глубины погружения, температурного градиента и пр. Эти величины определены и зафиксированы для каждой установки. Если все же термопара удалена из установки и ее калибруют в лаборатории, то эти величины изменяются, так как в лабораторной обстановке невозможно воссоздать те условия, в которых находится действующая термопара. Калибровка, произведенная в лаборатории, дает совершенно другие результаты, нежели калибровка с сохранением всех физических характеристик постоянной установки (если бы это было возможно). Отсюда очевидно, что при употреблении негомогенных термопар их необходимо проверять на месте, в стационарной установке.

Точность метода зависит от типа установки. Для проверки употребляют стандартную проверочную термопару вместе с высокоомным гальванометром „тепломером" или портативным потенциометром. Нагревающийся конец контрольной термопары помещают возможно ближе к нагревающемуся концу проверяемой термопары, и показания обеих термопар сравниваются. Основным препятствием проверке является трудность установки обеих пар возможно близко друг к другу.

Один из способов такой установки состоит в том, что рядом с отверстием, в котором помещается испытуемая пара, сверлят в печи отверстие для контрольной термопары. Обычно это отверстие закрыто, и его открывают только во время производства проверки. Контрольная термопара вставляется в это отверстие до той глубины, до которой вставлена проверяемая термопара. Отверстие для контрольной термопары сверлят возможно ближе к отверстию для постоянной термопары.

Во многих установках термопара, изготовленная из простых металлов, вместе с защитной трубой вставлена внутрь другой защитной трубы, сделанной из железа, огнеупорной глины, карборунда или из другого огнеупорного материала. Эта труба вмазывается в стенку печи. Часто в ней устраивают камеру для контрольной термопары.

Третий способ, значительно менее удовлетворительный, состоит в том, что выжидают установления в печи подходящей постоянной температуры, после чего производят наблюдение над испытуемой термопарой; затем термопару удаляют, и на ее место вставляют на ту же глубину контрольную термопару. Показания обеих термопар сравниваются.

В зависимости от требований проверка может быть проведена тем или другим способом при различных температурах; кривая, полученная для каждой из постоянных термопар, укажет те поправки, которые должны быть внесены в их показания.

Возникает мысль, что этот метод проверки термопар неудовлетворителен, так как в большинстве заводских печей температурный градиент очень высок и поэтому нет уверенности в том, что контрольная термопара имеет ту же температуру, что и испытуемая. Однако это соображение не серьезно, так как если температурный градиент так велик, что создает значительную разность температур между двумя термопарами (постоянной и контрольной), помещенными рядом, то нет необходимости в точном измерении температуры, и показания контрольной термопары могут быть смело приняты за показания истинной температуры. Если температурный градиент имеет такую величину, что две хорошие термопары, помещенные рядом, показывают, например, разницу больше чем в 20°С, то можно с уверенностью сказать, что более точные измерения в данной печи невозможны.

Огнеупоры для пирометрии

Необходимые качества материалов защитных труб для термопар сводятся к следующему [1]:

1. Низкая газопроницаемость. Многие трубы сильно пропускают печные газы, а последние обычно портят термопары.
2. Низкая летучесть. Некоторые металлические трубы не пригодны для высоких температур, так как металл труб оседает на термопаре и изменяет ее калибровку.
3. Способность выдержать высокие температуры.
4. Способность выдержать резкие изменения температуры.
5. Способность выдержать механические удары и напряжения.
6. Высокая вязкость или жесткость. Защитные трубы часто деформируются при высоких температурах.
7. Теплопроводность. Часто бывает необходимо иметь высокую теплопроводность для измерения быстро меняющейся температуры. Только в том случае, если тепловой поток не меняется по всей длине защитной трубы, возможно применение материалов с низкой теплопроводностью.
8. Способность противостоять коррозии от печных газов и расплавленных металлов.

Ни одна защитная труба не обладает в полной мере этими качествами, но очень многие прекрасно работают в специальных условиях, что указано в табл. 12.

Таблица 11

Температуры плавления некоторых огнеупорных материалов

	°С
Угольная зола	1 100—1 500
Огнеупорная глина	1 400—1 750
Кремнезем	1 700—1 750
Боксит	1 600—1 800
Каолин	1 740
Хромит	1 990—2 180
Алунд	2 050
Окись магния	2 150—2 800
Карборунд	Около 2 700
Графит	Около 3 000
Окись циркония	2 700

Обычные источники погрешностей в пирометрии

1. Изменения в калибровке термопар. Термопары могут сохранять свою калибровку в период времени от одного-двух дней до многих месяцев. Термопары должны перекалибровываться в зависимости от постоянства тех условий, в которых они эксплоатируются. Методы калибровки описаны выше.

2. Изменения в калибровке записывающих электрических приборов или других указателей.

[1] "Bur. Standards Tech. Paper", 170.

3. Различное сопротивление соединительных проводов. При измерении электродвижущей силы потенциометром эта погрешность исключена. Чем больше сопротивление самого гальванометра, тем меньше погрешность, обусловленная различным сопротивлением соединительных проводов. Конечно, поскольку электродвижущая сила, возникающая в термопарах, очень мала, есть практический предел для увеличения сопротивления милливольтметра. Слишком большое сопротивление снизит ток до такой малой величины, что для его измерения потребуется очень чувствительный милливольтметр. Изменение кривой сопротивления может произойти вследствие целого ряда причин, в числе которых можно назвать следующие: окисление провода, чистота контактов, различие в глубинах погружения термопары, температурные изменения в линии, частичное образование трещин в соединительных проводах и пр.

4. Изменения температуры холодного конца термопары. Если холодный конец пары имеет не ту температуру, при которой была калибрована термопара, то для получения правильных результатов необходимо внести в показания термопары поправку; для этого нужно узнать ту действительную температуру, которую имеет холодный конец термопары. Эта поправка равна разности между истинной температурой холодного конца и его температурой при калибровке, умноженной на коэфициент K. Для термопар из простых металлов K равен единице, а для термопар из редких металлов K равен 0,5. Полученная таким образом поправка вполне удовлетворительна для обычных целей при небольшой разности температур. В случае необходимости в прецизионном измерении или же при значительной разности температур следует пользоваться таблицами, помещенными в „U. S. Bureau of Standards Technical Paper", 170.

Если температура холодного конца выше, нежели при калибровке, то поправка прибавляется к температуре горячего конца термопары. Если же температура холодного конца ниже температуры при калибровке, то поправка вычитается из температуры горячего конца термопары.

В большинстве простых схем (без контролирования температуры холодного конца) действительным холодным концом является соединение проводов термопары с проводами измерительной аппаратуры.

В этом случае температура холодного конца может иметь изменения. Во избежание этого к холодному концу термопары присоединяют провод, изготовленный из того же материала, что и провода самой термопары (или в случае термопары из редких металлов провод этот делают из материала, имеющего те же термоэлектрические качества, что и провода термопары). Присоединенный провод ведут от клемм термопары до дна трубы, закопанной на 3 *м* в землю. Медный провод, одним концом присоединенный к измерительной аппаратуре, другим концом присоединяют к продолжению термопары на дне трубы. Таким образом, холодный конец термопары переносится на глубину 3 *м*, где колебания температуры составляют не больше 2% в течение года. Труба холодного конца термопары должна отстоять на 3 *м* от источников тепла (печи).

Милливольтметр снабжают нулевым приспособлением, с помощью которого он может при разомкнутой цепи показывать температуру холодного конца термопары. До тех пор, пока температура холодного конца термопары не имеет колебаний, милливольтметр дает правильные показания температуры горячего конца термопары.

В имеющихся в продаже милливольтметрах нулевое приспособление сделано с помощью биметаллического подвеса (пружины). Потенциометры также могут снабжаться соответствующими приспособлениями или автоматическим компенсатором.

5. Ошибки от радиации. При измерении температуры струи газа, уходящей через отверстие, стенки которого имеют иную температуру, нежели газ, пирометр показывает не истинную температуру газа, а некоторую среднюю, соответствующую термальному равновесию, установившемуся между стенками, пирометром и газом. Равновесие устанавливается при том условии, что скорость перехода тепла с помощью радиации между стенками и пирометром равна скорости перехода тепла с помощью конвекции между пирометром и газом.

При большой разности температур стенок и газа получаются большие ошибки в измерениях температуры газа. Следующее уравнение дает возможность с большой точностью исправлять ошибки, возникающие в результате радиации:

$$T_G - T_P = \frac{4{,}615\, p_e}{h_g} \left\{ \left[\frac{T_P}{100} \right]^4 - \left[\frac{T_w}{100} \right]^4 \right\},$$

Таблица 12

Металлические и керамические материалы, применяемые для первичной и вторичной защиты термопар

Материал	Химическое строение	Применение	Температурный предел до 0° С	Преимущества и недостатки в применении
Железо и сталь	Состоит из железа и углерода	Первичная трубка	850	Легко окисляется. Невысокая стоимость и пригодность для термопар, изготовленных из простых металлов
Железо, покрытое алюминием	Сварочное железо с поверхностью, покрытой алюминием	Первичная и вторичная трубки	850	Более устойчиво к окислению, нежели непокрытое железо или сталь
Дюриron	Сильно насыщенный кремнием сплав железа	Первичная и вторичная трубки	900	Может трескаться при резких изменениях температуры. Прекрасно защищает от кислотных паров
Плавленый кварцит	SiO_2	Изолятор, первичная и вторичная трубки	1 050	Не применяется к термопарам, изготовленным из редких металлов, или к термопарам из хромеля и алюмеля. Противостоит окислению. Газонепроницаем, исключая легкие газы. Низкий коэфициент теплопроводности. Противостоит кислотным парам
Хромель	Состоит из никеля и хрома	Первичная и вторичная трубки	1 100	Высокая механическая прочность. Малая пористость. Хорошо противостоит окислению. Стоит дороже, чем железо или сталь, но долговечнее их
Хрохон	Состоит из железа (75%) и хрома (25%)	Первичная и вторичная трубки	1 100	Употребляется на короткое время для защиты термопары от расплавленной меди или бронзы
Алунд	Плавленый Al_2O_3 с глиной	Первичная и вторичная защитные трубки. Очень хорош для вторичных трубок	1 400	Обладает небольшой пористостью. Может быть глазурован, но глазуровка понижает точку плавле-

				ния. Очень хорош для термопар, изготовленных из благородных металлов
Никель	Никель	Первичная и вторичная защитные трубки	1 400	Противостоит окислению
Фарфор	Очень чистые глины	Изоляция и первичные трубки	1 500	Для большей непроницаемости необходимо глазуровать. Прекрасен для термопар из благородных металлов. Трубки из менее чистого фарфора могут употребляться только до 1200° С. Фарфоровые трубы не должны подвергаться резким изменениям температуры
Карборунд	SiC	Вторичные защитные трубки	1 500	Высокая механическая прочность. При высоких температурах не годен в качестве защитной трубы для фарфора. Верхний конец трубы должен иметь отверстие для доступа воздуха
Корундит	Корунд и глина	Вторичные защитные трубки	1 500	
Огнеупорная глина	Al_2O_3—SiO_2	Изолировочные и защитные трубки	1 400—1 750 в зависимости от чистоты глины	Вторичные трубки в обжигательных, сушильных, известковых, стеклянных и стальных печах. Изоляционные трубки для термопар из простых металлов
Графит	Углерод	Вторичные защитные трубки	3 000	Может применяться в расплавленных металлах; термопары из редких металлов должны быть защищены от действия на них углерода
Мюллит	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	Первичные защитные трубки	1 800	Редко употребляется. По-видимому, прекрасный огнеупорный материал
Окись циркония	ZrO_3	—	2 700	Обычно не применяется в пирометрии. Прекрасный огнеупор

где T_G — действительная температура газа в °С абс.;

T_p — показания пирометра в °С;

p_e — относительная „чернота" пирометра или термометра по сравнению с идеальным „черным телом"; для покрытия окисью термопар считают $p_e = 0{,}90$, для обычных ртутных термометров — $p_e = 0{,}60$;

T_w — действительная температура стенок канала в °С абс.; измеряется оптическим пирометром и термопарой, смонтированной на поверхности стенки канала;

h_g — коэфициент перехода тепла между термопарой и протекающим газом в *Кал/м² час* при перепаде 1° С.

Для воздуха или дымовых газов величина h_g может быть подсчитана по следующей формуле:

$$h_g = \frac{108{,}824 \cdot w}{w + 0{,}292},$$

где w — скорость массы воздуха или дымового газа, протекающего мимо термопары, выраженная в *кг/сек* на 1 *м²* площади поперечного сечения газовой струи.

При измерениях температуры газа ошибки от радиации могут быть практически исключены помещением термопары в центре трубы из плохо проводящего материала. Термопара помещается в 150 *мм* от конца трубы. Затем труба, содержащая термопару, подвергается действию газовой струи, и образец газа пропускается через трубу и над трубой; при скорости газа над вставленной термопарой, равной 6,1 *м/сек*, термопара будет показывать истинную температуру газа.

ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Сопротивление проволоки из чистой платины колеблется в зависимости от температуры в соответствии со следующим уравнением:

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2),$$

где $a = 0{,}00392$;

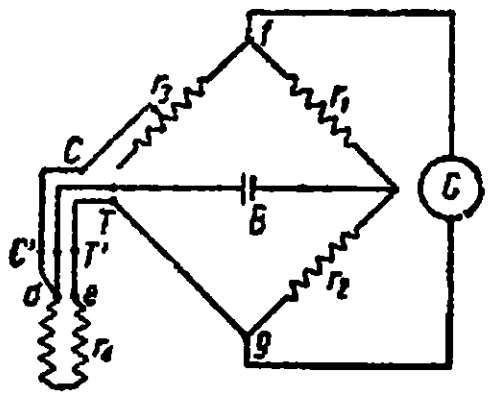
$b = -0{,}000000588$;

R_t — сопротивление при температуре t;

R_0 — сопротивление при 0° С;

t — температура проволоки в °С.

Это свойство платины широко используется для измерения температур в пределах от самой низкой, получаемой в лаборатории, до умеренно высоких температур (500° С). Для этих целей находят себе применение и другие металлы, как медь, палладий или никель. Сопротивление проволоки измеряют мостиком Уитстона или потенциометром. На фиг. 16 дана типичная схема такого термометра с применением мостика Уитстона. Схема соединений автоматически исключает сопротивление соединительных проводов, что чрезвычайно необходимо, так как исправление ошибки, внесенной изменением сопротивления проводов, очень трудно, если не невозможно.



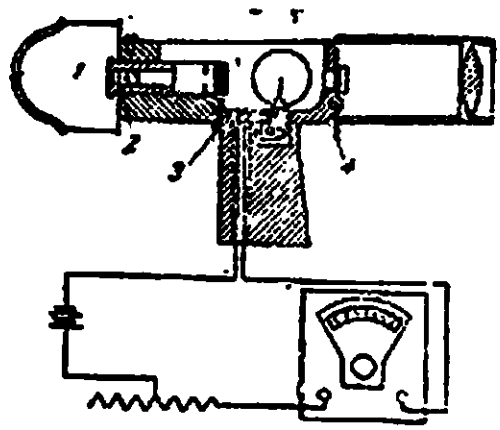
Фиг. 16. Термометр сопротивления с мостиком Уитстона.

ОПТИЧЕСКИЕ ПИРОМЕТРЫ

При прохождении излучения от нагретого тела через фильтр (окрашенное стекло), пропускающий свет только с определенной длиной волны, интенсивность проходящего пучка лучей находится в определенном соотношении с температурой нагретого тела. Существует также определенное соотношение между температурой нити накала какого-либо электрического прибора и силой тока, проходящего через нить. Если при этом установка снабжена аппаратурой для измерения и регулирования тока, протекающего через нить накала, и для непосредственного сравнения интенсивности света от накала нити с интенсивностью света от нагретого тела при известной температуре, то представляется возможным откалибровать нить накала по температурной шкале и составить графи

зависимости температуры нити накала от силы тока, проходящего через нить. Подбирая сечение нити накала, соответствующее сечению тела с неизвестной температурой и заменив необходимую при этом силу тока, находим по графику температуру тела.

На фиг. 17 и 18 представлен наиболее часто применяющийся оптический пирометр.

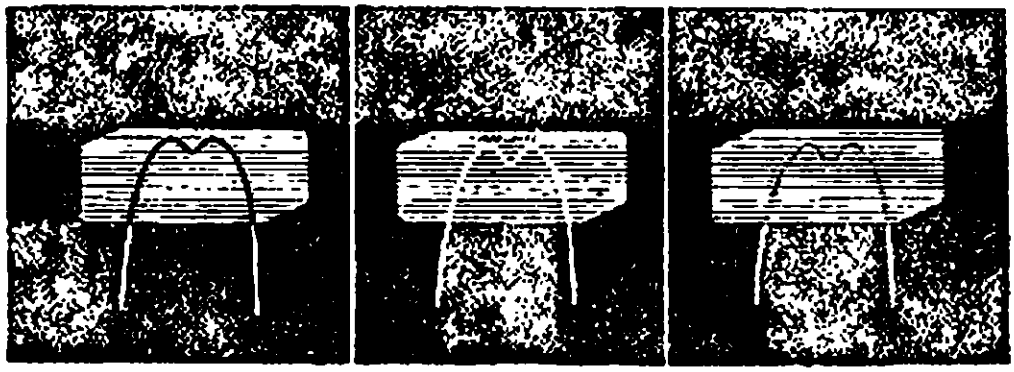


Фиг. 17. Оптический пирометр (Leeds and Northrup Co).

1 — окуляр; 2 — красное стекло; 3 — экран, употребляемый только для приборов с одной шкалой; 4 — экран, употребляемый для приборов с двойной шкалой.

Оптические пирометры обычно калибруются по излучениям тел в условиях „черного тела". „Черное тело" может быть определено как тело, поглощающее все лучи, падающие на него, и не отражающее и не пропускающее никаких лучей. Таким образом, все излучения „черного тела" создают только температуру. Отношение энергии, излучаемой при данной температуре каким-либо веществом, к энергии, излучаемой при той же температуре „черным телом", называется „лучеиспускательной способностью" вещества.

Излучения из небольших отверстий в равномерно нагретых камерах весьма близко подходят к излучениям „черного тела". Температура стенок печи и температура нагреваемого в печи тела могут быть получены с помощью оптического пирометра при том допущении, что в данном случае мы имеем условия „черного тела". Окисленные металлы гораздо более приближаются к условиям „черного тела", нежели неокисленные. Когда нет преобладающих условий „черного тела", пирометр показывает заниженную температуру, требующую внесения поправок. Указания относительно внесения поправок обычно даются заводами, выпускающими пирометры [1].



Фиг. 18. Сравнение интенсивности изображения волоска в оптических пирометрах.

САМОЗАПИСЫВАЮЩИЕ ПИРОМЕТРЫ И КОНТРОЛЬНАЯ ПИРОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Обсуждение данного вопроса выходит из рамок этой книги; поэтому достаточно сказать только, что самопишущие приборы пригодны для обоих типов термопар как из простых, так и из редких металлов, причем используется или потенциометр, или обычный гальванометр. Возможно также и применение пирометров, записывающих излучение, за исключением оптических пирометров, требующих подбора цвета накала нити.

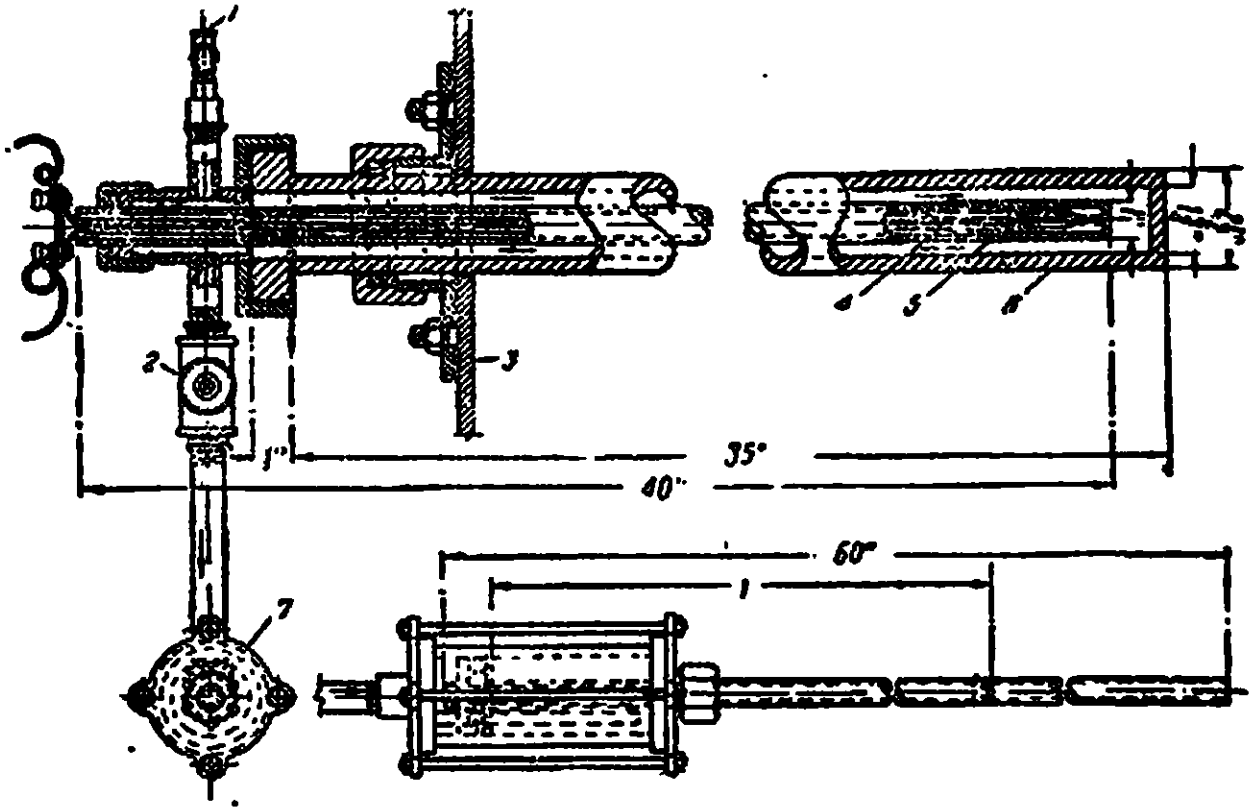
[1] „Bur. Standards Tech. Paper, 170" and Wood and Cork, Pyrometry, стр. 97—103, McGraw-Hill.

Ни в коем случае нельзя применять энергию термопары для приведения в движение записывающего пера или карандаша. Источником силы должен служить или электрический мотор, или же пружина, подвигающие ленту самопишущего прибора. В случае применения гальванометра мотор или пружина заставляют действовать прерывающийся контакт, давящий на перо. В случае применения потенциометра мотор или пружина производят автоматическое балансирование.

Измерения температуры в газогенераторах [1]

Температура в нефтяных газогенераторах может изменяться от 500 до 1200° С и зависит от места в генераторе и отрезка времени цикла, захваченного измерением температуры.

Для измерения этих температур обычно применяются термопары, изготовленные из простых металлов. Если термопары недостаточно хорошо защищены, то в восстановительной атмосфере генератора их точность будет нарушена весьма скоро.



Фиг. 19. Устройство защитных труб и термопар с присоединенной системой со сжатым воздухом, приспособленное для газогенераторов.

1 — входное отверстие для сухого сжатого воздуха: *2* — вспомогательный клапан; *3* — камера газогенератора; *4* — термопара; *5* — защитная труба из сплава; *6* — карборундовая труба; *7* — водомер.

Для защиты термопар в газогенераторах употребляются следующие материалы:

1. Сварочное железо. Исключается, так как трубы очень недолговечны даже при сравнительно низких температурах, а также потому, что они проницаемы для газов с восстановительными свойствами.

2. Цельнотянутая сталь. Лучше, нежели сварочное железо, но все же срок годности ограничен воздействием на нее углерода, утолщающего и коробящего сталь. Проницаема для восстановительных газов.

---

[1] H. J. K o l l m a n, Abstracts of article, „Proc. P. C. G. A.", стр. 440—443, 1928.

3. Фарфоровые трубы. Не могут противостоять резким изменениям температуры. Менее проницаемы по сравнению с сварочным железом и цельнотянутой сталью.

4. Нихром (сплав железа, никеля и хрома). Долговечность ограничена при работе в зоне высоких температур, но весьма удовлетворительна при работе в местах с более низкой температурой.

5. Карборунд. Прекрасно противостоит высоким температурам и восстановительным газам, но мало пригоден для защиты термопар вследствие его проницаемости.

На фиг. 19 показана система, с помощью которой карборунд может быть использован для защиты термопар в газогенераторах. В этой системе давление воздуха несколько выше, нежели давление газа в самом газогенераторе. Это сделано для предупреждения диффузии газа из газогенератора в термопару.

В табл. 13 указано применение пирометров в различных отраслях промышленности и приведены свойства пирометров, наиболее подходящих для применения в той или иной области техники.

Таблица 13

Промышленное применение пирометров

Род работы	Тип пирометра
Образование донного льда возле силовых станций	Термометр сопротивления
Доменная печь:	
Расплавленный чугун	Оптический пирометр
Расплавленный шлак	
Температура фуры	
Горячее дутье	Термопара из простых металлов
Колошниковый газ	
Хлебопекарни	Термометры с жидкостью Биметаллические термометры Термометры с сопротивлением Термопары из простых металлов
Паровые котлы:	
Топка	Оптический пирометр
Экономайзеры	Термометры с жидкостью и термопары из простых металлов
Подогреватели питательной воды	
Дымовые газы	
Шпилевые печи	Записывающие термометры с жидкостью или биметаллические термопары из простых металлов
Керамическая промышленность:	
Сушильные печи	Термометры с жидкостью Термопары из простых или из редких металлов
Печи для обжига	
Товарные вагоны (холодильники)	Термометры сопротивления
Грузовые пароходы (температура груза)	
Гальванические ванны	Термопары из простых металлов
Стекольная промышленность:	
Плавильные печи	Оптические пирометры Пирометры радиации Частично погруженные термопары из редких металлов

Род работы	Тип пирометра
Печи для отжига стекла	Термометры с жидкостью Термопары из простых металлов
Нити ламп накаливания	Оптические пирометры типа исчезающей нити
Накал калильной сетки	Усовершенствованный радиационный пирометр
Сушка леса	Термометр сопротивления
Производство ковкого чугуна:	
Печь без дутья (воздушная печь)	Оптический пирометр
Печь для отжига	Термопара из простых металлов
Нефтеперегонные установки	Термометры с жидкостью Термопары из простых металлов
Печи для портланд-цемента	Оптические пирометры
Сталь:	
Производство:	
Расплавленный металл при выходе из печи или в ковше	Оптический пирометр
Слитки и поковки	Оптический пирометр и пирометр для измерения радиации
Термическая обработка:	
Закалочная печь для обычных поковок Закалочная печь для инструментальной стали	Термопара из простых металлов
Закалочная печь для быстрорежущей стали	Термопара из редких металлов
Масляные ванны для закалки	Термометры с жидкостью Термопары из простых металлов

4. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

(Перевод *А. И. Великина*)

Уравнение для табл. 14, 15 и 16:

$$Q = 0{,}014435\, CA \sqrt{\frac{h}{G}},$$

где Q — расход в *м³/час*;
A — сечение отверстия в *мм²*;
C — коэфициент истечения;
h — давление в *мм* водного столба;
G — удельный вес газа, принимая удельный вес воздуха за единицу.

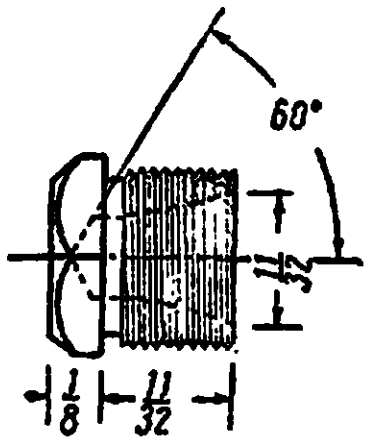
Расход воздуха через отверстия кругового сечения, через отверстия в тонкой пластинке и через отверстия квадратного сечения

$$Q = 0{,}25508\, C_1' d^2 \sqrt{\frac{T_s}{P_s}} \sqrt{\frac{T_a}{T_f}} \sqrt{\frac{1}{G}} P_1 \sqrt{(1 - r)},$$

где Q — количество проходящего воздуха в *м³/час* при 15,56° С и давлении в 1,035 *ата*;
C_1' — коэфициент расхода (см. табл. 32 по данным Бюро стандартов США);

Таблица 14

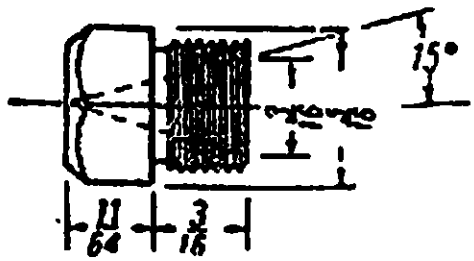
Расход воздуха и коэфициент истечения из отверстий форсунки с углом скоса в 60°



Фиг. 20.

Номера калибров	Расход воздуха в м³/час при давлении в мм водяного столба											Коэфициент истечения
	50,8	76,2	101,6	127,0	152,4	177,8	203,2	228,6	254,0	279,4	304,8	
20	1,081	1,327	1,534	1,715	1,879	2,029	2,173	2,301	2,425	2,544	2,657	0,801
21	1,056	1,293	1,494	1,670	1,828	1,975	2,111	2,241	2,360	2,476	2,587	0,801
22	1,030	1,262	1,455	1,627	1,783	1,924	2,060	2,182	2,301	2,414	2,522	0,801
23	0,991	1,214	1,401	1,568	1,715	1,854	1,981	2,103	2,216	2,323	2,428	0,801
24	0,968	1,180	1,364	1,525	1,673	1,806	1,930	2,049	2,156	2,264	2,366	0,801
25	0,934	1,143	1,319	1,474	1,616	1,746	1,868	1,981	2,089	2,188	2,284	0,801
26	0,900	1,104	1,276	1,426	1,562	1,687	1,806	1,913	2,015	2,089	2,210	0,801
27	0,866	1,061	1,225	1,370	1,500	1,619	1,732	1,837	1,936	2,032	2,123	0,801
28	0,824	1,007	1,163	1,302	1,426	1,540	1,647	1,746	1,840	1,930	2,018	0,801
29	0,773	0,945	1,092	1,223	1,339	1,446	1,545	1,639	1,726	1,811	1,890	0,801
30	0,688	0,843	0,974	1,090	1,194	1,288	1,378	1,460	1,540	1,616	1,687	0,801
31	0,600	0,736	0,849	0,951	1,041	1,124	1,203	1,276	1,344	1,409	1,472	0,801
32	0,563	0,688	0,795	0,889	0,974	1,050	1,124	1,191	1,257	1,319	1,378	0,801
33	0,535	0,654	0,753	0,843	0,923	0,999	1,067	1,132	1,191	1,251	1,305	0,801
34	0,515	0,631	0,727	0,812	0,891	0,962	1,030	1,092	1,149	1,206	1,259	0,801
35	0,504	0,617	0,713	0,798	0,874	0,945	0,010	1,070	1,129	1,183	1,237	0,801
36	0,473	0,580	0,671	0,750	0,821	0,886	0,948	1,005	1,058	1,112	1,160	0,801
37	0,450	0,552	0,637	0,713	0,781	0,843	0,903	0,957	1,007	1,058	1,104	0,801
38	0,430	0,526	0,608	0,679	0,744	0,804	0,860	0,911	0,962	1,007	1,053	0,801
39	0,413	0,507	0,586	0,654	0,716	0,773	0,826	0,877	0,925	0,971	1,013	0,801
40	0,399	0,487	0,566	0,634	0,693	0,750	0,801	0,849	0,894	0,940	0,982	0,801
41	0,385	0,470	0,543	0,608	0,665	0,719	0,770	0,815	0,860	0,903	0,942	0,801
42	0,365	0,447	0,515	0,577	0,631	0,682	0,730	0,773	0,815	0,855	0,894	0,801
43	0,331	0,405	0,467	0,524	0,572	0,617	0,659	0,702	0,739	0,775	0,809	0,801
44	0,308	0,379	0,436	0,487	0,535	0,577	0,617	0,654	0,691	0,724	0,756	0,801
45	0,281	0,342	0,396	0,444	0,487	0,524	0,560	0,594	0,625	0,657	0,688	0,801
46	0,274	0,335	0,387	0,433	0,474	0,512	0,547	0,580	0,611	0,642	0,670	0,801
47	0,257	0,315	0,364	0,406	0,446	0,481	0,514	0,545	0,574	0,603	0,630	0,801
48	0,241	0,296	0,341	0,381	0,418	0,451	0,483	0,512	0,539	0,566	0,591	0,801
49	0,223	0,273	0,315	0,352	0,386	0,417	0,446	0,473	0,498	0,522	0,545	0,801
50	0,204	0,250	0,289	0,323	0,354	0,383	0,409	0,434	0,457	0,480	0,501	0,801
51	0,187	0,230	0,265	0,296	0,325	0,351	0,375	0,398	0,419	0,440	0,460	0,801

Расход воздуха и коэфициент истечения из отверстий форсунки с углом скоса в 15°

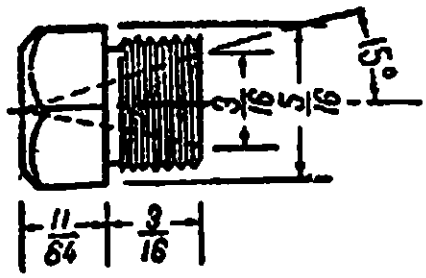


Фиг. 21.

Номера калибров	Расход воздуха в *м³/час*. Давление в *мм* водяного столба											Коэфициент истечения
	50,8	76,2	101,6	127,0	152,4	177,8	203,2	228,6	254,0	279,4	304,8	
20	1,1452	1,4037	1,6215	1,8112	1,9857	2,1451	2,2951	2,4336	2,5640	2,6885	2,8074	0,847
21	1,1179	1,3697	1,5791	1,7659	1,9357	2,0914	2,2357	2,3715	2,4989	2,6234	2,7394	0,848
22	1,0867	1,3329	1,5395	1,7205	1,8875	2,0376	2,1791	2,3043	2,4338	2,5556	2,6697	0,848
23	1,0471	1,2848	1,4829	1,6584	1,8169	1,9612	2,0970	2,2244	2,3432	2,4593	2,5696	0,848
24	1,0216	1,2509	1,4423	1,6159	1,7716	1,9103	2,0433	2,1678	2,2838	2,3970	2,5017	0,848
25	0,9877	1,2084	1,3960	1,5622	1,7122	1,8480	1,9810	2,0942	2,2102	2,3149	2,4197	0,848
26	0,9537	1,1658	1,3499	1,5084	1,6527	1,7857	1,9103	2,0263	2,1378	2,2414	2,3376	0,845
27	0,9169	1,1225	1,2961	1,4490	1,5876	1,7160	1,8338	1,9442	2,0489	2,1508	2,2442	0,846
28	0,8716	1,0699	1,2311	1,3782	1,5112	1,6301	1,7453	1,8480	1,9499	2,0433	2,1338	0,848
29	0,8179	1,0018	1,1575	1,2933	1,4178	1,5310	1,6357	1,7348	1,8282	1,9150	2,0036	0,848
30	0,7301	0,8943	1,0330	1,1546	1,2650	1,3641	1,4603	1,5480	1,6301	1,7093	1,7857	0,848
31	0,6368	0,7783	0,8999	1,0076	1,1037	1,1914	1,2735	1,3499	1,4235	1,4943	1,5603	0,848
32	0,5943	0,7273	0,8405	0,9396	1,0301	1,1122	1,1914	1,2622	1,3301	1,3962	1,4575	0,848
33	0,5632	0,6905	0,7981	0,8915	0,9764	1,0471	1,1292	1,1971	1,2622	1,3244	1,3830	0,848
34	0,5434	0,6679	0,7698	0,8603	0,9424	1,0188	1,0896	1,1548	1,2169	1,2763	1,3358	0,848
35	0,5249	0,6537	0,7556	0,8490	0,9264	0,9960	1,0697	1,1343	1,1943	1,2537	1,3103	0,848
36	0,5009	0,6141	0,7075	0,7924	0,8688	0,9387	1,0018	1,0611	1,1207	1,1765	1,2282	0,848
37	0,4783	0,5858	0,6764	0,7568	0,8264	0,8943	0,9665	1,0131	1,0669	1,1207	1,1698	0,8475
38	0,4542	0,5603	0,6424	0,7188	0,7867	0,8518	0,9084	0,9650	0,0160	1,0669	1,1150	0,847
39	0,4372	0,5369	0,6160	0,6905	0,7584	0,8179	0,8699	0,9282	0,9764	1,0245	1,0697	0,8485
40	0,4231	0,5179	0,5965	0,6693	0,7330	0,7924	0,8462	0,8971	0,9452	0,9933	1,0358	0,848
41	0,4061	0,4969	0,5669	0,6424	0,7047	0,7613	0,8122	0,8632	0,9084	0,9537	0,9962	0,8456
42	0,3854	0,4726	0,5448	0,6085	0,6679	0,7217	0,7698	0,8179	0,8603	0,9028	0,9424	0,845
43	0,3481	0,4259	0,4924	0,5490	0,6028	0,6509	0,6962	0,7385	0,7783	0,8159	0,8518	0,843
44	0,3243	0,3976	0,4585	0,5122	0,5632	0,6056	0,6481	0,6877	0,7245	0,7613	0,7952	0,8415
45	0,2943	0,3605	0,4160	0,4641	0,5094	0,5519	0,5895	0,6254	0,6594	0,6905	0,7217	0,840
46	0,2864	0,3515	0,4050	0,4538	0,4983	0,5349	0,5745	0,6085	0,6396	0,6785	0,7018	0,839
47	0,2691	0,3297	0,3805	0,4245	0,4670	0,5037	0,5377	0,5717	0,6028	0,6311	0,6594	0,8375
48	0,2524	0,3085	0,3565	0,3985	0,4358	0,4726	0,5037	0,5349	0,5632	0,5915	0,6169	0,837
49	0,2323	0,2844	0,3286	0,3679	0,4019	0,4358	0,4641	0,4924	0,5207	0,5462	0,5688	0,836
50	0,2131	0,2609	0,3014	0,3373	0,3707	0,3990	0,4273	0,4528	0,4754	0,5009	0,5236	0,834
51	0,1944	0,2383	0,2722	0,3073	0,3366	0,3622	0,3877	0,4132	0,4358	0,4556	0,4754	0,830
52	0,1740	0,2128	0,2459	0,2751	0,3014	0,3237	0,3461	0,3679	0,3877	0,4075	0,4273	0,827
53	0,1509	0,1840	0,2125	0,2377	0,2604	0,2810	0,3000	0,3170	0,3368	0,3509	0,3679	0,824
54	0,1296	0,1588	0,1834	0,2049	0,2244	0,2422	0,2592	0,2748	0,2898	0,3039	0,3175	0,821
55	0,1159	0,1409	0,1627	0,1823	0,1992	0,2154	0,2304	0,2442	0,2575	0,2700	0,2819	0,818
56	0,0920	0,1124	0,1299	0,1452	0,1590	0,1721	0,1837	0,1947	0,2052	0,2154	0,2250	0,815
57	0,0778	0,0954	0,1101	0,1231	0,1347	0,1457	0,1557	0,1653	0,1740	0,1825	0,1905	0,808
58	0,0741	0,0906	0,1050	0,1174	0,1285	0,1390	0,1483	0,1573	0,1658	0,1740	0,1817	0,807
59	0,0705	0,0868	0,0999	0,1118	0,1223	0,1322	0,1412	0,1497	0,1579	0,1656	0,1729	0,806
60	0,0671	0,0824	0,0951	0,1064	0,1163	0,1257	0,1344	0,1425	0,1503	0,1576	0,1647	0,805
61	0,0634	0,0775	0,0897	0,1002	0,1098	0,1188	0,1268	0,1347	0,1415	0,1489	0,1554	0,803
62	0,0603	0,0739	0,0852	0,0951	0,1039	0,1126	0,1203	0,1276	0,1344	0,1412	0,1474	0,802
63	0,0574	0,0702	0,0809	0,0906	0,0993	0,1073	0,1146	0,1217	0,1282	0,1344	0,1404	0,800
64	0,0541	0,0662	0,0764	0,0856	0,0937	0,1013	0,1081	0,1146	0 1208	0,1268	0,1324	0,799
65	0,0507	0,0633	0,0719	0,0804	0,0880	0,0951	0,1016	0,1078	0,1135	0,1191	0,1245	0,797
66	0,0483	0,0566	0,0642	0,0719	0,0787	0,0849	0,0908	0,0965	0,1016	0,1067	0,1112	0,796
67	0,0422	0,0518	0,0597	0,0666	0,0730	0,0790	0,0843	0,0894	0,0945	0,0991	0,1033	0,795
68	0,0393	0,0484	0,0558	0,0625	0,0685	0,0739	0,0790	0,0838	0,0883	0,0926	0,0968	0,793
69	0,0351	0,0430	0,0496	0,0558	0,0611	0,0659	0,0705	0,0747	0,0787	0,0826	0,0863	0,792
70	0,0325	0,0399	0,0458	0,0512	0,0563	0,0608	0,0651	0,0691	0,0727	0,0761	0,0792	0,790

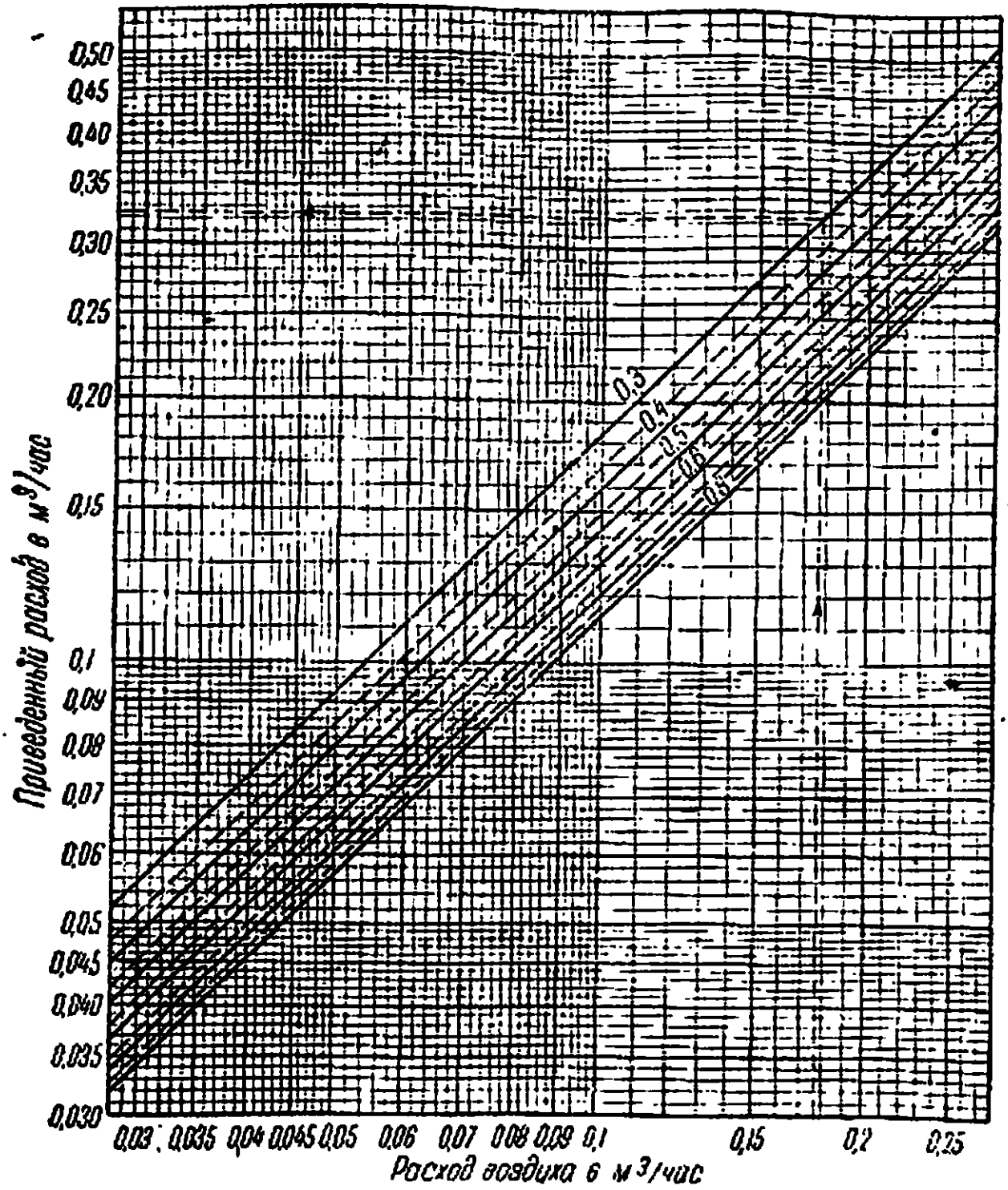
Таблица 16

Расход воздуха и коэфициент истечения из отверстий форсунки с углом скоса в 15° в стандартной кухонной плите



Фиг. 22.

Номера калибров	Расход воздуха в м³/час при давлении в мм водяного столба										Коэфициент истечения
	50,8	76,2	101,6	127,0	152,4	177,8	203,2	228,6	254,0	279,4	304,8	
20	1,061	1,299	1,500	1,678	1,840	1,984	2,123	2,250	2,372	2,490	2,598	0,784
21	1,036	1,271	1,466	1,639	1,794	1,939	2,072	2,199	2,318	2,431	2,539	0,786
22	1,013	1,242	1,432	1,602	1,755	1,896	2,026	2,151	2,267	2,377	2,485	0,789
23	0,979	1,200	1,387	1,551	1,698	1,834	1,961	2,080	2,190	2,298	2,403	0,793
24	0,957	1,174	1,356	1,517	1,658	1,794	1,916	2,032	2,142	2,247	2,349	0,795
25	0,928	1,138	1,313	1,469	1,610	1,738	1,856	1,970	2,077	2,179	2,275	0,798
26	0,900	1,104	1,274	1,423	1,562	1,687	1,803	1,913	2,015	2,111	2,207	0,800
27	0,869	1,064	1,228	1,373	1,506	1,624	1,738	1,842	1,941	2,038	2,128	0,804
28	0,829	1,016	1,174	1,313	1,440	1,554	1,661	1,763	1,856	1,947	2,035	0,808
29	0,784	0,959	1,107	1,240	1,356	1,466	1,568	1,661	1,752	1,837	1,919	0,812
30	0,705	0,863	0,999	1,118	1,223	1,319	1,412	1,497	1,579	1,656	1,729	0,820
31	0,620	0,758	0,877	0,979	1,075	1,160	1,240	1,316	1,387	1,455	1,520	0,826
32	0,580	0,710	0,821	0,917	1,005	1,087	1,160	1,231	1,299	1,361	1,421	0,828
33	0,552	0,676	0,781	0,874	0,957	1,033	1,104	1,172	1,237	1,296	1,353	0,830
34	0,532	0,654	0,753	0,843	0,923	0,996	1,067	1,132	1,191	1,251	1,305	0,830
35	0,524	0,642	0,741	0,829	0,908	0,979	1,047	1,112	1,172	1,228	1,293	0,830
36	0,492	0,603	0,696	0,775	0,852	0,920	0,982	1,044	1,101	1,152	1,203	0,831
37	0,467	0,574	0,662	0,741	0,812	0,874	0,937	0,993	1,047	1,098	1,146	0,831
38	0,447	0,546	0,631	0,705	0,773	0,835	0,891	0,945	0,999	1,047	1,092	0 831
39	0,430	0,526	0,606	0,679	0,741	0,801	0,857	0,911	0,959	1,007	1,050	0,831
40	0,416	0,509	0,589	0,657	0,722	0,778	0,832	0,883	0,931	0,976	1,019	0,831
41	0,408	0,490	0,566	0,631	0,693	0,747	0,798	0,849	0,894	0,937	0,979	0,832
42	0,380	0,466	0,538	0,600	0,658	0,710	0,759	0,805	0,849	0,891	0,931	0,832
43	0,344	0,421	0,486	0,543	0,595	0,642	0,688	0,730	0,768	0,807	0,842	0,832
44	0,321	0,393	0,454	0,508	0,556	0,601	0,642	0,682	0,719	0,753	0,787	0,832
45	0,292	0,358	0,413	0,461	0,505	0,546	0,584	0,620	0,652	0,685	0,715	0,832
46	0,284	0,348	0,402	0,450	0,492	0,532	0,569	0,603	0,637	0,667	0,696	0,832
47	0,267	0,328	0,378	0,423	0,464	0,501	0,535	0,567	0,599	0,628	0,656	0,832
48	0,251	0,307	0,354	0,396	0,434	0,470	0,501	0,532	0,560	0,589	0,614	0,832
49	0,231	0,283	0,327	0,365	0,401	0,433	0,463	0,491	0,518	0,543	0,566	0,831
50	0,212	0,260	0,300	0,335	0,368	0,397	0,425	0,450	0,475	0,498	0,520	0,830
51	0,194	0,238	0,275	0,307	0,337	0,364	0,389	0,412	0,434	0,456	0,475	0,829



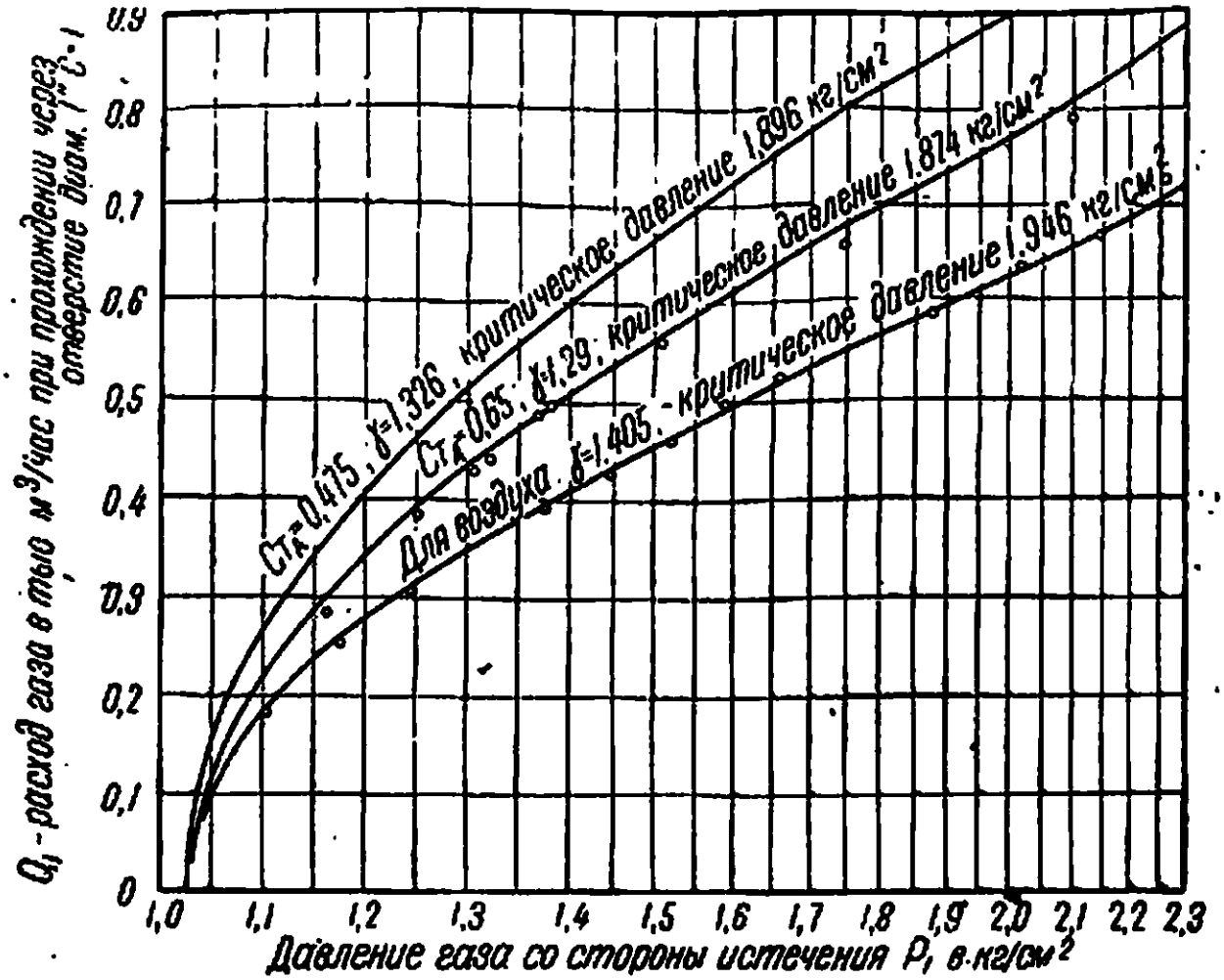
Фиг. 23. Кривые для поправки на удельный вес. Расход воздуха можно привести путем поправочных кривых к расходу газа любого удельного веса. От данного значения расхода воздуха нижней шкалы идем вверх до пересечения с кривой удельного веса и слева читаем расход газа соответствующего удельного веса.

Таблица 17

Стандартные калибры с соответствующими обозначениями диаметров отверстий и их сечения [1]

Условные обозначения калибра	Диаметр отверстия в дм.	Сечение отверстия в кв. дм.	Условные обозначения калибра	Диаметр отверстия в дм.	Сечение отверстия в кв. дм.	Условные обозначения калибра	Диаметр отверстия в дм.	Сечение отверстия в кв. дм.
1/2	0,5000	0,1963	3	0,2130	0,03563	3/32	0,0938	0,00690
31/64	0,4841	0,1843	4	0,2090	0,03431	42	0,0935	0,00687
15/32	0,4688	0,1726	5	0,2055	0,03317	43	0,0890	0,00622
29/64	0,4531	0,1613	6	0,2040	0,03269	44	0,0860	0,00581
7/16	0,4375	0,1503	13/64	0,2031	0,03241	45	0,0820	0,00528
27/64	0,4219	0,1398	7	0,2010	0,03173	46	0,0810	0,00515
Z	0,4130	0,1340	8	0,1990	0,03110	47	0,0785	0,00484
13/32	0,4063	0,1296	9	0,1960	0,03017	5/64	0,0781	0,00479
Y	0,4040	0,1282	10	0,1935	0,02940	48	0,0760	0,00454
X	0,3970	0,1238	11	0,1910	0,02865	49	0,0730	0,00419
25/61	0,3906	0,1198	12	0,1890	0,02806	50	0,0700	0,00385
W	0,3860	0,1170	3/16	0,1875	0,02761	51	0,0670	0,00353
V	0,3770	0,1116	13	0,1850	0,02688	52	0,0635	0,00317
3/8	0,3750	0,1104	14	0,1820	0,02602	1/16	0,0625	0,00307
U	0,3680	0,1064	15	0,1800	0,02545	53	0,0595	0,00278
23/64	0,3594	0,1014	16	0,1770	0,02461	54	0,0550	0,00238
T	0,3580	0,1006	17	0,1730	0,02351	55	0,0520	0,00212
S	0,3480	0,09511	11/64	0,1719	0,02320	3/64	0,0473	0,00173
11/32	0,3438	0,09281	18	0,1695	0,02256	56	0,0465	0,001698
R	0,3390	0,09026	19	0,1660	0,02164	57	0,0430	0,001452
Q	0,3320	0,08657	20	0,1610	0,02036	58	0,0420	0,001385
21/64	0,3281	0,08456	21	0,1590	0,01986	59	0,0410	0,001320
P	0,3230	0,08194	22	0,1570	0,01936	60	0,0400	0,001257
O	0,3160	0,07843	5/32	0,1563	0,01917	61	0,0390	0,001195
5/16	0,3125	0,07670	23	0,1540	0,01863	62	0,0380	0,001134
N	0,3020	0,07163	24	0,1520	0,01815	63	0,0370	0,001075
19/64	0,2969	0,06922	25	0,1495	0,01755	64	0,0360	0,001018
M	0,2950	0,06835	26	0,1470	0,01697	65	0,0350	0,000962
L	0,2900	0,06605	27	0,1440	0,01629	66	0,0330	0,000855
9/32	0,2813	0,06213	9/64	0,1406	0,01553	67	0,0320	0,000804
K	0,2810	0,06202	28	0,1405	0,01549	1/32	0,0313	0,000765
J	0,2770	0,06026	29	0,1360	0,01453	68	0,0310	0,000755
I	0,2720	0,05811	30	0,1285	0,01296	69	0,0292	0,000670
H	0,2660	0,05557	1/8	0,1250	0,01227	70	0,0280	0,000616
17/64	0,2656	0,05542	31	0,1200	0,01131	71	0,0260	0,000531
G	0,2610	0,05350	32	0,1160	0,01057	72	0,0250	0,000491
F	0,2570	0,05187	33	0,1130	0,01003	73	0,0240	0,000452
E-1/4	0,2500	0,04909	34	0,1110	0,00968	74	0,0225	0,000398
D	0,2460	0,04753	35	0,1100	0,00950	75	0,0210	0,000346
C	0,2420	0,04600	7/64	0,1094	0,00940	76	0,0200	0,000314
B	0,2380	0,04449	36	0,1065	0,00891	77	0,0180	0,000254
15/64	0,2344	0,04314	37	0,1040	0,00849	78	0,0160	0,000201
A	0,2340	0,04301	38	0,1015	0,00809	1/64	0,0156	0,000191
1	0,2280	0,04083	39	0,0995	0,00778	79	0,0145	0,000165
2	0,2210	0,03836	40	0,0980	0,00754	80	0,0135	0,000143
7/32	0,2188	0,03758	41	0,0960	0,00724			

[1] Условные обозначения калибра даны в стандартном обозначении или в стандартных числах, соответствующих калибрам, установленным для стальной проволоки.



Фиг. 24. Истечение газа через отверстия в атмосферу.

1 — $G_Д = 0{,}475$; $\gamma = 1{,}326$; критическое давление 1,896 *кг/см²*; *2* — $G_Д = 0{,}65$; $\gamma = 1{,}29$; критическое давление 1,874 *кг/см²*; *3* — для воздуха $\gamma = 1{,}405$; критическое давление 1,946 *кг/см²*.

Расход воздуха в *м³/час*:

$$Q = Q' D^2 C \sqrt{\frac{288{,}8}{T}},$$

где Q получается по кривой или по формуле; Q' — расход воздуха через отверстие диаметром в 1" в *м³/час* при 15,56° С и при давлении в 1,035 *ат*, причем $C = 1{,}00$;

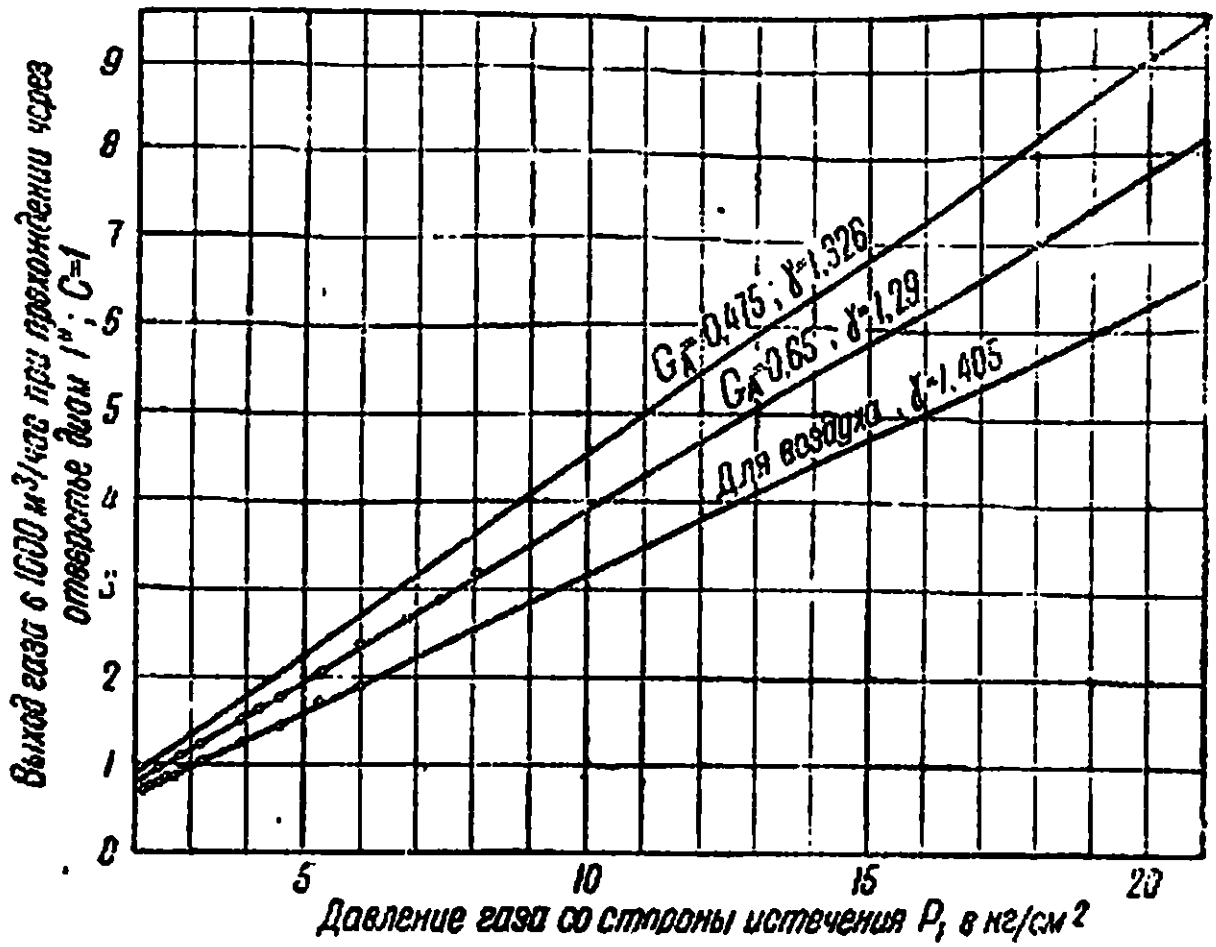
Для воздуха:
$Q' = 1356{,}5 \sqrt{P_1^{0{,}2857} - 1{,}00844}$, когда $P < 1{,}946$ *ата*;
$Q = 315{,}5\ P_1$, $P > 1{,}946$ *ата*.

Для газа $G_Д = 0{,}65$:
$Q' = 1907{,}17 \sqrt{P_1^{0{,}2248} - 1{,}00644}$, когда $P < 1{,}874$ *ата*;
$Q' = 388{,}94\ P_1$, $P > 1{,}874$ *ата*.

Для газа $G_Д = 0{,}475$:
$Q' = 2133{,}25 \sqrt{P_1^{0{,}248} - 1{,}0065}$, когда $P < 1{,}898$ *ата*;
$Q' = 456{,}75\ P_1$, $P > 1{,}898$ *ата*.

Для любого газа:
$Q' = 731{,}36 \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{1}{G_Д} \left[\left(\frac{P_1}{1{,}027} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]}$, когда $P < P_C$ в *ата*;
$Q' = \frac{P'}{P_C} Q_C$, $P > P_C$ в *ата*.

D — диаметр отверстия в дм.; C — коэфициент истечения; $C = 1{,}00$, когда со стороны истечения края отверстия закруглены или вогнуты; $C = 0{,}6$ (приблизительно), когда края отверстия заострены;



Фиг. 25. Движение газа через отверстия, когда $P_2 : P_1 < 0{,}5$.
1 — $G_A = 0.475$; $\gamma = 1{,}326$; *2* — $G_A = 0{,}65$; $\gamma = 1{,}29$; *3* — для воздуха $\gamma = 1{,}405$.
(условные обозначения см. на фиг. 24).

T — температура газа со стороны истечения в °C *абс.*;
P_1 — давление " " " " " *am*;
P_C — критическое давление газа со стороны истечения в *am*;
P_2 — давление газа за отверстием в *am*;
$P_C = 1{,}946$ *am* для воздуха;
$P_C = 1{,}874$ для газа, когда $G_A = 0{,}65$;
$P_C = 1{,}896$ для газа, когда $G_A = 0.475$;

$$Pc = P_2 : \left(\frac{2}{1+\gamma}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}; \quad P_C = \frac{1\,027}{\left(\frac{2}{1+\gamma}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}} \text{ для любого газа;}$$

G_A — удельный вес газа по отношению к воздуху;
γ — отношение удельной теплоты газов;
$\frac{C_p}{C_v} = 1{,}405$ для воздуха;
$\frac{C_p}{C_v} = 1{,}29$ для газа при $G_A = 0{,}65$;
$\frac{C_p}{C_v} = 1{,}326$ для газа при $G_A = 0{,}475$;
Q_0 — расход газа при критическом давлении в *м³/час* при температуре 15,56° C и при давлении в 1,035 *am*. Точки на кривых соответствуют экспериментальным данным.
Кривые построены на основании приведенных выше уравнений.

Таблица 18

Величины Q/d^2 для разных давлений и отношений давления

P_1	Отношение давлений до и после диафрагмы $= \tau = P_2/P_1$														
	0,995	0,990	0,98	0,97	0,96	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1,0	0,04879	0,06595	0,09313	0,1136	0,1315	0,1486	0,2050	0,2482	0,2825	0,3115	0,3365	0,3585	0,3743	0,3866	0,4011
1,1	0,05147	0,07254	0,1024	0,1250	0,1446	0,1613	0,2255	0,2730	0,3107	0,3427	0,3691	0,3923	0,4117	0,4253	0,4412
1,2	0,05616	0,07914	0,1118	0,1363	0,1578	0,1759	0,2460	0,2978	0,3390	0,3738	0,4026	0,4278	0,4492	0,4639	0,4813
1,3	0,06063	0,08573	0,1211	0,1477	0,1709	0,1906	0,2665	0,3227	0,3673	0,4050	0,4362	0,4635	0,4866	0,5026	0,5214
1,4	0,06561	0,09233	0,1304	0,1590	0,1841	0,2052	0,2870	0,3475	0,3956	0,4361	0,4697	0,4991	0,5240	0,5412	0,5615
1,5	0,07008	0,09892	0,1397	0,1704	0,1972	0,2199	0,3075	0,3723	0,4238	0,4673	0,5033	0,5348	0,5615	0,5799	0,6017
1,6	0,07456	0,1055	0,1490	0,1818	0,2104	0,2346	0,3280	0,3971	0,4520	0,4984	0,5368	0,5704	0,5989	0,6185	0,6418
1,7	0,07904	0,1121	0,1583	0,1931	0,2235	0,2492	0,3485	0,4219	0,4803	0,5296	0,5704	0,6061	0,6363	0,6572	0,6819
1,8	0,08422	0,1187	0,1676	0,2045	0,2367	0,2639	0,3690	0,4468	0,5085	0,5607	0,6039	0,6417	0,6737	0,6959	0,7220
1,9	0,08810	0,1253	0,1769	0,2158	0,2498	0,2785	0,3895	0,4716	0,5368	0,5919	0,6375	0,6774	0,7112	0,7345	0,7621
2,0	0,09258	0,1319	0,1861	0,2272	0,2630	0,2932	0,4100	0,4964	0,5650	0,6230	0,6710	0,7130	0,7486	0,7732	0,8022
2,1	0,09636	0,1385	0,1956	0,2386	0,2761	0,3079	0,4305	0,5212	0,5933	0,6542	0,7046	0,7487	0,7860	0,8119	0,8423
2,2	0,1009	0,1451	0,2049	0,2499	0,2893	0,3225	0,4510	0,5460	0,6215	0,6853	0,7381	0,7843	0,8235	0,8505	0,8824
2,3	0,1048	0,1517	0,2142	0,2613	0,3025	0,3372	0,4715	0,5709	0,6498	0,7165	0,7717	0,8200	0,8609	0,8892	0,9225
2,4	0,1123	0,1583	0,2235	0,2726	0,3156	0,3518	0,4920	0,5957	0,6780	0,7476	0,8052	0,8556	0,8983	0,9278	0,9626
2,5	0,1170	0,1649	0,2328	0,2840	0,3288	0,3665	0,5125	0,6205	0,7063	0,7788	0,8388	0,8913	0,9358	0,9665	1,0028
2,6	0,1216	0,1715	0,2421	0,2954	0,3419	0,3812	0,5330	0,6453	0,7345	0,8099	0,8723	0,9269	0,9732	1,0052	1,0429
2,7	0,1263	0,1781	0,2515	0,3067	0,3550	0,3958	0,5535	0,6701	0,7628	0,8411	0,9059	0,9626	1,0106	1,0438	1,0830
2,8	0,1310	0,1847	0,2608	0,3181	0,3682	0,4105	0,5740	0,6950	0,7910	0,8722	0,9394	0,9982	1,0480	1,0825	1,1231
2,9	0,1357	0,1913	0,2701	0,3294	0,3814	0,4251	0,5945	0,7198	0,8193	0,9034	0,9730	1,0339	1,0855	1,1211	1,1632
3,0	0,1404	0,1978	0,2794	0,3408	0,3945	0,4398	0,6115	0,7446	0,8475	0,9345	1,0065	1,0696	1,1229	1,1598	1,2033
3,1	0,1450	0,2044	0,2887	0,3522	0,4077	0,4545	0,6355	0,7694	0,8758	0,9657	1,0401	1,1052	1,1603	1,1985	1,2434
3,2	0,1497	0,2110	0,2980	0,3636	0,4208	0,4691	0,6560	0,7942	0,9040	0,9968	1,0736	1,1408	1,1978	1,2371	1,2835
3,3	0,1544	0,2176	0,3073	0,3749	0,4340	0,4838	0,6765	0,8191	0,9321	1,0279	1,1072	1,1765	1,2352	1,2758	1,3236
3,4	0,1591	0,2242	0,3166	0,3862	0,4471	0,4984	0,6970	0,8439	0,9605	1,0591	1,1407	1,2121	1,2726	1,3144	1,3637
3,5	0,1633	0,2308	0,3260	0,3976	0,4603	0,5131	0,7175	0,8687	0,9888	1,0903	1,1743	1,2478	1,3101	1,3531	1,4039
3,6	0,1684	0,2374	0,3353	0,4090	0,4734	0,5278	0,7380	0,8935	1,0170	1,1214	1,2078	1,2834	1,3475	1,3918	1,4440
3,7	0,1731	0,2440	0,3446	0,4203	0,4865	0,5424	0,7585	0,9183	1,0453	1,1526	1,2414	1,3191	1,3849	1,4304	1,4841
3,8	0,1778	0,2506	0,3539	0,4317	0,4997	0,5571	0,7790	0,9432	1,0735	1,1837	1,2748	1,3547	1,4223	1,4691	1,5242
3,9	0,1825	0,2572	0,3632	0,4430	0,5129	0,5717	0,7995	0,9680	1,1018	1,2149	1,3085	1,3904	1,4568	1,5077	1,5643
4,0	0,1872	0,2638	0,3725	0,4544	0,5260	0,5864	0,8200	0,9928	1,1300	1,2460	1,3420	1,4260	1,4972	1,5464	1,6044
4,1	0,1918	0,2704	0,3818	0,4658	0,5392	0,6011	0,8405	1,0176	1,1583	1,2772	1,3756	1,4617	1,5348	1,5851	1,6445
4,2	0,1965	0,2770	0,3911	0,4771	0,5523	0,6157	0,8610	1,0424	1,1865	1,3083	1,4091	1,4973	1,5721	1,6237	1,6846
4,3	0,2012	0,2836	0,4004	0,4885	0,5655	0,6304	0,8815	1,0673	1,2148	1,3395	1,4427	1,5330	1,6096	1,6624	1,7247
4,4	0,2059	0,2902	0,4098	0,4998	0,5786	0,6450	0,9020	1,0921	1,2430	1,3706	1,4762	1,5686	1,6469	1,7010	1,7648
4,5	0,2106	0,2968	0,4191	0,5112	0,5918	0,6597	0,9225	1,1169	1,2713	1,4018	1,5098	1,6043	1,6844	1,7397	1,8050
4,6	0,2152	0,3034	0,4284	0,5226	0,6049	0,6744	0,9430	1,1417	1,2995	1,4329	1,5433	1,6399	1,7218	1,7784	1,8451
4,7	0,2199	0,3100	0,4377	0,5339	0,6181	0,6890	0,9635	1,1666	1,3278	1,4641	1,5769	1,6756	1,7592	1,8170	1,8852
4,8	0,2246	0,3166	0,4470	0,5453	0,6312	0,7037	0,9840	1,1914	1,3560	1,4952	1,6104	1,7112	1,7966	1,8557	1,9253
4,9	0,2293	0,3232	0,4563	0,5566	0,6444	0,7183	1,0045	1,2162	1,3843	1,5264	1,6440	1,7469	1,8341	1,8943	1,9654

5,0	0,2340	0,3298	0,4657	0,5680	0,6575	0,7330	1,0250	1,2410	1,4125	1,5575	1,6775	1,7825	1,8715	1,9330	2,0055
5,1	0,2386	0,3363	0,4750	0,5794	0,6707	0,7477	1,0455	1,2658	1,4408	1,5887	1,7111	1,8182	1,9090	1,9717	2,0456
5,2	0,2433	0,3429	0,4843	0,5907	0,6838	0,7623	1,0660	1,2906	1,4690	1,6198	1,7446	1,8538	1,9464	2,0103	2,0857
5,3	0,2480	0,3495	0,4936	0,6021	0,6970	0,7770	1,0865	1,3155	1,4973	1,6510	1,7782	1,8895	1,9838	2,0490	2,1258
5,4	0,2527	0,3561	0,5029	0,6134	0,7101	0,7916	1,1070	1,3403	1,5255	1,6821	1,8117	1,9251	2,0212	2,0876	2,1659
5,5	0,2575	0,3627	0,5122	0,6248	0,7233	0,8063	1,1275	1,3651	1,5538	1,7133	1,8453	1,9608	2,0587	2,1263	2,2061
5,6	0,2620	0,3693	0,5215	0,6362	0,7364	0,8210	1,1480	1,3899	1,5820	1,7444	1,8788	1,9964	2,0961	2,1650	2,2462
5,7	0,2667	0,3759	0,5308	0,6475	0,7495	0,8356	1,1685	1,4147	1,6103	1,7756	1,9124	2,0321	2,1335	2,2036	2,2863
5,8	0,2714	0,3825	0,5402	0,6589	0,7627	0,8503	1,1890	1,4396	1,6385	1,8067	1,9459	2,0677	2,1709	2,2423	2,3264
5,9	0,2761	0,3891	0,5495	0,6702	0,7759	0,8649	1,2095	1,4644	1,6668	1,8379	1,9795	2,1034	2,2084	2,2809	2,3665
6,0	0,2807	0,3957	0,5588	0,6816	0,7890	0,8796	1,2300	1,4892	1,6950	1,8690	2,0130	2,1390	2,2458	2,3196	2,4066
6,1	0,2854	0,4023	0,5681	0,6930	0,8022	0,8943	1,2505	1,5140	1,7233	1,9002	2,0465	2,1747	2,2832	2,3583	2,4467
6,2	0,2901	0,4090	0,5774	0,7043	0,8153	0,9089	1,2710	1,5388	1,7515	1,9313	2,0801	2,2103	2,3207	2,3969	2,4868
6,3	0,2948	0,4156	0,5867	0,7157	0,8285	0,9236	1,2915	1,5637	1,7798	1,9625	2,1137	2,2460	2,3581	2,4356	2,5269
6,4	0,2995	0,4221	0,5960	0,7270	0,8416	0,9382	1,3120	1,5885	1,8080	1,9936	2,1472	2,2816	2,3955	2,4742	2,5670
6,5	0,3041	0,4287	0,6053	0,7384	0,8548	0,9529	1,3325	1,6133	1,8363	2,0248	2,1808	2,3173	2,4330	2,5129	2,6071
6,6	0,3088	0,4353	0,6147	0,7498	0,8679	0,9676	1,3530	1,6381	1,8645	2,0559	2,2143	2,3529	2,4704	2,5516	2,6473
6,7	0,3135	0,4419	0,6240	0,7611	0,8811	0,9822	1,3735	1,6629	1,8928	2,0871	2,2479	2,3886	2,5078	2,5902	2,6874
6,8	0,3182	0,4485	0,6333	0,7725	0,8942	0,9969	1,3940	1,6878	1,9210	2,1182	2,2814	2,4242	2,5452	2,6289	2,7275
6,9	0,3229	0,4551	0,6426	0,7838	0,9074	1,0115	1,4145	1,7126	1,9493	2,1494	2,3150	2,4599	2,5827	2,6675	2,7676
7,0	0,3275	0,4617	0,6519	0,7952	0,9205	1,0262	1,4350	1,7374	1,9775	2,1805	2,3485	2,4955	2,6201	2,7062	2,8077
7,1	0,3322	0,4683	0,6612	0,8066	0,9337	1,0409	1,4555	1,7622	2,0058	2,2117	2,3821	2,5312	2,6575	2,7449	2,8478
7,2	0,3369	0,4748	0,6705	0,8179	0,9468	1,0555	1,4760	1,7870	2,0340	2,2428	2,4156	2,5668	2,6950	2,7835	2,8879
7,3	0,3416	0,4814	0,6798	0,8293	0,9599	1,0702	1,4965	1,8119	2,0623	2,2740	2,4492	2,6025	2,7324	2,8222	2,9280
7,4	0,3462	0,4880	0,6892	0,8406	0,9731	1,0848	1,5170	1,8367	2,0905	2,3051	2,4827	2,6381	2,7698	2,8608	2,9681
7,5	0,3509	0,4946	0,6985	0,8520	0,9863	1,0995	1,5375	1,8615	2,1188	2,3363	2,5163	2,6738	2,8073	2,8995	3,0083
7,6	0,3556	0,5012	0,7078	0,8634	0,9994	1,1142	1,5580	1,8863	2,1470	2,3674	2,5498	2,7094	2,8447	2,9382	3,0484
7,7	0,3603	0,5078	0,7171	0,8747	1,0126	1,1288	1,5785	1,9111	2,1753	2,3985	2,5834	2,7451	2,8821	2,9768	3,0885
7,8	0,3650	0,5144	0,7264	0,8861	1,0257	1,1435	1,5990	1,9360	2,2035	2,4297	2,6169	2,7807	2,9195	3,0155	3,1286
7,9	0,3696	0,5210	0,7357	0,8974	1,0389	1,1581	1,6195	1,9608	2,2318	2,4609	2,6505	2,8164	2,9570	3,0541	3,1687
8,0	0,3743	0,5276	0,7450	0,9088	1,0520	1,1728	1,6400	1,9856	2,2600	2,4920	2,6840	2,8520	2,9944	3,0928	3,2088
8,1	0,3790	0,5342	0,7544	0,9202	1,0652	1,1875	1,6605	2,0104	2,2883	2,5232	2,7176	2,8877	3,0318	3,1315	3,2489
8,2	0,3837	0,5408	0,7637	0,9315	1,0783	1,2021	1,6810	2,0352	2,3165	2,5543	2,7511	2,9233	3,0693	3,1701	3,2890
8,3	0,3884	0,5474	0,7730	0,9429	1,0914	1,2168	1,7015	2,0601	2,3448	2,5855	2,7847	2,9590	3,1067	3,2088	3,3291
8,4	0,3930	0,5540	0,7823	0,9542	1,1046	1,2314	1,7220	2,0849	2,3730	2,6166	2,8182	2,9946	3,1441	3,2474	3,3692
8,5	0,3977	0,5606	0,7916	0,9656	1,1178	1,2461	1,7425	2,1097	2,4013	2,6478	2,8518	3,0303	3,1816	3,2861	3,4094
8,6	0,4024	0,5672	0,8009	0,9770	1,1309	1,2608	1,7630	2,1345	2,4295	2,6789	2,8853	3,0659	3,2190	3,3248	3,4495
8,7	0,4071	0,5738	0,8102	0,9883	1,1441	1,2754	1,7835	2,1593	2,4578	2,7100	2,9189	3,1016	3,2564	3,3634	3,4896
8,8	0,4118	0,5804	0,8195	0,9997	1,1572	1,2901	1,8040	2,1842	2,4860	2,7412	2,9524	3,1372	3,2938	3,4021	3,5297
8,9	0,4164	0,5870	0,8289	1,0110	1,1703	1,3047	1,8245	2,2090	2,5143	2,7724	2,9860	3,1729	3,3313	3,4407	3,5698
9,0	0,4211	0,5936	0,8382	1,0224	1,1835	1,3194	1,8450	2,2338	2,5425	2,8035	3,0195	3,2086	3,3687	3,4794	3,6099
9,1	0,4258	0,6001	0,8475	1,0338	1,1967	1,3341	1,8655	2,2586	2,5708	2,8347	3,0531	3,2442	3,4061	3,5181	3,6500
9,2	0,4305	0,6067	0,8568	1,0451	1,2098	1,3487	1,8860	2,2834	2,5990	2,8658	3,0866	3,2799	3,4436	3,5567	3,6901
9,3	0,4351	0,6133	0,8661	1,0565	1,2230	1,3634	1,9065	2,3083	2,6273	2,8970	3,1202	3,3155	3,4810	3,5954	3,7302
9,4	0,4398	0,6199	0,8754	1,0678	1,2361	1,3780	1,9270	2,3331	2,6555	2,9281	3,1537	3,3511	3,5184	3,6340	3,7703
9,5	0,4445	0,6265	0,8847	1,0792	1,2493	1,3927	1,9475	2,3579	2,6838	2,9593	3,1873	3,3868	3,5559	3,6727	3,8105
9,6	0,4492	0,6331	0,8940	1,0906	1,2624	1,4074	1,9680	2,3827	2,7120	2,9904	3,2208	3,4224	3,5933	3,7114	3,8506
9,7	0,4539	0,6397	0,9034	1,1019	1,2756	1,4220	1,9885	2,4076	2,7403	3,0216	3,2544	3,4580	3,6307	3,7500	3,8907
9,8	0,4586	0,6463	0,9127	1,1133	1,2887	1,4367	2,0090	2,4324	2,7685	3,0527	3,2879	3,4937	3,6681	3,7887	3,9308
9,9	0,4632	0,6529	0,9220	1,1246	1,3019	1,4513	2,0295	2,4572	2,7968	3,0838	3,3215	3,5294	3,7056	3,8273	3,9709

Продолжение табл. 18

P_1	Отношение давлений до и после диафрагмы $= \varepsilon = P_2/P_1$														
	0,995	0,990	0,98	0,97	0,96	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
10,0	0,4679	0,6595	0,9313	1,1360	1,3150	1,4680	2,0500	2,4820	2,8250	3,1150	3,3560	3,5650	3,7430	3,8980	4,0110
10,5	0,4913	0,6924	0,9779	1,1928	1,3808	1,5383	2,1525	2,6061	2,9663	3,2708	3,5228	3,7433	3,9302	4,0583	4,2116
11,0	0,5147	0,7256	1,0244	1,2496	1,4465	1,6126	2,2550	2,7302	3,1075	3,4265	3,6905	3,9215	4,1173	4,2528	4,4121
11,5	0,5381	0,7584	1,0710	1,3064	1,5123	1,6869	2,3575	2,8543	3,2488	3,5822	3,8583	4,0998	4,3045	4,4458	4,6127
12,0	0,5615	0,7914	1,1176	1,3632	1,5780	1,7592	2,460	2,9784	3,3900	3,7380	4,0260	4,2780	4,4916	4,6392	4,8132
12,5	0,5849	0,8244	1,1641	1,4200	1,6437	1,8325	2,5625	3,1025	3,5313	3,8938	4,1938	4,4563	4,6788	4,8325	5,0138
13,0	0,6083	0,8574	1,2107	1,4768	1,7095	1,9058	2,665	3,2265	3,6725	4,0495	4,3615	4,6345	4,8659	5,0258	5,2143
13,5	0,6317	0,8903	1,2573	1,5336	1,7753	1,9791	2,7675	3,3507	3,8138	4,2053	4,5293	4,8128	5,0530	5,2191	5,4149
14,0	0,6551	0,9233	1,3038	1,5904	1,8410	2,0524	2,870	3,4748	3,9550	4,3610	4,6970	4,9910	5,2402	5,4124	5,6154
14,5	0,6785	0,9563	1,3504	1,6472	1,9068	2,1257	2,9725	3,5989	4,0963	4,5168	4,8648	5,1693	5,4274	5,6057	5,8160
15,0	0,7019	0,9893	1,3970	1,7040	1,9725	2,1990	3,075	3,7230	4,2375	4,6725	5,0325	5,3475	5,6145	5,7990	6,0165
15,5	0,7252	1,0222	1,4435	1,7608	2,0383	2,2723	3,1775	3,8471	4,3788	4,8283	5,2003	5,5258	5,8017	5,9923	6,2171
16,0	0,7486	1,0552	1,4901	1,8176	2,1040	2,3456	3,280	3,9712	4,5200	4,9840	5,3680	5,7040	5,9888	6,1856	6,4176
16,5	0,7720	1,0882	1,5366	1,8741	2,1698	2,4189	3,3825	4,0953	4,6613	5,1398	5,5358	5,8823	6,1760	6,3789	6,6182
17,0	0,7954	1,1212	1,5832	1,9312	2,2355	2,4922	3,485	4,2194	4,8025	5,2955	5,7035	6,0605	6,3631	6,5722	6,8187
17,5	0,8188	1,1541	1,6296	1,9880	2,3013	2,5655	3,5875	4,3435	4,9438	5,4513	5,8713	6,2388	6,5502	6,7655	7,0193
18,0	0,8422	1,1871	1,6703	2,0448	2,3670	2,6388	3,6900	4,4676	5,0850	5,6070	6,0390	6,4170	6,7374	6,9588	7,2199
18,5	0,8656	1,2201	1,7229	2,1016	2,4328	2,7121	3,7925	4,5917	5,2263	5,7628	6,2068	6,5953	6,9246	7,1521	7,4204
19,0	0,8890	1,2531	1,7695	2,1584	2,4985	2,7854	3,8950	4,7158	5,3675	5,9185	6,3745	6,7735	7,1117	7,3454	7,6209
19,5	0,9124	1,2860	1,8160	2,2152	2,5643	2,8587	3,9975	4,8399	5,5088	6,0743	6,5423	6,9518	7,2988	7,537	7,8215
20,0	0,9358	1,3190	1,8626	2,2720	2,6300	2,9320	4,1000	4,9640	5,6500	6,2300	6,7100	7,1300	7,4860	7,7320	8,0220
21,0	0,9826	1,3850	1,9557	2,3856	2,7615	3,0786	4,3050	5,2122	5,9325	6,5415	7,0455	7,4865	7,8603	8,1186	8,4231
22,0	1,0294	1,4509	2,0489	2,4992	2,8930	3,2252	4,5100	5,4604	6,2150	6,8530	7,3810	7,8430	8,2346	8,5052	8,8242
23,0	1,0762	1,5169	2,1420	2,6128	3,0245	3,3718	4,7150	5,7086	6,4975	7,1645	7,7165	8,1995	8,6089	8,8918	9,2253
24,0	1,1230	1,5828	2,2351	2,7264	3,1560	3,5184	4,9200	5,9568	6,7800	7,4760	8,0520	8,5560	8,9832	9,2784	9,6264
25,0	1,1698	1,6488	2,3283	2,8400	3,2875	3,6650	5,1250	6,2050	7,0625	7,7875	8,3875	8,9125	9,3575	9,6650	10,0275
26,0	1,2165	1,7147	2,4214	2,9536	3,4190	3,8116	5,3300	6,4532	7,3450	8,0990	8,7230	9,2690	9,7318	10,0516	10,4286
27,0	1,2633	1,7807	2,5145	3,0672	3,5505	3,9582	5,5350	6,7014	7,6275	8,4105	9,0585	9,6255	10,1061	10,4382	10,8297
28,0	1,3101	1,8466	2,6076	3,1809	3,6820	4,1048	5,740	6,9496	7,9100	8,7220	9,3940	9,9820	10,4804	10,8248	11,2308
29,0	1,3569	1,9126	2,7008	3,2944	3,8135	4,2514	5,9450	7,1978	8,1925	9,0335	9,7295	10,3385	10,8547	11,2114	11,6319
30,0	1,4037	1,9785	2,7939	3,4080	3,9450	4,3980	6,1500	7,4460	8,4750	9,3450	10,0650	10,6950	11,2290	11,5980	12,0330

d — диаметр отверстия в *мм*;
T_s — стандартная абсолютная (в °С) температура (для данной таблицы 288,88° С);
P_s — стандартное абсолютное давление (для этой таблицы 1,035 *кг/см²*);
T_f — абсолютная (°С) температура протекающего газа (для этой таблицы 288,88° С);
G — удельный вес газа (при удельном весе воздуха, принятом за 1,00);
P_1 — абсолютное статическое давление со стороны истечения в *кг/см²*;
r — отношение давления за отверстием к давлению со стороны истечения, равное $P_2 : P_1$.

Подставляя в указанные выше уравнения специальные значения для этого случая, получаем:

$$\frac{Q}{d^2} = 1{,}110\, C_1'\, P_1 \sqrt{1 - r},$$

каковые величины и показаны в табл. 18 для разных давлений.

Поправочные величины. Числовые значения C_1' зависит от соотношения (β) диаметра отверстия к диаметру камеры. Данные табл. 18 относятся к случаю, когда $\beta = 0$. Однако данные указанной таблицы можно использовать без поправок на коэфициент β без существенных ошибок во всех случаях, когда $\beta \leq 0{,}2$. Для внесения поправок в значения таблицы при других значениях следует обратиться к табл. 32 и умножить на коэфициент

$$\frac{C_1' \text{ (для действительного значения } \beta)}{C_1' \text{ (для величин табл. 18)}}.$$

Температурная поправка. Для внесения поправок на температуру движущегося потока, если температура не равна 15,56° С, умножают на множитель, приведенный в табл. 43.

Поправка на удельный вес. Для внесения поправок на удельный вес иной, чем 1,000, умножают на множители, приведенные в табл. 42.

Применение данных табл. 18 к другим газам, помимо воздуха. Данные этой таблицы могут быть применены с достаточной точностью для вычисления движения других газов, помимо воздуха, если $r > 0{,}9$ и если сделана поправка на удельный вес. При меньших значениях r, т. е. при большей разности в давлениях, на движение потока могут оказать некоторое влияние и другие свойства газа, например отношение их удельных теплоемкостей.

Однако это влияние во всех случаях незначительно. Данные табл. 18 несомненно могут быть использованы с достаточной точностью в большинстве работ для вычисления скорости движения и количества проходящего в час любого газа при любой потере давления, если только сделана поправка на удельный вес газа.

Расположение штуцеров. Коэфициент C_1', применявшийся при вычислении данных табл. 18, относится к положению штуцеров для измерения давления вблизи сужения сечения, т. е. когда один штуцер располагается со стороны истечения на расстоянии одного диаметра камеры до отверстия, а другой — на расстоянии половины диаметра камеры за отверстием. Таким образом, данные этой таблицы применимы к движению потока газа через отверстие, находящееся в трубопроводе, если штуцера для измерения давления расположены в надлежащем месте. Эти данные применимы также для вычисления расхода воздуха из большого сосуда в атмосферу, причем давление за отверстием в этом случае равняется атмосферному. Для вычисления коэфициентов, когда штуцера расположены иначе, см. данные табл. 37 и 42.

Дифференциальное давление, превышающее величины табл. 18. Последняя колонка справа в этой таблице относится к случаю, когда $r = P_2 : P_1 = 0{,}5$. Это — минимальная величина, для которой имеются экспериментальные данные в Бюро стандартов. Однако критический поток для воздуха был получен при величинах r, несколько меньших, чем 0,53; поэтому при $r = 0{,}5$ остается в ряде критических. Поэтому величины потока, данные в последней колонке таблицы, должны быть максимальными, получаемыми при соответствующих давлениях со стороны истечения. Колонка при $r = 0{,}5$ даст точные, экспериментально выверенные величины потока для тех случаев, когда $r = 0{,}5$, и приближенные величины потока во всех остальных случаях, когда $r < 0{,}5$.

Таблица 19

Движение газа по трубам разных размеров [1]

Диаметр трубы в дм.	Потеря давления в мм вод. столба	Длина трубы в м											
		3,05	6,10	15,24	30,48	45,70	60,00	91,40	121,90	152,40	182,90	213,30	243,80	304,80
1	8	11,70	8,49	5,37	3,82	3,17	2,55	2,12	1,75	1,41	1,27	1,13	0,99	0,85
	13	15,20	12,40	7,07	5,00	3,96	3,39	2,83	2,26	1,98	1,84	1,61	1,36	1,13
	25		15,80	10,19	7,35	6,08	5,09	4,10	3,53	3,11	2,83	2,54	2,26	1,98
	38			12,45	9,19	7,50	6,37	5,09	4,38	3,82	3,53	3,11	2,97	2,55
	51			14,43	10,75	8,77	7,50	6,08	5,23	4,52	4,10	3,82	3,54	2,97
	76				13,16	10,75	9,34	7,50	6,36	5,66	5,09	4,67	4,39	3,82
1¼	8	24,05	17,26	11,04	8,06	6,51	5,52	4,39	3,82	3,26	2,83	2,55	2,41	2,12
	13	31,84	22,36	14,43	10,61	8,63	7,36	5,80	5,09	4,67	3,96	3,54	3,26	2,83
	25		32,12	20,52	15,42	12,45	10,75	8,63	7,36	6,51	5,80	5,38	4,95	4,39
	38			25,19	18,96	14,86	12,31	10,61	9,20	8,07	7,36	6,65	6,37	5,52
	51			28,87	21,79	17,83	15,42	12,45	10,75	9,48	8,63	7,92	7,36	6,51
	76				26,60	22,07	18,96	15,42	13,30	11,89	10,75	9,90	9,20	8,07
1½	8	37,50	26,60	16,98	12,45	9,90	8,49	6,79	5,80	4,95	4,53	3,96	3,68	3,40
	13	48,11	33,96	22,07	16,13	12,88	11,32	8,91	7,50	6,79	6,08	5,52	5,09	4,24
	25		54,48	31,70	23,49	18,96	16,41	13,16	11,32	9,90	8,91	8,21	7,64	6,79
	38			38,91	28,72	23,49	20,38	16,41	13,87	12,45	11,18	10,19	9,62	8,49
	51			44,57	33,11	26,88	23,49	18,96	16,70	14,43	13,02	12,17	11,32	9,90
	76				41,03	33,39	26,18	24,76	20,38	18,11	15,99	14,71	13,87	12,17
2	8	68,49	48,82	31,55	23,49	18,96	16,41	13,30	11,60	10,19	9,06	8,49	7,92	7,07
	13	87,73	62,97	41,03	30,42	24,90	21,51	17,26	15,90	13,30	11,89	11,04	10,33	9,06
	25		89,43	58,16	43,72	35,94	30,71	24,62	21,51	18,96	17,26	15,85	14,86	13,30
	38			70,75	51,65	43,72	37,78	30,42	26,32	23,35	21,51	19,81	18,54	16,70
	51			82,78	61,13	50,09	43,86	35,52	30,99	27,45	24,90	22,78	21,51	18,96
	76				74,99	62,26	53,49	43,86	38,06	33,96	30,42	28,30	26,60	23,35

2½	8	110,37	79,24	50,94	37,78	30,56	26,60	20,80	18,25	16,13	14,15	13,16	12,17	10,90
	13	142,63	102,60	66,50	49,38	40,19	34,67	28,16	23,91	20,94	18,68	17,55	16,13	14,15
	25		145,70	94,52	70,18	57,81	49,81	40,04	34,67	30,71	28,09	25,75	24,05	20,94
	38			114,60	86,31	70,75	60,99	49,52	42,45	37,92	34,67	31,70	28,87	26,88
	51			134,00	99,33	82,07	70,75	57,45	50,23	44,43	39,96	37,07	34,67	30,28
	76				122,07	100,90	87,16	70,75	61,69	54,48	49,52	45,28	43,16	37,92
3	8	198,10	158,80	89,00	64,52	51,22	43,58	34,53	29,01	24,62	21,37	18,82	17,69	15,00
	13	257,50	184,00	125,50	85,47	80,37	60,56	46,41	39,20	34,24	30,71	27,73	25,47	21,51
	25		263,20	167,00	124,50	101,90	84,90	80,37	60,56	51,51	46,41	42,45	39,34	34,67
	38			206,60	153,10	124,50	107,50	86,31	73,58	64,81	58,72	53,63	50,09	45,28
	51			240,50	178,00	145,50	124,80	100,70	86,31	76,41	69,05	63,39	58,86	51,51
	76				219,00	179,70	154,20	124,80	107,54	95,65	86,31	78,96	74,43	64,81
3½	8	292,90	207,70	132,70	97,50	78,39	67,21	53,49	45,42	39,60	35,23	31,98	29,71	25,61
	13		268,80	173,80	127,30	103,60	90,14	70,75	65,09	53,49	47,83	43,72	40,80	35,23
	25			247,80	184,20	149,40	128,80	103,30	89,43	78,67	70,75	66,08	60,84	53,35
	38				225,30	183,90	159,00	127,30	110,70	99,05	89,14	80,65	76,41	66,50
	51				261,80	213,70	185,10	149,70	129,60	113,80	103,58	96,22	89,14	78,53
	76					264,20	227,80	185,40	160,20	141,50	127,35	118,70	111,90	97,63
4	8		288,70	186,20	137,00	110,50	95,80	76,98	64,67	56,60	50,60	46,84	44,15	38,20
	13			240,50	178,30	145,00	124,50	106,00	85,18	81,20	75,56	67,92	59,43	50,94
	25				255,80	208,90	179,70	144,90	124,50	110,40	100,50	92,82	86,31	76,13
	38					257,00	222,40	179,00	154,20	136,10	123,40	113,20	105,80	95,09
	51						270,30	208,70	180,10	158,80	145,40	134,40	124,50	109,80
	76							256,10	222,20	197,80	178,30	164,70	155,60	136,40

[1] В этой таблице приводятся разные количества газа, проходящего в единицу времени (в м³/час) при разных потерях давления в трубах разных размеров и разной длины. Данные приведены на основе опытов для газа с уд. весом 0,60.

Продолжение табл. 19

Размеры труб в дм.	Потеря давления в мм вод. столба	Длина трубы в м										
		7,62	15,24	30,48	45,72	60,96	91,44	121,90	152,40	182,90	243,80	304,80
6	8	905,6	639,6	452,8	367,9	319,8	261,8	226,4	202,3	183,9	159,9	144,3
	13	1 174,0	826,4	583,0	475,4	413,2	336,8	291,5	261,8	237,7	209,4	183,9
	25	1 644,0	1 166,0	820,7	676,4	583,0	461,1	410,3	369,3	336,8	291,5	261,8
	38	2 023,0	1 429,0	1 013,0	820,7	716,0	583,0	506,6	450,0	413,2	356,6	317,0
	51	2 335,0	1 641,0	1 166,0	956,5	826,3	673,5	583,0	520,7	475,4	410,8	367,9
8	8	1 839,0	1 302,0	922,6	730,1	650,9	529,2	461,3	410,3	376,4	325,4	291,5
	13	2 377,0	1 627,0	1 189,0	973,5	843,3	679,2	594,8	532,0	486,8	418,8	382,0
	25	3 339,0	2 377,0	1 684,0	1 373,0	1 189,0	939,6	837,7	752,8	684,9	594,3	529,2
	38	4 103,0	2 816,0	2 066,0	1 684,0	1 457,0	1 189,0	1 058,0	919,7	843,3	727,3	650,9
	51	4 754,0	3 339,0	2 377,0	1 953,0	1 684,0	1 373,0	1 189,0	1 061,0	973,5	837,7	752,8
10	8	3 283,0	2 321,0	1 641,0	1 344,0	1 160,0	950,9	820,7	735,8	670,7	574,5	520,7
	13	4 245,0	3 000,0	2 122,0	1 726,0	1 500,0	1 316,0	1 061,0	950,9	866,0	752,8	667,9
	25	6 000,0	4 245,0	2 971,0	2 462,0	2 122,0	1 698,0	1 500,0	1 344,0	1 225,0	1 061,0	950,9
	38	7 358,0	5 207,0	3 679,0	2 971,0	2 688,0	2 122,0	1 889,0	1 641,0	1 500,0	1 302,0	1 160,0
	51	8 490,0	6 000,0	4 245,0	3 453,0	2 971,0	2 462,0	2 122,0	1 896,0	1 726,0	1 500,0	1 344,0
12	8	5 179,0	3 622,0	2 569,0	2 108,0	1 825,0	1 486,0	1 288,0	1 152,0	1 053,0	914,1	815,0
	13	6 622,0	4 698,0	3 325,0	2 717,0	2 363,0	1 896,0	1 670,0	1 491,0	1 358,0	1 174,0	1 053,0
	25	9 367,0	6 650,0	4 698,0	3 849,0	3 311,0	2 660,0	2 349,0	2 108,0	1 924,0	1 664,0	1 486,0
	38	11 490,0	8 150,0	5 773,0	4 698,0	4 075,0	3 311,0	2 887,0	2 575,0	2 363,0	2 038,0	1 825,0
	51	13 301,0	9 452,0	6 679,0	5 434,0	4 698,0	3 820,0	3 311,0	2 971,0	2 717,0	2 349,0	2 108,0

Таблица 20

Движение газа по трубам различных диаметров [1]

Количество куб. метров в час	Диаметр трубы в дм.							
	½"	¾"	1"	1¼"	1½"	2"	2½"	3"
0,142	0,575	0,108	0,025	—	—	—	—	2,315
0,170	0,833	0,150	0,042	0,008	—	—	—	3,332
0,226	1,483	0,316	0,067	0,017	—	—	—	5,923
0,283	2,316	0,425	0,108	0,025	0,008	—	—	9,246
0,425	5,215	0,958	0,242	0,058	0,025	—	—	20,825
0,566	9,246	1,699	0,425	0,100	0,042	0,008	—	37,069
0,849	20,825	3,832	0,958	0,216	0,083	0,025	0,008	83,300
1,132	37,485	6,814	1,699	0,383	0,158	0,050	0,017	3"
1,415	57,893	10,646	2,666	0,600	0,242	0,075	0,025	0,008
1,698	83,300	15,327	3,832	0,858	0,350	0,100	0,033	0,008
2,264	148,274	27,156	6,814	1,541	0,616	0,183	0,058	0,017
2,830	4"	42,483	10,646	2,391	0,966	0,292	0,100	0,033
4,245	0,017	95,795	23,907	5,381	2,166	0,650	0,216	0,067
5,660	0,083	4½"	42,483	9,579	3,832	1,150	0,383	0,117
8,490	0,067	0,033	95,753	21,491	8,663	2,591	0,866	0,266
11,320	0,117	0,058	5"	38,235	15,411	4,582	1,541	0,475
14,150	0,183	0,100	0,058	59,809	28,990	7,205	2,391	0,741
16,980	0,266	0,142	0,083	6"	34,653	10,329	3,457	1,083
22,640	0,466	0,250	0,142	0,058	61,642	18,498	6,123	1,916
28,300	0,733	0,383	0,225	0,083	96,545	28,822	9,580	2,999
42,450	1,641	0,866	0,508	0,192	7"	64,807	21,575	6,664
56,600	2,915	1,549	0,900	0,341	0,158	115,204	38,401	12,079
84,900	6,539	3,482	2,016	0,775	0,350	8"	86,215	26,656
113,200	11,662	6,173	3,582	1,374	0,616	0,308	9"	47,481
141,500	18,159	9,663	5,598	2,141	0,966	0,488	0,258	74,137
169,800	26,240	13,911	8,063	3,082	1,391	0,700	0,375	106,791
226,400	46,731	24,657	14,328	5,481	2,466	1,233	0,683	10"
283,000	12"	38,568	22,324	8,563	3,848	1,941	1,050	0,608
424,500	0,533	86,799	50,397	19,309	8,672	4,340	2,366	1,374
566,000	0,958	16"	89,548	34,320	15,411	7,730	4,182	2,432
849,000	2,149	0,500	20"	77,058	34,658	17,326	9,413	5,456
1 132,000	3,815	0,883	0,283	24"	61,642	30,904	16,743	9,746
1 415,000	5,964	1,383	0,450	0,175	96,461	48,314	26,156	15,202
1 698,000	8,580	1,999	0,650	0,250	30"	69,555	37,652	21,866
2 264,000	15,244	3,549	1,150	0,450	0,142	36"	67,056	38,943
2 830,000	23,824	5,531	1,799	0,700	0,225	0,092	104,958	60,809
4 245,000	53,645	12,495	4,032	1,583	0,508	0,200	42"	137,403
5 660,000	95,379	22,158	7,172	2,807	0,908	0,358	0,167	48"
8 490,000	214,914	49,813	12,453	6,331	2,041	0,808	0,375	0,192
11 320,000	381,514	88,465	28,663	11,245	3,624	1,433	0,666	0,342
14 150,000	596,428	138,445	44,815	17,576	5,664	2,241	1,033	0,541
16 980,000	857,990	199,920	64,541	25,323	8,122	3,215	1,483	0,775
22 640,000	1 524,390	354,858	114,954	44,982	14,494	5,748	2,632	1,374
28 300,000	2 232,440	553,112	179,928	70,097	22,616	8,938	4,123	2,149

Примечание: Величины, данные в таблице, представляют собой перепад давления в *мм* для различных скоростей газа в трубах различных диаметров на 100 *м* длины трубы, определенный опытным путем; удельный вес газа 0,6 по воздуху.

[1] The Surface Combustion Co, New York.

Движение воды в трубах. Потеря напора на трение

Коэфициент *c* зависит от степени шероховатости стенок трубы

Диаметр в дм.	Расход воды		Скорость в *м/сек*	Скоростной напор в *м*	Потеря напора в *м* на 1 000 *м* длины трубы			
	м³/сутки	*л/сек*			$c = 140$	$c = 130$	$c = 120$	$c = 100$
2	55	0,630	0,311	0,0061	2,7	3,1	3,6	5,0
	109	1,260	0,622	0,018	9,8	11,2	12,9	18,2
	164	1,890	0,933	0,046	20,7	23,8	27,3	38,4
	273	3,150	1,558	0,122	53,0	61,0	71,0	99,0
	409	4,725	2,335	0,277	113,0	129,0	149,0	209,0
	545	6,300	3,112	0,494	192,0	220,0	256,0	358,0
	818	9,450	4,670	1,109	407,0	465,0	540,0	760,0
	1 090	12,600	6,224	1,969	690,0	800,0	920,0	1 290,0
2,5	55	0,630	0,198	0,003	0,9	1,0	1,2	1,7
	164	1,890	0,597	0,018	6,9	8,0	9,2	12,9
	273	3,150	0,997	0,052	17,8	20,6	23,8	33,2
	545	6,300	1,993	0,201	64,0	74,0	86,0	120,0
	872	10,080	3,188	0,518	156,0	178,0	207,0	290,0
	1 090	12,600	3,984	0,811	232,0	267,0	309,0	431,0
	1 635	18,900	5,977	1,823	493,0	570,0	660,0	920,0
	2 180	25,200	7,967	3,237	840,0	960,0	1 120,0	1 560,0
3	109	1,260	0,277	0,003	1,35	1,55	1,8	2,5
	273	3,150	0,692	0,024	7,4	8,5	9,8	13,8
	545	6,300	1,384	0,098	26,7	30,6	35,2	49,6
	1 090	12,600	2,768	0,390	96,0	110,0	128,0	178,0
	1 635	18,900	4,151	0,878	204,0	233,0	271,0	380,0
	2 180	25,200	5,535	1,558	348,0	399,0	461,0	650,0
	2 725	31,500	6,919	2,438	530,0	600,0	700,0	980,0
	3 270	37,800	8,300	3,505	740,0	840,0	980,0	1 370,0
4	273	3,150	0,390	0,009	1,82	2,08	2,41	3,39
	545	6,300	0,777	0,030	6,5	7,5	8,8	12,2
	1 090	12,600	1,558	0,125	23,7	27,0	31,2	44,0
	1 635	18,900	2,335	0,277	50,0	57,0	67,0	93,0
	2 180	25,200	3,112	0,494	85,0	98,0	113,0	160,0
	2 725	31,500	3,892	0,771	129,0	148,0	172,0	240,0
	3 270	37,800	4,670	1,113	181,0	207,0	240,0	337,0
	4 360	50,400	6,224	1,975	308,0	352,0	410,0	570,0
5	273	3,150	0,250	0,003	0,61	0,7	0,81	1,13
	545	6,300	0,497	0,012	2,21	2,53	2,94	4,11
	1 090	12,600	0,997	0,052	8,0	9,1	10,6	14,8
	1 635	18,900	1,494	0,113	16,8	19,4	22,5	31,4
	2 725	31,500	2,490	0,317	43,5	49,9	58,0	81,0
	3 815	44,100	3,487	0,619	81,0	93,0	108,0	151,0
	4 905	56,700	4,484	1,024	129,0	148,0	172,0	240,0
	5 995	69,300	5,477	1,524	187,0	214,0	249,0	349,0
6	378,5	4,378	0,241	0,00305	0,46	0,53	0,61	0,86
	737	8,756	0,482	0,0122	1,67	1,91	2,22	3,1
	1 135,5	13,134	0,719	0,0274	3,54	4,06	4,7	6,6
	1 892,5	21,904	1,201	0,0732	9,1	10,4	12,1	16,9
	2 649,5	30,649	1,682	0,143	17,0	19,5	22,6	31,6
	3 785	43,780	2,402	0,296	32,9	37,8	43,8	61,0
	5 299	61,298	3,362	0,576	61,0	70,0	82,0	114,0
	7 570	87,560	4,804	1,173	119,0	137,0	159,0	222,0

Продолжение табл. 21

Диаметр в мм	Расход воды		Скорость в м/сек	Скоростной напор в м	Потеря напора в м на 1 000 м длины трубы			
	м³/сутки	л/сек			$c = 140$	$c = 130$	$c = 120$	$c = 100$
8	1 135,5	13,134	0,405	0,00914	0,87	1,0	1,16	1,62
	1 892,5	21,904	0,677	0,0244	2,25	2,58	2,99	4,18
	2 649,5	30,649	0,945	0,0457	4,19	4,8	5,6	7,8
	3 785	43,780	1,350	0,0914	8,1	9,3	10,8	15,1
	5 299	61,298	1,890	0,183	15,1	17,3	20,0	28,1
	6 813	78,816	2,432	0,302	23,8	27,2	31,6	44,2
	9 084	105,078	3,243	0,536	41,0	47,0	55,0	77,0
	11 355	131,369	4,054	0,835	62,0	71,0	83,0	116,0
10	1 514	17,518	0,344	0,0061	0,5	0,57	0,66	0,93
	2 271	26,262	0,518	0,0122	1,05	1,21	1,41	1,97
	3 785	43,780	0,866	0,0366	2,73	3,13	3,63	5,1
	6 056	70,071	1,384	0,0975	6,5	7,5	8,7	12,2
	8 327	96,333	1,902	0,183	11,7	13,4	15,6	21,8
	10 598	122,596	2,420	0,299	18,3	21,0	24,3	34,0
	12 869	148,858	2,941	0,439	26,3	30,2	35,0	49,0
	15 140	175,177	3,459	0,610	35,5	40,8	47,3	66,0
12	1 892,5	21,904	0,302	0,0061	0,31	0,36	0,41	0,58
	3 785	43,780	0,600	0,0183	1,12	1,29	1,5	2,1
	5 677,5	65,684	0,902	0,0427	2,39	2,73	3,17	4,43
	7 570	87,560	1,201	0,0732	4,06	4,65	5,4	7,6
	11 355	131,369	1,801	0,165	8,6	9,9	11,5	16,0
	18 925	219,042	3,002	0,457	22,0	25,1	29,2	41,0
	26 495	306,489	4,203	0,902	41,2	47,2	55,0	77,0
	37 850	437,801	6,005	1,838	81,0	93,0	107,0	150,0
16	2 271	26,262	0,201	0,00305	0,108	0,124	0,143	0,201
	3 785	43,780	0,338	0,0061	0,278	0,319	0,369	0,52
	7 570	87,560	0,677	0,0244	1,0	1,15	1,33	1,87
	11 355	131,369	1,012	0,0518	2,12	2,43	2,83	3,98
	15 140	175,177	1,350	0,0945	3,61	4,15	4,8	6,8
	18 925	219,042	1,689	0,146	5,5	6,3	7,3	10,2
	26 495	306,489	2,365	0,283	10,2	11,7	13,6	19,0
	37 850	437,801	3,377	0,579	19,8	22,6	26,2	36,8
	52 990	612,978	4,727	1,137	36,9	42,2	49,0	68,0
20	3 785	43,805	0,216	0,003	0,094	0,107	0,124	0,174
	7 570	87,610	0,433	0,009	0,339	0,389	0,449	0,63
	15 140	175,276	0,866	0,040	1,22	1,39	1,62	2,28
	26 495	306,662	1,512	0,116	3,43	3,95	4,58	6,4
	37 850	438,049	2,161	0,238	6,6	7,6	8,9	12,4
	49 205	569,435	2,810	0,402	10,8	12,4	14,4	20,1
	60 560	701,104	3,459	0,610	15,8	18,2	21,1	29,6
	75 700	876 097	4,322	0,954	24,0	27,6	32,0	44,8
24	5 677,5	65,680	0,226	0,00305	0,082	0,093	0,108	0,152
	11 355	131,370	0,451	0,00914	0,298	0,338	0,391	0,55
	18 925	219,040	0,750	0,0274	0,76	0,87	1,02	1,41
	30 280	350,350	1,201	0,0732	1,81	2,07	2,41	3,38
	45 420	525,530	1,801	0,165	3,82	4,39	5,1	7,1
	60 560	700,710	2,402	0,293	6,6	7,5	8,7	12,2
	83 270	963,330	3,301	0,555	11,8	13,5	15,7	21,9
	105 980	1 226,900	4,203	0,902	18,3	21,1	24,5	34,2

Диаметр в мм.	Расход воды		Скорость в м/сек	Скоростной напор в м	Потеря напора в м на 1 000 м длины трубы			
	м³/сутки	л/сек			$c = 140$	$c = 130$	$c = 120$	$c = 100$
30	7 570	87,560	0,192	0,00305	0,047	0,054	0,062	0,087
	15 140	175,180	0,384	0,0061	0,168	0,194	0,225	0,315
	26 495	306,490	0,674	0,0244	0,474	0,55	0,64	0,89
	37 850	437,800	0,960	0,0457	0,92	1,06	1,23	1,72
	56 775	656,840	1,442	0,107	1,95	2,24	2,6	3,64
	75 700	875,600	1,920	0,189	3,33	3,81	4,44	6,2
	98 410	1 138,500	2,499	0,317	5,4	6,2	7,2	10,1
	132 475	1 531,000	3,362	0,576	9,4	10,8	12,6	17,5
36	11 355	131,369	0,201	0,00305	0,041	0,047	0,054	0,076
	22 710	262,624	0,399	0,00914	0,147	0,168	0,196	0,274
	37 850	437,801	0,668	0,0213	0,379	0,434	0,5	0,71
	56 775	656,843	1,000	0,0518	0,8	0,92	1,07	1,49
	75 700	875,602	1,335	0,0914	1,37	1,57	1,82	2,55
	113 550	1 313,686	2,003	0,204	2,9	3,32	3,86	5,4
	151 400	1 751,770	2,670	0,363	4,95	5,7	6,6	9,2
	208 175	2 408,330	3,670	0,686	8,9	10,2	11,8	16,6
42	15 140	175,177	0,195	0,00305	0,033	0,038	0,044	0,061
	30 280	350,354	0,393	0,00914	0,118	0,136	0,158	0,22
	45 420	525,531	0,588	0,0183	0,251	0,288	0,333	0,468
	75 700	875,602	0,981	0,0488	0,64	0,74	0,86	1,21
	113 550	1 313,686	1,469	0,110	1,37	1,57	1,83	2,56
	151 400	1 751,770	1,966	0,195	2,33	2,68	3,1	4,35
	189 200	2 190,420	2,451	0,308	3,52	4,05	4,7	6,6
	264 950	3 064,890	3,432	0,600	6,6	7,6	8,8	12,2
48	18 920	219,042	0,189	0,00305	0,026	0,03	0,305	0,048
	37 850	437,801	0,375	0,0061	0,094	0,107	0,124	0,174
	75 700	875,602	0,750	0,0274	0,338	0,387	0,449	0,63
	113 550	1 313,686	1,125	0,064	0,72	0,82	0,95	1,33
	151 400	1 751,770	1,500	0,116	1,22	1,39	1,62	2,28
	189 200	2 190,420	1,878	0,180	1,84	2,12	2,46	3,44
	264 950	3 064,890	2,627	0,351	3,43	3,94	4,58	6,4
	341 000	3 939,360	3,377	0,562	5,5	6,3	7,3	10,2
54	37 850	437,801	0,296	0,00305	0,053	0,06	0,07	0,098
	75 700	875,602	0,594	0,0183	0,19	0,218	0,252	0,354
	113 500	1 313,686	0,890	0,040	0,402	0,461	0,54	0,75
	151 300	1 751,770	1,186	0,0701	0,68	0,79	0,91	1,28
	189 200	2 190.420	1,481	0,113	1,04	1,19	1,38	1.94
	265 000	3 064,890	2,076	0,219	1,93	2,22	2,58	3,61
	341 000	3 939,360	2,670	0,363	3,08	3,52	4,1	5,8
	416 300	4 816,660	3,261	0,543	4,48	5,2	6,0	8,4
60	37 850	437,801	0,241	0,00305	0,032	0,036	0,042	0,059
	75 700	875,602	0,482	0,0122	0,113	0,131	0,152	0,212
	113 500	1 313,686	0,719	0,0274	0,241	0,277	0,32	0,449
	151 300	1 751,770	0,960	0,0457	0,41	0,47	0,55	0,76
	227 000	2 626,240	1,442	0,107	0,87	1,0	1,16	1,62
	303 000	3 503,540	1,920	0,189	1,48	1,7	1,97	2,78
	378 500	4 378,010	2,402	0,296	2,24	2,57	2,98	4,19
	492 000	5 691,130	3,121	0,497	3,63	4,18	4,84	6,8

Продолжение табл. 21

Диаметр в дм.	Расход воды		Скорость в м/сек	Скоростной напор в м	Потеря напора в м на 1 000 м длины трубы			
	м³/сутки	л/сек			$c = 140$	$c = 130$	$c = 120$	$c = 100$
66	37 850	437,801	0,198	0,00305	0,02	0,023	0,026	0,037
	75 700	875,602	0,396	0,00914	0,071	0,082	0,095	0,133
	113 500	1 313,686	0,594	0,0188	0,152	0,173	0,201	0,282
	170 500	1 969,680	0,893	0,0396	0,32	0,368	0,427	0,6
	227 000	2626,240	1,192	0,0732	0,55	0,63	0,73	1,02
	303 000	3 503,540	1,588	0,128	0,93	1,07	1,24	1,74
	378 500	4 378,010	1,984	0,201	1,41	1,62	1,88	1,62
	529 800	6 129,780	2,780	0,393	2,62	3,01	3,50	4,9
72	37 850	437,801	0,168	0,000	0,013	0,015	0,017	0,024
	75 700	875,602	0,332	0,0061	0,047	0,054	0,062	0,087
	113 500	1 313,686	0,500	0,0122	0,099	0,113	0,132	0,185
	189 200	2 190,420	0,835	0,0366	0,255	0,292	0,34	0,477
	284 000	3 282,800	1,250	0,0792	0,54	0,62	0,72	1,01
	378 500	4 378,010	1,667	0,143	0,92	1,07	1,23	1,72
	529 800	6 129,780	2,335	0,277	1,72	1,97	2,29	3,2
	681 500	7 881,550	3,002	0,460	2,73	3,13	3,63	5,1

В каждой из разных величин для r, приводимых в табл. 18, применялись различные значения коэфициента расхода C_1'. Значения C_1' получены были путем опытов, проведенных над воздухом в Бюро стандартов США, причем они покрывают ряд величин r, данных в указанной таблице.

Данные этой таблицы представляют собой экспериментальные величины и не зависят от теоретических соображений, относящихся к природе данного потока.

Коэфициент трения на фиг. 26, 27, 28 и 29 (если нет иных указаний) принимается как функция $\frac{DUS}{Z}$ (или той же величины в упрощенном виде).

Удельный вес жидкости S можно получить из таблиц т. I; удельный вес воды дан на фиг. 32.

Относительные вязкости Z различных жидкостей даны на фиг. 30 и 31.

Соотношение между $\frac{Z}{S}$ и величиной θ по Saybolt'y таково:

$$\frac{Z}{S} = 0{,}220\,\theta - \frac{180}{\theta}.$$

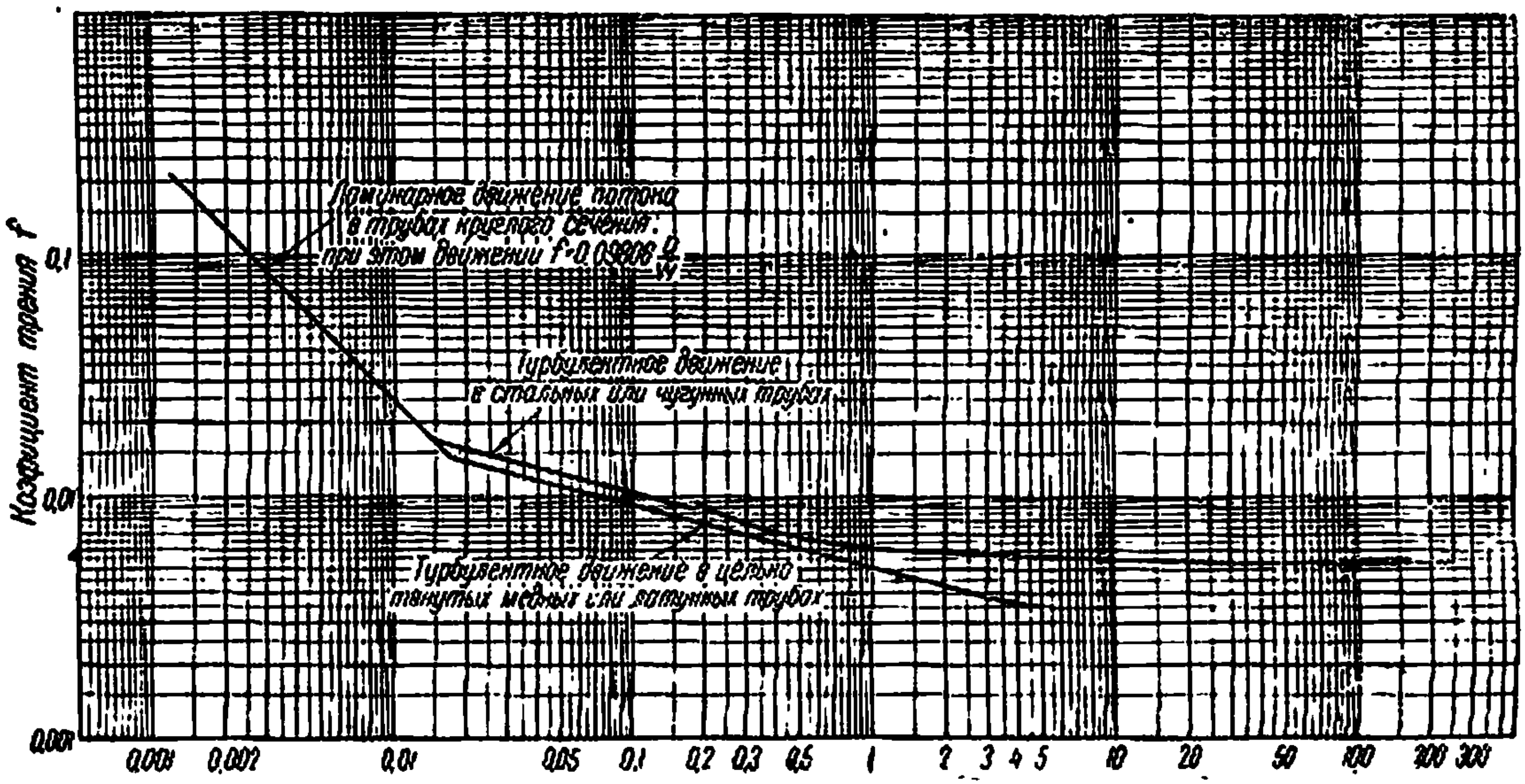
Относительные вязкости газов даны в табл. 24.

ИЗМЕНЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ГАЗОВ С ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

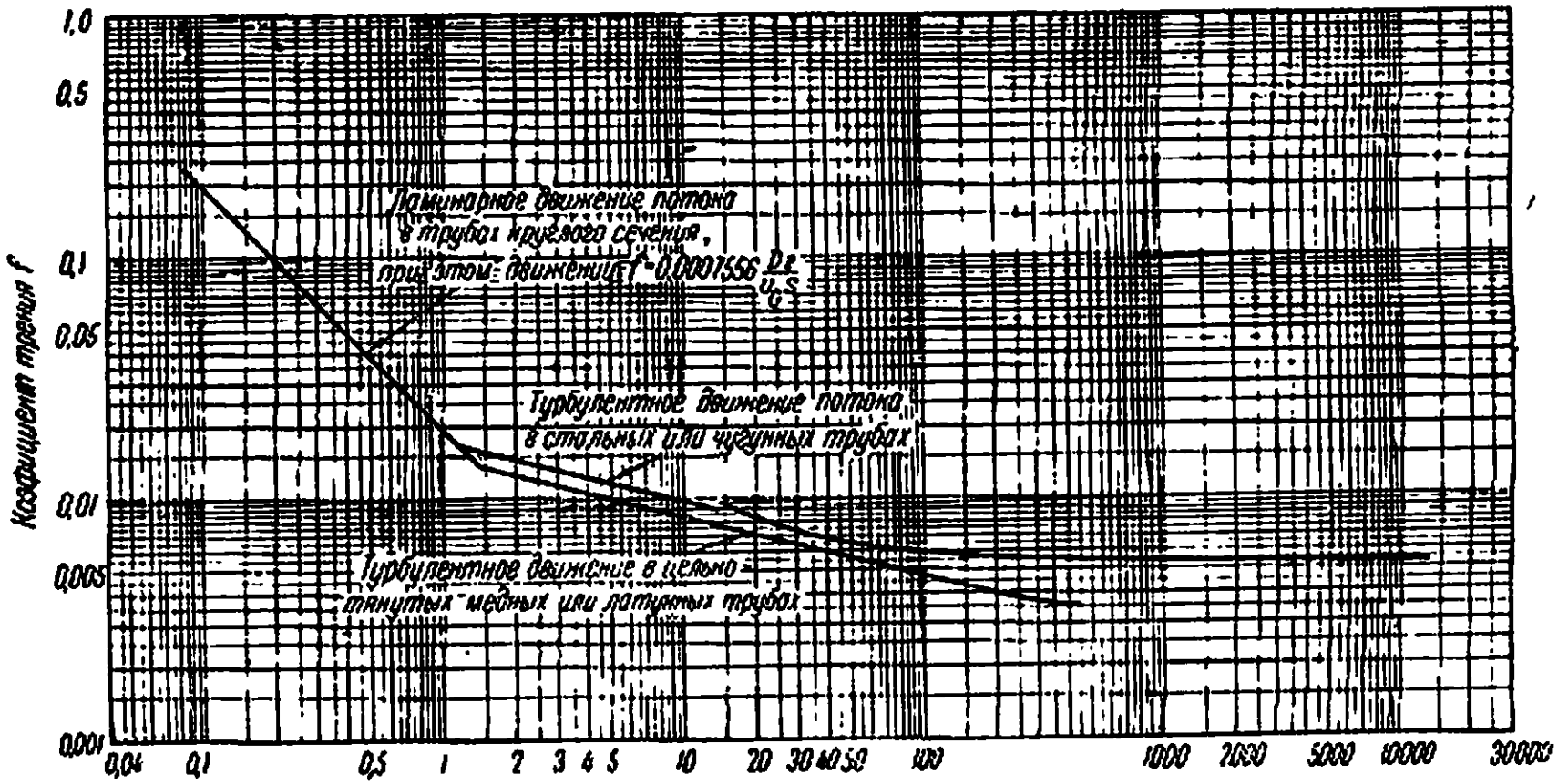
Наиболее распространенной формулой для выражения зависимости вязкости газов от температуры является уравнение Sutherland'a:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T_0 + C}{T + C}\right) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}},$$

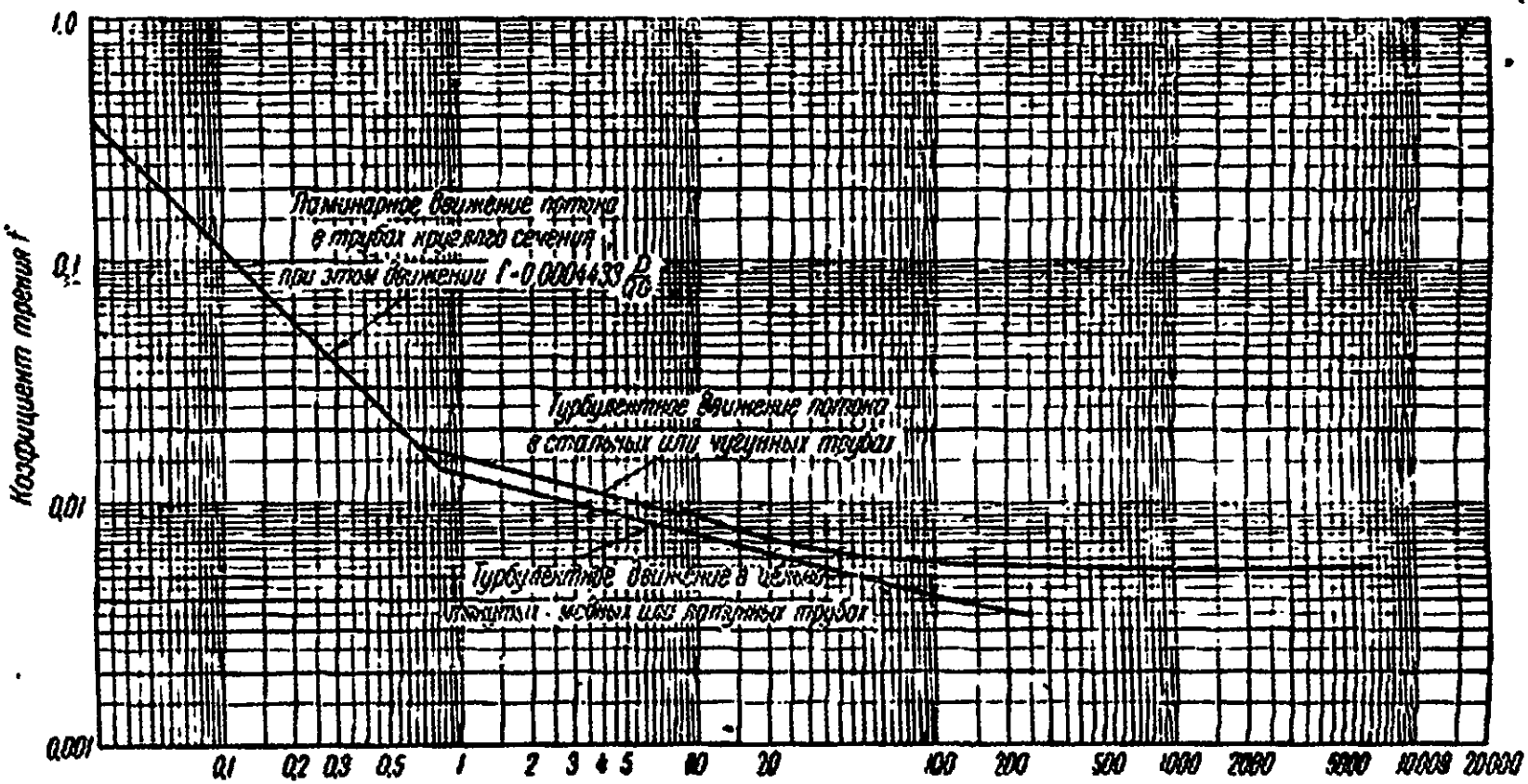
где μ и μ_0 — абсолютные вязкости в *г/смсек* при абсолютных температурах T и T_0, а C — постоянная по Sutherland'y, которую можно взять из табл. 23.



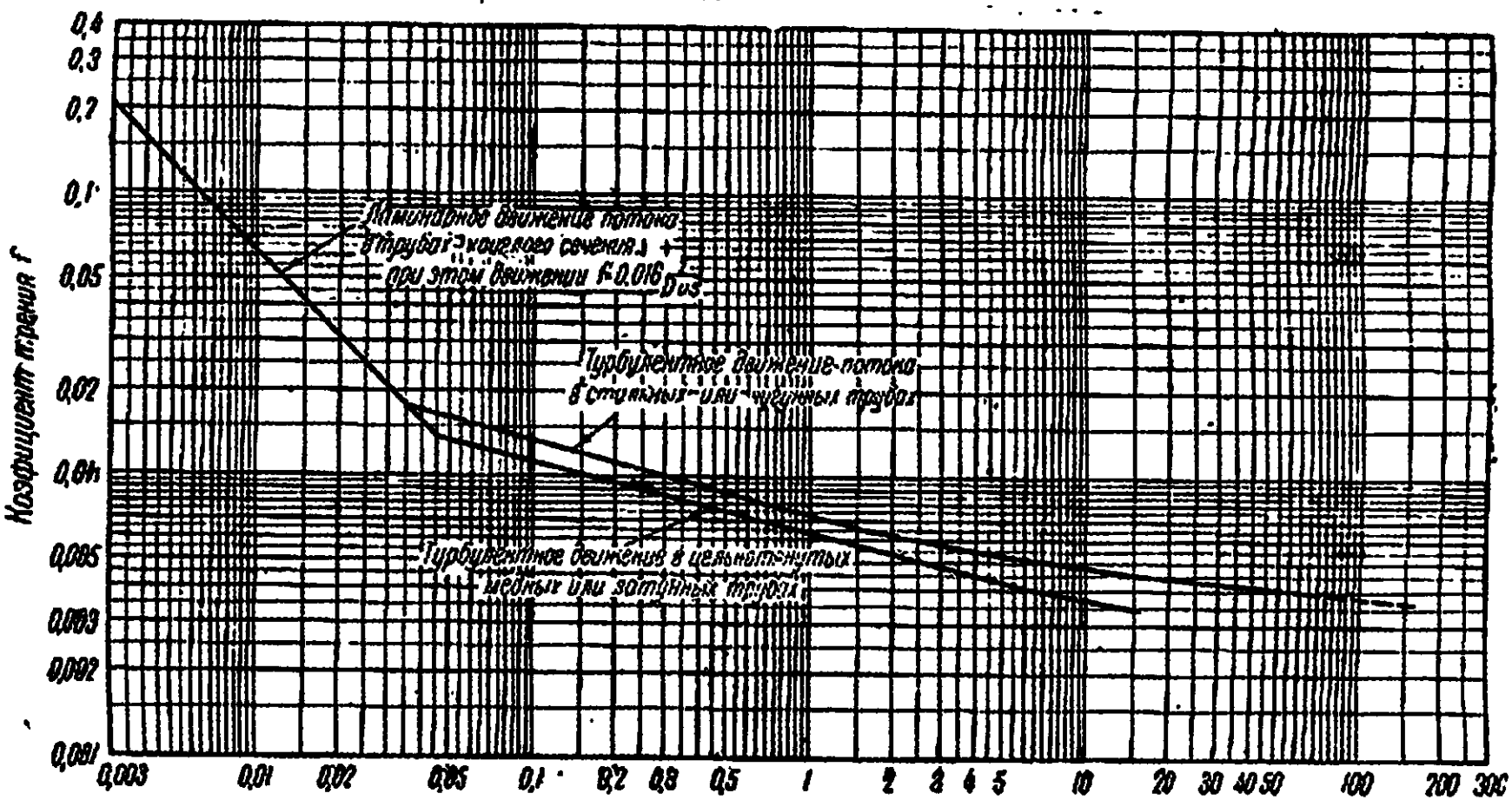
Фиг. 26 (подпись к фиг. на стр. 96).



Фиг. 27 (подпись к фиг. на стр. 96).



Фиг. 28 (подпись к фиг. на стр. 97).



Фиг. 29 (подпись к фиг. на стр. 97—98).

Фиг. 26. Коэфициент трения к формулы движения пара в трубах круглого сечения.

1 — ламинарное движение потока в трубах круглого сечения; при этом движении $f = 0{,}03625\ \frac{D}{W}$;

2 — турбулентное движение в стальных или чугунных трубах; *3* — турбулентное движение в цельнотянутых медных или латунных трубах.

Переводный коэфициент $\frac{W}{D} = 0{,}00061256\ \frac{DUS}{Z}$. (Кривые построены по диаграмме 28 книги Walker, Lewis и McAdams, Principles of Chemical Engineering и более поздним данным McAdams и Sherwood, см. статью в „Mechan. Engineering", т. 48.)

Формула движения пара

$$W = 0{,}00032397\sqrt{\frac{D^5 (P_1 - P_2) P_a}{fl}},$$

где W — количество проходящего пара по весу в *кг/мин*;

f — коэфициент трения, значение которого нужно подставить в приведенное выше уравнение;

D — действительный внутренний диаметр трубы в *мм*;

l — расчетная длина трубы, равная действительной длине трубы в *м*, плюс эквивалентная длина, заменяющая сопротивление клапанов, поворотных колен и т. д., также в *м*;

S — удельный вес пара по отношению к воде при 15,56° С;

P_a — средняя плотность движущегося потока пара в *кг/м*³;

P — абсолютное давление в *кг/см*²;

U — средняя скорость потока в *м/сек*

Z — вязкость пара по отношению к воде при 20° С. В данной диаграмме значение Z принято равным 0,013.

Примечание. Для турбулентного движения в трубах диаметром меньше 1" коэфициент f должен быть увеличен на 10%; для труб очень большого диаметра кривая дает с запасом высокие значения, так как данные для труб большого диаметра близки к значениям кривой для медных труб.

Фиг. 27. Коэфициент трения и формулы движения жидкости в трубах круглого сечения.

1 — ламинарное движение потока в трубах круглого сечения; при этом движении $f = 0{,}0007556\ \frac{DZ}{V_G S}$;

2 — турбулентное движение потока в стальных или чугунных трубах; *3* — турбулентное движение в цельнотянутых медных или латунных трубах.

Переводный коэфициент $\frac{V_G S}{DZ} = 0{,}0472\ \frac{DUS}{Z}$.

(Данные вычислены и кривые построены по тем же источникам, что и в фиг. 26.)

Формула движения жидкости

$$V_G = 0{,}01044\sqrt{\frac{D^5 (P_1 - P_2)}{Sfl}};$$

$$V_G = 0{,}003300\sqrt{\frac{D^5 \Delta h}{fl}}.$$

где V_G — количество протекающей жидкости по объему в *л/мин*;

f — коэфициент трения для приведенной выше формулы;

D — действительный внутренний диаметр трубы в *мм*;

Δh — потеря давления в *м* жидкостного столба при температуре движущегося потока;

l — расчетная длина трубы, равняется действительной длине трубы в *м* плюс эквивалентная длина, заменяющая сопротивление клапанов, поворотных колен и т. д., также в *м*;

S — удельный вес жидкости по отношению к воде при 15,6° С;

P — абсолютное давление в *кг/см*²;

U — скорость потока жидкости в *м/сек*;

Z — вязкость жидкости по отношению к воде при 20° С.

Примечание. При турбулентном потоке жидкости в стальных трубах диаметром меньше 1" значение f надо увеличить на 10%. Для труб очень большого диаметра кривая дает с запасом высокие значения, так как данные для труб большого диаметра близки к значениям кривой для медных труб.

Подписи к фиг. 28—29.

Фиг. 28. Коэфициент трения и формулы движения газа в трубах круглого сечения.

1 — ламинарное движение потока в трубах круглого сечения; при этом движении $f = 0{,}0004433\,\frac{D}{QG}$; *2* — турбулентное движение потока в стальных или чугунных трубах; *3* — турбулентное движение в цельнотянутых медных или латунных трубах.

Переводный коэфициент $\frac{QG}{D} = 0{,}02758\,\frac{DUS}{Z}$.

(Данные вычислены, и кривые построены по тому же источнику, что и в фиг. 26).

Формулы движения газа

Когда потеря давления не более 10% от абсолютного конечного давления в трубе и когда длина трубы не менее 200 диаметров, то

$$Q = 0{,}29826\sqrt{\frac{D^5(P_1 - P_2)P_2}{TfLG}}; \qquad Q = 0{,}0000298\sqrt{\frac{D^5(H_{W_1} - H_{W_2})(H_{W_1} + h)}{TfLG}}.$$

При потере давления более 10%:

$$Q = 0{,}00290\sqrt{\frac{D^5(P_1^2 - P_2^2)}{TfLG}}.$$

где Q — расход газа в *м³/час* при 15,6° С и при 760 *мм* ртутного столба;
f — коэфициент трения;
D — действительный внутренний диаметр трубы в *мм*;
G — удельный вес газа по отношению к воздуху;
H_{W_1} — первоначальное давление по манометру в *мм* водяного столба;
H_{W_2} — конечное давление по манометру в *мм* водяного столба;
h — атмосферное давление в 10 269 *мм* водяного столба;
L — расчетная длина линии; равняется фактической длине трубы в *м* плюс эквивалентная длина, заменяющая сопротивление клапанов, поворотных колен и т. д., также в *м*;
L — расчетная длина в *км*;
P — абсолютное давление в *кг/см²*;
S — средний удельный вес проходящего газа по отношению к воде при температуре в 15,6° С:
T — средняя температура газового потока в °С абс.;
U — средняя скорость потока газа в *м/сек*;
Z — вязкость газа по отношению к воде при 20° С.

На этой диаграмме величина Z принята равной 0,012.

Если требуется применить другие значения для Z, то надо умножить $\frac{QG}{D}$ на $\frac{0{,}012}{Z}$ и пользоваться этой новой величиной для определения коэфициента трения f по кривым.

Примечание. При турбулентном движении газового потока в трубах диаметром меньше 1" значение f надо увеличить на 10%. Для труб очень большого диаметра кривая дает с запасом высокие значения, так как данные для труб большого диаметра близко подходят к значениям, показанным на кривой для медных труб.

Фиг. 29. Коэфициент трения и формулы движения потока для любых жидкостей в трубах с круглым сечением.

1 — ламинарное движение потока в трубах круглого сечения; при этом движении $f = 0{,}016\,\frac{Z}{DUS}$; *2* — турбулентное движение потока в стальных или латунных трубах; *3* — турбулентное движение в цельнотянутых медных или латунных трубах.

На линии абсцисс нанесены величины $\frac{DUS}{Z}$.

ПОТЕРИ НА РАСШИРЕНИЕ И СЖАТИЕ

Условные обозначения

ΔH — потеря напора в *м* движущегося потока;
u_1 — средняя скорость движущегося потока до изменения сечения в *м/сек*;
u_2 — средняя скорость движущегося потока после изменения сечения в *м/сек*;
g — ускорение под влиянием силы тяжести 9,81 *м/сек*;
h — потеря напора в *мм* водяного столба;
G — удельный вес газа (при весе воздуха, равном единице);
Q — скорость потока газа в *м³/час* при 15,6° С и при давлении в 1,035 *ат*;
T_1 — абсолютная температура движущегося потока до изменения сечения в °С;
P_1 — абсолютное давление потока газа до изменения сечения в *кг/см²*;
D_1 — диаметр живого сечения движущегося потока до изменения сечения в *мм*;
D_2 — диаметр живого сечения движущегося потока после изменения сечения в *мм*;
ΔP — потеря напора в *кг/см²*;
S — удельный вес жидкости по отношению к воде при 15,56° С;
V_G — скорость потока жидкости в *л/мин*;
ρ — плотность жидкости в *кг/м³*;
K — коэфициент сжатия потока.

При внезапном расширении живого сечения потока, потеря напора в любой жидкости определяется по уравнению:

$$\Delta H = \frac{(u_1 - u_2)^2}{2g}.$$

Для газов, проходящих по трубам кругового сечения, когда $\Delta P < 10\% P_1$, потеря от расширения живого сечения потока составит:

$$\Delta P = 0{,}0028207 \frac{GQ^2T_1}{P_1}\left(\frac{1}{D_1^2} - \frac{1}{D_2^2}\right)^2;$$

$$h = 28{,}207 \frac{GQ^2T_1}{P_1}\left(\frac{1}{D_1^2} - \frac{1}{D_2^2}\right)^2.$$

Для жидкостей, проходящих по трубам кругового сечения, потеря напора от увеличения живого сечения потока определяется по уравнению:

$$\Delta P = 2{,}2877\, SV_G^2 \left(\frac{1}{D_1^2} - \frac{1}{D_2^2}\right)^2.$$

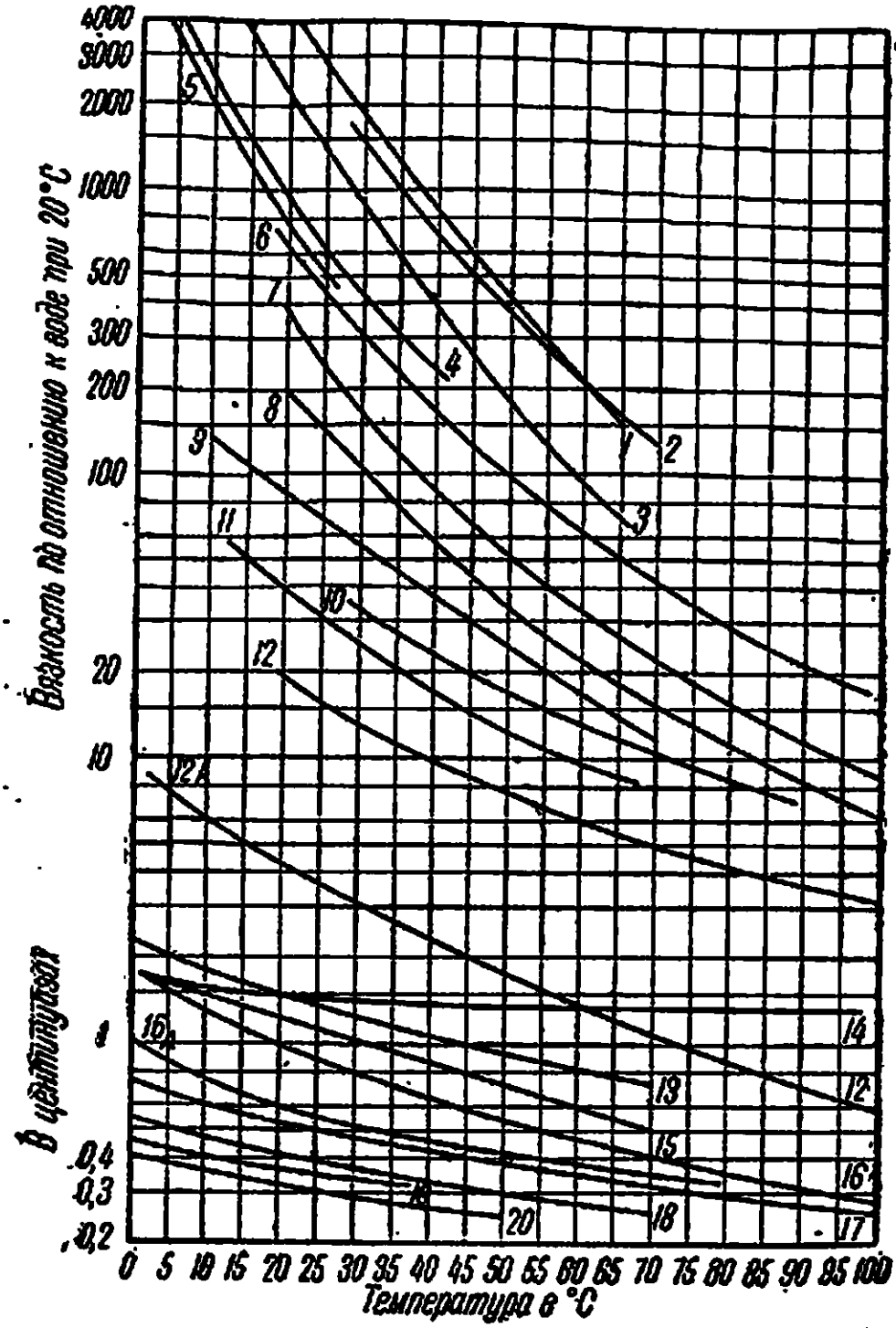
---

* (Окончание подписи к фиг. 29).

На линии ординат — коэфициент трения f для движения жидкостей в трубах кольцевого сечения как при ламинарном, так и при турбулентном потоках:

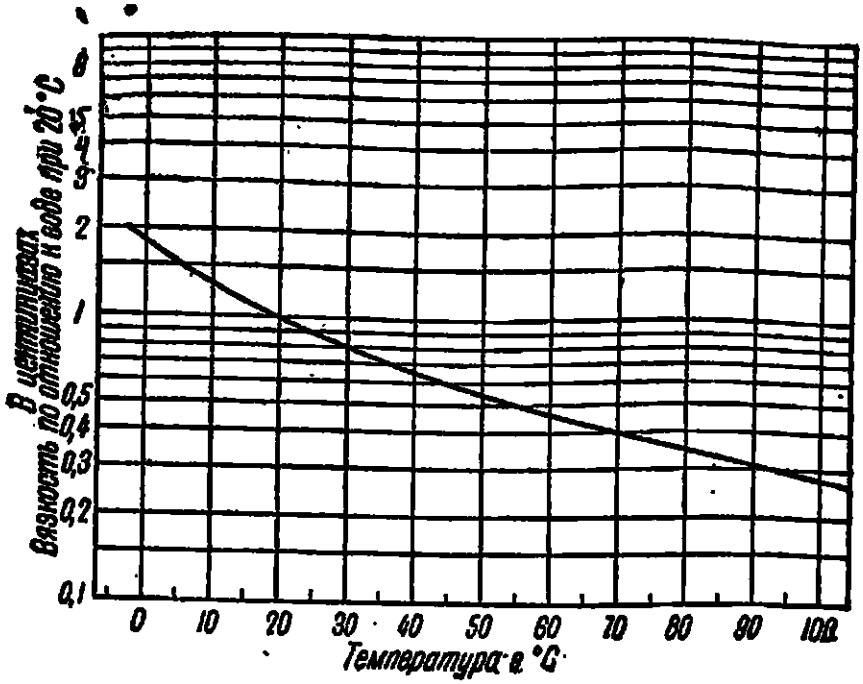
$$\Delta P = 1{,}9851 \frac{fL\rho U^2}{gd},$$

где f — коэфициент трения, безразмерный;
L — длина прямой трубы в *м* плюс эквивалентная длина, заменяющая сопротивление клапанов, поворотных колен и т. д., также в *м*;
ρ — плотность жидкости в *кг/м³*;
U — средняя скорость потока в *м/сек* $= \frac{\text{расход в } м^3/сек}{\text{поперечное сечение в } м^2}$;
g — 9,8 *м/сек²*;
d — действительный внутренний диаметр в *м*;
ΔP — потеря давления в *кг/м²*;
D — действительный внутренний диаметр в *мм*;
S — удельный вес;
Z — вязкость жидкости по отношению к воде при 20° С в центипуазах.

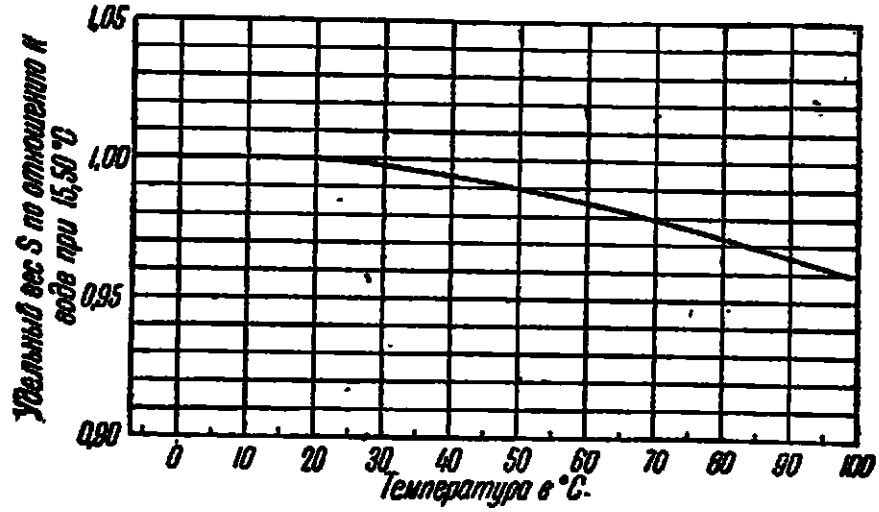


Фиг. 30. Кривые вязкости различных жидкостей в зависимости от температуры [Из „J. Ind. Eng. Chem.", т. 14, № 2, 105, 1922]:

1 — мексиканская нефть;
2 — Meproleum;
3 — калифорнийская тяжелая нефть (15° Be);
4 — касторовое масло;
5 — глицерол;
6 — моторное масло B;
7 — моторное масло A;
8 — техасское моторное масло;
9 — оливковое масло;
10 — олифа (copra oil)
11 — калифорнийская легкая нефть (24,4° Be);
12 — невязкое натуральное масло;
12A — амиловый спирт;
13 — ртуть;
14 — терпентин;
15 — этиловый спирт;
16 — вода;
16A — бензол;
17 — октан;
18 — гептан;
19 — сероуглерод;
20 — гексан.



Фиг. 31. Кривая вязкости для воды в зависимости от температуры по данным I. C. T. (International Critical Tables).



Фиг. 32. Кривая удельного веса для воды в зависимости от температуры (по данным I. C. T.). Плотность воды при 15,56° С равна 0,999013 *г/см*³.

Таблица 22

Эквивалентные длины труб, выраженные в диаметрах основной прямой трубы

Приводимые ниже данные относятся к турбулентному движению и рассчитаны на любую жидкость

Виды соединений, через которые проходит жидкость	Диаметры в дм.	Длина, выраженная числом диаметров
Поворотные колена под 90°	1—2,5	30
» » » 90°	3—6	40
» » » 90°	7—10	50
Шаровой клапан	1—2,5	45
» »	3—6	60
» »	7—10	75
Тройники	1—4	60
Отводы 90°; радиус по средней линии равен диаметру трубы	—	20
Радиус по средней линии (2—8 диам.)	—	10
Угольники (пересечение двух цилиндров)	—	50

Таблица 23

Константы Sutherland'a для разных газов [1].

Газ	C	μ_0 в *г/см сек*	Температура в °C
Воздух	120	0,0001814	23
Водяной пар	650	0,0000879	0
A	142	0,0002087	0
CO_2	240—274	0,0013700	0
CH_4	198	0,0010200	0
C_2H_4	226	0,0000986	15
C_2H_6	—	0,0000844	0
		0,0000630	—78,6
H_2	72—83	0,0000838	0
He	70	0,0001865	0
N_2	110,6	0,0001758	23
Ne	56	0,0002960	0
NH_3	370	0,0000915	0
O_2	127	0,0002029	23
SO_2	416	0,0011690	0

Таблица 24

Вязкости наиболее распространенных газов по отношению к воде при 20° C [2]

Газ	Температура в °C	Вязкость газа по отношению к воде при 20° C
Метан	0	0,01035
»	20	0,01201
»	100	0,01363
Этан	0	0,00855
Этилен	0	0,00920
Воздух	0	0,01740
»	20	0,01900
»	100	0,02240
Углекислый газ	0	0,14000
Природный »	—	0,01200 (прибл.) [3]
Искусственный газ	—	0,0120 [3]
Водяной пар	100	0,01205
» »	180	0,01443

Потеря напора вследствие внезапного уменьшения живого сечения потока составит для любой жидкости:

$$\Delta H = \frac{K}{2g} (u_2)^2.$$

Для газов, проходящих по трубам кругового сечения, потеря напора от увеличения живого сечения потока, когда $\Delta P < 10\% P_1$ составит:

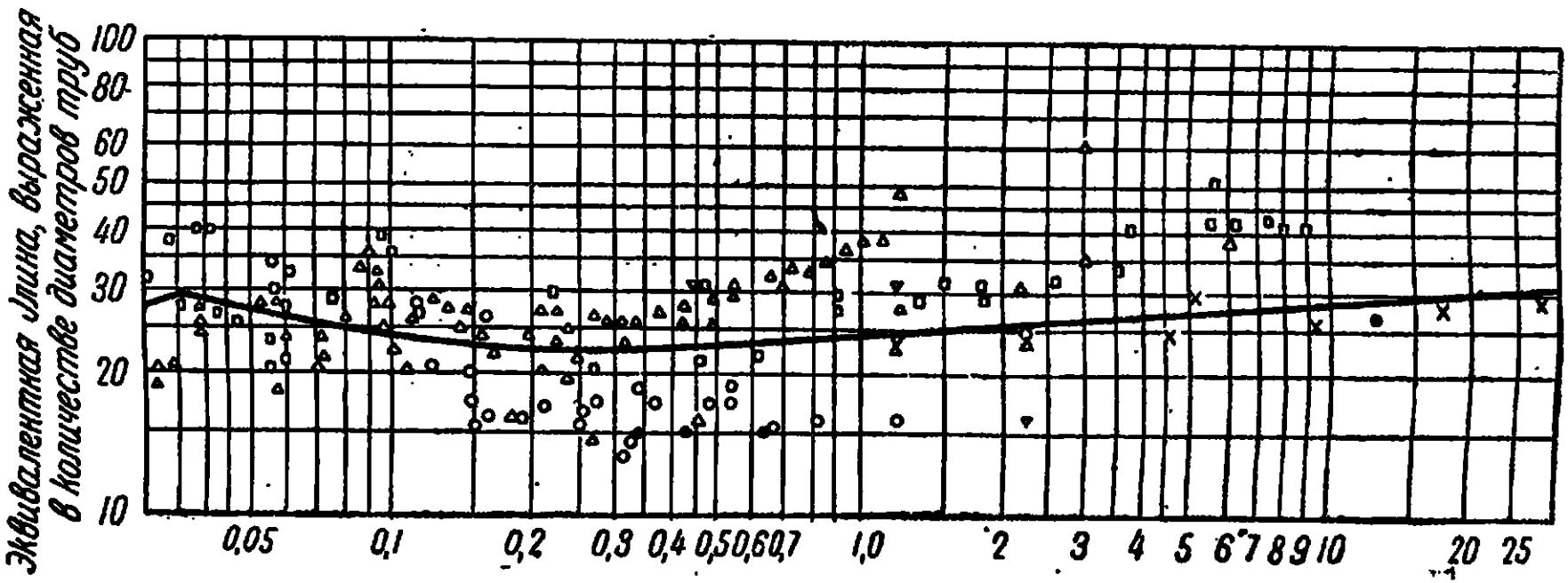
$$\Delta P = 0{,}0028207\ K \left(\frac{GQ^2T_1}{P_1}\right)\left(\frac{1}{D_2^4}\right);$$

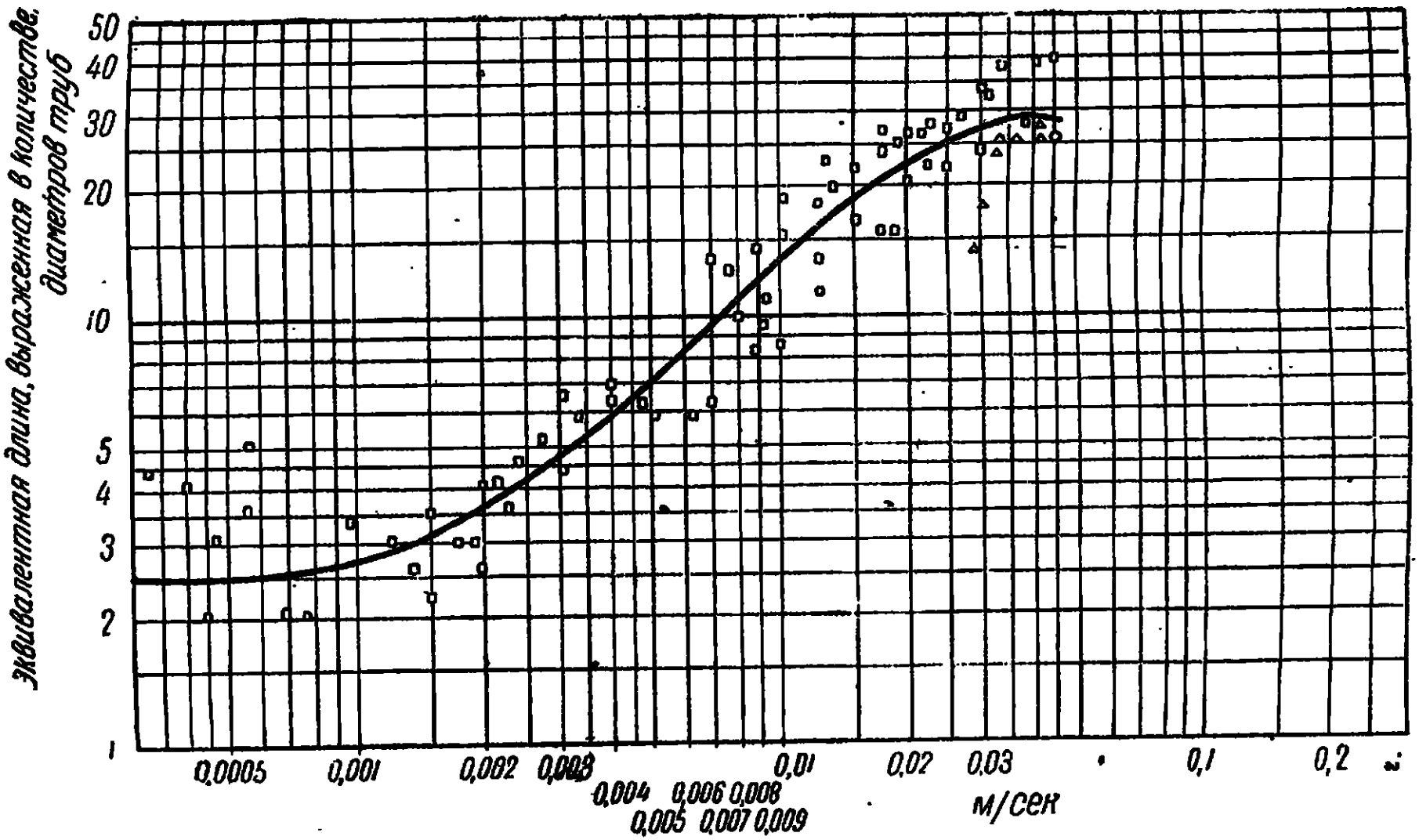
$$h = 28{,}207\ K \left(\frac{GQ^2T_1}{P_1}\right)\left(\frac{1}{D_2^4}\right).$$

[1] По таблицам I. C. T.
[2] По данным I. T. C.
[3] Этим значением Z можно пользоваться при решении всяких заданий, касающихся обычных горючих газов, распространяемых для использования как топливо без заметной ошибки в окончательных результатах подсчета.

Условные обозначения (к фиг. 33)

□	— данные	Seltzer-Kendall		в трубах диам.		1, 2 и 4″
△	— »	Kite-Kennedy	для нефти	» »	»	1, 2 и 4″
×	— »	Schroder	» воды	» »	»	6″
●	— »	Daley	» »	» »	»	4″
+	— »	»	» »	» »	»	3″
△	— »	Davis	» »	» »	»	2″
▽	— »	Bain	» »	» »	»	5/4″
□	— »	Giesecke	» »	» »	»	от 1/2 до 3″
□	— »	Balch	» »	» »	»	3″





Фиг. 33. Эквивалентные длины, заменяющие сопротивление в стандартных коленах под углом в 90° (по статье Wilson, McAdams и Seltzer, „J. Ind. Eng. Chem.", т. 14, № 2, 105—119, 1922).

До 10 по вертикальной оси—движение ламинарное; выше — турбулентное.

Поправка к значению эквивалентной длины колен для труб торгового качества.

Для жидкостей, проходящих по трубам кругового сечения, потеря напора от уменьшения живого сечения потока составит:

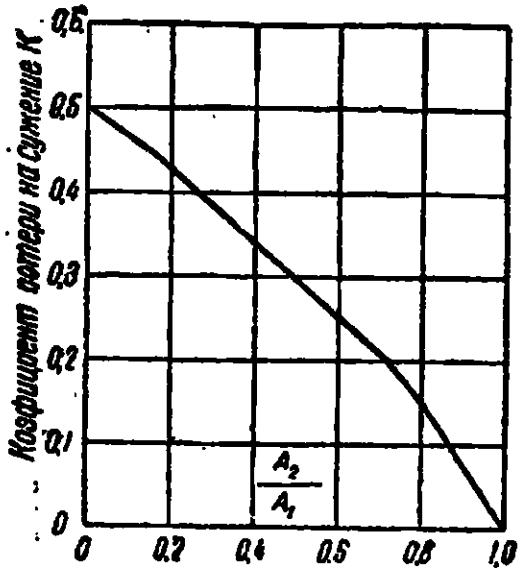
$$\Delta P = 2{,}2877\ KSV_G^2\left(\frac{1}{D_2^4}\right),$$

где K — множитель, который берется по фиг. 34 соответственно отношению площадей.

Движение жидкостей и газов по трубам с квадратным или кольцевым сечением

Движение жидкостей по трубам с квадратным или кольцевым сечением можно вычислить при помощи кривых и уравнений, представленных на фиг. 26, 27, 28, 29.

Значение D, применяемое как в самих уравнениях, так и при определении коэфициента трения, должно равняться диаметру трубы кругового сечения, имеющей тот же гидравлический радиус (m), как и сама заданная труба.



Фиг. 34. Коэфициент для вычисления потери давления от сужения живого сечения потока.

Гидравлический радиус равняется площади поперечного сечения, деленной на „смоченный" периметр.

Он равен:

$\frac{D}{4}$ — для трубы кругового сечения;

$\frac{D_1 - D_2}{4}$ — для труб кольцевого сечения;

$\frac{x}{4}$ — для труб квадратного сечения,

где D — внутренний диаметр трубы кругового сечения;

D_1 — внутренний диаметр внешнего пояса трубы кольцевого сечения в *мм*;

D_2 — наружный диаметр внутреннего пояса трубы кольцевого сечения в *мм*;

X — сторона сечения в трубах квадратного сечения.

$$\Delta h = K\frac{u_2^2}{2g},$$

где Δh — потеря давления в *м* длины потока, плотность которого соответствует плотности в месте сужения;

u_2 — линейная скорость потока в малом сечении в *м/сек*;

g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 *м/сек*²;

K — коэфициент потери напора на сужение;

A_2 — площадь суженного сечения потока.

Пример. Вычислить внутренний диаметр трубопровода кольцевого сечения, состоящего из внешней стандартной стальной 3-дюймовой трубы и внутренней стандартной 2-дюймовой трубы.

Внутренний диаметр 3-дюймовой трубы равен 3,068″ (77,927 *мм*).

Наружный диаметр 2-дюймовой трубы равен 2,375″ (60,335 *мм*).

$$D_1 - D_2 = 0{,}693''\ (17{,}602\ мм).$$

$\frac{D_1 - D_2}{4} = \frac{0{,}693}{4} = \frac{17{,}602}{4} = 4{,}4$ *мм* = гидравлическому радиусу кольцевого трубопровода.

Диаметр круглой трубы, имеющей тот же гидравлический радиус:

$$\frac{D}{4} = \frac{0{,}693''}{4} = \frac{17{,}602}{4}\ мм, \quad D = 0{,}693\ (17{,}602\ мм).$$

Таким образом, скорость потока, проходящего по трубопроводу кольцевого сечения, равняется скорости потока, проходящего по трубе кругового сечения, имеющей диаметр 0,693″ (вдвое больше, чем ширина кольцевого сечения в свету); задача может быть разрешена так же, как и в отношении трубы кругового сечения.

Потеря на трение при прохождении потока через поворотные колена и клапана

Потеря на трение в поворотных коленах может быть определена по фиг. 33.

Потеря на трение в клапанах, тройниках и угольниках может быть определена по табл. 22.

В отношении трубопроводов прямоугольного сечения Wirt показал, что в колене, наружные стороны которого образуют прямой, а внутренние — закругленный угол, потеря на трение на 10% меньше, чем в колене, закругленном с наружной и внутренней сторон. Потеря для колена с прямым углом по наружной образующей и с закругленным углом по внутренней образующей при прямоугольном сечении составляет:

Отношение радиусов:	2,8	1,8	1,4	1,0	0,8	0,7
Потеря в процентах скоростного напора	24	30	37	55	84	120

Отношение радиусов равняется радиусу угла по внутренней образующей колена, взятого до оси трубопровода, деленному на ширину трубы, находящейся в той же плоскости, где измеряется радиус.

Для воздухопроводов различных сечений величины, указанные выше, умножаются на следующие поправочные коэфициенты:

Геометрическое отношение	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0
Поправочные коэфициенты	1,3	1,0	0,8	0,7	0,53	0,45	0,38

где

$$\text{геометрическое отношение} = \frac{\text{ширина воздухопровода в плоскости, перпендикулярной радиусу}}{\text{ширина воздухопровода в плоскости самого радиуса}}.$$

Если в закругленное колено прямоугольного сечения ввести направляющую закругленную решетку из труб, то может получиться уменьшение потери на трение на 35%.

При увеличенном количестве таких направляющих поток труб потеря может еще более уменьшиться.

Потеря давления в конических трубах. Jones, применяя уравнение Harris'a $f = \frac{0{,}008 \cdot D^{1/3}}{(25{,}4)^{1/3}}$ для коэфициента трения, получил для конической трубы:

$$Q = 2{,}8865 \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)\,(D_2 - D_1)\,(D_1 \cdot D_2)^{4{,}333}}{GLT\,(D_2^{4{,}333} - D_1^{4{,}333})}}.$$

Для трубы, диаметр которой увеличивается ступенями, причем ступени имеют равные длины и на своем протяжении являются цилиндрическими, Jones получил уравнение:

$$Q = 1{,}3853 \sqrt{\frac{N\,(P_1^2 - P_N^2)}{GTL\left(\frac{1}{D_1^{5{,}333}} + \frac{1}{D_2^{5{,}333}} + \cdots + \frac{1}{D_N^{5{,}333}}\right)}},$$

где N — число отрезков равной длины;
Q — расход газа в $м^3/час$ при нормальных (стандартных условиях);
L — длина трубы в $м$.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ВЫРАЖЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

(см. также табл. 19, 20 и 21)

Условные обозначения

Q — расход в $м^3/час$;
h — потеря давления в $мм$ водяного столба;
D — диаметр трубы в $дм$;
d — диаметр трубы в $мм$;
G — удельный вес газа (удельный вес воздуха принят за единицу);
L — длина трубы в $м$;

ΔP — потеря напора в *кг/см²*;
P — абсолютное давление *кг/см²*;
ρ — средняя плотность в *кг/м³*;
W — расход в *кг/мин*;
U — скорость потока в *м/сек*;
m — гидравлический радиус в *мм*;
ΔH — потеря давления в *м* соответственно проходящей жидкости;
V_G — расход в *л/мин*;
c — коэфициент шероховатости стенок трубы:
140 — для новых стальных труб;
130 — для новых чугунных труб;
110 — для клепаных труб.

Индекс 1 соответствует начальным условиям движущегося потока; индекс 2 — то же для конечных условий движущегося потока.

Расход газа, проходящего под низким давлением, вычисляется по уравнению Spitzglass'a:

$$Q = 0{,}00338 \sqrt{\frac{hD^5}{GL\left(1 + \frac{91.44}{D} + 0{,}00118D\right)}}.$$

Расход газа, проходящего под высоким давлением, вычисляется по уравнению Weymouth'a:

$$Q = 0{,}00256 \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)\, D^{5{,}33}}{GL}},$$

где L дано в *км*.

Потеря давления для пара вычисляется по уравнению Babcock'a:

$$\Delta P = 24885{,}3 \left(\frac{D + 91{,}44}{D^6}\right) \frac{W^2 L}{\rho}.$$

По уравнению Hazen'a и Williams'a для воды:

$$U = 0{,}8492\, cm^{0{,}63} \left(\frac{\Delta H}{L}\right)^{0{,}54};$$

$$V_G = 24{,}2041\, cd^{2{,}63} \left(\frac{\Delta H}{L}\right)^{0{,}54};$$

$$V_G = 84{,}054\, cd^{2{,}63} \left(\frac{\Delta P}{L}\right)^{0{,}54}$$

Уравнения Hazen'a и Williams'a пригодны для масел, которые легче по удельному весу, чем 0,8762 (30° Bé):

$$V_G = 918{,}46\, cd^{2{,}63} \left(\frac{\Delta P}{\rho L}\right)^{0{,}54}.$$

Для нефти с удельным весом 0,8109 (43° Bé) $c = 96$; с уменьшением показаний ареометра на каждые 3° Bé коэфициент c увеличивается на 1%.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЕМКОСТИ ОБЫКНОВЕННОГО ТРУБОПРОВОДА

Если газ движется по трубе с постоянной скоростью, т. е. если приход газа точно равняется расходу, то все количество газа, содержащееся в линии, может быть вычислено при помощи следующего уравнения[1]:

$$V = 0{,}14597 \frac{D^2 L}{T}\left(P_1 + P_2 - \frac{P_1 P_2}{P_1 + P_2}\right).$$

[1] Уравнение выведено по статье Weymouth, Trans. A. S. M. E. т. 34 и по статье Lichty, „Natural Gas", стр. 404—406.

где V — объем газа, находящегося в линии, в $м^3$ при 15,6 °С и при давлении в 1,035 *ат*;

D — диаметр линии в *мм*;

L — длина линии в *км*;

T — абсолютная температура в °С;

P_1 — давление на входе в $кг/см^2$ абс.;

P_2 — давление на выходе в $кг/см^2$ абс.

Для определения того количества газа, которое может быть извлечено из линии как из газохранилища при переходе от малого расхода к большому, необходимо только подставить значение давлений, имеющих место в период большого расхода, в указанное выше уравнение и вычесть полученный объем газа из объема, вычисленного для давлений периода малого расхода.

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ТРУБОПРОВОДОВ, ОБРАЗУЮЩИХ ПЕТЛИ МЕЖДУ ДВУМЯ ТОЧКАМИ

Для решения проблемы движения жидкостей по системе трубопроводов между двумя точками находят один эквивалентный всей системе трубопровод, по которому при данных условиях давления, температуры и при данном удельном весе газа будет проходить такое же количество последнего, как и по системе трубопроводов. Этот простой трубопровод будет эквивалентен системе трубопроводов между двумя точками при всех условиях; таким образом, все задачи, касающиеся указанной системы, могут быть разрешены, при помощи замены сложной системы, одним трубопроводом.

Эквивалентный трубопровод определяется следующим образом.

Общий поток, который проходит по системе вычисляется путем сложения потоков, проходящих по каждой ветви системы. Таким образом, получается следующее уравнение для расхода:

$$Q = 0{,}0025647\,\frac{\sqrt{P_1^2 - P_2^2}}{G}\left[\sqrt{\frac{D_1^{5\frac{1}{3}}}{L_1}} + \sqrt{\frac{D_2^{5\frac{1}{3}}}{L_2}} + \ldots + \sqrt{\frac{D_m^{5\frac{1}{3}}}{L_m}}\right] \quad (1)$$

Уравнение для расхода через эквивалентный трубопровод:

$$Q = \frac{0{,}0025647\,\sqrt{P_1^2 - P_2^2}}{\sqrt{G}} \cdot \sqrt{\frac{D_e^{5\frac{1}{3}}}{L_e}}; \quad (2)$$

$$\sqrt{\frac{D_e^{5\frac{1}{3}}}{L_e}} = \sqrt{\frac{D_1^{5\frac{1}{3}}}{L_1}} + \sqrt{\frac{D_2^{5\frac{1}{3}}}{L_2}} + \ldots + \sqrt{\frac{D_m^{5\frac{1}{3}}}{L_m}}, \quad (3)$$

где Q — расход для всей системы трубопроводов между двумя точками в $м^3/час$;

G — удельный вес газа (при удельной весе воздуха, принятом за единицу)

$D_1 D_2 \ldots, D_m$ — внутренние диаметры отдельных ветвей системы в *мм*;

$L_1 L_2 \ldots, L_m$ — длина ветвей в *км*;

D_e — диаметр эквивалентного трубопровода в *мм*;

L_e — длина эквивалентного трубопровода в *км*;

P_1 — начальное давление в $кг/см^2$;

P_2 — конечное давление в $кг/см^2$.

Пример. Трубопровод между двумя точками A и $Б$ состоит из одного трубопровода: $D_1 = 250$ *мм*, $L_1 = 60$ *км*; $D_2 = 300$ *мм*, $L_2 = 100$ *км*; $D_3 = 200$ *мм*, $L_3 = 75$ *км*:

$$\sqrt{\frac{D_e^{5\frac{1}{3}}}{L_e}} = \sqrt{\frac{250^{5\frac{1}{3}}}{60}} + \sqrt{\frac{300^{5\frac{1}{3}}}{100}} + \sqrt{\frac{200^{5\frac{1}{3}}}{75}} = 320\,207 + 403\,319 + 157\,960 = 881\,486.$$

Пусть диаметр эквивалентного трубопровода будет $D_e = 300$ *мм*. Тогда

$$\sqrt{\frac{300^{5\frac{1}{3}}}{L_e}} = 881\,486; \qquad L_e = \frac{300}{881\,486^2};$$

$$L_e = 24{,}037\ км.$$

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ПО ТРУБАМ РАЗНЫХ ДИАМЕТРОВ

Для расчета движения потока по последовательному ряду труб разных диаметров определяют длины труб произвольно взятого диаметра, эквивалентные соответственно каждой из труб, из которых составлена линия. Складывая эти длины, мы получим трубу одного заданного диаметра, эквивалентную серии последовательных труб.

Можно легко показать по уравнению Weymouth'a, что эквивалентные длины труб и диаметры двух труб выводятся из уравнения:

$$L_2 = L_1 \frac{D_2^{5\frac{1}{3}}}{D_1^{5\frac{1}{3}}}, \qquad (1)$$

где D_1 и L_1 являются диаметром и длиною одной трубы, а
D_2 и L_2 — диаметр и длина другой трубы.

Пример. Линия состоит из 53,1 *км* труб диаметром в 12″ и 28,96 *км* труб диаметром в 15″. Найти линию эквивалентной длины.

Пусть диаметр эквивалентной линии равен 12″.

Чтобы найти длину 12″ эквивалентной линии длиной 28,9 *км* и диаметром 15″, подставляем числа в уравнение (1):

$$L_2 = L_1 \frac{D_2^{5\frac{1}{3}}}{D_1^{5\frac{1}{3}}} = 28{,}9 \cdot \frac{12^{5\frac{1}{3}}}{15^{5\frac{1}{3}}} = 8{,}8.$$

Таким образом, длина в $53{,}1 + 8{,}8 = 61{,}9$ *км* эквивалентна серии линий в 15 и 12″.

ДВИЖЕНИЕ ГАЗА ПО ТРУБЕ ПОСТОЯННОГО ДИАМЕТРА, ИМЕЮЩЕЙ НЕСКОЛЬКО ОТВОДОВ

Условные обозначения

q_a — расход газа по линии от одного конца до другого, вызывающий такую же общую потерю давления, как и та, которая получается в действительности при различных потоках, идущих по отдельным участкам:

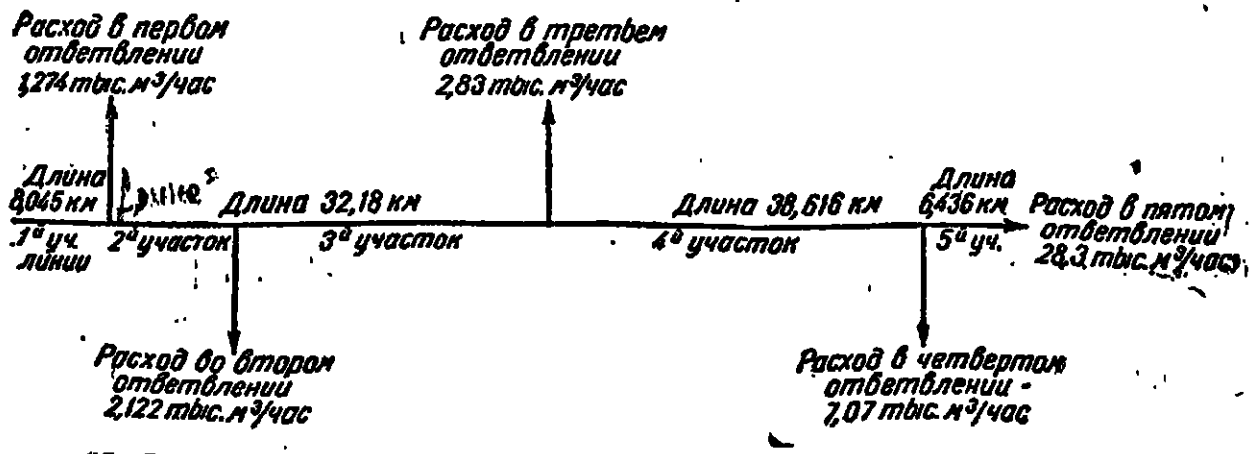
$q_1, q_2, q_3 \ldots, q_n$ — количество газа, протекающее в каждом последовательном звене линии в тыс. *м³/час*;

$L_1, L_2, L_3 \ldots, L_n$ — длины последовательных участков линии в *км*;

$P_1, P_2, P_3 \ldots, P_n$ — начальное давление на каждом из последовательных участков линии в *кг/см²*;

D — диаметр линии в *мм*;

G — удельный вес газа (принимая удельный вес воздуха равным единице).



Фиг. 35. Диаграмма, показывающая количество газа, отбираемое через каждое ответвление.

Расход газа на первом участке линии по уравнению Weymouth'a выражается:

$$q_1 = \frac{0{,}0025647}{1\,000}\sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)\,D^{5{,}33}}{GL}}, \qquad (1)$$

$$q_1^2 = \left(\frac{0{,}0025647}{1\,000}\right)^2 \frac{D^{5{,}33}}{G} \cdot \frac{P_1^2 - P_2^2}{L_1},$$

или
$$q_1^2 L_1 = K(P_1^2 - P_2^2), \qquad (2)$$

где
$$K = \left(\frac{0{,}0025647}{1000}\right)^2 \frac{D^{5{,}33}}{G}. \qquad (3)$$

Подобным же образом расход газа на каждом из последующих участков линии выражается уравнением:

$$q_2^2 L_2 = K(P_2^2 - P_3^2); \qquad (4)$$

$$q_3^2 L_3 = K(P_3^2 - P_4^2); \qquad (5)$$

$$q_n^2 L_n = K(P_n^2 - P_{n+1}^2). \qquad (6)$$

Складывая уравнения (2), (4), (5) и (6), получим:

$$q_1^2 L_1 + q_2^2 L_2 + q_3^2 L_3 + \ldots + q_n^2 L_n = K(P_1^2 - P_{n+1}^2); \qquad (7)$$

$$q_a^2 L = K(P_1^2 - P_{n+1}^2), \qquad (8)$$

откуда
$$q_1^2 L_1 + q_2^2 L_2 + q_3^2 L_3 + \ldots + q_n^2 L_n = q_a^2 L; \qquad (9)$$

$$q_1^2 \frac{L_1}{L} + q_2^2 \frac{L_2}{L} + q_3^2 \frac{L_3}{L} + \ldots + q_n^2 \frac{L_n}{L} = q_a^2. \qquad (10)$$

По уравнению (10) можно вычислить q_a^2.

Поскольку q_a^2 известно, вопросы, касающиеся давления по трубам, можно решать при помощи уравнения (8), как будто перед нами простой трубопровод без ответвлений.

Пример. На трубопроводе длиною в 96,51 *км* имеются 4 ответвления; расположение ответвлений и количество отбираемого каждым из них газа показаны на прилагаемой схеме (фиг. 35). Удельный вес газа — 0,65. Каков должен быть диаметр трубопровода, чтобы подавать через эти отводы газ и пропускать до конечной станции 28 300 *м³/час*? Начальное давление 28,12 *кг/см²*, а конечное — 5,273 *кг/см²*.

Вычисления для получения q_a^2 из уравнения (10) располагаются так, как показано в табл. 25.

Таблица 25

Расчет величин q_a

Номер секции	Расход газа в *м³/час*	Расход газа в $(м^3/час)^2$	Отношение длины участка к общей длине линии	Произведение графы 3 на графу 4
1	2	3	4	5
5	28,30	801	0,0667	53
4	35,37	1 250	0,4000	500
3	38,20	1 458	0,3300	483
2	40,33	1 626	0,1168	190
1	41,60	1 730	0,0833	144
			$q_a^2 = 1\,370$	

Подставляя значение q_s^2, а также значения начального и конечного давления в уравнение (8) и решая уравнения относительно K, получаем:

$$K = \frac{1370{,}0825 \cdot 96{,}54}{(29{,}157)^2 - (6{,}307)^2} = 163{,}22.$$

Подставляя значение K в уравнение (3), получаем:

$$163{,}22 = \left(\frac{0{,}0025647}{1\,000}\right)^2 \frac{D^{5/3}}{0{,}65};$$

$$D^{5/3} = \frac{163{,}22 \cdot 1\,000\,000 \cdot 0{,}65}{(0{,}0025647)^2}.$$

Таким образом, внутренний диаметр трубопровода, необходимый для того, чтобы он мог пропускать указанное количество газа, равняется 299,5 *мм* (~11,8").

5. ЗАМЕР ГАЗА И СЧЕТЧИКИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕДИНИЦ ЗАМЕРА

Стандартный куб. метр. Стандартный куб. метр газа представляет собой такое его количество, которое при температуре 15,56° С и при давлении в 760 *мм* в состоянии насыщения водяными парами занимает объем в 1 $м^3$ (температура ртути равна 0°С; ускорение 9,81 *м/сек*; плотность 13,595 $г/см^3$). Такая единица для замера газа применяется во всех лабораторных испытаниях в нефтяной промышленности. Она имеет применение также при отпуске газа с завода.

Куб. метр при отпуске газа с низким давлением. Когда газ отпускается потребителю при низком давлении (меньше 0,0351 $кг/см^2$ по манометру) и мера для отпуска его не обусловлена договором, то единицей при отпуске является то количество газа, которое занимает объем в 1 $м^3$ при той температуре и том давлении, какие существуют в счетчике в момент отпуска.

Такая единица замера принята повсюду при отпуске газа для бытовых потребителей.

Куб. метр при отпуске газа с высоким давлением. Общепринятой единицы замера газа при больших расходах, когда подача производится при давлениях, превышающих 0,0351 $кг/см^2$ по манометру, не существует.

Стандартная температура 15,56° С принята повсюду; что же касается давлений, при которых делается замер, то в этом отношении в практике безусловного однообразия нет.

Издавна в практике американской газовой промышленности принято было сводить давления при замерах газа к давлению среднеатмосферному, существующему в точке замера, с добавлением к нему 0,0176, 0,0352, 0,044, 0,0703, 0,1406 $кг/см^2$. Величина давления при отпуске газа, а также другие условия замера предусматриваются договорами.

Такой способ выбора исходного давления вносит путаницу в дело замера, и поэтому количество газа, которое заключается в 1 $м^3$, становится неопределенным.

Чтобы устранить затруднения, возникающие от того, что за основу замера берется атмосферное давление в точке замера, некоторые компании стали измерять газ при абсолютном давлении (1,035 $кг/см^2$).

По соглашению между различными заинтересованными компаниями в Калифорнии принята была единая объемная единица (куб. фут), к которой сводится все замеры газа, отпускаемого при высоком давлении. Эта объемная единица составляет куб. фут газа при температуре в 15,56° С и при абсолютном давлении в 1,035 *ат* (14,73 фун/кв. *дм*).

Поскольку это давление соответствует давлению ртутного столба в 760 *мм*, такое определение единицы замера сходно с тем определением, которое дано в начале главы; здесь не упомянуто лишь насыщение пара.

Квадраты абсолютных давлений

p — манометрическое давление $P+=(P+1{,}0)$

p	$P+$	p	$P+$	p	$P+$	p	$P+$	p	$P+$
0,01	1,0201	0,55	2,4025	1,09	4,3681	1,63	6,9169	2,28	10,6276
0,02	1,0404	0,56	2,4336	1,10	4,4100	1,64	6,9696	2,27	10,6929
0,03	1,0609	0,57	2,4649	1,11	4,4521	1,65	7,0225	2,28	10,7584
0,04	1,0816	0,58	2,4964	1,12	4,4944	1,66	7,0756	2,29	10,8241
0,05	1,1025	0,59	2,5281	1,13	4,5369	1,67	7,1289	2,30	10,8900
0,06	1,1236	0,60	2,5600	1,14	4,5796	1,68	7,1824	2,31	10,9561
0,07	1,1449	0,61	2,5921	1,15	4,6225	1,69	7,2361	2,32	11,0224
0,08	1,1664	0,62	2,6244	1,16	4,6656	1,70	7,2900	2,33	11,0889
0,09	1,1881	0,63	2,6569	1,17	4,7089	1,71	7,3441	2,34	11,1556
0,10	1,2100	0,64	2,6896	1,18	4,7524	1,72	7,3984	2,35	11,2225
0,11	1,2321	0,65	2,7225	1,19	4,7961	1,73	7,4529	2,36	11,2896
0,12	1,2544	0,66	2,7556	1,20	4,8400	1,74	7,5076	2,37	11,3569
0,13	1,2769	0 67	2,7889	1,21	4,8841	1,75	7,5625	2,38	11,4244
0,14	1,2996	0,68	2,8224	1,22	4,9284	1,76	7,6176	2,39	11,4921
0,15	1,3225	0,69	2,8561	1,23	4,97.9	1,77	7,6729	2,40	11,5600
0,16	1,3456	0,70	2,8900	1,24	5,0176	1,78	7,7284	2,41	11,6281
0,17	1,3689	0,71	2,9241	1,25	5,0625	1,79	7,7841	2,42	11,6964
0,18	1,3924	0,72	2,9584	1,26	5,1076	1,80	7,8400	2,43	11,7649
0,19	1,4161	0,73	2,9929	1,27	5,1529	1,81	7,8961	2,44	11,8336
0,20	1,4400	0,74	3,0276	1,28	5,1984	1,82	7,9524	2,45	11,9025
0,21	1,4641	0 75	3,0625	1,29	5,2441	1,83	8,0089	2,46	11,9716
0,22	1,4884	0,76	3,0976	1,30	5,2900	1,84	8,0656	2,47	12,0409
0,23	1,5129	0,77	3,1329	1,31	5,3361	1,85	8,1225	2,48	12,1104
0,24	1,5376	0,78	3,1684	1,32	5,3824	1,86	8,1796	2,49	12,1801
0,25	1,5625	0,79	3,2041	1,33	5,4289	1,87	8,2369	2,50	12,2500
0,26	1,5876	0,80	3,2400	1,34	5,4756	1,88	8,2944	2,51	12,3201
0,27	1,6129	0,81	3,2761	1,35	5,5225	1,89	8,3521	2,52	12,3904
0,28	1,6384	0,82	3,3124	1,36	5,5696	1,90	8,4100	2,53	12,4609
0,29	1,6641	0,83	3,3489	1,37	5,6169	2,00	9,0000	2,54	12,5316
0,30	1,6900	0,84	3,3856	1,38	5,6644	2,01	9,0601	2,55	12,6025
0,31	1,7161	0,85	3,4225	1,39	5,7121	2,02	9,1204	2,56	12,6736
0 32	1,7424	0,86	3,4596	1,40	5,7600	2,03	9,1809	2,57	12,7449
0,33	1,7689	0,87	3,4969	1,41	5,8081	2,04	9,2416	2,58	12,8164
0,34	1,7956	0,88	3,5344	1,42	5,8564	2,05	9,3025	2,59	12,8881
0,35	1,8225	0,89	3,5721	1,43	5,9049	2,06	9,3636	2,60	12,9600
0,36	1,8496	0,90	3,6100	1,44	5,9536	2,07	9,4249	2,61	13,0321
0,37	1,8769	0,91	3,6481	1,45	6,0025	2,08	9,4864	2,62	13,1044
0,38	1,9044	0,92	3,6864	1,46	6,0516	2,09	9,5481	2,63	13,1769
0,39	1,9321	0,93	3,7249	1,47	6,1009	2,10	9,6100	2,64	13,2496
0,40	1,9600	0,91	3,7636	1,48	6,1504	2,11	9,6721	2,65	13,3225
0,41	1,9881	0,95	3,8025	1,49	6,2001	2,12	9,7344	2,66	13,3956
0,42	2,0164	0,96	3,8416	1,50	6,2500	2,13	9,7969	2,67	13,4689
0,43	2,0449	0,97	3,8809	1,51	6,3001	2,14	9,8596	2,68	13,5424
0,44	2,0736	0,98	3,9204	1,52	6,3504	2,15	9,9225	2,69	13,6161
0,45	2,1025	0,99	3,9601	1,53	6,4009	2,16	9,9856	2,70	13,6900
0,46	2,1316	1,00	4,0000	1,54	6,4516	2,17	10,0489	2,71	13,7641
0,47	2,1609	1,01	4,0401	1,55	6,5025	2,18	10,1124	2,72	13,8384
0,48	2,1904	1,02	4,0804	1,56	6,5536	2,19	10,1761	2,73	13,9129
0,49	2,2201	1,03	4,1209	1,57	6,6049	2,20	10,2400	2,74	13,9876
0,50	2,2500	1,04	4,1616	1,58	6,6564	2,21	10,3041	2,75	14,0625
0,51	2,2801	1,05	4,2025	1,59	6,7081	2,22	10,3684	2,76	14,1376
0,52	2,3104	1,06	4,2436	1,60	6,7600	2,23	10 4329	2,77	14,2129
0,53	2,3409	1,07	4,2849	1,61	6,8121	2,24	10,4976	2,78	14,2884
0,54	2,3716	1,08	4,3264	1,62	6,8644	2,25	10 5625	2,79	14,3641

P	P+	P	P+	P	P+	P	P+	P	P+
2,80	14,4400	3,37	19,0969	3,94	24,4036	4,51	30,3601	5,9	47,61
2,81	14,5161	3,38	19,1844	3,95	24,5025	4,52	30,4704	6,0	49,00
2,82	14,5924	3,39	19,2721	3,96	24,6016	4,53	30,5809	6,1	50,41
2,83	14,6689	3,40	19,3600	3,97	24,7009	4,54	30,6916	6,2	51,84
2,84	14,7456	3,41	19,4481	3,98	24,8004	4,55	30,8025	6,3	53,29
2,85	14,8225	3,42	19,5364	3,99	24,9001	4,56	30,9136	6,4	54,76
2,86	14,8996	3,43	19,6249	4,00	25,0000	4,57	31,0249	6,5	56,25
2,87	14,9769	3,44	19,7136	4,01	25,1001	4,58	31,1364	6,6	57,76
2,88	15,0544	3,45	19,8025	4,02	25,2004	4,59	31,2481	6,7	59,29
2,89	15,1321	3,46	19,8916	4,03	25,3009	4,60	31,3600	6,8	60,84
2,90	15,2100	3,47	19,9809	4,04	25 4016	4,61	31,4721	6,9	62,41
2,91	15,2881	3,48	20,0704	4,05	25,5025	4,62	31,5844	7,0	64,00
2,92	15,3664	3,49	20,1601	4,06	25,6036	4,63	31,6969	7,1	65,61
2,93	15,4449	3,50	20,2500	4,07	25,7049	4,64	31,8096	7,2	67,24
2,94	15,5236	3,51	20,3401	4,08	25,8064	4,65	31,9225	7,3	68,89
2,95	15,6025	3 52	20,4304	4,09	25,9081	4,66	32,0356	7,4	70,56
2,96	15,6816	3,53	20,5209	4,10	26,0100	4,67	32 1489	7,5	72,25
2,97	15,7609	3,54	20,6116	4,11	26,1121	4,68	32,2624	7,6	73,96
2,98	15.8404	3,55	20,7025	4,12	26,2144	4,69	32,3761	7,7	75,69
2,99	15,9201	3,56	20,7936	4,13	26.3169	4,70	32,4900	7,8	77,44
3,00	16,0000	3,57	20,8849	4,14	26,4196	4,71	32,6041	7,9	79,21
3,01	16,0801	3,58	20,9764	4,15	26,5225	4,72	32,7184	8,0	81,00
3,02	16,1604	3,59	21,0681	4,16	26,6256	4,73	32,8329	8,1	82,81
3,03	16,2409	3,60	21,1600	4,17	26,7289	4,75	33,0625	8,2	84,64
3,04	16,3216	3,61	21,2521	4,18	26,8324	4,76	33,1776	8,3	86,49
3,05	16,4025	3,62	21,3444	4,19	26,9361	4,77	33,2929	8,4	88,36
3,06	16,4836	3,63	21,4369	4,20	27,0400	4,78	33,4084	8,5	90,25
3,07	16,5649	3,64	21,5296	4,21	27,1441	4,79	33,5241	8,6	92,16
3,08	16,6464	3,65	21,6225	4,22	27,2484	4,80	33,6400	8,7	94,09
3,09	16,7281	3,66	21,7156	4,23	27,3529	4,81	33,7561	8,8	96,04
3,10	16,8100	3,67	21,8089	4,24	27,9576	4,82	33,8724	8,9	98,01
3,11	16,8921	3,68	21,9024	4,25	27,5625	4,83	33,9889	9,0	100,00
3,12	16,9744	3,69	21,9961	4,26	27,6676	4,84	34,1056	9,1	102,01
3,13	17,0569	3,70	22,0900	4,27	27,7729	4,85	34,2225	9,2	104,04
3,14	17,1396	3,71	22,1841	4,28	27,8784	4,86	34,3396	9,3	106,09
3,15	17,2225	3,72	22,2784	4,29	27,9841	4,87	34,4569	9,4	108,16
3,16	17,3056	3,73	22,3729	4,30	28,0900	4,88	34,5744	9,5	110,25
3,17	17,3889	3,74	22,4676	4,31	28,1961	4,89	34,6921	9,6	112,36
3,18	17,4724	3,75	22,5625	4,32	28,3024	4,90	34,8100	9,7	114,49
3,19	17,5561	3,76	22,6576	4,33	28,4089	4,91	34,9281	9,8	116,64
3,20	17,6400	3,77	22,7529	4,34	28,5156	4,92	35,0464	9,9	118,81
3,21	17,7241	3.78	22,8484	4,35	28,6225	4,93	35,1649	10,0	121,00
3,22	17,8084	3,79	22,9441	4,36	28,7296	4,94	35,2836	10,1	123,21
3,23	17,8929	3,80	23,0400	4,37	28,8369	4,95	35,4025	10,2	125,44
3,24	17,9776	3,81	23,1361	4,38	28,9444	4,96	35,5216	10,3	127,69
3,25	18,0625	3,82	23,2324	4,39	29,0521	4,97	35,6409	10,4	129,96
3,26	18,1476	3,83	23,3289	4,40	29,1600	4,98	35,7604	10,5	132,25
3,27	18,2329	3.84	23,4256	4,41	29,2681	4,99	35 8801	10,6	134,56
3,28	18,3184	3,85	23,5225	4,42	29 3764	5,0	36,0000	10,7	136,89
3,29	18,4041	3,86	23,6196	4,43	29,4849	5.1	37,21	10,8	139,24
3,30	18,4900	3,87	23,7169	4,44	29,5936	5,2	38,44	10,9	141,61
3,31	18,5761	3,88	23,8144	4,45	29,7025	5,3	39,69	11,0	144,00
3,32	18,6624	3,89	23,9121	4,46	29,8116	5,4	40,96	11,1	146,41
3,33	18,7489	3,90	24,0100	4,47	29.9209	5,5	42,25	11,2	148,84
3,34	18,8356	3,91	24,1081	4,48	30,0304	5.6	43,56	11,3	151,29
3,35	18,9225	3,92	24,2064	4,49	30,1401	5,7	44,89	11,4	153,76
3,36	19,0096	3,93	24,3049	4,50	30,2500	5,8	46,24	11,5	156,25

P	P+	P	P+	P	P+	P	P+	P	P+
11,6	158,76	15,9	285,61	20,2	449,44	24,5	650,25	44,0	2 025,00
11,7	161,29	16,0	289,00	20,3	453,69	24,6	655,36	44,5	2 070,25
11,8	163,84	16,1	292,41	20,4	457,96	24,7	660,49	45,0	2 116,00
11,9	166,41	16,2	295,84	20,5	462,25	24,8	665,64	45,5	2 162,25
12,0	169,00	16,3	299,29	20,6	466,56	24,9	670,81	46,0	2 209,00
12,1	171,61	16,4	302,76	20,7	470,89	25,0	676,00	46,5	2 256,25
12,2	174,24	16,5	306,25	20,8	475,24	25,5	702,25	47,0	2 304,00
12,3	176,89	16,6	309,76	20,9	479,61	26,0	729,00	47,5	2 352,25
12,4	179,56	16,7	313,29	21,0	484,00	26,5	756,25	48,0	2 401,00
12,5	182,25	16,8	316,84	21,1	488,41	27,0	784,00	48,5	2 450,25
12,6	184,96	16,9	320,41	21,2	492,84	27,5	812,25	49,0	2 500,00
12,7	187,69	17,0	324,00	21,3	497,29	28,0	841,00	49,5	2 550,25
12,8	190,44	17,1	327,61	21,4	501,76	28,5	870,25	50,0	2 601,00
12,9	193,21	17,2	331,24	21,5	506,25	29,0	900,00	51,0	2 704,00
13,0	196,00	17,3	334,89	21,6	510,76	29,5	930,25	52,0	2 809,00
13,1	198,81	17,4	338,56	21,7	515,29	30,0	961,00	53,0	2 916,00
13,2	201,64	17,5	342,25	21,8	519,84	30,5	992,25	54,0	3 025,00
13,3	204,49	17,6	345,96	21,9	524,41	31,0	1 024,00	55,0	3 136,00
13,4	207,36	17,7	349,69	22,0	529,00	31,5	1 056,25	56,0	3 249,00
13,5	210,25	17,8	353,44	22,1	533,61	32,0	1 089,00	57,0	3 364,00
13,6	213,16	17,9	357,21	22,2	538,24	32,5	1 122,25	58,0	3 481,00
13,7	216,09	18,0	361,00	22,3	542,89	33,0	1 156,00	59,0	3 600,00
13,8	219,04	18,1	364,81	22,4	547,56	33,5	1 190,25	60,0	3 721,00
13,9	222,01	18,2	368,64	22,5	552,25	34,0	1 225,00	61,0	3 844,00
14,0	225,00	18,3	372,49	22,6	556,96	34,5	1 260,25	62,0	3 969,00
14,1	228,01	18,4	376,36	22,7	561,69	35,0	1 296,00	63,0	4 096,00
14,2	231,04	18,5	380,25	22,8	566,44	35,5	1 332,25	64,0	4 225,00
14,3	234,09	18,6	384,16	22,9	571,21	36,0	1 369,00	65,0	4 356,00
14,4	237,16	18,7	388,09	23,0	576,00	36,5	1 406,25	66,0	4 489,00
14,5	240,25	18,8	392,04	23,1	580,81	37,0	1 444,00	67,0	4 624,00
14,6	243,36	18,9	396,01	23,2	585,64	37,5	1 482,25	68,0	4 761,00
14,7	246,49	19,0	400,00	23,3	590,49	38,0	1 521,00	69,0	4 900,00
14,8	249,64	19,1	404,01	23,4	595,36	38,5	1 560,25	70,0	5 041,00
14,9	252,81	19,2	408,04	23,5	600,25	39,0	1 600,00	71,0	5 184,00
15,0	256,00	19,3	412,09	24,6	605,16	39,5	1 640,25	72,0	5 329,00
15,1	259,21	19,4	416,16	23,7	610,09	40,0	1 681,00	73,0	5 476,00
15,2	262,44	19,5	420,25	24,8	615,04	40,5	1 722,25	74,0	5 625,00
15,3	265,69	19,6	424,36	23,9	620,01	41,0	1 764,00	75,0	5 776,00
15,4	268,96	19,7	428,49	24,0	625,00	41,5	1 806,25	76,0	5 929,00
15,5	272,25	19,8	432,64	24,1	630,01	42,0	1 849,00	77,0	6 084,00
15,6	275,56	19,9	436,81	24,2	635,04	42,5	1 892,25	78,0	6 241,00
15,7	278,89	20,0	441,00	24,3	640,09	43,0	1 936,00	79,0	6 400,00
15,8	282,24	20,1	445,21	24,4	645,16	43,5	1 980,25	80,0	6 561,00

Неточность при замере. Во всех таблицах и диаграммах, приводимых в настоящей главе, степень неточности при замере газов (в процентах) определяется следующим уравнением:

$$\text{Процент погрешности} = \frac{(\text{объем по показанию счетчика} - \text{действительный объем}) \times 100}{\text{действительный объем}}.$$

Такое определение ошибки применяется при физических замерах, однако имеет далеко не повсеместное применение. По целому ряду практических соображений более удобным представляется следующее определение ошибки при замере:

$$\text{Процент погрешности} = \frac{(\text{объем по показанию счетчика} - \text{действительный объем}) \times 100}{\text{объем по показанию счетчика}}.$$

Первое уравнение служит для определения процента ошибки к точному отсчету (действительному отсчету); при помощи второго уравнения определяется процент ошибки к отсчету по счетчику.

Процент ошибки, вычисленный при помощи второго уравнения, можно использовать для определения всей ошибки по счетчику. Процент ошибки, вычисленный по первому уравнению, следует перевести в процент, вычисляемый по второму, и только тогда им можно пользоваться применительно к показаниям счетчика.

Второй способ определения ошибки применяется в материалах и таблицах, публикуемых компаниями, производящими счетчики, и рекомендуется бюро стандартов США.

Однако в этой главе применяется первый способ как более распространенный.

Испытание счетчика. Поправка на показание счетчика определяется как отношение объема по показанию счетчика к действительному.

$$\text{Поправка на показание счетчика} = \frac{\text{объем по показанию счетчика}}{\text{действительный объем}}.$$

Пропускная способность счетчика. а) *Пропускная способность счетчика по воздуху.* Пропускная способность счетчика определяется как объемное количество воздуха, которое хорошо отрегулированный счетчик может пропустить и показать в течение 1 часа, когда потеря давления между впускным и выпускным отверстиями счетчика остается постоянной и равняется 12,7 *мм* водяного столба.

б) *Пропускная способность счетчика по газу.* Она определяется объемным количеством газа (не воздуха), которое хорошо выверенный счетчик может пропустить и показать в течение 1 часа, когда потеря давления между впускным и выпускным отверстиями счетчика остается постоянной и равняется 12,7 *мм* водяного столба.

в) *Отношение между пропускной способностью счетчика по воздуху и по газу.* На практике пропускная способность счетчика на газ определяется по его пропускной способности на воздух при помощи следующего уравнения:

Пропускная способность счетчика по газу = пропускной способности по воздуху $\times$

$$\times \sqrt{\frac{1}{\text{уд. вес газа}}}.$$

г) *Обозначение пропускной способности счетчика.* Пропускная способность счетчика указывается на передней стенке корпуса счетчика. Она принимается в 1,25 раза большей, чем пропускная способность счетчика по воздуху (это соответствует пропускной способности счетчика на газ с удельным весом 0,64).

Такой способ определения и обозначения пропускной способности счетчика введен Американской газовой ассоциацией в 1922 г. и теперь принят в Америке повсюду.

В настоящее время почти повсеместно в практике отпуска газа принято применять счетчики большой пропускной способности, превышающей приведенную выше „официальную" пропускную способность. Пределом является такая пропускная способность, при которой наибольшая потеря давления равна 50,8 *мм* водяного столба и имеет место при прохождении газа через счетчик, когда он работает при давлении, близком к атмосферному.

В приводимых в этой главе таблицах замеров мы исходим из величин потери давления в 12,7 *мм* ($^1/_2$″) и 50,8 *мм* (2″).

РАСЧЕТ СЧЕТЧИКОВ

Условные обозначения и физические константы

D — диаметр трубы в *мм*;
d — диаметр отверстия в *мм*;
$\beta = \frac{d}{D}$;
k — коэфициент истечения (см. табл. 27);
E — „ „ в счетчиках с фланцевым соединением;
C_v — „ „ „ „ „ трубным „ ;
C_a — стандартный коэфициент часового расхода в $м^3$ воздуха в час при температуре в 15,56° С и при давлении в 1,035 *ат*;

g — ускорение силы тяжести в *м/сек²*, по международному стандарту 9,81 *м/сек²*;
G — удельный вес газа (вес воздуха равен единице);
G_f — удельный вес движущейся жидкости (вес воды равен единице при 15,56° С);
G_b — удельный вес жидкости при стандартной температуре или при температуре в хранилище;
G_m — удельный вес жидкости над уровнем ртути в манометре;
G_{Hg} — удельный вес ртути;
h_v — дифференциальное давление, выраженное в метрах однородного столба протекающей жидкости;
h — соответствующая высота водяного столба в *мм*;
h_{Hg} — разность давления в *мм* ртутного столба; над ртутью вода;
h_m — дифференциальное давление ртутного столба под водой;
γ_a — плотность воздуха (принимается как 1,225 при температуре в 15,56° С и давлении в 1,035 *ат*) в *кг/м³*;
γ — плотность движущейся жидкости в *кг/м³*;
γ_m — эффективная плотность жидкости, применяемой в манометре, в *кг/м³*;
γ_w — плотность воды (принимаемая 999,013 *кг/м³* при 15,56° С) в *кг/м³*;
γ_s — плотность сухого насыщенного пара в *кг/м³*;
P_f — абсолютное давление движущейся жидкости в *кг/см²*;
P_s — стандартное давление (или давление, оговоренное в контракте о поставке), при котором замеряется отпускаемый газ, в *кг/см²*;
Q — расход газа в *м³/час* при абсолютном давлении в 1,035 *ат* и при температуре в 15,56° С;
V — расход жидкости в *м³/час* в данных условиях движения;
V_q — расход жидкости в *л/час* при данных условиях;
V_h — расход жидкости в *л/час* при стандартной температуре или температуре хранилища;
V_b — расход жидкости в *м³/час* при стандартной температуре или температуре хранилища;
W — вес пара, проходящего в единицу времени, в *кг/час*;
S_1 — скорость движения жидкости до диафрагмы в *м/сек*;
S_2 — скорость движения жидкости после диафрагмы в *м/сек*;
T_f — абсолютная температура движущегося потока в °С абс.;
T_s — стандартная температура (или оговоренная в контракте), при которой производится замер в °С абс.;
x — отношение дифференциального давления к статическому давлению потока до прохождения через диафрагму (оба давления в одном и том же измерении);
r — отношение давления за диафрагмой к давлению до диафрагмы $x = 1 - r$;
X — количество воды на количество сухого пара в *кг*.

Построение общих уравнений, применяемых к замеру любой жидкости с диафрагмами трубой Вентури или соплами-счетчиками

В этих счетчиках часть потенциальной энергии жидкости превращается в кинетическую. В теоретическом случае, когда предполагается отсутствие трения, превращение одной энергии в другую выражается следующей формулой (гидравлическая формула):

$$S_2^2 - S_1^2 = 2gh_v. \qquad (1)$$

Выражая дифференциальное давление в миллиметрах водяного столба, получаем:

$$S_2^2 - S_1^2 = \frac{2g\gamma_w h}{1000\gamma}. \qquad (2)$$

В отдельном случае, когда кран для измерения давления за диафрагмой расположен над отверстием:

$$S_1 = S_2\frac{d^2}{D^2} = S_2\beta^2; \qquad (3)$$

$$S_2^2\,(1 - \beta^4) = \frac{2g\gamma_w h}{1000\gamma}; \qquad (4)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{2g\gamma_w h}{1000\gamma(1 - \beta^4)}}.$$

Перемножая уравнение на время и площадь сечения, чтобы получить объем, и подставляя числовые значения вместо g и γ_w, получаем следующее уравнение:

$$V = \frac{\pi d^2 \cdot 3600}{1000^2 \cdot 4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 997{,}92 \cdot h}{1000 \cdot \gamma\,(1-\beta^4)}};$$

$$V = 0{,}012546 \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot d^2 \sqrt{\frac{h}{\gamma}}. \qquad (5)$$

Уравнение (5) построено в предположении, что при переходе энергии из потенциальной в кинетическую не происходит потери энергии и что площадь живого сечения струи в месте сжатия за диафрагмой равняется площади живого сечения самого отверстия. Так как ни одно из этих предположений нельзя считать соответствующим действительности, то в практике замеров приходится вводить поправочный коэфициент k.

Тогда получаем следующее уравнение:

$$V = 0{,}012546 \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot d^2 \sqrt{\frac{h}{\gamma}}. \qquad (6)$$

Это уравнение применимо при всех случаях прохождения жидкости через сопла, диафрагмы и трубки „Вентури"; оно годится также при любом расположении кранов для измерения давления, если только выбран подходящий коэфициент k.

Уравнения, применимые к замеру газов

Имея в виду, что газы подчиняются закснам Boyle и Charles, можно пользоваться следующими уравнениями:

$$\gamma = \gamma_a\, G \frac{P_f}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_f}; \qquad \gamma = 341{,}61\, G \frac{P_f}{T_f}; \qquad V = \frac{QP_sT_f}{P_fT_s}.$$

Подставляя числовые значения вместо γ и V в уравнение (6), получаем следующую формулу расхода жидкости:

$$Q = 0{,}0006762 \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot d^2 \frac{\sqrt{T_s}}{P_s} \sqrt{\frac{T_s}{T_f}} \frac{1}{\sqrt{G}} \sqrt{P_f h}. \qquad (7)$$

Принимая, что $C_a = 0{,}0006762 \frac{kd^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\sqrt{T_s}}{P_s}$, (8)

получаем следующее уравнение[1]

$$Q = C_a \sqrt{\frac{1}{G}} \sqrt{\frac{T_s}{T_f}} \sqrt{P_f h}. \qquad (9)$$

Коэфициент истечения k в счетчиках с диафрагмами и соплами

Замер газа. При замере газа числовое значение коэфициента истечения k (по уравнению (7) для газов), определяемое экспериментально, зависит от следующих факторов: 1) от расположения штуцеров для снятия давления; 2) от формы отверстия в диафрагме или сопле; 3) от того, замеряется ли статическое давление до диафрагмы или после; 4) от скорости движения жидкости и 5) от величины β.

Поэтому, когда пользуются коэфициентами, опубликованными в литературе, необходимо знать те условия движения потока жидкости или газа и условия замера, к которым применяется коэфициент.

[1] В табл. 45 значение коэфициента C_a по подлиннику представлено в виде

$$C_a = 0{,}0009037 \frac{C_v \cdot d_a^2 \sqrt{T_s}}{P_s}.$$

В соответствии с этим

$$Q = 0{,}7483\, C_a \sqrt{\frac{1}{G}} \sqrt{\frac{T_s}{T_f}} \sqrt{P_f h},$$

и произведение $0{,}0009037 \cdot 0{,}7483 = 0{,}0006762$.

В табл. 27 приводятся уравнения, при помощи которых определяются коэфициенты истечения воздуха или газа в диафрагменных счетчиках, и указаны те условия, к которым они применимы.

Наиболее применимы: коэфициент E, введенный и применяемый в Foxboro Meter и Co и коэфициент C_v, введенный Metric Meter Co.

Эти коэфициенты являются функцией $\frac{d}{D} = \beta$; полагают, что они не зависят от скорости потока. В действительности, коэфициент истечения газа претерпевает изменения с изменением скорости потока. Однако E и C_v можно применять, не рискуя ошибиться более чем на 1%, если $\frac{h}{P_f} < 1$. При $\frac{h}{P_f} > 1$ точность замера увеличивается, если вместо статического давления P_f применять среднее давление до и после диафрагмы.

Коэфициенты истечения для диафрагменных счетчиков приводятся в табл. 28—43. Эти коэфициенты можно применять для замера воздуха при очень большой разности давлений; ими можно пользоваться также для замера газа с достаточно большой разностью давлений. Если перепад так высок, что $r < 0{,}9$, то происходят ошибки в применении этих коэфициентов в связи с различиями в физических свойствах газа и воздуха (например теплоемкость).

Эти коэфициенты, введенные Бюро стандартов, являются, по всей вероятности, наиболее надежными для применения к диафрагменным счетчикам, чем всякие другие.

Замер жидкостей. Величина коэфициента истечения k для невязких жидкостей соответствует величине этого коэфициента для газа при малом отношении перепада к статическому давлению. Так, например, величина k для жидкостей весьма близко подходит к коэфициентам истечения воздуха, приводимым Бюро стандартов при $r = 1$. Эти последние коэфициенты в действительности так же хороши, как и всякие другие, для замера жидкостей. Стандартные коэфициенты часового расхода жидкостей C_w для замера жидкостей, проходящих через счетчик с фланцевым соединением, приводимые в табл. 54, составлены на основе величины E для жидкостей, опубликованных Foxboro Meter Co. Соответствующие коэфициенты для счетчиков с трубным соединением имеются в табл. 56 и основаны на величинах C_1' данных Бюро стандартов, приводимых в табл. 42.

Коэфициент истечения k для сопел и счетчиков Вентури

Коэфициенты истечения для сопел и счетчиков Вентури приводятся на фиг. 36, 37 и 38 на стр. 129—130. Этими коэфициентами можно пользоваться как при замере газов, так и при замере жидкостей и их можно подставлять вместо k в любое уравнение счетчиков с диафрагмами.

Если давление, обусловленное в договоре о поставке (P_s), меньше атмосферного, то для получения величин C_a (см. табл. 45 и 46 на стр. 131—133), соответствующих предусмотренному договором давлению, вводятся поправочные коэфициенты (множители), приводимые в табл. 44.

Пользуясь приведенной ниже формулой, коэфициенты часового расхода газа C_a можно перевести с атмосферного давления к любому стандартному давлению, предусмотренному договором. Поправочный коэфициент (множитель) выводится по следующей формуле:

$$\text{Коэфициент} = \frac{\text{атмосферное давление} = 1{,}035\ кг/см^2}{\text{давление по договору в } кг/см^2}.$$

Номограммы для вычисления пропускной способности счетчиков

Приводимые на стр. 142 и 143 номограммы (фиг. 39 и 40), рассчитаны на быстрое вычисление максимальной пропускной способности счетчика, но ими нельзя пользоваться для подсчета расхода в том случае, если требуется высокая точность.

Чтобы показать, как пользоваться этими номограммами, приведем два примера.

Пример 1. 10-дюймовый счетчик снабжен диференциальным манометром на 1270 *мм* и 4-дюймовой диафрагмой. Счетчик — с трубным соединением. Вычислить наибольшее количество газа, которое можно пропустить через этот счетчик, если статическое давление по манометру составляет 14,06 $кг/см^2$ (15,086 $кг/см^2$ абс.)

Коэфициенты истечения воздуха в диафрагменных счетчиках

Таблица 27

Как коэфициент введен	Условное обозначение величин	Значение величин по уравнению (7)	Уравнение для определения числовых величин	Расстояние от штуцера давления до лицевой стороны шайбы: до диафрагмы	Расстояние от штуцера давления до лицевой стороны шайбы: после диафрагмы	Где измеряется статическое давление	Ссылка на таблицу
Коэфициенты истечения, разработанные Foxboro Meter Co, для счетчиков с фланцевым соединением	E	$E = \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}}$	$E = 0{,}606 + 1{,}25(\beta - 0{,}41)^2$ $E = 0{,}606$, когда $\beta = 0{,}41$	1″	1″	Штуцер после диафрагмы	28
Коэфициенты истечения, разработанные Metric Meter Co, для счетчиков с трубным соединением	C_v	$C_v = \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}}$	$C_v = 0{,}589 + 0{,}272\,\beta - 0{,}825\,\beta^2 + 1{,}75\,\beta^3$	2½ диам.	8 диам.	» до »	29
Коэфициенты истечения, разработанные Американским бюро стандартов, для счетчиков с присоединением к горловине	C_1	$C_1 = k$	$C_1 = 0{,}5970 + 0{,}09\,\beta^4 - 0{,}115\,(x + x^3)(1 + 1{,}5\,\beta^4)$	1 »	½ »	» до »	30
	C_2	$C_2 = k$	$C_2 = C_1\sqrt{\frac{1}{1-x}}$	1 »	½ »	» после »	31
	C_1'	$C_1' = \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}}$	$C_1' = \frac{C_1}{\sqrt{1-\beta^4}}$	1 »	½ »	» до »	32
	C_2'	$C_2' = \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}}$	$C_2' = \frac{C_2}{\sqrt{1-\beta^4}}$	1 »	½ »	» после »	33
	C_m	$C_m = k$	$C_m = C_1\sqrt{\frac{2}{2-x}}$	1 »	½ »	Давление среднее между давлением до и давлением после диафрагмы	34

Коэфициенты истечения, разработанные Американским бюро стандартов, для счетчиков с фланцевым соединением	C_1	$C_1 = k$	$C_1 = 0{,}5970 + 0{,}12\,\beta^4 - 0{,}6\,\beta^{12} - 0{,}115\,(x + x^2)\,(1 + 1{,}5\,\beta^4)$	1″	1″	Штуцер до диафрагмы	35
	C_2	$C_2 = k$	$C_2 = C_1\sqrt{\frac{1}{1-x}}$	1″	1″	» после »	36
	C_1'	$C_1' = \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}}$	$C_1' = \frac{C_1}{\sqrt{1-\beta^4}}$	1″	1″	» до »	37
	C_2'	$C_2' = \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}}$	$C_2' = \frac{C_2}{\sqrt{1-\beta^4}}$	1″	1″	» после »	38
	C_m	$C_m = k$	$C_m = C_1\sqrt{\frac{2}{2-x}}$	1″	1″	Для P_f — давление среднее между давлением до и после диафрагмы	39
Коэфициенты истечения, разработанные Американским бюро стандартов, для счетчиков с трубным соединением	C_1	$C_1 = k$	$C_1 = 0{,}5970 + 0{,}006\,\beta + 0{,}54\,\beta^{2{,}3} + \beta^3 x^8 - 0{,}115\,(x + x^6)\,(1 + 11\,\beta^8)$	$2^1/_2$ диам.	8 диам.	Штуцер до диафрагмы	40
	C_2	$C_2 = k$	$C_2 = C_1\frac{1}{1-x}$	$2^1/_2$ »	8 »	» после »	41
	C_1'	$C_1' = \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}}$	$C_1' = \frac{C_1}{\sqrt{1-\beta^4}}$	$2^1/_2$ »	8 »	» до »	42
	C_2'	$C_2' = \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}}$	$C_2' = \frac{C_2}{\sqrt{1-\beta^4}}$	$2^1/_2$ »	8 »	» после »	43

Примечание. Каждый из приведенных выше коэфициентов можно подставить в уравнение (7) при условии установки диафрагмы концентрично с трубой; при этом отверстие должно иметь со стороны потока газа острые прямоугольные кромки, и толщина горла должна быть менее $^1/_8$ диаметра.

Коэфициенты истечения газа в счетчиках с диафрагмами при фланцевом соединении

Таблица значений E для газов

$$E = \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} = 0{,}606 + 1{,}25\,(\beta - 0{,}41)^2$$

$E = 0{,}606$, когда $\beta \leq 0{,}41$

β	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,41	0,6060	0,6060	0,6060	0,6060	0,6060	0,6006	0,6060	0,6061	0,6061	0,6061
0,42	0,6061	0,6062	0,6062	0,6062	0,6062	0,6063	0,6063	0,6064	0,6064	0,6064
0,43	0,6065	0,6065	0,6066	0,6067	0,6067	0,6068	0,6068	0,6069	0,6070	0,6071
0,44	0,6071	0,6072	0,6073	0,6074	0,6075	0,6075	0,6076	0,6077	0,6078	0,6079
0,45	0,6080	0,6081	0,6082	0,6083	0,6084	0,6085	0,6086	0,6088	0,6089	0,6090
0,46	0,6091	0,6092	0,6094	0,6095	0,6096	0,6098	0,6099	0,6101	0,6102	0,6104
0,47	0,6105	0,6106	0,6108	0,6110	0,6111	0,6113	0,6114	0,6116	0,6118	0,6120
0,48	0,6121	0,6123	0,6125	0,6127	0,6128	0,6130	0,6132	0,6134	0,6136	0,6138
0,49	0,6140	0,6142	0,6144	0,6146	0,6148	0,6150	0,6152	0,6155	0,6157	0,6159
0,50	0,6161	0,6164	0,6166	0,6168	0,6170	0,6173	0,6175	0,6178	0,6180	0,6182
0,51	0,6185	0,6188	0,6190	0,6193	0,6195	0,6198	0,6200	0,6203	0,6206	0,6208
0,52	0,6211	0,6214	0,6217	0,6220	0,6222	0,6225	0,6228	0,6231	0,6234	0,6237
0,53	0,6240	0,6243	0,6246	0,6249	0,6252	0,6255	0,6258	0,6262	0,6265	0,6268
0,54	0,6271	0,6274	0,6278	0,6281	0,6284	0,6288	0,6291	0,6295	0,6298	0,6302
0,55	0,6305	0,6308	0,6312	0,6316	0,6319	0,6323	0,6326	0,6330	0,6334	0,6338
0,56	0,6341	0,6345	0,6349	0,6353	0,6356	0,6360	0,6364	0,6368	0,6372	0,6376
0,57	0,6380	0,6384	0,6388	0,6392	0,6396	0,6400	0,6404	0,6409	0,6413	0,6417
0,58	0,6421	0,6426	0,6430	0,6434	0,6438	0,6443	0,6447	0,6452	0,6456	0,6460
0,59	0,6465	0,6470	0,6474	0,6479	0,6483	0,6488	0,6492	0,6497	0,6502	0,6506
0,60	0,6511	0,6516	0,6521	0,6526	0,6530	0,6535	0,6540	0,6545	0,6550	0,6555
0,61	0,6560	0,6565	0,6570	0,6575	0,6580	0,6585	0,6590	0,6596	0,6601	0,6606
0,62	0,6611	0,6616	0,6622	0,6627	0,6632	0,6638	0,6643	0,6649	0,6654	0,6660
0,63	0,6665	0,6670	0,6676	0,6682	0,6687	0,6693	0,6698	0,6704	0,6710	0,6716
0,64	0,6721	0,6727	0,6733	0,6739	0,6744	0,6750	0,6756	0,6762	0,6778	0,6774
0,65	0,6780	0,6786	0,6792	0,6798	0,6804	0,6810	0,6816	0,6823	0,6829	0,6835
0,66	0,6841	0,6848	0,6854	0,6860	0,6866	0,6873	0,6879	0,6886	0,6892	0,6898
0,67	0,6905	0,6912	0,6918	0,6925	0,6931	0,6938	0,6944	0,6951	0,6958	0,6964
0,68	0,6971	0,6978	0,6985	0,6992	0,6998	0,7005	0,7012	0,7019	0,7026	0,7033
0,69	0,7040	0,7047	0,7054	0,7061	0,7068	0,7075	0,7082	0,7090	0,7097	0,7104
0,70	0,7111	0,7118	0,7126	0,7133	0,7140	0,7148	0,7155	0,7163	0,7170	0,7178
0,71	0,7185	0,7192	0,7200	0,7208	0,7215	0,7223	0,7230	0,7238	0,7246	0,7254
0,72	0,7261	0,7269	0,7277	0,7285	0,7292	0,7300	0,7308	0,7316	0,7324	0,7332
0,73	0,7340	0,7348	0,7356	0,7364	0,7372	0,7380	0,7388	0,7397	0,7405	0,7413
0,74	0,7421	0,7430	0,7438	0,7446	0,7454	0,7463	0,7471	0,7480	0,7488	0,7496
0,75	0,7505	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Коэфициенты истечения газа в счетчиках с трубными соединениями

Таблица значений C_v для газов

$$C_v = \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} = 0{,}589 + 0{,}272\beta - 0{,}825\beta^2 + 1{,}75\beta^3$$

(Условия, к которым применимы коэфициенты, приводятся в табл. 27)

β	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,15	0,6175	0,6176	0,6178	0,6179	0,6180	0,6182	0,6183	0,6185	0,6186	0,6188
0,16	0,6189	0,6190	0,6192	0,6193	0,6195	0,6196	0,6198	0,6199	0,6200	0,6202
0,17	0,6203	0,6205	0,6206	0,6208	0,6209	0,6210	0,6212	0,6213	0,6215	0,6216
0,18	0,6218	0,6219	0,6221	0,6222	0,6224	0,6225	0,6226	0,6228	0,6230	0,6231
0,19	0,6232	0,6234	0,6235	0,6237	0,6238	0,6240	0,6241	0,6243	0,6244	0,6246
0,20	0,6248	0,6249	0,6250	0,6252	0,6254	0,6255	0,6257	0,6258	0,6260	0,6261
0,21	0,6263	0,6264	0,6266	0,6268	0,6269	0,6271	0,6272	0,6274	0,6276	0,6277
0,22	0,6279	0,6281	0,6282	0,6284	0,6286	0,6287	0,6289	0,6291	0,6292	0,6294
0,23	0,6296	0,6297	0,6299	0,6301	0,6303	0,6304	0,6306	0,6308	0,6310	0,6311
0,24	0,6313	0,6315	0,6317	0,6319	0,6320	0,6322	0,6324	0,6326	0,6328	0,6330
0,25	0,6332	0,6333	0,6335	0,6337	0,6338	0,6341	0,6343	0,6345	0,6347	0,6349
0,26	0,6351	0,6353	0,6355	0,6357	0,6359	0,6361	0,6363	0,6365	0,6367	0,6369
0,27	0,6371	0,6373	0,6375	0,6378	0,6380	0,6382	0,6384	0,6386	0,6388	0,6391
0,28	0,6393	0,6395	0,6397	0,6400	0,6402	0,6404	0,6406	0,6409	0,6411	0,6413
0,29	0,6416	0,6418	0,6420	0,6423	0,6425	0,6428	0,6430	0,6432	0,6435	0,6438
0,30	0,6440	0,6442	0,6445	0,6448	0,6450	0,6453	0,6455	0,6458	0,6460	0,6463
0,31	0,6466	0,6468	0,6471	0,6474	0,6476	0,6479	0,6482	0,6485	0,6488	0,6490
0,32	0,6493	0,6496	0,6499	0,6502	0,6504	0,6507	0,6510	0,6513	0,6516	0,6519
0,33	0,6522	0,6525	0,6528	0,6531	0,6534	0,6537	0,6540	0,6544	0,6547	0,6550
0,34	0,6553	0,6556	0,6560	0,6563	0,6566	0,6569	0,6572	0,6576	0,6579	0,6582
0,35	0,6586	0,6589	0,6593	0,6596	0,6600	0,6603	0,6607	0,6610	0,6614	0,6617
0,36	0,6621	0,6624	0,6628	0,6632	0,6635	0,6639	0,6643	0,6646	0,6650	0,6654
0,37	0,6658	0,6662	0,6665	0,6669	0,6673	0,6677	0,6681	0,6685	0,6689	0,6693
0,38	0,6697	0,6701	0,6705	0,6709	0,6713	0,6717	0,6722	0,6726	0,6730	0,6734
0,39	0,6738	0,6743	0,6747	0,6751	0,6756	0,6760	0,6765	0,6769	0,6774	0,6780
0,40	0,6782	0,6787	0,6792	0,6796	0,6801	0,6805	0,6810	0,6815	0,6820	0,6824
0,41	0,6829	0,6834	0,6839	0,6844	0,6848	0,6853	0,6858	0,6863	0,6868	0,6873
0,42	0,6878	0,6883	0,6888	0,6894	0,6899	0,6904	0,6909	0,6914	0,6920	0,6925
0,43	0,6930	0,6936	0,6941	0,6946	0,6952	0,6957	0,6963	0,6968	0,6974	0,6979
0,44	0,6985	0,6991	0,6996	0,7002	0,7008	0,7014	0,7019	0,7025	0,7031	0,7037
0,45	0,7043	0,7049	0,7055	0,7061	0,7067	0,7073	0,7079	0,7085	0,7091	0,7097
0,46	0,7104	0,7110	0,7116	0,7122	0,7129	0,7135	0,7142	0,7148	0,7155	0,7161
0,47	0,7168	0,7174	0,7181	0,7188	0,7194	0,7201	0,7208	0,7214	0,7221	0,7228
0,48	0,7235	0,7242	0,7249	0,7256	0,7263	0,7270	0,7277	0,7284	0,7291	0,7298
0,49	0,7306	0,7313	0,7320	0,7328	0,7335	0,7342	0,7350	0,7357	0,7365	0,7372
0,50	0,7380	0,7388	0,7395	0,7403	0,7411	0,7418	0,7426	0,7434	0,7442	0,7450
0,51	0,7458	0,7466	0,7474	0,7482	0,7490	0,7498	0,7506	0,7514	0,7523	0,7531
0,52	0,7539	0,7548	0,7556	0,7564	0,7573	0,7582	0,7590	0,7599	0,7607	0,7616
0,53	0,7625	0,7633	0,7642	0,7651	0,7660	0,7669	0,7678	0,7687	0,7696	0,7705
0,54	0,7714	0,7723	0,7732	0,7741	0,7751	0,7760	0,7769	0,7779	0,7788	0,7798

Продолжение табл. 29

β	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,55	0,7807	0,7817	0,7826	0,7836	0,7846	0,7855	0,7865	0,7875	0,7885	0,7895
0,56	0,7904	0,7914	0,7924	0,7935	0,7945	0,7955	0,7965	0,7975	0,7986	0,7996
0,57	0,8006	0,8017	0,8027	0,8038	0,8048	0,8059	0,8069	0,8080	0,8091	0,8101
0,58	0,8112	0,8123	0,8134	0,8145	0,8156	0,8167	0,8178	0,8189	0,8200	0,8211
0,59	0,8222	0,8234	0,8245	0,8256	0,8268	0,8279	0,8191	0,8302	0,8314	0,8326
0,60	0,8338	0,8349	0,8361	0,8373	0,8385	0,8397	0,8409	0,8421	0,8433	0,8445
0,61	0,8457	0,8469	0,8482	0,8494	0,8506	0,8519	0,8531	0,8544	0,8556	0,8569
0,62	0,8581	0,8594	0,8607	0,8620	0,8632	0,8645	0,8658	0,8671	0,8684	0,8698
0,63	0,8711	0,8724	0,8737	0,8750	0,8764	0,8777	0,8790	0,8804	0,8818	0,8831
0,64	0,8845	0,8858	0,8872	0,8886	0,8900	0,8914	0,8928	0,8942	0,8956	0,8970
0,65	0,8984	0,8998	0,9012	0,9027	0,9041	0,9056	0,9070	0,9085	0,9099	0,9114
0,66	0,9128	0,9143	0,9158	0,9173	0,9198	0,9203	0,9218	0,9233	0,9248	0,9263
0,67	0,9278	0,9293	0,9309	0,9324	0,9340	0,9355	0,9370	0,9386	0,9402	0,9418
0,68	0,9433	0,9449	0,9465	0,9481	0,9497	0,9513	0,9529	0,9545	0,9561	0,9578
0,69	0,9594	0,9610	0,9627	0,9643	0,9660	0,9676	0,9693	0,9710	0,9726	0,9743
0,70	0,9760	0,9777	0,9794	0,9811	0,9828	0,9845	0,9862	0,9880	0,9897	0,9914
0,71	0,9932	0,9949	0,9967	0,9984	1,0000	1,0020	1,0040	1,0050	1,0070	1,0090
0,72	1,0110	1,0130	1,0140	1,0160	1,0180	1,0200	1,0220	1,0240	1,0260	1,0270
0,73	1,0290	1,0310	1,0330	1,0350	1,0370	1,0390	1,0410	1,0420	1,0440	1,0460
0,74	1,0480	1,0500	1,0520	1,0540	1,0560	1,0580	1,0600	1,0620	1,0640	1,0660
0,75	1,0680	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 30

Присоединение в месте сужения

Значения C_1; гидравлический коэффициент истечения, отнесенный к статическому давлению, до диафрагмы, причем фактор приближения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$ не учтен[1]

$$C_1 = 0{,}5970 + 0{,}09\,\beta^4 - 0{,}115\,(x + x^2)(1 + 1{,}5\,\beta^4)$$

r	β = 0,0	β = 0,2	β = 0,3	β = 0,4	β = 0,5	β = 0,55	β = 0,6
1,00	0,597	0,597	0,598	0,599	0,602	0,605	0,609
0,95	0,591	0,591	0,592	0,593	0,596	0,598	0,601
0,90	0,584	0,584	0,585	0,586	0,589	0,591	0,593
0,85	0,577	0,577	0,578	0,579	0,581	0,583	0,585
0,80	0,569	0,569	0,570	0,571	0,572	0,574	—
0,75	0,561	0,561	0,561	0,562	0,563	—	—
0,70	0,552	0,552	0,552	0,553	—	—	—
0,65	0,543	0,543	0,543	0,543	—	—	—
0,60	0,533	0,533	0,533	—	—	—	—
0,55	0,522	0,522	—	—	—	—	—
0,50	0,511	0,511	—	—	—	—	—

[1] Данные табл. 30—41 взяты из Bur. Standards J. Research, vol. 2, 1929, Paper 49.

Таблица 31

Присоединение в месте сужения

Значения C_2; гидравлический коэфициент истечения относится к статическому давлению после диафрагмы, причем фактор приближения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$ не учтен

$$C_2 = C_1 \sqrt{\frac{1}{1-x}}$$

r	$\beta = 0{,}0$	$\beta = 0{,}2$	$\beta = 0{,}3$	$\beta = 0{,}4$	$\beta = 0{,}5$	$\beta = 0{,}55$	$\beta = 0{,}6$
1,00	0,597	0,597	0,598	0,599	0,603	0,605	0,609
0,95	0,606	0,606	0,607	0,608	0,611	0,614	0,617
0,90	0,616	0,616	0,617	0,618	0,621	0,623	0,626
0,85	0,626	0,626	0,627	0,628	0,630	0,632	0,634
0,80	0,637	0,637	0,637	0,638	0,640	0,642	—
0,75	0,648	0,648	0,648	0,649	0,650	—	—
0,70	0,660	0,660	0,660	0,661	—	—	—
0,65	0,673	0,673	0,673	0,673	—	—	—
0,60	0,688	0,688	0,688	—	—	—	—
0,55	0,704	0,704	—	—	—	—	—
0,50	0,722	0,722	—	—	—	—	—

Таблица 32

Присоединение в месте сужения

Значения C_1'; гидравлический коэфициент истечения относится к статическому давлению до диафрагмы с учетом множителя $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$C_1' = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

r	$\beta = 0{,}0$	$\beta = 0{,}2$	$\beta = 0{,}3$	$\beta = 0{,}4$	$\beta = 0{,}5$	$\beta = 0{,}55$	$\beta = 0{,}6$
1,00	0,597	0,598	0,600	0,607	0,622	0,635	0,652
0,95	0,591	0,592	0,594	0,601	0,616	0,628	0,645
0,90	0,584	0,585	0,587	0,594	0,608	0,620	0,636
0,85	0,577	0,578	0,580	0,586	0,600	0,611	0,627
0,80	0,569	0,570	0,572	0,578	0,591	0,602	—
0,75	0,561	0,562	0,564	0,569	0,582	—	—
0,70	0,552	0,553	0,555	0,560	—	—	—
0,65	0,543	0,543	0,545	0,550	—	—	—
0,60	0,533	0,533	0,535	—	—	—	—
0,55	0,522	0,522	—	—	—	—	—
0,50	0,511	0,511	—	—	—	—	—

Таблица 33

Присоединение в месте сужения

Значения C_2': гидравлический коэффициент истечения определяется для статического давления после диафрагмы с введением фактора приближения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$.

$$C_2' = \frac{C_2}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

ε	$\beta=0{,}0$	$\beta=0{,}2$	$\beta=0{,}3$	$\beta=0{,}4$	$\beta=0{,}5$	$\beta=0{,}55$	$\beta=0{,}6$
1,00	0,597	0,598	0,600	0,607	0,622	0,635	0,652
0,95	0,606	0,607	0,609	0,616	0,631	0,644	0,661
0,90	0,616	0,617	0,619	0,626	0,641	0,653	0,671
0,85	0,626	0,627	0,629	0,636	0,651	0,663	0,680
0,80	0,637	0,637	0,640	0,646	0,661	0,673	—
0,75	0,648	0,648	0,651	0,657	0,672	—	—
0,70	0,660	0,661	0,663	0,669	—	—	—
0,65	0,673	0,674	0,676	0,682	—	—	—
0,60	0,688	0,688	0,690	—	—	—	—
0,55	0,704	0,704	—	—	—	—	—
0,50	0,722	0,723	—	—	—	—	—

Таблица 34

Присоединение в месте сужения

Значения C_m: средний гидравлический коэффициент истечения без множителя $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$C_m = C_1 \sqrt{\frac{2}{2-x}}$$

ε	$\beta=0{,}0$	$\beta=0{,}2$	$\beta=0{,}3$	$\beta=0{,}4$	$\beta=0{,}5$	$\beta=0{,}55$	$\beta=0{,}6$
1,00	0,597	0,597	0,598	0,599	0,603	0,605	0,609
0,95	0,599	0,599	0,599	0,601	0,604	0,606	0,609
0,90	0,600	0,600	0,600	0,601	0,604	0,606	0,609
0,85	0,600	0,600	0,601	0,602	0,604	0,606	0,609
0,80	0,600	0,600	0,601	0,602	0,603	0,605	—
0,75	0,600	0,600	0,600	0,601	0,602	—	—
0,70	0,599	0,599	0,599	0,599	—	—	—
0,65	0,597	0,597	0,597	0,598	—	—	—
0,60	0,595	0,595	0,595	—	—	—	—
0,55	0,593	0,593	—	—	—	—	—
0,50	0,590	0,590	—	—	—	—	—

Таблица 35

Фланцевое присоединение

Значения C_1; гидравлический коэфициент истечения для статического давления до диафрагмы без фактора приближения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$C_1 = 0{,}5970 + 0{,}12\,\beta^4 - 0{,}6\,\beta^{12} - 0{,}115\,(x + x^2)(1 + 1{,}5\,\beta^4)$$

r	$\beta = 0{,}0$	$\beta = 0{,}2$	$\beta = 0{,}3$	$\beta = 0{,}4$	$\beta = 0{,}5$	$\beta = 0{,}55$	$\beta = 0{,}6$
1,00	0,597	0,597	0,598	0,600	0,604	0,608	0,611
0,95	0,591	0,591	0,592	0,594	0,598	0,601	0,604
0,90	0,584	0,585	0,585	0,587	0,591	0,593	0,596
0,85	0,577	0,577	0,578	0,579	0,583	0,585	0,588
0,80	0,569	0,570	0,570	0,571	0,574	0,576	—
0,75	0,561	0,561	0,562	0,563	0,565	—	—
0,70	0,552	0,552	0,553	0,553	—	—	—
0,65	0,543	0,543	0,543	0,543	—	—	—
0,60	0,533	0,533	0,533	—	—	—	—
0,55	0,522	0,522	—	—	—	—	—
0,50	0,511	0,511	—	—	—	—	—

Таблица 36

Фланцевое присоединение

Значения C_2; гидравлический коэфициент истечения взят для статического давления после диафрагмы без фактора приближения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$C_2 = C_1 \sqrt{\frac{1}{1-x}}$$

r	$\beta = 0{,}0$	$\beta = 0{,}2$	$\beta = 0{,}3$	$\beta = 0{,}4$	$\beta = 0{,}5$	$\beta = 0{,}55$	$\beta = 0{,}6$
1,00	0,597	0,597	0,598	0,600	0,604	0,608	0,611
0,95	0,606	0,606	0,607	0,609	0,613	0,616	0,620
0,90	0,616	0,616	0,617	0,619	0,622	0,625	0,628
0,85	0,626	0,626	0,627	0,629	0,632	0,634	0,637
0,80	0,637	0,637	0,637	0,639	0,642	0,644	—
0,75	0,648	0,648	0,648	0,650	0,653	—	—
0,70	0,660	0,660	0,660	0,661	—	—	—
0,65	0,673	0,673	0,673	0,674	—	—	—
0,60	0,688	0,688	0,688	—	—	—	—
0,55	0,704	0,704	—	—	—	—	—
0,50	0,722	0,722	—	—	—	—	—

Таблица 37

Фланцевое присоединение

Значения C_1'; гидравлический коэффициент истечения взят для статического давления до диафрагмы с введением фактора приближения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$C_1' = \frac{C_1}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

r	$\beta = 0{,}0$	$\beta = 0{,}2$	$\beta = 0{,}3$	$\beta = 0{,}4$	$\beta = 0{,}5$	$\beta = 0{,}55$	$\beta = 0{,}6$
1,00	0,597	0,598	0,600	0,608	0,624	0,637	0,655
0,95	0,591	0,592	0,594	0,602	0,617	0,630	0,647
0,90	0,584	0,585	0,587	0,595	0,610	0,622	0,639
0,85	0,577	0,578	0,580	0,587	0,602	0,614	0,630
0,80	0,569	0,570	0,572	0,579	0,593	0,604	—
0,75	0,561	0,562	0,564	0,570	0,584	—	—
0,70	0,552	0,553	0,555	0,561	—	—	—
0,65	0,543	0,543	0,545	0,551	—	—	—
0,60	0,533	0,533	0,535	—	—	—	—
0,55	0,522	0,522	—	—	—	—	—
0,50	0,511	0,511	—	—	—	—	—

Таблица 38

Фланцевое присоединение

Значения C_2'; гидравлический коэффициент истечения взят для статического давления после диафрагмы с введением фактора приближения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$C_2' = \frac{C_2}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

r	$\beta = 0{,}0$	$\beta = 0{,}2$	$\beta = 0{,}3$	$\beta = 0{,}4$	$\beta = 0{,}5$	$\beta = 0{,}55$	$\beta = 0{,}6$
1,00	0,597	0,598	0,600	0,608	0,624	0,637	0,655
0,95	0,606	0,607	0,610	0,617	0,633	0,647	0,664
0,90	0,616	0,617	0,619	0,627	0,643	0,656	0,674
0,85	0,626	0,627	0,629	0,637	0,653	0,666	0,683
0,80	0,637	0,637	0,640	0,647	0,663	0,676	—
0,75	0,648	0,649	0,651	0,658	0,674	—	—
0,70	0,660	0,661	0,663	0,670	—	—	—
0,65	0,673	0,674	0,676	0,683	—	—	—
0,60	0,688	0,688	0,691	—	—	—	—
0,55	0,704	0,704	—	—	—	—	—
0,50	0,722	0,723	—	—	—	—	—

Таблица 39

Фланцевое присоединение

Значения C_m; средний гидравлический коэффициент истечения без фактора приближения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$C_m = C_1 \sqrt{\frac{2}{2-x}}$$

r	β = 0,0	β = 0,2	β = 0,3	β = 0,4	β = 0,5	β = 0,55	β = 0,6
1,00	0,597	0,597	0,598	0,600	0,604	0,607	0,611
0,95	0,599	0,599	0,599	0,601	0,605	0,608	0,612
0,90	0,600	0,600	0,600	0,602	0,606	0,609	0,612
0,85	0,600	0,600	0,601	0,602	0,606	0,608	0,611
0,80	0,600	0,600	0,601	0,602	0,605	0,607	—
0,75	0,600	0,600	0,600	0,602	0,604	—	—
0,70	0,599	0,599	0,599	0,600	—	—	—
0,65	0,597	0,598	0,598	0,598	—	—	—
0,60	0,595	0,595	0,596	—	—	—	—
0,55	0,593	0,593	—	—	—	—	—
0,50	0,590	0,590	—	—	—	—	—

Таблица 40

Трубное присоединение

Значения C_1; гидравлический коэффициент истечения взят, исходя из статического давления до диафрагмы, без фактора приближения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$C_1 = 0{,}5970 + 0{,}006\beta + 0{,}54\beta^{2{,}3} + \beta^3 x^2 - 0{,}115(x + x^2)\ (1 + 11\beta^3)$$

r	β = 0,0	β = 0,1	β = 0,2	β = 0,3	β = 0,35	β = 0,4	β = 0,45	β = 0,5	β = 0,55	β = 0,6
1,00	0,597	0,600	0,612	0,633	0,647	0,665	0,696	0,710	0,787	0,767
0,95	0,591	0,594	0,605	0,625	0,639	0,655	0,674	0,696	0,720	0,748
0,90	0,584	0,588	0,598	0,617	0,629	0,645	0,661	0,681	0,703	0,727
0,85	0,577	0,580	0,590	0,608	0,619	0,633	0,648	0,665	0,684	—
0,80	0,569	0,572	0,582	0,598	0,608	0,621	0,634	0,649	0,665	—
0,75	0,561	0,564	0,573	0,588	0,597	0,608	0,619	0,632	—	—
0,70	0,552	0,555	0,563	0,577	0,585	0,594	0,604	—	—	—
0,65	0,543	0,545	0,553	0,565	0,573	0,580	—	—	—	—
0,60	0,533	0,535	0,543	0,553	0,559	—	—	—	—	—
0,55	0,522	0,525	0,532	0,541	—	—	—	—	—	—
0,50	0,511	0,513	0,520	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 41

Трубное присоединение

Значения C_2; гидравлический коэфициент истечения взят, исходя из статического давления после диафрагмы, без фактора прибли жения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$C_2 = C_1 \sqrt{\frac{1}{1-x}}$$

r	β = 0,0	β = 0,1	β = 0,2	β = 0,3	β = 0,35	β = 0,4	β = 0,45	β = 0,5	β = 0,55	β = 0,6
1,00	0,597	0,600	0,612	0,633	0,647	0,665	0,686	0,710	0,737	0,767
0,95	0,606	0,610	0,621	0,641	0,655	0,672	0,691	0,714	0,739	0,767
0,90	0,616	0,619	0,630	0,650	0,663	0,679	0,697	0,718	0,741	0,766
0,85	0,626	0,629	0,640	0,659	0,672	0,686	0,703	0,722	0,743	—
0,80	0,637	0,640	0,650	0,669	0,680	0,694	0,709	0,726	0,744	—
0,75	0,648	0,651	0,662	0,679	0,690	0,702	0,715	—	—	—
0,70	0,660	0,663	0,674	0,690	0,700	0,710	0,722	—	—	—
0,65	0,673	0,677	0,686	0,701	0,710	0,720	—	—	—	—
0,60	0,688	0,691	0,701	0,715	0,722	—	—	—	—	—
0,55	0,704	0,707	0,717	0,729	—	—	—	—	—	—
0,50	0,722	0,726	0,735	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 42

Трубное присоединение

Значения C_1'; гидравлический коэфициент истечения взят, исходя из статического давления до диафрагмы, с фактором прибли жения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$C_1' = \frac{C_1}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

r	β = 0,0	β = 0,1	β = 0,2	β = 0,3	β = 0,35	β = 0,4	β = 0,45	β = 0,5	β = 0,55	β = 0,6
1,00	0,597	0,600	0,612	0,635	0,652	0,674	0,700	0,733	0,765	0,822
0,95	0,591	0,594	0,605	0,627	0,643	0,663	0,688	0,718	0,748	0,801
0,90	0,584	0,588	0,598	0,619	0,634	0,653	0,675	0,703	0,730	0,779
0,85	0,577	0,580	0,591	0,610	0,624	0,641	0,662	0,687	0,711	—
0,80	0,569	0,572	0,582	0,600	0,613	0,629	0,648	0,670	0,691	—
0,75	0,561	0,564	0,573	0,590	0,602	0,616	0,633	0,653	—	—
0,70	0,552	0,555	0,564	0,579	0,590	0,602	0,617	—	—	—
0,65	0,543	0,546	0,554	0,568	0,577	0,588	—	—	—	—
0,60	0,533	0,535	0,543	0,556	0,564	—	—	—	—	—
0,55	0,522	0,525	0,532	0,543	—	—	—	—	—	—
0,50	0,511	0,513	0,520	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 43

Трубное присоединение

Значения C_2': гидравлический коэфициент истечения взят, исходя из статического давления после диафрагмы, с фактором приближения $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$C_2' = \frac{C_2}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

r	$\beta = 0{,}0$	$\beta = 0{,}1$	$\beta = 0{,}2$	$\beta = 0{,}3$	$\beta = 0{,}35$	$\beta = 0{,}4$	$\beta = 0{,}45$	$\beta = 0{,}5$	$\beta = 0{,}55$	$\beta = 0{,}6$
1,00	0,597	0,600	0,612	0,635	0,652	0,674	0,700	0,733	0,765	0,822
0,95	0,606	0,610	0,621	0,644	0,660	0,681	0,706	0,737	0,767	0,822
0,90	0,616	0,619	0,631	0,653	0,668	0,688	0,712	0,741	0,769	0,821
0,85	0,626	0,629	0,641	0,662	0,677	0,695	0,718	0,745	0,771	—
0,80	0,637	0,640	0,651	0,671	0,685	0,703	0,724	0,749	0,773	—
0,75	0,648	0,651	0,662	0,681	0,695	0,711	0,730	0,754	—	—
0,70	0,660	0,663	0,674	0,692	0,705	0,720	0,737	—	—	—
0,65	0,673	0,677	0,687	0,704	0,716	0,729	—	—	—	—
0,60	0,688	0,691	0,701	0,717	0,728	—	—	—	—	—
0,55	0,704	0,707	0,717	0,732	—	—	—	—	—	—
0,50	0,722	0,726	0,736	—	—	—	—	—	—	—

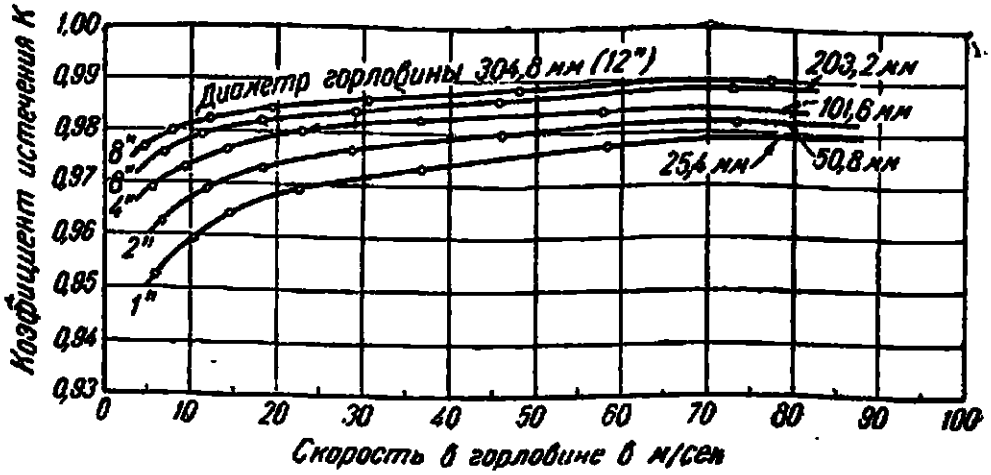


Фиг. 36. Коэфициенты истечения воды в счетчиках Вентури при температуре в 15,56° С.

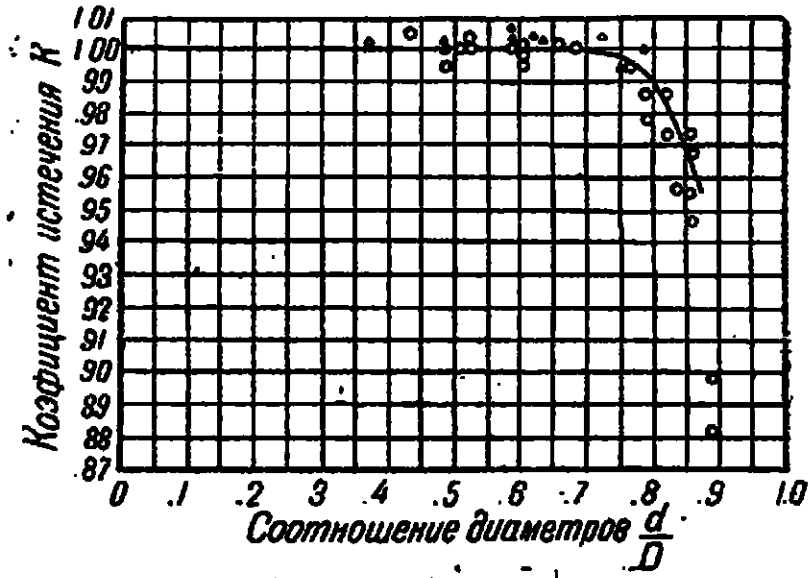
Обратимся к номограмме для счетчиков с трубным соединением (фиг. 40). В первой колонке с левой стороны номограммы находим 4-дюймовую диафрагму счетчика. Вправо от цифры 4 находим ряд диаметров труб. Следуем по кривой 10-дюймовой трубы до ее пересечения с вертикальной линией в точке, соответствующей абсолютному давлению в 15,086 *ат*. От точки пересечения проводим горизонталь до шкалы, соответствующей перепаду 1270 *мм* (50"). По этой шкале находим число куб. метров газа, которое пройдет через счетчик в течение часа, когда перепад давления составляет 1270 *мм* водяного столба (это число равняется 13 018 *м*³/*час*).

Пример 2. Требуется пропустить 2830 *м*³/*час* газа в течение часа через счетчик с 8-дюймовой диафрагмой при трубном присоединении, снабженный дифференциальным манометром на 1270 *мм*. Статическое давление составляет 7 *кг*/*см*² (8 *кг*/*см*² абс.). Определить, каких размеров должна быть установлена диафрагма.

Соответствующую требуемого часовому количеству газа (2830 *м*³/*час*) точку на шкале с дифференциальным давлением 1270 *мм* проектируем на вертикаль, соответствующую абсолютному давлению в 8 *ат*. Найденная точка соответствует 8-дюймовым счетчикам с диаметром диафрагмы счетчика от 2 до $2^1/_2$"; следовательно, нужно выбрать диаметр в $2^1/_2$".



Фиг. 37. Коэфициенты истечения воздуха в счетчиках Вентури при температуре 15,56° С и при давлении в 1 *ат*.



Фиг. 38. Коэфициенты истечения через сопла (кружочками отмечены данные опытов над паром, треугольниками — данные опытов над водой).

Таблица 44

Поправочные коэфициенты для вычисления необходимых по договору давлений

Необходимое по договору давление в *кг/см²*	Абсолютное давление в *ат*	Поправочный коэфициент (множитель)
1,0125 + 0,0000	1,0125	1,0230
1,0125 + 0,0176	1,0301	1,0050
1,0125 + 0,0352	1,0477	0,9890
1,0125 + 0,0527	1,0552	0,9804
1,0125 + 0,0703	1,0828	0,9565
1,0125 + 0,1406	1,1531	0,8982

Стандартные коэфициенты часового расхода газа в счетчиках с диафрагмами при трубном соединении

Таблица значений C_a для газов

$$C_a = 0{,}0009037\,\frac{C_v = d^2\sqrt{T_g}}{P_g},$$

$$Q = 0{,}7483\,C_a\sqrt{\frac{1}{G}}\sqrt{\frac{T_g}{T_f}}\sqrt{P_f h},$$

Q в $м^3/час$

Размер отверстия диафрагмы в дм.	Размеры трубы в дм.							
	16 (15,25)	12 (12,09)	10 (10,19)	8 (8,071)	6 (6,065)	4 (4,026)	3 (3,068)	2 (2,067)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1/4	0,3549	0,3557	0,3560	0,3569	0,3569	0,3608	0,3628	0,3668
3/8	0,8012	0,8029	0,8049	0,8077	0,8116	0,8193	0,8255	0,8365
1/2	1,4314	1,4337	1,4376	1,4433	1,4529	1,4682	1,4815	1,5115
5/8	2,2397	2,2482	2,2549	2,2654	2,2827	2,3115	2,3381	2,4089
3/4	4,0837	3,2488	3,2602	3,2771	3,3026	3,3507	3,4017	3,5686
7/8	4,4148	4,4346	4,4516	4,4793	4,5195	4,5959	4,6921	5,0516
1	5,7817	5,8100	5,8355	5,8751	5,9289	6,0562	6,2317	6,9505
1 1/8	7,3382	7,3778	7,4089	7,4627	7,5420	7,7429	8,0542	9,3928
1 1/4	9,0730	9,1296	9,1720	9,2428	9,3532	9,6678	10,1823	12,5567
1 3/8	11,0059	11,0823	11,1361	11,2266	11,3908	11,8690	12,7293	16,6546
1 1/2	13,1312	13,2189	13,2840	13,4085	13,6180	14,3566	15,7150	—
1 5/8	15,4490	15,5537	15,6442	15,7914	16,0970	17,1894	19,2751	—
1 3/4	17,9450	18,0696	18,1884	18,3865	18,7884	20,3873	23,4579	—
1 7/8	20,6449	20,8062	20,9448	21,1995	21,7457	24,0324	28,4981	—
2	23,5343	23,7182	23,8965	24,2248	24,9719	28,1670	34,4977	—
2 1/8	26,6162	26,8567	27,0548	27,4793	28,4698	32,8846	41,6859	—
2 1/4	29,9131	30,1678	30,4225	30,9602	32,2620	38,2333	50,1476	—
2 3/8	33,3940	33,7053	34,0166	34,6958	36,4221	44,4027	—	—
2 1/2	37,0730	37,4409	37,8088	38,6861	40,8935	51,3928	—	—
2 5/8	40,9218	41,3746	41,8557	42,9028	45,8177	59,4300	—	—
2 3/4	44,9970	45,5347	46,1290	47,4591	51,1098	68,6275	—	—
2 7/8	49,2986	49,9212	50,6004	52,2701	56,9113	79,1268	—	—
3	53,7700	54,5058	55,3548	57,3924	63,2505	91,1260	—	—
3 1/4	63,3354	64,3825	65,5994	68,6841	77,5986	—	—	—
3 1/2	73,7781	75,2214	76,9760	81,5040	94,7484	—	—	—
3 3/4	85,0981	87,0225	89,4846	95,9936	115,1527	—	—	—
4	97,3237	99,9273	103,3233	112,5491	139,7454	—	—	—
4 1/4	110,4549	113,9924	118,6396	131,9271	169,0359	—	—	—
4 1/2	124,6049	129,2178	135,5853	152,8483	203,8732	—	—	—
4 3/4	139,7454	145,6601	154,1784	177,0731	—	—	—	—

Размер отверстия диафрагмы в дм.	Размеры трубы в дм.							
	16 (15,25)	12 (12,09)	10 (10,19)	8 (8,071)	6 (6,035)	4 (4,026)	3 (3,068)	2 (2,067)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	155,9047	163,8570	174,9506	205,2882	—	—	—	—
5 1/4	173,2243	183,3840	197,7887	236,9842	—	—	—	—
5 1/2	191,8174	204,8071	223,3436	273,5478	—	—	—	—
5 3/4	211,5142	228,0697	251,3889	315,3752	—	—	—	—
6	232,5694	253,2567	282,9151	363,1173	—	—	—	—
6 1/4	255,2660	280,9058	317,5826	—	—	—	—	—
6 1/2	279,3776	311,2434	356,5517	—	—	—	—	—
6 3/4	305,4985	343,7884	399,3130	—	—	—	—	—
7	332,8646	379,8703	—	—	—	—	—	—
7 1/4	362,2683	419,4060	—	—	—	—	—	—
7 1/2	394,1341	461,998	—	—	—	—	—	—
7 3/4	427,8394	509,2868	—	—	—	—	—	—
8	464,3747	560,9626	—	—	—	—	—	—
8 1/4	503,0608	616,5721	—	—	—	—	—	—
8 1/2	544,6052	678,4076	—	—	—	—	—	—
8 3/4	589,7720	745,9597	—	—	—	—	—	—
9	637,5424	818,7190	—	—	—	—	—	—
9 1/4	689,5861	—	—	—	—	—	—	—
9 1/2	744,6296	—	—	—	—	—	—	—
9 3/4	803,4936	—	—	—	—	—	—	—
10	868,1025	—	—	—	—	—	—	—
10 1/4	936,4187	—	—	—	—	—	—	—
10 1/2	1 008,7818	—	—	—	—	—	—	—
10 3/4	1 089,1821	—	—	—	—	—	—	—
11	1 173,4029	—	—	—	—	—	—	—
11 1/4	1 265,2930	—	—	—	—	—	—	—
11 1/2	1 361,0036	—	—	—	—	—	—	—
11 3/4	1 467,2418	—	—	—	—	—	—	—
12	1 578,2627	—	—	—	—	—	—	—

Номинальные диаметры труб даны округленными, в скобках даны действительные диаметры.

Примечание. Штуцер для измерения давления до диафрагмы расположен в 2½ диаметрах от лицевой стороны шайбы.

Штуцер для измерения давления за диафрагмой расположен в 8 диаметрах от лицевой стороны шайбы.

Статическое давление P_f взято до диафрагмы.

Отверстие диафрагмы должно быть концентрично трубе и иметь острые прямоугольные кромки со стороны потока; сужение должно быть на протяжении менее ¼ диаметра.

Единицы измерения: *м³/час*, отнесенный к давлению 1,0356 *кг/см²* и температуре 288,88° С абс. Поправки на другие давления см. табл. 44.

Таблица 46

Стандартные коэфициенты часового расхода газа в счетчиках с диафрагмами при фланцевом соединении

Таблица значений C_a для газов

$$C_a = \frac{0{,}0009037\, Ed^2 \sqrt{T_s}}{P_s};$$

$$Q = 0{,}7483\, C_a \sqrt{\frac{1}{G}} \sqrt{\frac{T_s}{T_f}} \sqrt{P_f h} \quad м^3/час$$

Размеры отверстия диафрагмы в дм.	Размеры трубы в дм.							
	16 (15,25)	12 (12,09)	10 (10,19)	8 (8,071)	6 (6,065)	4 (4,026)	3 (3,068)	2 (2,067)
1/4	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628
3/8	0,8153	0,8153	0,8153	0,8153	0,8153	0,8153	0,8153	0,8153
1/2	1,4501	1,4501	1,4501	1,4501	1,4501	1,4501	1,4501	1,4501
5/8	2,2654	2,2654	2,2654	2,2654	2,2654	2,2654	2,2654	2,2654
3/4	3,2630	3,2630	3,2630	3,2630	3,2630	3,2630	3,2630	3,2630
7/8	4,4403	4,4403	4,4403	4,4403	4,4403	4,4403	4,4403	4,4431
1	5,7987	5,7987	5,7987	5,7987	5,7987	5,7987	5,7987	5,8638
1 1/8	7,3439	7,3439	7,3439	7,3439	7,3439	7,3439	7,3439	7,6155
1 1/4	9,0588	9,0588	9,0588	9,0588	9,0588	9,0588	9,0588	9,7720
1 3/8	10,9691	10,9691	10,9691	10,9691	10,9691	10,9691	10,9974	12,4435
1 1/2	13,0548	13,0548	13,0548	13,0548	13,0548	13,0548	13,2161	—
1 5/8	15,3131	15,3131	15,3131	15,3131	15,3131	15,3131	15,7744	—
1 3/4	17,7639	17,7639	17,7639	17,7639	17,7639	17,7837	18,7006	—
1 7/8	20,3958	20,3958	20,3958	20,3958	20,3958	20,5203	22,0910	—
2	23,2003	23,2003	23,2003	23,2003	23,2003	23,5626	26,0049	—
2 1/8	26,1945	26,1945	26,1945	26,1945	26,1945	26,9416	30,5074	—
2 1/4	29,3754	29,3754	29,3754	29,3754	29,3754	30,7055	35,6863	—
2 3/8	32,7148	32,7148	32,7148	32,7148	32,7148	34,8939	—	—
2 1/2	36,2523	36,2523	36,2523	36,2523	36,2523	39,5634	—	—
2 5/8	39,9596	39,9596	36,9596	36,9596	40,0162	44,7989	—	—

Размеры отверстия диафрагмы в дм.	Размеры трубы в дм.							
	16 (15,25)	12 (12,09)	10 (10,19)	8 (8,071)	6 (6,065)	4 (4,026)	3 (3,068)	2 (2,067)
2 3/4	43,8650	43,8650	43,8650	43,8650	44,0631	50,6004	—	—
2 7/8	47,9402	47,9402	47,9402	47,9402	48,3364	57,0811	—	—
3	52,1852	52,1852	52,1852	52,1852	52,9776	64,2976	—	—
3 1/4	61,2412	61,2412	61,2412	61,2412	63,2505	—	—	—
3 1/2	71,0613	71,0613	71,0613	71,1462	75,1365	—	—	—
3 3/4	81,5323	81,5323	81,5323	82,0700	88,8337	—	—	—
4	92,7957	92,7957	92,7957	94,2107	104,7949	—	—	—
4 1/4	104,7100	104,7100	104,7949	107,6815	123,0767	—	—	—
4 1/2	117,4450	117,4450	117,7280	122,7937	144,1319	—	—	—
4 3/4	130,8309	130,8309	131,7082	139,3492	—	—	—	—
5	145,0092	145,0092	147,0185	158,1970	—	—	—	—
5 1/4	159,8384	160,0365	163,4608	178,7994	—	—	—	—
5 1/2	175,4317	176,1958	181,5728	202,0337	—	—	—	—
5 3/4	191,7042	193,4305	201,0998	227,7867	—	—	—	—
6	208,8540	211,9953	222,6078	256,5112	—	—	—	—
6 1/4	226,5415	231,9185	245,7855	—	—	—	—	—
6 1/2	245,2195	253,3416	271,3404	—	—	—	—	—
6 3/4	264,8314	276,2080	298,9046	—	—	—	—	—
7	285,6036	300,9139	—	—	—	—	—	—
7 1/4	307,5078	327,5159	—	—	—	—	—	—
7 1/2	330,7704	355,9574	—	—	—	—	—	—
7 3/4	355,2782	386,6629	—	—	—	—	—	—
8	381,3142	419,8871	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 46

Размеры отверстия диафрагмы в дм.	Размеры трубы в дм.							
	16 (15,25)	12 (12,09)	10 (10,19)	8 (8,071)	6 (6,065)	4 (4,026)	3 (3,068)	2 (2,067)
8 1/4	408,6803	455,0074	—	—	—	—	—	—
8 1/2	437,6878	493,2973	—	—	—	—	—	—
8 3/4	468,7046	534,3606	—	—	—	—	—	—
9	501,2496	577,8860	—	—	—	—	—	—
9 1/4	535,9737	—	—	—	—	—	—	—
9 1/2	572,4524	—	—	—	—	—	—	—
9 3/4	611,0253	—	—	—	—	—	—	—
10	652,3716	—	—	—	—	—	—	—
10 1/4	695,8970	—	—	—	—	—	—	—
10 1/2	741,0921	—	—	—	—	—	—	—
10 3/4	790,8435	—	—	—	—	—	—	—
11	841,7835	—	—	—	—	—	—	—
11 1/4	897,2798	—	—	—	—	—	—	—
11 1/2	954,0496	—	—	—	—	—	—	—
11 3/4	1015,4889	—	—	—	—	—	—	—
12	1080,5789	—	—	—	—	—	—	—

Номинальные диаметры труб даны округленно.

В скобках даны действительные диаметры.

Примечание. Штуцер для измерения давления после диафрагмы устанавливается на расстоянии 25,4 *мм* от лицевой стороны шайбы счетчика.

Штуцер для измерения давления до диафрагмы устанавливается на расстоянии 25,4 *мм* от лицевой стороны шайбы счетчика.

Статическое давление (P_f) взято по давлению у крана, расположенного после диафрагмы.

Отверстие диафрагмы счетчика должно быть концентрично трубе и иметь острые прямоугольные кромки со стороны потока, сужение должно быть на протяжении менее 1/4 диаметра.

Единицы измерения: $м^3/час$, отнесенный к давлению 1,0356 $кг/см^2$ и температуре 288,88° С абс.

Поправки на другие давления см. табл. 44.

Таблица 47

Поправочные коэфициенты на удельный вес газа для счетчиков „Орифайс" с диафрагмами

$$\text{Коэфициент} = \sqrt{\frac{1}{G}}$$

Уд. вес	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,500	1,414	1,413	1,411	1,410	1,408	1,407	1,406	1,404	1,403	1,402
0,510	1,400	1,399	1,397	1,396	1,395	1,394	1,392	1,391	1,389	1,388
0,520	1,387	1,385	1,384	1,383	1,381	1,380	1,379	1,378	1,376	1,375
0,530	1,374	1,372	1,371	1,370	1,368	1,367	1,366	1,364	1,363	1,362
0,540	1,361	1,359	1,358	1,357	1,356	1,355	1,354	1,352	1,351	1,349
0,550	1,348	1,347	1,346	1,345	1,344	1,342	1,341	1,340	1,339	1,338
0,560	1,336	1,335	1,334	1,333	1,332	1,330	1,329	1,328	1,827	1,326
0,570	1,324	1,323	1,322	1,321	1,320	1,319	1,318	1,316	1,315	1,314
0,580	1,313	1,312	1,311	1,310	1,308	1,307	1,306	1,305	1,304	1,303
0,590	1,302	1,301	1,300	1,299	1,297	1,296	1,295	1,294	1,293	1,292
0,600	1,291	1,290	1,289	1,288	1,287	1,286	1,285	1,284	1,283	1,282
0,610	1,280	1,279	1,278	1,277	1,276	1,275	1,274	1,273	1,272	1,271
0,620	1,270	1,269	1,268	1,267	1,266	1,265	1,264	1,263	1,262	1,261
0,630	1,260	1,259	1,258	1,257	1,256	1,255	1,254	1,253	1,252	1,251
0,640	1,250	1,249	1,248	1,247	1,246	1,245	1,244	1,243	1,242	1,241
0,650	1,240	1,239	1,238	1,237	1,236	1,236	1,235	1,234	1,233	1,232
0,660	1,231	1,230	1,229	1,228	1,227	1,226	1,225	1,224	1,224	1,223
0,670	1,222	1,221	1,220	1,219	1,218	1,217	1,216	1,215	1,214	1,214
0,680	1,213	1,212	1,211	1,210	1,209	1,208	1,207	1,207	1,206	1,205
0,690	1,204	1,203	1,202	1,201	1,200	1,200	1,199	1,198	1,197	1,196
0,700	1,195	1,194	1,194	1,193	1,192	1,191	1,190	1,189	1,188	1,188
0,710	1,187	1,186	1,185	1,184	1,183	1,183	1,182	1,181	1,180	1,179
0,720	1,178	1,178	1,177	1,176	1,175	1 174	1,174	1,173	1,172	1,171
0,730	1,170	1,170	1,169	1,168	1,167	1,166	1,166	1,165	1,164	1,163
0,740	1,162	1,162	1,161	1,160	1,159	1,159	1,158	1,157	1,156	1,156
0,750	1,155	1,154	1,153	1,152	1,152	1,151	1,150	1.149	1,149	1,148
0,760	1,147	1,146	1,146	1,145	1,144	1,143	1,143	1,142	1,141	1,140
0,770	1,140	1,139	1,138	1,137	1,137	1,136	1,135	1,135	1,134	1,133
0,780	1,132	1,132	1,131	1,130	1,129	1,129	1,128	1,127	1,126	1,125
0,790	1,125	1,124	1,124	1,123	1,122	1,122	1,121	1,120	1,119	1,119
0,800	1,118	1,117	1,117	1,116	1,115	1,114	1,114	1,113	1,112	1,112
0,810	1,111	1,110	1,110	1,109	1,108	1,108	1,107	1,106	1,106	1,105
0,820	1,104	1,104	1,103	1,102	1,102	1,101	1,100	1,100	1,099	1,098
0,830	1,098	1,097	1,096	1,096	1,095	1,094	1,094	1,093	1,092	1,092
0,840	1,091	1,090	1,090	1,089	1,088	1,088	1,087	1,087	1,086	1,085
0,850	1,085	1,084	1,083	1,083	1,082	1,082	1,081	1,080	1,080	1,079
0,860	1,078	1,078	1,077	1,076	1,076	1,075	1,075	1,074	1,073	1,073
0,870	1,072	1,072	1,071	1,070	1,070	1,069	1,068	1,068	1,067	1,067
0,880	1,066	1,065	1,065	1,064	1,064	1,063	1,062	1,062	1,061	1,061
0,890	1,060	1,059	1,059	1,058	1,058	1,057	1,057	1,056	1,055	1,055
0,900	1,054	1,054	1,053	1,052	1,052	1,051	1,051	1, 50	1,050	1,049
0,910	1,048	1,048	1,047	1,047	1,046	1,045	1,045	1,044	1,044	1,043
0,920	1,043	1,042	1,042	1,041	1,040	1,040	1,039	1,039	1,038	1,038
0,930	1,037	1,036	1,036	1,035	1,035	1,034	1,034	1,033	1,032	1,032
0,940	1,031	1,031	1,030	1,030	1,029	1,029	1,028	1,028	1,027	1,026

Уд. вес	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,950	1,026	1,026	1,025	1,024	1,024	1,023	1,023	1,022	1,022	1,021
0,960	1,021	1,020	1,020	1,019	1,018	1,018	1,017	1,017	1,016	1,016
0,970	1,015	1,015	1,014	1,014	1,013	1,013	1,012	1,012	1,011	1,010
0,980	1,010	1,010	1,009	1,009	1,008	1,008	1,007	1,007	1,006	1,006
0,990	1,005	1,004	1,004	1,004	1,003	1,002	1,002	1,002	1,001	1,000
1,000	1,0000	1,9995	1,9990	1,9985	1,9980	1,9975	1,9970	1,9965	1,9960	1,9955
1,01	0,9950	0,9945	0,9940	0,9935	0,9930	0,9925	0,9921	0,9916	0,9911	0,9906
1,02	0,9901	0,9896	0,9891	0,9887	0,9882	0,9877	0,9872	0,9867	0,9863	0,9858
1,03	0,9853	0,9848	0,9844	0,9839	0,9834	0,9829	0,9825	0,9820	0,9815	0,9811
1,04	0,9806	0,9801	0,9796	0,9792	0,9788	0,9783	0,9779	0,9774	0,9770	0,9765
1,05	0,9759	0,9754	0,9750	0,9745	0,9741	0,9736	0,9731	0,9727	0,9722	0,9718
1,06	0,9713	0,9708	0,9704	0,9699	0,9695	0,9690	0,9685	0,9681	0,9676	0,9672
1,07	0,9667	0,9663	0,9658	0,9654	0,9649	0,9645	0,9641	0,9636	0,9632	0,9627
1,08	0,9622	0,9618	0,9614	0,9609	0,9605	0,9601	0,9596	0,9592	0,9587	0,9583
1,09	0,9578	0,9574	0,9570	0,9565	0,9561	0,9556	0,9552	0,9548	0,9544	0,9539
1,10	0,9535	0,9530	0,9526	0,9521	0,9517	0,9513	0,9509	0,9504	0,9500	0,9496
1,11	0,9492	0,9487	0,9483	0,9479	0,9475	0,9470	0,9466	0,9462	0,9457	0,9453
1,12	0,9449	0,9445	0,9441	0,9437	0,9432	0,9428	0,9424	0,9420	0,9415	0,9411
1,13	0,9407	0,9403	0,9399	0,9395	0,9390	0,9386	0,9382	0,9378	0,9374	0,9370
1,14	0,9366	0,9362	0,9358	0,9354	0,9349	0,9345	0,9341	0,9337	0,9333	0,9329
1,15	0,9325	0,9321	0,9317	0,9313	0,9309	0,9305	0,9301	0,9297	0,9293	0,9289
1,16	0,9285	0,9281	0,9277	0,9273	0,9269	0,9265	0,9261	0,9257	0,9253	0,9249
1,17	0,9245	0,9241	0,9237	0,9233	0,9229	0,9225	0,9221	0,9217	0,9214	0,9210
1,18	0,9206	0,9202	0,9198	0,9194	0,9190	0,9186	0,9182	0,9179	0,9175	0,9171
1,19	0,9167	0,9163	0,9159	0,9155	0,9152	0,9148	0,9144	0,9140	0,9136	0,9132
1,20	0,9128	0,9125	0,9121	0,9118	0,9114	0,9110	0,9106	0,9102	0,9098	0,9094
1,21	0,9091	0,9087	0,9084	0,9080	0,9076	0,9072	0,9069	0,9065	0,9061	0,9057
1,22	0,9054	0,9050	0,9046	0,9043	0,9039	0,9035	0,9032	0,9028	0,9024	0,9020
1,23	0,9017	0,9013	0,9009	0,9006	0,9002	0,8998	0,8995	0,8991	0,8988	0,8984
1,24	0,8980	0,8977	0,8973	0,8969	0,8966	0,8962	0,8959	0,8955	0,8952	0,8948
1,25	0,8944	0,8941	0,8937	0,8934	0,8930	0,8926	0,8923	0,8919	0,8916	0,8912
1,26	0,8909	0,8905	0,8902	0,8898	0,8895	0,8891	0,8888	0,8884	0,8881	0,8877
1,27	0,8874	0,8870	0,8867	0,8863	0,8859	0,8856	0,8853	0,8849	0,8846	0,8842
1,28	0,8838	0,8835	0,8832	0,8828	0,8825	0,8822	0,8818	0,8815	0,8811	0,8808
1,29	0,8804	0,8801	0,8798	0,8794	0,8791	0,8787	0,8784	0,8781	0,8777	0,8774
1,30	0,8770	0,8767	0,8764	0,8760	0,8757	0,8754	0,8750	0,8747	0,8744	0,8740
1,31	0,8737	0,8734	0,8730	0,8727	0,8724	0,8720	0,8717	0,8714	0,8710	0,8707
1,32	0,8704	0,8701	0,8697	0,8694	0,8691	0,8687	0,8684	0,8681	0,8678	0,8674
1,33	0,8671	0,8668	0,8665	0,8661	0,8658	0,8655	0,8652	0,8648	0,8645	0,8642
1,34	0,8639	0,8635	0,8632	0,8629	0,8626	0,8623	0,8619	0,8116	0,8613	0,8610
1,35	0,8606	0,8603	0,8600	0,8597	0,8594	0,8591	0,8588	0,8584	0,8581	0,8578
1,36	0,8575	0,8572	0,8568	0,8565	0,8562	0,8559	0,8556	0,8553	0,8550	0,8547
1,37	0,8543	0,8540	0,8537	0,8534	0,8531	0,8528	0,8525	0,8522	0,8519	0,8516
1,38	0,8512	0,8509	0,8506	0,8503	0,8500	0,8497	0,8494	0,8491	0,8488	0,8485
1,39	0,8482	0,8479	0,8476	0,8473	0,8470	0,8467	0,8464	0,8461	0,8458	0,8455

Продолжение табл. 47

Уд. вес	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
1,40	0,8452	0,8449	0,8446	0,8442	0,8439	0,8436	0,8433	0,8430	0,8427	0,8425
1,41	0,8422	0,8419	0,8416	0,8413	0,8410	0,8407	0,8404	0,8401	0,8398	0,8395
1,42	0,8392	0,8389	0,8386	0,8383	0,8380	0,8377	0,8374	0,8371	0,8368	0,8365
1,43	0,8362	0,8359	0,8357	0,8354	0,8351	0,8348	0,8345	0,8342	0,8339	0,8336
1,44	0,8333	0,8330	0,8328	0,8325	0,8322	0,8319	0,8316	0,8313	0,8310	0,8307
1,45	0,8305	0,8302	0,8299	0,8296	0,8293	0,8290	0,8287	0,8285	0,8282	0,8279
1,46	0,8276	0,8273	0,8270	0,8268	0,8265	0,8262	0,8259	0,8256	0,8253	0,8251
1,47	0,8248	0,8245	0,8242	0,8239	0,8237	0,8234	0,8231	0,8228	0,8226	0,8223
1,48	0,8220	0,8217	0,8214	0,8212	0,8209	0,8206	0,8203	0,8201	0,8198	0,8195
1,49	0,8192	0,8190	0,8187	0,8184	0,8181	0,8179	0,8176	0,8173	0,8170	0,8168
1,50	0,8165	0,8162	0,8159	0,8157	0,8154	0,8151	0,8149	0,8146	0,8143	0,8141

Таблица 48

Температурная поправка для счетчиков „Орифайс"

Поправочный множитель $\sqrt{\frac{288{,}8}{T_f}}$

Температура в °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
— 10	1,047	1,049	1,051	1,054	1,056	1,058	1,060	1,062	1,064	1,166
0 [1]	1,028	1,030	1,032	1,034	1,036	1,038	1,040	1,042	1,044	1,045
0	1,028	1,026	1,024	1,023	1,021	1,019	1,017	1,015	1,013	1,012
10	1,010	1,009	1,007	1,005	1,003	1,001	0,999	0,997	0,996	0,994
20	0,992	0,991	0,989	0,988	0,986	0,984	0,982	0,981	0,979	0,977
30	0,976	0,974	0,972	0,971	0,970	0,968	0,967	0,965	0,964	0,962
40	0,960	0,959	0,957	0,955	0,954	0,953	0,951	0,950	0,948	0,947
50	0,946	0,944	0,943	0,941	0,939	0,938	0,936	0,935	0,933	0,932
60	0,930	0,929	0,928	0,926	0,925	0,924	0,923	0,922	0,920	0,919
70	0,917	0,916	0,914	0,913	0,912	0,911	0,909	0,908	0,907	0,906
80	0,904	0,903	0,902	0,901	0,900	0,898	0,897	0,896	0,894	0,892
90	0,891	0,890	0,889	0,887	0,886	0,885	0,884	0,883	0,882	0,881
100	0,880	0,879	0,878	0,876	0,875	0,874	0,873	0,872	0,871	0,870

[1] Эта строка дает поправки для отрицательных температур от 0 до —9°.

Таблица 49

Множители для дифференциального давления в *мм* водяного столба

h	Множитель	h	Множитель	h	Множитель	h	Множитель	h	Множитель
100	10,00	150	12,25	200	14,14	250	15,81	300	17,32
110	10,49	160	12,65	210	14,49	260	16,12	310	17,61
120	10,95	170	13,04	220	14,83	270	16,43	320	17,89
130	11,40	180	13,42	230	15,17	280	16,73	330	18,17
140	11,83	190	13,78	240	15,49	290	17,03	340	18,44

h	Множитель	h	Множитель	h	Множитель	h	Множитель	h	Множитель
350	18,71	850	29,15	1 350	36,74	1 850	43,01	5 500	74,16
360	18,97	860	29,33	1 360	36,87	1 860	43,13	5 600	74,83
370	19,24	870	29,50	1 370	37,01	1 870	43,24	5 700	75,50
380	19,49	880	29,66	1 380	37,15	1 880	43,36	5 800	76,16
390	19,75	890	29,83	1 390	37,28	1 890	43,47	5 900	76,81
400	20,00	900	30,00	1 400	37,42	1 900	43,59	6 000	77,46
410	20,25	910	30,17	1 410	37,55	1 910	43,70	6 100	78,10
420	20,49	920	30,33	1 420	37,68	1 920	43,82	6 200	78,74
430	20,74	930	30,50	1 430	37,81	1 930	43,93	6 300	79,37
440	20,98	940	30,66	1 440	37,94	1 940	44,04	6 400	80,00
450	21,21	950	30,82	1 450	38,08	1 950	44,16	6 500	80,62
460	21,45	960	30,98	1 460	38,21	1 960	44,27	6 600	81,24
470	21,68	970	31,14	1 470	38,34	1 970	44,38	6 700	81,85
480	21,91	980	31,30	1 480	38,47	1 980	44,49	6 800	82,46
490	22,14	990	31,46	1 490	38,60	1 990	44,61	6 900	83,07
500	22,36	1 000	31,62	1 500	38,73	2 000	44,72	7 000	83,67
510	22,58	1 010	31,78	1 510	38,86	2 100	45,83	7 100	84,26
520	22,80	1 020	31,93	1 520	38,98	2 200	46,90	7 200	84,85
530	23,02	1 030	32,09	1 530	39,11	2 300	47,96	7 300	85,44
540	23,24	1 040	32,24	1 540	39,24	2 400	48,99	7 400	86,02
550	23,45	1 050	32,40	1 550	39,36	2 500	50,00	7 500	86,60
560	23,66	1 060	32,56	1 560	39,49	2 600	50,99	7 600	87,18
570	23,87	1 070	32,71	1 570	39,62	2 700	51,96	7 700	87,75
580	24,08	1 080	32,87	1 580	39,75	2 800	52,92	7 800	88,32
590	24,29	1 090	33,02	1 590	39,87	2 900	53,85	7 900	88,88
600	24,49	1 100	33,17	1 600	40,00	3 000	54,77	8 000	89,44
610	24,70	1 110	33,31	1 610	40,12	3 100	55,68	8 100	90,00
620	24,90	1 120	33,46	1 620	40,25	3 200	56,57	8 200	90,55
630	25,10	1 130	33,61	1 630	40,37	3 300	57,45	8 300	91,10
640	25,30	1 140	33,75	1 640	40,49	3 400	58,31	8 400	91,65
650	25,50	1 150	33,90	1 650	40,62	3 500	59,16	8 500	92,20
660	25,69	1 160	34,05	1 660	40,74	3 600	60,00	8 600	92,74
670	25,88	1 170	34,19	1 670	40,86	3 700	60,83	8 700	93,27
680	26,08	1 180	34,34	1 680	40,98	3 800	61,64	8 800	93,81
690	26,27	1 190	34,49	1 690	41,11	3 900	62,45	8 900	94,34
700	26,46	1 200	34,64	1 700	41,23	4 000	63,25	9 000	94,87
710	26,65	1 210	34,78	1 710	41,35	4 100	64,03	9 100	95,39
720	26,83	1 220	34,92	1 720	41,47	4 200	64,81	9 200	95,92
730	27,02	1 230	35,06	1 730	41,59	4 300	65,57	9 300	96,44
740	27,20	1 240	35,21	1 740	41,71	4 400	66,33	9 400	96,95
750	27,39	1 250	35,35	1 750	41,83	4 500	67,08	9 500	97,47
760	27,57	1 260	35,49	1 760	41,95	4 600	67,82	9 600	97,98
770	27,75	1 270	35,63	1 770	42,07	4 700	68,56	9 700	98,49
780	27,93	1 280	35,77	1 780	42,19	4 800	69,28	9 800	98,99
790	28,11	1 290	35,92	1 790	42,31	4 900	70,00	9 900	99,50
800	28,28	1 300	36,06	1 800	42,43	5 000	70,71	10 000	100,00
810	28,46	1 310	36,20	1 810	42,55	5 100	71,41		
820	28,64	1 320	36,33	1 820	42,66	5 200	72,11		
830	28,81	1 330	36,47	1 830	42,78	5 300	72,80		
840	28,98	1 340	36,60	1 840	42,89	5 400	73,48		

Таблица 50

Множители для статического давления ниже 1 кг/см²

P_f	Множитель	P_f	Множитель	P_f	Множитель	P_f	Множитель	P_f	Множитель
1,00	1,0000	0,80	0,8944	0,60	0,7746	0,40	0,6325	0,20	0,4472
0,99	0,9950	0,79	0,8888	0,59	0,7681	0,39	0,6245	0,19	0,4359
0,98	0,9899	0,78	0,8832	0,58	0,7616	0,38	0,6164	0,18	0,4243
0,97	0,9849	0,77	0,8775	0,57	0,7550	0,37	0,6083	0,17	0,4123
0,96	0,9798	0,76	0,8718	0,56	0,7483	0,36	0,6000	0,16	0,4000
0,95	0,9747	0,75	0,8660	0,55	0,7416	0,35	0,5916	0,15	0,3873
0,94	0,9695	0,74	0,8602	0,54	0,7349	0,34	0,5831	0,14	0,3742
0,93	0,9644	0,73	0,8544	0,53	0,7280	0,33	0,5745	0,13	0,3606
0,92	0,9592	0,72	0,8485	0,52	0,7211	0,32	0,5657	0,12	0,3464
0,91	0,9539	0,71	0,8426	0,51	0,7141	0,31	0,5568	0,11	0,3317
0,90	0,9487	0,70	0,8367	0,50	0,7071	0,30	0,5477	0,10	0,3162
0,89	0,9434	0,69	0,8307	0,49	0,7000	0,29	0,5385	0,09	0,3000
0,88	0,9381	0,68	0,8246	0,48	0,6928	0,28	0,5291	0,08	0,2828
0,87	0,9327	0,67	0,8185	0,47	0,6856	0,27	0,5196	0,07	0,2646
0,86	0,9274	0,66	0,8124	0,46	0,6782	0,26	0,5099	0,06	0,2449
0,85	0,9220	0,65	0,8062	0,45	0,6708	0,25	0,5000	0,05	0,2236
0,84	0,9165	0,64	0,8000	0,44	0,6633	0,24	0,4899	0,04	0,2000
0,83	0,9110	0,63	0,7937	0,43	0,6557	0,23	0,4796	0,03	0,1732
0,82	0,9055	0,62	0,7874	0,42	0,6481	0,22	0,4690	0,02	0,1414
0,81	0,9000	0,61	0,7810	0,41	0,6403	0,21	0,4583	0,01	0,1000

Таблица 51

Множители статического давления выше 1 кг/см²

P_f	Множитель	P_f	Множитель	P_f	Множитель	P_f	Множитель
1,0	1,000	4,0	2,000	7,0	2,646	10,0	3,162
1,1	1,049	4,1	2,025	7,1	2,665	10,5	3,240
1,2	1,095	4,2	2,049	7,2	2,683	11,0	3,317
1,3	1,140	4,3	2,074	7,3	2,702	11,5	3,391
1,4	1,183	4,4	2,098	7,4	2,720	12,0	3,464
1,5	1,225	4,5	2,121	7,5	2,739	12,5	3,535
1,6	1,265	4,6	2,145	7,6	2,757	13,0	3,606
1,7	1,304	4,7	2,168	7,7	2,775	13,5	3,674
1,8	1,342	4,8	2,191	7,8	2,793	14,0	3,742
1,9	1,378	4,9	2,214	7,9	2,811	14,5	3,808
2,0	1,414	5,0	2,236	8,0	2,828	15,0	3,873
2,1	1,449	5,1	2,258	8,1	2,846	15,5	3,937
2,2	1,483	5,2	2,280	8,2	2,864	16,0	4,000
2,3	1,517	5,3	2,302	8,3	2,881	16,5	4,062
2,4	1,549	5,4	2,324	8,4	2,898	17,0	4,123
2,5	1,581	5,5	2,345	8,5	2,915	17,5	4,183
2,6	1,612	5,6	2,366	8,6	2,933	18,0	4,243
2,7	1,643	5,7	2,387	8,7	2,950	18,5	4,301
2,8	1,673	5,8	2,408	8,8	2,966	19,0	4,359
2,9	1,703	5,9	2,429	8,9	2,983	19,5	4,416
3,0	1,732	6,0	2,449	9,0	3,000	20,0	4,472
3,1	1,761	6,1	2,470	9,1	3,017	20,5	4,528
3,2	1,789	6,2	2,490	9,2	3,033	21,0	4,583
3,3	1,817	6,3	2,510	9,3	3,050	21,5	4,637
3,4	1,844	6,4	2,530	9,4	3,066	22,0	4,690
3,5	1,871	6,5	2,550	9,5	3,082	22,5	4,743
3,6	1,897	6,6	2,569	9,6	3,098	23,0	4,796
3,7	1,924	6,7	2,588	9,7	3,114	23,5	4,848
3,8	1,949	6,8	2,608	9,8	3,130	24,0	4,899
3,9	1,975	6,9	2,627	9,9	3,146	24,5	4,950
						25,0	5,000

Таблица 51а

Пропускная способность счетчика

Пределы пропускной способности с точностью от 1 до 2½%

Максимальный отсчет воды в *мм*	Максимальная пропускная способность в $м^3$	Допустимая величина для точного отсчета в *мм*	Минимальный отсчет в *мм* воды		Минимальная пропускная способность в $м^3$		Отношение максимальной к минимальной пропускной способности	
			1% ошибки	2,5% ошибки	1% ошибки	2,5% ошибки	1% ошибки	2,5% ошибки
2540,0	28,30	10,16	508,00	203,20	12,65	8,01	2,22	3,45
1270,0	20 01	5,08	254.00	121,90	8,94	5,66	2,22	3,45
635,0	14,15	2,54	127.00	50,80	6,34	3,99	2,22	3,45
508.0	12,65	2,03	101,60	40,60	5,66	3,59	2,22	3,45
254,0	8,94	1,02	50,80	20,30	3,99	2,52	2,22	3,45
63,5	4,47	0,25	12,70	5,08	2,01	1,27	2,22	3,45

Уравнение для замера пара диафрагмовыми счетчиками

Начинаем с уравнения (6), выведенного выше:

$$V = 0{,}01254 \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} d^2 \sqrt{\frac{h}{\gamma}}$$

Пусть W означает вес пара, проходящего через счетчик со скоростью 1 *кг/час*. Тогда имеем следующее уравнение:

$$\gamma V = W = 0{,}01254 \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} d^2 \sqrt{\gamma h}. \qquad (10)$$

Уравнение (10) для счетчиков с фланцевым соединением получает следующий вид:

$$W = 0{,}01254\ E d^2 \sqrt{\gamma h}. \qquad (11)$$

Для счетчиков с трубным соединением имеем:

$$W = 0{,}01254\ C_v d^2 \sqrt{\gamma h}. \qquad (12)$$

В приведенных выше уравнениях γ означает действительную плотность пара, проходящего через отверстие счетчика (в *кг/м*³). При замере сухого или перегретого пара значение γ можно взять прямо из таблиц. Если замеряется влажный пар, то нужно еще учесть вес увлекаемой жидкости.

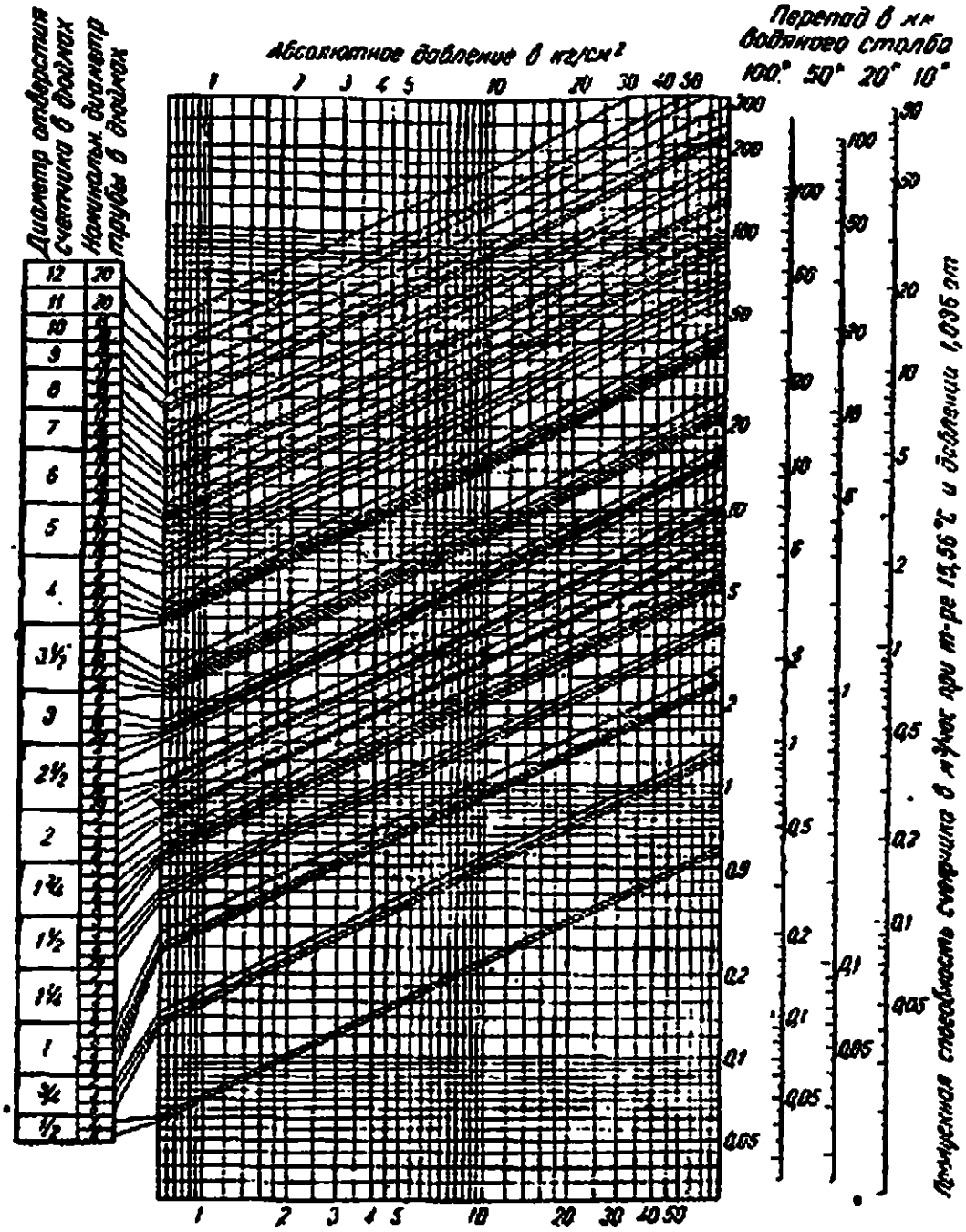
Пусть X — количество воды в килограммах на 1 *кг* сухого насыщенного пара (это количество определяется калориметром с дроссельным клапаном).

γ_s — плотность сухого насыщенного пара при существующем в счетчике давлении P_f; тогда получаем следующую формулу плотности:

$$\gamma = \gamma_s + \gamma_s = X = \gamma_s (1 + X).$$

Подставляя в уравнение (10), получаем:

$$W = 0{,}01254 \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} d^2 \sqrt{1+X} \sqrt{\gamma_s h}. \qquad (13)$$

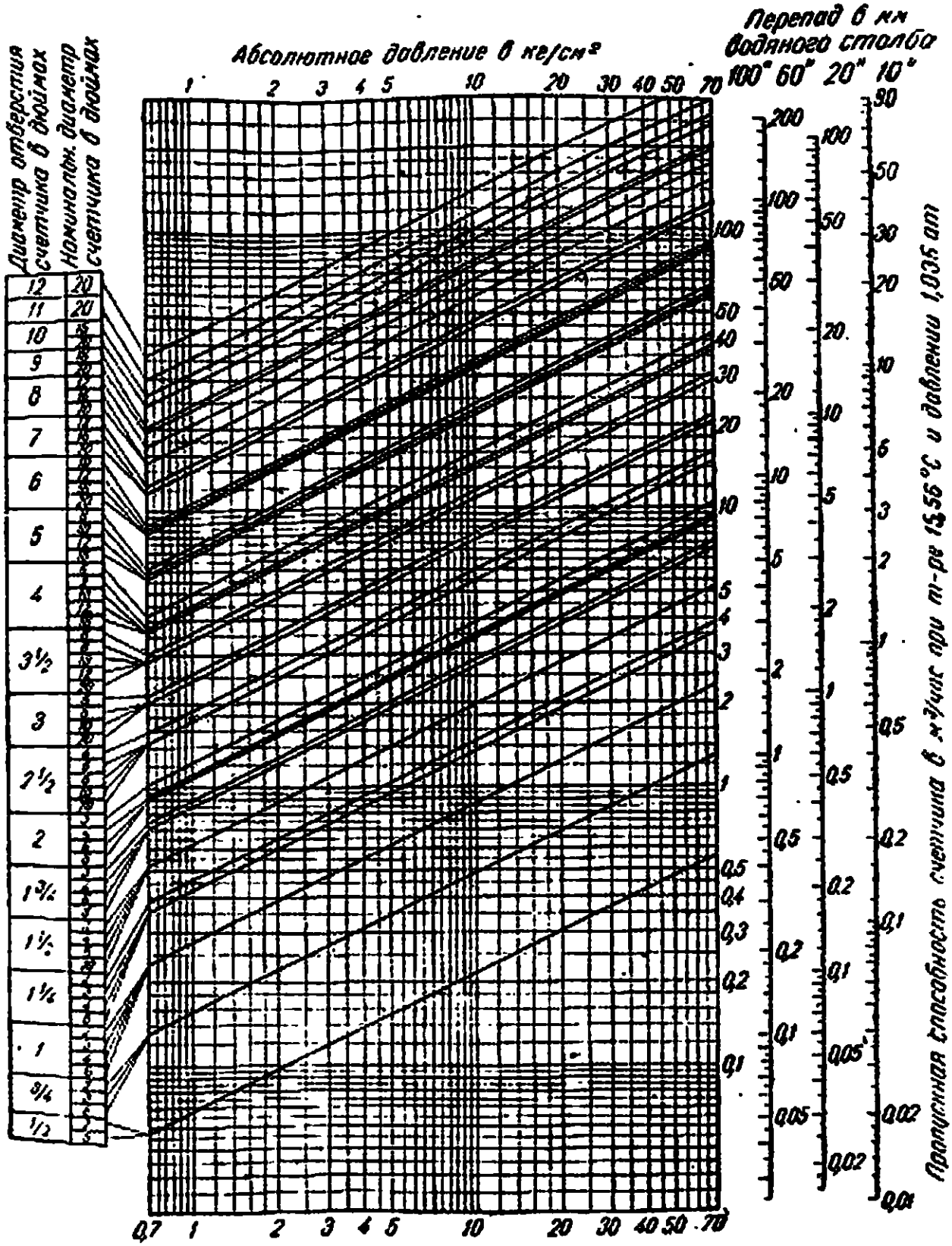


Фиг. 39. Номограмма пропускной способности счетчика с диафрагмой при фланцевом соединении, температуре газа 15,56° С и удельном весе 0,65.

Обыкновенно при замере пара h нельзя измерять в миллиметрах водяного столба. Если применяется дифференциальный манометр, усиливаемый ртутным, и если дифференциальный манометр калиброван в миллиметрах водяного столба, когда над ртутью находится газ, то делают приводимую ниже поправку к показаниям дифференциального манометра, так как при замере пара над ртутью обычно находится вода.

Допустим, что h — перепад в миллиметрах водяного столба; h_m — перепад по манометру. Тогда имеем следующее уравнение:

$$h = \frac{13{,}56 - 1{,}00}{13{,}56} h_m = \frac{12{,}56}{13{,}56} h_m = 0{,}9263\, h_m \qquad (14)$$



Фиг. 40. Номограммы счетчика с диафрагмой при трубном соединении.

Таким образом

$$W = 0{,}01204 \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} d^2 \sqrt{1+X} \sqrt{\gamma_s h_w}. \quad (15)$$

Это уравнение для счетчиков с фланцевым соединением получает следующий вид:

$$W = 0{,}01204 \, E d^2 \sqrt{1+X} \sqrt{\gamma_s h_w}. \quad (16)$$

Для счетчиков с трубным соединением уравнение получает следующую формулу:

$$W = 0{,}01204 \, C_v d^2 \sqrt{1+X} \sqrt{\gamma_s h_w}. \quad (17)$$

Уравнение для замера жидкостей диафрагмовыми счетчиками

Предположим, что G_f — удельный вес движущейся жидкости (вода при 15,56° принята за единицу);

G_b — удельный вес жидкости при температуре в резервуаре или при стандартной температуре; тогда получаем:

$$V_b = V \frac{G_f}{G_b}. \quad (18)$$

Подставляя это значение в уравнение (6), получаем:

$$V_b = 0{,}000396 \frac{G_f}{G_b} \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} d^2 \sqrt{\frac{h}{G_f}}. \quad (19)$$

$$V_h = 0{,}396 \frac{G_f}{G_b} \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} d^2 \sqrt{\frac{h}{G_f}}. \quad (20)$$

Если применяется ртутный манометр в виде U-образной трубки, который показывает перепад давления в миллиметрах водяного столба и который градуирован при условии нахождения газа над ртутью, то при замере жидкости манометр не покажет действительного давления в миллиметрах водяного столба, так как над поверхностью ртути будет находиться скорее жидкость, чем газ. Однако показания манометра можно использовать вместо h в уравнении (20), если применен соответствующий поправочный коэфициент.

$$h = h_m \frac{G_{Hg} - G_m}{G_{Hg}}. \quad (22)$$

В специальном случае, когда температура ртути и воды над ней составляет 15,56°C, получаем следующее значение из уравнения (14):

$$h = 0{,}9263 \, h_m.$$

Приводимые ниже таблицы коэфициентов относятся непосредственно к движению воды, когда перепад измеряется ртутным манометром при тех условиях, к которым применимо уравнение (14). Если замеряется не вода, а другая жидкость, то приводимые в таблицах коэфициенты следует умножить на поправочный коэфициент:

$$\frac{13{,}56 - G}{12{,}56}$$ (13,56 — удельный вес ртути при 15,56°C).

Тогда

$$V_h = 0{,}381 \frac{G_f}{G_b} \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{13{,}56 - G_f}{12{,}56 \, G_f}} d^2 \sqrt{h_w}. \quad (23)$$

Если

$$C_w = 1{,}91965 \frac{k}{\sqrt{1-\beta^4}} d^2, \quad (24)$$

то

$$V_h = 0{,}1984 \, C_w \frac{G_f}{G_b} \sqrt{\frac{13{,}56 - G}{12{,}56 \, G_f}} \sqrt{h_w}. \quad (25)$$

где $\frac{G_f}{G_b} = F_T$ — поправочный коэфициент, применяемый при температуре движущегося потока, если она не является той стандартной температурой, на которую ссылаются при замерах жидкости.

$\sqrt{\frac{13{,}56 - G_f}{12{,}56\,G_f}} = F_\theta$ — поправочный коэфициент применим тогда, когда удельный вес жидкости не равен единице (табл. 55).

Значения E в счетчиках с фланцевым соединением (жидкостных) [1]

Таблица 52

$\beta = \frac{d}{D}$	E	$\beta = \frac{d}{D}$	E	$\beta = \frac{d}{D}$	E	$\beta = \frac{d}{D}$	E	$\beta = \frac{d}{D}$	E
0,05	0,5985	0,20	0,6004	0,35	0,6065	0,50	0,6271	0,65	0,6815
0,06	0,5986	0,21	0,6006	0,36	0,6072	0,51	0,6294	0,66	0,6869
0,07	0,5987	0,22	0,6008	0,37	0,6081	0,52	0,6319	0,67	0,6928
0,08	0,5988	0,23	0,6010	0,38	0,6090	0,53	0,6345	0,68	0,6988
0,09	0,5989	0,24	0,6013	0,39	0,6099	0,54	0,6373	0,69	0,7052
0,10	0,5990	0,25	0,6016	0,40	0,6110	0,55	0,6403	0,70	0,7119
0,11	0,5991	0,26	0,6019	0,41	0,6121	0,56	0,6434	0,71	0,7189
0,12	0,5992	0,27	0,6023	0,42	0,6133	0 57	0,6468	0,72	0,7263
0,13	0,5994	0,28	0,6027	0,43	0,6147	0,58	0,6503	0,73	0,7340
0,14	0,5995	0,29	0,6031	0,44	0,6161	0,59	0,6541	0,74	0,7421
0,15	0,5996	0,30	0,6035	0,45	0,6176	0,60	0,6580	0,75	0,7505
0,16	0,5998	0,31	0,6040	0,46	0,6193	0,61	0,6622	0,76	0,7594
0,17	0,5999	0,32	0,6045	0,47	0,6210	0,62	0,6667	0,77	0,7687
0,18	0,6001	0,33	0,6051	0,48	0,6229	0,63	0,6714	0,78	0,7783
0,19	0,6002	0,34	0,6058	0,49	0,6250	0,64	0,6763	0,79	0,7884

[1] Из „Principles and Practice of Flow Meter Engineering", Foxboro Co.

Правила конструирования и установки счетчиков

Приводимые в этой книге коэфициенты для диафрагменных счетчиков можно применять с достаточной точностью только тогда, когда конструирование счетчика и его установка производятся согласно приводимым ниже правилам. Эти последние выработаны в результате внимательного исследования вопроса, начатого еще в 1924 г.

Область применения правил

Упомянутые правила и указания относятся и должны применяться к следующим двум типам диафрагменных счетчиков: 1) к счетчикам с круглыми отверстиями, расположенными концентрически к окружности сечения трубы, причем штуцера для измерения давления до и после диафрагмы расположены во фланцах, в связи с чем эти счетчики известны под названием „счетчиков с фланцевым соединением", и 2) к счетчикам с круглыми отверстиями, которые также расположены концентрически к окружности сечения трубы, но в которых штуцера до и после диафрагмы расположены на самом трубопроводе, вследствие чего они известны под именем „счетчиков с трубным соединением".

А. Правила устройства и установки счетчиков. 1. Отверстие со стороны потока должно иметь прямоугольную острую кромку.

2. Передняя часть диафрагмовой шайбы должна быть гладкой и перпендикулярной к оси трубы после установки.

3. Толщина диафрагмы должна быть не больше 3,2 *мм* ($^1/_8$"), а при диафрагмах с отверстиями — меньше 12,7 *мм* ($^1/_2$") в диаметре; толщина не должна

Значение C_w в счетчиках с фланцевым соединением [1]

Коэфициенты для воды — в *л/час* при 15,56° С.

Вода находится на поверхности ртути: $F_G = 1{,}0$

Отверстие в дм.	C_w для трубы 2" (2,067")	C_w для трубы 3" (3,068")	C_w для трубы 4" (4,026")	C_w для трубы 6" (6,065")	C_w для трубы 8" (8,071")
0,125	11,58	11,57	11,57	11,57	11,57
0,250	46,36	46,36	46,32	46,35	46,32
0,375	104,5	104,3	104,3	104,2	104,2
0,500	186,1	185,6	185,4	185,3	185,3
0,625	291,9	290,4	290	289,7	289,6
0,750	423,1	418,9	418,3	417,4	417,1
0,875	562,1	571,5	569,6	568,5	568,1
1,000	772,5	749	744,8	742,9	742,2
1,125	1 001,1	953	944,7	940,5	939,4
1,250	1 276	1 183	1 168,4	1 161	1 160
1,375	1 615	1 445	1 418	1 407	1 404
1,500	2 026	1 741	1 694	1 676	1 672
1,625	2 546	2 075	1 999	1 969	1 963
1,750	—	2 454	2 333	2 286	2 278
1,875	—	2 889	2 700	2 629	2 617
2,000	—	3 384	3 103	2 997	2 979
2,125	—	3 959	3 545	3 391	3 366
2,250	—	4 576	4 031	3 815	3 778
2,375	—	5 404	4 568	4 261	4 212
2,500	—	—	5 162	4 738	4 674
2,625	—	—	5 832	5 249	5 162
2,750	—	—	6 563	5 791	5 673
2,875	—	—	7 387	6 365	6 211,1
3,000	—	—	8 319	6 975	6 778
3,125	—	—	9 367	7 626	7 373
3,250	—	—	—	8 319	7 997
3,375	—	—	—	9 061	8 643
3,500	—	—	—	9 848	9 333
3,625	—	—	—	10 692	10 049
3,750	—	—	—	11 567	10 798
3,875	—	—	—	12 586	11 595
4,000	—	—	—	13 607	12 407
4,125	—	—	—	14 742	13 270
4,250	—	—	—	15 934	14 174
4,375	—	—	—	17 240	15 121
4,500	—	—	—	18 652	16 116
4,625	—	—	—	20 181	17 161
4,750	—	—	—	21 839	18 258
4,875	—	—	—	23 637	19 417
5,000	—	—	—	—	20 636
5,125	—	—	—	—	21 919
5,250	—	—	—	—	23 270
5,375	—	—	—	—	24 705
5,500	—	—	—	—	26 216
5,625	—	—	—	—	27 816
5,750	—	—	—	—	29 506
5,875	—	—	—	—	31 306
6,000	—	—	—	—	33 213
6,125	—	—	—	—	35 235
6,250	—	—	—	—	37 385
6,375	—	—	—	—	39 678
6,500	—	—	—	—	42 112

Примечание. Коэфициенты для диафрагм, диаметры которых относительно велики по сравнению с диаметром труб, подчеркнуты. Эти коэфициенты не следует применять в том случае, когда желательно получить точные результаты при подсчетах.

[1] Из „Flow Meter Engineering" Foxboro Co.

Таблица 54

Стандартные коэффициенты часового расхода жидкостей в счетчиках с трубным соединением

Значения C_w для жидкостей

$$C_w = 1{,}91965\, C'_1 d^2$$

$$V_h = 0{,}1984\, C_w F_T F_G \sqrt{h_m}$$

Отверстие в дм.	2" $D = 2{,}067$	3" $D = 3{,}068$	4" $D = 4{,}023$	6" $D = 6{,}065$	8" $D = 8{,}071$
d	C_w	C_w	C_w	C_w	C_w
0,125	11,6	11,6	11,6	11,6	11,5
0,250	46,6	46,6	46,2	46,2	46,2
0,375	106,4	104,8	104,5	104,5	104,1
0,500	192,7	188,1	186,6	185,5	185,1
0,625	307,7	296,4	293,3	290,3	289,9
0,750	458,0	435,3	423,9	420,1	416,3
0,875	651,0	598,0	582,9	575,3	571,5
1,000	893,3	798,6	772,1	753,2	745,6
1,125	1 192,3	1 025,7	987,9	957,6	946,2
1,250	1 601,1	1 309,6	1 238,9	1 184,7	1 173,3
1,375	—	1 635,1	1 517,8	1 445,9	1 423,2
1,500	—	2 021,2	1 843,3	1 737,3	1 699,5
1,625	—	2 460,2	2 206,7	2 055,3	2 002,3
1,750	—	2 966,4	2 623,0	2 395,9	2 335,3
1,875	—	—	3 092,3	2 778,2	2 694,9
2,000	—	—	3 622,2	3 194,5	3 084,8
2,125	—	—	4 201,3	3 645,0	3 501,1
2,250	—	—	4 806,9	4 125,6	3 936,4
2,375	—	—	5 677,5	4 693,4	4 428,4
2,500	—	—	—	5 185,4	4 920,5
2,625	—	—	—	5 904,6	5 488,2
2,750	—	—	—	6 548,0	6 093,8
2,875	—	—	—	7 342,9	6 699,4
3,000	—	—	—	8 137,7	7 380,7
3,125	—	—	—	8 970,4	8 062,0
3,250	—	—	—	9 878,8	8 819,0
3,375*	—	—	—	10 900,8	9 651,7
3,500	—	—	—	12 074,1	10 484,5
3,625	—	—	—	13 323,2	11 392,8
3,750	—	—	—	—	12 414,8
3,875	—	—	—	—	13 398,9
4,000	—	—	—	—	14 458,7
4,125	—	—	—	—	15 632,0
4,250	—	—	—	—	16 767,5

Примечание. Штуцер для давления до диафрагмы установлен на расстоянии 2 диаметров от лицевой стороны ее.

Штуцер после диафрагмы установлен на расстоянии 8 диаметров от лицевой стороны ее.

Отверстие счетчика должно быть концентрично с трубой; со стороны потока кромка отверстия должны быть прямоугольными и острыми.

Горловина — менее 1/3 диаметра.

Единица измерения — л/час при температуре 15,56° С.

Вода — на поверхности ртути.

Поправочные коэфициенты на удельный вес (F_G) кислотных и соляных растворов [1]

Удельный вес жидкости над ртутью в манометре тот же, что и удельный вес замеряемой жидкости

°Bé	Уд. вес G_f	Коэфициент F_G	°Bé	Уд. вес G_f	Коэфициент F_G
1	1,0069	0,996	36	1,3303	0,856
2	1,0140	0,993	37	1,3426	0,851
3	1,0211	0,989	38	1,3551	0,847
4	1,0284	0,985	39	1,3679	0,842
5	1,0357	0,981	40	1,3810	0,838
6	1,0432	0,977	41	1,3942	0,834
7	1,0507	0,974	42	1,4078	0,829
8	1,0584	0,970	43	1,4216	0,825
9	1,0662	0,966	44	1,4356	0,820
10	1,0741	0,962	45	1,4500	0,815
11	1,0821	0,958	46	1,4646	0,811
12	1,0902	0,954	47	1,4796	0,806
13	1,0985	0,950	48	1,4948	0,802
14	1,1069	0,946	49	1,5104	0,797
15	1,1154	0,943	50	1,5263	0,792
16	1,1240	0,939	51	1,5426	0,788
17	1,1328	0,935	52	1,5591	0,783
18	1,1417	0,931	53	1,5761	0,778
19	1,1508	0,927	54	1,5934	0,773
20	1,1600	0,923	55	1,6111	0,768
21	1,1694	0,918	56	1,6292	0,764
22	1,1789	0,914	57	1,6477	0,759
23	1,1885	0,910	58	1,6667	0,754
24	1,1983	0,906	59	1,6860	0,749
25	1,2083	0,902	60	1,7059	0,744
26	1,2185	0,898	61	1,7262	0,739
27	1,2288	0,894	62	1,7470	0,734
28	1,2393	0,890	63	1,7683	0,729
29	1,2500	0,886	64	1,7901	0,724
30	1,2609	0,881	65	1,8125	0,718
31	1,2719	0,877	66	1,8354	0,713
32	1,2832	0,871	67	1,8590	0,708
33	1,2946	0,869	68	1,8831	0,703
34	1,3063	0,863	69	1,9079	0,697
35	1,3182	0,860	70	1,9333	0,692

[1] Из „Flow Meter Engineering", Foxboro Co.

Поправочные коэфициенты на удельный вес (F_G) [1] нефтепродуктов

Удельный вес продукта над ртутью в манометре тот же, что и удельный вес замеряемого продукта

°A. P. I.	Уд. вес G_f	Коэфициент F_G	°A. P. I.	Уд. вес G_f	Коэфициент F_G	°A. P. I.	Уд. вес G_f	Коэфициент F_G
10	1,0000	1,000	57	0,7507	1,166	104	0,6309	1,310
11	0,9930	1,004	58	0,7467	1,169			
12	0,9861	1,006	59	0,7428	1,172	105	0,6283	1,313
13	0,9792	1,011				106	0,6258	1,316
14	0,9725	1,015	60	0,7389	1,175	107	0,6234	1,319
			61	0,7351	1,178	108	0,6208	1,322
15	0,9659	1,019	62	0,7313	1,182	109	0,6184	1,325
16	0,9593	1,023	63	0,7275	1,185			
17	0,9529	1,026	64	0,7238	1,188	110	0,6158	1,327
18	0,9465	1,030				111	0,6135	1,330
19	0,9402	1,034	65	0,7201	1,191	112	0,6111	1,333
			66	0,7165	1,195	113	0,6087	1,336
20	0,9340	1,037	67	0,7128	1,198	114	0,6064	1,339
21	0,9279	1,041	68	0,7093	1,201			
22	0,9218	1,045	69	0,7057	1,204	115	0,6040	1,342
23	0,9159	1,048				116	0,6017	1,345
24	0,9100	1,052	70	0,7022	1,207	117	0,5994	1,348
			71	0,6988	1,211	118	0,5971	1,350
25	0,9042	1,056	72	0,6952	1,214	119	0,5947	1,353
26	0,8984	1,059	73	0,6919	1,217			
27	0,8927	1,063	74	0,6886	1,220	120	0,5926	1,356
28	0,8871	1,066				121	0,5904	1,359
29	0,8816	1,070	75	0,6852	1,223	122	0,5882	1,362
			76	0,6819	1,226	123	0,5860	1,365
30	0,8762	1,074	77	0,6787	1,229	124	0,5838	1,367
31	0,8708	1,077	78	0,6754	1,232			
32	0,8654	1,081	79	0,6722	1,235	125	0,5817	1,370
33	0,8602	1,084				126	0,5796	1,373
34	0,8550	1,088	80	0,6690	1,239	127	0,5774	1,375
			81	0,6659	1,242	128	0,5753	1,378
35	0,8498	1,091	82	0,6628	1,245	129	0,5732	1,381
36	0,8448	1,095	83	0,6597	1,248			
37	0,8398	1,098	84	0,6566	1,251	130	0,5711	1,384
38	0,8348	1,102				131	0,5691	1,387
39	0,8299	1,105	85	0,6535	1,254	132	0,5670	1,389
			86	0,6506	1,257	133	0,5650	1,392
40	0,8251	1,109	87	0,6476	1,260	134	0,5630	1,395
41	0,8203	1,112	88	0,6446	1,263			
42	0,8155	1,115	89	0,6417	1,266	135	0,5610	1,397
43	0,8109	1,119				136	0,5590	1,400
44	0,8063	1,122	90	0,6388	1,269	137	0,5570	1,403
			91	0,6360	1,272	138	0,5551	1,406
45	0,8017	1,126	92	0,6331	1,275	139	0,5531	1,408
46	0,7972	1,129	93	0,6303	1,278			
47	0,7927	1,132	94	0,6275	1,281	140	0,5512	1,411
48	0,7883	1,136				141	0,5193	1,414
49	0,7839	1,139	95	0,6247	1,284	142	0,5184	1,417
			96	0,6220	1,287	143	0,5155	1,419
50	0,7796	1,142	97	0,6193	1,290	144	0,5136	1,422
51	0,7753	1,146	98	0,6165	1,293			
52	0,7711	1,149	99	0,6139	1,296	145	0,5117	1,424
53	0,7669	1,152				146	0,5099	1,427
54	0,7628	1,156	100	0,6112	1,299	147	0,5081	1,430
			101	0,6085	1,302	148	0,5063	1,433
55	0,7587	1,159	102	0,6060	1,304	149	0,5045	1,435
56	0,7547	1,162	103	0,6034	1,307	150	0,5027	1,438

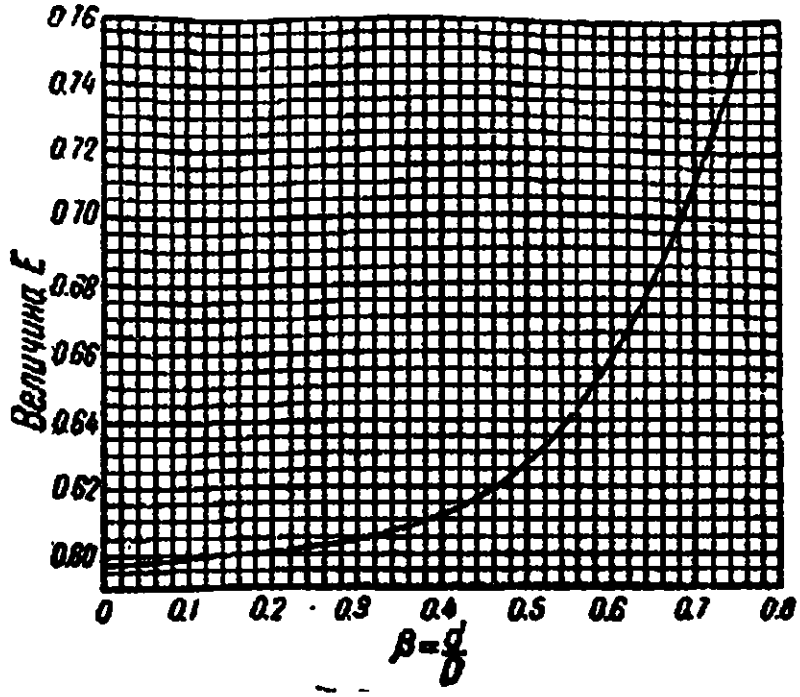
[1] Из „Flow Meter Engineering", Foxboro Co.

Таблица 57

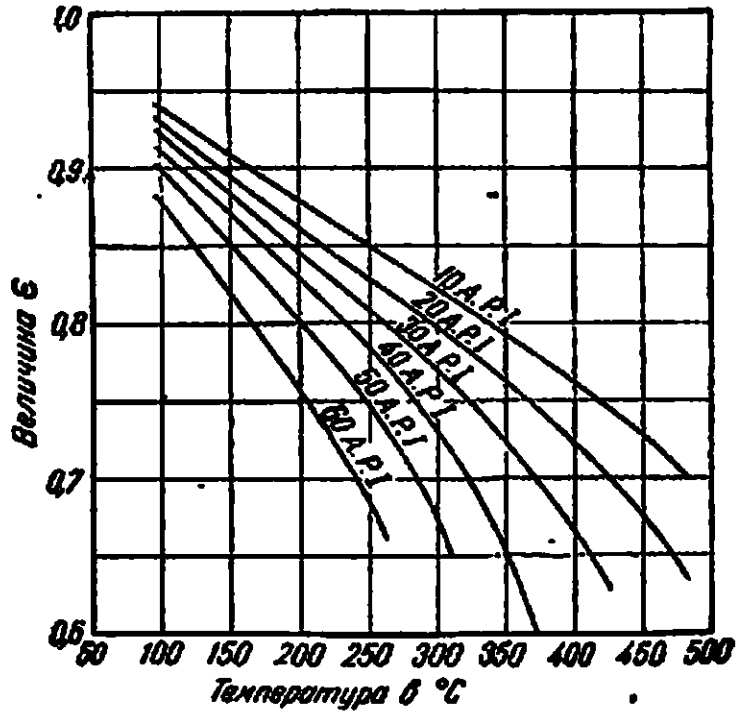
Поправочные коэфициенты на объем нефтепродуктов (F_T) при температуре хранилища в 15,56° С [1]

Температура °F	Температура °С	1 уд. вес 10° A.P.I.	0,934 уд. вес 20° A.P.I.	0,876 уд. вес 30° A.P.I.	0,825 уд. вес 40° A.P.I.	0,780 уд. вес 50° A.P.I.	0,739 уд. вес 60° A.P.I.	0,702 уд. вес 70° A.P.I.	0,669 уд. вес 80° A.P.I.	0,639 уд. вес 90° A.P.I.
0	— 17,78	1,0223	1,0239	1,0256	1,0284	1,0324	1,0370	1,0411	1,0451	1,0496
5	— 15,00	1,0204	1,0219	1,0234	1,0261	1,0297	1,0339	1,0377	1,0414	1,0455
10	— 12,22	1,0185	1,0199	1,0213	1,0237	1,0270	1,0309	1,0343	1,0377	1,0414
15	— 9,44	1,0166	1,0179	1,0192	1,0213	1,0243	1,0278	1,0309	1,0340	1,0373
20	— 6,67	1,0148	1,0159	1,0170	1,0189	1,0216	1,0247	1,0275	1,0302	1,0332
25	— 3,89	1,0129	1,0139	1,0149	1,0166	1,0189	1,0217	1,0241	1,0265	1,0291
30	— 1,11	1,0111	1,0119	1,0128	1,0142	1,0162	1,0186	1,0207	1,0227	1,0250
35	+ 1,67	1,0092	1,0099	1,0106	1,0119	1,0135	1,0155	1,0172	1,0190	1,0209
40	4,44	1,0073	1,0079	1,0085	1,0095	1,0108	1,0124	1,0138	1,0152	1,0167
45	7,22	1,0055	1,0059	1,0064	1,0071	1,0081	1,0093	1,0104	1,0114	1,0125
50	10,00	1,0037	1,0039	1,0042	1,0047	1,0054	1,0062	1,0069	1,0076	1,0084
55	12,78	1,0018	1,0020	1,0021	1,0024	1,0027	1,0031	1,0035	1,0038	1,0042
60	15,56	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
65	18,33	0,9982	0,9980	0,9979	0,9976	0,9973	0,9969	0,9965	0,9962	0,9958
70	21,11	0,9964	0,9961	0,9958	0,9953	0,9946	0,9938	0,9931	0,9924	0,9916
75	23,89	0,9946	0,9941	0,9937	0,9923	0,9919	0,9907	0,9896	0,9885	0,9874
80	26,67	0,9928	0,9922	0,9915	0,9905	0,9891	0,9876	0,9861	0,9847	0,9832
85	29,44	0,9910	0,9902	0,9894	0,9881	0,9864	0,9844	0,9826	0,9809	0,9789
90	32,22	0,9892	0,9883	0,9873	0,9858	0,9837	0,9813	0,9792	0,9770	0,9747
95	35,00	0,9874	0,9863	0,9852	0,9834	0,9810	0,9782	—	—	—
100	37,78	0,9856	0,9844	0,9831	0,9811	0,9783	0,9751	—	—	—
105	40,56	0,9838	0,9825	0,9810	0,9787	0,9756	0,9720	—	—	—
110	43,33	0,9820	0,9806	0,9789	0,9763	0,9729	0,9689	—	—	—
115	46,11	0,9802	0,9786	0,9768	0,9739	0,9702	0,9657	—	—	—
120	48,89	0,9785	0,9767	0,9747	0,9716	0,9674	0,9626		—	—
125	51,67	0,9767	0,9748	0,9726	0,9692	0,9647	0,9595	—	—	—
130	54,44	0,9750	0,9729	0,9705	0,9669	—	—	—	—	—
135	57,22	0,9732	0,9710	0,9684	0,9645	—	—	—	—	—
140	60,00	0,9715	0,9691	0,9664	0,9622	—	—	—	—	—
145	62,78	0,9698	0,9672	0,9643	0,9598	—	—	—	—	—
150	65,56	0,9680	0,9653	0,9622	0,9574	—	—	—	—	—
155	68,33	0,9663	0,9634	0,9601	—	—	—	—	—	—
160	71,11	0,9646	0,9615	0,9580	—	—	—	—	—	—
165	73,89	0,9629	0,9597	0,9560	—	—	—	—	—	—
170	76,67	0,9612	0,9578	0,9539	—	—	—	—	—	—
175	79,44	0,9595	0,9559	0,9518	—	—	—	—	—	—

[1] Из „Flow Meter Engineering", Foxboro Co.

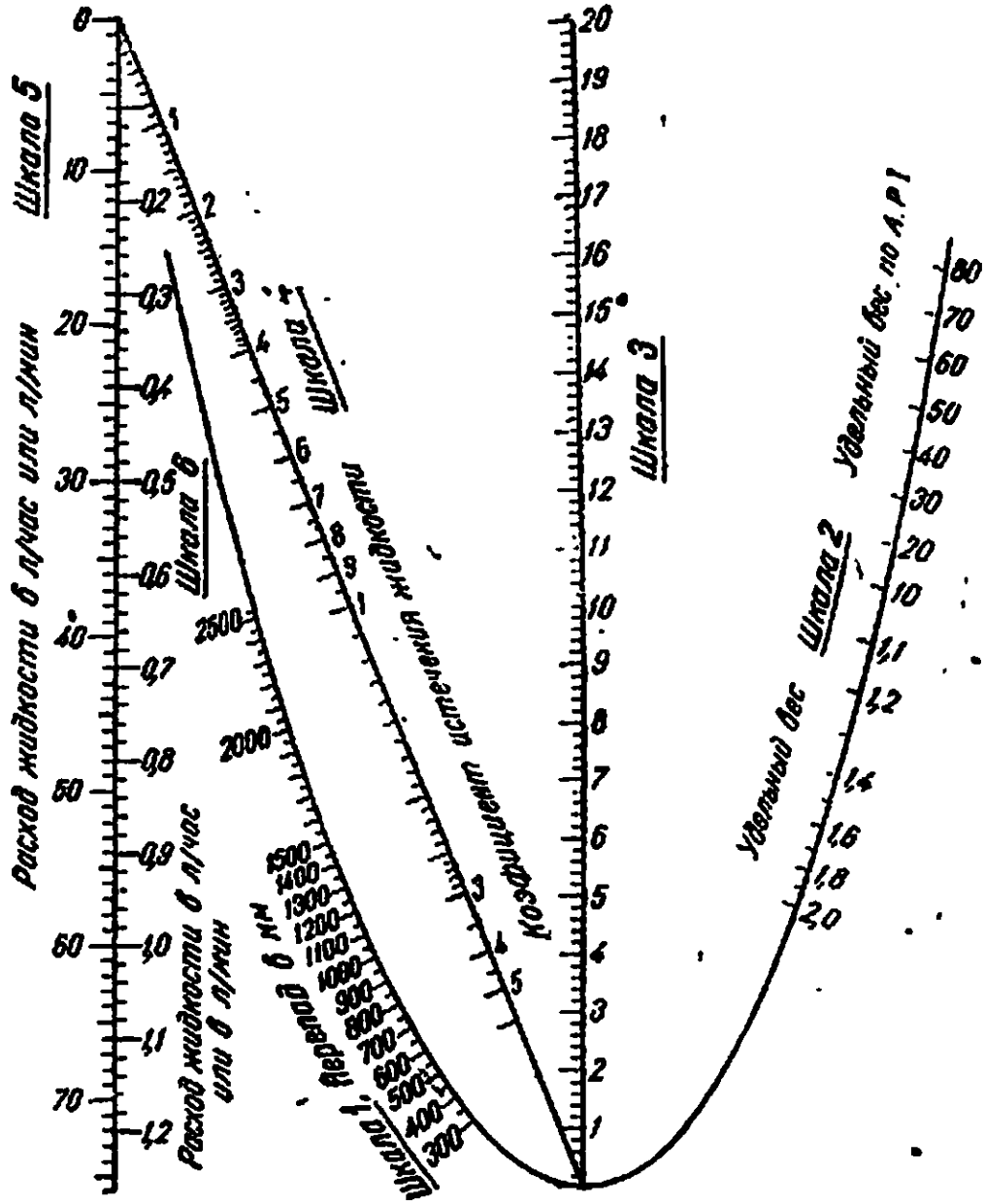


Фиг. 41. Кривая E для жидкостей.



Фиг. 42. Кривые поправочных коэфициентов на объем нефтяных масел при высоких температурах (поправка сделана на температуру 15,56° С).

Примечание. Давление должно быть достаточно для предотвращения испарения.



Фиг. 43. Кривые расхода жидкостей. Диаграмма для выбора диаметра диафрагмы.

Чтобы найти диаметр отверстия диафрагмы при данных условиях движения: 1) проводят прямую линию от перепада на шкале *1* до удельного веса на шкале 2, после чего можно зачитать результаты на шкале *5*; 2) проводят прямую линию отсчета на шкале *5* к шкале *5* или *6*; пересечение этой линии со шкалой *4* даст искомый коэфициент; 3) выбирают диаметр отверстия из табл. 53 с несколько бо́льшим коэфициентом, чем тот, который получился в точке пересечения прямых на шкале *4*

превышать 1,6 *мм* ($^1/_{16}$"). Если для этого необходимо скашивание края, то последнее делают на задней стороне диафрагмы, причем угол скоса по отношению к оси трубы должен быть не менее 45°.

4. Те секции труб, которые близко прилегают к фланцам счетчика, должны быть как можно ближе к цилиндрическим, гладким, свободным от пузырей, включений и т. д. Разность между внутренним диаметром трубы до диафрагмы и после нее не должна превышать 0,5%.

5. Штуцера для снятия давления располагаются следующим образом.

В счетчиках с фланцевым соединением центральная ось верхних (по току) штуцеров должна быть расположена на 25,4 *мм* (1") от передней (по току) стороны диафрагмы.

Ось штуцера после диафрагмы должна быть расположена не ближе чем на 28,6 *мм* ($1^1/_8''$) и не дальше чем на 32 *мм* ($1^1/_4''$) от передней (по току) стороны диафрагмы.

В счетчиках с трубным соединением верхний штуцер до диафрагмы должен быть расположен на расстоянии 2,5 диаметров от передней стороны диафрагмы; нижний штуцер после диафрагмы должен быть расположен на расстоянии 8 диаметров от передней стороны диафрагмы.

6. В счетчиках с фланцевым соединением диаметр отверстия для измерения давления должен не превышать 19 *мм* ($^3/_4''$) и быть не меньше 6 *мм* ($^1/_4''$).

Края этих отверстий по внутренней поверхности трубы должны быть свободны от грубых шероховатостей и несколько округлены путем протирки тонкой наждачной бумагой.

В счетчиках с трубным соединением подводка от манометров к штуцерам в трубах, имеющих фланцы для диафрагмы, должна иметь диаметр не менее 6 *мм* ($^1/_4''$). Концы этих трубок должны быть гладкие и подвинчены так, чтобы быть на уровне внутренней поверхности главной трубы.

Б. Установка шайб счетчиков, решеток, выпрямляющих поток, фитингов и т. д. Даваемые здесь указания по поводу установки счетчика, его частей, соединений и решеток, взяты из правил, опубликованных в отчете Газового комитета (1927 г.), просмотренных 1/III 1929 г. и измененных на заседании Комитета 14/IV 1930 г.

Правило 2. *Поворотные колена с поворотом в двух плоскостях.* Если на расстоянии 100 диаметров трубы от диафрагмы со стороны потока в трубопроводе имеются иные сопротивления, кроме фланцев, муфт, открытых задвижек, поворотов, колен или тройников, которые расположены в одной и той же плоскости, то устанавливают ряд выпрямляющих поток труб между штуцером до диафрагмы и ближайшим сопротивлением, причем расстояние должно быть не меньше 6 диаметров от штуцера (фиг. 44 и 45).

Правило 3. *Регулятор давления до диафрагмы.* Если регулирующий клапан, регулятор, дифференциальный или контрольный клапаны или другой какой-либо распределяющий прибор или фитинг расположены до диафрагмы на расстоянии 200 диаметров трубы от нее, то нужно установить решетки (фиг. 46 и 47).

Правило 4. *Минимальная длина прямого участка трубы, при котором не требуется решеток.* Длина прямого участка от штуцера давления до ближайшего фитинга или поворота со стороны потока должна быть не меньше 10 диаметров трубы. Длина прямого участка трубы после диафрагмы должна быть не меньше 5 диаметров трубы (фиг. 48 и 49), считая от штуцера давления.

Правило 5. *Установка регулятора давления после диафрагмы.* Регулятор давления, дифференциальный или контрольный клапаны устанавливаются после диафрагмы не ближе чем на расстоянии 10 диаметров трубы от штуцера (за диафрагмой).

Решетки. Приводимые правила относительно установки и применения решеток основаны главным образом на результате опытов, произведенных Комитетом. В этих опытах ставились либо решетки обычного типа, указанного на фиг. 49, либо радиальные (решетки трубчатого типа, фиг. 50).

Приводимые здесь указания применимы к типу решеток, показанных на фиг. 50. Ниже даны диаметры труб решетки и их отношения к диаметру основной трубы и длина решетки. Эти данные основаны на целом ряде опытов. При устройстве и установке других типов решеток следует также придерживаться настоящих указаний. Основные принципы установки устройства решеток сводится к следующему:

1) наибольшая величина внутреннего сечения отдельной ячейки решетки не должна превышать $^1/_4$ внутреннего диаметра трубы;

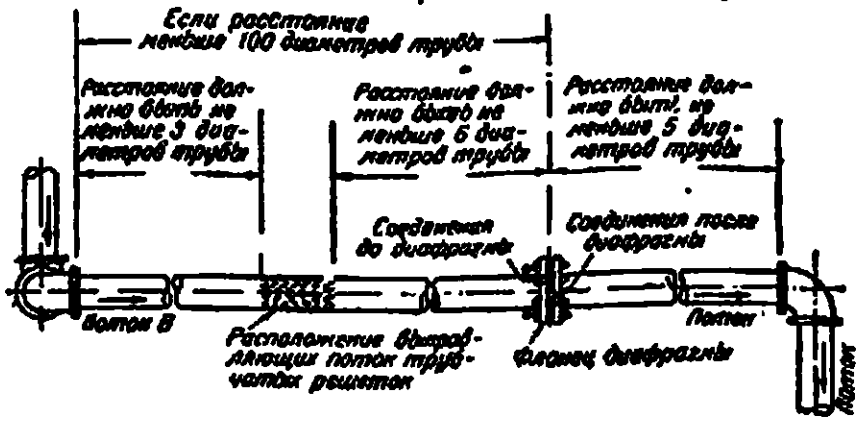
2) длина решеток должна быть не меньше десятикратной величины, приводимой в п. 1.

Назначение решеток заключается в устранении вихрей и встречных потоков для того, чтобы газ шел ламинарным потоком по всей трубе.

Решетки делаются из труб стандартного веса или же из тонкостенных труб, сваренных и собранных или в ниппели, так что при сборке они вставляются как отдельная секция в линию, или же монтируемых по концам в два кольца. Эти кольца должны иметь размеры, не препятствующие их проходу через трубу. В трубе они укрепляются установочными винтами.

Если решетки делаются из толстостенных трубок, то края их срезаются настолько, чтобы стенки по краям были тоньше.

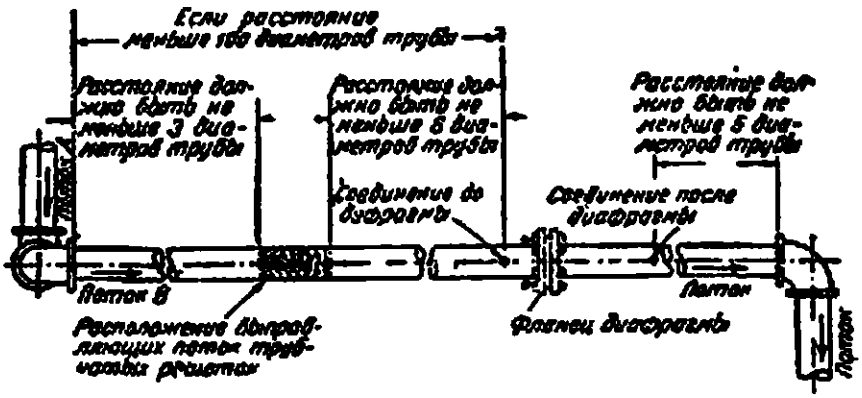
Для решеток можно употреблять также трубки квадратного или шестигранного сечения. Нет необходимости, чтобы все трубки решетки имели одинаковые диаметры в свету, но они должны быть расположены симметрично и однообразно;



Фиг. 44. Пояснение к правилу 2 по установке счетчиков с фланцевыми соединениями.

Примечания. 1. Когда оба колена до диафрагмы не расположены в одной и той же плоскости, иначе говоря, поток *А* не идет по тому направлению, по которому идет поток *В*, то устанавливать выправляющие поток трубы обязательно при условии, что расстояние от фланца счетчика до угла поворота меньше 100 диаметров трубы.

2. Если регулятор, дифференциальный или контрольный клапаны установлены после диафрагмы, то они должны быть не ближе 10 диаметров трубы от штуцера после диафрагмы.



Фиг. 45. Пояснения к правилу 2 применительно к счетчикам с трубным соединением.

Примечания. 1. Когда оба колена до диафрагмы не расположены в одной и той же плоскости, иначе говоря, поток *А* не идет по тому направлению, по которому идет поток *В*, то устанавливать выправляющие поток трубы обязательно; необходимость в этом отпадает только в том случае, если расстояние от фланца счетчика до угла поворота равно 100 диаметрам трубы или превышает это расстояние.

2. Если регулятор, дифференциальный или контрольный клапан установлены после диафрагмы, то они должны быть не ближе 10 диаметров трубы, считая от соединения счетчика за диафрагмой.

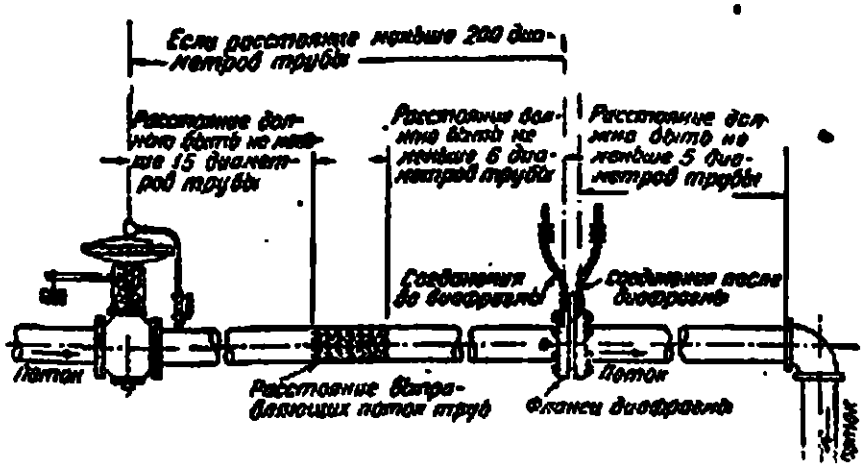
такое расположение их, когда, например, все широкие трубки находятся на одной стороне, а узкие на другой, или же в центре помещается труба большого диаметра, а вокруг нее трубки малого диаметра, не допускается.

Опыт показал, что нельзя допускать непрочного устройства решеток. Трубки решетки должны быть или прочно сварены, или каким-нибудь способом прочно соединены друг с другом с тем, чтобы их поломка и потеря в линии были заранее предотвращены.

Переходные патрубки. Если линия трубопровода на участке до диафрагмы (по течению) расширена при помощи переходного патрубка, что позволяет при-

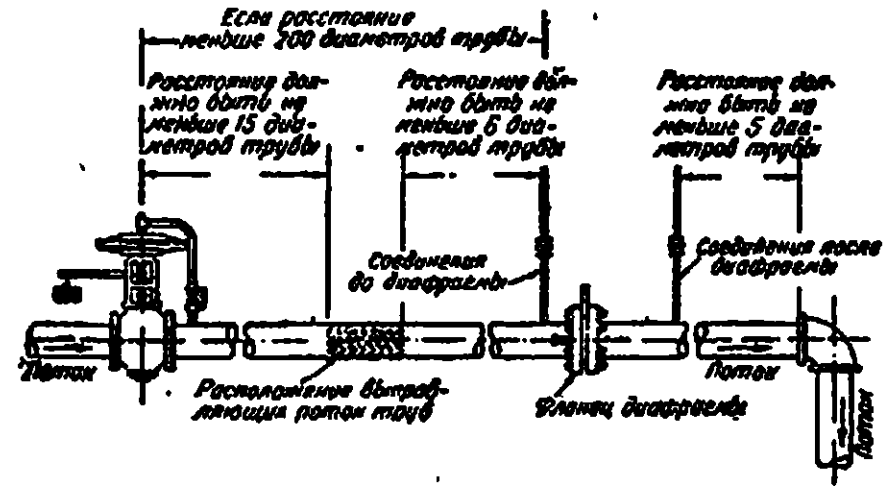
менять счетчик с фланцами более крупного диаметра, то расстояние между патрубками и штуцером давления до диафрагмы должно быть не меньше 10 диаметров трубопрово. а наибольшего диаметра.

Применение решеток не устраняет, однако, ошибок, которые могут возникнуть в связи с расширением трубы при помощи патрубков.



Фиг. 46. Пояснение к правилу 3 по установке счетчиков с фланцевыми соединениями.

Примечание. Если регулятор, дифференциальный или контрольный клапан расположены до диафрагмы на расстоянии менее 200 диаметров трубы от диафрагмы, то выпрямляющие поток трубы необходимы.



Фиг. 47. Пояснение к правилу 3 применительно к счетчикам с трубным соединением.

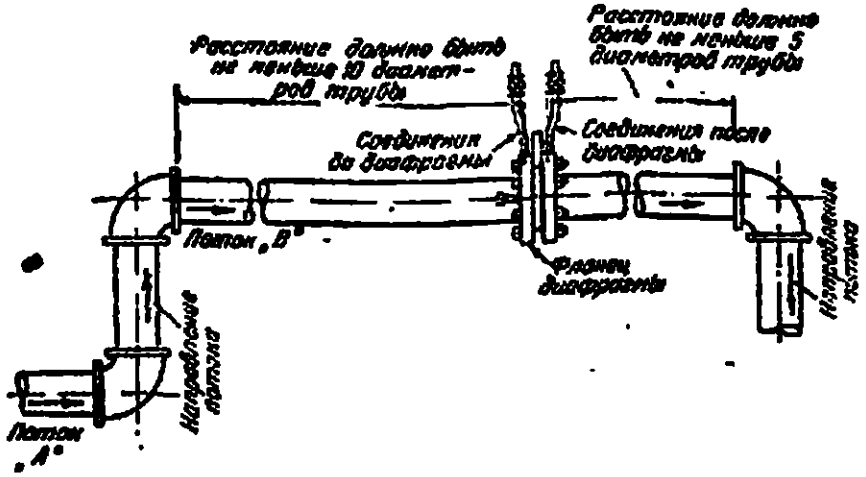
Примечание. Если регулятор, дифференциальный или контрольный клапан расположены до диафрагмы на расстоянии менее 200 диаметров трубы от диафрагмы, то выпрямляющие поток трубы необходимы.

В. Отношение диаметров и условия работы счетчика. 1. Обычно в практике диаметр отверстия диафрагмы в свету не должен превышать 0,6 внутреннего диаметра трубы. Если для производства каких-либо замеров необходимо большее отверстие диафрагмы, то рекомендуется соответственно расширить трубу и фланцы, но с тем, чтобы отношение диаметров оставалось в пределах 0,6 или менее.

2. Диафрагма должна быть тщательно установлена так, чтобы отверстие ее было концентрично с окружностью трубы.

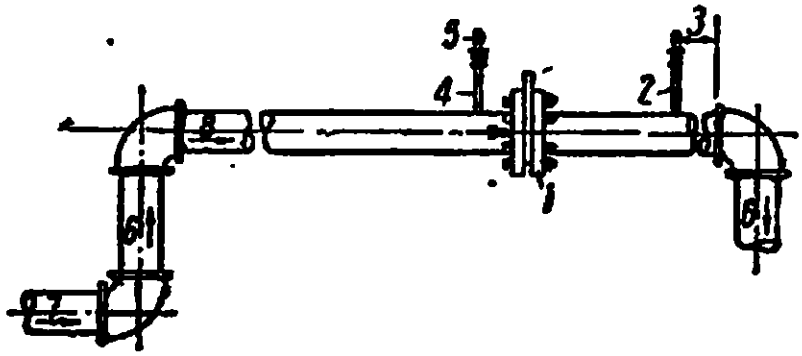
3. Для обеспечения точности замера необходимо поддерживать в чистоте плоскость диафрагмы и края отверстия.

4. Термометры следует устанавливать только после диафрагмы и на расстоянии не менее 3 диаметров трубы от нижнего (после диафрагмы) штуцера давления.



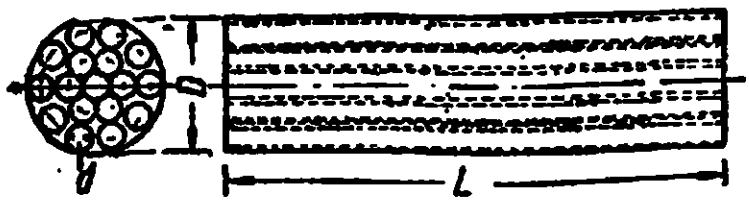
Фиг. 48. Пояснения к правилу 4 применительно к счетчикам с фланцевым соединением.

Примечание. Если фитинги до диафрагмы представляют собой два колена (или одно), расположенные в такой плоскости, как показано на фигуре, т. е. поток *A* движется в том же направлении, что и поток *B*, то ставить выпрямляющие поток трубы не нужно.



Фиг. 49. Пояснение к правилу 4 применительно к счетчикам с трубными соединениями.

Примечание. Если фитинги до диафрагмы представляют собою два колена (или одно), расположенные в такой плоскости, как показано на фигуре, т. е. поток *A* движется в том же направлении, что и поток *B*, то в выпрямляющих поток трубах нет необходимости.

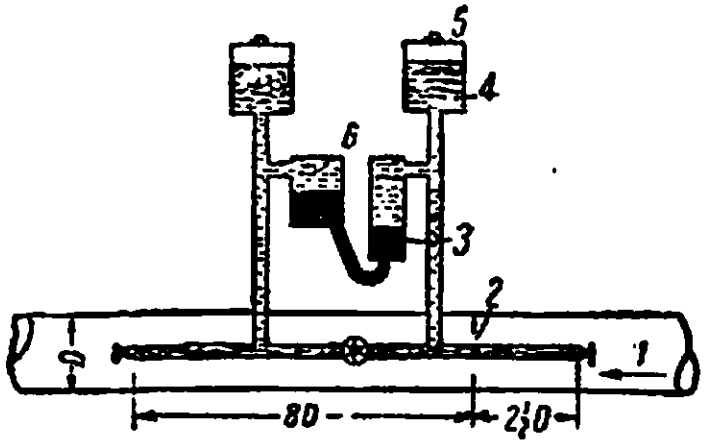


Фиг. 50. Решетка трубчатого типа для выпрямления потока.

d — диаметр труб решетки; *D* — внутренний диаметр трубы; *L* — длина труб решетки.

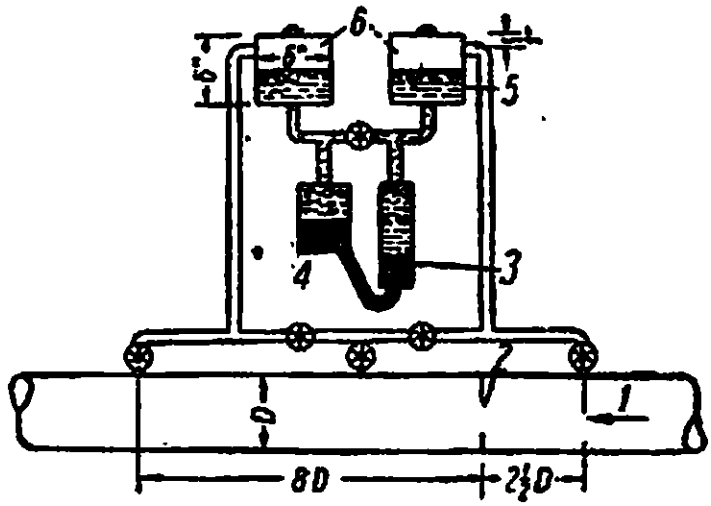
Установка диафрагменных счетчиков для замера жидкостей, не содержащих значительных количеств газа

Диафрагменные счетчики для замера жидкостей можно устанавливать либо на горизонтальной, либо на вертикальной линии. В общем, данные выше указания относительно размещения решеток, клапанов, поворотных колен и т. д., относящиеся к счетчикам для замера газа, применимы также и к жидкостным счетчикам. Манометрические трубки должны иметь соединения с трубами счетчика



Фиг. 51. Схема установки диафрагменного счетчика для жидкостей, содержащих некоторое количество увлеченного газа.

1 — направление потока; *2* — диафрагма; *3* — ртуть; *4* — газоотделитель; *5* — газ; *6* — счетчик.



Фиг. 52. Схема установки диафрагменного счетчика для газов, обладающих разъедающими свойствами.

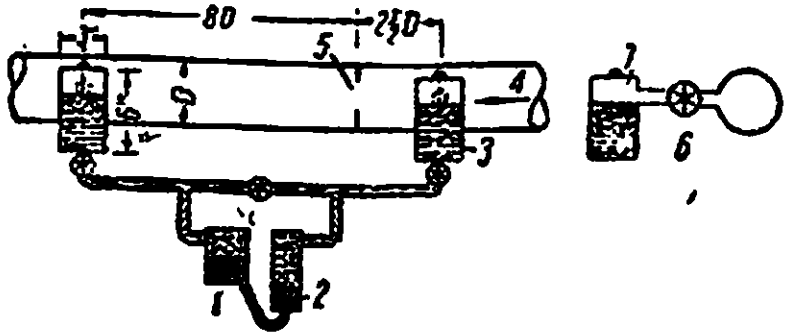
1 — направление потока; *2* — диафрагма; *3* — ртуть; *4* — счетчик; *5* — гидравлический затвор; *6* — воздух или газ.

сбоку. Если соединение сделано сверху, то они наполняются пузырьками увлеченного газа или воздуха; если же соединение сделано снизу, то они забиваются осадками.

На фиг. 51 дана схема установки диафрагменного счетчика с газоотделителями наверху, в которые собирается газ или воздух, могущие проникнуть в манометрические трубки. До тех пор, пока газ не попал в сосуды счетчиков, замер показывает действительный перепад.

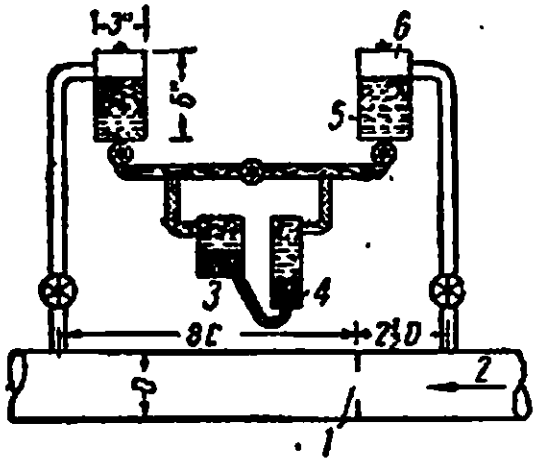
Замер корродирующих газов в диафрагменных счетчиках

Если газы действуют разъедающим образом на ртуть дифференциального манометра, то применяется гидравлический затвор, показанный на фиг. 52. Небольшая ошибка в замере перепада получается вследствие разности уровней жидкостей в гидравлическом затворе в обоих сосудах, однако, ее можно снизить до желаемой степени путем увеличения диаметра сосудов.



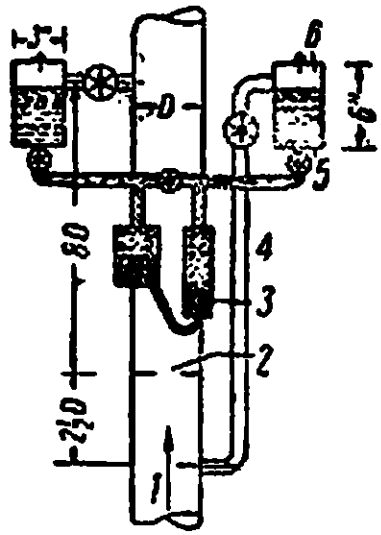
Фиг. 53. Схема установки счетчика пара; счетчик под трубой.

1 — счетчик; *2* — ртуть; *3* — вода; *4* — направление потока; *5* — диафрагма; *6* — поперечный разрез; *7* — пар.



Фиг. 54. Схема установки счетчика пара; счетчик — над трубой.

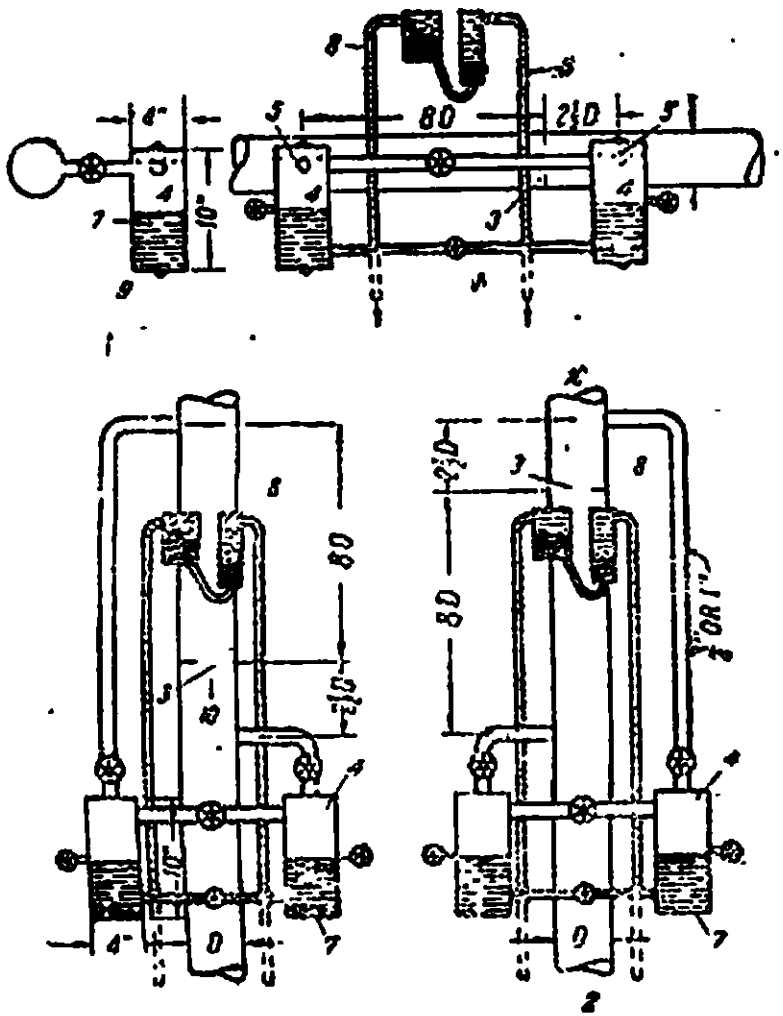
1 — диафрагма; *2* — направление потока; *3* — счетчик; *4* — ртуть; *5* — вода; *6* — пар.



Фиг. 55. Схема установки счетчика для замера пара на вертикальной линии.

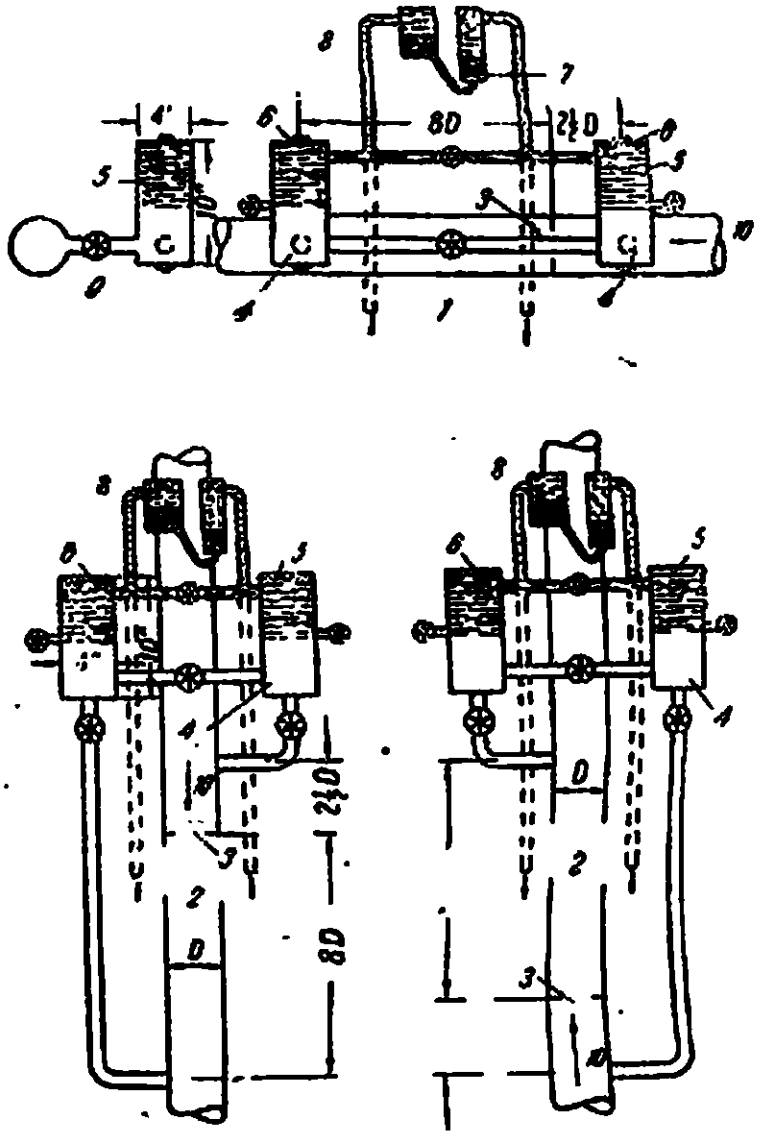
1 — направление потока; *2* — диафрагма; *3* — ртуть; *4* — счетчик; *5* — вода; *6* — пар.

Если применяется гидравлический затвор, то необходимо сделать поправку к коэфициенту для того, чтобы компенсировать изменения в показаниях манометра в связи с наличием непосредственно над ртутью жидкости, а не газа. Чтобы внести эту поправку, умножают стандартный коэфициент, взятый из таблиц 45 и 46 для C_0, на множитель $\sqrt{\frac{13{,}56-\gamma_s}{13{,}56}}$, где γ_s — удельный вес жидкости в гидравлическом затворе при температуре дифференциального манометра.



Фиг. 56. Схема установки счетчиков для замера масел и газолина.

1 — к счетчику, если он ниже линии; *2* — к счетчику, если он ниже резервуаров; *3* — диафрагма; *4* — масло; *5* — газ; *6* — ртуть; *7* — вода; *8* — счетчик; *9* — поперечный разрез; *10* — направление потока.



Фиг. 57. Схема установки счетчика для жидкостей тяжелее воды.

1 — к счетчику, если он ниже линии; *2* — к счетчику, если он ниже резервуаров; *3* — диафрагма; *4* — раствор; *5* — гидравлический затвор; *6* — газ; *7* — ртуть; *8* — счетчик; *9* — газ; *10* — направление потока.

ОТКЛОНЕНИЕ ГАЗОВ ОТ ЗАКОНОВ БОЙЛЯ

Отношение между объемом и давлением для всех газов отклоняется от общепринятого закона Бойля. Если давление превышает 3,5 *кг/см*², то это отклонение достаточно велико, и с ним следует считаться при замере газа. Если V_L выражает объем какого-нибудь количества газа данного веса, находящегося под давлением P_L, а V_H — объем того же газа при более высоком давлении P_H, то, согласно закону Бойля, получается следующее отношение:

$$\frac{P_L V_L}{P_H V_H} = 1.$$

В действительности, это отношение обычно бывает больше или меньше единицы; направление этого изменения и степень его зависят от характера газа, разности давления и температур для обоих состояний газа. Изложенное ниже имеет целью рассмотрение этого вопроса в применении к природному газу и его замеру.

Природный газ обладает способностью сильного сжатия и сильного расширения; после уменьшения давления он занимает больший объем, чем тот, который можно предположить на основании закона Бойля; соответственно этому указанное выше отношение будет больше единицы. Y выражает это отношение, которое определяется как „коэфициент отклонения в расширении газа", применяемый в газовом деле при замерах.

С повышением температуры газа степень отклонения от закона Бойля уменьшается.

Закон Бойля вместо $P_H V_H$ позволяет подставить $P_L V_{LT}$, где V_{LT} — теоретический объем газа при давлении P_L (полагая, что не было расширения газа больше, чем следует по закону Бойля); тогда получаем следующую формулу расширения:

$$\frac{P_L V_L}{P_L V_{LT}} = \frac{V_L}{V_{LT}} = Y \text{ (для расширения от } P_H \text{ до } P_L).$$

При замере объемным счетчиком отсчитанный объем при высоком давлении переводится на „свободный газ" при температуре 15,56° С и при некотором стандартном давлении, равном 1 *ат* или близком к ней. Этот объем выражается через V_{LT}; если Y заранее определено экспериментальным путем при температуре, которую имеет газ в счетчике, и при давлении газа, равном 1 *ат*, то можно внести поправку на отклонение, которая выразится следующим уравнением:

$$V_L = Y V_{LT}.$$

При замере газа в диафрагменных счетчиках V_{LT} определяется подобным же образом. Формула для потока, проходящего через счетчик:

$$Q = K \sqrt{\frac{hP}{ST}},$$

где K — константа; h — перепад давления; P — абсолютное давление; S — удельный вес; T — абсолютная температура.

В этом случае отклонение не только влияет на объем, но меняет также плотность движущегося газа.

Отсюда

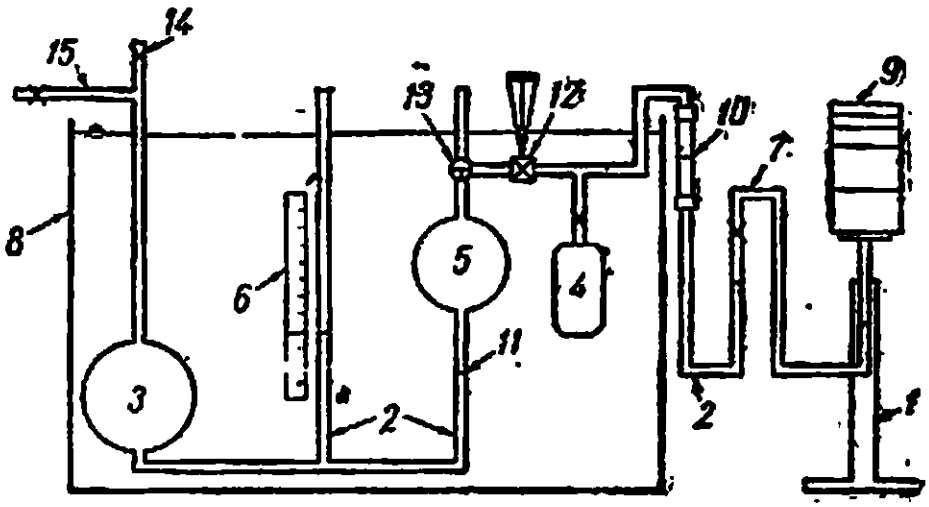
$$V_L = Q = YK \sqrt{\frac{hP}{YST}} = \sqrt{Y}\, V_{LT}.$$

Разумеется, формула для движения газов через диафрагму является также общей формулой движения через всякие отверстия или трубы. При желании решать вопросы движения газа по трубам с большой точностью необходимо

вводить тот коэфициент отклонения, который применяется для диафрагменных счетчиков, причем Y означает отклонение от среднего давления в трубе.

Прибор для определения степени отклонения, разработанный Бюро стандартов. Этот прибор удовлетворяет требованиям в отношении качества и точности замера в экспериментальной работе и вполне применим на практике для производства замеров в газовой промышленности. Схема этого прибора дана на фиг. 58.

Принцип работы прибора. Газ, находящийся в стальной бомбе под высоким давлением, проходит через контрольные клапаны, после чего его давление снижается до атмосферного; далее он переходит в стеклянную бюретку, так что после нескольких операций наполнения и опорожнения бюретки давление внутри бомбы снижается до 1 *ат*. Таким образом, если известна емкость бюретки, то



Фиг. 58. Схема прибора, разработанного Американским бюро стандартов для определения степени отклонения газов от закона Бойля.

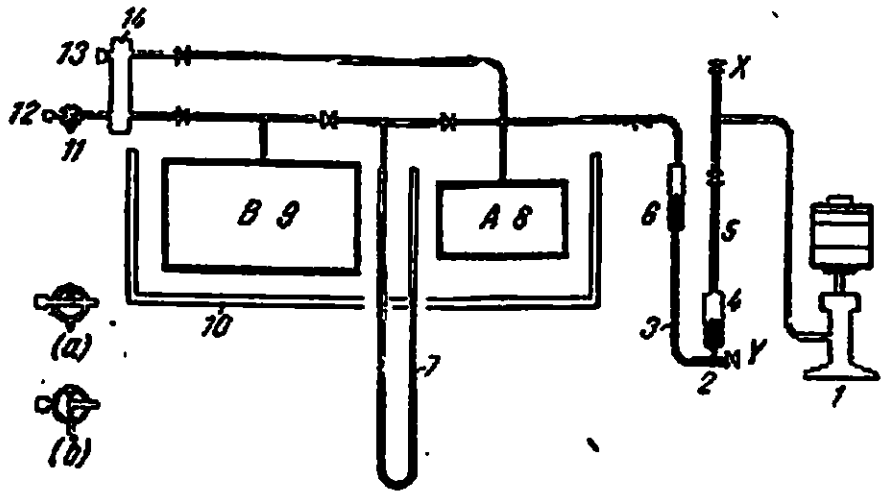
1 — цилиндр с поршнем; *2* — ртуть; *3* — сосуд с ртутью; *4* — бомба; *5* — бюретка; *6* — манометр; *7* — масло; *8* — водяная ванна, поддерживаемая при постоянной температуре; *9* — грузы; *10* — стеклянная трубка с указателем; *11* — градуировачная трубка; *12* — контрольный клапан; *13* — трехходовой кран; *14* — предохранительный клапан для воздуха; *15* — подача сжатого воздуха.

газ можно замерять при атмосферном давлении. С другой стороны, если известны емкость бомбы и давление внутри ее, то объем газа при атмосферном давлении можно подсчитать на основании закона Бойля. Деля объем газа, замеряемого в бюретке, на объем, вычисленный по закону Бойля, получаем коэфициент отклонения.

Работа с прибором. Бомбу наполняют газом, присоединяют к аппарату и открывают контрольный клапан. При закрытом предохранительном воздушном клапане и открытом трехходовом кране, соединенном с бюреткой, ртуть, под действием сжатого воздуха, переходит из баллона, в который она была налита, в бюретку, заполняя ее до уровня трехходового крана. После закрытия воздушного клапана и переключения трехходового крана для соединения бюретки с контрольным клапаном открываются предохранительный и контрольный клапаны, вследствие чего ртуть, вытесняемая газом из бомбы, переходит в градуированную трубку. Этот цикл повторяется до тех пор, пока давление в бомбе не дойдет до 1 *ат*. Замеряемый газ часто находится под давлением выше или ниже атмосферного в зависимости от манипуляций, производимых при работе с аппаратом. Эти изменения давления наблюдаются по манометру и вызывают необходимую поправку. Давление в бомбе отмечается при каждом цикле; при этом регулированием грузов на поршне ртуть приводится до указателя на стеклянной трубке. Эти замеры производятся таким образом, чтобы можно было использовать данные каждого цикла для вычисления коэфициентов отклонения при любом давлении в бомбе. На основании записи отдельных давлений, получающихся в бомбе в результате каждого цикла, и составляется кривая отклонений.

Опыт работы с таким прибором (который был сконструирован Pacific Gas and Electric Co) показал, что при максимальном давлении, равном 28,1 *кг/см²*, наиболее подходящее отношение объемов бюретки и бомбы равняется 2,5 при указанном давлении. Прибор дает возможность выявить целый ряд характерных точек в изменении давления, на основании которых можно составить кривую. Опыт может быть произведен в течение непродолжительного времени.

Необходимо внимательно следить за тем, чтобы в газовые пространства прибора не проникли вода или какие-нибудь промывочные жидкости, так как они превращаются в пары, и это сильно искажает результаты опыта. Бомба перед использованием должна быть высушена, и из нее должны быть выкачаны газ и воздух. До начала опыта нужно три раза пропустить газ через бомбу, после



Фиг. 59. Схема прибора „Pacific Gas and Electric Co" для определения степени отклонения газов от закона Бойля.

1 — прибор с мертвым грузом; *2* — трап; *3* — ртуть; *4* — горшок; *5* — масло; *6* — стеклянная трубка для высокого давления; *7* — ртутный манометр; *8* — бомба *A*; *9* — бюретка *B*; *10* — ванна; *11* — трехходовой кран; *12* — к вакуумному насосу; *13* — к бомбе для отбора пломб; *14* — соединительное устройство.

чего наполнять ее уже окончательно, очень медленно пропуская газ (лучше всего через хлопчатобумажный фильтр). Надо следить за тем, чтобы абсолютно устранена была возможность утечки газа.

Подробное описание работы с аппаратом и изложение методов вычислений имеется в статье H. S. Bean, Bureau of Stand., „Journ. of Research", май 1930, стр. 645.

Прибор для определения степени отклонения, разработанный Pacific Gas and Electric Co. Прибор, построенный этой компанией, основан на том же принципе, что и прибор Бюро стандартов, но устройство его проще; он более жесток и прочен, так как устроен весь из металла. Схема дана на фиг. 59.

Отношение объема бюретки к объему бомбы для этого аппарата около 4.

Система подсчета очень проста по сравнению с аппаратом Бюро стандартов.

Подробные данные об аппарате читатель может найти в „American Gas Journal" март 1932.

Принцип работы прибора. Газ, находящийся в бомбе *A* под высоким давлением, проходит через контрольный клапан *1*, и его давление снижается до атмосферного; далее он переходит в бюретку *B*, заранее опорожненную. После нескольких операций наполнения и опорожнения бюретки давление в бомбе *A* снижается до 1 *ат*.

Таким образом, газ можно замерять при атмосферном давлении. Если давление и емкость бомбы известны, то можно вычислить объем газа при атмосферном давлении по закону Бойля; деля объем газа, замеряемого в бюретке, на объем, вычисленный по закону Бойля, получаем коэфициент отклонения.

Работа с прибором. Для отбора пробы газа бомбу не снимают с аппарата, а наполняют ее путем специального соединения при закрытых кранах *1* и *6*. После

закрытия крана *5* кран *6* открывают, и берется отсчет давления. При открытых кранах *2* и *3* бюретка опорожняется. После этого закрывают кран *3* и записывают показания манометра. Затем кран *1* открывают, бюретку наполняют газом, а кран *1* закрывают, причем записывают показания манометра. Этот процесс продолжается до тех пор, пока давление в бомбе не снизится до 1 *am*. Краном *2* пользуются только для проверки того, что кран *1* не дает утечки.

Калибровка. Соотношение объемов газов в бюретке и в бомбе для приборов обоего типа должно быть вычислено с точностью до 0,05%. Замер каждого объема в отдельности признан нежелательным и не дающим удовлетворительных результатов; поэтому непосредственно находят отношение объемов газа. Для этого проводят опыт над сухим воздухом, свободным от углекислого газа; поскольку отклонение в расширении воздуха известно, можно вычислить и отношение объема газа в бюретке к его объему в бомбе [1].

Таблица 58

Коэфициенты отклонения в расширении для сухого воздуха, не содержащего углекислого газа

Отнесено к давлению 1,035 *am* = 762 *мм* Hg

°C	Абсолютное давление в *кг/см²*			
	7,03	14,05	21,08	28,10
16,7	1,00233	1,00479	1,00703	1,00903
22,2	1,00204	1,00413	1,00597	1,00763

Другие методы определения степени отклонения. В прежние годы делали попытку вычислить отклонение газа от закона Бойля по составу газа, зная степень отклонения его отдельных составных частей. Однако в настоящее время мы не располагаем надежными данными такого порядка в отношении пропана, бутана или пентана. Если бы такие данные и имелись, то этот метод был бы все-таки затруднительнее и дороже указанных выше методов, так как фракционный анализ приходилось бы делать столько же раз, сколько и самый опыт по определению отклонений. Само собой разумеется, что обычный анализ горючих газов совершенно не пригоден для таких вычислений. Кроме того, значительные затруднения возникают здесь в связи с отклонениями, вызываемыми изменениями температур.

В газовой промышленности ранее применялся еще метод непосредственного определения отклонений; газ, расширяющийся при выходе из баллона высокого давления определенного объема, замеряся мокрым счетчиком.

Очевидно, что в этом случае увеличением объема сухого газа за счет водяных паров, получаемых в мокром счетчике, пренебрегают. Если при помощи такого метода имеют в виду установить небольшое отклонение от закона Бойля, то этим не достигают цели.

В табл. 59 и 60 даются коэфициенты отклонения для двух характерных натуральных газов при разных температурах. Для получения по этим таблицам данных замера газа в диафрагменных счетчиках извлекают квадратный корень из приводимых в них чисел.

Другие выражения коэфициента отклонения. В технической литературе отклонения газа от закона Бойля обычно даются в виде коэфициента отклонения при сжатии, который может быть применен и как коэфициент отклонения при

[1] Philip E. Beckman, A. Simplified Apparatus for Determining the Deviation of Gas from Boyle's Law, „Am. Gas J.", стр. 22, март 1932; Philip E. Beckman, The Deviation of Natural Gas from Boyle's Law, „Proc. P. C. G. A.", т. 22, стр. 329, 1932.

Таблица 59

Отклонения для сухого природного газа с промысла Кетлмен-Хилс, взятого из абсорбера

Фракционный анализ:

CH_4 — 86,8%; C_2H_6 — 7,8%; C_3H_8 — 3,9%;

изобутан-C_4H_{10} — 0,5%; n-C_4H_{10} — 0,8%; изопентан C_5H_{12} — 0,2%.

Анализ газа по сожжению:

CH_4 — 79,6%; C_2H_6 — 20,4%

°C	Манометрическое давление в *кг/см²*			
	7,03	14,05	21,08	28,10
26,7	1,0190	1,0373	1,0549	1,0722
37,8	1,0171	1,0328	1,0180	1,0631
48,9	1,0151	1,0285	1,0415	1,0542

Таблица 60

Отклонение природного газа (98,7% метана) от закона Бойля

Температура в °C	Давление по манометру в *кг/см²*			
	7	14	21,1	28,1
0,5	1,0075	1,0210	1,0375	1,0561
21,1	1,0062	1,0171	1,0291	1,0427
40,7	1,0055	1,0142	1,0235	1,0332

расширении. Если C — коэфициент отклонения при сжатии, то он выражается следующей формулой:

$$C = \frac{1}{Y} = \frac{P_H V_H}{P_L V_L} = \frac{V_{LT}}{V_L}.$$

Данные отклонения часто публикуют в процентах. Переводить эти данные в другие величины следует осторожно, так как процент отклонения, отнесенный к расширению, не равняется проценту отклонения, отнесенному к сжатию. Так, например, газ, имеющий коэфициент отклонения при расширении 1,25, имеет коэфициент отклонения при сжатии 0,80. Таким образом, процент отклонения в обоих случаях выражается следующими числами:

$$100(1{,}25 - 1{,}00) = 25\%; \quad 100(1{,}00 - 0{,}80) = 20\%.$$

Перевод коэфициентов на другие единицы давления. Исследователи обычно предпочитают относить определяемые отклонения к абсолютному давлению, равному нулю. Тогда они пользуются следующими уравнениями:

$$\frac{P_H V_H}{P_0 V_0} = C; \quad \frac{P_0 V_0}{P_H V_H} = Y.$$

где P_0V_0 — гипотетическая, неопределенная величина, которую можно вычислить только путем экстраполяции, но которая до сих пор является все же наиболее применимой условной базой для вычислений.

Коэфициент отклонения, относящийся к нулевому давлению P_0, можно привести к другому давлению P_x, для чего коэфициент при давлении P_0 делят на коэфициент отклонения при давлении P_x. Это одинаково верно как для случаев более сильного сжатия, так и для случаев более сильного расширения по сравнению с законом Бойля.

Примером такого перевода коэфициента, взятого из нулевого основания, может служить табл. 61. Коэфициенты, отнесенные к нулевому давлению, переведены в этой таблице к давлению в 100 *ат*.

Таблица 61

Перевод коэфициентов

Абсолютное давление в *ат*	Данная величина C для P_0	Величина C для P_{100}	Величина Y для P_0	Величина Y для P_{100}
300	0,7	0,7/0,9	1/0,7	0,9/0,7
200	0,8	0,8/0,9	1/0,8	0,9/0,8
100	0,9	0,9/0,9	1/0,9	0,9/0,9
0	1,0	—	1/1,0	—

При переводе коэфициентов следует обратить внимание на то, что коэфициент сжатия является зависимым от P и V. Если иметь это в виду, то при любом переводе коэфициентов затруднений не встретится.

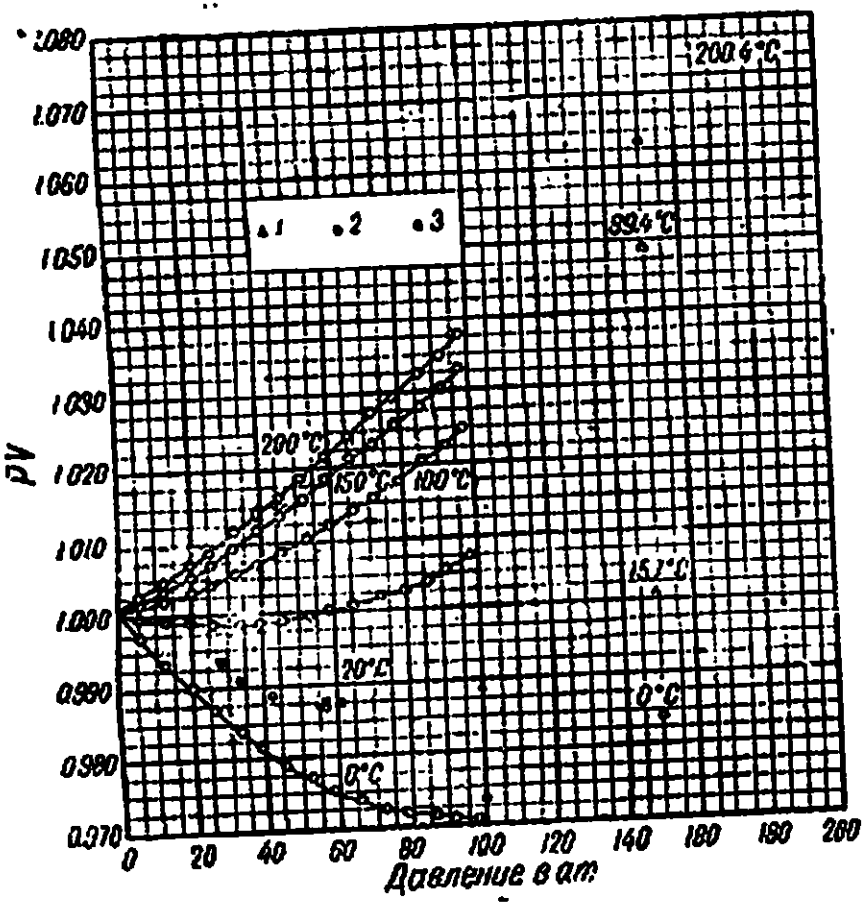
Этот способ, разумеется, применим и при тех условиях, когда первоначальные данные отнесены к давлению выше нуля. При этом необходимо сделать оговорку, что это давление должно быть более высоким, чем то, которое соответствует первоначальным данным. Это дает возможность сделать соответствующую интерполяцию.

При необходимости привести коэфициенты к более низкому давлению, чем первоначальное, производят экстраполяцию. В этом случае данные желательно представлять как в виде коэфициента отклонения при сжатии, так и в виде коэфициента отклонения при расширении. Выбирается тот из них, который наиболее близко подходит к линейному соотношению с давлением. Приводимый ниже пример (табл. 62) относится к таким условиям, когда коэфициент отклонения при сжатии изменяется прямо пропорционально изменению давления. Коэфициент C рассматривается в этом примере как произведение P и V. В табл. 62 приводятся данные, относящиеся к давлению в 200 *ат*. Эти данные распространены и приведены также и к давлению в 100 *ат*.

Таблица 62

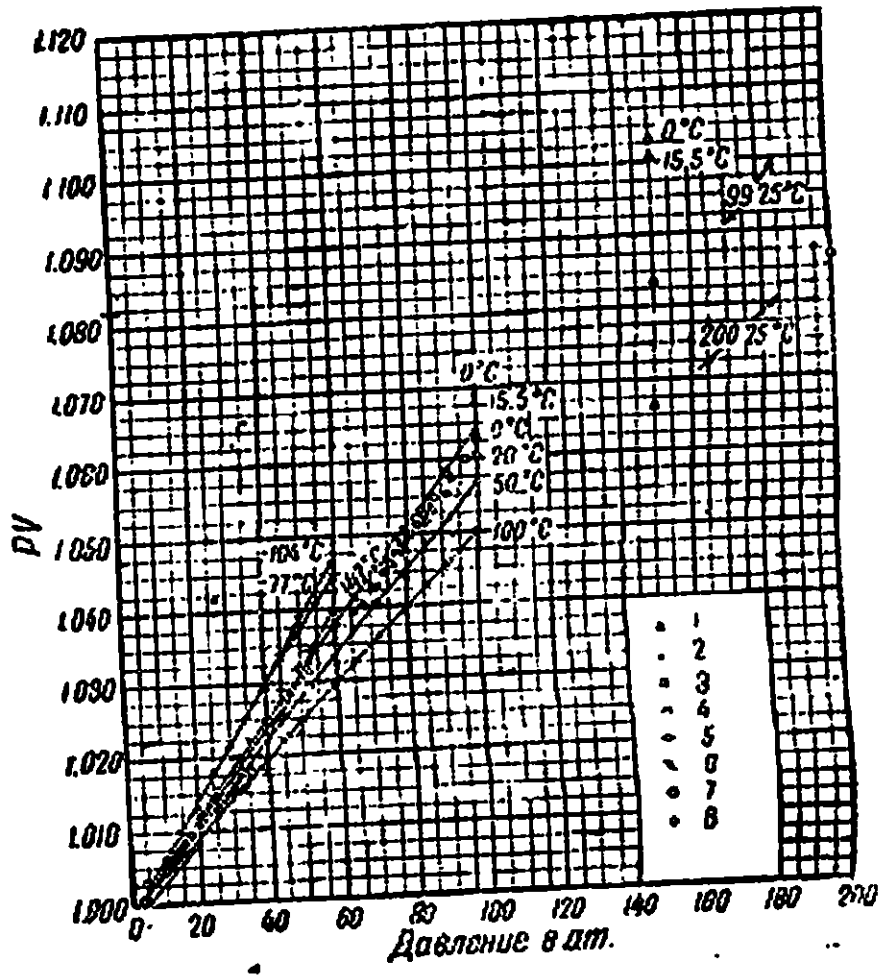
Перевод коэфициентов

Абсолютное давление в *ат*	Данная величина C для P_{200}	Произведение P на v и экстраполяции к $P = 100$	Величина C для P_{100}
400	0,8	0,8	0,8/1,1
300	0,9	0,9	0,9/1,1
200	1,0	1,0	1,0/1,1
100	—	1,1	1,1/1,1



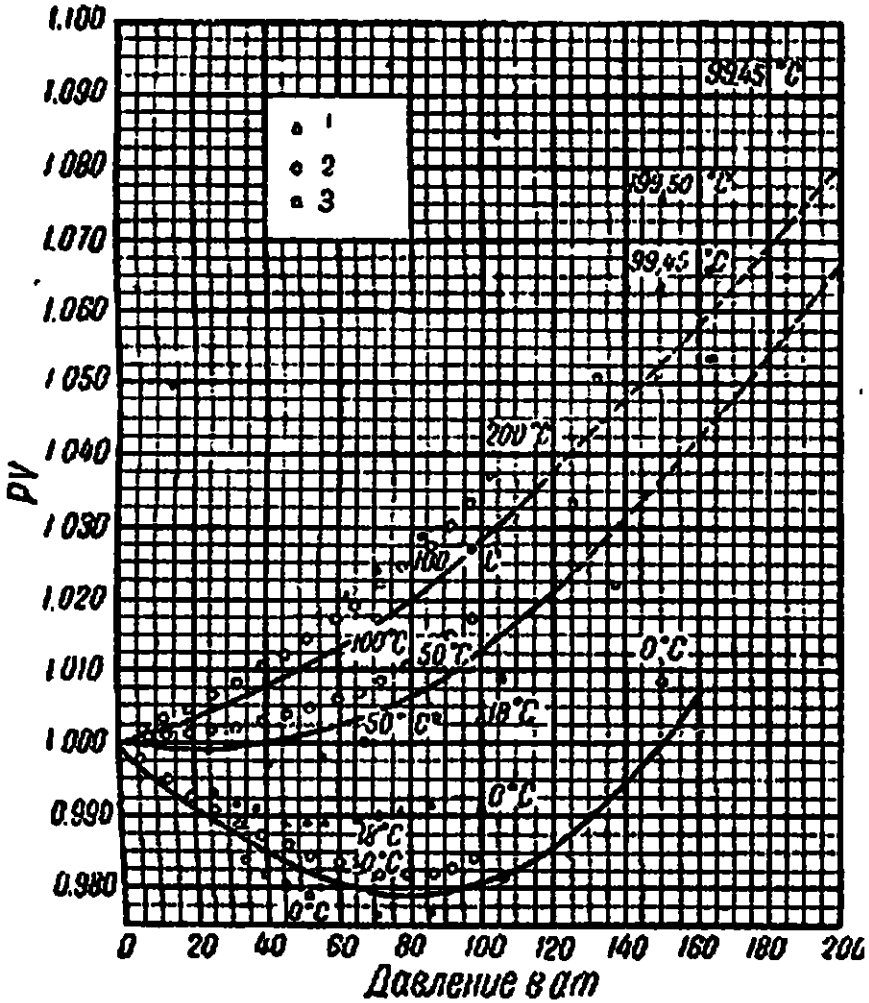
Фиг. 60. Коэфициенты сжатого воздуха (1 *am* принята равной 1,033 *кг/см*², или 760 *мм* Hg).

1 — данные Amagat'a 1893 г.; *2* — данные Holborn'a и Schulze 1915 г.; *3* — данные Pernig'a 1924 г.



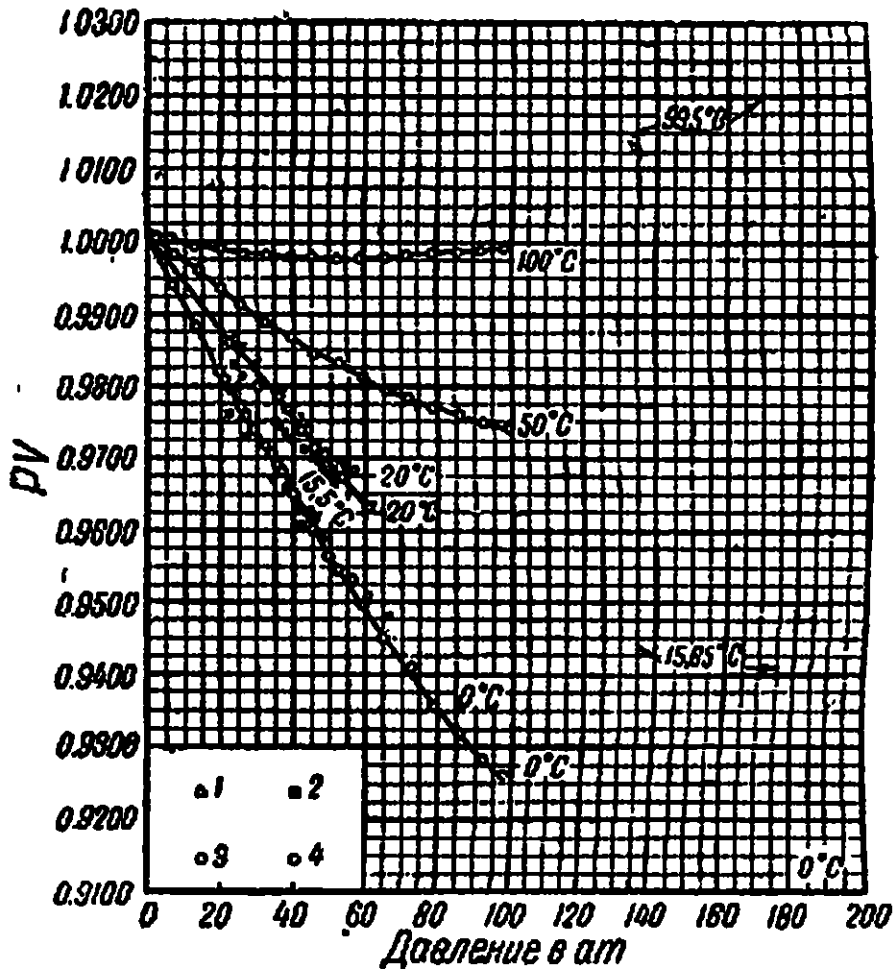
Фиг. 61. Коэфициенты сжатия водорода (1 *am* принята равной 1,033 *кг/см*², или 760 *мм* Hg).

1 — данные Amagat'a 1893 г.; *2* — данные Schalkwijk'a при 20° C 1853 г. *3* — данные — Onnes'a и Hyndman'a 1922 г.; *4* — данные Witkowski 1908 г.; *5* — данные Onnes'a и Braak'a 1907 г.; *6* — данные Onnes'a, Dorsman'a и Holst'a 1915 г.; *7* — данные Onnes'a, Crommelin'a и Smid'a 1915 г.; *8* — данные Holborn'a 1920 г.



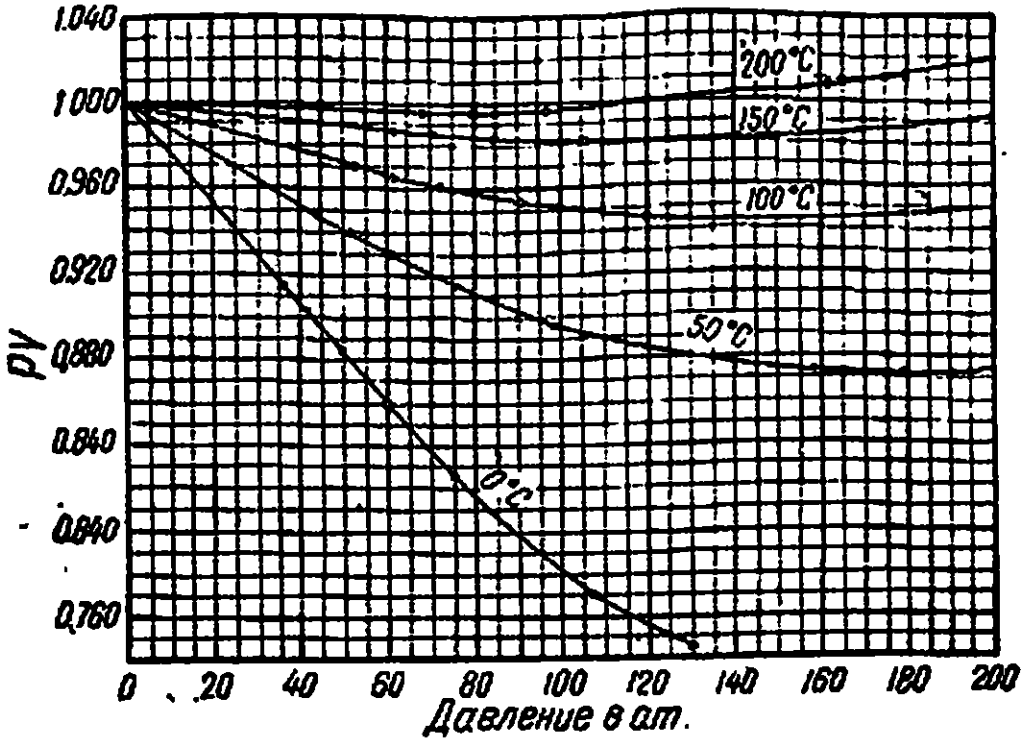
Фиг. 62. Коэфициенты сжатия азота (1 *am* принята равной 1,033 *кг/см*², или 760 *мм* Hg).

1 — данные Amagat'a 1893 г.; *2* — данные Holborn'a и Otto 1922 г.; *3* — данные Smith'a и Taylor'a 1923 г.

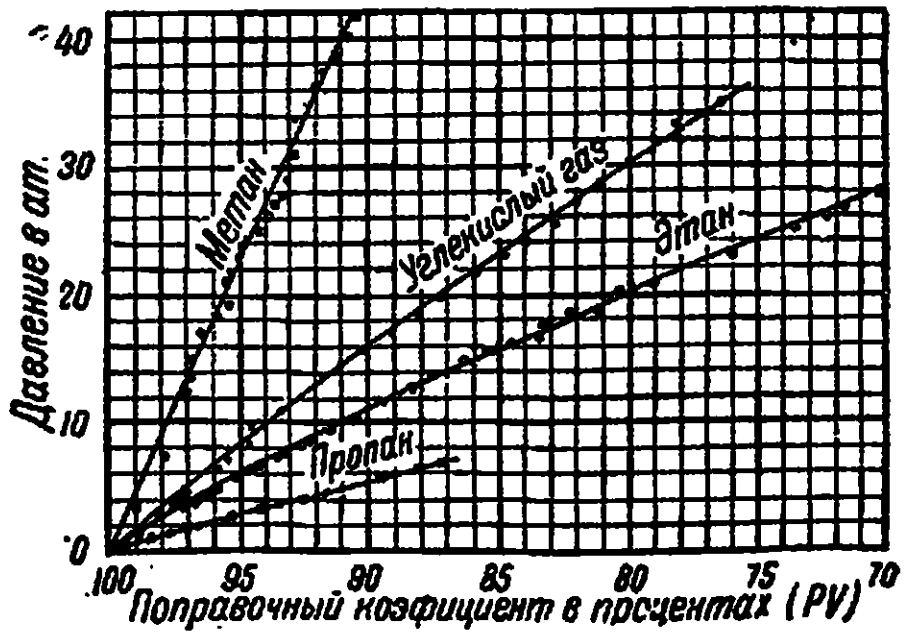


Фиг. 63. Коэфициенты сжатия кислорода (1 *am* принята равной 1,033 *кг/см*², или 760 *мм* Hg).

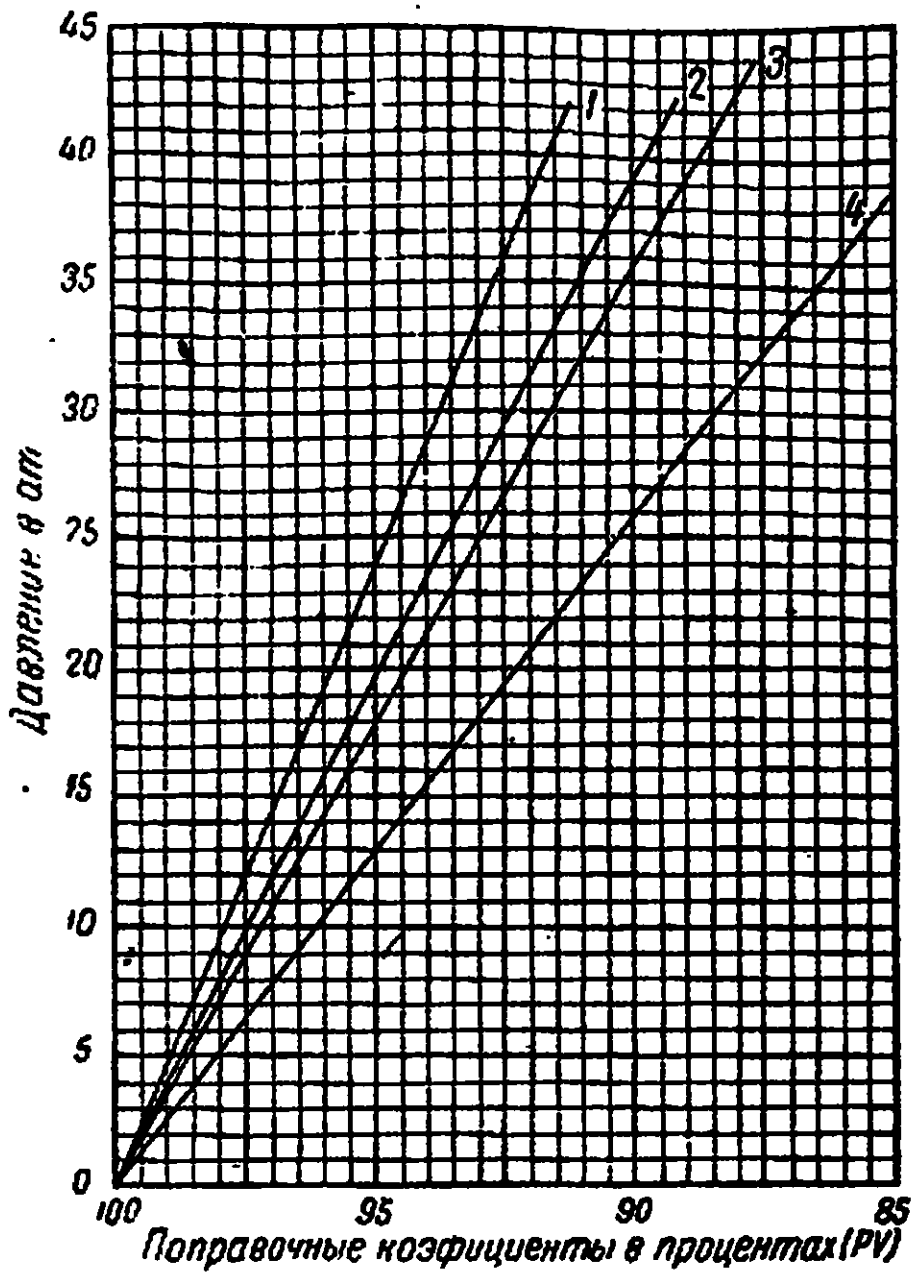
1 — данные Amagat'a 1893 г.; *2* — данные Onnes'a и Hyndman'a 1903 г.; *3* — данные Holborn'a и Otto 1922 г.; *4* — данные Kuipers'a и Onnes'a 1923 г.



Фиг. 64. Коэфициенты сжатия метана (1 *ат* принята равной 1,033 *кг/см*², или 760 *мм* Hg) по данным Smith'a и Joubert'a.



Фиг. 65. Коэфициенты сжатия метана, этана, пропана и углекислого газа.



Фиг. 66. Коэфициенты сжатия природного газа; газ взят с промыслов Литл-Рок в Арканзасе (*1*), Бартлсвил в Оклагоме (*2*), Кливеленд в Огайо (*3*) и Лос-Анжелос в Калифорнии (*4*) при температуре 15° С.

ТРУБКИ ПИТО

Основные формулы. Для трубки Пито при любом давлении и при любой жидкости действительна следующая формула:

$$u_{act} = E\sqrt{2gH},$$

где u_{act} — скорость жидкости в *м/сек* в трубке Пито;

E — постоянная, зависящая от типа трубки Пито; если выбрана хорошая трубка Пито и если она правильно установлена, то $E = 1$;

g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 *м/сек*^{2};

H — дифференциальное давление в метрах движущегося потока жидкости.

Скорость движущегося потока жидкости в трубе меняется от минимальной до максимальной. Минимальная скорость имеет место на поверхности стенки трубы, а максимальная — на ее оси (в ее центре). Поэтому для определения расхода

жидкости определяется среднее значение скорости потока. Обычно на практике чаще всего применяются следующие методы вычисления средней скорости движения жидкости в трубках Пито:

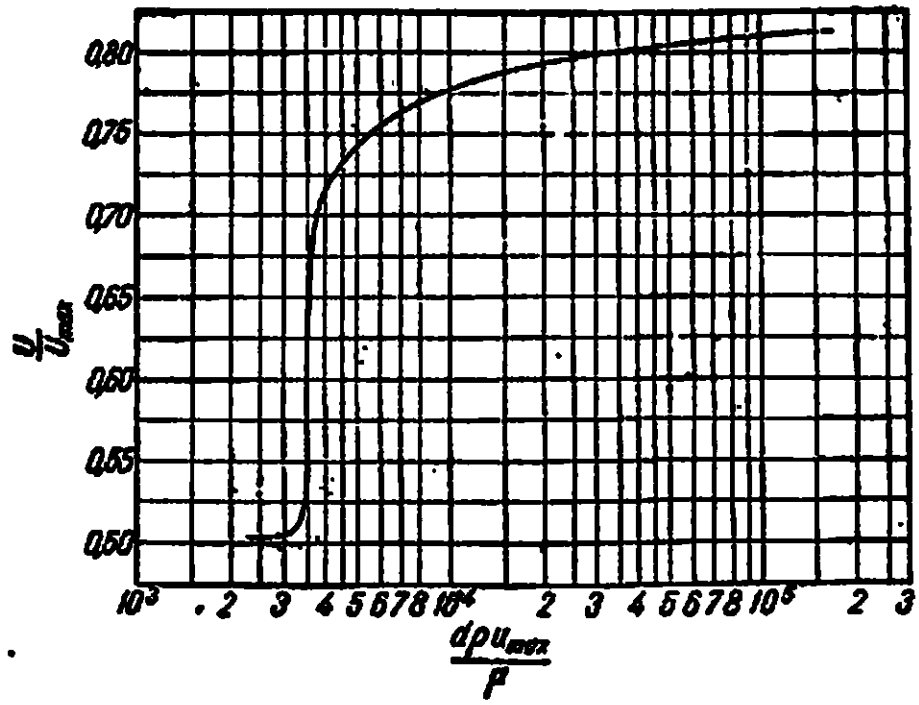
1. Трубка Пито помещается в центре трубы (по ее оси), где скорость движения жидкости наибольшая. Отношение средней скорости движения жидкости к наибольшей можно взять из фиг. 67. Вспомогательные данные для вычисления модуля $\frac{dup}{\mu}$ имеются в разделе движения газов по трубам. Модуль $\frac{Dus}{z}$, применяемый в этом разделе, можно перевести на единицы, приведенные на фиг. 67, при помощи следующего уравнения:

$$\frac{Dus}{z} = \frac{0{,}000996\, du\rho}{\mu}.$$

2. При приближенных вычислениях, которые обычно имеют место при замере газов, или в тех случаях, когда имеет место турбулентное движение жидкости, отношение средней скорости к максимальной обычно принимается в размере 0,82.

3. Трубку Пито можно поместить в такой точке трубы, где действительная скорость равняется средней скорости по всему сечению. Эта точка обыкновенно предполагается на окружности круга, имеющего радиус, равный 0,74 радиуса трубы, и расположенного концентрично к последней.

Для проведения более точных вычислений лучше сделать сечение трубы и либо определить нужный коэфициент для данного случая, либо взять среднюю из всех полученных величин. Если труба имеет четырехугольное сечение, то его делят на большое число маленьких квадратов или прямоугольников и делают отсчет в центре каждого из них. В этом случае получаемая средняя всех скоростей, соответствующих данным давлениям, и составит истинную скорость потока



Фиг. 67. Соотношение средней и максимальной скоростей движения жидкости в трубах круглого сечения.

d — внутренний диаметр трубы в *м*; ρ — плотность потока в *кг/м³*; *u* — средняя скорость потока в *м/сек*; μ — абсолютная вязкость в *кг/м сек*.

в трубе. Если труба имеет круглое сечение, то это последнее делят на большое число концентрических зон или колец одинаковой площади и в каждой зоне делают 4 отсчета как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях по сечению трубы.

Положение каждой последующей точки определяют путем деления каждого кольца на две одинаковые площади, причем одну из половин добавляют к сумме

предыдущих площадей. Желаемую точку находят в радиусе круга, имеющего эту суммарную площадь.

Такие точки находят при помощи следующих уравнений:

$$R_1 = \sqrt{\frac{a}{6{,}2832}};$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{a+\frac{a}{2}}{3{,}1416}}; \quad R_3 = \sqrt{\frac{2a+\frac{a}{2}}{3{,}1416}}; \quad R_4 = \sqrt{\frac{3a+\frac{a}{2}}{3{,}1416}},$$

где R_1, R_2 и т. д. — расстояния от центра до точек, с которых делаются записи, в каждом отдельном кольце,

a — площадь каждой зоны или кольца.

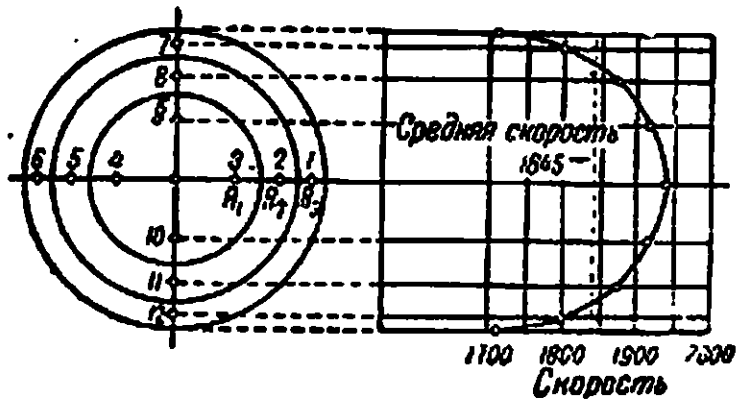
Таблица 63

Деление сечения труб для отсчетов по трубке Пито

Расстояние от центра трубы до выбранной точки в процентах диаметра трубы

Число равных по площади сечений	Число выбранных отсчетов	Радиусы							
		R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8
3	12	20,4	35,3	45,5	—	—	—	—	—
4	16	17,7	30,5	39,4	46,6	—	—	—	—
5	20	15,5	27,2	35,3	41,7	47,4	—	—	—
6	24	14,5	25,0	32,3	38,2	43,3	47,9	—	—
7	28	13,4	23,1	29,9	35,3	40,1	44,3	48,2	—
8	32	12,5	21,6	28,0	33,2	37,6	41,5	45,1	48,4

Размещение точек по сечению трубы в таких местах, откуда можно делать отсчеты, показано на фиг. 68. Таблица величин построена на основе данных формул и является вполне подходящей для поставленной в этой работе цели. Для того чтобы показать пример применения этой таблицы, предположим, что сечение сделано в трубе кругового сечения диаметром 24" (609,6 *мм*). причем делаются отсчеты в 12 точках сечения. Четыре отсчета берутся на расстоянии $0{,}204 \cdot 609{,}6 = 120{,}5$ *мм* от центра трубы, четыре — на расстоянии $0{,}353 \cdot 609{,}6 = 214{,}9$ *мм* от центра и четыре — на расстоянии $0{,}455 \cdot 609{,}6 = 277{,}4$ *мм*.



Фиг. 68. Деление сечения трубы на равновеликие зоны и определение средней скорости потока для кругового сечения. На диаграмме нанесены средние скорости потока через каждую зону, и через точки проведена кривая, показывающая относительное распределение скорости потока по сечению трубы.

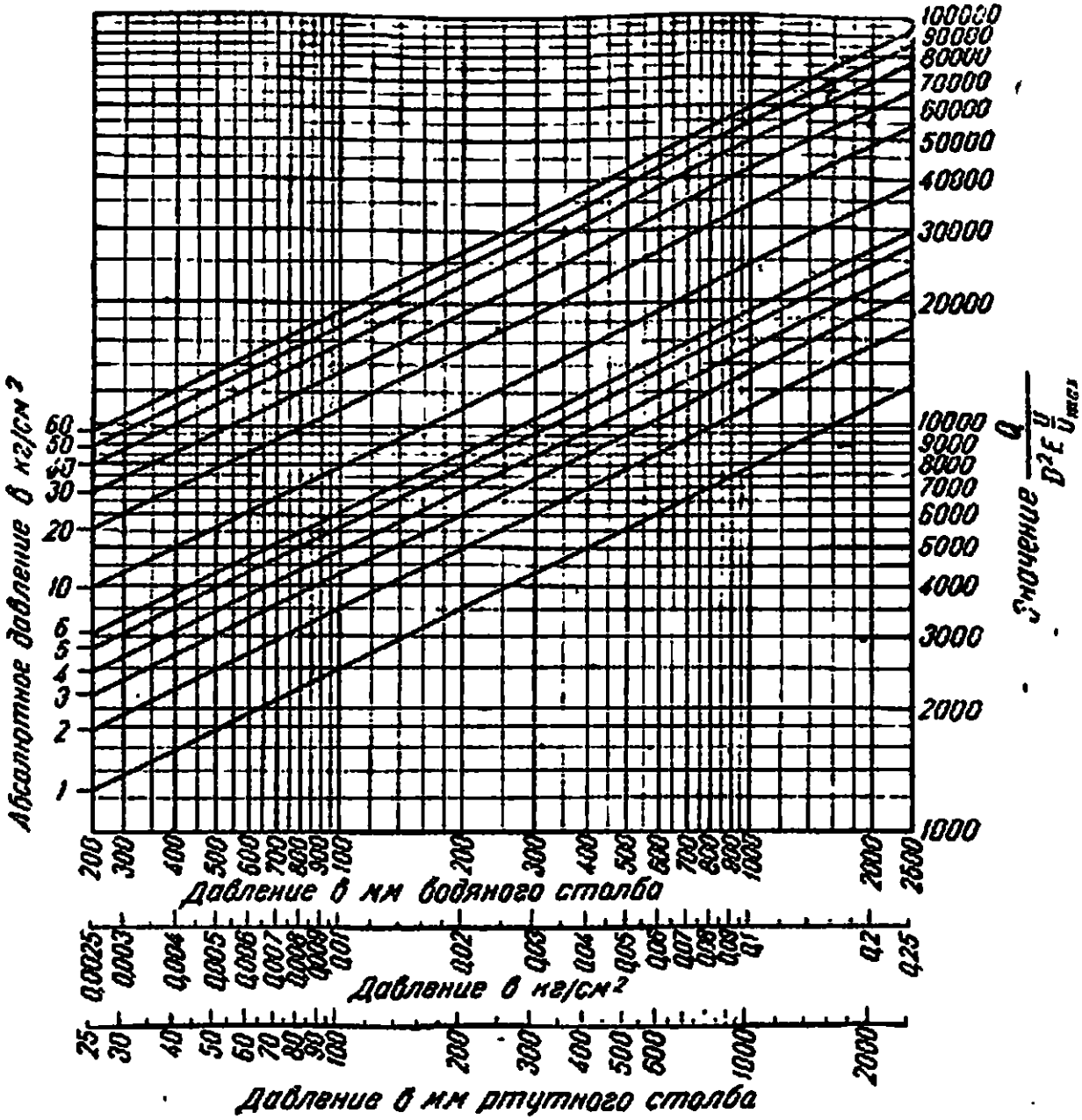
Факторы, влияющие на точность вычислений движения жидкости и газов с помощью труб Пито. По данным Payза (Rouse) в „Journ. of Am. Society of Mechanical Engineers" за март 1914 г. имеются следующие факторы, влияющие на точность вычислений движения жидкостей и газов в трубках Пито.

1. Газ движется по трубе волнообразно или по спирали, причем ни в один момент скорость не распределяется равномерно по сечению трубы: на одной четверти сечения трубы она больше, чем на других трех четвертях.

2. Скорость на диаметрах, на которых делаются отсчеты по трубке Пито, может постоянно меняться в течение всего времени, необходимого для получения отсчетов.

3. Движение газа может только приближаться к идеальным условиям ламинарного потока, но никогда не достигает их; теоретически показания трубки Пито можно признать правильными только в том случае, когда последняя идет точно параллельно потоку газа.

4. Трубка Пито как средство замера газов надежна только в пределах 1%, когда статическое давление точно вычислено и когда все отсчеты делаются с достаточной степенью точности. Чтобы получить эту степень точности, перед трубкой Пито устанавливают прямой отрезок трубы, равный по длине 20—38 диа-



Фиг. 69. Номограмма движения газа по трубке Пито.

метрам этой трубы. Это позволяет сделать поток газа по возможности более однообразным по всему сечению трубы.

5. Все методы получения динамического напора (применяемые в опытах с трубкой Пито) дают точные результаты.

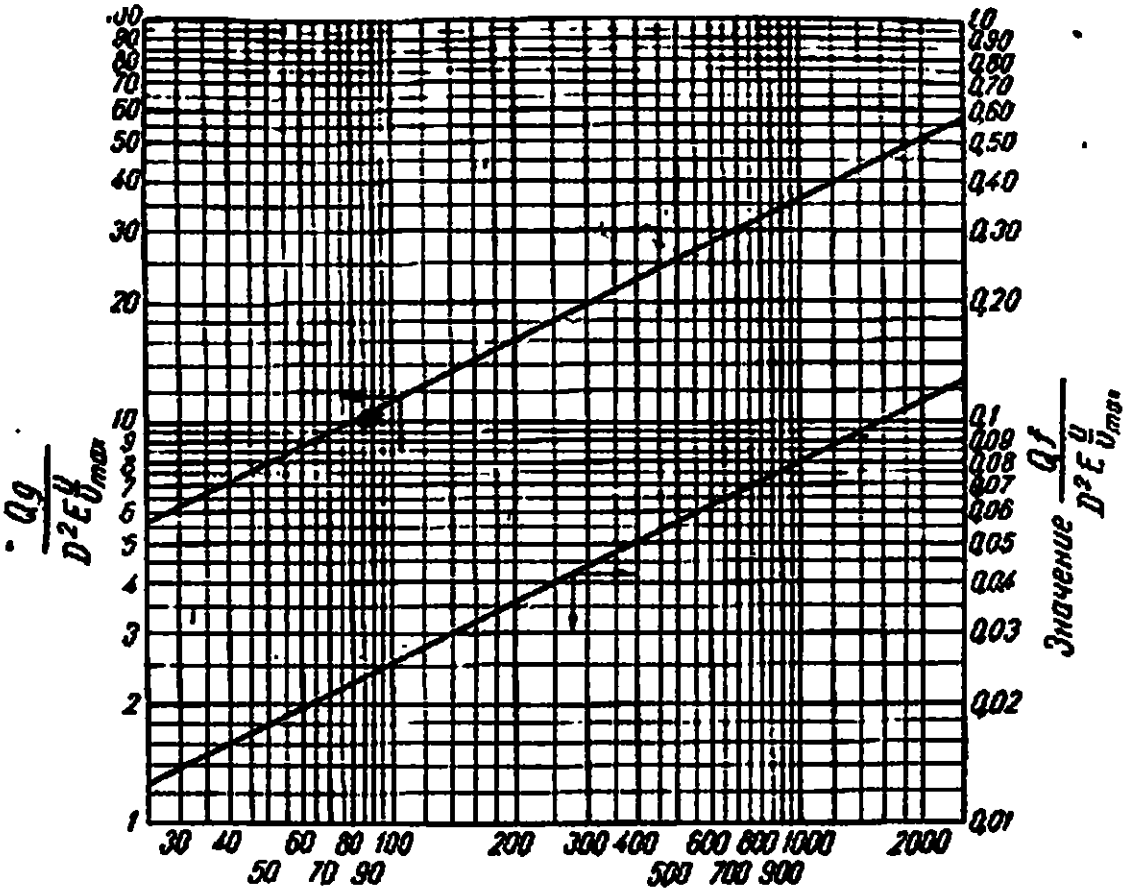
6. Наиболее надежным и точным способом вычисления статического давления является пьезометр или иной подобный ему прибор. Результаты с полной несомненностью показали, что статическое давление является постоянным по любому сечению той трубы, по которой газ проходит с равномерной скоростью.

7. Для вычисления статического давления при помощи трубки Пито наиболее

подходящим способом является пропускание газа через маленькое отверстие, сделанное на очень гладкой поверхности.

8. Результаты, получаемые при замерах статического давления через прорез, дают ошибку вычислений, величина которой колеблется от 3,5 до 10%. Длина прореза или толщина стенки трубы не оказывает, видимо, влияния на эти результаты.

9. Скошенная труба не является надежной для вычисления статических давлений; незначительное изменение угла скоса может сильно исказить результаты. При проведении отсчетов по сечению трубы обнаружено, что стенки трубы оказывают влияние на результаты. Наибольшая ошибка получается в том случае, когда не установлено точно, направлена ли трубка прямо по движению потока. В результате допущения отклонения трубки Пито на 20% от направления течения получается ошибка в размере 85% при вычислении скорости напора.



Фиг. 70. Номограмма трубки Пито для жидкостей.

Специальные формулы, применимые к замеру газа и воздуха. При подстановке общеупотребительных значений, применяемых при замере газа, в предыдущие уравнения получаются уравнения, вполне применимые к движению газов.

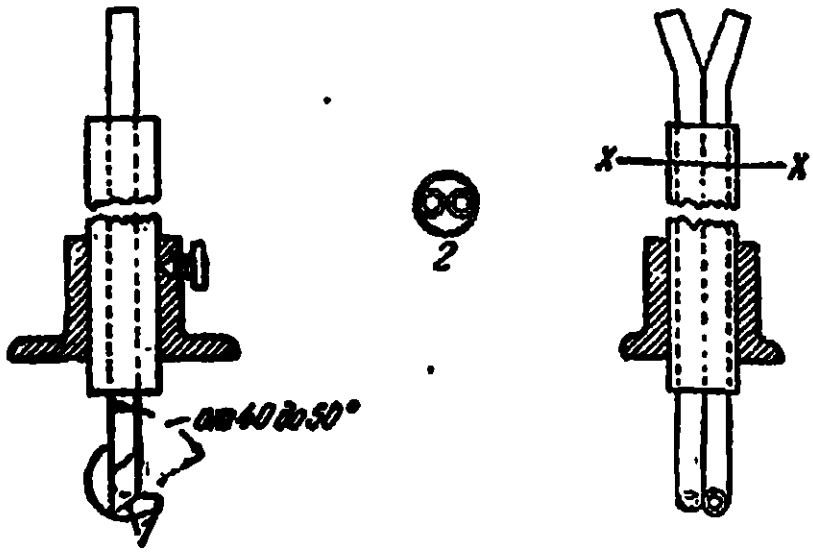
Эти уравнения даны в номограмме (фиг. 69) для измерения газов трубкой Пито.

Уравнения, на основании которых построена номограмма (фиг. 69).

$$Q = 18{,}881\, ED^2 \frac{u}{u_{max}} \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)\, P_a}{G_a T_a}};$$

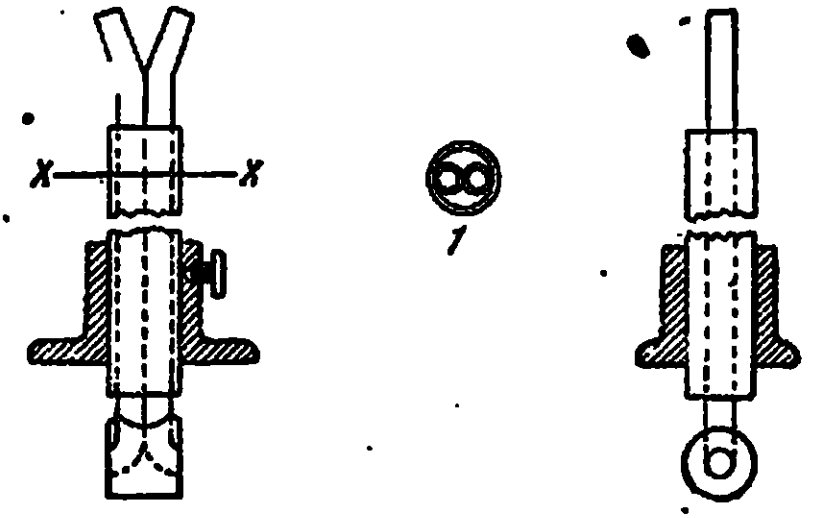
$$Q = 0{,}6958\, ED^2 \frac{u}{u_{max}} \sqrt{\frac{H_a P_a}{G_a T_a}};$$

$$Q = 0{,}18881\, ED^2 \frac{u}{u_{max}} \sqrt{\frac{H_w P_a}{G_a T_a}}.$$



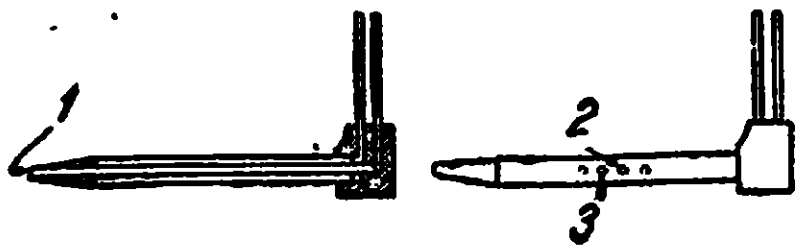
Фиг. 71. Трубка Пито со скошенным отверстием для замера статических давлений (эту трубку применять не рекомендуется).

1 — статическое давление; *2* — сечение *x — x*.



Фиг. 72. Трубка Пито с отверстиями, направленными в противоположные стороны (не рекомендуется).

1 — сечение *x — x*.



Фиг. 73. Трубка Пито с малыми отверстиями для замера статических давлений (рекомендована для употребления).

1 — скоростное давление; *2* — отверстия для замера статического давления (не меньше 4); *3* — диаметр отверстия в 0,508 *мм* (0,02").

где Q — расход газа в $м^3/час$ при температуре 15,56° С, при давлении ртутного столба в 762 *мм*;

E — постоянная для установки трубки Пито; при трубках Пито, хорошо сконструированных и надлежащим образом установленных, $E = 1$;

$(P_1 - P_2)$ — диференциальное давление в $кг/см^2$;

T_a — температура газа в °С абс.;

G_s — удельный вес газа (вес воздуха принят за единицу),

P_a — абсолютное статическое давление в $кг/см^2$;

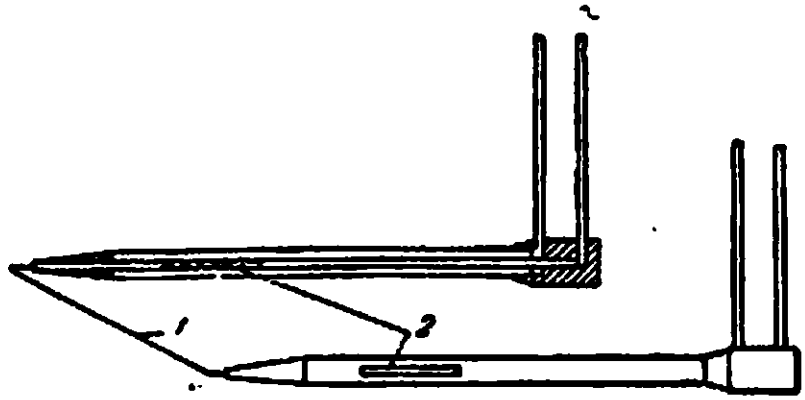
D — диаметр трубы в *мм*;

$\frac{u}{u_{max}}$ — отношение средней скорости потока к скорости движения в трубках Пито;

H_g — диференциальное давление в *мм* ртутного столба при 0° С;

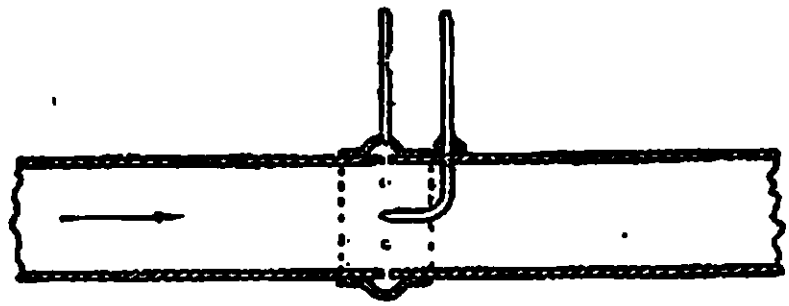
H_w — диференциальное давление в *мм* водяного столба при 15,56°С.

friutec md@mail.ru V. Gusarenco



Фиг. 74. Трубка Пито с прорезом для замера статического давления (не рекомендуется).

1 — скоростное давление; *2* — статическое давление.



Фиг. 75. Наконечник для динамического давления с пьезометрическим кольцом для замера статического давления (рекомендован).

Номограмма (фиг. 69) построена для того случая, когда температура движущегося газа равняется 15,56°С, а его удельный вес равен единице. Если действительная температура газа и его давление разнятся от этих величин, то для получения необходимых значений умножают Q, взятое по номограмме, на поправочные коэфициенты температуры и удельного веса, которые даются в таблицах и номограммах (в разделе о диафрагменных счетчиках).

Область применения этой номограммы можно расширять, умножая величины, нанесенные на линию абсцисс, на 100, а величины, нанесенные на линию ординат, — на 10 или же, деля величины, нанесенные на линию абсцисс, на 100, а величины, нанесенные на линию ординат, — на 10.

Уравнение для номограммы (фиг. 70)

$$Q_g = 0{,}0065995\, D^2 E \frac{u}{u_{max}} \sqrt{\frac{H}{s}}; \qquad (1)$$

$$Q_f = 0{,}00000010993\, D^2 E \frac{u}{u_{max}} \sqrt{\frac{H_w}{s}} \qquad (2)$$

где Q_g — объем жидкости в *л/мин* (при температуре движущегося потока);
Q_f — объем жидкости в $м^3/сек$;
D — внутренний диаметр трубы в *мм*;
E — постоянная при установке трубки Пито; при хорошем качестве трубки и при надлежащей ее установки $E = 1$;
$\frac{u}{u_{max}}$ — отношение средней скорости потока к скорости в трубке Пито;
H_w — диференциальное давление в *мм* водяного столба при 15,56° С;
s — удельный вес жидкости по отношению к воде при 15,56° С.

Уравнение (1) относится к верхней кривой, уравнение (2) — к нижней.

Для верхней кривой пользуются координатами левой и нижней сторон номограммы, а для нижней — координатами правой и нижней сторон.

Обе кривые рассчитаны на тот случай, когда $s = 1$.

Область применения диаграммы можно расширить путем умножения величин, нанесенных на линию абсцисс, на 100, а величин, нанесенных на линию ординат, — на 10 или же путем соответствующего деления на 100 и на 10.

СЧЕТЧИК ТОМАСА

Принцип, на котором основана работа счетчика. Счетчик Томаса по существу представляет собой прибор для подогревания электричеством струи газа на определенный температурный интервал, например 1—2° С (в Америке принят интервал в 2° F), с последующим замером количества израсходованной электрической энергии. Деля общее количество энергии на количество, потребное для того, чтобы повысить температуру 1 $м^3$ на 1° С, получают количество газа, пропущенное через счетчик, в куб. метрах.

Для вычисления применяется следующее уравнение:

$$Q = \frac{0{,}860 \cdot W}{C_p T},$$

где Q — расход газа в $м^3/час$;
W — расход электроэнергии по электросчетчику в ватт-час.;
C_p — теплоемкость движущегося по трубе газа при постоянном давлении в $Кал/м^3$ на 1° С, вычисляется на основании анализа газа;
T — повышение температуры газа при прохождении через счетчик в °С.

Теплоемкость газа определяется как количество калорий тепла, необходимого для повышения температуры 1 $м^3$ газа на 1° С, имея в виду замер при нормальных (стандартных) условиях. Величина теплоемкости зависит главным образом от числа атомов, содержащихся в молекуле газа. Газы, которые в своей молекуле содержат одинаковое количество атомов (если только это количество невелико), имеют приблизительно одинаковую теплоемкость. Это следует из уравнений, приводимых в части I настоящей книги и, относящихся к теплоемкости наиболее известных газов. Уравнения показывают, что все двухатомные газы обладают одинаковой теплоемкостью; одинаковой теплоемкостью обладают также и все трехатомные газы.

Из этих уравнений видно также, что в пределах обычных колебаний атмосферной температуры теплоемкость не зависит от температуры. Теплоемкость не зависит также и от давления.

Изменение теплоемкости топливного газа, получающееся в результате изменения самого состава газа, обычно представляет собой незначительную величину, которой можно пренебречь, если газ приходит от определенного источника, например с одного и того же завода или из одного и того же месторождения (природный газ). В табл. 64 приводится сравнительная теплоемкость некоторых газов, сильно различающихся по составу.

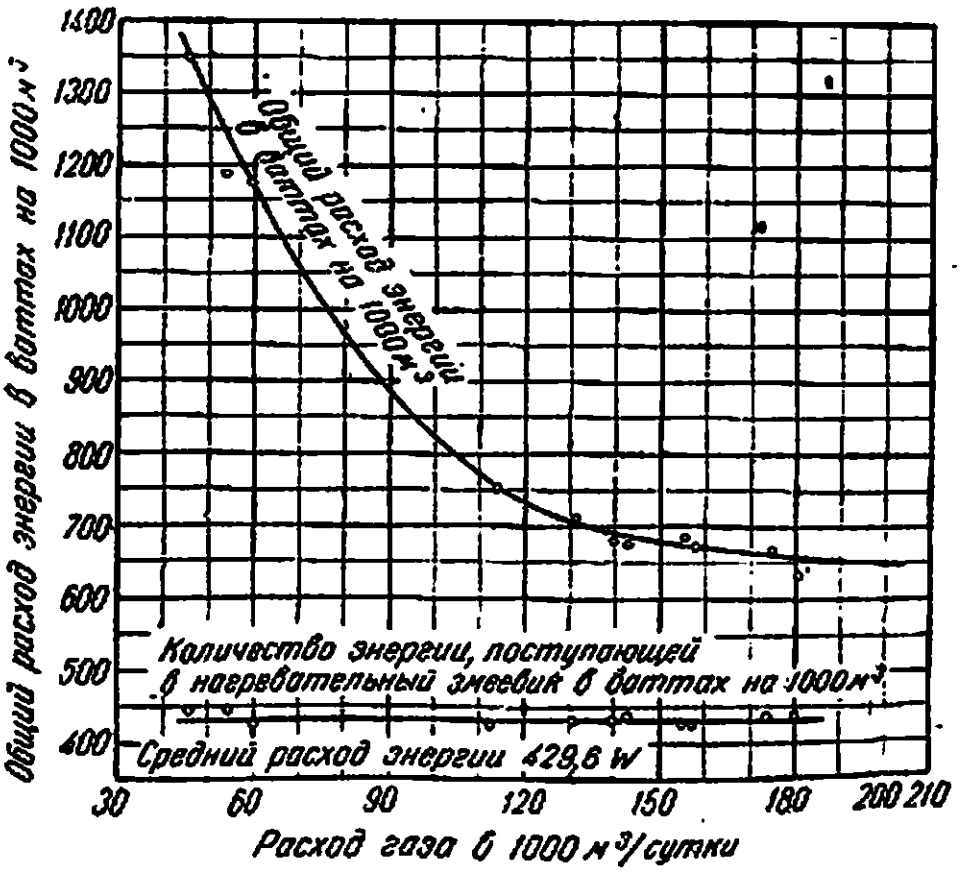
Описание счетчика Томаса. Счетчики Томаса снабжаются интегрирующим ваттметром, калиброванным с таким расчетом, чтобы можно было сразу же зачитать на счетчике расход газа в куб. метрах. По этим счетчикам также можно прочитать скорость движения газа в куб. метрах в час на непрерывной ленточной картограмме.

Таблица 64

Теплоемкость разных промышленных газов

Газы	Каменноугольный газ	Водяной газ	Нефтяной газ	Реформированный газ
Углекислый газ	2,1	6,1	4,0	1,7
Бензол	1,3	2,4	1,4	—
Иллюминанты C_nH_m	2,4	7,4	1,9	2,0
Кислород	0,6	0,4	0,7	0,2
Окись углерода	6,9	23,2	10,9	9,7
Метан	32,9	15,7	26,9	40,0
Водород	47,4	33,9	48,2	43,3
Азот	6,4	10,9	6,0	3,1
Всего	100,0	100,0	100,0	100,0
Теплоемкость (в *Кал/м³* °С)	0,346	0,343	0,341	0,351

Для того чтобы не допустить в счетчик воды, находящейся часто во взвешенном состоянии в виде капель в газе, в газопроводе впереди счетчика устанавливают паровые змеевики.



Фиг. 76. Расход энергии на 1000 *м³* и количество поступающей энергии в нагревательную обмотку счетчика Томаса при разных расходах.

Таблица 65

Сводные данные опытов, произведенных над объемными счетчиками, счетчиками Вентури, счетчиками с электрическим регистрирующим аппаратом и счетчиками Томаса

Июль 1926 г.	Объемные счетчики	Счетчики Вентури	Счетчики с электрорегистрирующим прибором	Счетчики Томаса	Погрешность по сравнению со счетчиком Вентури в %		
	расход в тыс. куб. метров				объемный	с электрорегистр. прибором	Томаса
17	218,08	215,87	212,62	220,51	1,01	—1,50	2,20
18	212,50	212,02	207,04	216,16	0,20	—2,30	1,90
19	234,47	235,14	231,01	240,55	—0,28	—1,70	2,30
20	232,34	232,85	229,91	237,64	—0,22	—1,20	2,05
21	232,77	232,60	224,96	236,11	0,08	—3,20	1,50
22	231,98	231,65	222,86	234,75	0,13	—3,80	1,33
23	226,88	226,82	219,18	230,11	0,012	—3,30	1,40
24	223,74	222,83	215,50	226,65	0,39	—3,30	1,65
25	235,37	235,14	228,44	239,64	0,09	—2,80	1,80
26	230,08	229,37	227,39	234,32	0,703	—0,86	2,15
	Средняя погрешность по сравнению со счетчиком Вентури				0,2115	—2,40	1,83

Примечание. Опыты производились на заводе Provan Gas Works в Глазго (Англия). Испытанию подвергнуто было следующее число счетчиков: а) 3 объемных счетчика пропускной способностью в 5660 м³/час; б) 1 счетчик Вентури пропускной способностью в 2225 м³/час; в) 2 счетчика с электрическим регистрирующим прибором; из них: один от диафрагмы и другой от трубки Пито; два последних счетчика установлены были на пропускную способность в 28300 м³/час; г) 1 электрический счетчик Томаса, рассчитанный на пропускную способность в 2825 м³/час.

Таблица 66

Стоимость эксплоатации счетчика Томаса в течение трех лет

Годы	Все количество замеренного газа в 1000 м³	Годовая стоимость эксплоатации счетчика в долларах[3]	Стоимость в центах 1000 м³
1924 [1]	7 927,2	15,58	0,1978
1925	42 572,4	97,45	0,2296
1926	52 933,7	65,59	0,1236
1927 [2]	38 325,2	119,23	0,3108

[1] Счетчик в 1924 г. работал с мая до декабря.
[2] Два счетчика в 1927 г. работали с января до июня.
[3] Стоимость эксплоатации включает мелкий ремонт, масло и т. д.
Средняя стоимость эксплоатации счетчика составляет 0,2084 цента на 1000 м³ газа.

Таблица 67

Стоимость обслуживания счетчика Томаса в течение трех лет

Годы	Общее количество замеренного газа в 1000 м³	Годовая стоимость рабсилы в долларах	Стоимость рабсилы на 1000 м³ замеренного газа в центах
1924 [1]	7 927,2	70,00	0,8826
1925	42 572,4	140,00	0,3288
1926	52 933,7	140,00	0,2642
1927 [2]	38 325,2	160,00	0,4167

[1] Средняя стоимость обслуживания счетчика (имея в виду только рабочую силу) составляла 0,26 цента на 1000 м³ газа.

При помощи этих змеевиков газ нагревается до температуры, достаточной для того, чтобы сделать его ненасыщенным, и таким образом исключается возможность проникания воды в счетчик.

Точность счетчика. В табл. 65 даны сводные результаты опытов, проделанных на заводе Provan Gas Works в Глазго (Англия). На этом заводе производились сравнительные испытания объемных счетчиков, счетчиков Вентури, счетчиков, действующих при помощи электричества, и счетчиков Томаса.

Эти опыты показали, что смолистые вещества, проникающие в счетчик, не оказывают влияния на точность его показаний, если он работает при постоянной скорости потока, но затрудняют его саморегулирование при изменении скорости потока.

Полная стоимость эксплоатации счетчика. Общий расход по счетчику на 1000 $м^3$ газа в средних условиях завода Сан-Диего составлял:

Электроэнергии из расчета 1 цент за 1 kWh	0,80 цента
Эксплоатационные расходы	0,20 „
Рабочая сила	0,36 „
Всего на 1000 $м^3$ . . .	1,36 цента

При расчете средней стоимости содержания счетчика, показанной выше, не учтены амортизация и проценты на капитал, но эти дополнительные расходы на 1000 $м^3$ газа незначительны.

Таблица 68

Характеристика счетчиков Томаса

Пропускная способность счетчика в *м³/час*	Ток только переменный		Тип	Диаметр соединения в *дм.*
	напряжение V	число периодов		
Для счетчиков малой пропускной способности — автоматов				
707,5	110	25	С обратным потоком	8 или 10
707,5	110	60	„ „ „	8 „ 10
1 415,0	110	25	„ „ „	8 „ 10
1 415,0	110	60	„ „ „	12 „ 16
2 830,0	220	25	„ „ „	12 „ 16
2 830,0	220	60	„ „ „	12 „ 16
4 245,0	220	25	„ „ „	12 „ 16
4 245,0	220	60	„ „ „	12 „ 16
4 245,0	220	25	Вертикальный	12
4 245,0	220	60	„	12
5 660,0	220	25	„	16
5 660,0	220	60	„	16
Для счетчиков большой пропускной способности				
8 490,0	220	25	Вертикальный	16
8 490,0	220	60	„	16
14 150,0	220	25	„	20
14 150,0	220	60	„	20
21 225,0	220	25	„	24
21 225,0	220	60	„	24
28 300,0	220	25	„	30
28 300,0	220	60	„	30
35 375,0	220	25	„	30
35 375,0	220	60	„	30
42 450,0	220	25	„	30
42 450,0	220	60	„	30
49 525,0	220	25	„	30
49 525,0	220	60	„	30
56 600,0	220	25	„	30
56 600,0	220	60	„	30

ИСПЫТАНИЕ СЧЕТЧИКОВ БОЛЬШОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Приборы, употребляемые для испытания счетчиков

Для испытания счетчиков большой пропускной способности необходимы следующие контрольные приборы:

1) контрольный счетчик типа газгольдера;
2) испытательный счетчик;
3) контрольный счетчик при низком давлении: а) с одним отверстием и б) с несколькими отверстиями;
4) счетчик Пирса (пробный) для контроля критического потока.

При любых методах испытания счетчиков соблюдаются следующие условия.

Испытание на расход газа. Всякого рода счетчики должны быть испытаны не меньше, чем при двух расходах. При этом низший или контрольный расход должен составлять около 20% пропускной способности счетчика.

Высший расход должен быть достаточным для того, чтобы дать такой перепад во все время опыта, какой имеет место в рабочих условиях. Если расход, при котором счетчик находился или должен находиться в эксплоатации, не известен, то необходимо произвести испытание счетчика на ряд расходов с тем условием, чтобы перепады при испытании были наиболее вероятными в условиях эксплоатации.

Следует заметить, что если счетчик испытывается при более низком статическом давлении, чем то, при котором ему придется работать в условиях эксплоатации, то для создания в счетчике в течение опыта перепада, равного тому перепаду, который будет иметь место в условиях эксплоатации, необходимо провести испытание счетчика при более высоком расходе, чем в эксплоатационных условиях.

Таблица 69

Необходимые для испытания расходы газа, отнесенные к атмосферному давлению и дающие ту же потерю давления в счетчике, какая имеет место в эксплоатационных условиях

Максимальный расход газа для счетчика	Давление в *кг/см*, при котором измеряется максимальный расход газа для счетчика								
	0	0,35	0,70	1,41	2,11	3,52	7,03	10,55	14,06
17,0	17,0	19,6	22,6	25,5	28,3	36,8	48,1	56,6	70,7
22,6	22,6	25,5	28,3	34,0	39,6	48,1	62,3	76,4	96,2
28,3	28,3	34,0	36,8	42,4	48,1	59,4	79,2	93,3	118,9
42,4	42,4	48,1	53,8	65,1	73,6	87,7	118,9	141,5	181,2
56,6	56,6	65,1	73,6	87,7	99,1	118,9	158,6	189,7	250,7
84,8	84,8	99,1	110,4	130,2	147,3	178,3	237,7	283,0	367,8
113,2	113,2	130,2	147,3	175,4	196,0	237,7	311,3	367,8	—
169,8	169,8	196,0	226,4	254,7	283,0	367,8	—	—	—
226,4	226,4	254,7	283,0	339,6	396,0	—	—	—	—
283,0	283,0	339,6	367,8	—	—	—	—	—	—

Примечание. Расходы газа в *м³/час* в первой (левой) колонке таблицы соответствуют максимальному расходу в рабочих условиях. Расходы, полученные во время испытаний, выражены в *м³/час* и отнесены к атмосферному давлению. Эти расходы газа не зависят от удельного веса, если только при испытании счетчика использован тот же газ, который пропускается через него в рабочих условиях.

В табл. 69 даны расходы, на которые испытывается счетчик при атмосферном давлении на тот же газ, на котором счетчик работает в условиях эксплоатации.

Если при испытании счетчика используется не тот газ, который пропускается через него в рабочих условиях, то расходы, приведенные в табл. 70, необходимо помножить на следующий множитель:

$$\sqrt{\frac{\text{удельный вес газа в рабочих условиях счетчика}}{\text{удельный вес газа во время испытания счетчика}}}.$$

Температура. Температура, при которой работает контрольный (пробный) счетчик, и температура самого испытываемого счетчика должны быть равны температуре пропускаемого через них воздуха или газа.

Продолжительность опыта. Наблюдение над испытываемым счетчиком продолжается в течение одного или нескольких оборотов стрелки секундомера.

Если применяется метод испытания, при котором необходимо производить точный замер каждого интервала времени, то продолжительность такого интервала должна быть не менее 100 сек.

Испытания счетчиков высокой пропускной способности при помощи газгольдеров

Наибольшая точность при испытании счетчиков высокой пропускной способности получается при помощи газгольдеров, емкость которых не ниже 3 $м^3$ (в Америке применяются газгольдеры емкостью в 100 куб. фут., т. е. в 2,83 $м^3$). Такой газгольдер весьма полезен также для проверки точности переносных контрольных счетчиков, употребляемых в эксплоатационных условиях. Возможно, хотя и затруднительно, получить удовлетворительную точность при испытании счетчика при помощи газгольдера емкостью в 0,283 $м^3$ (10 куб. фут.), если газгольдер имеет достаточно широкие соединительные трубки, позволяющие проводить опыт при больших расходах.

Рабочее испытание счетчиков большой пропускной способности контрольными счетчиками

Счетчики большой пропускной способности, заключенные в цинковые коробки или в коробки из литого алюминия, могут применяться для проверки в рабочих условиях. Контрольный счетчик должен быть достаточной пропускной способности, чтобы он мог служить для проверки испытываемого счетчика при том же перепаде в нем, какой существует в рабочих условиях. Иногда для достижения достаточной пропускной способности устанавливают целую батарею контрольных счетчиков. Эти последние предварительно испытываются (предпочтительно на газгольдере) до того, как их увозят с завода, и немедленно после возвращения на завод. Такие заводские испытания делаются часто во избежание ошибок, возникающих вследствие расстройства регулировки во время перевозки.

Контрольный счетчик (или счетчики) соединяется последовательно в ряд с испытываемым счетчиком при помощи короткого шланга; газ пускают в ряд тогда, когда устанавливается постоянная температура и отрегулирован его расход.

Результаты испытаний можно подсчитать при помощи следующего уравнения:

$$Y_f = 100\left[\frac{M_t P_t T_f (100 + Y_t)}{M_f P_f T_t \cdot 100} - 1\right],$$

где Y — процент погрешности;

M — отсчёт по индексу счетчика;

P — абсолютное давление;

T — абсолютная температура.

Индекс t относится к контрольному счетчику; индекс f относится к испытываемому счетчику.

Контрольные скоростные счетчики для низких давлений

Счетчики с одним отверстием. Такой счетчик показан на фиг. 77. Отверстия в этом счетчике калиброваны при помощи газгольдера, и время, необходимое для пропускания 1 $м^3$ газа или воздуха через отверстие при нормальном (стан-

Таблица величин h в сантиметрах H_2O для контрольного счетчика с одним отверстием

Табличные значения надо умножить на удельный вес газа

Температура в °С	Давление по барометру при 0° С в *мм* ртутного столба									
	685,8	688,3	690,9	693,4	696,0	698,5	701,0	703,6	706,1	708,7
—0,4	19,86	19,94	20,02	20,07	20,14	20,22	20,29	20,37	20,45	20,52
+1,7	19,66	19,74	19,81	19,88	19,94	20,02	20,09	20,17	20,24	20,33
4,4	19,45	19,53	19,61	19,69	19,76	19,81	19,89	19,96	20,04	20,12
7,2	19,28	19,33	19,41	19,48	19,56	19,63	19,69	19,76	19,81	19,91
10,0	19,08	19,15	19,23	19,28	19,35	19,43	19,51	19,58	19,63	19,71
12,8	18,90	18,97	19,02	19,10	19,18	19,25	19,30	19,38	19,46	19,53
15,6	18,72	18,77	18,85	18,92	19,00	19,05	19,13	19,20	19,28	19,33
18,3	18,54	18,59	18,67	18,75	18,82	18,87	18,95	19,02	19,08	19,15
21,1	18,36	18,42	18,49	18,57	18,62	18,69	18,77	18,85	18,90	18,97
23,9	18,19	18,26	18,31	18,39	18,47	18,52	18,59	18,67	18,72	18,80
26,7	18,01	18,08	18,16	18,21	18,29	18,36	18,42	18,49	18,54	18,62
29,4	17,85	17,91	17,98	18,06	18,11	18,19	18,26	18,31	18,39	18,44
32,2	17,70	17,75	17,83	17,88	17,96	18,01	18,08	18,16	18,21	18,29
35,0	17,53	17,60	17,65	17,73	17,78	17,86	17,93	17,98	18,06	18,11
37,8	17,37	17,45	17,50	17,58	17,63	17,70	17,75	17,83	17,88	17,96

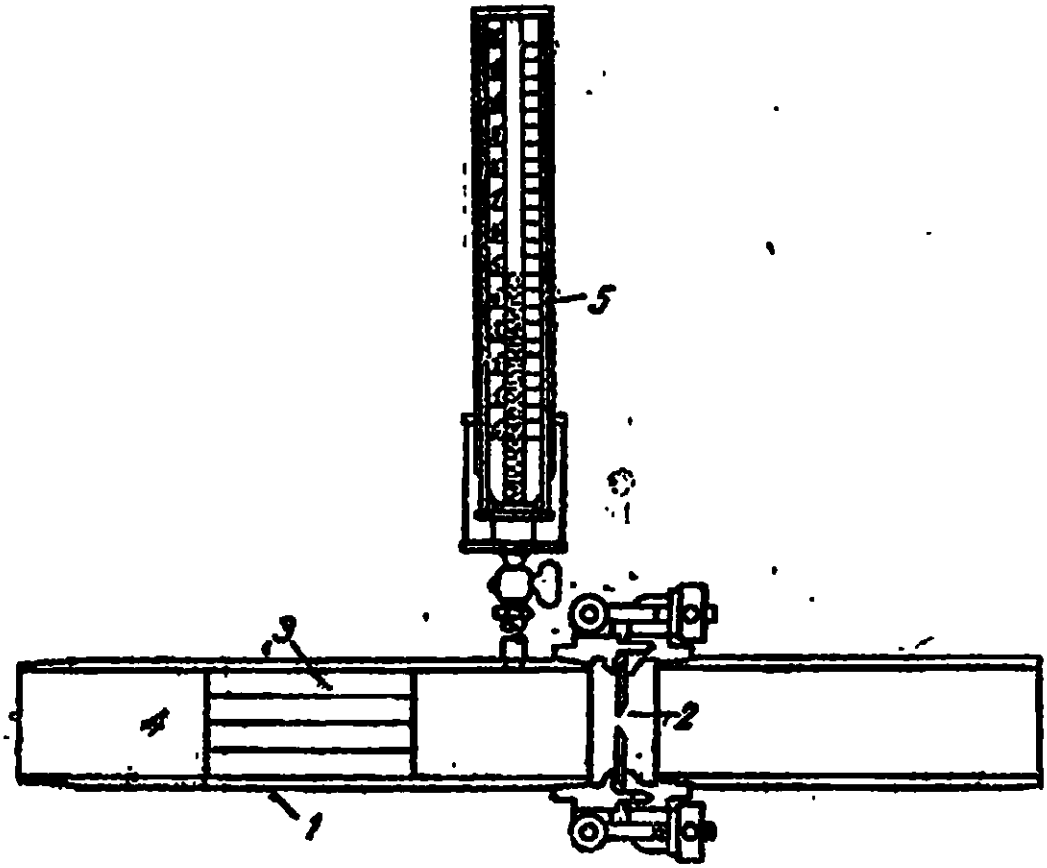
Температура в °С	Давление по барометру при 0° С в *мм* ртутного столба									
	711,2	713,7	716,3	718,8	721,4	723,9	726,4	729,0	731,5	734,1
—0,4	20,60	20,68	20,75	20,80	20,88	20,96	21,03	21,11	21,18	21,26
1,7	20,40	20,45	20,52	20,60	20,68	20,75	20,83	20,90	20,98	21,03
4,4	20,19	20,24	20,32	20,40	20,47	20,55	20,62	20,68	20,75	20,83
7,2	19,99	20,04	20,12	20,19	20,27	20,35	20,42	20,47	20,55	20,62
10,0	19,79	19,86	19,94	19,99	20,07	20,14	20,22	20,27	20,35	20,42
12,8	19,58	19,66	19,74	19,81	19,86	19,94	20,02	20,09	20,14	20,22
15,6	19,41	19,48	19,53	19,61	19,69	19,76	19,81	19,89	19,96	20,04
18,3	19,23	19,28	19,35	19,43	19,51	19,58	19,63	19,71	19,76	19,84
21,1	19,06	19,10	19,18	19,25	19,30	19,38	19,46	19,51	19,58	19,66
23,9	18,87	18,92	19,00	19,08	19,13	19,20	19,28	19,33	19,41	19,46
26,7	18,69	18,75	18,82	18,90	18,95	19,02	19,08	19,15	19,23	19,28
29,4	18,52	18,59	18,64	18,72	18,77	18,85	18,92	18,97	19,05	19,10
32,2	18,34	18,42	18,49	18,54	18,62	18,67	18,75	18,80	18,87	18,95
35,0	18,19	18,24	18,31	18,36	18,44	18,52	18,57	18,64	18,69	18,77
37,8	18,01	18,08	18,16	18,21	18,29	18,34	18,42	18,47	18,54	18,59

Температура в °С	Давление по барометру при 0° С в *мм* ртутного столба									
	736,6	739,1	741,7	744,2	746,8	749,3	751,8	754,4	756,9	759,5
—0,4	21,34	21,41	21,46	21,54	21,62	21,69	21,77	21,84	21,92	22,00
1,7	21,11	21,18	21,26	21,34	21,41	21,48	21,54	21,62	21,69	21,77
4,4	20,90	20,98	21,06	21,11	21,18	21,26	21,34	21,41	21,49	21,54
7,2	20,70	20,75	20,83	20,90	20,98	21,06	21,13	21,18	21,26	21,34
10,0	20,50	20,57	20,62	20,70	20,78	20,85	20,90	20,98	21,06	21,13
12,8	20,29	20,37	20,42	20,50	20,57	20,65	20,70	20,78	20,85	20,93
15,6	20,09	20,17	20,24	20,29	20,37	20,45	20,52	20,57	20,65	20,73
18,3	19,91	19,96	20,04	20,12	20,19	20,24	20,32	20,40	20,45	20,53
21,1	19,71	19,79	19,86	19,91	19,99	20,07	20,12	20,19	20,27	20,32
23,9	19,53	19,61	19,66	19,74	19,81	19,86	19,94	20,02	20,07	20,14
26,7	19,36	19,43	19,48	19,56	19,61	19,69	19,76	19,81	19,89	19,96
29,4	19,18	19,25	19,30	19,38	19,43	19,51	19,58	19,63	19,71	19,78
32,2	19,00	19,08	19,13	19,20	19,25	19,33	19,41	19,46	19,53	19,58
35,0	18,82	18,90	18,95	19,02	19,10	19,15	19,23	19,28	19,35	19,41
37,8	18,67	18,72	18,80	18,85	18,92	18,97	19,05	19,13	19,18	19,25

дартном) перепаде, отмечено на нижней (по потоку) стороне диафрагмы. Нормальный перепад определяется при помощи следующего уравнения (табл. 70):

$$h = 78{,}833\,\frac{GB}{T},$$

где h — давление до диафрагмы в *см* водяного столба;
B — давление по барометру в *мм* ртутного столба при 0° С;
T — абсолютная температура в °С;
G — удельный вес газа (вес воздуха принят за единицу).



Фиг. 77. Контрольный счетчик с одним отверстием.

1 — алюминиевая трубка 2"; *2* — отверстие диафрагмы; *3* — выпрямляющие поток трубы; *4* — направление потока; *5* — манометр с одной трубкой.

Приблизительные величины диаметров отверстий, соответствующие наиболее часто применяемым расходам во время испытания при нормальном (стандартном) перепаде, приводятся в табл. 71.

Таблица 71

Приблизительная пропускная способность отверстий контрольных скоростных счетчиков для низких давлений

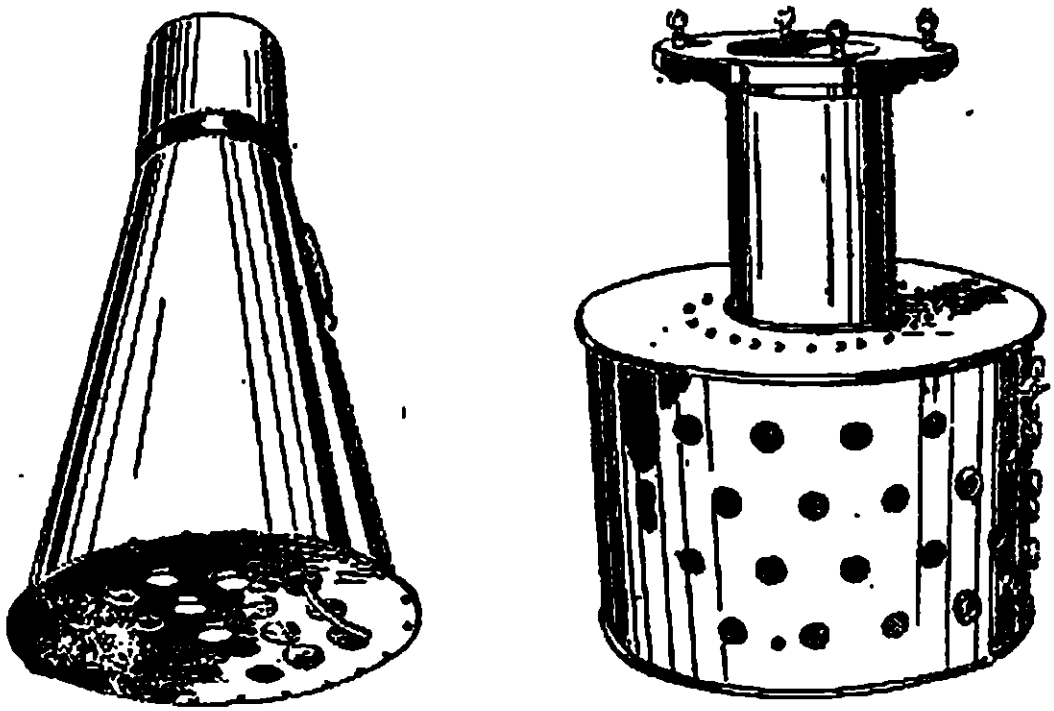
2" счетчик			4" счетчик		
Диаметр отверстия в дм.	Пропускная способность в м³/час	Время в сек. на 1 м³	Диаметр отверстия в дм.	Пропускная способность в м³/час	Время в сек. на 1 м³
0,250	3,96	882	0,500	16,414	218,9
0,375	9,34	388	0,750	36,79	98,8
0,500	16,98	211	1,000	67,92	53,0
0,625	26,60	134	1,250	107,54	33,5
0,750	39,62	92	1,500	158,48	22,6
0,875	56,60	64	1,750	226,40	15,9
1,000	76,41	46	2,000	311,30	11,6

Скоростные счетчики со многими отверстиями, воронкообразные. Счетчики со многими отверстиями показаны на фиг. 78. Принцип их работы и их использование те же, что и при контрольных счетчиках с одним отверстием. Основная разница между этими двумя типами счетчиков заключается в способе получения желаемой скорости потока. В пробном счетчике со многими отверстиями шайба, на которой имеется много отверстий разных диаметров, укреплена неподвижно на счетчике. Желаемую скорость потока получают по нескольким отверстиям одновременно. Те отверстия, которые не используются, забиваются каучуковыми пробками.

Ниже приводятся номинальные диаметры и точные данные пропускной способности отверстий в счетчиках второго типа:

Номинальный диаметр отверстия в дм.	Расход при нормальном перепаде в $м^3/час$
$1^1/_2$	101,88
1	45,28
$^3/_4$	25,47
$^1/_2$	11,32
$^1/_4$	2,83

Отверстия калибруются по контрольному счетчику типа газгольдера, развертывают их таким образом, чтобы можно было получить расходы, показанные выше, если имеет место нормальный (стандартный) перепад



Фиг. 78. Два типа контрольных счетчиков со многими отверстиями.

Нормальный перепад дается заводом, изготовляющим контрольные счетчики, и определяется при помощи следующего уравнения (табл. 72):

$$h = \frac{BG}{0.02484\,T},$$

где h — перепад в *мм* водяного столба;
B — давление по барометру в *мм* ртутного столба при 0° С;
G — удельный вес проходящего через счетчик газа (воздух принят за единицу);
T — температура проходящего через счетчик газа в ° С абс.

Перепад, обычно применяемый при контрольных счетчиках со многими отверстиями, составляет около половины перепада, применяемого при счетчиках с одним отверстием. Эта разница между перепадами объясняется практическими соображениями фирм, изготовляющих счетчики, и не связана с особенностями самих счетчиков.

Пользование счетчиками низкого давления обоих типов, указанных выше. При употреблении указанных счетчиков производятся следующие последовательные операции:

1. Замеряют температуру, удельный вес газа и барометрическое давление.
2. Берут из табл. 72 стандартный перепад, соответствующий наблюдаемым температуре и давлению по барометру.
3. Умножают найденное таким образом значение h на удельный вес газа. Таким путем получается правильный перепад, который надо применять при испытании.
4. Выбирают и устанавливают ту диафрагму, через которую можно получить желаемый расход, если применяется счетчик с одним отверстием. Если применяется воронкообразный счетчик, то удаляют каучуковые пробки с той группы отверстий, которая может дать желаемый расход.
5. Регулируют скорость прохождения газа как через испытуемый счетчик, так и через контрольный, чтобы на последнем можно было получить правильный перепад.
6. Устанавливают время испытания по одному или нескольким поворотам стрелки секундомера и вычисляют соответствующий расход газа в куб. метрах в час.

Погрешность при таких замерах сводится обычно к следующему:

$$\text{Процент погрешности} = 100\,\frac{(\text{расход по индексу испытываемого счетчика минус расход по индексу контрольного счетчика})}{\text{расход по индексу контрольного счетчика}}.$$

Необходимые предосторожности. При пользовании счетчиками надо соблюдать следующие предосторожности:

1. Перепад обычно применяется небольшой; поэтому нужно производить замер его тщательно во избежание крупных ошибок. Дифференциальный манометр должен быть однотрубного типа с тем, чтобы отсчет делать только по одному уровню жидкости. Диаметр трубы дифференциального манометра должен быть достаточно велик (не меньше $^1/_8''$) во избежание ошибок, получающихся вследствие капиллярности. Спиральные манометры с узким отверстием в трубе считаются ненадежными. Здесь может быть полезен наклонный манометр, если только он хорошо калиброван и если диаметр труб в свету достаточно велик.
2. Шайбы счетчика должны поддерживаться в чистоте, и должны сохраняться форма и размеры отверстий.
3. При скорости потока, превышающей 8,045 *км/час* получается значительная ошибка. Влияние большой скорости можно значительно уменьшить, если установить контрольный счетчик в направлении потока.
4. Отверстия счетчиков следует периодически калибровать по счетчику типа газгольдера, имеющему определенную точность.

Пробные счетчики для испытания в условиях критического потока

Когда абсолютное давление струи газа, проходящего через отверстие счетчика после диафрагмы, составляет около половины абсолютного давления до диафрагмы, то наступают условия „критического потока".

При „критическом потоке" скорость движения в суженном сечении потока равна скорости звука в газе при температуре, наблюдаемой в этом сечении. В условиях „критического потока" объем газа, отнесенный к состоянию его перед истечением через диафрагму, не меняется с увеличением давления до диафрагмы. Отсюда, если диафрагма установлена у выхода проверяемого счетчика и если газ проходит последовательно через счетчик и диафрагму при давлении, достаточном для того, чтобы создать условия „критического потока", то давление в счетчике может повышаться без увеличения показания индекса счетчика, если только температура остается без изменения.

Скорость звука в газовой среде определяется на основании следующего уравнения:

$$v_2 = \sqrt{gnp_2V_2}, \qquad (1)$$

Таблица 72

Величины h для контрольных счетчиков со многими отверстиями

Поток через контрольный счетчик с 1¼" отверстием

Давление в *мм* водяного столба, необходимое для получения потока газа в 1 *м³/сек*

Давление в *мм* ртутного столба

Температура в °С	728,4	729,0	731,5	734,1	736,6	739,1	741,7	744,2	746,8	749,3	751,8	754,4	756,9	759,5	762,0	764,5	767,1
0	105,93	107,44	107,70	108,20	108,46	108,97	109,22	109,73	109,96	110,24	110,74	111,00	111,51	111,76	112,27	112,53	113,03
0,6	105,68	107,19	107,44	107,95	108,20	108,71	108,97	109,47	109,73	110,24	110,49	111,00	111,25	111,51	112,01	112,27	112,78
1,1	105,68	106,93	107,19	107,70	107,95	108,46	108,71	109,22	109,47	109,98	110,24	110,74	111,00	111,51	111,76	112,27	112,52
1,7	105,43	106,68	107,19	107,44	107,95	108,20	108,46	108,97	109,22	109,73	109,98	110,49	110,74	111,25	111,51	112,01	112,27
2,2	105,17	105,43	106,43	107,19	107,70	107,95	108,46	108,71	109,22	109,47	109,73	110,24	110,49	111,00	111,25	111,76	112,01
2,8	104,92	106,17	106,68	106,93	107,44	107,70	108,20	108,46	108,97	109,22	109,73	109,98	110,24	110,74	111,00	111,51	111,76
3,3	105,66	106,17	106,43	106,93	107,19	107,44	107,95	108,20	108,71	108,97	109,47	109,73	110,24	110,49	111,00	111,25	111,51
3,9	105,41	105,92	106,17	106,68	106,93	107,44	107,70	107,95	108,43	108,71	109,22	109,47	109,98	110,24	110,74	111,00	111,25
4,4	105,16	105,66	105,92	106,43	106,68	107,19	107,44	107,95	108,20	108,71	108,97	109,22	109,73	109,98	110,49	110,74	111,25
5,0	105,16	105,41	105,92	106,17	106,43	106,93	107,19	107,70	107,95	108,46	108,71	109,22	109,47	109,73	110,24	110,49	111,00
5,6	104,90	105,16	105,66	105,92	106,43	106,68	107,19	107,44	107,70	108,20	108,46	108,97	109,22	109,73	109,98	110,24	110,74
6,1	104,65	104,90	105,41	105,66	105,17	106,43	106,93	107,19	107,70	107,95	108,20	108,71	108,97	109,47	109,73	110,24	110,49
6,7	104,39	104,90	105,16	105,68	105,92	106,17	106,68	106,93	107,44	107,70	108,20	108,46	108,71	109,22	109,47	109,98	110,24
7,2	104,14	104,65	104,90	105,41	105,66	106,17	106,43	106,68	107,19	107,44	107,95	108,20	108,71	108,97	109,22	109,73	109,98
7,8	104,14	104,39	104,65	105,16	105,41	105,92	106,17	106,68	105,93	107,19	107,70	107,95	108,46	108,71	108,22	109,47	109,73
8,3	103,89	104,14	104,65	104,90	105,16	105,66	106,92	106,43	106,68	107,19	107,44	107,70	108,20	108,46	108,97	109,22	109,73
8,9	103,63	103,89	104,39	104,65	105,16	105,41	105,92	106,17	106,43	106,93	107,19	107,70	107,95	108,46	108,71	108,97	109,47
9,4	103,38	103,89	104,14	104,39	104,90	105,16	105,66	105,92	106,43	106,68	106,93	107,44	107,70	108,20	108,46	108,97	109,22
10,0	103,12	103,63	103,89	104,39	104,65	104,90	105,41	105,66	106,17	106,43	106,93	107,19	107,44	107,95	108,20	108,71	108,97
10,6	103,12	103,38	103,63	104,14	104,39	104,90	105,16	105,41	105,92	106,17	106,68	106,93	107,44	107,70	107,95	108,46	108,71
11,1	102,87	103,12	103,63	103,89	104,14	104,65	104,90	105,41	105,66	106,17	106,43	106,68	107,19	107,44	107,95	108,20	108,46
11,7	102,62	102,87	103,38	103,63	104,14	104,39	104,65	105,15	105,41	105,92	106,17	106,93	106,93	107,19	107,70	107,95	108,46
12,2	102,36	102,87	103,12	103,38	103,89	104,14	104,65	104,90	105,16	105,66	105,92	106,43	106,68	107,19	107,44	107,70	108,20
12,8	102,11	102,62	102,87	103,38	103,63	103,89	104,39	104,65	105,16	105,41	105,66	106,17	106,43	106,93	107,19	107,70	107,95
13,3	102,11	102,36	102,62	103,12	103,38	103,89	104,14	104,39	104,90	105,16	105,66	105,92	106,17	106,68	106,93	107,44	107,70
13,9	101,85	102,11	102,62	102,87	103,12	103,63	103,89	104,39	104,65	104,90	105,41	105,66	106,17	106,43	106,68	107,19	107,44
14,4	101,60	101,85	102,36	102,62	103,12	103,38	103,63	104,14	104,39	104,90	105,16	105,41	105,92	106,17	106,68	106,93	107,19
15,0	101,36	101,85	102,11	102,62	102,87	103,12	103,63	103,89	104,14	104,65	104,90	105,41	105,66	105,92	106,43	106,68	107,19
15,6	101,35	101,60	101,85	102,36	102,62	103,12	103,38	103,63	104,14	104,39	104,65	105,16	105,41	105,92	106,17	106,43	106,93
16,1	101,09	101,35	101,85	102,11	102,36	102,87	103,12	103,63	103,89	104,14	104,65	104,90	105,16	105,66	105,92	106,43	106,68
16,7	100,84	101,09	101,60	101,85	102,36	102,62	102,87	103,38	103,63	104,14	104,39	104,65	105,16	105,41	105,66	106,17	106,43
17,2	100,58	100,09	101,35	101,60	102,11	102,36	102,87	103,12	103,38	103,89	104,14	104,65	104,90	105,16	105,66	105,92	106,17
17,8	100,58	100,84	101,09	101,60	101,85	102,11	102,62	102,87	103,38	103,63	103,89	104,39	104,65	104,90	105,41	105,66	106,17
18,3	100,33	100,58	101,09	101,35	101,60	102,11	102,36	102,62	103,12	103,38	103,89	104,14	104,39	104,90	105,16	105,41	105,92
18,9	100,08	100,33	100,84	101,09	101,35	101,85	102,11	102,62	102,87	103,12	103,63	103,89	104,14	104,39	104,90	105,16	105,41

20,0	99,62	100,08	100,33	100,84	101,09	101,35	101,85	102,11	102,36	102,87	103,12	103,38	103,89	104,14	104,65	104,90	105,16
20,5	99,57	99,82	100,33	100,58	100,84	101,35	101,60	101,85	102,36	102,62	102,87	103,38	103,64	104,14	104,41	104,65	105,16
21,1	99,31	99,57	100,08	100,33	100,58	101,09	101,35	101,85	102,11	102,36	102,87	103,12	103,35	103,99	104,14	104,65	104,90
21,7	99,06	99,57	99,82	100,08	100,58	100,84	101,09	101,60	102,11	102,36	102,62	102,87	103,28	103,63	103,89	104,39	104,85
22,2	99,06	99,31	99,57	100,08	100,33	100,58	101,09	101,35	101,60	102,11	102,36	102,87	103,12	103,28	103,89	104,14	104,39
22,8	98,81	99,06	99,57	99,82	100,08	100,58	100,84	101,09	101,60	101,85	102,11	102,62	102,87	103,28	103,63	103,89	104,39
23,3	98,55	98,81	99,31	99,57	100,08	100,33	100,58	101,09	101,35	101,60	102,11	102,35	102,62	103,12	103,28	103,63	104,14
23,9	98,30	98,81	99,06	99,31	99,82	100,08	100,58	100,84	101,09	101,60	101,85	102,11	102,62	102,87	103,12	103,63	103,89
24,4	98,30	98,55	98,81	99,31	99,57	99,82	100,33	100,58	100,84	101,35	101,60	102,11	102,35	102,62	103,12	103,28	103,63
25,0	98,04	98,30	98,81	99,06	99,31	99,62	100,08	100,33	100,84	101,09	101,35	101,85	102,11	102,62	102,87	103,12	103,63
25,6	97,79	98,04	98,55	98,81	99,06	99,57	99,82	100,08	100,58	100,84	101,35	101,60	101,85	102,36	102,62	102,87	103,38
26,1	97,79	98,04	98,30	98,81	99,06	99,31	99,82	100,08	100,33	100,84	101,09	101,35	101,85	102,11	102,36	102,87	103,12
26,7	97,54	97,79	98,04	98,55	98,81	99,06	99,57	99,82	100,33	100,58	100,84	101,35	101,60	101,85	102,36	102,62	102,87
27,2	97,28	97,54	98,04	98,30	98,55	99,06	99,31	99,57	100,08	100,33	100,58	101,09	101,35	101,60	102,11	102,36	102,87
27,8	97,03	97,54	97,79	98,04	98,55	98,81	99,06	99,57	99,82	100,08	100,58	100,84	101,09	101,60	101,85	102,11	102,62
28,3	97,03	97,28	97,54	98,04	98,30	98,55	99,06	99,31	99,57	100,08	100,33	100,58	101,09	101,35	101,60	102,11	102,36
28,9	96,77	97,03	97,54	97,79	98,04	98,55	98,81	99,06	99,57	99,82	100,08	100,58	100,84	101,09	101,60	101,85	102,11
29,4	96,52	97,03	97,28	97,54	98,04	98,30	98,55	99,06	99,31	99,57	100,08	100,33	100,58	101,09	101,35	101,60	102,11
30,0	96,52	96,77	97,03	97,54	97,79	98,04	98,55	98,81	99,06	99,57	99,82	100,08	100,33	100,84	101,09	101,35	101,85
30,6	96,27	96,52	96,77	97,03	97,28	97,54	98,04	98,30	98,55	98,81	99,31	99,57	99,82	100,33	100,58	100,84	101,35
31,1	96,01	96,52	96,77	97,03	97,28	97,79	98,04	98,30	98,81	99,06	99,31	99,82	100,08	100,33	100,84	101,09	101,35
31,7	96,76	96,27	96,52	96,77	97,28	97,54	97,79	98,30	98,81	99,31	99,57	99,82	100,33	100,58	100,84	101,35	
32,2	96,76	96,01	96,27	96,77	97,03	97,28	97,79	98,04	98,30	98,81	99,06	99,31	99,82	100,08	100,33	100,84	101,09
32,8	96,50	95,76	96,27	96,52	96,77	97,28	97,54	97,79	98,30	98,55	98,81	99,31	99,57	99,82	100,33	100,58	100,84
33,3	95,25	95,76	96,01	96,27	96,77	97,03	97,28	97,79	98,04	98,30	98,81	99,06	99,31	99,82	100,08	100,33	100,58
33,9	95,25	95,50	95,76	96,27	96,52	96,77	97,28	97,54	97,79	98,30	98,55	98,81	99,06	99,57	99,82	100,08	100,58
34,4	95,00	95,25	95,76	96,01	96,27	96,77	97,03	97,28	97,79	98,04	98,30	98,55	99,06	99,31	99,57	100,08	100,33
35,0	94,74	95,25	95,50	95,76	96,27	96,52	96,77	97,28	97,54	97,79	98,04	98,55	98,81	99,06	99,57	99,82	100,08
35,6	94,74	95,00	95,25	95,76	96,01	96,27	96,77	97,03	97,28	97,54	98,04	98,30	98,55	99,06	99,31	99,57	100,08
36,1	94,49	94,74	95,25	95,50	95,76	96,01	96,52	96,77	97,03	97,54	97,79	98,04	98,55	98,81	99,06	99,31	99,82
36,7	94,23	94,74	95,00	95,25	95,76	96,01	96,27	96,52	97,03	97,28	97,54	98,04	98,30	98,55	99,06	99,31	99,57
37,2	94,23	94,49	94,74	95,25	95,50	95,76	96,27	96,52	96,77	97,03	97,54	97,79	98,04	98,55	98,81	99,06	99,31
37,8	93,98	94,23	94,74	95,00	95,25	95,76	96,01	96,27	96,52	97,03	97,28	97,54	98,04	98,55	98,81	99,31	
38,3	93,73	94,23	94,49	94,74	95,25	95,50	95,76	96,01	96,52	96,77	97,03	97,54	97,79	98,04	98,55	98,81	99,06
38,9	93,73	93,98	94,23	94,74	95,00	95,25	95,76	96,01	96,27	96,52	97,03	97,28	97,54	98,04	98,55	98,81	
39,4	93,47	93,73	94,23	94,49	94,74	95,25	95,50	95,76	96,01	96,52	96,77	97,03	97,54	97,79	98,04	98,30	98,81
40,0	93,22	93,78	93,98	94,23	94,74	95,00	95,25	95,50	96,01	96,27	96,52	97,03	97,28	97,54	97,79	98,30	98,55
40,6	93,22	93,47	93,73	94,23	94,49	94,74	95,25	95,50	95,76	96,01	96,52	96,77	97,03	97,28	97,79	98,04	98,30
41,1	92,96	93,22	93,73	93,98	94,23	94,74	95,00	95,25	95,50	96,01	96,27	96,52	97,03	97,28	97,54	97,79	98,30
41,7	92,96	93,22	93,47	93,73	94,23	94,49	94,74	95,00	95,50	95,76	96,01	96,52	96,77	97,03	97,28	97,79	98,04
42,2	92,71	92,96	93,22	93,73	93,98	94,23	94,74	95,00	95,25	95,50	96,01	96,27	96,52	96,77	97,28	97,54	97,79
42,8	92,46	92,96	93,22	93,47	93,73	93,98	94,23	94,49	94,74	95,00	95,50	95,76	96,01	96,52	96,77	97,03	97,28	97,79
43,3	92,46	92,71	92,96	93,22	93,73	93,98	94,23	94,49	95,00	95,25	95,50	96,01	96,27	96,52	96,77	97,28	97,54

Примечание.

$$h = \frac{BO}{0{,}002484\ (273 + t)\ G^2},$$

где h — давление в *мм* водяного столба, необходимое для того, чтобы пропускать газ со скоростью в 1 $м^3/сек$ через отверстие диаметром $1\frac{1}{8}$";
B — откорректированное давление по барометру в *мм* водяного столба;
G — удельный вес газа (воздух равен 1,00);
t — температура в °С.

где v_2 — скорость звука в *м/сек*;
g — ускорение силы тяжести *м/сек²*;
n — отношение теплоемкостей газов;
p_2 — абсолютное давление в *кг/м²*;
V_2 — удельный объем газа в *м³/кг*.

Индекс 2, поставленный под буквами p и V в уравнении (1), относится к условиям в суженном сечении потока при прохождении газа через отверстие и в этом случае означает скорость потока в этом сечении.

Так как давление у отверстия контрольного счетчика меняется в сложных условиях, то расширение газа должно быть адиабатическим. Поэтому применяется основное уравнение адиабатического изменения газа:

$$v_2 = \sqrt{2g\frac{n}{n-1}(p_1V_1 - p_2V_2)}. \qquad (2)$$

Индекс 1, поставленный под буквами p и V в уравнении (2), относится к условиям движения газа до диафрагмы.

Из уравнений (1) и (2) можно вывести точное соотношение между давлениями до и после диафрагмы и таким образом получить условия критического потока:

$$p_2 \geq p_1\left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n}{n-1}}. \qquad (3)$$

Уравнение (2) можно преобразовать так, чтобы получить протекающий объем. Тогда оно получит следующий вид:

$$q_1 = ca\sqrt{gn\frac{RT_1}{m}\left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n+1}{n-1}}}. \qquad (4)$$

где q_1 — расход газа в *м³/сек* при давлении и температуре, существующих до диафрагмы;
c — коэфициент истечения отверстия;
a — площадь сечения отверстия в *м²*;
R — газовая постоянная;
T_1 — абсолютная температура до диафрагмы;
m — молекулярный вес газа.

Если q равняется 1 *м³*, а время измеряется секундами, то $q_1 = \frac{1}{t}$.

Если подставить значения, относящиеся к воздуху в уравнение (4), то при температуре в 15° С получается следующее уравнение:

$$\frac{1}{t_a} = ca\sqrt{g\frac{(1{,}403)\,R\,(288)\,(0{,}3347)}{m_a}}. \qquad (5)$$

Если однажды определено время прохождения воздуха (t_a) для какого-либо отверстия при точной его калибровке, то это время можно перевести на время для газа (t_g) при помощи коэфициента, зависящего от температуры удельного веса, и соотношения теплоемкостей газа, который применялся для проведения опыта.

Деля уравнение (4) для газа на уравнение (5) для воздуха, сокращая c, a, g и R и принимая $\frac{m_g}{m_a}$ равным удельному весу G, подставляя далее вместо n значение k, представляющее отношение теплоемкостей газа при опыте, получаем следующее уравнение:

$$t_g = t_a\sqrt{\frac{(1{,}403)\,(288)\,(0{,}3347)}{(273+t)\,k}\cdot\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}. \qquad (6)$$

Упрощая уравнение (6), имеем:

$$t_g = Mt_aF\sqrt{G},$$

где t_g — время в сек., необходимое для того, чтобы пропустить через счетчик M *м³* газа (показание индекса);

t_a — время в сек., необходимое для прохождения 1 $м^3$ воздуха (что отмечается у отверстия);

$\sqrt{G}$ — квадратный корень из удельного веса газа, значение которого помещено в табл. 77.

$$F = \sqrt{\frac{(1{,}403)(288)(0{,}3347)}{(273+t)k} \cdot \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}.$$

Эти величины можно найти в табл. 74.

Отношение теплоемкости газовых смесей можно получить путем вычисления соотношения сумм теплоемкостей отдельных фракций газов при постоянной температуре и постоянном объеме. Вычисление делается на основании табл. 73.

Таблица 73

Отношение теплоемкостей разных газов k

Теплоемкость при постоянном давлении C_p и постоянном объеме C_v дана в *Кал/м³* при 15,6° С и при давлении в 760 *мм* ртутного столба

Наименование газов	C_p	C_v	$k = \frac{C_p}{C_v}$
Водород	0,288	0,205	1,409
Азот	0,295	0,210	1,404
Кислород	0,295	0,210	1,401
Окись углерода	0,295	0,210	1,404
Углекислый газ	0,363	0,279	1,305
Метан	0,376	0,290	1,295
Этан	0,490	0,402	1,220
Пропан	0,645	0,555	1,150
Бутан	0,848	0,763	1,110
Пентан	1,018	0,935	1,090
Ацетилен	0,423	0,336	1,260
Этилен	0,442	0,352	1,310
Аммиак	0,384	0,293	1,290
Сернистый ангидрид	0,421	0,327	1,290
Воздух	0,295	0,210	1,403

В табл. 75 и 76 приведены данные соответственно данным табл. 73 и 74. Эти данные опубликованы в бюллетене *E*-9 American Meter Co и применяются для контрольных диафрагмовых счетчиков Пирса при критическом потоке. Числовые значения табл. 75 составлены на основе истинных адиабатических условий потока.

Пример. Если природный газ состоит из 80% метана и 20% этана, то для определения k производится следующее вычисление:

Газ	Объем фракции в $м^3$	C_p на 1 $м^3$	Фракция C_p	C_v на 1 $м^3$	Фракция C_v
1	2	3	4	5	6
Метан	0,80	0,376	0,301	0,290	0,232
Этан	0,20	0,490	0,098	0,402	0,080
Теплоемкость смеси		$C_p = 0{,}399$		$C_v = 0{,}312$	

Отношение теплоемкостей $k = 0{,}399 : 0{,}312 = 1{,}278$.

Коэфициенты F для температур и отношений теплоемкости

$$\text{Коэфициент } F = \sqrt{\frac{(1{,}408)\ (288{,}9)\ (0{,}3347)\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}{(273+t)\,k}}$$

Температура в °С	Величины k, отношения удельных теплоемкостей										
	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,34	1,36	1,38	1,40	1,403
−12,2	1,089	1,086	1,083	1,080	1,077	1,074	1,069	1,063	1,058	1,053	1,052
−9,44	1,083	1,080	1,077	1,074	1,072	1,069	1,063	1,058	1,053	1,047	1,046
−6,67	1,077	1,075	1,072	1,069	1,066	1,063	1,058	1,052	1,047	1,042	1,041
−3,89	1,072	1,069	1,066	1,063	1,061	1,058	1,052	1,047	1,042	1,036	1,035
−1,11	1,067	1,064	1,061	1,058	1,055	1,052	1,047	1,041	1,036	1,031	1,030
+1,67	1,061	1,058	1,055	1,052	1,050	1,047	1,041	1,036	1,031	1,026	1,025
4,44	1,056	1,053	1,050	1,047	1,044	1,041	1,036	1,031	1,026	1,021	1,020
5,56	1,054	1,051	1,048	1,045	1,042	1,040	1,034	1,029	1,024	1,019	1,018
6,67	1,052	1,049	1,046	1,043	1,040	1,037	1,032	1,027	1,022	1,017	1,016
7,78	1,049	1,047	1,044	1,041	1,038	1,035	1,030	1,025	1,020	1,015	1,014
8,89	1,047	1,045	1,042	1,039	1,036	1,033	1,028	1,023	1,018	1,013	1,012
10,00	1,045	1,043	1,040	1,037	1,034	1,031	1,026	1,021	1,016	1,011	1,010
11,10	1,043	1,041	1,038	1,035	1,032	1,029	1,024	1,019	1,014	1,009	1,008
12,20	1,041	1,039	1,036	1,033	1,030	1,027	1,022	1,017	1,012	1,007	1,006
13,30	1,039	1,037	1,034	1,031	1,028	1,025	1,020	1,015	1,010	1,005	1,004
14,40	1,037	1,035	1,032	1,029	1,026	1,023	1,018	1,013	1,008	1,003	1,002
15,60	1,035	1,033	1,030	1,027	1,024	1,021	1,016	1,011	1,006	1,001	1,000
16,70	1,033	1,031	1,028	1,025	1,022	1,019	1,014	1,009	1,004	0,999	0,998
17,80	1,031	1,029	1,026	1,023	1,020	1,017	1,012	1,007	1,002	0,997	0,996
18,90	1,029	1,027	1,024	1,021	1,018	1,015	1,010	1,005	1,000	0,995	0,994
20,00	1,027	1,025	1,022	1,019	1,016	1,013	1,008	1,003	0,998	0,993	0,992
21,10	1,025	1,023	1,020	1,017	1,015	1,012	1,006	1,001	0,996	0,991	0,990
22,20	1,024	1,021	1,018	1,015	1,013	1,010	1,005	0,999	0,995	0,990	0,989
23,30	1,022	1,019	1,016	1,013	1,011	1,008	1,003	0,997	0,993	0,988	0,987
24,40	1,020	1,017	1,014	1,011	1,009	1,006	1,001	0,996	0,991	0,986	0,985
25,60	1,018	1,015	1,012	1,009	1,007	1,004	0,999	0,994	0,989	0,984	0,983
26,70	1,016	1,013	1,010	1,008	1,005	1,002	0,997	0,992	0,987	0,982	0,981
27,80	1,014	1,011	1,009	1,006	1,003	1,000	0,995	0,990	0,985	0,980	0,979
28,90	1,012	1,010	1,007	1,004	1,001	0,999	0,993	0,988	0,984	0,979	0,978
30,00	1,010	1,008	1,005	1,002	1,000	0,997	0,992	0,986	0,982	0,977	0,976
31,10	1,008	1,006	1,003	1,000	0,998	0,995	0,990	0,985	0,980	0,975	0,974
32,20	1,007	1,004	1,001	0,998	0,996	0,993	0,988	0,983	0,978	0,973	0,972
33,30	1,005	1,002	0,999	0,997	0,994	0,991	0,986	0,981	0,976	0,972	0,971
34,40	1,003	1,000	0,998	0,995	0,992	0,989	0,984	0,979	0,975	0,970	0,969
35,60	1,001	0,999	0,996	0,993	0,991	0,988	0,983	0,977	0,973	0,968	0,967
36,70	0,999	0,997	0,994	0,991	0,989	0,986	0,981	0,976	0,971	0,966	0,965
37,80	0,998	0,995	0,992	0,989	0,987	0,984	0,979	0,974	0,969	0,965	0,964

Коэфициенты для температуры и отношения удельных теплоемкостей k

Умножают стандартное время прохождения воздуха через контрольный счетчик для условий критического потока на величины, соответствующие данным температуры и отношению удельных теплоемкостей газа

$$\text{Коэфициент} = \sqrt{\frac{288{,}9 \cdot 1{,}405}{(273 + t)\,k}}$$

Температура в °С	Величины k — отношение удельных теплоемкостей										
	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,34	1,36	1,38	1,40	1,405
— 12,2	1,106	1,102	1,098	1,093	1,089	1,085	1,077	1,069	1,061	1,054	1,052
— 9,44	1,101	1,096	1,092	1,088	1,084	1,080	1,071	1,063	1,056	1,048	1,046
— 6,67	1,095	1,090	1,086	1,082	1,078	1,074	1,066	1,058	1,050	1,043	1,041
— 3,84	1,089	1,085	1,081	1,077	1,072	1,068	1,060	1,053	1,045	1,037	1,035
— 1,11	1,084	1,079	1,075	1,071	1,067	1,063	1,055	1,047	1,040	1,032	1,030
+ 1,67	1,078	1,073	1,070	1,066	1,061	1,057	1,049	1,042	1,034	1,027	1,025
4,44	1,073	1,068	1,064	1,060	1,056	1,052	1,044	1,037	1,029	1,022	1,020
5,56	1,071	1,066	1,062	1,058	1,054	1,050	1,042	1,035	1,027	1,020	1,018
6,67	1,068	1,064	1,060	1,056	1,052	1,048	1,040	1,032	1,025	1,018	1,016
7,78	1,066	1,062	1,058	1,054	1,050	1,046	1,038	1,030	1,023	1,016	1,014
8,89	1,064	1,060	1,056	1,052	1,048	1,044	1,036	1,028	1,021	1,014	1,012
10,00	1,062	1,058	1,054	1,050	1,046	1,042	1,034	1,026	1,019	1,012	1,010
11,10	1,060	1,056	1,052	1,048	1,044	1,040	1,032	1,024	1,017	1,010	1,008
12,20	1,058	1,054	1,050	1,046	1,042	1,038	1,030	1,022	1,015	1,008	1,006
13,30	1,056	1,052	1,048	1,044	1,040	1,036	1,028	1,020	1,013	1,006	1,004
14,40	1,054	1,050	1,046	1,042	1,038	1,034	1,026	1,018	1,011	1,004	1,002
15,60	1,052	1,048	1,044	1,040	1,036	1,032	1,024	1,016	1,009	1,002	1,000
16,70	1,050	1,046	1,042	1,038	1,034	1,030	1,022	1,015	1,007	1,000	0,998
17,80	1,048	1,044	1,040	1,036	1,032	1,028	1,020	1,013	1,005	0,998	0,996
18,90	1,046	1,042	1,038	1,034	1,030	1,026	1,018	1,011	1,003	0,996	0,994
20,00	1,044	1,040	1,036	1,032	1,028	1,024	1,016	1,009	1,001	0,994	0,992
21,10	1,042	1,038	1,034	1,030	1,026	1,022	1,014	1,007	0,999	0,992	0,990
22,20	1,041	1,036	1,032	1,028	1,024	1,020	1,012	1,005	0,998	0,990	0,989
23,30	1,038	1,034	1,030	1,026	1,022	1,018	1,010	1,003	0,996	0,989	0,987
24,40	1,036	1,032	1,028	1,024	1,020	1,016	1,009	1,001	0,994	0,987	0,985
25,60	1,034	1,030	1,026	1,022	1,018	1,014	1,007	0,999	0,992	0,985	0,983
26,70	1,032	1,028	1,024	1,020	1,016	1,012	1,005	0,997	0,990	0,983	0,981
27,80	1,030	1,026	1,022	1,018	1,014	1,011	1,003	0,996	0,988	0,981	0,979
28,90	1,028	1,024	1,020	1,016	1,013	1,009	1,001	0,994	0,987	0,979	0,978
30,00	1,026	1,022	1,018	1,015	1,011	1,007	0,999	0,992	0,985	0,978	0,976
31,10	1,025	1,021	1,017	1,013	1,009	1,005	0,997	0,990	0,983	0,976	0,974
32,20	1,023	1,019	1,015	1,011	1,007	1,003	0,996	0,988	0,981	0,974	0,972
33,30	1,021	1,017	1,013	1,009	1,005	1,001	0,994	0,987	0,979	0,972	0,971
34,40	1,019	1,015	1,011	1,007	1,003	1,000	0,992	0,985	0,978	0,971	0,969
35,60	1,017	1,013	1,009	1,005	1,002	0,998	0,990	0,983	0,976	0,969	0,967
36,70	1,015	1,011	1,007	1,004	1,000	0,996	0,988	0,981	0,974	0,967	0,965
37,80	1,014	1,010	1,006	1,002	0,998	0,994	0,987	0,979	0,972	0,965	0,964

Таблица 76

Коэфициенты для числовых значений *k*

Числовые значения *k*, определяемые при помощи этой таблицы, применяются для определения коэфициентов, получаемых из предыдущей таблицы

Компоненты газа	Анализ в %	C_p		Анализ в %	C_v	
		A	*Кал*		*A*	*Кал*
Метан	0,98	401	392,98	0,98	304	297,92
Этан	0,02	686	13,7	0,02	562	11,24
Углекислый газ	—	377	—	—	290	—
Кислород	—	293	—	—	209	—
Воздух	—	289	—	—	206	—
Азот	—	289	—	—	205	—
Водород	—	289	—	—	265	—
Окись углерода	—	286	—	—	204	—
Этилен	—	476	—	—	392	—
Бензол	—	982	—	—	700	—
	1,00	—	406,68	1,00	—	309,16

$$k = \frac{406{,}68}{309{,}16} = 1{,}313.$$

Примечание. *A* — удельная теплота в *кал* на 1000 $м^3$ при 15,6° С и 1,033 $кг/см^2$.

Применение контрольного счетчика при условиях критического потока. При применении этого счетчика следует соблюдать следующие правила:

1. Одно из отверстий счетчика устанавливают по возможности близко к выходному отверстию испытуемого счетчика.

2. Пускают газ и наблюдают, чтобы давление было равно 1,655 $кг/см^2$ или выше. Во время всего испытания необходимо поддерживать постоянное давление.

3. Необходимо выждать, пока температура у контрольного счетчика не сделается постоянной.

4. Испытание ведется в продолжение нескольких оборотов стрелки секундомера. Время испытания никогда не должно быть меньше 100 сек.

5. Для определения точности счетчика умножают полученную величину *M* на t_g, *F* и $\sqrt{G}$.

Таким путем получают время t_g в сек. при расходе газа в 1000 $м^3/час$, если счетчик верен. Устанавливают разность между t_g и наблюденным временем и делят затем разницу на t_g. Это дает процент погрешности счетчика. Если наблюденное время меньше, чем t_g, то это означает, что счетчик пропускает больше; если это время превышает t_g, то счетчик пропускает газа меньше.

6. Если испытание показало недостаточно удовлетворительное состояние счетчика, то снимают клапаны, вычищают их и повторяют опыт. Если опыт вновь не удастся, то надо отрегулировать счетчик на ±0 возможно точнее.

7. Записывают показание индекса на счетчике. Затем индекс устанавливают по показанию в начале опыта. После этого снова пускают счетчик в работу. Необходимая отрегулировка и мелкие ремонты должны производиться на месте. Для более крупных ремонтов счетчик снимают и отправляют в мастерскую.

Необходимые меры предосторожности. Необходимо следить за тем, чтобы не получилось заметной потери давления между счетчиком, который подвергается испытанию, и отверстием контрольного счетчика. Если применяются 2 колена или труба длиннее 4,5 *м* при диаметре 2″, то необходимо сделать поправку на потерю давления. В тех случаях, когда определенная потеря давления неизбежна, делают запись давлений как на входе испытуемого счетчика, так и у отверстия

контрольного счетчика и приводят показание испытуемого счетчика к давлению контрольного счетчика. Ни при каких условиях не следует производить испытаний при давлении меньшем 1,055 *кг/см²* по манометру у отверстия контрольного счетчика. Для внесения поправки на разность давлений у контрольного и у испытуемого счетчиков пользуются следующей формулой:

$$M_c = \frac{P_m M_m}{P_0},$$

где M_m — запись по счетчику;
M_c — запись, откорректированная по давлению у отверстия контрольного счетчика;
P_0 — абсолютное давление у отверстия контрольного счетчика в *кг/см²*;
P_m — абсолютное давление в испытуемом счетчике в *кг/см²*.

Если газ содержит много влаги, то это оказывает влияние на результаты опыта. Проведение опыта совершенно исключается при перенасыщенном газе, и такого опыта не следует производить. Во избежание влияния влаги необходимо предварительно произвести продувку всех дрипов, устанавливаемых у испытуемого счетчика. Отверстия того и другого счетчиков должны поддерживаться в чистоте, и на их поверхности не должно быть зауселиц и царапин.

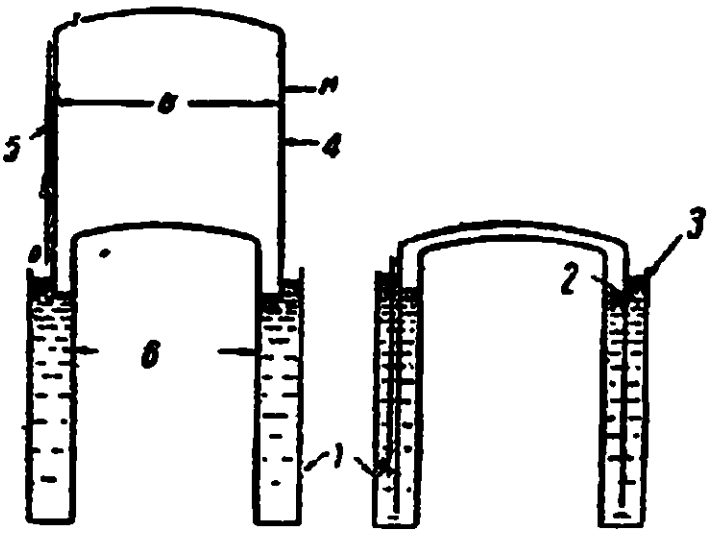
Необходимо выждать время, достаточное для того, чтобы термометр у счетчика мог показать действительную установившуюся температуру газа.

Применяемые для определения времени секундомеры необходимо время от времени проверять на точность.

Калибровка контрольных счетчиков типа газгольдера при помощи измерительной ленты [1]

Положим, что колокол счетчика понизился на некоторую высоту между какими-либо двумя отметками по шкале, например между 0 и 100; пусть при этом:

Q — объем вытесненного воздуха;
B — внутренний объем колокола между двумя отметками шкалы;
W — объем жидкости, поднимающейся между внутренней стенкой бассейна и поверхностью колокола;
V — объем колокола по наружной поверхности между двумя точками;
M — объем металла колокола между двумя точками;
S — объем металла шкалы между двумя точками;
T — объем жидкости, поднимающейся между наружной поверхностью колокола и наружной стенкой бассейна.



Фиг. 79. Чертеж контрольного счетчика типа газгольдера, показывающий различные положения колокола.

1 — резервуар; *2* — объем W; *3* — объем T; *4* — внешний объем V; *5* — шкала S; *6* — сухие стенки.

Тогда получим:

$$Q = B + W;$$
$$B = V - M;$$
$$M + S = T + W;$$
$$Q = V - M + W;$$

$$M = T + W - S;$$
$$Q = V - (T + W - S) + W;$$
$$Q = V - T + S.$$

Это показывает, что вытесненный счетчиками объем равняется объему колокола по наружной поверхности плюс объем шкалы минус объем жидкости, поднимающейся между наружной поверхностью колокола и наружной стенкой бассейна.

[1] Из „Positive Displacement Meters", Handbook E—4, 1930, American Meter Company.

Все эти величины можно с точностью определить, применяя стальную ленту и стальную шкалу, при условии, что наружная поверхность колокола ровная и имеет цилиндрическую форму. Беря средний из замеров, сделанных по окружности колокола, вычитают полуторную толщину ленты, так как принимается, что расширение и сжатие волокон ленты одинаковы.

По этим уравнениям можно заметить, что на вытесненный объем влияет какой-либо материал, добавляемый к наружной поверхности счетчика, например краска.

Если бассейн не имеет цилиндрической формы на уровне жидкости, то поверхность жидкости должна поддерживаться на том же уровне во время опыта, на котором был калиброван счетчик.

Порядок проведения испытания счетчиков в рабочих условиях

1) Если необходимо, открыть клапан механизма на отпуск.

2) Провести проверочное испытание газа по предварительной оплате (автомат) (повторить, если имеется рекламация на работу счетчика)

При неточности между + 1% и —2%

3) Медленное испытание

4) Продувают стояки, если это необходимо.

5) Спустить содержимое счетчика, если это необходимо.

6) Испытание на покупку газа, если счетчик автомат.

8) Испытание на давление дна.

9) Испытание на максимальный пропуск газа или воздуха.

В пределах до —2%, но не выше + 1%

10) Повторить контрольный опыт.

11) Смазать клапаны.

14) Закрыть клапан механизма на отпуск газа по предварительной оплате (автомат).

15) Покрыть краской.

16) Отправить на склад.

В пределах до — 2% или выше + 1%

7) Снять верхнюю крышку счетчика.

8) Испытание на давление дна счетчика.

10) Отрегулировать счетчик (одно испытание на большой расход и два на необходимые пределы).

11) Смазать клапаны.

12) Надеть крышку.

13) Произвести пробное давление на верхнюю и нижнюю часть счетчика.

14) Закрыть клапан механизма на отпуск газа по предварительной оплате (автомат).

15) Покрыть краской.

16) Отправить на склад.

При неточности больше ± 10% и необходимости значительного ремонта счетчика

4) Продуть стояки.

5) Спустить содержимое счетчика.

Отправить в ремонтную мастерскую.

При неточности больше —2% и + 1%, но не больше 10%

3) Медленное испытание.

4) Продуть стояки.

5) Спустить содержимое счетчика.

6) Испытание на покупку газа, если счетчик автомат.

7) Снять крышку счетчика.

8) Испытание на давление дна.

9) Произвести испытание на максимальный пропуск газа или воздуха.

10) Отрегулировать счетчик (одно испытание на большой расход и два контрольных испытания).

11) Смазать клапаны.

12) Надеть крышку.

13) Произвести пробное давление на верхней и нижней части счетчика.

14) Закрыть клапан механизма на отпуск газа по предварительной оплате.

15) Покрыть краской.

16) Отправить на склад.

Таблица 77

Коэфициенты для удельного веса

Умножить стандартное время прохождения воздуха через контрольные счетчики при критическом потоке на эти величины, принимая во внимание удельный вес газа G. Коэфициент $= \sqrt{G}$

Уд. вес	Коэфициент	Уд. вес	Коэфициент	Уд. вес	Коэфициент	Уд. вес	Коэфициент	Уд. вес	Коэфициент
0,40	0,632	0,60	0,775	0,80	0,894	1,00	1,000	1,20	1,095
0,41	0,640	0,61	0,781	0,81	0,900	1,01	1,005	1,22	1,105
0,42	0,648	0,62	0,787	0,82	0,906	1,02	1,010	1,24	1,114
0,43	0,656	0,63	0,794	0,83	0,911	1,03	1,015	1,26	1,123
0,44	0,663	0,64	0,800	0,84	0,917	1,04	1,020	1,28	1,131
0,45	0,671	0,65	0,806	0,85	0,922	1,05	1,025	1,30	1,140
0,46	0,678	0,66	0,812	0,86	0,927	1,06	1,030	1,32	1,149
0,47	0,686	0,67	0,819	0,87	0,933	1,07	1,034	1,34	1,158
0,48	0,693	0,68	0,825	0,88	0,938	1,08	1,039	1,36	1,166
0,49	0,700	0,69	0,831	0,89	0,943	1,09	1,044	1,38	1,175
0,50	0,707	0,70	0,837	0,90	0,949	1,10	1,049	1,40	1,183
0,51	0,714	0,71	0,843	0,91	0,954	1,11	1,054	1,42	1,192
0,52	0,721	0,72	0,849	0,92	0,959	1,12	1,058	1,44	1,200
0,53	0,728	0,73	0,854	0,93	0,964	1,13	1,063	1,46	1,208
0,54	0,735	0,74	0,860	0,94	0,970	1,14	1,068	1,48	1,217
0,55	0,742	0,75	0,866	0,95	0,975	1,15	1,072	1,50	1,225
0,56	0,748	0,76	0,872	0,96	0,980	1,16	1,077	1,52	1,233
0,57	0,755	0,77	0,877	0,97	0,985	1,17	1,082	1,54	1,241
0,58	0,762	0,78	0,883	0,98	0,990	1,18	1,086	1,56	1,249
0,59	0,768	0,79	0,889	0,99	0,995	1,19	1,091	1,58	1,257

Таблица 78

Процент погрешности для контрольного счетчика с пропускной способностью 0,0566 м³

Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности
45,2	+ 25,0	49,5	+ 14,3	53,8	+ 5,3	58,1	— 2,4
45,6	+ 24,2	49,8	+ 13,6	54,1	+ 4,7	58,4	— 2,9
45,9	+ 23,4	50,1	+ 13,0	54,4	+ 4,2	58,6	— 3,4
46,2	+ 22,7	50,4	+ 12,4	54,7	+ 3,6	58,9	— 3,9
46,5	+ 21,9	50,7	+ 11,7	55,0	+ 3,1	59,2	— 4,3
46,7	+ 21,2	51,0	+ 11,1	55,2	+ 2,6	59,5	— 4,8
47,0	+ 20,5	51,3	+ 10,5	55,5	+ 2,0	59,8	— 5,2
47,3	+ 19,7	51,5	+ 9,9	55,8	+ 1,5	60,0	— 5,7
47,6	+ 19,0	51,8	+ 9,3	56,1	+ 1,0	60,3	— 6,1
47,8	+ 18,3	52,1	+ 8,7	56,4	+ 0,5	60,6	— 6,5
48,1	+ 17,6	52,4	+ 8,1	56,7	± 0,0	60,9	— 7,0
48,4	+ 17,0	52,7	+ 7,5	57,0	— 0,5	61,2	— 7,4
48,7	+ 16,2	53,0	+ 7,0	57,2	— 1,0	61,5	— 7,8
49,0	+ 15,6	53,3	+ 6,4	57,5	— 1,5	61,8	— 8,3
49,3	+ 14,9	53,6	+ 5,8	57,8	— 2,0	62,0	— 8,7

Продолжение табл. 78

Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности
62,3	— 9,1	65,7	— 13,8	69,1	— 18,0	72,5	— 21,9
62,6	— 9,5	66,0	— 14,2	69,4	— 18,4	72,8	— 22,2
62,9	— 9,9	66,3	— 14,5	69,6	— 18,7	73,1	— 22,5
63,2	— 10,3	66,6	— 14,9	69,9	— 19,0	73,4	— 22,8
63,5	— 10,7	66,9	— 15,2	70,2	— 19,4	73,7	— 23,1
63,8	— 11,1	67,2	— 15,6	70,5	— 19,7	73,9	— 23,4
64,1	— 11,5	67,4	— 16,0	70,8	— 20,0	74,2	— 23,7
64,3	— 11,9	67,6	— 16,3	71,1	— 20,3	74,5	— 24,0
64,5	— 12,3	68,0	— 16,7	71,4	— 20,6	74,8	— 24,2
64,8	— 12,7	68,2	— 17,0	71,7	— 20,9	75,0	— 24,5
65,1	— 13,2	68,5	— 17,3	72,0	— 21,3	75,3	— 24,8
65,4	— 13,4	68,8	— 17,7	72,3	— 21,5	75,6	— 25,1

Таблица 79

Процент погрешности для контрольного счетчика с пропускной способностью 0,14 м³

Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности
127,3	+ 11,1	135,5	+ 4,4	143,7	— 1,6	151,9	— 6,9
127,6	+ 10,9	135,8	+ 4,2	144,0	— 1,8	152,2	— 7,0
127,8	+ 10,6	136,1	+ 4,0	144,3	— 2,0	152,5	— 7,2
128,1	+ 10,4	136,4	+ 3,7	144,6	— 2,2	152,8	— 7,4
128,4	+ 10,1	136,6	+ 3,5	144,8	— 2,3	153,1	— 7,6
128,7	+ 9,9	136,9	+ 3,3	155,1	— 2,5	153,4	— 7,8
129,0	+ 9,7	137,2	+ 3,1	155,4	— 2,7	153,7	— 7,9
129,2	+ 9,4	137,5	+ 2,9	155,7	— 2,9	153,9	— 8,1
129,5	+ 9,2	137,8	+ 2,7	156,0	— 3,1	154,2	— 8,3
129,8	+ 8,9	138,0	+ 2,5	146,2	— 3,3	154,5	— 8,4
130,1	+ 8,7	138,3	+ 2,3	146,5	— 3,5	154,8	— 8,6
130,4	+ 8,5	138,6	+ 2,0	146,8	— 3,7	155,1	— 8,8
130,7	+ 8,2	138,9	+ 1,8	147,1	— 3,9	155,3	— 8,9
131,0	+ 8,0	139,2	+ 1,6	147,4	— 4,0	155,6	— 9,1
131,3	+ 7,8	139,5	+ 1,4	147,6	— 4,2	155,9	— 9,3
131,5	+ 7,5	139,8	+ 1,2	147,9	— 4,4	156,2	— 9,4
131,8	+ 7,3	140,1	+ 1,0	148,2	— 4,6	156,5	— 9,6
132,1	+ 7,1	140,4	+ 0,8	148,5	— 4,8	156,8	— 9,8
132,3	+ 6,8	140,7	+ 0,6	148,8	— 5,0	157,1	— 9,9
132,6	+ 6,6	140,9	+ 0,4	149,1	— 5,1	157,3	— 10,1
132,9	+ 6,4	141,2	+ 0,2	149,4	— 5,3	157,6	— 10,2
133,2	+ 6,2	141,5	± 0,0	149,6	— 5,5	157,9	— 10,4
133,5	+ 5,9	141,8	— 0,2	149,9	— 5,7	158,2	— 10,6
133,8	+ 5,7	142,1	— 0,4	150,2	— 5,8	158,5	— 10,7
134,1	+ 5,5	142,3	— 0,6	150,5	— 6,0	158,7	— 10,9
134,4	+ 5,3	142,6	— 0,8	150,8	— 6,2	159,0	— 11,0
134,7	+ 5,0	142,9	— 1,0	151,0	— 6,4	159,2	— 11,2
135,0	+ 4,8	143,2	— 1,2	151,3	— 6,5	—	—
135,2	+ 4,6	143,4	— 1,4	151,6	— 6,7	—	—

Процент погрешности для контрольного счетчика с пропускной способностью 0,283 м³

Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности	Расход газа в л/час	% погрешности
254,7	+ 11,1	270,7	+ 4,5	287,0	— 1,4	303,3	— 6,6
255,1	+ 11,0	271,0	+ 4,4	287,2	— 1,5	303,6	— 6,7
255,8	+ 10,9	271,3	+ 4,3	287,5	— 1,6	303,9	— 6,8
256,2	+ 10,7	271,6	+ 4,2	287,8	— 1,7	304,2	— 6,9
256,5	+ 10,6	271,9	+ 4,1	288,1	— 1,8	304,5	— 7,0
256,9	+ 10,5	272,2	+ 4,0	288,4	— 1,9	304,8	— 7,1
257,2	+ 10,4	272,5	+ 3,8	288,7	— 2,0	305,0	— 7,2
257,6	+ 10,3	272,8	+ 3,7	289,0	— 2,1	305,3	— 7,2
257,9	+ 10,1	273,1	+ 3,6	289,3	— 2,2	305,6	— 7,3
258,2	+ 10,0	273,5	+ 3,5	289,6	— 2,3	305,8	— 7,4
258,5	+ 9,9	273,8	+ 3,4	289,9	— 2,3	306,1	— 7,5
258,8	+ 9,8	273,9	+ 3,3	290,2	— 2,4	306,4	— 7,6
259,2	+ 9,7	274,1	+ 3,2	290,5	— 2,5	306,7	— 7,7
259,4	+ 9,5	274,4	+ 3,1	290,8	— 2,6	307,0	— 7,8
259,7	+ 9,4	274,7	+ 3,0	291,0	— 2,7	307,2	— 7,8
260,0	+ 9,3	275,0	+ 2,9	291,3	— 2,8	307,5	— 7,9
260,2	+ 9,2	275,3	+ 2,8	291,6	— 2,9	307,8	— 8,0
260,4	+ 9,1	275,6	+ 2,7	291,9	— 3,0	308,1	— 8,1
260,7	+ 8,9	275,9	+ 2,6	292,2	— 3,1	308,4	— 8,2
260,9	+ 8,8	276,2	+ 2,5	292,5	— 3,2	308,7	— 8,3
261,1	+ 8,7	276,5	+ 2,4	292,8	— 3,3	309,0	— 8,3
261,4	+ 8,6	276,8	+ 2,3	293,1	— 3,4	309,3	— 8,4
261,6	+ 8,5	277,0	+ 2,2	293,4	— 3,5	309,5	— 8,5
261,9	+ 8,3	277,3	+ 2,0	293,7	— 3,6	309,8	— 8,6
262,1	+ 8,2	277,6	+ 1,9	293,9	— 3,7	310,1	— 8,7
262,3	+ 8,1	277,9	+ 1,8	294,2	— 3,8	310,3	— 8,8
262,5	+ 8,0	278,2	+ 1,7	294,5	— 3,9	310,6	— 8,8
262,8	+ 7,9	278,4	+ 1,6	294,8	— 3,9	310,9	— 8,9
263,0	+ 7,8	278,7	+ 1,5	295,0	— 4,0	311,2	— 9,0
263,3	+ 7,6	279,0	+ 1,4	295,3	— 4,1	311,5	— 9,1
263,5	+ 7,5	279,3	+ 1,3	295,6	— 4,2	311,8	— 9,2
263,7	+ 7,4	279,6	+ 1,2	295,9	— 4,3	312,0	— 9,3
263,9	+ 7,3	279,9	+ 1,1	296,2	— 4,4	312,3	— 9,3
264,1	+ 7,2	280,1	+ 1,0	296,5	— 4,5	312,6	— 9,4
264,3	+ 7,1	280,4	+ 0,9	296,8	— 4,6	312,9	— 9,5
264,5	+ 7,0	280,7	+ 0,8	297,0	— 4,7	313,1	— 9,6
264,8	+ 6,9	281,0	+ 0,7	297,3	— 4,8	313,4	— 9,7
265,1	+ 6,7	281,3	+ 0,6	297,6	— 4,9	313,7	— 9,8
265,4	+ 6,6	281,6	+ 0,5	297,8	— 4,9	314,0	— 9,8
265,7	+ 6,5	281,9	+ 0,4	298,1	— 5,0	314,3	— 9,9
266,0	+ 6,4	282,2	+ 0,3	298,4	— 5,1	314,6	— 10,0
266,2	+ 6,3	282,5	+ 0,2	298,7	— 5,2	314,9	— 10,1
266,5	+ 6,2	282,7	+ 0,1	299,0	— 5,3	315,2	— 10,2
266,8	+ 6,0	283,0	± 0,0	299,3	— 5,4	315,5	— 10,2
267,1	+ 5,9	283,3	— 0,1	299,6	— 5,5	315,8	— 10,3
267,5	+ 5,8	283,6	— 0,2	299,9	— 5,6	316,0	— 10,4
267,8	+ 5,7	283,9	— 0,3	300,2	— 5,7	316,3	— 10,5
268,0	+ 5,6	284,1	— 0,4	300,5	— 5,8	316,6	— 10,6
268,3	+ 5,5	284,4	— 0,5	300,8	— 5,8	316,9	— 10,6
268,5	+ 5,4	284,7	— 0,6	301,0	— 5,9	317,2	— 10,7
268,8	+ 5,3	285,0	— 0,7	301,3	— 6,0	317,4	— 10,8
269,1	+ 5,2	285,3	— 0,8	301,6	— 6,1	317,7	— 10,9
269,4	+ 5,0	285,6	— 0,9	301,9	— 6,2	318,0	— 11,0
269,6	+ 4,9	285,9	— 1,0	302,1	— 6,3	318,3	— 11,0
269,9	+ 4,8	286,2	— 1,1	302,4	— 6,4	318,6	— 11,1
270,1	+ 4,7	286,5	— 1,3	302,7	— 6,5		
270,4	+ 4,6	286,7	— 1,3	303,0	— 6,5		

Таблица 81

Размеры и характеристики американских счетчиков типа „B", заключенных в корпусе из оцинкованной стали

Выпускаются фирмой American Meter Co

Марка	Потеря давления в *мм* водяного столба	Пропускная способность в $м^3$/час	Размеры в *см*			Диаметр входа и выхода в дм.	Расстояние между центрами входа и выхода в *мм*	Вес нетто в *кг*
			высота	длина	ширина			
5-B	12,7	4,2	41,3	32,4	24,3	1/2	286	6,92
10-B	12,7	8,5	47,0	38,7	28,6	3/4	340	10,44
20-B	12,7	12,7	55,9	46,7	32,7	1	408	14,53
30-B	12,7	17,0	66,4	52,7	38,1	1 1/4	464	20,88
60-B	12,7	36,8	79,7	68,6	53,3	1 1/2	610	38,59
100-B	12,7	50,9	92,1	77,9	60,3	2	686	61,29
200-B	12,7	87,7	109,9	85,7	78,1	2 1/2	857	101,92
500-B	12,7	212,2	175,9	160,3	123,2	6 (ниппель)	1 432	736,84

Примечание. Пропускная способность относится к газу с удельным весом 0,4 (при удельном весе воздуха 1,0), при давлении у впускного отверстия в 100 *мм* водяного столба.

Таблица 82

Размеры и характеристики американских счетчиков типа „A", заключенных в корпусе из оцинкованной стали

Выпускаются фирмой American Meter Co [1]

Марка	Потеря давления в *мм* водяного столба	Пропускная способность в $м^3$/час	Размеры в *см*			Диаметр входа и выхода в дм.	Расстояние между центрами соединений в *мм*	Вес нетто в *кг*
			высота	длина	ширина			
5-A	12,7	5,0	41,1	32,4	24,4	1/2	286	7,03
10-A	12,7	10,6	45,4	37,5	27,6	3/4	329	8,85
30-A	12,7	24,8	63,2	52,7	40,0	1 1/4	464	20,88
60-A	12,7	42,5	84,1	71,8	52,4	1 1/2	644	58,11
150-A	12,7	96,2	110,2	91,4	68,9	2 1/2	808	111,22

[1] См. примечание к табл. 81.

Таблица 83

Размеры и характеристики счетчиков, заключенных в цинковые корпуса
Выпускаются фирмой John J. Griffin Co [1]

Марка	Потеря давления в *мм* водяного столба	Пропускная способность в *м³/час*	Размеры в *см*			Диаметр входа и выхода в *дм.*	Расстояние между центрами соединений в *мм*	Вес нетто в *кг*	Наибольшее рабочее давление в *мм* водяного столба
			высота	длина	ширина				
5-B	12,7	4,2	40,0	32,4	22,9	1/2	286	6,35	Все диафрагмы испытываются на давление 150 *мм* водяного столба
5-A	12,7	4,9	40,8	32,4	24,4	1/2	286	6,81	
10-A	12,7	10,6	44,9	37,5	27,6	3/4	330	9,19	
20-A	12,7	24,8	62,9	52,9	40,3	1 1/4	470	20,88	
60-A	12,7	42,4	84,8	71,4	51,4	1 1/2	641	51,30	Все корпуса испытываются на давление 1 370 *мм* водяного столба
50-A	12,7	96,2	109,7	91,8	68,9	2 1/2	810	107,13	

[1] См. примечание к табл. 81.

Таблица 84

Размеры и характеристики счетчиков, заключенных в цинковые корпуса
Изготовляются фирмой Lambert Meter Co [1]

Марка	Потеря движения в *мм* водяного столба	Пропускная способность в *м³/час*	Размеры в *см*			Диаметр впускного и выпускного отверстия в *дм.*	Расстояние между центрами соединений в *мм*	Вес в *кг*	Наибольшее давление в *кг/см²*
			высота	длина	ширина				
5-Lt (5—150)	12,7	4,8	41,3	31,1	22,9	1/2	286	7,03	0,211
10-Lt (10—375)	12,7	11,9	45,4	36,5	27,3	3/4	327	10,89	0,211
30-Lt (30—875)	12,7	27,9	62,9	52,1	40,6	1 1/4	467	25,87	0,211
60-Lt (60—1 500)	12,7	47,8	84,8	71,1	61,0	1 1/2	647	57,65	0,211
150-Lt (150—3 400)	12,7	108,4	109,7	91,8	68,9	2	806	115,76	0,211

[1] См. примечание к табл. 81.

Таблица 85

Размеры и характеристики счетчиков, заключенных в цинковые корпуса

Изготовляются фирмой Superior Meter Co [1]

Марка	Потеря давления в *мм* водяного столба	Пропускная способность в $м^3/час$	Размеры в *см*			Размеры соединений в *дм.*		Расстояние между центрами соединений в *мм*	Вес в *кг*	Число оборотов на 1 $м^3$
			высота	длина	ширина	входного	выходного			
Тип „B"										
5-L	12,7	4,2	41,3	31,4	24,1	1/2	1/4	286	6,81	212
Тип „Super B"										
10-L	12,7	10,6	47,0	38,1	29,2	3/4	3/4	343	9,99	106
30-L	12,7	24,8	66,7	52,1	38,1	1 1/4	1 1/4	470	21,78	42,3
60-L	12,7	42,4	83,2	70,5	51,4	1 1/2	1 1/2	610	45,40	21,2
150-L	12,7	96,2	110,5 до верха трубы	74,9 включая трубу	70,5	2 1/2	2 1/2	816 от центра до центра	97,62	7,0

[1] См. примечание к табл. 81.

Таблица 86

Размеры и характеристики счетчиков, заключенных в железные корпуса [1]

Марка	Потеря давления в *мм* водяного столба	Пропускная способность в $м^3/час$	Размеры в *см*			Размеры соединений (жел. трубы), вход и выход в *дм.*	Вес в *кг*
			высота	длина	ширина		
1-A	12,7	5,7	34,3	24,1	18,7	3/4—1	11,2
2	12,7	10,4	39,4	27,3	21,6	1—1 1/4	18,3
3	12,7	12,8	43,2	30,5	24,1	1 1/4	21,7
3	12,7	26,0	62,2	45,7	38,1	2	66,1
1-D	12,7	7,0	34,3	24,1	20,3	3/4—1	14,0
1	12,7	4,2	34,3	24,1	19,4	3/4—1	11,2

[1] См. примечание к табл. 81.

Размеры и характеристики счетчиков, заключенных в железные корпуса

Выпускаются на заводах „American Meter Co"

Марка	Пропускная способность в $м^3/час$		Размеры в *см*			Диаметр соединений в *дм*	Расстояние между центрами соединений в *мм*	Вес нетто в *кг*	Наибольшее рабочее давление в $кг/см^2$
	при диам. входного отверстия в 2" и потере давления в 127 *мм*	при диам. входного отверстия в 3" и потере давления в 50,8 *мм*	высота	длина	ширина				
5-B	4,67	8,49	34,9	22,2	24,1	1/4, 3/4, 1 1/4	152	15,9	0,352
5-BHP	4,67	9,34	33,0	22,2	24,1	1 (нарезка на трубе)	152	18,1	1,758
10-B	7,07	12,17	38,1	25,4	26,0	3/4, 1, 1 1/4, 1 1/2	175	19,5	0,352
20-B	9,90	16,98	44,4	30,8	31,1	1, 1 1/4, 1 1/2, 2 (труба)	210	34,4	0,703
20-BHP	9,90	16,98	47,0	30,8	39,4	1 1/2 (труба)	308	81,5	17,578
25-B	11,32	22,92	45,1	31,7	31,4	1 1/4 (по нарезке на гайке)	210	43,0	0,703
25-B	11,32	22,92	48,9	31,7	35,2	1 1/4 (то же)	210	45,3	7,031
30-B	15,56	26,88	55,2	40,6	38,9	1 1/4, 1 1/2, 2, 1 1/2 (труба)	279	60,7	1,055
30-BHP	15,56	26,88	59,7	51,4	40,0	2 (фланец)	514	190,3	15,468
35-B	15,56	32,54	54,3	39,0	39,0	1 1/2 (нарезка гайки)	333	61,2	1,055
35-BHP	18,39	32,54	59,1	39,0	37,5	1 1/2 (то же)	333	63,4	7,031
60-B	26,88	48,11	66,0	46,7	42,2	2,2 (труба) 3 (нарезка трубы)	333	120,0	1,406
60-B	26,88	48,11	66,0	46,7	44,1	2 (труба)	333	140,4	7,031
60-BHP	26,88	48,11	67,9	57,5	51,4	2 (труба)	575	210,6	17,578
80-B	35,37	70,75	68,6	46,0	44,4	2, 2 1/2 (по нарезке гайки)	432	117,8	1,406
80-B	35,37	70,75	71,1	46,0	44,4	2, 2 1/2 (то же)	432	122,3	7,031
80-BHP	35,37	70,75	76,8	47,0	50,5	2, 2 1/2 „ „	432	192,5	17,578
250-B	84,90	169,80	83,2	54,6	54,6	4 „ „	540	210,6	5,273
250-BHP	84,90	169,80	83,8	61,0	65,4	4 „ „	546	339,8	17,578
500-B	141,50	283,00	105,7	75,6	72,2	4 „ „	651	394,1	5,273
500-BHP	141,50	283,00	108,6	76,5	77,5	4 „ „	664	521,0	17,578

Таблица 88

Размеры и характеристики счетчиков Emco

Выпускаются фирмой Pittsburgh Equitable Meter Co

Марка	Пропускная способность в $м^3$/час		Размеры в см			Диаметр соединений в дм.	Расстояние между центрами соединений в мм	Вес нетто в кг	Наибольшее рабочее давление в $кг/см^2$
	8" вход, потеря давления 12,7 мм	8" вход, потеря давления 50,8 мм	высота	длина	ширина				
0 Std.	4,95	10,9	28,9	24,0	22,2	3/4, 1, 1 1/4	152	14,5	1,4
0 Curbbox	4,95	10,9	39,4	24,1	21,6	1 1/4	114	16,3	1,4
0 H. P.	4,95	11,3	32,7	26,0	23,8	1	152	18,1	3,5
1 Std.	7,78	15,6	36,2	28,3	25,7	1, 1 1/4, 1 1/2	178	19,0	1,4
2 Std.	10,60	23,8	42,2	32,4	25,7	1 1/4, 1 1/2	203	24,9	1,4
2 Curbbox	10,60	23,8	49,2	32,4	21,9	1 1/2	190	27,6	1,4
2 1/2	24,05	50,9	64,8	51,7	35,6	2	517	77,9	3,5
2 1/2	24,05	50,9	65,4	52,7	40,3	2	527	144,1	7,0
2 1/2	24,05	50,9	65,4	54,3	41,9	2	543	155,4	14,1
2 1/2	24,05	50,9	65,4	54,3	41,9	2	543	175,8	35,2
3	28,30	70,7	71,1	57,1	41,9	2,3	571	122,3	3,5
3	28,30	70,7	71,1	56,5	43,5	2,3	565	172,1	7,0
3	28,30	70,7	71,1	58,1	45,1	2,8	581	176,7	14,1
3	28,30	70,7	71,1	58,1	45,1	2,3	581	183,5	35,2
4	63,67	141,5	81,9	67,3	50,2	3,4	673	204,8	3,5
4	63,67	141,5	82,7	71,1	52,1	4	711	269,5	7,0
4	63,67	141,5	86,5	74,3	55,2	4	743	439,4	14,1
4	63,67	141,5	86,7	74,3	54,6	4	743	511,9	35,2
5	113,20	283,0	130,2	101,6	51,4	4	940	435,8	3,5

Таблица 89

Размеры и характеристики счетчиков типа Вестингауз

Выпускаются Pittsburgh Equitable Meter Co

Марка	Потеря давления в мм водяного столба	Пропускная способность в $м^3$/час	Размеры в см			Диаметр соединения в дм.	Вес в кг	Наибольшее рабочее давление в $кг/см^2$
			высота	длина	ширина			
3	12,7	2,07	34,9	30,8	30,8	1	22,7	1,406
	43,2	8,49						
5	12,7	2,83	41,3	35,2	35,2	1 1/4	33,1	1,406
	43,2	14,15						
8	12,7	9,76	44,4	39,0	39,0	1 1/2	41,2	1,406
	43,2	22,64						

Продолжение табл. 89

Марка	Потеря давления в *мм* водяного столба	Пропускная способность в *м³/час*	Размеры в *см*			Диаметр соединения в *дм.*	Вес в *кг*	Наибольшее рабочее давление в *кг/см²*
			высота	длина	ширина			
12	12,7	12,17	51,4	44,4	44,4	1½	49,8	1,406
	50,8	33,96						
25	12,7	28,30	73,7	71,1	71,1	2½	202,9	1,406
	50,8	84,90						
50	12,7	48,82	86,4	84,8	84,8	3	317,1	1,406
	50,8	130,18						
100	12,7	65,09	122,6	109,2	109,2	4	679,5	1,406
	50,8	254,70						
300	12,7	195,27	168,0	161,6	161,6	8	1 875,4	1,406
	50,8	650,90						

Примечания. Пропускные способности отнесены к газу с удельным весом в 0,60 при начальном давлении в 1,03 *кг/см²*.

Таблица 90

Размеры и характеристики счетчиков типа Connersville, рассчитанных на низкое давление

Максимальное давление 0,7 *кг/см²*

Марка	Расход газа на 1 оборот в *л*	Число об/мин.	Диаметр впускного и выпускного отверстий в *см.*	Расход газа в *м³/час*	Расход газа в *м³/сутки*	Вес в *кг*
3½×10	4,7	900	3	256	6 160	147
4×12	7,5	800	4	353	8 480	215
5×15	14,6	750	6	655	15 700	362
6×18	22,3	700	8	937	22 500	510
8×24	52,9	445	10	1 412	33 900	1 042
10×30	116,5	410	12	2 865	68 750	1 495
12×36	201,3	336	16	4 057	97 370	2 220
14×42	319,6	330	20	6 327	151 860	3 171
16×48	477,0	250	20	7 155	171 730	4 349
18×54	679,2	220	24	8 966	215 170	5 663
20×60	931,7	210	24	11 730	281 740	7 112
22×66	1 270,6	167	24	12 730	305 550	8 381
24×72	1 610,0	156	30	15 070	361 670	11 189
26×78	2 004,6	147	30	17 670	424 325	12 458
28×84	2 938,0	128	30	22 560	541 530	14 949
32×96	3 816,2	—	36	—	—	—

Примечания. 1. Пропускная способность — нормальная, допускаемая временная перегрузка 50%.

2. При любом из этих счетчиков можно применить стандартные записывающие приборы. Для прибора P.V.T.T. вес увеличится на 91 *кг* для счетчиков до размера 14 × 42, на 113 *кг* для счетчиков размером от 14 × 42 до 28 × 84 и на 136 *кг* для счетчиков 32 × 96.

Таблица 91

Размеры и характеристики счетчиков типа Connersville на высокое давление
Для давлений до 3,51 *кг/см²*

Марка	Расход газа на 1 оборот в *л*	Число об/мин.	Диаметр впускного и выпускного отверстий в *дм.*	Расход газа в *м³/час*	Расход газа в *м³/сутки*	Вес в *кг*
4×8	4,97	920	4	274	6 580	408
5×10	9,71	780	4	454	10 902	544
6×10	12,40	650	6	484	11 604	747
8×12	26,45	460	8	730	17 517	969
10×15	58,23	430	10	1 502	36 054	1 495
12×18	100,62	350	12	2 113	50 714	2 039
14×21	159,78	325	12	3 116	74 777	3 941
16×24	238,51	300	16	4 293	103 037	5 164
18×27	339,61	275	16	5 603	134 483	6 116
20×30	465,85	250	16	6 988	167 704	6 976
22×33	635,30	225	20	8 576	205 835	8 154
24×36	805,00	200	20	9 660	231 838	9 513
26×39	1 002,28	175	20	10 524	252 574	11 325
28×42	1 468,99	150	24	13 221	317 302	13 137

Примечания. 1. Пропускная способность нормальная. Допускается временная перегрузка на 50%.

2. При любом из этих счетчиков можно применять стандартные записывающие приборы. При применении приборов P.V.T.T. вес увеличивается на 136,2 *кг* для счетчиков от 4×8 до 5×10 и на 227 *кг* для счетчиков от 6×10 и выше.

Таблица 92

Пропускная способность объемных мокрых стационарных счетчиков

Размеры в *мм*	Пропускная способность при потере давления на 25 *мм* вод. ст. в *м³/час*		Пропускная способность при потере давления на 25 *мм* вод. ст. в *м³/сутки*		Объемный диаметр соединения в *дм.*	Вес счетчика в *кг*	Вес воды	Вес счетчика с водой
	в счетчиках старого типа	в счетчиках нового типа	в счетчиках старого типа	в счетчиках нового типа				
1 219	147	226	3 532	5 434	8	1 721	997	2 718
1 371	192	318	4 619	7 641	8	2 242	1 404	3 646
1 524	241	410	5 773	9 848	8	2 695	1 903	4 598
1 676	294	509	7 064	12 226	10	3 375	2 559	5 934
1 829	351	616	8 422	14 773	10	3 964	3 330	7 294
1 980	416	729	9 984	17 489	12	4 757	4 213	8 970
2 134	484	849	11 614	20 376	12	5 549	5 210	10 759
2 286	560	990	13 448	23 772	12	6 501	6 342	12 843
2 438	637	1 132	15 282	27 168	12	7 520	7 814	15 334
2 743	815	1 443	19 561	34 639	16	10 872	11 099	21 971
3 048	1 019	1 783	24 451	42 790	16	13 364	15 176	28 540
3 353	1 245	2 179	29 885	52 298	16	16 308	20 023	36 331
3 657	1 500	2 604	35 998	62 486	16	20 159	26 048	46 207
3 960	1 783	3 085	42 790	74 033	20	24 462	33 205	57 667
4 257	2 094	3 622	50 261	86 938	24	29 898	41 450	71 348
4 572	2 448	4 245	58 751	101 880	24	36 240	50 963	87 203
4 876	2 830	4 896	67 920	117 502	24	43 035	61 608	104 643

Если в объемном счетчике поддерживается постоянный перепад давления, то показание счётного механизма в единицу времени увеличивается с изменением абсолютного давления в соответствии с уравнением:

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}, \qquad (1)$$

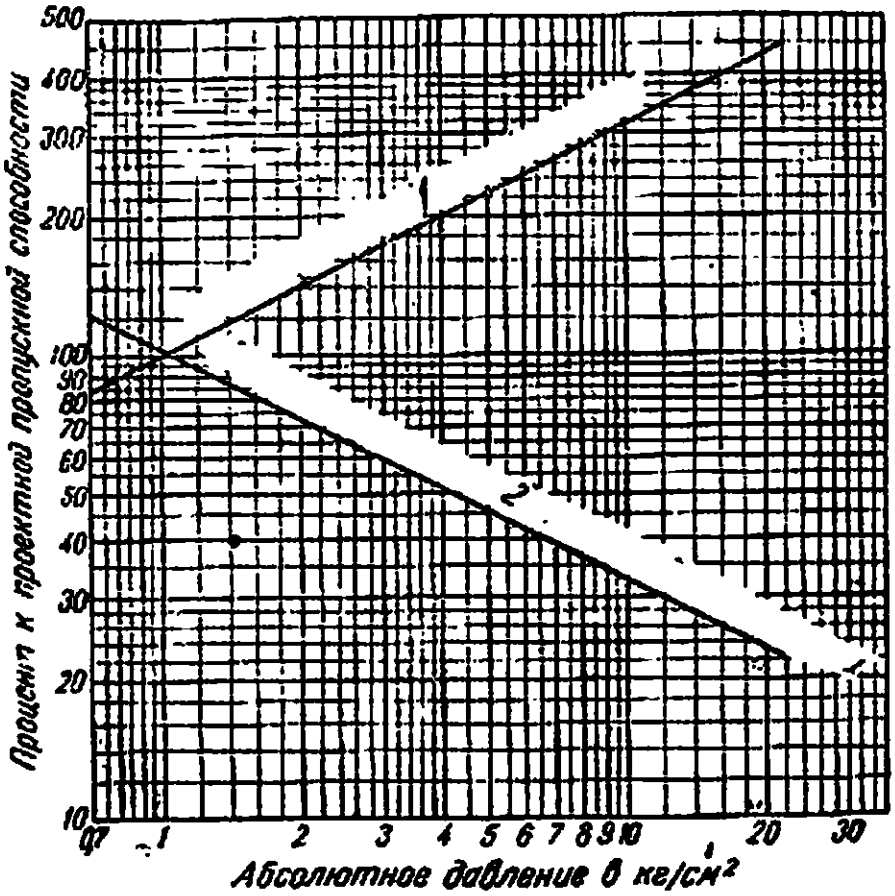
где v_1 — объем газа, проходящего через счетчик (отсчет по индексу), когда абсолютное давление равно P_1;

v_2 — объем газа, проходящего через счетчик (отсчет по индексу), когда абсолютное давление равно P_2.

Количество проходящего газа, приведенного к стандартным условиям, выразится уравнением:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1 P_1}{v_2 P_2} = \frac{\sqrt{P_1}}{\sqrt{P_2}}, \qquad (2)$$

где V_1 и V_2 представляют объемы газа, проходящие через счетчик и выраженные в стандартных кубометрах, когда абсолютное давление равно соответственно P_1 или P_2.



Фиг. 80. Рекомендуемые пропускные способности для объемных мокрых счетчиков.

1 — действительная пропускная способность счетчика в стандартных куб. метрах; *2* — кривая показаний индекса.

Нисходящая кривая на диаграмме (фиг. 80) построена на основании уравнения (1) и восходящая — по уравнению 2. Пользование диаграммой объясняется следующим примером.

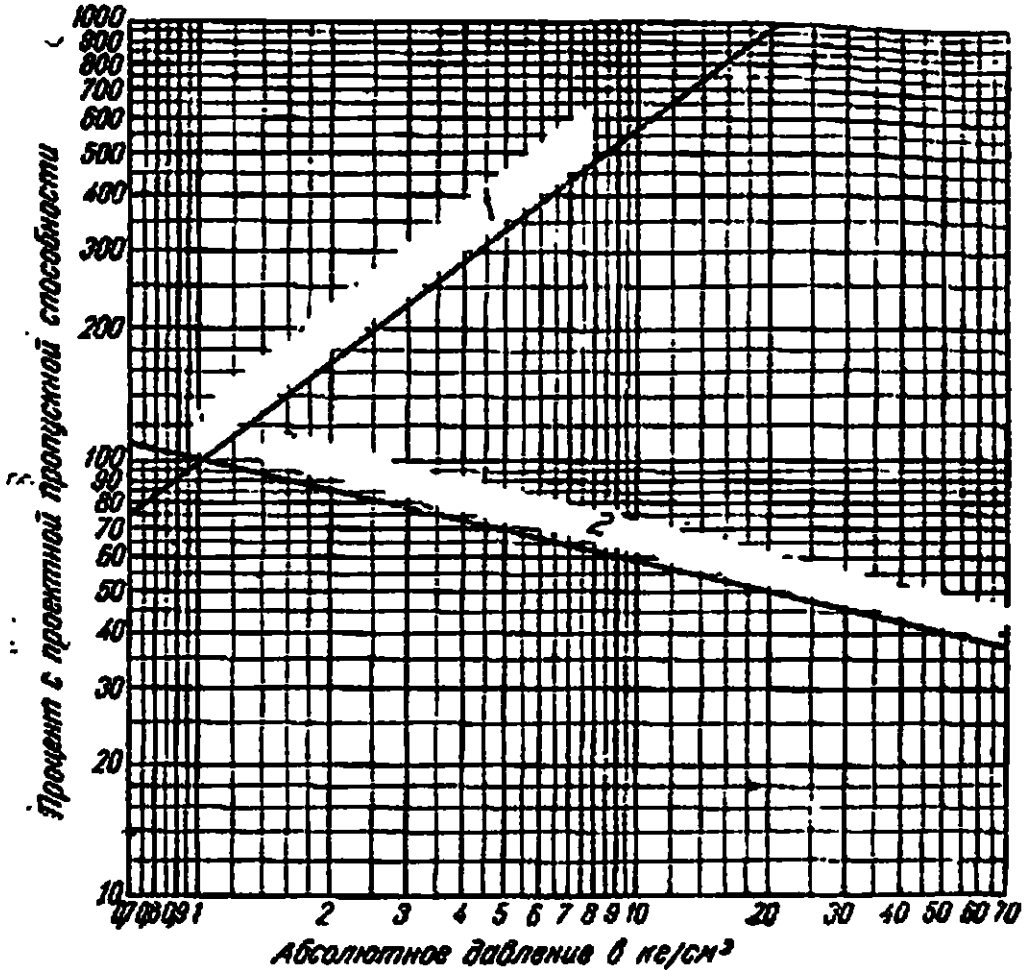
Объемный счетчик имеет нормальную пропускную способность 141 *м³/час* при потере давления 50,8 *мм* водяного столба и начальном давлении 1,03 *кг/см²*. Какова будет пропускная способность этого счетчика при 2,46 *кг/см²* манометрического давления? Барометрическое давление в месте, где установлен счетчик, равно 1,027 *кг/см²*.

Диаграмма показывает, что при давлении в 50,8 *мм* водяного столба и индексе 54,2% от нормальной пропускной способности счетчик покажет $0{,}542 \cdot 141 = 76{,}4$ *м³/час*.

Та же диаграмма показывает, что пропускная способность счетчика, выраженная в куб. метрах, будет при давлении 3,49 *кг/см²* равна 183% от нормальной пропускной способности или $1{,}83 \cdot 141 = 253$ *м³/час*.

При работе с газами приходится сталкиваться с необходимостью приведения объема газа к нормальному давлению и 0°С; точно так же, имея газ при нормальных условиях, иногда необходимо бывает узнать, какой объем займет этот газ при ином давлении и иной температуре.

Приводимые ниже таблицы Гесса облегчают эти вычисления.



Фиг. 81. Рекомендуемые пропускные способности для объемных сухих счетчиков при давлении в 203 *мм* водяного столба на входе и в 50,8 *мм* на перепады (уд. вес газа 0,60).

1 — действительная пропускная способность счетчика в куб. метрах; *2* — кривая показаний счетчика.

Если необходимо объем газа привести к нормальным условиям, то этот объем следует разделить на коэфициент, находимый в таблице. Например, имеем 210 *см³* газа при 15° и 740 *мм* давления; в таблице против 15° и 740 *мм* находим коэфициент 1,08348; следовательно, при нормальных условиях объем газа будет:

$$\frac{210}{1{,}08348} = 193{,}8 \text{ } см^3.$$

Обратно, если бы при нормальных условиях мы имели 193,8 *см³*, то для того, чтобы получить объем газа при 15° и 740 *мм*, мы должны 193,8 умножить на коэфициент 1,08348.

Таблица Гесса для вычисления объема газа при различных давлениях и температурах

°C	680 мм	681 мм	682 мм	683 мм	684 мм	685 мм	686 мм	687 мм	688 мм	689 мм	690 мм
+30	1,24062	1,23871	1,23689	1,23508	1,23327	1,23147	1,22968	1,22789	1,22610	1,22432	1,22255
+29	1,23643	1,23461	1,23280	1,23100	1,22920	1,22741	1,22562	1,22383	1,22205	1,22028	1,21851
+28	1,23233	1,23052	1,22872	1,22691	1,22513	1,22334	1,22156	1,21978	1,21800	1,21623	1,21448
+27	1,22824	1,22643	1,22463	1,22284	1,22106	1,21927	1,21749	1,21572	1,21396	1,21219	1,21044
+26	1,22414	1,22234	1,22055	1,21876	1,21698	1,21520	1,21343	1,21167	1,20991	1,20815	1,20640
+25	1,22045	1,21825	1,21647	1,21469	1,21291	1,21114	1,20937	1,20761	1,20586	1,20411	1,20236
+24	1,21595	1,21416	1,21238	1,21081	1,20884	1,20707	1,20531	1,20356	1,20181	1,20006	1,19833
+23	1,21185	1,21007	1,20830	1,20653	1,20477	1,20301	1,20126	1,19951	1,19776	1,19602	1,19429
+22	1,20776	1,20598	1,20422	1,20245	1,20070	1,19894	1,19719	1,19545	1,19371	1,19198	1,19025
+21	1,20306	1,20189	1,20013	1,19838	1,19663	1,19488	1,19313	1,19139	1,18966	1,18794	1,18622
+20	1,19957	1,19780	1,19606	1,19430	1,19255	1,19081	1,18907	1,18734	1,18562	1,18390	1,18218
+19	1,19547	1,19371	1,19196	1,19022	1,18848	1,18674	1,18501	1,18329	1,18157	1,17985	1,17815
+18	1,19137	1,18962	1,18788	1,18614	1,18441	1,18268	1,18096	1,17923	1,17752	1,17581	1,17411
+17	1,18728	1,18553	1,18380	1,18207	1,18033	1,17861	1,17689	1,17518	1,17347	1,17177	1,17007
+16	1,18318	1,18145	1,17972	1,17799	1,17626	1,17454	1,17283	1,17113	1,16942	1,16772	1,16603
+15	1,17909	1,17736	1,17563	1,17391	1,17219	1,17047	1,16877	1,16707	1,16537	1,16368	1,16200
+14	1,17499	1,17327	1,17156	1,16983	1,16812	1,16641	1,16471	1,16302	1,16132	1,15964	1,15796
+13	1,17089	1,16918	1,16748	1,16575	1,16406	1,16234	1,16065	1,15897	1,15728	1,15560	1,15392
+12	1,16680	1,16509	1,16337	1,16167	1,15997	1,15828	1,15659	1,15491	1,15323	1,15156	1,14989
+11	1,16270	1,16100	1,15929	1,15759	1,15590	1,15421	1,15253	1,15085	1,14918	1,14751	1,14585
+10	1,15861	1,15691	1,15521	1,15352	1,15183	1,15015	1,14847	1,14680	1,14513	1,14347	1,14182
+9	1,15451	1,15282	1,15113	1,14944	1,14776	1,14608	1,14441	1,14275	1,14109	1,13943	1,13778
+8	1,15041	1,14873	1,14704	1,14536	1,14369	1,14202	1,14035	1,13870	1,13704	1,13539	1,13374
+7	1,14632	1,14464	1,14296	1,14129	1,13962	1,13795	1,13629	1,13464	1,13299	1,13135	1,12971
+6	1,14222	1,14065	1,13888	1,13721	1,13554	1,13388	1,13223	1,13058	1,12894	1,12730	1,12567
+5	1,13813	1,13646	1,13479	1,13312	1,13147	1,12982	1,12817	1,12653	1,12489	1,12326	1,12163
+4	1,13403	1,13237	1,13071	1,12906	1,12740	1,12575	1,12411	1,12248	1,12085	1,11922	1,11760
+3	1,12994	1,12828	1,12663	1,12498	1,12333	1,12168	1,12005	1,11842	1,11680	1,11518	1,11356
+2	1,12584	1,12419	1,12254	1,12089	1,11926	1,11761	1,11599	1,11437	1,11275	1,11113	1,10952
+1	1,12175	1,12010	1,11846	1,11682	1,11518	1,11355	1,11193	1,11031	1,10870	1,10709	1,10549
± 0	1,11766	1,11601	1,11437	1,11274	1,11111	1,10949	1,10787	1,10626	1,10465	1,10305	1,10145
— 1	1,11355	1,11192	1,11029	1,10866	1,10704	1,10542	1,10381	1,10220	1,10060	1,09901	1,09741
— 2	1,10946	1,10783	1,10620	1,10456	1,10297	1,10136	1,09975	1,09815	1,09656	1,09496	1,09337

°C	690 мм	691 мм	692 мм	693 мм	694 мм	695 мм	696 мм	697 мм	698 мм	699 мм	700 мм
+30	1,22255	1,22078	1,21901	1,21726	1,21550	1,21375	1,21201	1,21027	1,20854	1,20681	1,20508
+29	1,21651	1,21675	1,21499	1,21324	1,21149	1,20974	1,20800	1,20627	1,20454	1,20282	1,20110
+28	1,21448	1,21272	1,21096	1,20922	1,20747	1,20574	1,20400	1,20227	1,20055	1,19884	1,19712
+27	1,21044	1,20869	1,20694	1,20520	1,20346	1,20173	1,20000	1,19828	1,19656	1,19485	1,19314
+26	1,20840	1,20466	1,20291	1,20118	1,19945	1,19772	1,19600	1,19428	1,19257	1,19087	1,18917
+25	1,20236	1,20062	1,19889	1,19715	1,19543	1,19371	1,19200	1,19029	1,18858	1,18688	1,18519
+24	1,19833	1,19659	1,19486	1,11314	1,19142	1,18971	1,18800	1,18629	1,18460	1,18290	1,18121
+23	1,19429	1,19256	1,19084	1,18912	1,18741	1,18570	1,18400	1,18230	1,18060	1,17891	1,17723
+22	1,19026	1,18853	1,18681	1,18510	1,18339	1,18169	1,17999	1,17830	1,17661	1,17493	1,17325
+21	1,18622	1,18450	1,18279	1,18108	1,17938	1,17768	1,17599	1,17430	1,17262	1,17094	1,16927
+20	1,18218	1,18047	1,17876	1,17706	1,17537	1,17368	1,17199	1,17031	1,16863	1,16696	1,16529
+19	1,17815	1,17644	1,17474	1,17305	1,17135	1,16967	1,16799	1,16631	1,16464	1,16297	1,16131
+18	1,17411	1,17241	1,17072	1,16903	1,16734	1,16566	1,16399	1,16232	1,16065	1,15899	1,15733
+17	1,17007	1,16838	1,16669	1,16501	1,16333	1,16165	1,15998	1,15832	1,15666	1,15501	1,15336
+16	1,16603	1,16435	1,16266	1,16099	1,15931	1,15765	1,15598	1,15432	1,15267	1,15102	1,14938
+15	1,16200	1,16032	1,15864	1,15697	1,15530	1,15364	1,15198	1,15033	1,14868	1,14704	1,14540
+14	1,15796	1,15629	1,15462	1,15295	1,15129	1,14963	1,14798	1,14633	1,14469	1,14305	1,14142
+13	1,15392	1,15225	1,15059	1,14893	1,14727	1,14562	1,14398	1,14234	1,14070	1,13907	1,13744
+12	1,14989	1,14822	1,14657	1,14491	1,14326	1,14162	1,13998	1,13834	1,13671	1,13508	1,13346
+11	1,14585	1,14419	1,14254	1,14089	1,13925	1,13761	1,13597	1,13434	1,13272	1,13110	1,12948
+10	1,14182	1,14016	1,13852	1,13687	1,13523	1,13360	1,13197	1,13035	1,12873	1,12711	1,12550
+9	1,13778	1,13613	1,13449	1,13285	1,13122	1,12959	1,12797	1,12635	1,12474	1,12313	1,12152
+8	1,13374	1,13210	1,13047	1,12883	1,12721	1,12559	1,12397	1,12236	1,12075	1,11914	1,11754
+7	1,12971	1,12807	1,12644	1,12481	1,12319	1,12158	1,11997	1,11835	1,11676	1,11516	1,11357
+6	1,12567	1,12404	1,12242	1,12079	1,11918	1,11757	1,11596	1,11436	1,11277	1,11117	1,10959
+5	1,12163	1,12001	1,11839	1,11678	1,11517	1,11356	1,11196	1,11037	1,10878	1,10719	1,10561
+4	1,11760	1,11598	1,11436	1,11276	1,11115	1,10956	1,10796	1,10637	1,10479	1,10320	1,10163
+3	1,11356	1,11195	1,11033	1,10874	1,10714	1,10615	1,10396	1,10237	1,10080	1,09922	1,09765
+2	1,10952	1,10792	1,10631	1,10472	1,10313	1,10154	1,09996	1,09838	1,09681	1,09524	1,09367
+1	1,10549	1,10389	1,10229	1,10070	1,09911	1,09753	1,09595	1,09438	1,09282	1,09125	1,08969
± 0	1,10145	1,09986	1,09826	1,09668	1,09510	1,09353	1,09195	1,09039	1,08883	1,08727	1,08571
— 1	1,09741	1,09582	1,09424	1,09269	1,09109	1,08952	1,08795	1,08639	1,08484	1,08328	1,08173
— 2	1,09337	1,09179	1,09022	1,08864	1,08708	1,08551	1,08395	1,08239	1,08085	1,07930	1,07776

°C	700 мм	701 мм	702 мм	703 мм	704 мм	705 мм	706 мм	707 мм	708 мм	709 мм	710 мм
+30	1,20508	1,20385	1,20165	1,19994	1,19823	1,19654	1,19484	1,19318	1,19147	1,18979	1,18811
+29	1,21010	1,19839	1,19768	1,19598	1,19428	1,19259	1,19089	1,18921	1,18753	1,18586	1,18419
+28	1,19712	1,19542	1,19371	1,19215	1,19032	1,18863	1,18695	1,18527	1,18360	1,18193	1,18026
+27	1,19314	1,19144	1,18975	1,18806	1,18638	1,18469	1,18301	1,18133	1,17966	1,17800	1,17634
+26	1,18917	1,18747	1,18578	1,18409	1,18241	1,18073	1,17906	1,17739	1,17573	1,17407	1,17242
+25	1,18519	1,18350	1,18181	1,18013	1,17845	1,17678	1,17512	1,17345	1,17180	1,17014	1,16849
+24	1,18121	1,17953	1,17784	1,17617	1,17450	1,17283	1,17117	1,16951	1,16786	1,16621	1,16457
+23	1,17723	1,17555	1,17387	1,17221	1,17054	1,16888	1,16722	1,16557	1,16393	1,16228	1,16065
+22	1,17325	1,17158	1,16991	1,16824	1,16658	1,16493	1,16328	1,16163	1,15999	1,15835	1,15673
+21	1,16927	1,16760	1,16594	1,16428	1,16262	1,16098	1,15933	1,15770	1,15606	1,15443	1,15280
+20	1,16529	1,16363	1,16197	1,16032	1,15867	1,15703	1,15539	1,15376	1,15213	1,15050	1,14888
+19	1,16131	1,15966	1,15800	1,15636	1,15471	1,15308	1,15144	1,14982	1,14819	1,14657	1,14496
+18	1,15733	1,15569	1,15404	1,15240	1,15076	1,14913	1,14750	1,14588	1,14426	1,14264	1,14103
+17	1,15336	1,15171	1,15007	1,14843	1,14680	1,14518	1,14356	1,14194	1,14032	1,13872	1,13711
+16	1,14938	1,14774	1,14610	1,14447	1,14285	1,14123	1,13961	1,13800	1,13639	1,13479	1,13319
+15	1,14540	1,14376	1,14214	1,14051	1,13889	1,13728	1,13566	1,13406	1,13246	1,13086	1,12927
+14	1,14142	1,13979	1,13817	1,13655	1,13493	1,13333	1,13173	1,13012	1,12852	1,12693	1,12534
+13	1,13744	1,13582	1,13420	1,13259	1,13098	1,12937	1,12777	1,12618	1,12459	1,12300	1,12142
+12	1,13346	1,13184	1,13023	1,12862	1,12702	1,12542	1,12383	1,12224	1,12065	1,11907	1,11750
+11	1,12948	1,12787	1,12626	1,12466	1,12306	1,12147	1,11988	1,11830	1,11672	1,11514	1,11357
+10	1,12550	1,12390	1,12230	1,12070	1,11911	1,11752	1,11594	1,11436	1,11279	1,11122	1,10965
+9	1,12152	1,11993	1,11833	1,11674	1,11515	1,11357	1,11199	1,11042	1,10885	1,10729	1,10573
+8	1,11754	1,11595	1,11436	1,11278	1,11120	1,10962	1,10805	1,10648	1,10492	1,10336	1,10181
+7	1,11357	1,11198	1,11039	1,10881	1,10724	1,10567	1,10410	1,10254	1,10098	1,09943	1,09788
+6	1,10959	1,10801	1,10643	1,10485	1,10328	1,10172	1,10016	1,09860	1,09705	1,09550	1,09396
+5	1,10561	1,10403	1,10246	1,10089	1,09933	1,09777	1,09621	1,09466	1,09312	1,09157	1,09004
+4	1,10163	1,10006	1,09849	1,09693	1,09537	1,09382	1,09227	1,09072	1,08918	1,08765	1,08611
+3	1,09765	1,09609	1,09453	1,09297	1,09141	1,08987	1,08832	1,08678	1,08525	1,08372	1,08219
+2	1,09367	1,09211	1,09056	1,08901	1,08746	1,08592	1,08438	1,08284	1,08131	1,07979	1,07827
+1	1,08969	1,08814	1,08659	1,08504	1,08350	1,08197	1,08043	1,07890	1,07738	1,07586	1,07435
±0	1,08571	1,08417	1,08262	1,08108	1,07954	1,07801	1,07649	1,07496	1,07344	1,07193	1,07042
−1	1,08173	1,08019	1,07865	1,07712	1,07559	1,07406	1,07254	1,07102	1,06951	1,06800	1,06650
−2	1,07776	1,07622	1,07469	1,07316	1,07163	1,07011	1,06860	1,06709	1,06558	1,06408	1,06258

°C	710 мм	711 мм	712 мм	713 мм	714 мм	715 мм	716 мм	717 мм	718 мм	719 мм	720 мм
+30	1,18811	1,18644	1,18477	1,18311	1,18145	1,17980	1,17815	1,17651	1,17487	1,17324	1,17161
+29	1,18419	1,18252	1,18085	1,17920	1,17755	1,17590	1,17426	1,17262	1,17099	1,16936	1,16774
+28	1,18026	1,17860	1,17695	1,17530	1,17365	1,17201	1,17037	1,16874	1,16711	1,16549	1,16387
+27	1,17634	1,17469	1,17304	1,17139	1,16976	1,16811	1,16647	1,16485	1,16323	1,16162	1,16000
+26	1,17242	1,17077	1,16912	1,16749	1,16585	1,16422	1,16259	1,16097	1,15936	1,15774	1,15613
+25	1,16849	1,16685	1,16521	1,16358	1,16195	1,16032	1,15870	1,15709	1,15548	1,15387	1,15227
+24	1,16457	1,16293	1,16130	1,15967	1,15805	1,15643	1,15481	1,15320	1,15160	1,14999	1,14840
+23	1,16065	1,15902	1,15739	1,15576	1,15415	1,15253	1,15092	1,14932	1,14772	1,14612	1,14453
+22	1,15673	1,15510	1,15348	1,15186	1,15025	1,14864	1,14703	1,14543	1,14384	1,14225	1,14066
+21	1,15280	1,15118	1,14956	1,14795	1,14634	1,14474	1,14314	1,14155	1,13996	1,13837	1,13679
+20	1,14888	1,14726	1,14565	1,14405	1,14244	1,14085	1,13925	1,13766	1,13608	1,13450	1,13292
+19	1,14496	1,14335	1,14174	1,14014	1,13854	1,13695	1,13536	1,13378	1,13220	1,13062	1,12906
+18	1,14103	1,13943	1,13783	1,13623	1,13464	1,13305	1,13147	1,12989	1,12832	1,12676	1,12519
+17	1,13711	1,13551	1,13392	1,13233	1,13074	1,12916	1,12758	1,12601	1,12444	1,12288	1,12132
+16	1,13319	1,13160	1,13001	1,12842	1,12684	1,12526	1,12369	1,12213	1,12056	1,11900	1,11745
+15	1,12927	1,12768	1,12609	1,12451	1,12294	1,12137	1,11980	1,11824	1,11668	1,11513	1,11358
+14	1,12534	1,12376	1,12218	1,12061	1,11904	1,11747	1,11591	1,11436	1,11280	1,11126	1,10971
+13	1,12142	1,11984	1,11827	1,11670	1,11514	1,11358	1,11502	1,11047	1,10892	1,10738	1,10584
+12	1,11750	1,11593	1,11436	1,11280	1,11124	1,10968	1,10813	1,10659	1,10505	1,10351	1,10198
+11	1,11357	1,11201	1,11045	1,10889	1,10734	1,10579	1,10424	1,10270	1,10117	1,09964	1,09811
+10	1,10965	1,10809	1,10653	1,10498	1,10343	1,10189	1,10035	1,09882	1,09729	1,09576	1,09424
+9	1,10573	1,10417	1,10262	1,10106	1,09953	1,09800	1,09646	1,09493	1,09341	1,09189	1,09037
+8	1,10181	1,10026	1,09871	1,09717	1,09563	1,09410	1,09257	1,09105	1,08953	1,08801	1,08650
+7	1,09788	1,09634	1,09480	1,09326	1,09173	1,09021	1,08868	1,08716	1,08566	1,08414	1,08263
+6	1,09396	1,09242	1,09089	1,08936	1,08783	1,08631	1,08479	1,08328	1,08177	1,08027	1,07877
+5	1,09004	1,08850	1,08697	1,08545	1,08393	1,08241	1,08090	1,07939	1,07789	1,07639	1,07490
+4	1,08611	1,08459	1,08306	1,08154	1,08003	1,07852	1,07701	1,07551	1,07401	1,07252	1,07103
+3	1,08219	1,08067	1,07915	1,07764	1,07613	1,07462	1,07312	1,07163	1,07013	1,06864	1,06715
+2	1,07827	1,07676	1,07524	1,07373	1,07223	1,07073	1,06923	1,06774	1,06625	1,06477	1,06329
+1	1,07435	1,07285	1,07133	1,06983	1,06833	1,06683	1,06534	1,06385	1,06238	1,06090	1,05943
±0	1,07042	1,06893	1,06742	1,06592	1,06443	1,06294	1,06145	1,05997	1,05851	1,05702	1,05555
−1	1,06650	1,06500	1,06350	1,06201	1,06052	1,05904	1,05756	1,05609	1,05462	1,05315	1,05169
−2	1,06258	1,06108	1,05959	1,05811	1,05662	1,05515	1,05367	1,05220	1,05074	1,04928	1,04782

°C	720 мм	721 мм	722 мм	723 мм	724 мм	725 мм	726 мм	727 мм	728 мм	729 мм	730 мм
+30	1,17161	1,16998	1,16836	1,16675	1,16514	1,16353	1,16193	1,16033	1,15873	1,15714	1,15556
+29	1,15774	1,15612	1,15450	1,15289	1,15129	1,14968	1,14809	1,14650	1,14491	1,14332	1,14174
+28	1,14387	1,14226	1,14065	1,13904	1,13744	1,13584	1,13425	1,13268	1,13108	1,12950	1,12793
+27	1,13000	1,12839	1,12679	1,12519	1,12359	1,12200	1,12042	1,11883	1,11725	1,11568	1,11411
+26	1,11643	1,11483	1,11323	1,11164	1,11005	1,10846	1,10688	1,10530	1,10373	1,10216	1,10060
+25	1,10287	1,10067	1,09907	1,09748	1,09589	1,09432	1,09274	1,09117	1,08961	1,08804	1,08648
+24	1,08840	1,08680	1,08522	1,08363	1,08205	1,08048	1,07891	1,07734	1,07578	1,07422	1,07266
+23	1,07453	1,07294	1,07136	1,06978	1,06821	1,06663	1,06507	1,06351	1,06195	1,06040	1,05885
+22	1,06066	1,05908	1,05750	1,05593	1,05436	1,05279	1,05123	1,04968	1,04813	1,04658	1,04503
+21	1,04679	1,04522	1,04364	1,04208	1,04051	1,03895	1,03740	1,03585	1,03430	1,03276	1,03122
+20	1,03292	1,03135	1,02978	1,02822	1,02666	1,02511	1,02357	1,02202	1,02047	1,01894	1,01740
+19	1,01906	1,01749	1,01593	1,01437	1,01282	1,01127	1,00973	1,00818	1,00665	1,00512	1,00359
+18	1,00519	1,00363	1,00207	1,00052	0,99897	0,99743	0,99589	0,99435	0,99282	0,99130	0,98977
+17	0,99132	0,98976	0,98821	0,98667	0,98513	0,98359	0,98205	0,98052	0,97900	0,97748	0,97596
+16	0,97745	0,97590	0,97435	0,97281	0,97128	0,96974	0,96821	0,96669	0,96517	0,96365	0,96214
+15	0,96358	0,96204	0,96050	0,95896	0,95743	0,95590	0,95438	0,95286	0,95134	0,94983	0,94833
+14	0,94971	0,94817	0,94664	0,94511	0,94358	0,94206	0,94054	0,93903	0,93752	0,93601	0,93451
+13	0,93584	0,93431	0,93278	0,93126	0,92973	0,92822	0,92671	0,92520	0,92369	0,92219	0,92070
+12	0,92198	0,92045	0,91892	0,91740	0,91589	0,91438	0,91287	0,91137	0,90987	0,90837	0,90688
+11	0,90811	0,90658	0,90507	0,90356	0,90204	0,90053	0,89903	0,89754	0,89604	0,89456	0,89307
+10	0,89424	0,89272	0,89121	0,88970	0,88819	0,88669	0,88520	0,88371	0,88222	0,88073	0,87925
+9	0,88037	0,87886	0,87735	0,87585	0,87435	0,87285	0,87136	0,86988	0,86839	0,86691	0,86543
+8	0,86650	0,86500	0,86349	0,86199	0,86050	0,85901	0,85752	0,85604	0,85456	0,85309	0,85162
+7	0,85263	0,85113	0,84964	0,84814	0,84665	0,84517	0,84369	0,84221	0,84074	0,83927	0,83780
+6	0,83877	0,83727	0,83578	0,83429	0,83281	0,83133	0,82985	0,82838	0,82691	0,82545	0,82399
+5	0,82490	0,82341	0,82192	0,82044	0,81896	0,81748	0,81601	0,81455	0,81308	0,81163	0,81017
+4	0,81103	0,80954	0,80806	0,80658	0,80511	0,80364	0,80218	0,80072	0,79926	0,79781	0,79636
+3	0,79716	0,79568	0,79420	0,79273	0,79127	0,78980	0,78834	0,78689	0,78544	0,78399	0,78254
+2	0,78329	0,78182	0,78035	0,77888	0,77742	0,77596	0,77451	0,77306	0,77161	0,77017	0,76873
+1	0,76942	0,76795	0,76649	0,76503	0,76357	0,76212	0,76067	0,75922	0,75778	0,75634	0,75491
± 0	0,75555	0,75409	0,75263	0,75117	0,74972	0,74828	0,74684	0,74539	0,74395	0,74252	0,74110
− 1	0,74169	0,74023	0,73877	0,73732	0,73588	0,73444	0,73300	0,73156	0,73013	0,72870	0,72728
− 2	0,72782	0,72636	0,72491	0,72347	0,72203	0,72059	0,71916	0,71773	0,71630	0,71488	0,71346

°C	730 мм	731 мм	732 мм	733 мм	734 мм	735 мм	736 мм	737 мм	738 мм	739 мм	740 мм
+30	1,15556	1,15398	1,15240	1,15083	1,14926	1,14770	1,14614	1,14458	1,14303	1,14149	1,13994
+29	1,14174	1,14017	1,13860	1,13703	1,13547	1,13391	1,13235	1,13080	1,12926	1,12772	1,12618
+28	1,12793	1,12636	1,12479	1,12323	1,12167	1,12012	1,11857	1,11702	1,11548	1,11396	1,11241
+27	1,11411	1,11255	1,11099	1,10943	1,10788	1,10633	1,10478	1,10324	1,10171	1,10018	1,09865
+26	1,10060	1,09874	1,09718	1,09563	1,09408	1,09254	1,09100	1,08946	1,08794	1,08641	1,08489
+25	1,08648	1,08493	1,08337	1,08183	1,08029	1,07875	1,07722	1,07569	1,07416	1,07264	1,07113
+24	1,07266	1,07112	1,06957	1,06803	1,06649	1,06496	1,06343	1,06191	1,06039	1,05887	1,05736
+23	1,05885	1,05731	1,05576	1,05423	1,05270	1,05117	1,04965	1,04813	1,04661	1,04510	1,04359
+22	1,04503	1,04350	1,04196	1,04043	1,03890	1,03738	1,03586	1,03435	1,03284	1,03133	1,02983
+21	1,03122	1,02969	1,02816	1,02663	1,02511	1,02359	1,02208	1,02057	1,01906	1,01756	1,01607
+20	1,01740	1,01587	1,01435	1,01283	1,01132	1,00980	1,00830	1,00679	1,00529	1,00380	1,00230
+19	1,00359	1,00206	1,00055	0,99903	0,99753	0,99601	0,99451	0,99301	0,99151	0,99003	0,98854
+18	0,98977	0,98825	0,98674	0,98523	0,98373	0,98222	0,98073	0,97923	0,97774	0,97626	0,97478
+17	0,97596	0,97444	0,97294	0,97143	0,96993	0,96843	0,96694	0,96545	0,96397	0,96249	0,96101
+16	0,96214	0,96063	0,95913	0,95763	0,95614	0,95465	0,95316	0,95167	0,95019	0,94872	0,94725
+15	0,94833	0,94683	0,94533	0,94383	0,94234	0,94086	0,93937	0,93789	0,93642	0,93495	0,93348
+14	0,93451	0,93301	0,93152	0,93003	0,92855	0,92707	0,92559	0,92412	0,92265	0,92118	0,91972
+13	0,92070	0,91920	0,91772	0,91623	0,91475	0,91328	0,91180	0,91034	0,90887	0,90741	0,90595
+12	0,90688	0,90539	0,90391	0,90243	0,90096	0,89949	0,89802	0,89656	0,89510	0,89364	0,89219
+11	0,89307	0,89159	0,89011	0,88863	0,88716	0,88570	0,88424	0,88278	0,88132	0,87988	0,87843
+10	0,87925	0,87777	0,87630	0,87483	0,87337	0,87191	0,87045	0,86900	0,86755	0,86611	0,86467
+9	0,86543	0,86396	0,86250	0,86103	0,85957	0,85812	0,85667	0,85522	0,85378	0,85234	0,85090
+8	0,85162	0,85015	0,84869	0,84723	0,84578	0,84433	0,84288	0,84144	0,84000	0,83857	0,83714
+7	0,83780	0,83634	0,83488	0,83343	0,83199	0,83054	0,82910	0,82766	0,82623	0,82480	0,82337
+6	0,82399	0,82253	0,82108	0,81963	0,81819	0,81675	0,81531	0,81388	0,81245	0,81103	0,80961
+5	0,81017	0,80872	0,80728	0,80583	0,80440	0,80296	0,80153	0,80010	0,79868	0,79726	0,79585
+4	0,79636	0,79491	0,79347	0,79203	0,79060	0,78917	0,78775	0,78632	0,78491	0,78349	0,78208
+3	0,78254	0,78110	0,77967	0,77823	0,77681	0,77538	0,77396	0,77254	0,77113	0,76972	0,76831
+2	0,76873	0,76729	0,76586	0,76443	0,76301	0,76159	0,76018	0,75877	0,75736	0,75596	0,75455
+1	0,75491	0,75348	0,75206	0,75063	0,74922	0,74780	0,74639	0,74499	0,74358	0,74219	0,74079
± 0	0,74110	0,73967	0,73825	0,73683	0,73542	0,73401	0,73261	0,73121	0,72981	0,72842	0,72703
− 1	0,72728	0,72584	0,72445	0,72303	0,72163	0,72023	0,71883	0,71743	0,71603	0,71465	0,71326
− 2	0,71346	0,71203	0,71064	0,70923	0,70783	0,70643	0,70504	0,70365	0,70226	0,70088	0,69950

°C	740 мм	741 мм	742 мм	743 мм	744 мм	745 мм	746 мм	747 мм	748 мм	749 мм	750 мм
+30	1,13994	1,13840	1,13687	1,13534	1,13381	1,13229	1,13077	1,12926	1,12775	1,12624	1,12474
29	1,13616	1,13464	1,13312	1,13159	1,13007	1,12855	1,12704	1,12553	1,12403	1,12253	1,12103
28	1,13241	1,13089	1,12936	1,12784	1,12633	1,12481	1,12331	1,12180	1,12030	1,11881	1,11731
27	1,12865	1,12713	1,12561	1,12409	1,12258	1,12107	1,11957	1,11807	1,11658	1,11509	1,11360
26	1,12489	1,12337	1,12186	1,12035	1,11884	1,11734	1,11584	1,11435	1,11286	1,11137	1,10989
25	1,12112	1,11961	1,11810	1,11660	1,11510	1,11360	1,11211	1,11062	1,10913	1,10765	1,10617
24	1,11738	1,11585	1,11434	1,11285	1,11135	1,10986	1,10837	1,10689	1,10541	1,10393	1,10246
23	1,11359	1,11209	1,11060	1,10910	1,10761	1,10612	1,10464	1,10316	1,10169	1,10022	1,09875
22	1,10983	1,10833	1,10684	1,10535	1,10387	1,10238	1,10091	1,09943	1,09795	1,09650	1,09503
21	1,10607	1,10457	1,10309	1,10160	1,10012	1,09864	1,09717	1,09570	1,09424	1,09278	1,09132
20	1,10230	1,10081	1,09933	1,09785	1,09638	1,09491	1,09344	1,09197	1,09052	1,08906	1,08761
19	1,09854	1,09706	1,09558	1,09410	1,09263	1,09117	1,08970	1,08825	1,08679	1,08534	1,08389
18	1,09478	1,09330	1,09183	1,09036	1,08889	1,08743	1,08597	1,08452	1,08307	1,08162	1,08018
17	1,09101	1,08954	1,08807	1,08661	1,08515	1,08369	1,08224	1,08079	1,07934	1,07790	1,07647
16	1,08725	1,08578	1,08432	1,08286	1,08140	1,07996	1,07850	1,07706	1,07562	1,07418	1,07275
15	1,08348	1,08202	1,08056	1,07911	1,07766	1,07621	1,07477	1,07333	1,07190	1,07047	1,06904
14	1,07972	1,07826	1,07681	1,07536	1,07392	1,07247	1,07104	1,06960	1,06817	1,06675	1,06532
13	1,07596	1,07451	1,07305	1,07161	1,07017	1,06873	1,06730	1,06587	1,06445	1,06303	1,06161
12	1,07219	1,07075	1,06930	1,06786	1,06643	1,06500	1,06357	1,06215	1,06073	1,05931	1,05790
11	1,06843	1,06699	1,06555	1,06412	1,06269	1,06126	1,05984	1,05842	1,05700	1,05559	1,05418
10	1,06467	1,06323	1,06180	1,06037	1,05894	1,05752	1,05610	1,05469	1,05328	1,05187	1,05047
9	1,06090	1,05947	1,05804	1,05662	1,05520	1,05378	1,05237	1,05096	1,04956	1,04815	1,04676
8	1,05714	1,05571	1,05429	1,05287	1,05145	1,05004	1,04863	1,04723	1,04583	1,04443	1,04304
7	1,05337	1,05195	1,05054	1,04912	1,04771	1,04630	1,04490	1,04350	1,04211	1,04072	1,03933
6	1,04961	1,04819	1,04678	1,04537	1,04397	1,04257	1,04117	1,03978	1,03839	1,03700	1,03562
5	1,04585	1,04444	1,04303	1,04162	1,04022	1,03883	1,03743	1,03606	1,03466	1,03328	1,03191
4	1,04208	1,04068	1,03928	1,03788	1,03648	1,03509	1,03370	1,03232	1,03094	1,02956	1,02819
3	1,03831	1,03692	1,03553	1,03413	1,03274	1,03135	1,02997	1,02859	1,02721	1,02584	1,02447
2	1,03455	1,03316	1,03177	1,03038	1,02899	1,02761	1,02623	1,02486	1,02349	1,02212	1,02076
1	1,03079	1,02940	1,02801	1,02663	1,02525	1,02387	1,02250	1,02113	1,01977	1,01841	1,01705
0	1,02703	1,02564	1,02426	1,02287	1,02151	1,02014	1,01877	1,01740	1,01604	1,01469	1,01333
−1	1,02326	1,02188	1,02050	1,01913	1,01776	1,01640	1,01504	1,01367	1,01232	1,01097	1,00962
−2	1,01950	1,01812	1,01675	1,01538	1,01402	1,01266	1,01130	1,00994	1,00860	1,00725	1,00591

°C	750 мм	751 мм	752 мм	753 мм	754 мм	755 мм	756 мм	757 мм	758 мм	759 мм	760 мм
+30	1,12474	1,12324	1,12175	1,12026	1,11878	1,11729	1,11581	1,11434	1,11287	1,11141	1,10995
29	1,12103	1,11954	1,11805	1,11656	1,11508	1,11360	1,11213	1,11066	1,10920	1,10774	1,10628
28	1,11731	1,11583	1,11434	1,11286	1,11139	1,10991	1,10845	1,10698	1,10552	1,10407	1,10261
27	1,11360	1,11212	1,11064	1,10916	1,10769	1,10623	1,10476	1,10330	1,10185	1,10040	1,09895
26	1,10989	1,10841	1,10693	1,10546	1,10400	1,10254	1,10108	1,09963	1,09818	1,09673	1,09529
25	1,10617	1,10470	1,10323	1,10177	1,10030	1,09885	1,09740	1,09596	1,09450	1,09306	1,09162
24	1,10246	1,10099	1,09953	1,09807	1,09661	1,09516	1,09371	1,09227	1,09083	1,08939	1,08795
23	1,09875	1,09729	1,09583	1,09437	1,09292	1,09147	1,09003	1,08859	1,08715	1,08572	1,08429
22	1,09503	1,09358	1,09212	1,09067	1,08923	1,08778	1,08634	1,08491	1,08348	1,08205	1,08063
21	1,09132	1,08987	1,08842	1,08697	1,08553	1,08409	1,08266	1,08123	1,07980	1,07838	1,07696
20	1,08761	1,08616	1,08472	1,08327	1,08184	1,08040	1,07898	1,07755	1,07613	1,07471	1,07330
19	1,08389	1,08245	1,08101	1,07957	1,07814	1,07671	1,07529	1,07387	1,07245	1,07104	1,06963
18	1,08018	1,07874	1,07731	1,07588	1,07445	1,07303	1,07161	1,07019	1,06878	1,06737	1,06597
17	1,07647	1,07503	1,07360	1,07218	1,07076	1,06934	1,06792	1,06651	1,06510	1,06370	1,06230
16	1,07276	1,07132	1,06989	1,06848	1,06706	1,06565	1,06424	1,06283	1,06143	1,06003	1,05864
15	1,06904	1,06761	1,06620	1,06478	1,06337	1,06196	1,06055	1,05915	1,05775	1,05636	1,05497
14	1,06532	1,06390	1,06249	1,06108	1,05967	1,05827	1,05687	1,05547	1,05408	1,05269	1,05131
13	1,06161	1,06020	1,05879	1,05738	1,05598	1,05458	1,05318	1,05179	1,05041	1,04902	1,04764
12	1,05790	1,05649	1,05508	1,05368	1,05229	1,05089	1,04950	1,04811	1,04673	1,04535	1,04398
11	1,05418	1,05278	1,05138	1,04998	1,04859	1,04720	1,04582	1,04435	1,04306	1,04168	1,04031
10	1,05047	1,04907	1,04768	1,04629	1,04490	1,04351	1,04213	1,04075	1,03938	1,03801	1,03665
9	1,04676	1,04536	1,04397	1,04259	1,04120	1,03982	1,03845	1,03708	1,03571	1,03434	1,03299
8	1,04304	1,04165	1,04027	1,03889	1,03751	1,03614	1,03477	1,03340	1,03203	1,03067	1,02932
7	1,03933	1,03795	1,03657	1,03519	1,03381	1,03245	1,03108	1,02972	1,02836	1,02700	1,02565
6	1,03562	1,03424	1,03286	1,03149	1,03012	1,02876	1,02740	1,02604	1,02468	1,02333	1,02198
5	1,03190	1,03053	1,02916	1,02779	1,02643	1,02507	1,02371	1,02236	1,02101	1,01967	1,01832
4	1,02819	1,02682	1,02545	1,02409	1,02273	1,02138	1,02003	1,01868	1,01734	1,01600	1,01466
3	1,02447	1,02311	1,02175	1,02039	1,01904	1,01769	1,01634	1,01500	1,01366	1,01233	1,01099
2	1,02076	1,01940	1,01805	1,01670	1,01535	1,01400	1,01266	1,01132	1,00999	1,00866	1,00733
1	1,01705	1,01569	1,01434	1,01300	1,01165	1,01031	1,00897	1,00764	1,00631	1,00499	1,00366
0	1,01333	1,01198	1,01063	1,00930	1,00796	1,00662	1,00529	1,00396	1,00264	1,00132	1,00000
−1	1,00962	1,00828	1,00693	1,00560	1,00426	1,00293	1,00161	1,00028	0,99896	0,99765	0,99634
−2	1,00591	1,00457	1,00323	1,00190	1,00057	0,99924	0,99792	0,99660	0,99528	0,99398	0,99267

°C	760 мм	761 мм	762 мм	763 мм	764 мм	765 мм	766 мм	767 мм	768 мм	769 мм	770 мм
+30	1,10995	1,10849	1,10703	1,10558	1,10413	1,10269	1,10125	1,09981	1,09838	1,09695	1,09553
29	1,10628	1,10483	1,10337	1,10193	1,10049	1,09905	1,09761	1,09618	1,09476	1,09333	1,09191
28	1,10261	1,10117	1,09972	1,09828	1,09684	1,09541	1,09397	1,09255	1,09113	1,08971	1,08829
27	1,09895	1,09751	1,09608	1,09463	1,09319	1,09177	1,09034	1,08892	1,08750	1,08609	1,08468
26	1,09529	1,09385	1,09241	1,09098	1,08955	1,08813	1,08671	1,08529	1,08387	1,08247	1,08106
25	1,09162	1,09019	1,08875	1,08733	1,08590	1,08449	1,08307	1,08166	1,08026	1,07884	1,07744
24	1,08795	1,08653	1,08510	1,08368	1,08226	1,08084	1,07943	1,07803	1,07662	1,07522	1,07383
23	1,08429	1,08287	1,08145	1,08003	1,07861	1,07720	1,07580	1,07439	1,07299	1,07160	1,07021
22	1,08063	1,07921	1,07779	1,07638	1,07491	1,07356	1,07216	1,07076	1,06937	1,06798	1,06659
21	1,07696	1,07555	1,07413	1,07273	1,07132	1,06992	1,06852	1,06713	1,06574	1,06436	1,06297
20	1,07330	1,07189	1,07048	1,06908	1,06768	1,06628	1,06489	1,06350	1,06212	1,06074	1,05936
19	1,06963	1,06822	1,06682	1,06543	1,06403	1,06264	1,06125	1,05987	1,05849	1,05711	1,05574
18	1,06597	1,06456	1,06317	1,06178	1,06039	1,05900	1,05762	1,05624	1,05486	1,05349	1,05212
17	1,06230	1,06090	1,05951	1,05812	1,05674	1,05536	1,05398	1,05261	1,05124	1,04987	1,04851
16	1,05864	1,05726	1,05586	1,05447	1,05309	1,05172	1,05034	1,04898	1,04761	1,04623	1,04489
15	1,05497	1,05359	1,05220	1,05082	1,04945	1,04808	1,04671	1,04534	1,04398	1,04262	1,04127
14	1,05131	1,04992	1,04855	1,04717	1,04580	1,04443	1,04307	1,04171	1,04035	1,03900	1,03765
13	1,04764	1,04626	1,04489	1,04357	1,04216	1,04079	1,03944	1,03808	1,03673	1,03538	1,03404
12	1,04398	1,04261	1,04124	1,03987	1,03851	1,03715	1,03580	1,03445	1,03310	1,03178	1,03042
11	1,04031	1,03895	1,03758	1,03622	1,03487	1,03351	1,03216	1,03082	1,02948	1,02814	1,02680
10	1,03665	1,03529	1,03393	1,03257	1,03122	1,02987	1,02853	1,02719	1,02585	1,02452	1,02319
9	1,03299	1,03163	1,03027	1,02892	1,02756	1,02623	1,02489	1,02356	1,02222	1,02089	1,01957
8	1,02932	1,02797	1,02662	1,02527	1,02393	1,02259	1,02126	1,01993	1,01860	1,01727	1,01595
7	1,02565	1,02431	1,02296	1,02162	1,02028	1,01896	1,01762	1,01629	1,01497	1,01365	1,01233
6	1,02198	1,02065	1,01931	1,01797	1,01664	1,01531	1,01399	1,01266	1,01134	1,01003	1,00872
5	1,01832	1,01699	1,01565	1,01432	1,01299	1,01167	1,01035	1,00903	1,00772	1,00641	1,00510
4	1,01466	1,01333	1,01200	1,01067	1,00935	1,00803	1,00671	1,00540	1,00409	1,00278	1,00148
3	1,01099	1,00967	1,00834	1,00702	1,00570	1,00439	1,00307	1,00177	1,00047	0,99916	0,99786
2	1,00733	1,00601	1,00469	1,00337	1,00206	1,00075	0,99944	0,99814	0,99684	0,99554	0,99425
1	1,00366	1,00235	1,00103	0,99972	0,99841	0,99711	0,99580	0,99451	0,99321	0,99192	0,99063
± 0	1,00000	0,99869	0,99737	0,99607	0,99476	0,99346	0,99217	0,99087	0,98958	0,98829	0,98701
− 1	0,99634	0,99503	0,99372	0,99242	0,99112	0,98982	0,98853	0,98724	0,98595	0,98467	0,98340
− 2	0,99267	0,99137	0,99006	0,98877	0,98747	0,98618	0,98489	0,98361	0,98233	0,98105	0,97978

Глава II

ТРАНСПОРТ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗА

(Перевод *А. И. Великина*)

1. ТРАНСПОРТ

Проблема транспорта и распределения газа включает проектирование, строительство и эксплоатацию транзитной линии и распределительной сети, компрессорных установок и хранилищ; сюда входят также выбор и установка различных измерительных и контрольных приборов (счетчики, регуляторы и т. д.). Провести точное различие между транзитной и распределительной линиями трудно, так как это зависит от местных условий и местной практики. В общем, транзитная линия — нефтепровод или газопровод — характеризуется своей большой длиной, применяемой на ней высоким давлением, большой скоростью потока и небольшим количеством задвижек, клапанов и фасонных частей. При расчете линий такого типа принято пользоваться формулой Weymouth'a. Распределительная линия характеризуется низким давлением, небольшими скоростями и большим количеством задвижек, клапанов, отводов и фасонных частей. Лучшей формулой для расчета линий этого типа считается формула Spitzglass'a. Общие вопросы движения потока жидкости и газа, а также вопросы измерений рассмотрены в предыдущем разделе настоящей книги; приводимые в этом разделе уравнения и величины, относящиеся к движению жидкостей и газов в условиях низкого и повышенного давлений, выведены при помощи формулы Spitzglass'a.

РАСЧЕТ ТРАНЗИТНОЙ ЛИНИИ

Хорошо разработанные вопросы, касающиеся практики строительства нефтепроводов и газопроводов, имеются в трудах тихоокеанской газовой ассоциации США „Proceedings of the Pacific Coast Gas Association". В этих трудах рассмотрены следующие важнейшие вопросы проектирования линий и строительства.

Выбор трассы. Трассу, которая должна проходить от источника снабжения до места распределения — рынка, следует выбирать таким образом, чтобы вложенные в линию капиталы покрывались в достаточной степени за время ее существования. Относительная экономия, получаемая при прохождении главной магистрали от источника снабжения до конечного потребителя при попутном питании других потребителей по трассе, расходы при питании потребителей, расположенных вдали от трассы, через ответвления, характер местности — все эти соображения должны быть тщательно рассмотрены и взвешены при выборе трассы и при определении проектной длины нефтепровода и газопровода. При выборе трассы следует учитывать также доступность линии для ремонта во всякое время.

Выбор наиболее выгодных диаметра трубы и давления в линии. При выборе наиболее выгодных диаметра трубы и давления важнейшими факторами являются первоначальные расходы и годовая эксплоатационная стоимость линии. В эксплоатационные расходы входят: амортизация, расходы по ремонту и т. п. Пользуясь таблицами, приводимыми в настоящей книге и выведенными на основании формул Weymouth'a и кривых Kepler'a, можно видеть, что в большинстве случаев при данном объеме пропускаемого газа и при данной пропускной спо-

собности линии можно легко выбрать как диаметр, так и толщину стенки трубы и установить рабочее давление. При этом следует выбирать такие значения этих величин, которые связаны с наименьшими годовыми расходами по эксплоатации линии.

Сортамент труб при проектировании линии. Сортамент труб, который необходимо учитывать при проектировании линии разных диаметров, имеются во многих справочниках. Американский нефтяной институт одобрил стандартные сортаменты, наиболее распространенные и применяемые на заводах, изготовляющих трубы. Сортамент труб, одобренный и утвержденный Американским нефтяным институтом, опубликован в брошюрах и включает почти все, что касается этого вопроса.

При заказе труб заводу должны быть сообщены следующие данные:

1) тип трубы и способ соединения (сварка внахлестку, сварка впритык, электросварка, цельнотянутые трубы и т. д.);
2) материал (желаемый сорт стали и ее состав по спецификации, сопротивление на растяжение и другие физические характеристики);
3) наружный диаметр;
4) толщина стенок трубы;
5) вес трубы на метр с указанием допуска;
6) желательные качества труб;
7) способы заводских испытаний труб;
8) средняя длина соединений с указанием допусков;
9) тип соединения труб (полное описание);
10) тип защитного покрытия, которое должно быть наложено на заводе, если это там производится (полное описание покрытия и метод наложения);
11) способ погрузки;
12) место сдачи и путь перевозки труб.

Этот сортамент Американского нефтяного института соблюдается американскими заводами, если заказчиком не оговорены дополнительные указания.

Коэфициент надежности. При проектировании нефтепроводов и газопроводов обычно принято вводить коэфициент надежности 4. В своем экономическом исследовании по этому вопросу Kepler рекомендует коэфициент 3 при условии достаточных защитных покрытий, причем более высокие коэфициенты он рекомендует применять только при большей вероятности порчи труб. Более того, если сталь не защищена достаточно надежно, то более высокий коэфициент не может предотвратить коррозии. В табл. 94 в виде примеров приводятся данные о типичных нефтепроводах и газопроводах.

Толщина стенки. Толщина стенки вычисляется по следующей формуле:

$$\text{Минимальная допустимая толщина стенки (в } мм) = \frac{RP}{SEF},$$

где P — рабочее давление в *ат*;
S — сопротивление материала трубы разрыву в *кг/см²*;
F — коэфициент надежности;
E — прочность продольного шва;
R — внутренний радиус в *мм*.

Формула Барлоу (Barlow) для толщины стенки представляется в следующем виде:

$$t = \frac{1}{2} D \frac{p}{f},$$

где t — толщина стенки в *см*;
D — наружный диаметр в *см*;
p — внутреннее давление по манометру в *ат*;
f — допустимое напряжение на разрыв в *кг/см²*.

ДВИЖЕНИЕ ГАЗА ПО ТРУБАМ ГАЗОПРОВОДА

Высокое давление. Для определения величин потока газа по трубам газопроводов предложено было много разных формул. Одна из них, наиболее распространенная, выражает с большей точностью, чем другие формулы, соотношение различных элементов и различных величин; это — формула Thomas R. Weymouth'a Однако применяемый Weymouth'ом коэфициент трения представляется слишком низким, когда диаметр трубы превышает 550 *мм*, в особенности при высоких

Сравнительные данные для газопроводов высокого давления

Таблица 94

Общая длина линии в км	Наружный диаметр в мм	Толщина стенки в мм	Максимально-проектное рабочее давление в ат	Испытательное давление в ат	Проектная сопротивляемость на растяжение в кг/мм²	Растягивающие усилия под давлением: при заводских испытаниях	Растягивающие усилия под давлением: в рабочих условиях	Способ изготовления стальных труб	Предел упругости ... кг/мм²	Коэффициент прочности	Вид продольного	Тип соединения
547,0	22	9,5	28,0	—	843	1 033	—	Мартен.	3 656	4,11	Внахлестку	Муфта Дрессера
338,0	18	8,7	28,0	—	745	1 012	—	Мартен.	3 656	4,66	"	"
274,0	22	9,5	28,0	—	843	1 033	—	Бессем.	4 078	5,20	"	"
483,0	22	8,0	30,0	—	949	1 546	—	"	4 078	4,59	Электросварной шов	"
257,0	20	6,3	24,6	—	1 012	1 546	1 406	Мартен.	4 429	4,44	"	Сварка
—	16	8,7	45,7	—	1 068	1 546	1 406	"	4 429	4,16	"	"
133,5	12¾	5,6	28,0	35,0	829	1 019	1 019	"	4 429	3,94	"	"
80,5	12¾	5,6	28,0	35,0	829	1 019	1 019	"	3 656	4,19	Внахлестку	"
69,2	15	6,4	28,0	28,0	857	1 054	843	"	3 656	4,19	"	"
403,0	20	8,0	26,0	—	857	1 054	—	"	3 656	4,05	"	"
24,1	16	8,0	28,0	—	724	991	—	"	3 656	4,05	"	Соединен. Дрессера
62,8	16	7,1	28,0	—	815	1 096	—	"	3 656	4,80	"	"
59,6	12¾	6,3	14,0	7,0	358	896	179	"	3 656	4,25	"	"
175,0	20	7,1	28,0	7,0	999	1 499	267	"	3 515	9,80	"	Сварка ацетиленом
119,0	16	6,3	24,6	7,0	787	1 462	225	"	4 218	4,21	Электросварной шов	"
58,0	22	8,0	28,0	7,0	989	1 484	247	"	4 218	5,35	"	Электросварка
40,3	24	8,7	31,6	7,0	1 103	1 469	245	"	4 218	4,26	"	"
151,2	26	9,5	31,6	7,0	1 096	1 462	244	"	4 218	3,82	"	"
111,0	20	7,1	28,0	28,0	1 001	1 564	1 000	"	4 218	3,84	"	"
127,1	26	6,3	28,0	28,0	1 476	1 898	1 462	"	4 218	4,20	"	"
157,6	26	6,3	23,0	24,6	1 195	1 828	1 280	"	6 145	4,16	"	"
557,0	24	8,0	35,0	31,6	1 371	1 617	1 216	"	4 717	3,95	"	"
									4 570	3,34	"	Муфта

Таблица 95

Рабочие давления в разных трубах при различной толщине стенки и разных напряжениях

Формула давления:

$$P = \frac{2t}{D_0} S, \text{ или } P = KS,$$

где P — рабочее давление в *кг* на 1 *см*²;
t — толщина стенки в *см*;
D_0 — наружный диаметр трубы;
S — допустимое напряжение на 1 *см*².

Значение константы K в вышеприведенном уравнении

Наружный диаметр в дм.	Толщина стенок в дм.				
	$\frac{1}{4}$	$\frac{9}{32}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{11}{32}$	$\frac{3}{8}$
$8^5/_8$	0,0580	0,0651	0,0725	0,0796	0,0870
$10^3/_4$	0,0465	0,0523	0,0582	0,0639	0,0698
$12^3/_4$	0,0892	0,0441	0,0490	0,0539	0,0588
14	0,0357	0,0402	0,0446	0,0491	0,0536
16	0,0312	0,0352	0,0391	0,0430	0,0469
18	0,0278	0,0313	0,0347	0,0382	0,0417
20	0,0250	0,0281	0,0313	0,0343	0,0375
22	0,0227	0,0256	0,0284	0,0312	0,0341
24	0,0208	0,0234	0,0260	0,0286	0,0312
26	0,0192	0,0216	0,0240	0,0264	0,0288

скоростях движения газа [см. предыдущий раздел о движении жидкостей и газов и номограммы с числом Рейнольдса (Reynolds)].

Формула Weymouth'a в английских мерах представляется в следующем виде:

$$Q_s = 433{,}45 \frac{T_s}{P_s} \sqrt{\frac{d^{5\frac{1}{3}}(P_1^2 - P_2^2)}{SLT_1}},$$

где Q_s — поток газа в куб. фут. в сутки;
d — диаметр труб в дм.;
P_1 и P_2 — начальное и конечное абсолютные давления в фун/кв. дм;
L_1 — длина линии в милях;
S — удельный вес газа по отношению к воздуху (воздух равен единице);
T_1 — абсолютная температура движущегося газа в °F;
T_s — стандартная абсолютная температура в °F.

Применяя стандартную температуру (T_s) и стандартное давление (P_s) в английских мерах, преобразуем формулу следующим образом:

$$Q_s = 1{,}0147 \sqrt{\frac{d^{5\frac{1}{3}}(P_1^2 - P_2^2)}{LST_1}} \; м^3/сутки.$$

Та же формула в метрических мерах имеет следующий вид:

$$Q_s = 0{,}003745 \frac{T_s}{P_s} \sqrt{\frac{d^{5\frac{1}{3}}(P_1^2 - P_2^2)}{LST_1}}, \quad (1)$$

где Q — $м^3/час$;
D — *мм*;

P_1 и P_2 — абсолютные давления в начале и конце газопровода в *кг/см²*;
L — *км*;
T — абсолютная температура газа, проходящего через газопровод, в °С;
S — удельный вес газа (воздух равен единице).

Диаметры труб, применяющихся для передачи воды, нефти и городского газа, представляются числами кратными 25 (50, 75... 200 и т. д.), и если для диаметров условно принять 25 *мм* за единицу, то формула Weymouth'а примет следующий вид:

$$Q_s = 5\,840 \sqrt{\frac{d^{5\frac{1}{3}}(P_1^2 - P_2^2)}{LST_1}} \; м^3/сутки, \qquad (2)$$

где значения букв будут выражаться в метрических мерах за исключением диаметров, которые будут определены единицами размером в 25,4 *мм*.

Для температуры газа в 15°С (абсолютная температура 288° и удельный вес газа равен единице):

$$Q_s = 343 \sqrt{\frac{d^{5\frac{1}{3}}(P_1^2 - P_2^2)}{L}}. \qquad (3)$$

При диаметре $d = 1$ (диаметр 25 *мм*) и длине труб в 1 *км*:

$$Q_s = 343 \sqrt{P_1^2 - P_2^2}, \qquad (4)$$

где Q_s — поток газа в *м³/сутки*.

В табл. 96 приводится сравнение пропускной способности газопроводов разных диаметров, вычисленных с применением различных формул, но в предположении, что величина, получаемая по формуле Weymouth'а, принимается во всех случаях за единицу. Сравниваемые данные по калифорнийской формуле представляют собой средние величины. Максимальные величины превышают приблизительно на 6% средние, а минимальные — на 6% ниже их.

Таблица 96

Сравнение формул для трубопроводов

Формула	Номинальный диаметр в дм.									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	22
Spitzglass	0,91	1,01	1,04	1,04	1,04	1,03	1,01	0,99	0,97	0,93
Cox	1,05	1,01	0,88	0,84	0,80	0,79	0,77	0,75	0,74	0,71
Oliphant	1,06	0,97	0,92	0,89	0,87	0,85	0,84	0,83	0,81	0,79
Pittsburgh	1,16	1,11	0,97	0,92	0,88	0,86	0,85	0,83	0,81	0,78
Towl	1,20	1,16	1,01	0,96	0,92	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82
California	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01
Weymouth	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

В табл. 98 приводятся значения Q_s, полученные по уравнению (4) для различных величин давления газа, соответствующих P_1 и P_2.

Для получения значения Q_s по формуле (3) умножают значения, приводимые в табл. 98, на $\sqrt{\frac{d^{5\frac{1}{3}}}{L}}$.

В табл. 100 приводятся множители для различных значений d и L.

Для вычисления величин Q_s по уравнению (2) умножают величину Q_s, полученную из уравнения (3), на $\frac{17}{\sqrt{ST}}$. Множители для различных величин S и T_1

Таблица 97

Эквивалентные длины труб, которые надо добавлять к полученным величинам для учета трения в поворотных коленах и тройниках

Диаметр трубопровода в дм.	Добавочная длина в *м*	Диаметр трубопровода в дм.	Добавочная длина в *м*
1	0,5	6	8,2
$1^1/_4$	0,6	7	8,9
$2^1/_2$	0,8	8	10,8
2	1,4	10	14,2
$2^1/_2$	2,0	12	17,9
3	2,7	15	23,4
$3^1/_2$	3,3	18	29,0
4	4,1	20	32,9
5	5,7	24	40,5

приводятся в табл. 101. В табл. 102 приводятся внутренние диаметры и значения $d^{5\frac{1}{3}}$, соответствующие диаметрам. Таким образом, если известны диаметр, начальное и конечное давления, длина линии, удельный вес и температура движущегося газа, то пропускную способность линии получают, беря соответствующие величины из табл. 98, 100 и 101.

Пример. В точке A газопровода диаметром в 8″ давление по манометру составляет 23,8 *ат*, а в точке B, находящейся от первой на 80 *км*, оно составляет 3,4 *ат*. Удельный вес газа составляет 0,55, а температура движущегося газа 21° С (70° F). Вычислить пропускную способность участка линии, расположенного между этими двумя точками.

В табл. 98 в соответствии с тем давлением газа в 23,8 *ат* и давлением у конца участка в 3,4 *ат* находим величину 8420 $м^3$.

В табл. 100 находим величину, соответствующую номинальному диаметру трубы в 8″ и длине 80 *км*: она составляет 28,46.

В табл. 101 находим величину, соответствующую удельному весу 0,55 при температуре движущегося газа в 21° С; она составляет 1,35.

В результате перемножения получается $8,42 \cdot 28,46 \cdot 1,35 = 324$ $м^3$/*сутки*, что и является искомым для данного задания.

Этими таблицами можно пользоваться также для определения любой неизвестной величины по уравнению (2), если только известны другие величины.

Пример. Потребление газа в определенной точке A составляет 707,5 тыс. $м^3$/*сутки*. Этот пункт расположен от пункта $Б$, с которого подается газ на расстоянии 45,8 *км*. Начальное давление составляет 20,4 *ат*, а конечное — 6,8 *ат* по манометру. Удельный вес газа — 0,65, средняя температура потока газа составляет 10°С. Определить диаметр, который должна иметь труба, чтобы она могла подавать требуемое количество газа.

В табл. 98 в графах начальных (20,5) и конечных давлений (6,8) найдем по интерполяции величину 6,84.

В табл. 101 найдем величину, соответствующую удельному весу 0,65 и температуре потока газа в 10° С. Эта величина равна 1,26.

Произведение $6,84 \cdot 1,26 = 8,6$ представляет собою пропускную способность линии в 1″, длиною в 1 *км*, удельного веса 0,65 и температуры в 10°С. Чтобы получить заданную пропускную способность (707,5), полученную величину 8,6 нужно умножить на $\frac{707,5}{8,6} = 82,4$. В табл. 101 против 50 *км* (длины, близкой к 48,4) найдем 108 — ближайшую бо́льшую величину, соответствующую диаметру в 12″. Этот диаметр и будет искомым.

Потеря давления в фасонных частях. Потеря давления вследствие трения газа в поворотах, тройниках и задвижках при расчетах обычно компенсируется

Таблица 98

Пропускная способность газопровода диаметром 1" и длиной 1 км при различных давлениях в м³/сутки

Расчет произведен, исходя из следующих данных: атмосферное давление 1 *ата*, удельный вес газа 1, температура газа 15° С

Начальное давление по манометру в кг/см²	Конечное давление по манометру в кг/см²									
	0,5	2,0	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	20,0	25,0	30,0
60	20 913	20 896	20 885	20 786	20 642	20 443	20 189	19 647	18 930	18 021
55	19 196	19 184	19 160	19 064	18 899	18 687	18 412	17 809	17 013	15 998
50	17 490	17 466	17 442	17 328	17 153	16 917	16 611	15 948	15 047	13 892
45	15 768	15 747	15 723	15 593	15 401	15 137	14 793	14 086	13 017	11 655
40	14 046	14 025	13 994	13 857	13 638	13 336	12 948	12 080	10 873	9 203

	Конечное давление по манометру в кг/см²									
	0,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	15,0	20,0	25,0
38	13 367	13 219	13 161	13 096	13 017	12 931	12 835	12 204	11 271	9 971
36	12 681	12 523	12 465	12 393	12 310	12 218	12 115	11 442	10 448	9 028
34	11 995	11 827	11 761	11 689	11 600	11 504	11 398	10 678	9 604	8 036
32	11 309	11 130	11 062	10 983	10 890	10 787	10 633	9 899	8 733	6 970
30	10 623	10 431	10 359	10 273	10 173	10 064	9 940	9 107	7 820	5 790

	Конечное давление по манометру в кг/см²									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
29	10 276	10 266	10 256	10 239	10 221	10 197	10 173	10 146	10 115	10 081
28	9 933	9 923	9 913	9 892	9 875	9 851	9 827	9 800	9 769	9 731
27	9 590	9 580	9 566	9 549	9 529	9 505	9 481	9 450	9 419	9 381
26	9 247	9 237	9 220	9 203	9 182	9 158	9 131	9 100	9 069	9 028
25	8 904	8 891	8 877	8 860	8 839	8 812	8 784	8 750	8 716	8 678

	Конечное давление по манометру в кг/см²									
	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
29	10 046	10 005	9 964	9 916	9 868	9 817	9 762	9 700	9 638	9 573
28	9 693	9 652	9 611	9 599	9 511	9 457	9 398	9 336	9 271	9 203
27	9 343	9 299	9 254	9 203	9 151	9 093	9 035	8 969	8 904	8 832
26	8 990	8 945	8 897	8 846	8 791	8 738	8 668	8 602	8 530	8 458
25	8 637	8 589	8 541	8 486	8 428	8 366	8 301	8 232	8 160	8 081

Начальное давление по манометру в *кг/см²*	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0
29	9 505	9 433	9 354	9 275	9 189	9 100	9 007	8 911	8 812	8 705
28	9 131	9 055	8 976	8 891	8 805	8 712	8 616	8 513	8 400	8 297
27	8 757	8 678	8 596	8 506	8 414	8 318	8 215	8 109	7 999	7 882
26	8 379	8 297	8 208	8 115	8 019	7 920	7 814	7 700	7 584	7 460
25	7 999	7 913	7 820	7 724	7 621	7 515	7 402	7 285	7 162	7 028

	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	15,5	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5	19,0	19,5	20,0
29	8 592	8 479	8 359	8 232	8 102	7 964	7 820	7 669	7 512	7 347
28	8 181	8 057	7 934	7 800	7 659	7 515	7 364	7 203	7 035	6 860
27	7 759	7 632	7 498	7 357	7 210	7 056	6 891	6 723	6 541	6 352
26	7 330	7 196	7 052	6 901	6 747	6 579	6 407	6 222	6 027	5 821
25	6 891	6 747	6 596	6 435	6 267	6 088	5 900	5 697	5 464	5 258

	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	20,5	21,0	21,5	22,0	22,5	23,0	23,5	24,0	24,5	25,0
29	7 176	6 997	6 805	6 606	6 397	6 174	5 937	5 687	5 423	5 135
28	6 675	6 479	6 277	6 057	5 828	5 584	5 323	5 042	4 737	4 408
27	6 163	5 941	5 718	5 478	5 220	4 946	4 648	4 325	3 965	3 547
26	5 601	5 368	5 118	4 850	4 558	4 243	3 893	3 499	3 042	2 497
25	5 015	4 754	4 469	4 157	3 814	3 430	2 984	2 449	1 739	—

	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
24	8 561	8 548	8 534	8 513	8 489	8 465	8 434	8 400	8 366	8 325
23	8 215	8 205	8 187	8 167	8 143	8 115	8 085	8 050	8 012	7 971
22	7 872	7 858	7 841	7 820	7 796	7 769	7 738	7 700	7 659	7 615
21	7 529	7 515	7 498	7 474	7 450	7 419	7 388	7 347	7 306	7 261
20	7 186	7 16[illegible]	7 152	7 128	7 104	7 073	7 035	6 997	6 953	6 901

Начальное давление по манометру в *кг/см²*	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
24	8 280	8 232	8 181	8 126	8 064	7 999	7 930	7 858	7 783	7 700
23	7 923	7 875	7 820	7 762	7 697	7 632	7 560	7 484	7 402	7 316
22	7 567	7 515	7 457	7 395	7 330	7 261	7 182	7 104	7 018	6 929
21	7 206	7 155	7 093	7 028	6 959	6 884	6 805	6 723	6 630	6 534
20	6 850	6 791	6 726	6 661	6 586	6 507	6 424	6 335	6 236	6 136
	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0
24	7 611	7 552	7 423	7 323	7 217	7 104	6 983	6 860	6 726	6 589
23	7 224	7 128	7 025	6 918	6 805	6 685	6 558	6 428	6 284	6 136
22	6 833	6 730	6 620	6 507	6 387	6 260	6 123	5 982	5 828	5 666
21	6 431	6 325	6 208	6 088	5 958	5 821	5 673	5 519	5 354	5 179
20	6 027	5 910	5 786	5 656	5 519	5 368	5 210	5 042	4 860	4 665
	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	15,5	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5	19,0	19,5	20,0
24	6 442	6 287	6 138	5 951	5 766	5 574	5 368	5 145	4 908	4 651
23	5 978	5 810	5 646	5 443	5 244	5 028	4 799	4 552	4 281	3 986
22	5 495	5 313	5 131	4 912	4 689	4 445	4 185	3 896	3 577	3 217
21	4 991	4 788	4 586	4 339	4 085	3 804	3 495	3 145	2 737	2 250
20	4 456	4 229	3 996	3 711	3 409	3 066	2 675	2 195	1 568	—
	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
19	6 889	6 826	6 805	6 781	6 754	6 723	6 682	6 640	6 596	6 544
18	6 496	6 479	6 459	6 435	6 404	6 370	6 332	6 287	6 236	6 184
17	6 153	6 136	6 112	6 088	6 054	6 020	5 978	5 930	5 879	5 821
16	5 807	5 790	5 769	5 738	5 708	5 666	5 622	5 570	5 519	5 457
15	5 464	5 448	5 419	5 389	5 354	5 313	5 265	5 214	5 155	5 087

Начальное давление по манометру в *кг/см²*	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
19	6 486	6 428	6 359	6 287	6 212	6 126	6 037	5 941	5 838	5 728
18	6 123	6 057	5 989	5 910	5 828	5 738	5 642	5 543	5 430	5 313
17	5 756	5 687	5 611	5 529	5 443	5 347	5 244	5 135	5 015	4 868
16	5 369	5 313	5 234	5 145	5 049	4 946	4 836	4 716	4 586	4 445
15	5 015	4 936	4 847	4 754	4 651	4 538	4 418	4 284	4 140	3 986

	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0
19	5 611	5 488	5 354	5 214	5 063	4 898	4 723	4 538	4 336	4 116
18	5 186	5 052	4 908	4 754	4 586	4 408	4 212	3 999	3 770	3 516
17	4 751	4 603	4 442	4 270	4 085	3 879	3 660	3 413	3 138	2 830
16	4 294	4 130	3 951	3 756	3 543	3 307	3 042	2 744	2 394	1 969
15	3 814	3 629	3 427	3 200	2 946	2 658	2 322	1 911	1 362	—

	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
14	5 121	5 100	5 073	5 042	5 004	4 960	4 908	4 850	4 785	4 716
13	4 775	4 754	4 723	4 689	4 648	4 603	4 548	4 486	4 414	4 339
12	4 428	4 408	4 377	4 339	4 294	4 243	4 185	4 116	4 041	3 955
11	4 085	4 058	4 027	3 986	3 938	3 879	3 818	3 742	3 660	3 564
10	3 739	3 711	3 674	3 629	3 577	3 516	3 444	3 361	3 269	3 162

	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
14	4 637	4 552	4 469	4 349	4 239	4 116	3 982	3 835	3 674	3 499
13	4 253	4 157	4 068	3 941	3 814	3 677	3 526	3 361	3 176	2 970
12	3 862	3 756	3 650	3 516	3 375	3 217	3 042	2 850	2 631	2 377
11	3 461	3 344	3 231	3 066	2 905	2 723	2 514	2 274	1 993	1 646
10	3 042	2 912	2 782	2 590	2 394	2 168	1 904	1 571	1 125	—

Начальное давление по манометру в *кг/см²*	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	0,1	0,2	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	2,2
9	3 409	3 406	3 392	3 372	3 361	3 348	3 320	3 293	3 272	3 248
8	3 063	3 060	3 046	3 025	3 012	2 994	2 967	2 933	2 912	2 885
7	2 717	2 713	2 696	2 675	2 658	2 638	2 607	2 569	2 545	2 514
6	2 370	2 367	2 346	2 322	2 302	2 281	2 243	2 202	2 171	2 137
5	2 024	2 017	1 993	1 962	1 941	1 914	1 869	1 821	1 784	1 742

	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0	4,2	4,5	5,0
9	3 214	3 173	3 145	3 114	3 063	3 008	2 970	2 929	2 864	2 744
8	2 843	2 799	2 765	2 730	2 675	2 610	2 566	2 521	2 442	2 302
7	2 466	2 415	2 377	2 336	2 271	2 195	2 144	2 085	1 998	1 814
6	2 284	2 017	1 972	1 921	1 838	1 749	1 681	1 609	1 485	1 238
5	1 670	1 592	1 533	1 468	1 362	1 235	1 139	1 026	823	—

	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
4	1 674	1 667	1 657	1 646	1 636	1 626	1 612	1 598	1 585	1 571
3	1 321	1 310	1 297	1 286	1 273	1 259	1 242	1 225	1 207	1 187
2	957	943	926	909	892	871	847	823	796	768
1	573	549	521	490	453	412	360	298	216	—

	Конечное давление по манометру в *кг/см²*									
	1,2	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,5	3,8
4	1 540	1 485	1 420	1 372	1 317	1 225	1 115	1 029	748	480
3	1 146	1 070	981	909	823	665	429	—	—	—
2	700	569	370	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 99

Множитель диаметр — длина

Величина $\sqrt{\frac{d^{5}}{L}}$

Длина в км	Действительный внутренний диаметр трубы в дм.											
	2,067	3,068	4,026	6,065	7,981	10,020	12,000	13,250	15,250	17,250	19,250	21,250
1,609	6,93	19,87	42,45	122,70	254,30	466,50	754,50	982,60	1429,50	1974,30	2660,30	3462,60
8,045	3,10	8,89	18,34	54,73	113,70	208,60	337,40	439,50	639,00	1889,00	1190,00	1546,70
16,09	2,19	6,28	12,96	34,45	80,42	147,50	238,60	310,70	452,10	627,90	841,30	1095,00
24,13	1,79	5,13	10,59	31,60	65,66	120,40	194,80	253,70	369,10	512,70	686,90	894,00
32,18	1,55	4,44	9,17	27,37	56,86	104,20	168,70	219,70	319,60	444,00	594,90	774,30
40,22	1,39	3,97	8,20	24,48	50,86	93,29	150,90	196,80	285,90	397,10	532,10	692,50
48,27	1,26	3,63	7,49	22,34	46,43	85,16	137,70	179,40	261,00	362,50	485,70	632,20
	1,17	3,36	6,93	20,73	42,98	78,85	127,50	166,10	241,60	335,60	449,70	585,30
64,36	1,10	3,14	6,49	19,35	40,21	73,75	119,30	155,40	226,00	314,00	420,60	547,50
72,40	1,02	2,93	6,12	18,24	37,91	69,54	112,50	146,50	213,10	296,00	396,60	516,20
80,45	0,98	2,81	5,80	17,31	35,96	65,97	106,70	139,00	202,20	280,80	376,20	489,70
88,49	0,92	2,68	5,53	16,50	34,29	62,90	101,70	132,50	192,80	267,70	358,70	466,90
96,54	0,89	2,57	5,29	15,80	32,83	60,22	97,40	126,90	184,60	256,30	343,40	447,00
104,60	0,85	2,47	5,09	15,18	31,54	57,86	93,58	121,90	177,30	246,30	330,00	429,50
112,60	0,83	2,37	4,90	14,63	30,39	55,75	90,18	117,40	170,90	237,30	318,00	413,90
120,70	0,80	2,30	4,73	14,14	29,36	53,86	87,12	113,50	165,10	229,30	307,20	399,80
128,70	0,77	2,22	4,58	13,68	28,43	51,56	84,35	109,90	159,80	222,00	297,40	387,10
136,80	0,75	2,16	4,45	13,27	27,65	50,60	81,83	106,60	155,10	215,40	288,60	375,60
144,80	0,73	2,10	4,32	13,04	26,81	49,17	79,53	103,60	150,70	209,30	280,40	365,00
152,80	0,71	2,04	4,21	12,59	26,09	47,86	77,41	100,80	146,70	203,70	272,90	355,20
160,90	0,69	1,99	4,10	12,27	25,43	46,65	75,45	98,26	143,00	198,60	266,10	346,30
177,00	0,66	1,89	3,91	11,69	24,24	44,48	71,93	93,69	136,30	189,30	253,70	330,10
193,10	0,63	1,81	3,74	11,17	23,21	42,58	68,87	89,70	130,50	181,30	242,90	316,10
209,20	0,61	1,74	3,59	10,73	22,33	40,91	66,17	86,18	125,40	174,20	233,30	303,70
225,30	0,58	1,68	3,46	10,34	21,49	39,42	63,76	83,05	120,80	167,80	224,80	292,60
241,30	0,57	1,62	3,35	9,99	20,76	38,08	61,60	80,23	116,70	162,10	217,20	282,70
257,40	0,55	1,57	3,24	9,67	20,11	36,88	59,65	77,68	113,00	157,00	210,30	273,70
273,50	0,53	1,52	3,14	9,39	19,50	35,78	57,87	75,36	109,60	152,30	204,00	265,60
289,60	0,52	1,48	3,06	9,12	18,96	34,77	56,28	73,24	106,50	148,00	198,30	258,10
305,70	0,50	1,44	2,97	8,88	18,45	33,84	54,73	71,29	103,60	144,10	193,00	251,20

Таблица 100

Множитель температуры удельного веса

Значение $\sqrt{\frac{288{,}9}{ST_1}}$

Удельный вес	Температура протекающего газа в °С							
	— 1,1	4,4	10,0	15,5	21,1	26,6	32,2	37,6
0,40	1,629	1,612	1,596	1,581	1,566	1,551	1,537	1,523
0,45	1,535	1,520	1,506	1,491	1,476	1,463	1,449	1,436
0,50	1,457	1,442	1,428	1,414	1,401	1,388	1,375	1,363
0,55	1,388	1,375	1,362	1,348	1,336	1,323	1,311	1,299
0,60	1,330	1,317	1,304	1,291	1,279	1,267	1,255	1,244
0,65	1,277	1,265	1,252	1,240	1,228	1,217	1,206	1,195
0,70	1,231	1,219	1,207	1,195	1,184	1,173	1,162	1,152
0,75	1,189	1,178	1,166	1,155	1,144	1,133	1,123	1,113
0,80	1,152	1,140	1,129	1,118	1,107	1,097	1,087	1,077
0,85	1,117	1,106	1,095	1,085	1,074	1,064	1,055	1,045
0,90	1,086	1,075	1,064	1,054	1,044	1,034	1,025	1,016
0,95	1,057	1,046	1,036	1,026	1,016	1,007	0,9976	0,9887
1,00	1,030	1,020	1,010	1,000	0,9905	0,9813	0,9723	0,9636

Таблица 101

Внутренний диаметр труб и значения $d^{5\frac{1}{3}}$

Номинальный диаметр в дм.	Действит. диаметр в дм.	$d^{5\frac{1}{3}}$	Номинальный диаметр в дм.	Действит. диаметр в дм.	$d^{5\frac{1}{3}}$
2 I. D.	2,067	48,06	12 I. D.	12,00	369 682
3 I. D.	3,068	394,8	14 I. D.	13,25	965 555
4 I. D.	4,026	1 681,9	16 I. D.	15,25	2 043 515
6 I. D.	6,065	14 977	18 I. D.	17,25	3 942 723
8 I. D.	7,981	64 710	20 I. D.	19,25	7 077 321
10 I. D.	10,020	217 752	22 I. D.	21,25	11 989 607

прибавлением к длине рассматриваемого трубопровода дополнительных длин. Табл. 97 показывает дополнительные длины, равноценные потерям давления в фасонных частях. Для задвижек указанные величины должны быть увеличены на 50%.

НОМОГРАММЫ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА В ТРУБАХ

Номограммы, даваемые ниже (фиг. 82—87), составлены так, что охватывают большую часть вопросов, связанных с распределением и транспортом газа при высоком давлении. Они построены на основании формул Weymouth'a, причем удельный вес газа принят равным 0,654, и для подачи газа при нормальных условиях, т. е. при температуре в 15° С и под давлением в 1 *ат*. В табл. 102 приводятся поправочные коэфициенты для удельного веса, но ими следует пользоваться только в том случае, когда удельный вес значительно разнится от 0,654.

Таблица 102

Поправочные коэфициенты

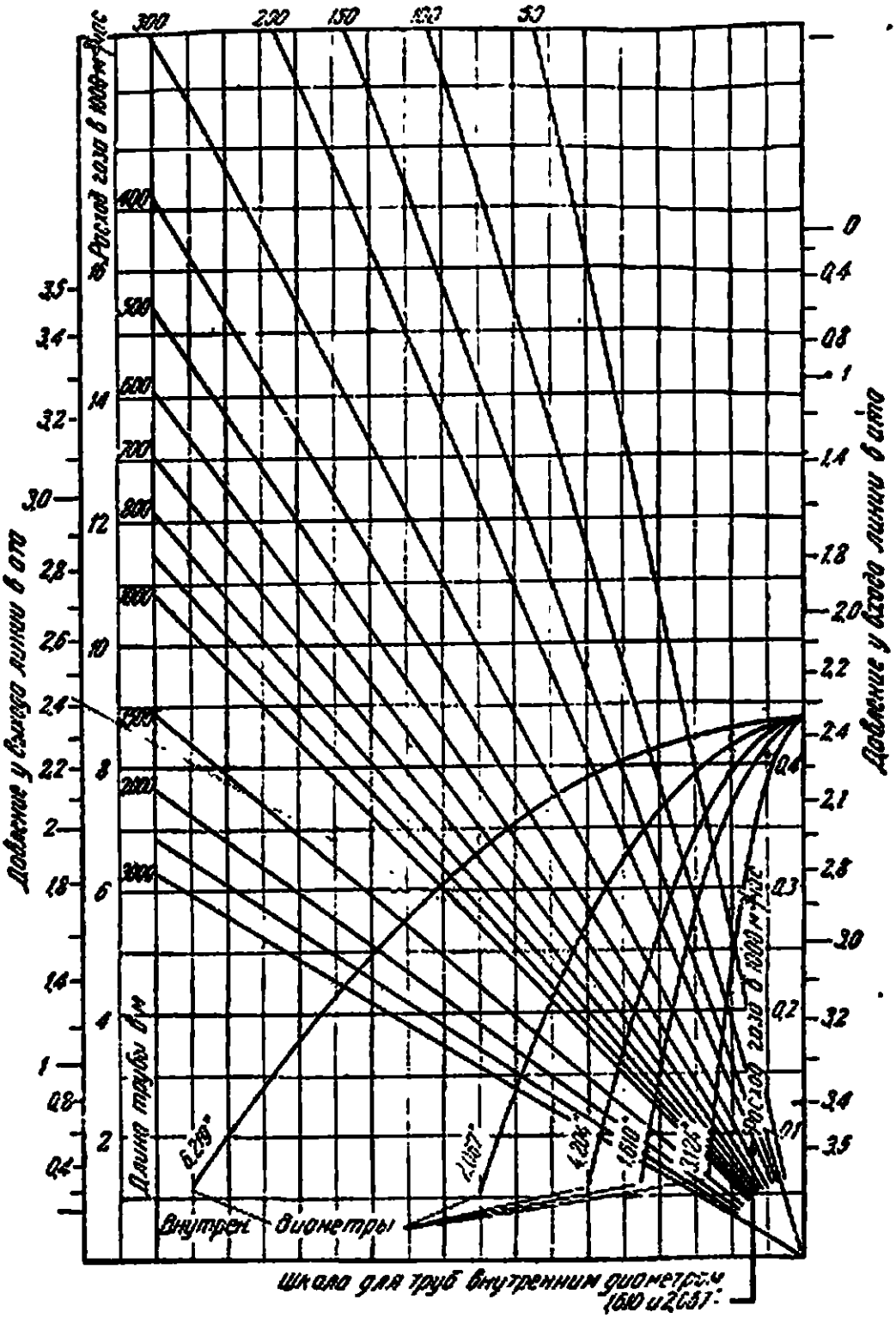
Уд. вес	Поправочный коэфициент	Уд. вес	Поправочный коэфициент
0,74	0,94	0,54	1,10
0,72	0,95	0,52	1,12
0,70	0,97	0,50	1,14
0,68	0,98	0,48	1,17
0,654	1,00	0,46	1,19
0,64	0,01	0,44	1,22
0,62	1,03	0,42	1,25
0,60	1,04	0,40	1,28
0,58	1,06	0,38	1,31
0,56	1,08	0,36	1,35

При вычислении пропускной способности трубопроводов умножают конечный объем, взятый из номограммы, на поправочный коэфициент удельного веса. Если известен объем газа и требуется вычислять начальное или конечное давление или же диаметр трубы, то имеющийся объем умножают на поправочный коэфициент удельного веса и получают эквивалентный объем газа соответственно удельному весу 0,654. Если же приходится пользоваться номограммами в том случае, когда удельный вес газа значительно разнится от 0,654, то вводят поправку по всей шкале пропускной способности, для чего величины номограммы умножают на соответственный поправочный коэфициент; этим путем устраняется необходимость производить каждый раз вычисление удельного веса.

На фиг. 82, 83, 84 и 85 приводятся номограммы, составленные по формуле Weymouth'a. В каждой из них имеется определенный, ограниченный ряд диаметров, длин и давлений, причем ряд величин в одной номограмме покрывает часть величин другой номограммы с таким расчетом, что вся группа номограмм покрывает все ряды величин, относящихся к распределению и транспорту газа. Если в исключительных случаях нет возможности определить какую-нибудь величину по шкале данной номограммы, чтобы получить точный объем пропускной способности, то берут ближайшую величину, которая больше искомой в 10 раз или составляет $\frac{1}{10}$, и умножают или делят найденную таким образом величину пропускной способности на 3,162 (квадратный корень из 10); тогда получают искомую точную величину пропускной способности.

Из приводимых номограмм можно заметить, что для получения точных данных имеется оптимальное положение линии диаметров в отношении к шкале давлений и длин. Поэтому для получения точных данных необходимо иметь достаточное число номограмм с небольшим количеством диаметров в каждой или же одну номограмму с одной линией диаметров и переводить длину всех линий трубопроводов на эквивалентную длину данного диаметра. Это являлось условием для составления номограммы на фиг. 86, которая при правильном пользовании ею дает достаточно точные результаты. Шкалы построены таким образом, что линия диаметров — прямая. Нанесена только одна линия, расположенная наиболее выгодно под углом 45°. По номограмме на фиг. 87 или по табл. 105 можно получить длину 20-дюймовой линии (при внутреннем диаметре в 19,4375″), пропускная способность которой равняется пропускной способности линии данной длины и данного диаметра. Эта эквивалентная длина линии, имеющей внутренний диаметр в 19,4375″, применяется во всех вычислениях по номограмме 86.

На номограмме 86 нанесены две добавочные шкалы: шкала *E* и шкала *D*. В том случае, когда эквивалентная длина не попадает в ряд наиболее удобной для вычисления части шкалы *B*, берут часть длины по шкале *B*, соответствующей 10 действительным эквивалентным длинам, и находят величину пропускной способности на шкале *D* вместо шкалы *C*. Если эквивалентная длина попадает в ряд шкалы *B*, то берут часть шкалы *B*, соответствующей $\frac{1}{10}$ действительной эквивалентной длины, и получают величину пропускной способности на шкале *E*.



Фиг. 82. Поток естественного газа по трубам диаметром от 1.5 до 6″ и длиной от 30 до 1500 *м* (от 100 до 5000 фут.).

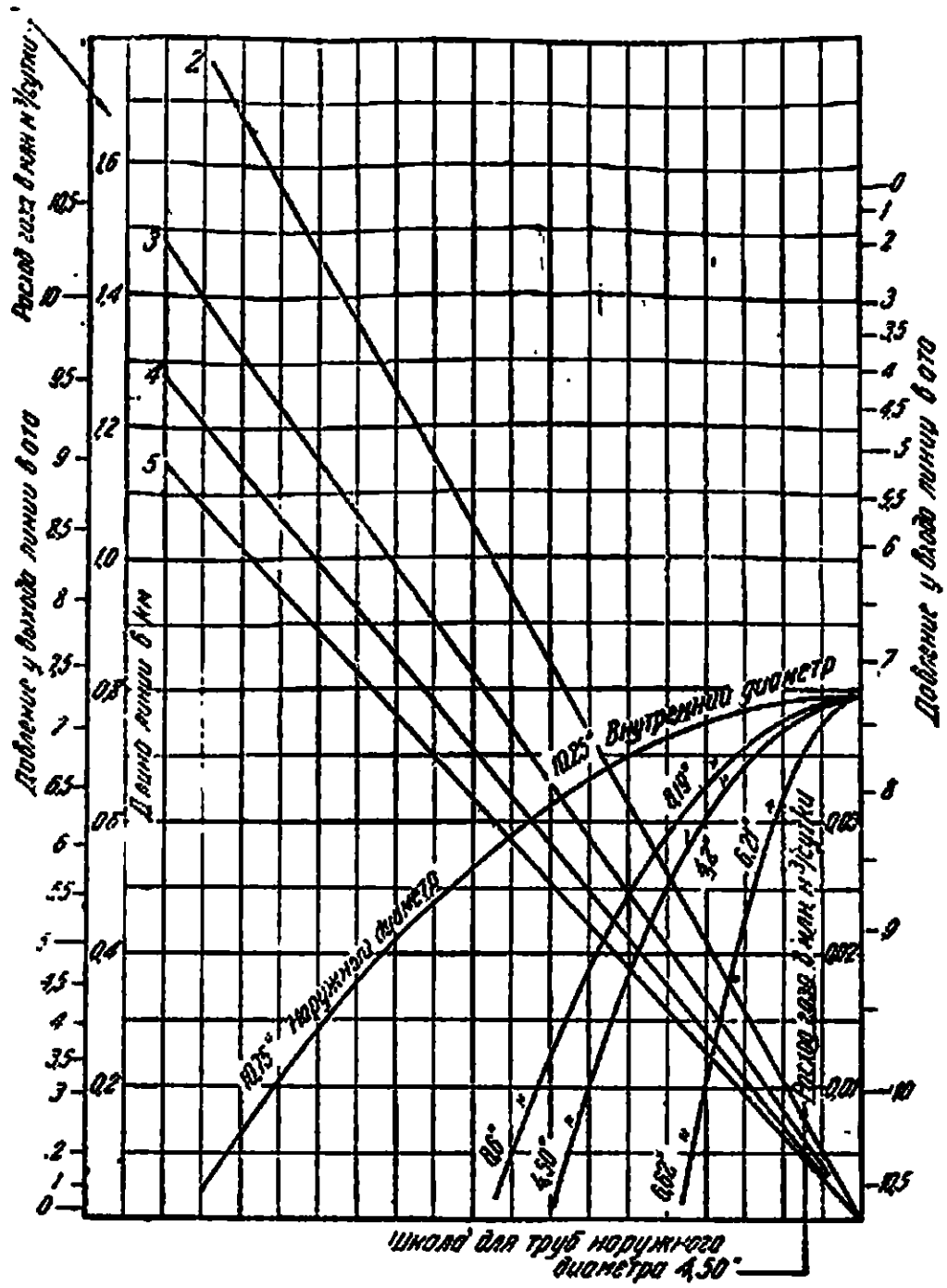
Формула Weymouth'a.

Удельный вес газа 0,654; давление 1 *ата*; температура 15,56°С. температура движущегося потока 15,56°С.

$$Q = \frac{13\,350}{\sqrt{\frac{L}{1\,610}}} D^{\frac{16}{3}} \sqrt{P_1^2 - P_2^2} \quad \text{или} \quad Q^2 L = 313\,600\,000\, D^{\frac{16}{3}} (P_1^2 - P_2^2) = K (P_1^2 - P_2^2).$$

где Q — расход газа в $м^3$/час; D — внутренний диаметр трубы в дм.; L — длина трубы в $м$; P_1 — внутреннее давление в *ата*; P_2 — наружное давление в *ата*;

Внутренний диаметр 1,610″; $K = 4 \cdot 10^6$
" " 2,067″; $K = 14{,}9 \cdot 10^6$
" " 3,124″; $K = 137 \cdot 10^6$
Внутренний диаметр 4,204″; $K = 666 \cdot 10^6$
" " 6,219″; $K = 550 \cdot 10^6$



Фиг. 83. Потоки естественного газа по трубам диаметром от 4 до 10" и длиной от 1,6 до 64 *км*.

Формула Weymouth'a.

Удельный вес газа 0,654; давление 1 *ат*; температура 15,56° С.

$$Q = \frac{425}{\sqrt{L}} D^{\frac{8}{3}} \sqrt{P_1^2 - P_2^2}$$

или

$$Q^2 L = 180\,625\, D^{\frac{16}{3}} (P_1^2 - P_2^2) = K(P_1^2 - P_2^2),$$

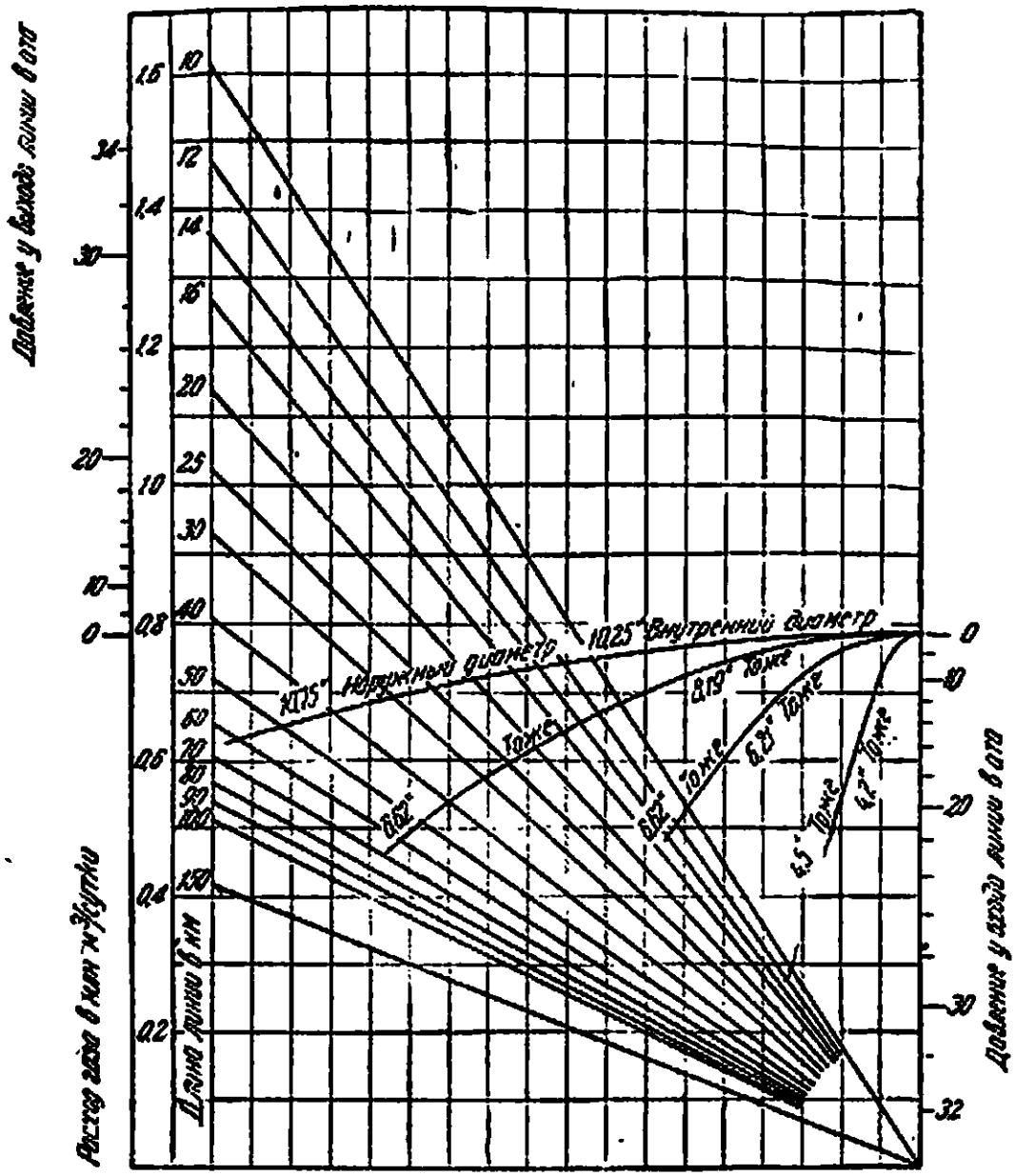
где Q — расход газа в *м³/сутки*; D — внутренний диаметр трубы в дм.; L — длина линии в *км*; P_1 — внутреннее давление в *ата*; P_2 — наружное давление в *ата*;

Внутренний диаметр 4,024"; $K = 3{,}78 \cdot 10^8$. Внутренний диаметр 10,250"; $K = 433 \cdot 10^8$

» » 6,219"; $K = 26 \cdot 10^8$ » » 10,250"; $K = 433 \cdot 10^8$

» » 8,191"; $K = 129 \cdot 10^8$

Для вычисления расхода газа в куб. футах применяют величину $K \cdot 10^9$.



Фиг. 84. Поток естественного газа по трубам диаметром от 4 до 10″ и длиной от 1,5 до 150 *км*.

Формула Weymouth'a.

Удельный вес газа 0,654; давление 1 *ат*; температура 15,56° С.

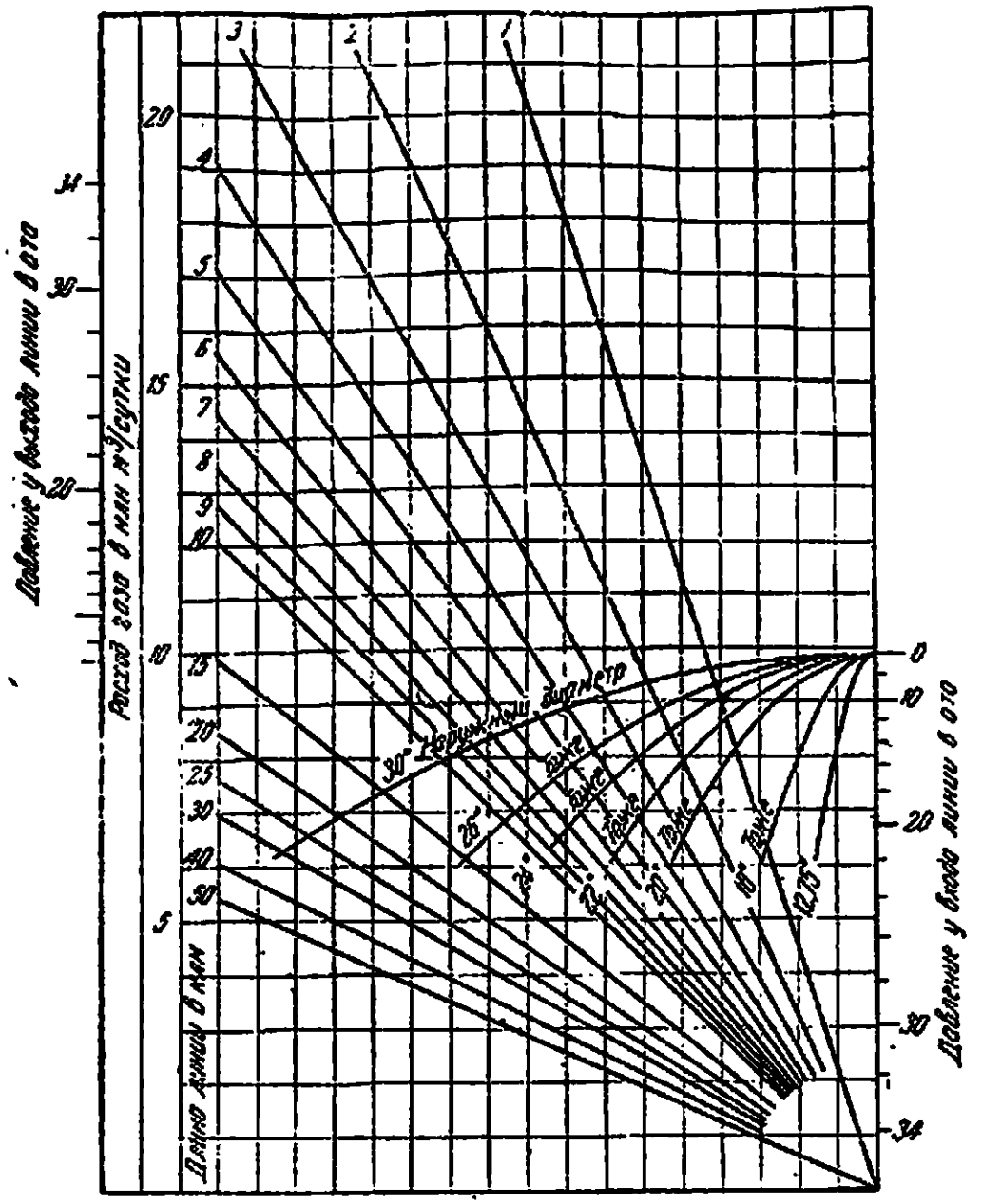
$$Q = \frac{425}{\sqrt{L}} D^{\frac{8}{3}} \sqrt{P_1^2 - P_2^2}$$

или

$$Q^2 L = 180\,625 D^{\frac{16}{3}} (P_1^2 - P_2^2) = K(P_1^2 - P_2^2),$$

где a — расход газа в *м³/сутки*;
D — внутренний диаметр трубы в дм.;
L — длина линии в *км*;
P_1 — внутреннее давление в *ата*;
P_2 — наружное " " "

Внутренний диаметр 4,204″; $K = 3{,}78 \cdot 10^6$
" " 6,219″; $K = 26 \cdot 10^6$
" " 8,191″; $K = 134 \cdot 10^6$
" " 10,250″; $K = 133 \cdot 3 \cdot 10^6$
" " 10,250″; $K = 433 \cdot 10^6$



Фиг. 85. Поток естественного газа по трубам диаметром от 12 до 50″ и длиной от 7,60 до 1700 *км*.

Формула Weymouth'a.

Удельный вес газа 0,654; давление 1 *ат*; температура 15,56° С.

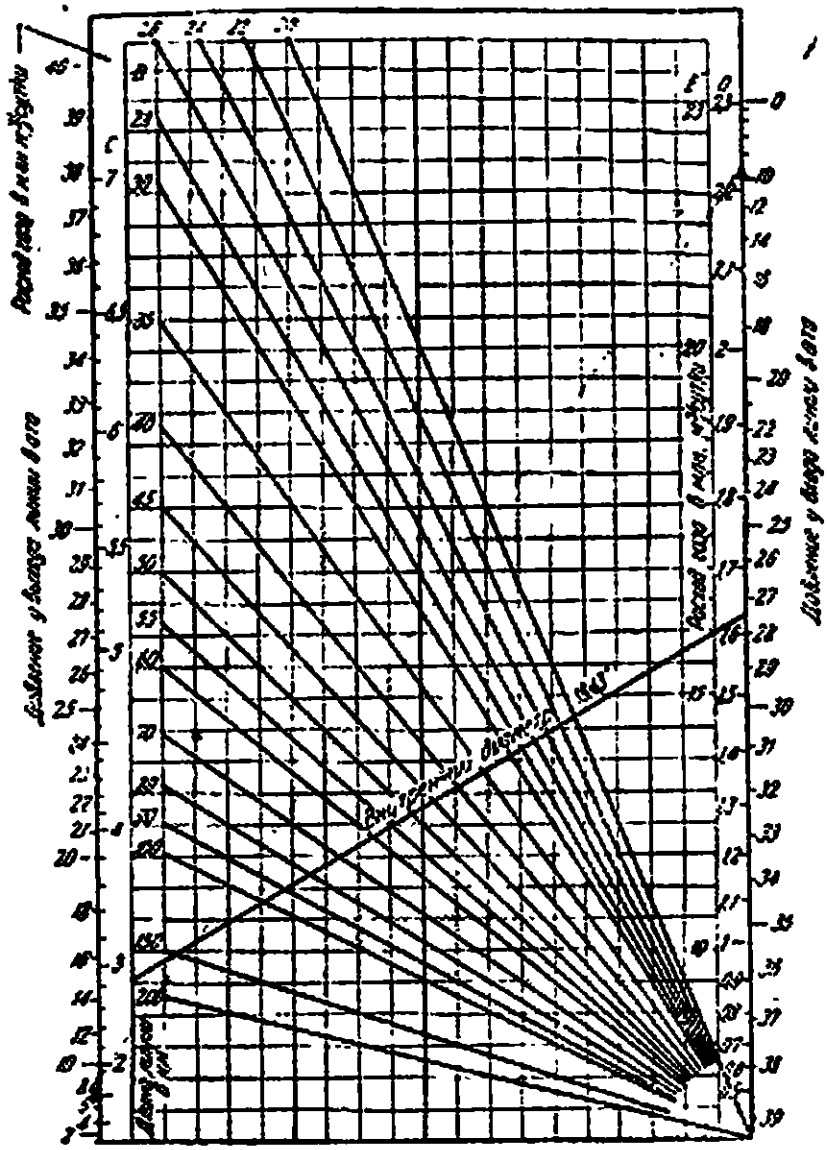
$$Q = \frac{425}{\sqrt{L}} D^{\frac{8}{3}} \sqrt{P_1^2 - P_2^2}$$

или

$$Q^2 L = 180\,625^{\frac{16}{3}} (P_1^2 - P_2^2) = K(P_1^2 - P_2^2),$$

где Q — расход газа в *м³/сутки*;
D — внутренний диаметр трубы в дм.;
L — длина линии в *км*;
P_1 — давление у входа в *ата*;
P_2 — " " выхода " "

Внутренний диаметр 29,125″; $K = 1221 \cdot 10^9$
" " 25,25″; $K = 532 \cdot 10^9$
" " 29,3125″; $K = 352 \cdot 10^9$
" " 21,375″; $K = 228 \cdot 10^9$
" " 19,4375″; $K = 136 \cdot 10^9$
" " 15,50″; $K = 41,4 \cdot 10^9$
" " 12,25″; $K = 24,9 \cdot 10^9$



Фиг. 86. Поток естественного газа по трубам диаметром от 10 до 30" и длиной от 15 до 3000 *км* при эквивалентной 20-дюймовой линии, вычисленной по номограмме 87.

Формула Weymouth'a

Удельный вес газа 0,634; давление 1 *am*; температура 15,56° С (атмосферное давление умножить на 0,07277); $19{,}4375^{\frac{8}{3}} = 2731{,}33$.

$$Q = \frac{425}{L} D^{\frac{8}{3}} \sqrt{P_1^2 - P_2^2} = \frac{1\,160\,000}{\sqrt{L}} \sqrt{P_1^2 - P_2^2}$$

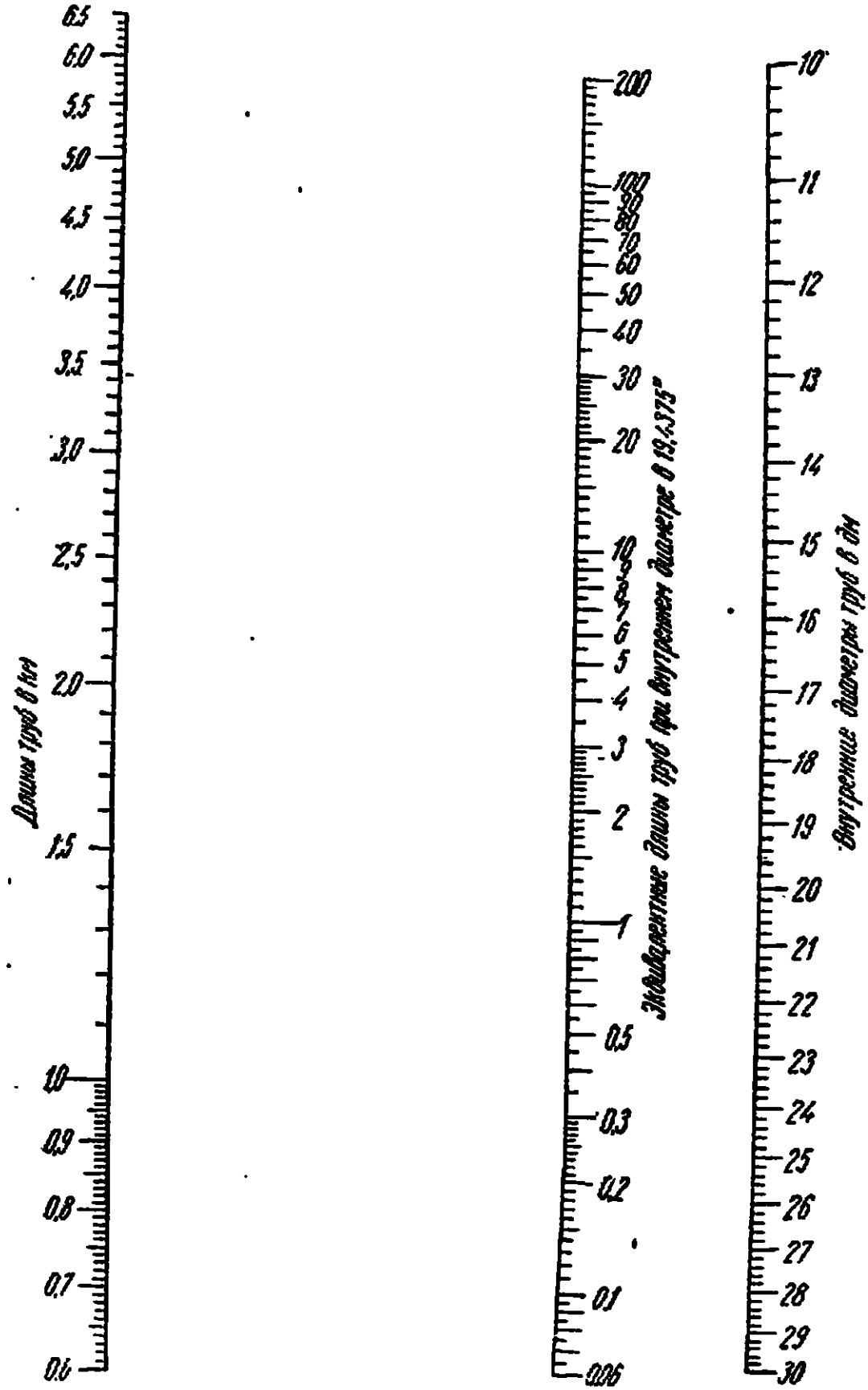
или

$$Q^2 L = 1{,}345 \cdot 10^9 (P_1^2 - P_2^2),$$

где Q — расход газа в *м³/сутки*; D — внутренний диаметр трубы в *дм.*; L — длина линии в *км*; P_1 — давление у входа в *ата*; P_2 — давление у выхода в *ата*.

В шкале E содержатся величины, равные величинам шкалы C, умноженной на $\sqrt{10}$, что соответствует производительности линии, равной $\frac{1}{10}$ линии, приведенных в шкале B.

В шкале D приводятся величины, равные величинам шкалы C, умноженной на $\frac{1}{\sqrt{10}}$, что соответствует производительности линий, равной $\frac{1}{10}$ линии, приведенных в шкале B.



Фиг. 87. Номограмма для вычисления длин линий, имеющих внутренний диаметр в 19,4" и эквивалентных длинам труб с диаметрами от 10 до 30" (внутренними). Эта номограмма применяется вместе с номограммой 86.

Примеры

По фиг. 82

Пример 1. Требуется найти пропускную способность линии длиной 915 *м* (3000 фут.). Внутренний диаметр 2,067″. Давление у входа 3,4 *ат*, у выхода 2,4 *ат*.

Соединяют прямой линией точки на шкалах давления у входа (3,4 *ат*) и давления у выхода (2,4 *ат*), чтобы найти пересечение этой прямой с линией *А — А*. От найденной точки пересечения проводят линию, параллельную оси абсцисс, до кривой диаметров 2,067″. Оттуда проводят перпендикуляр до наклонной 915 *м*; эту точку соединяют горизонтальной линией со шкалой пропускной способности, где получают $Q = 421$.

Пример 2. Требуется найти различные давления у входа и выхода, дающие расход газа в 421 *м³/час*, через трубу длиной 915 *м* и внутренним диаметром 2,067″.

Поступают обратно примеру 1. Начинают у шкалы пропускных способностей и соединяют ее горизонтальной линией с точкой на линии 915 *м*; отсюда проводят вертикаль до пересечения с кривой диаметров 2,067″; отсюда идут по горизонтали до линии *А — А*. Эта точка является центром вращения прямой, один конец которой отмечает давление у входа, а другой — у выхода.

Пример 3. Требуется найти диаметр трубы, которая могла бы передать 421 *м³/час* газа через линию длиной 915 *м* при давлении у входа 3,5 *ат* и у выхода 2,1 *ат*.

Пересекают линию *А — А* прямой, соединяющей точку давления у входа (3,5 *ат*) с точкой давления у выхода (2,1 *ат*). Проводят горизонтальную линию от точки в 421 *м³/час* к шкале с правой стороны, доводя ее до точки в 915 *м*; оттуда проводят вертикальную линию, соединяя ее через точку пересечений первой линии с линией *А — А*, и там находят диаметр, равный 2,067″.

По фиг. 83

Пример 1. Требуется вычислить пропускную способность линии диаметром 6″ и длиной 16,1 *км* при давлении 5,43 *ат* у входа и 1,36 *ат* у выхода.

Соединяют прямой линией точки давлений у входа (5,43 *ат*) и у выхода (1,36 *ат*) и находят точку пересечения с линией *А — А*. От этой точки проводят горизонтальную линию до кривой 6″. Отсюда проводят перпендикуляр к прямой 16,1 *км* и соединяют точку пересечения горизонтальной линией со шкалой пропускной способности. Получают $Q = 84\,600$ *м³*.

Пример 2. Требуется вычислить давление на линии у входа и выхода. Расход газа на линии 84 600 *м³/сутки*; длина линии 16,1 *км*; диаметр линии 6″.

Поступают обратно примеру 1. Начинают со шкалы пропускных способностей и соединяют взятую точку горизонтальной линией с наклонной линией, соответствующей длине 16,1 *км*. Отсюда по вертикали доходят до кривой диаметров 6″. От этой кривой проводят горизонтальную линию к линии *А*. Получаемая точка является центром вращения прямой, концы которой указывают значения давлений у входа и выхода.

Пример 3. Требуется найти диаметр трубы, по которой можно передать 84 600 *м³* газа в сутки. Длина линии 16,1 *км*; давление у входа 5,43 *ат*; давление у выхода 1,36 *ат*.

Пересекают линию *А — А* прямой, соединяющей давление у входа (5,43 *ат*) и выхода (1,36 *ат*). Соединяют горизонтальную точку 84 600 *м³* со шкалой длин в точке 16,1 *км*; из этой точки проводят вертикаль до кривой диаметров 6″ и затем идут по горизонтали до пересечения с линией *А — А*. Сделанное построение показывает, что диаметр 6,22″ удовлетворяет заданию.

По фиг. 84

Пример 1. Требуется вычислить пропускную способность линии диаметром 8″ и длиной 32,2 *км* при давлении у входа 27,2 *ат* и у выхода 3,4 *ат*.

Соединяют шкалы давлений у входа и выхода в точках 27,2 и 3,4 *ат*, пересекая линию *А — А*. Точку пересечения соединяют горизонталью с кривой диаметров 8″; проводят перпендикуляр к линии длин 32,2; соединяют горизонталью с линией пропускной способности и находят $Q = 585\,800$ *м³*.

Пример 2. Требуется найти давление у входа и у выхода линии. Пропускная способность линии 585 800 *м³/сутки*; длина линии 32,2 *км*; диаметр 8″.

Поступают обратно примеру 1. Начинают со шкалы пропускных способностей и соединяют соответствующую точку с линией длин 32,2 *км*. Отсюда проводят вертикаль к кривой 8″ и соединяют горизонталью с линией *А — А*. Эта точка является центром вращения прямой, концы которой указывают значения давлений у входа и выхода.

Пример 3. Требуется найти диаметр линии, пропускающей газ в количестве 585 800 *м³/сутки*. Длина линии 32,2 *км*; давление у входа 27,2 *ат*, у выхода 3,4 *ат*.

Пересекают линию *А—А* линией, соединяющей точки давления у входа (27,2 *ат*) и выхода (3,4 *ат*). Проводят горизонтальную линию от точки 585 800 *м³* к линии длин 32,2 *км*; отсюда проводят вертикаль к линии, соединяющей точку пересечения первой линии с линией *А — А*, и находят диаметр трубы 8,191″.

По фиг. 85

Пример 1. Требуется определить пропускную способность линии длиной 322 *км*. Диаметр линии 24″; давление у входа 27,2 *ат*; давление у выхода 3,4 *ат*.

Соединяют прямой линией шкалу давлений у входа со шкалой давлений у выхода в точках 27,2 и 3,4 *ат*, пересекая, таким образом, линию *А — А*. От точки пересечения проводят горизонтальную линию к кривой 24″ и отсюда — перпендикулярную линию к линии длин 322 *км*. Отсюда проводят горизонтальную линию к линии пропускной способности и находят $Q = 3\,028\,000$ *м³*.

Пример 2. Требуется определить давление у входа и выхода линии, пропускающей 3 028 000 *м³/сутки* газа. Длина линии 322 *км*; диаметр 24″.

Поступают обратно примеру 1. Начинают со шкалы пропускной способности и соединяют ее горизонталью с наклонной линией длин 322 *км*; отсюда проводят вертикаль к кривой диаметров 24″ и соединяют точку пересечения с линией *А—А*. Эта точка является центром вращения прямой, концы которой указывают значения давлений у входа и выхода.

Пример 3. Требуется определить диаметр трубы, через которую проходит 3 028 000 *м³/сутки* газа. Длина трубы 322 *км*; давление у входа 27,2 *ат*; давление у выхода 3,4 *ат*.

Пересекают линию *А—А* прямой, соединяющей давление у входа (27,2 *ат*) с давлением у выхода (3,4 *ат*). Проводят линию от точки 3 028 000 *м³/сутки* по шкале производительности до пересечения с линией, соответствующей 322 *км*; отсюда проводят вертикальную линию до пересечения первой линии с линией *А—А*; точка пересечения дает внутренний диаметр трубы 23,3125″.

По фиг. 86

Пример 1. Требуется определить производительность линии длиной 322 *км*, имеющей внутренний диаметр 23,3″. Давление у входа 27,2 *ат*, давление у выхода 3,4 *ат*.

По номограмме на фиг. 87 (эквивалентные длины) мы имеем, что длина 122,5 *км* при внутреннем диаметре 19,4″ эквивалентна линии длиной 322 *км* при внутреннем диаметре линии в 23,3″. На данной номограмме исходят из длины 122,5 *км*. Соединяют прямой линией точку давления у входа (27,2 *ат*) с точкой давления у выхода (3,4 *ат*). Находят точку пересечения ее с линией *А—А*. Отсюда проводят горизонталь до линии диаметров и вертикальную линию к шкале, соединяющей звездочку в нижнем правом углу с линией длин 122,5 *км* на шкале *В* и горизонтальную линию к шкале *С*; получаем, что производительность линии (расход газа в линии) составляет 3 028 000 *м³/сутки*.

Шкалы *D* и *E* прибавлены для того, чтобы расширить ряд величин на номограмме. Соответствующая величина на шкале *D* составляет для *Q* 956 540 *м³/сутки*, что отвечает производительности линии длиной 1220 *км*, имеющей диаметр 19,4″, или 3220 *км* с внутренним диаметром 23,3″. Соответствующая величина на шкале *E* для *Q* составляет 9 565 400 *м³/сутки*; что дает производительность линии в 12,2 *км* при диаметре 19,4″ или же производительность эквивалентной линии длиной в 32,2 *км* при внутреннем диаметре в 23,3″. Таким образом, на шкале *В* не содержится требуемых величин, и в этом случае размеры можно увеличить или уменьшить в 10 раз, пользуясь шкалами *D* или *E*.

Пример 2. Требуется определить диаметр газопровода с пропускной способностью в 3 028 000 *м³/сутки* при длине 322 *км*; давление у входа 27,2 *ат* и давление у выхода 3,4 *ат*.

Соединяют прямой давление у входа (27,2 *ат*) с давлением у выхода (3,4 *ат*). От точки пересечения на линии *А—А* проводят горизонтальную линию к шкале диаметров; отсюда, пересекая эту линию, проводят горизонталь через точку, соответствующую величине 3 028 000 *м³/сутки* на шкале *С*. Через пересечение этих двух линий проводят линию, идущую от звездочки в правом нижнем углу шкалы *В*, где эквивалентная длина линии, имеющей внутренний диаметр 19,4″, составляет 122 *км*. На номограмме фиг. 87 для получения эквивалентных длин соединяют прямой линией величины в точках 3,22 на линии *А* и 1,22 на шкале *В*. На пересечении линий на шкале *С* находим внутренний диаметр, который составляет 23,3″.

По фиг. 87

Пример 1. Дана длина линии, равная 322 *км*, при внутреннем диаметре 23,3″. Найти эквивалентную длину другой линии, имеющую внутренний диаметр 19,4″.

Проводят прямую линию от точки 3,22 на шкале *А* к точке 23,3″ на шкале *С*, пересекая шкалу *В*, где в месте пересечения находят величину 1,22. Таким образом, эквивалентной длиной будет длина линии в 122 *км* при внутреннем диаметре 19,4″, соответствующей длине 322 *км* с внутренним диаметром 23,3″ или же линии в 122 *км*, имеющей ту же производительность, как и эквивалентная линия в 322 *км*.

Пример 2. Дана линия длиной 322 *км* при внутреннем диаметре 23,3″. Найти линию эквивалентной длины, соответствующей диаметру 29,125″.

Проводят прямую линию на шкале *А* от точки 322 *км* к шкале *С* в точке 23,3″, как это сделано в примере 1. Эта линия пересекает шкалу *В*, и в точке пересечения мы имеем 1,22. Эту точку соединяют прямой линией с величиной 29,125″ на шкале *С* и на пересечении с линией *А* находят искомую величину (10,55 *км*). Таким образом, линия эквивалентной длины имеет 10,55 *км* при внутреннем диаметре в 29,125″; эта линия эквивалентна 32,2 *км* при внутреннем диаметре 23,3″. В том случае, если прямая линия, поворачивающаяся вокруг шкалы *В* и соединяющаяся с диаметрами шкалы *С*, не пересекает шкалу *А*, умножают или делят величины, зачитываемые на шкале *В*, на 10, 100 или 1000 для того, чтобы найти центральную точку, которая дает пересечение с линией *А*. В этом случае те величины, которые зачитываются на шкале *А*, следует делить или умножить (обратно действию, производимому на шкале *В*) на 10, 100 или 1000.

Пример 3. Дана линия длиной 322 *км* при внутреннем диаметре 23,3″. Найти эквивалентную линию, имеющую внутренний диаметр 15,50″.

Проводят линию для пересечения со шкалой *В* через точку, соответствующую величине 1,22, как это делалось выше; доходят до точки 12,2, соединяют прямой линией с точкой, соответствующей 15,50″, и пересекают шкалу *А* в точке 3,66. Деля 3,66 на 10, получают 0,366 *км*, что соответствует длине линии с внутренним диаметром 15,50″, эквивалентной 3,22 *км* с внутренним диаметром 29,3″; иными словами, длина 36,6 *км* первого диаметра соответствует длине 322 *км* второго диаметра при той же производительности.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГАЗОПРОВОДОВ

Приводимые ниже кривые взяты из статьи Kepler'a под заглавием „Факторы, влияющие на минимальные расходы при прокладке газовых линий" („Western Gas", ноябрь 1930, стр. 23).

При сравнении расходов по линиям итоги распределяются по следующим статьям: а) стоимость материала (стали), б) стоимость прокладки линии, в) стоимость компрессоров и компрессорных станций.

Статья стоимости прокладки линии составляется из следующих статей:

1) изыскательские работы; разные налоги; стоимость телефонной связи; строительные работы; производство окраски, чистка и т. п.;

2) складывание труб и перевозка их; укладка вдоль траншеи; сварка или другие виды соединений; сварка отдельных отрезков или целых секций с муфтами в зависимости от веса трубы или секции;

3) копка траншей; окраска и рабочая сила для этой цели; засыпка трубы; необходимое при этом оборудование в зависимости от диаметра трубы.

Таблица 103

Дополнительные длины труб от 1/4 до 6 5/8"

Размеры длинных труб			Эквивалентная длина труб к единице длиной трубы										
внешний диаметр в дм.	толщина стенок в дм.	внутренний диаметр в дм.	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	6"
1/4	0,088	0,364	1,00000	17,414	76,03	282,8	1220,8	2 779,8	10 530	29 602	95 302	464 285	3 741 893
3/8	0,109	0,622	0,05742	1,000	4,366	16,24	70,11	159,6	604,7	1 700	5 472	26 651	214 872
1/2	0,113	0,820	0,013151	0,22902	1,000	3,719	16,06	36,55	138,5	389	1 253	6 106	49 212
1	0,133	1,049	0,035336	0,061583	0,26889	1,000	4,317	9,83	37,23	104,7	337	1 612	13 223
1 1/4	0,140	1,380	0,003819	0,014253	0,06228	0,23162	1,000	2,277	8,625	24,26	78,1	380	3 065
1 1/2	0,145	1,610	0,000896	0,000364	0,02735	0,10173	0,43919	1,000	3,788	10,65	34,28	167	1 346
2	0,154	2,067	0,000095	0,0016537	0,007220	0,026853	0,11594	0,26399	1,000	2,811	9,05	44,1	355
2 1/2	0,183	2,509	0,0000338	0,0005883	0,002569	0,009552	0,041242	0,09390	0,35572	1,000	3,219	15,68	126
3 1/2	0,216	3,124	0,0000105	0,0001827	0,000798	0,002967	0,012811	0,02917	0,11049	0,31061	1,000	4,872	39,26
4 1/2	0,148	4,204	0,0000022	0,0000375	0,0001637	0,000609	0,002629	0,00599	0,02268	0,06376	0,20527	1,000	8,059
6 5/8	0,203	6,219	0,00000027	0,0000046	0,0000203	0,000075	0,0003 27	0,00074	0,00281	0,00791	0,02547	0,1241	1,000

Таблица 104

Эквивалентные длины труб от 4 до 30"

Размеры длинных труб			Эквивалентная длина труб к единице длиной трубы										
внешний диаметр в дм.	толщина в дм.	внутренний диаметр в дм.	4,204"	6,219"	8,191"	10,250"	12,250"	15,500"	19,4375"	21,375"	23,3125"	25,250"	29,125"
4 1/2	0,148	4,204	1,0000	8,509	35,076	115,983	300,096	1 052,70	3 530,60	5 843,88	9 287,75	14 210,08	30 428,97
6 5/8	0,203	6,219	0,1241	1,000	4,352	14,391	37,235	130,616	438,329	725,096	1 151,783	1 763,155	3 775,58
8 5/8	0,217	8,191	0,0285	0,22977	1,000	3,3057	8,5558	30,0127	100,3736	166,6109	264,654	405,133	867,54
10 3/4	0,250	10,250	0,00862	0,06948	0,3024	1,0000	2,5874	9,0762	30,3544	50,3855	80,035	122,518	262,355
12 3/4	0,250	12,250	0,00333	0,02690	0,11697	0,3864	1,0000	3,5078	11,7315	19,4733	30,932	47,361	101,397
16	0,250	15,500	0,000949	0,00765	0,03330	0,11017	0,2850	1,0000	3,3443	5,5513	8,818	13,498	28,905
20	0,28125	19,4375	0,000284	0,00229	0,00996	0,03290	0,0852	0,2990	1,0000	1,6599	2,637	4,036	8,643
22	0,3125	21,375	0,000171	0,00138	0,00600	0,01980	0,0513	0,1801	0,6024	1,0000	1,5884	2,4316	5,207
24	0,34375	23,3125	0,000108	0,000868	0,00377	0,01249	0,03232	0,1134	0,37926	0,62964	1,0000	1,5308	3,278
26	0,375	25,250	0,0000708	0,000567	0,002465	0,00816	0,021118	0 07408	0,24775	0,41125	0,65325	1,0000	2,1418
30	0,4375	29,125	0,0000329	0,000264	0,001152	0,003811	0,009862	0,03459	0,11570	0,19205	0,305 3	0,4670	1,0000

Чтобы вывести расходы по приводимым выше статьям, берут следующие суммы:

1) стоимость прокладки трубы на 1 *км* — 1865 долл. (3000 долл. на милю);

2) стоимость стали принята за 1 *т* 12 долл.;

3) 162 долл. на 1 *км* и на каждый дюйм диаметра трубы (260 долл. на милю).

Стоимость компрессорных станций зависит в значительной степени от необходимой мощности (в *л. с.*) на каждый 1 000 000 *м³/сутки* газа, равно как и от стоимости постройки помещения этих станций. Требуемая мощность для нагнетания 1 000 000 *м³/сутки* газа можно взять из диаграммы 90, где даны разные коэфициенты сжатия. Стоимость постройки станции и оборудования, а также стоимость компрессорного оборудования можно взять из табл. 105. Сумма расходов на компрессорное оборудование для данной установленной мощности, стоимость построек и необходимого имущества и составляют всю стоимость компрессорных станций.

Таблица 105

Стоимость постройки и оборудования компрессорных станций

Производительность линий в млн. *м³/сутки*	Стоимость построек и добавочного оборудования	Стоимость компрессорного оборудования на установленную *л. с.*
	в долларах	
1,4	75 000	75
2,1	125 000	75
2,8	170 000	75
3,5	215 000	75
4,2	265 000	70
5,0	325 000	70
5,7	385 000	70
6,4	440 000	70
7,1	500 000	60
8,2	560 000	60
8,5	615 000	60

Пояснение диаграмм 88—97

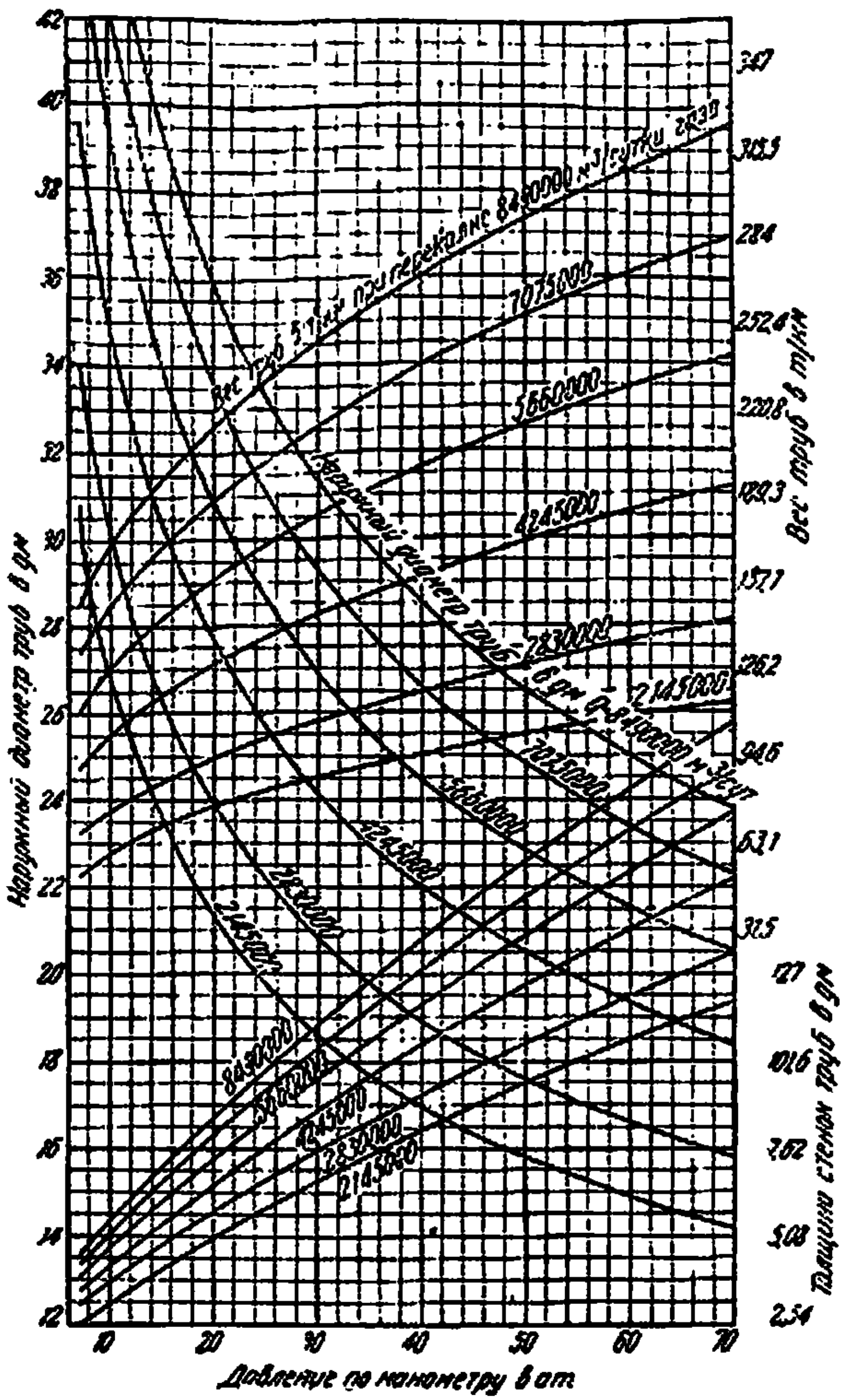
Диаграмма — фиг. 88. На кривых этой диаграммы даны веса стали на 1 *км* линии, а также диаметр и толщины стенок трубки. Кривые построены в расчете на определенную производительность линии при разных давлениях от 14 до 70 *ат* (от 200 до 1000 фун/кв. дм). Если длина трубы превышает 160 *км*, то расчет производительности или расхода газа производится по следующему уравнению

$$Q = \frac{Q160\sqrt{160}}{\sqrt{L}}.$$

Диаграмма — фиг. 89. Кривые дают расход стали в тоннах на 1 *км* для таких труб, которые можно применять при прокладке линий определенной производительности и разных диаметров и при разной толщине стенок трубы (толстая стенка трубы и небольшой диаметр или же тонкая стенка трубы и большой диаметр). Кривые показывают преимущество тонкостенных труб в смысле экономии металла.

Диаграмма — фиг. 90. На этой диаграмме даются мощности компрессоров, необходимые для того, чтобы пропустить 1 000 000 *м³* газа в сутки при разных отношениях давления у входа к давлению у выхода, а также величина $\sqrt{1-\frac{1}{R^2}}$ по формуле Weymouth'a.

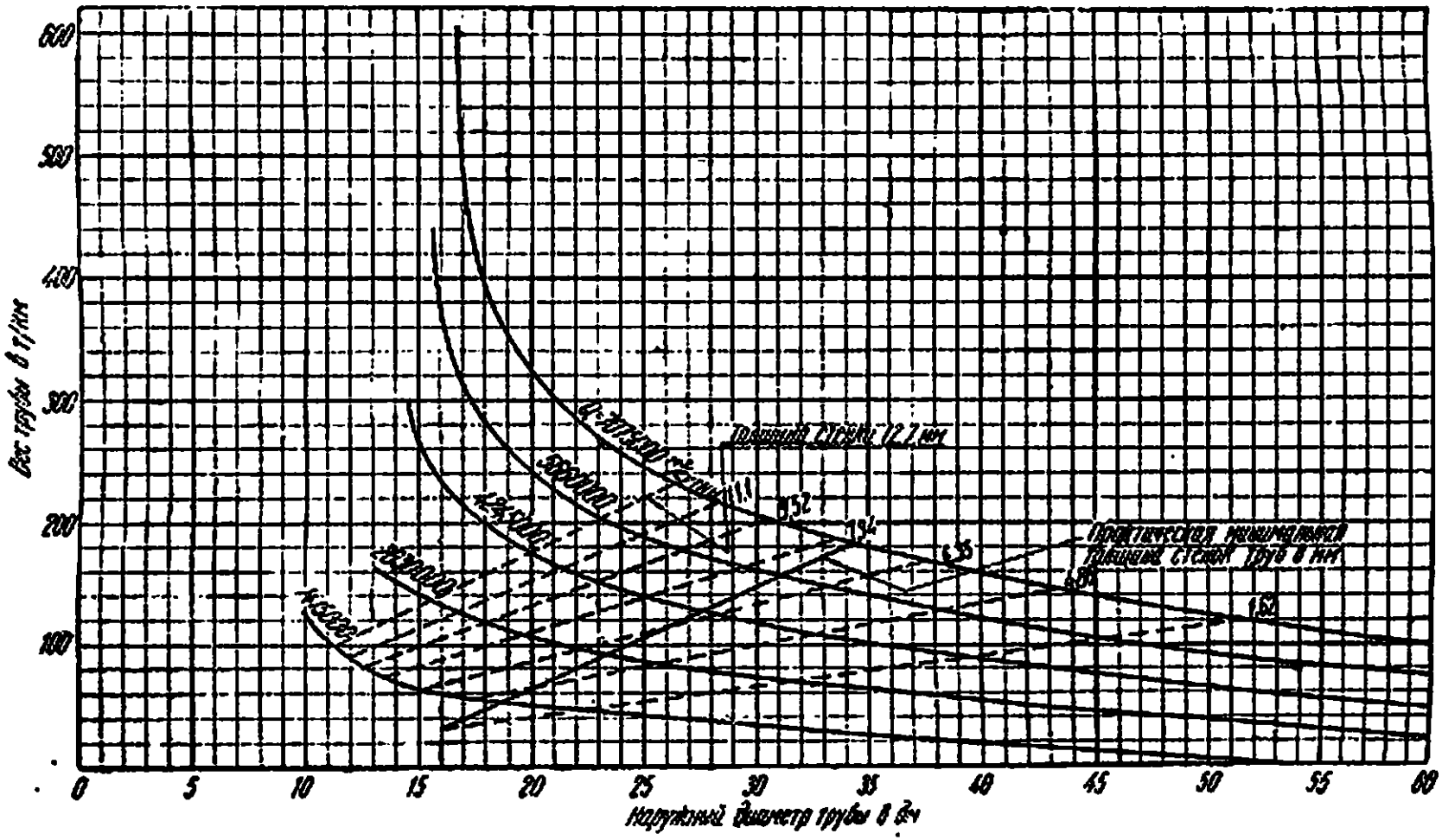
Диаграмма — фиг. 91. На кривые этой диаграммы нанесены отношения абсолютных давлений у входа и выхода при заданных давлениях у выхода, при которых получается минимальный расход стали по весу, считая, что давление газа в скважине известно.



Фиг. 88. Диаметр труб и веса стали для них при перекачке данных количеств природного газа при разных давлениях (по данным Smith Corporation).

$$Q = \frac{\frac{8}{3} P_1 \sqrt{1 - \frac{1}{R^2}}}{\sqrt{L}};$$

$L = 160$ *км* на секцию;
$S = 1000$ *кг/см²*;
$R = 2$.



Фиг. 89. Веса труб (стальных) на 1 *км* длины линии при передаче разных количеств природного газа и при большом ряде диаметров.

$$Q = 445\, D_1^{\frac{8}{3}} \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{L}};$$

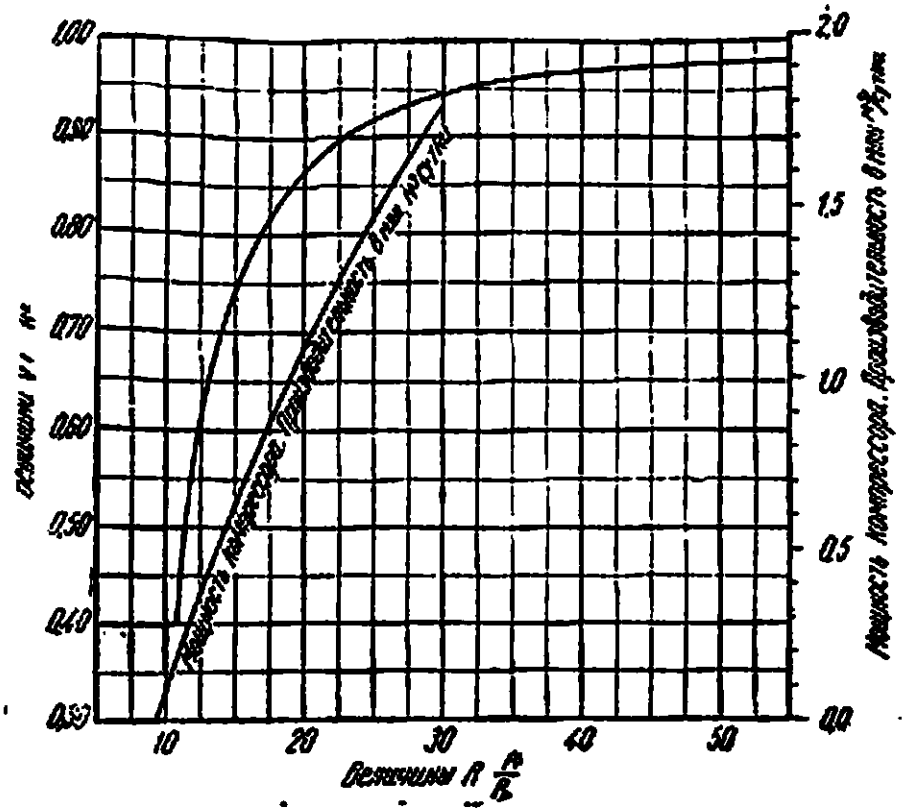
$L = 160$ *км* на секцию;

$R = \frac{P_1}{P_2}$ абс.;

$R = 2$;

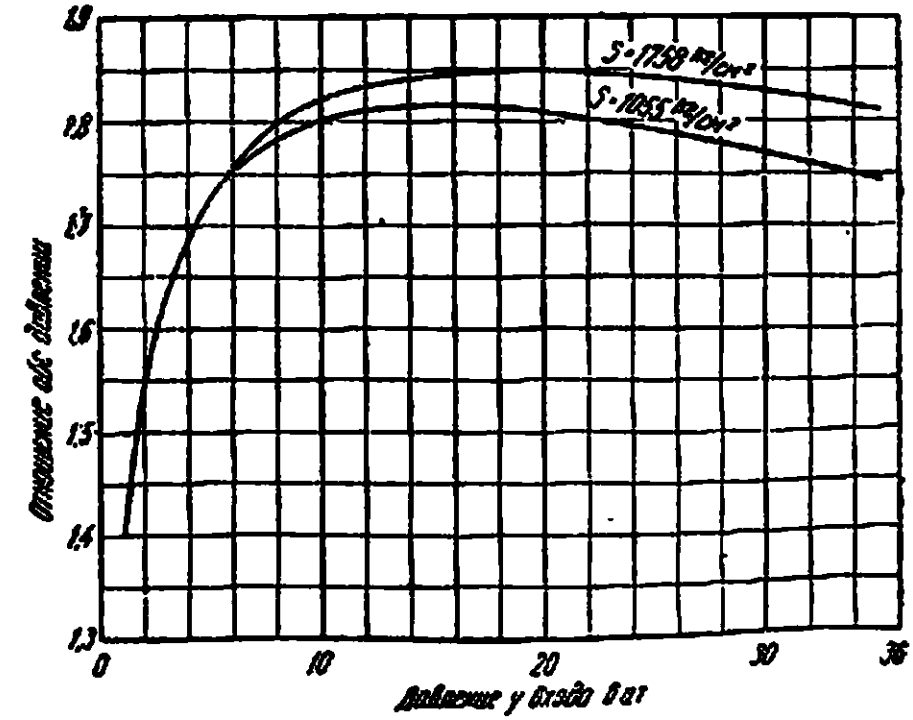
$S = 1000$ *кг/см*^{2};

$P = \frac{2St}{D_0}$.

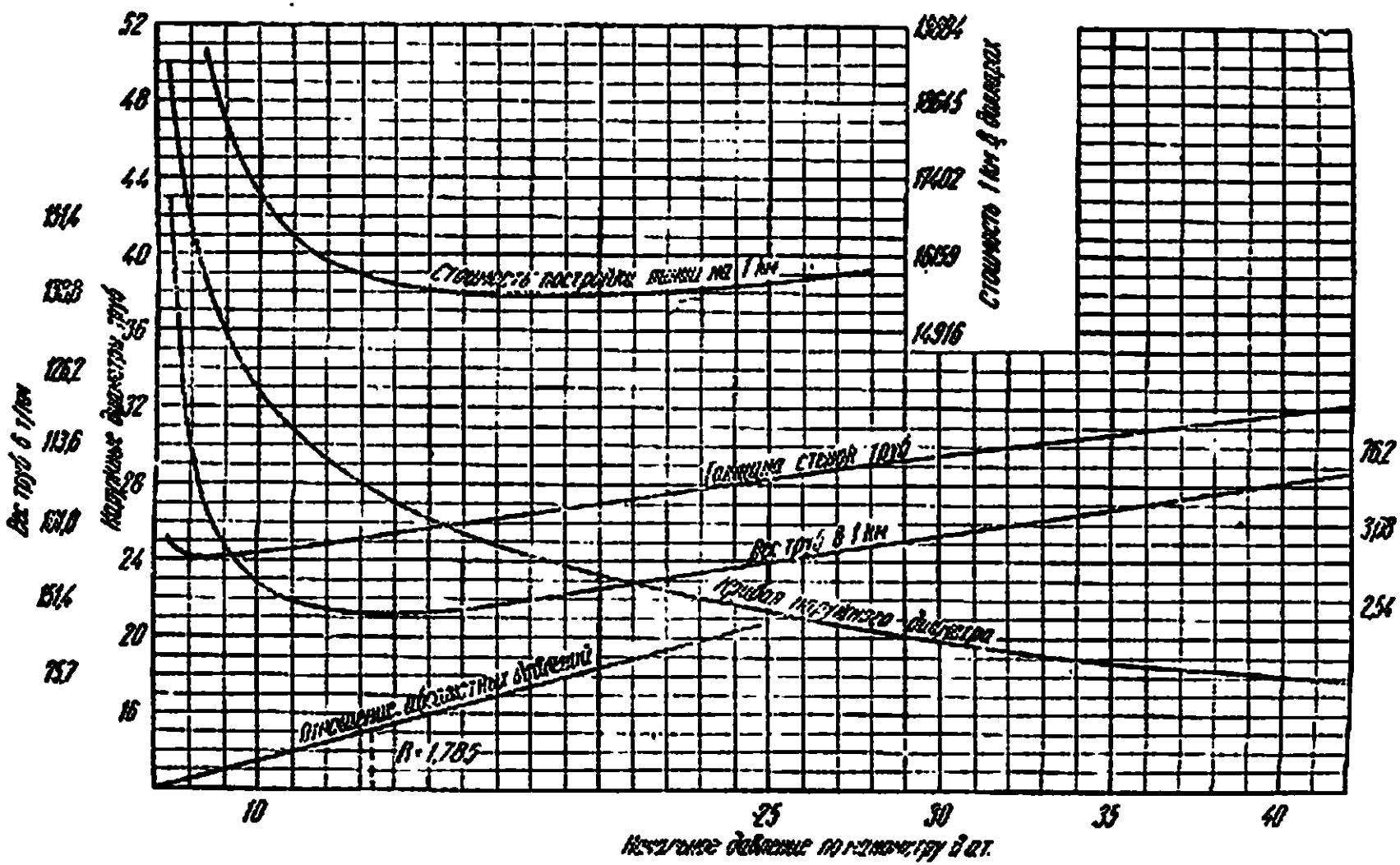


Фиг. 90. Значение $\sqrt{1-\frac{1}{R^2}}$ и величин мощности компрессоров в *л. с.* при разных величинах R и $P_1 : P_2$.

$$Q = \frac{445\, D_1^{\frac{5}{2}}\, P_1 \sqrt{1-\frac{1}{R^2}}}{\sqrt{L}}$$

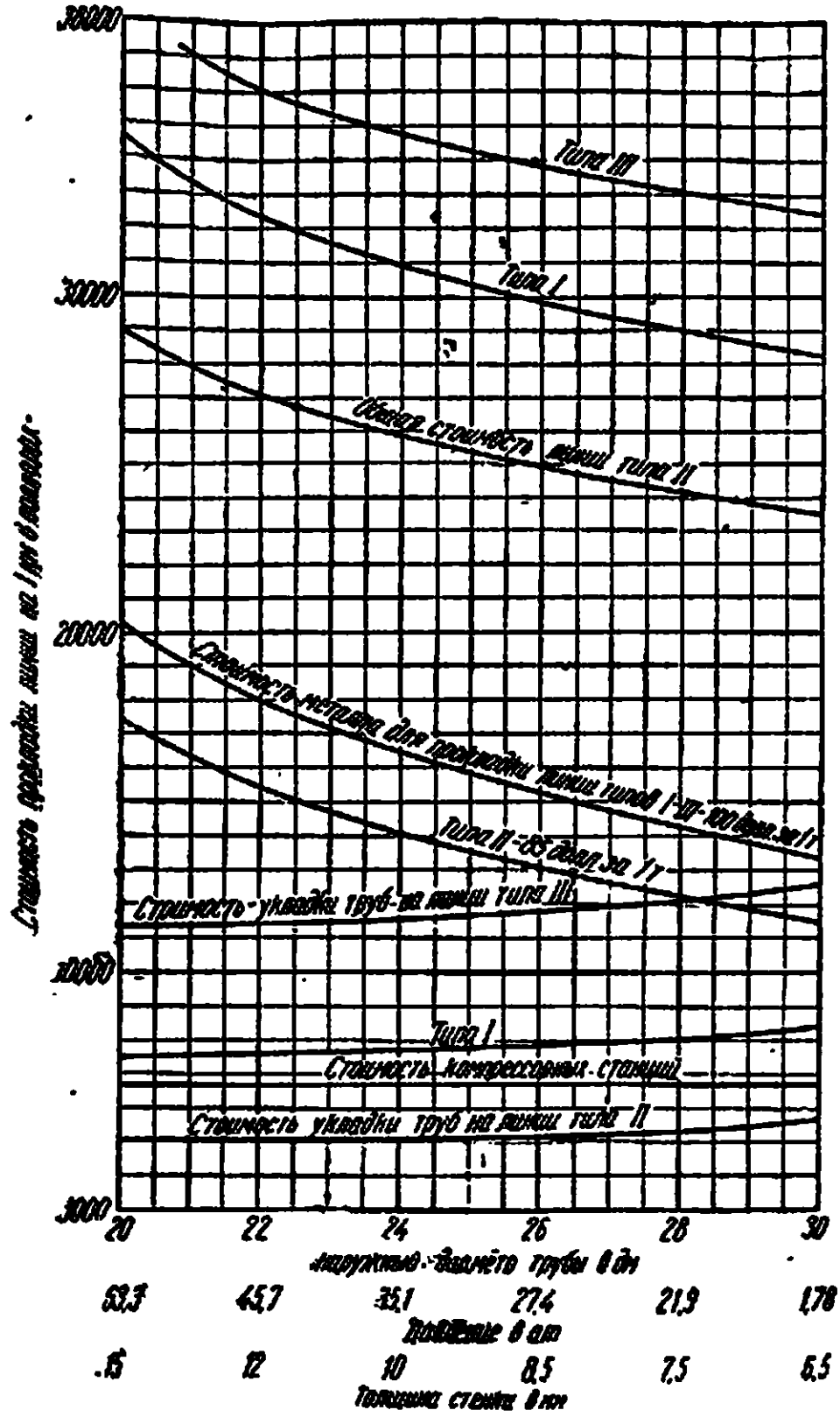


Фиг. 91. Отношение абсолютных давлений у выхода и входа для получения минимального веса стальных труб при данном давлении у выхода.



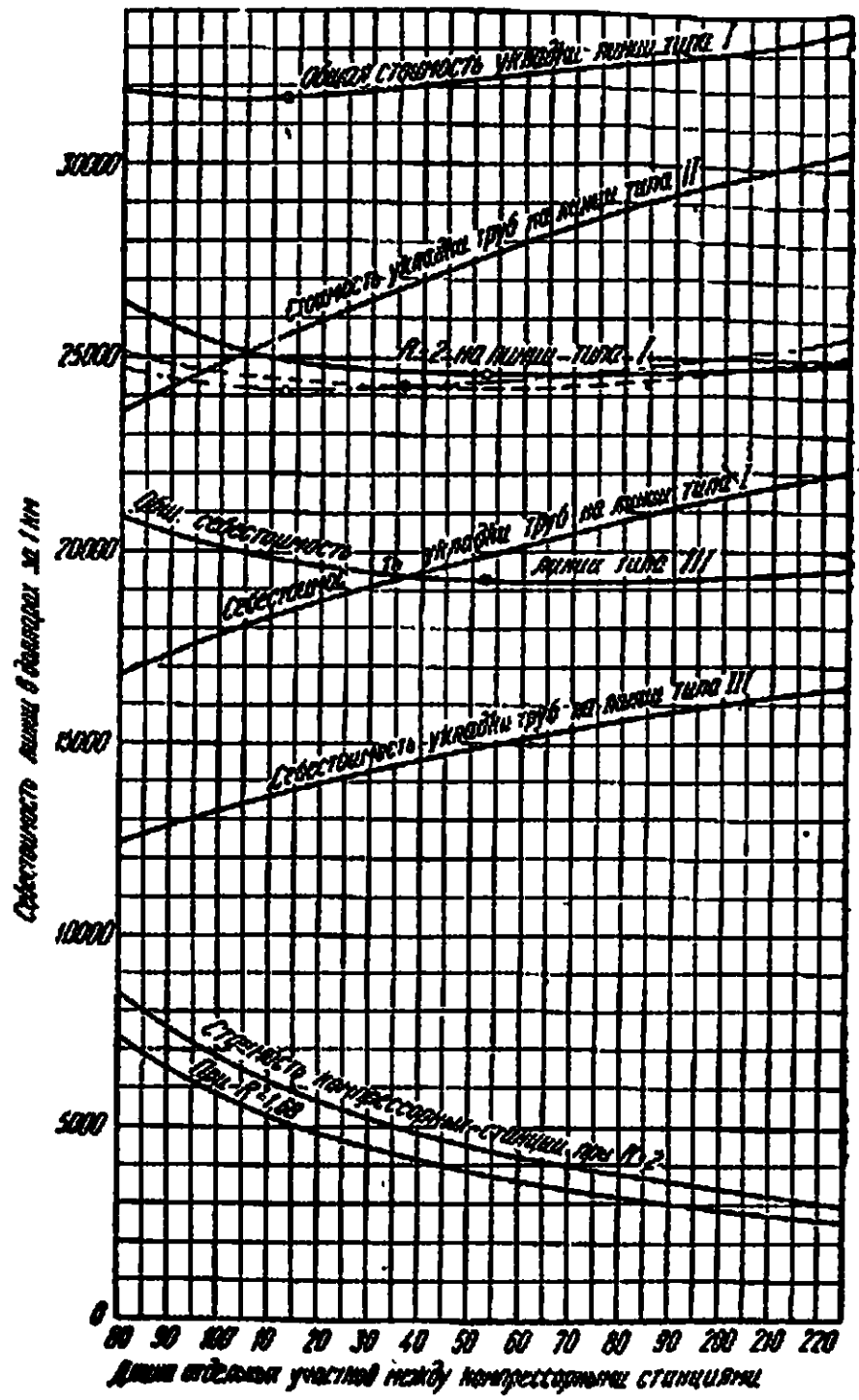
Фиг. 92. Влияние разных давлений у входа в трубопровод на требуемый вес стальных труб при данном давлении у выхода.

$Q = 2\,830\,000$ *м³/сутки*; $L = 160$ *км*; P_2 — давление по манометру — 7,03 *ат*; $S = 1000$ *ат*.



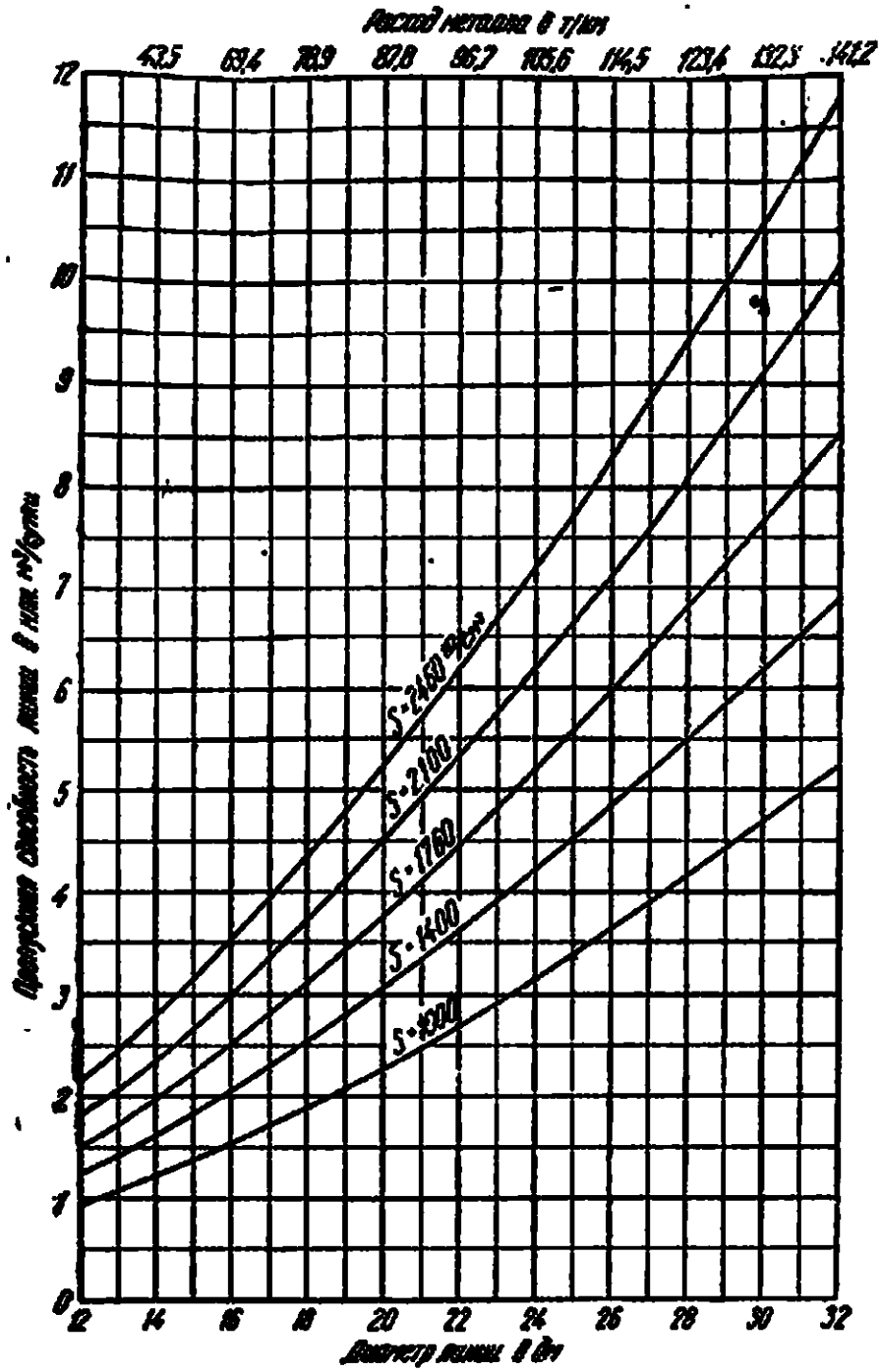
Фиг. 33. Стоимость прокладки 1 *км* линии для перекачки 5 377 000 *м³/сутки* газа при равных диаметрах.

$Q = 5\,377\,000$ *м³/сутки*; $L = 130$ *км*; $S = 1000$ *ат*; $R = 2$.



Фиг. 94. Зависимость длины отдельных участков линии между станциями от себестоимости ее постройки при сопоставлении со стоимостью компрессорного оборудования.

$Q = 4\,245\,000$ *м³/сутки*; $S = 1000$ *ат*; $R = 2$; $t = 6{,}35$ *мм* $\left(\frac{1^{\prime\prime}}{4}\right)$.

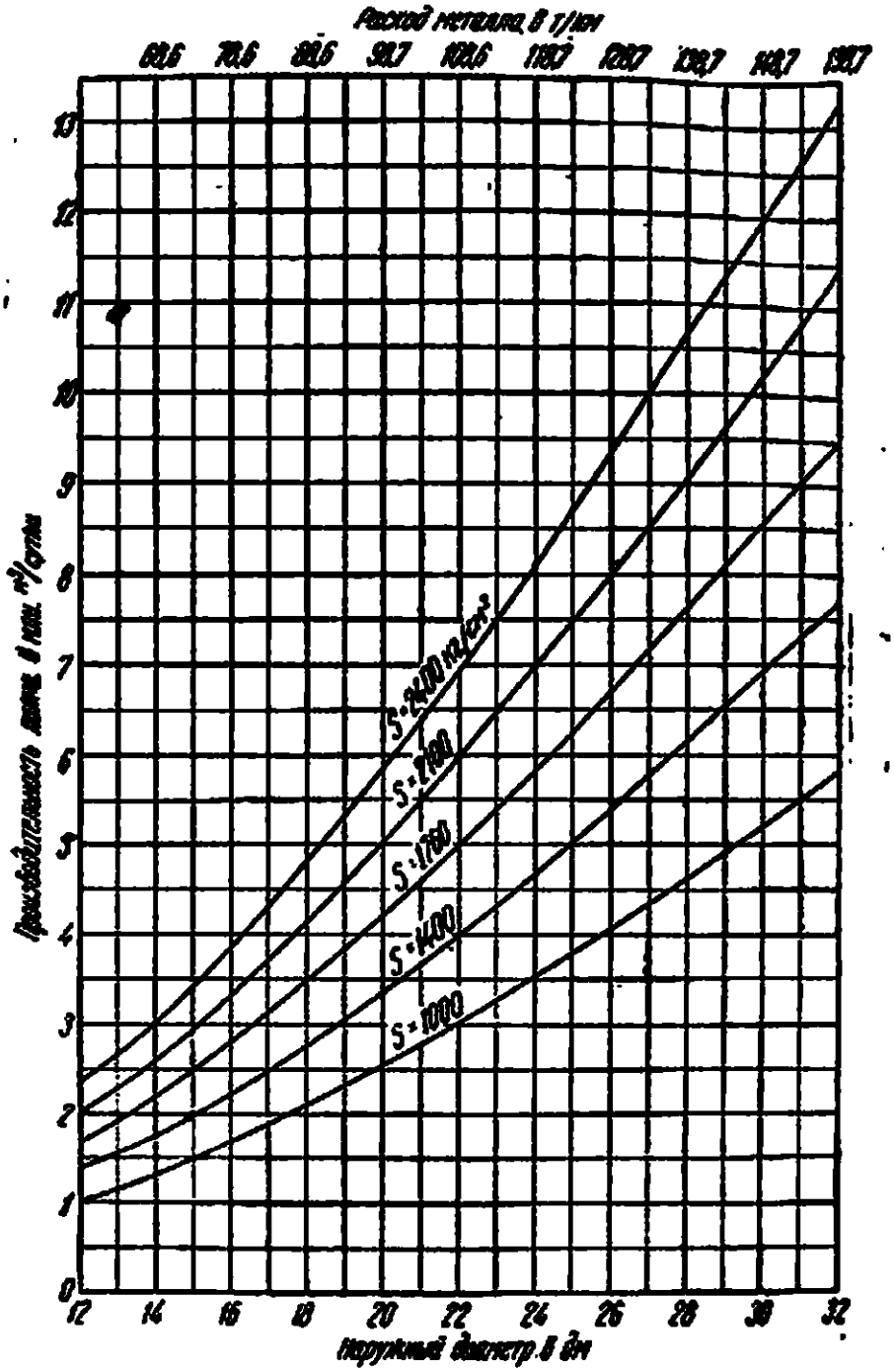


Фиг. 95. Пропускная способность линии диаметром от 12 до 36″ при толщине стенки трубы в 6,35 *мм* $\left(\frac{1}{4}''\right)$ и различных рабочих напряжениях.

$$Q = \frac{445\, D_1^{\frac{8}{3}} \cdot P_1 \sqrt{1 - \frac{1}{R^2}}}{\sqrt{L}},$$

$L = 160$ *км* на секцию; δ — толщина стенки $= 6{,}35$ *мм* $\left(\frac{1}{4}''\right)$; S — напряжение металла труб в *кг/см²*; $R = \frac{P_1}{P_2} = 2$ (при абсолютных P_1 и P_2);

$$Q\sqrt{L} = Q_{160}\sqrt{160}; \qquad P = \frac{0{,}500\, S}{D_0}.$$



Фиг. 96. Производительность линий диаметром от 12 до 32″ при толщине стенки 7,18 *мм* $\left(\frac{9''}{32}\right)$ и разных рабочих напряжениях.

$$Q = \frac{445\, D_1^{\frac{8}{3}}\, P_1 \sqrt{1-\frac{1}{R^2}}}{\sqrt{L}};$$

L = 160 *км* на секцию;

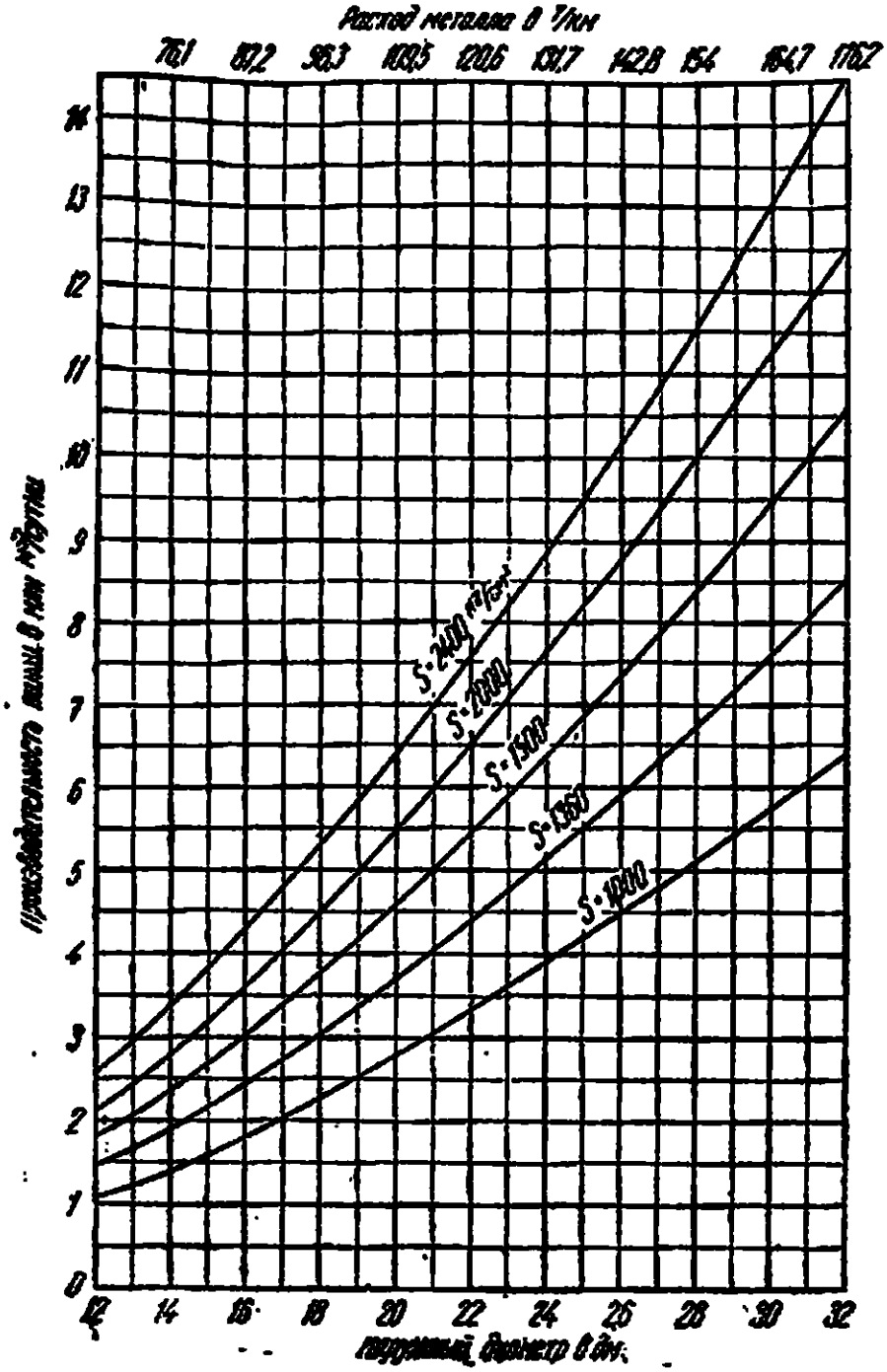
δ — толщина стенки = 7,18 *мм* $\left(\frac{9''}{32}\right)$;

S — напряжение металла труб в *кг/см²*;

$R = \frac{P_1}{P_2} = 2$ (при отношении абсолютных давлений P_1 и P_2);

$Q\sqrt{L} = Q_{160}\sqrt{160}$;

$P = \frac{0{,}562\, S}{D_0}$.



Фиг. 97. Производительность линии диаметром от 12 до 32″ при толщине стенки трубы в 7,94 *мм* $\left(\frac{5''}{16}\right)$ и разных рабочих напряжениях.

$$Q = \frac{445\, D_1^{\frac{8}{3}}\, P_1 \sqrt{1-\frac{1}{R^2}}}{\sqrt{L}};$$

$L = 160$ *км* на секцию;

t — толщина стенки = 7,94 *мм* $\left(\frac{5''}{16}\right)$;

S — напряжение металла труб в *кг/см²*;

$R = \frac{P_1}{P_2} = 2$ (при отношении абсолютных давлений P_1 и P_2);

$Q\sqrt{L} = Q_{160}\sqrt{160}$;

$P = \frac{0{,}625S}{D_0}$.

Диаграмма — фиг. 92. Диаграмма показывает экономию стали при тонкостенных трубах большого диаметра и низком давлении в тех случаях, когда скважина может дать большое начальное давление.

Диаграмма — фиг. 93. На этой диаграмме приводятся сравнительные данные себестоимости прокладки газопроводов для пропуска 5,4 млн. *м³/сутки*: эти данные показывают, что наименьшая себестоимость имеет место в газопроводах большого диаметра (с тонкостенными трубами).

Диаграмма — фиг. 94. На этой диаграмме приводятся данные об изменении длины участков между компрессорными станциями в связи с соображениями о стоимости металла труб и укладки последних по сравнению со стоимостью энергетического оборудования (компрессоров). Чем больше себестоимость металла и укладки труб, тем меньше может быть расстояние между станциями, если желательно получить минимальную себестоимость линии.

Кривые этой диаграммы показывают также, что при одинаковой себестоимости металла и укладки труб минимальная себестоимость всей линии для той же самой величины R составляет от 1,68 до 2 и несколько выше в том случае, если $R = 2{,}5$.

Диаграммы — фиг. 95, 96 и 97. Кривые, полученные Кеплером при различных допускаемых напряжениях в материале труб, начиная с минимального напряжения в 4220 *кг/см²* (60 000 фун/кв. дм). Эти кривые дают количество газа Q, которое могут пропустить тонкостенные трубы при различных допущенных напряжениях.

Если длина линий превышает 160 *км*, то применяют следующую формулу:

$$Q' = \frac{Q160\sqrt{160}}{\sqrt{L}}.$$

Если отношение давлений равно не 2, а другой величине (R_1), то помножают Q на

$$\sqrt{\frac{1-\frac{1}{R_1^2}}{1-\frac{1}{R_1^2}}},$$

где $R_1 = 2$.

2. КОМПРЕССИЯ ГАЗА

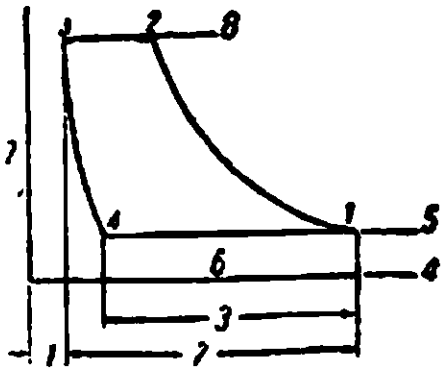
Процесс компрессии или сжатия. Компрессию можно рассматривать как процесс, происходящий под влиянием работы поршня в цилиндре, движущегося на определенное расстояние навстречу установленному постоянному давлению. Это постоянное давление можно рассматривать как воображаемое, представляющее собой среднее из всех давлений, существующих во время хода поршня; оно называется „средним эффективным давлением" (сэд). Таким образом, работа сжатия может быть охарактеризована следующей основной рабочей формулой сжатия:

Работа = сила × расстояние = сэд × площадь поршня × ход поршня,

или:

$$\text{Работа} = W = \text{сэд} \cdot V,$$

где V — ход поршня.



Фиг. 98. Индикаторная диаграмма идеального компрессора.

По рабочей диаграмме, показанной на фиг. 98, можно видеть, как меняется давление с изменением объема при полном цикле движения поршня. Среднее эффективное давление (или сэд) можно определить при помощи этой диаграммы.

Вычисление работы по диаграмме компрессора. Теоретически сжатие газа может быть изотермическое или адиабатическое. При изотермическом сжатии тепло, получающееся при компрессии, удаляется так, что газ сохраняет постоянную температуру в процессе изменения состояния.

Поэтому

$$P_1V_1 = P_2V_2 \text{ (фиг. 98)}.$$

Адиабатическое сжатие предполагает, что в процессе изменения состояния газа не происходит никакого удаления теплоты, так что $P_1V_1^n = P_2V_2^n$, где n — отношение теплоемкостей. В практике происхо-

Вес труб с плоскими концами

Наружный диаметр трубы в дм.	Толщина стенки		Вес трубы			
	в долях дм.	в мм	в кг/м	в т/км	в кг при длине секции в 10 м	в кг при длине секции в 12 м
8	1/40	6,350	33,3	33,28	332,8	398,7
8	9/160	7,137	37,3	37,30	373,0	446,9
8	5/64	7,925	41,3	41,28	412,8	494,7
8	11/160	8,712	45,2	45,24	452,4	542,1
8	3/32	9,525	49,2	49,17	491,7	589,2
10	1/40	6,350	41,7	41,72	417,2	499,9
10	9/160	7,137	46,8	46,80	468,0	560,7
10	5/64	7,925	51,8	51,84	518,4	621,2
10	11/160	8,712	56,8	56,85	568,5	681,3
10	3/32	9,525	61,8	61,88	618,3	740,9
12	1/40	6,350	49,7	49,67	496,7	595,2
12	9/160	7,137	55,7	55,74	557,4	667,9
12	5/64	7,925	61,8	61,77	617,7	740,2
12	11/160	8,712	67,8	67,78	677,8	812,2
12	3/32	9,525	73,7	73,75	737,5	883,8
14	1/40	6,350	54,6	54,63	546,3	654,7
14	9/160	7,137	61,3	61,32	613,2	734,8
14	5/64	7,925	68,0	67,96	679,6	814,6
14	11/160	8,712	74,6	74,61	746,1	894,0
14	3/32	9,525	81,2	81,21	812,1	973,0
16	1/40	6,350	62,6	62,58	625,8	749,9
16	9/160	7,137	70,3	70,26	702,6	841,9
16	5/64	7,925	77,9	77,92	779,2	933,6
16	11/160	8,712	85,5	85,53	855,3	1 025,0
16	3/32	9,525	93,1	93,13	931,2	1 116,0
18	1/40	6,350	70,5	70,53	705,3	845,1
18	9/160	7,137	79,2	79,20	792,0	949,1
18	5/64	7,925	87,8	87,85	878,5	1 053,0
18	11/160	8,712	96,4	96,48	964,8	1 156,0
18	3/32	9,525	105,0	105,04	1 050,4	1 259,0
20	1/40	6,350	78,5	78,48	784,8	940,3
20	9/160	7,137	88,1	88,15	881,5	1 056,0
20	5/64	7,925	97,8	97,78	977,8	1 172,0
20	11/160	8,712	107,4	107,39	1 073,9	1 287,0
20	3/32	9,525	117,0	116,97	1 169,7	1 402,0
22	1/40	6,350	86,4	86,42	864,1	1 036,0
22	9/160	7,137	97,1	97,09	970,9	1 163,0
22	5/64	7,925	107,7	107,73	1 077,3	1 291,7
22	11/160	8,712	118,3	118,31	1 183,1	1 418,0
22	3/32	9,525	128,9	128,89	1 288,9	1 544,0
22	13/160	10,312	139,4	139,43	1 394,3	1 671,0
22	7/80	11,100	149,9	149,93	1 499,3	1 797,0
24	1/40	6,350	94,4	94,37	943,7	1 131,0
24	9/160	7,137	106,0	106,05	1 060,5	1 271,0
24	5/64	7,925	117,7	117,73	1 177,3	1 411,0
24	11/160	8,712	129,2	129,24	1 292,4	1 549,0
24	3/32	9,525	140,8	140,80	1 408,0	1 687,0
24	13/160	10,312	152,3	152,34	1 523,4	1 826,0
24	7/80	11,100	163,8	163,84	1 638,4	1 963,0
26	1/40	6,350	102,3	102,32	1 023,2	1 226,0
26	9/160	7,137	115,0	115,09	1 150,9	1 378,0
26	5/64	7,925	127,6	127,69	1 276,9	1 529,0
26	11/160	8,712	140,0	140,14	1 401,4	1 679,0
26	3/32	9,525	152,7	152,67	1 526,7	1 830,0
26	13/160	10,312	165,2	165,22	1 652,2	1 980,0
26	7/80	11,100	177,7	177,76	1 777,5	2 130,0

дящее в газе изменение лежит между этими двумя теоретическими изменениями.

Рассматривая компрессию теоретически, можно видеть, что газ сжимается от состояния *1* к состоянию *2*, при чем уравнение изменения P с изменением F известно. Дальше газ выходит при постоянном давлении *2*. Некоторое количество его остается между стенками цилиндра и поршнем. Это остающееся количество сжатого газа расширяется от состояния *3* к состоянию давления у присоса *4*, причем уравнение кривой и здесь предполагается известным; при этом всасывающие клапаны открываются, чтобы впустить газ, пока поршень возвращается в положение, показанное на диаграмме 98 под цифрой *1*.

Площади между различными линиями и осью объема можно определить путем вычисления; точно так же можно определить площадь, показанную на диаграмме, и вычислить работу поршня. Часть этих площадей—прямоугольники, другие вычисляются путем интегрирования. Полное распределение площадей при изотермическом и адиабатическом сжатии показывает (см. диаграмму):
при изотермическом сжатии

$$W = P_s V_s \lg_e r,$$

при адиабатическом сжатии

$$W = \frac{n}{n-1} P_s V_s \left(r^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right),$$

где W — работа поршня при полном цикле в *кгм*;
P_s — абсолютное давление газа при входе в $кг/м^2$,
V_s — количество сжимаемого газа в $м^3$, замеряемого при давлении P_s и температуре T_s при входе;
r — отношение давления газа при входе к давлению при выходе (абсолютные давления);
n — отношение теплоемкостей.

Объемная производительность. Нужно отметить, что работа выражается через V_s и что вредные пространства на работу сжатия не влияют. Отношение между V_s и V выражается следующей формулой:

$$\frac{V_s}{V} = \frac{\text{количество нагнетаемого газа при давлении } P_s \text{ и т-ре } T_s \text{ в } м^3}{\text{объем перемещения поршня в } м^3 \text{ при полном цикле}} = E.$$

Величина E представляет собой объемный коэфициент полезного действия (к. п. д.).

Величина этого коэфициента зависит от величины вредного пространства, конструкции клапанов, утечки газа между поршнем и стенками цилиндра и через клапаны и степени подогревания газа у присоса, когда он проходит через клапаны.

Когда газ во вредном пространстве расширяется изотермически, то E выражается следующей формулой:

$$E = k \left\{ 1 - c \left[\left(\frac{r}{k} \right) - 1 \right] - s \right\}.$$

Когда газ расширяется адиабатически, то E выражается следующей формулой:

$$E = k \left\{ 1 - c \left[\left(\frac{r}{k} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] - s \right\},$$

где c — удельный объем вредного пространства, равный

$$\frac{\text{объему вредного пространства}}{\text{объем перемещения поршня при полном цикле}};$$

$k = 1$ — удельная потеря давления входа вследствие потерь через клапаны;
s — удельная утечка (по объему) через поршень и клапаны.

Объемный коэфициент выражается часто в связи с размерами вредного пространства. Для изотермического расширения во вредном пространстве объемный коэфициент:

$$E_v = 1 - c\,(r - 1).$$

Weymouth опытным путем установил, что такие объемные коэфициенты вполне подходят к практическим условиям работы, и нашел, что при сжатии естественного газа $c = 0{,}02$, $k = 0{,}98$ и $s = 0{,}04$. Со времени наблюдений Weymouth'a, происходивших в 1912 г., размеры клапанов значительно увеличились, что повлекло за собой увеличение значения c. Если принять c равным 0,03, то для сжатия естественного газа можно выразить формулу объемного коэфициента следующим образом:

$$E_v = (0{,}97 - 0{,}03\,r).$$

Эта формула вполне согласуется с уравнением Biddison'a.

Объемные коэфициенты при изотермическом и адиабатическом сжатии нанесены на ряд кривых (фиг. 99), где даны значения r.

Надо заметить, что величины вредного пространства разнятся между собой в разных установках, причем различие доходит до 15%. Размеры вредного пространства часто увеличивают для того, чтобы иметь возможность регулирования. Как указывалось выше, вредное пространство влияет на объемную производительность. Однако в определенных пределах можно поддерживать известное давление у выхода без потери в величине производительности, причем среднее эффективное давление при изменении объема вредного пространства понижается. Это достигается путем устройства дополнительных объемов у днищ цилиндра, изоляция которых может быть достигнута клапанами.

Среднее эффективное давление. Деля работу на объем перемещения поршня, получаем следующую формулу:

$$\frac{W}{V} = \frac{WE_v}{V_s}.$$

$$\text{Сэд при изотермическом сжатии} = k\left\{1 - c\left[\left(\frac{r}{k}\right) - 1\right] - s\right\} P_s \lg_e r;$$

$$\text{сэд при адиабатическом сжатии} = k\left\{1 - c\left[\left(\frac{r}{k}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right] - s\right\} \frac{n}{n-1} P_s \left(r^{\frac{n}{10(n-1)}} - 1\right).$$

Если бы объемный коэфициент зависел только от вредного пространства, то среднее эффективное давление при изотермическом сжатии было бы:

$$\text{сэд} = [1 - c\,(r - 1)]\, P_s \lg r.$$

Weymouth на основании многочисленных опытов нашел, что при компрессии естественного газа сэд может быть представлено следующим образом:

$$\text{сэд} = P_s \left[1{,}08 + 0{,}5\left(\frac{1}{r}\right)^2\right] \lg_e r.$$

Biddison применяет уравнение, основанное на его собственных опытах. Оно выражается следующим образом:

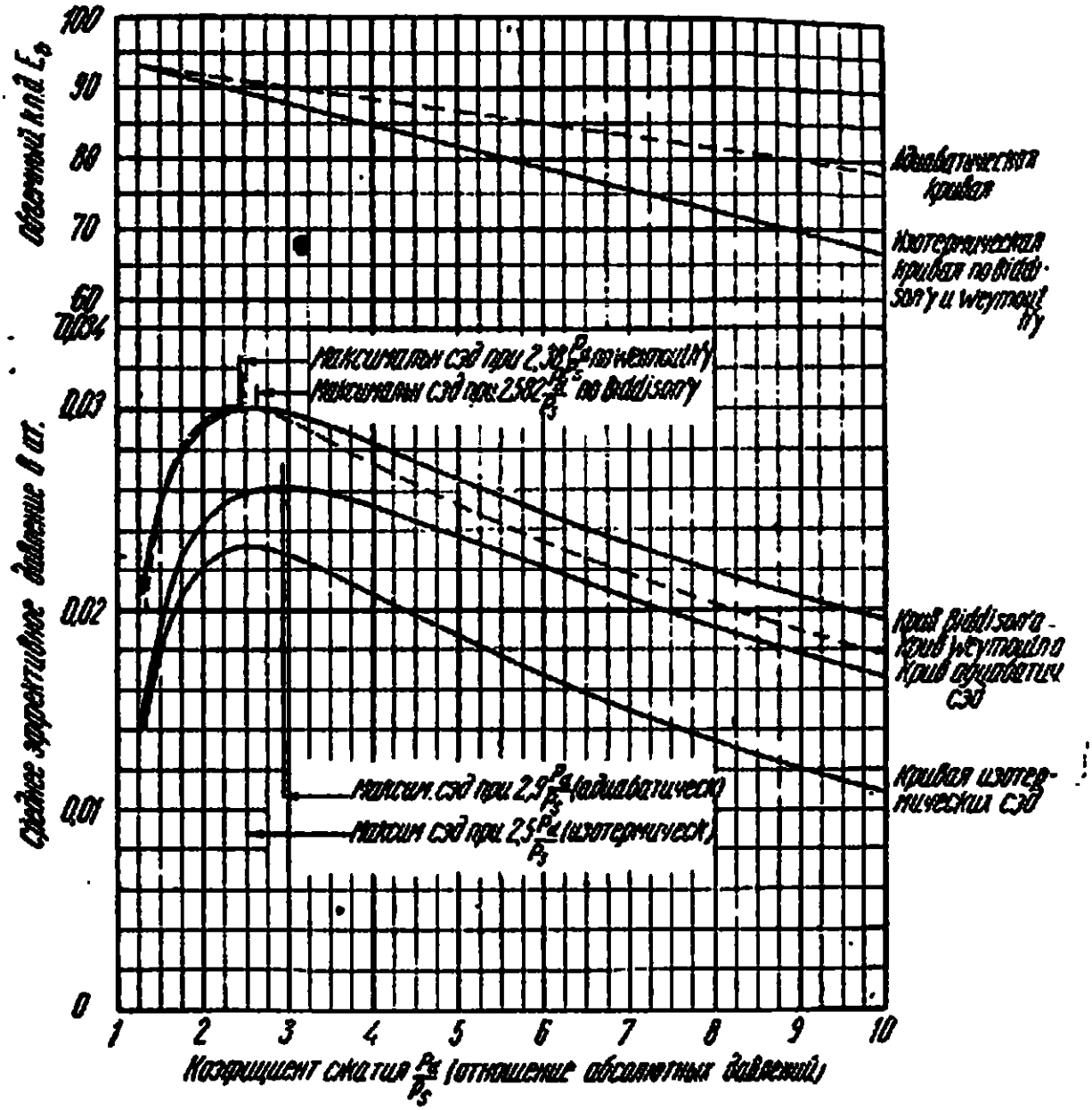
$$\text{сэд} = 6{,}33\, P_s\, (r^{0{,}15} - 0{,}98).$$

Анализ этих формул показывает, что если давление у присоса остается постоянным, а давление при выходе увеличивается против давления присоса, то мы имеем постоянно возрастающее сэд; если давление при выходе постоянное, а давление у присоса уменьшается против выхода, то сэд увеличивается до определенного максимума и затем вновь падает.

Все четыре формулы, выражающие сэд, нанесены вместе с величиной r на кривые диаграммы фиг. 100, причем давление при выходе рассматривается как

постоянное и равное единице, а отношение теплоемкостей равно 1,275. По этим кривым видно следующее:

а) максимальная величина изотермического сэд получается при $r = 2,5$;
б) максимальная величина адиабатического сэд получается при $r = 2,9$;
в) максимальная величина сэд по Weymouth'у соответствует $r = 2,38$;
г) максимальное значение сэд по Biddison'у соответствует $r = 2,582$.



Фиг. 99. Объемный коэфициент полезного действия и среднее эффективное давление при разных значениях $\frac{P_d}{P_s}$.

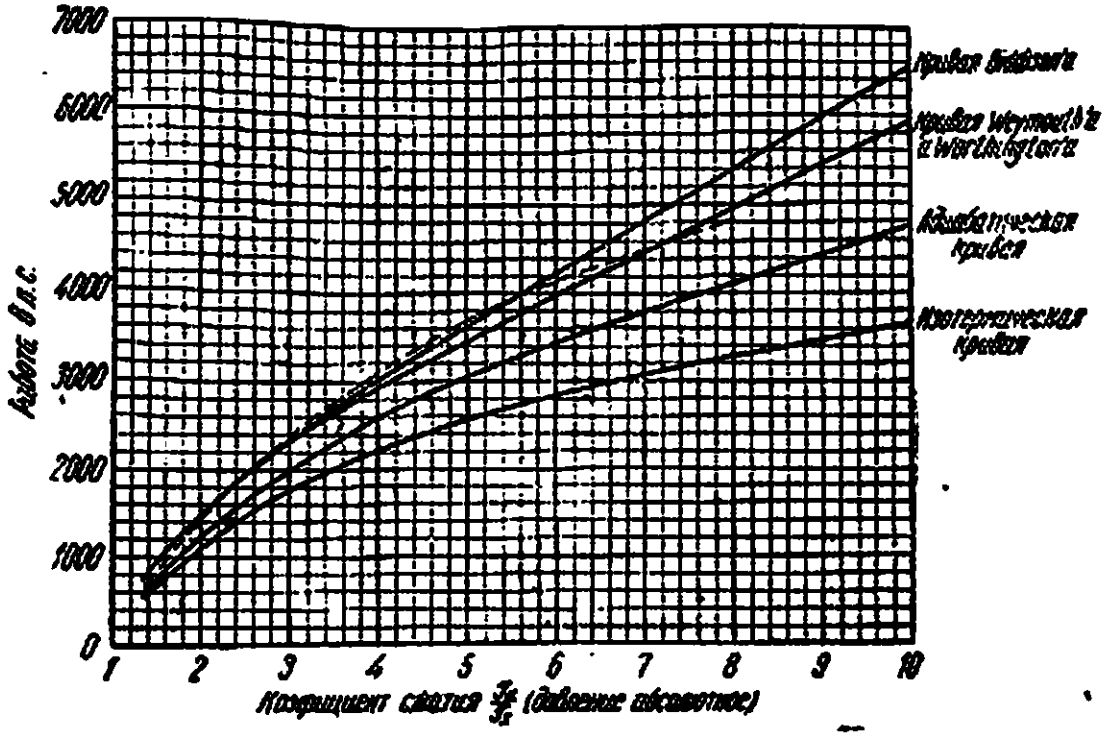
Диаграмма построена с учетом утечки $S = 0,03$; потери на утечку 0,02 или $K = 0,98 \cdot 16$; просачивание в зазоре и на подогреве $S = 0,04$; отношение теплоемкостей 1,275; постоянное давление у выхода 1 *ат*.

Примечание. Соответствующие объемные к. п. д. нанесены на кривые как для изотермического, так и для адиабатического сэд.

Надо отметить следующий важный момент. Если компрессор в качестве первичного двигателя предназначен для удовлетворения требования на сжатый газ при максимальных величинах сэд, то независимо от тех изменений, которым

подвергается давление у присоса, нагрузка на двигатель будет меньше, если давление у выхода постоянное.

Однако, если первичный двигатель используется в качестве силовой установки при иных условиях, чем те, которые дают максимальную величину сэд, то вполне возможно, что давление у присоса может измениться до величины, дающей отношение, соответствующее максимальному сэд, и в этом случае двигатель будет перегружен.



Фиг. 100. Работа компрессора в индикаторных лошадиных силах для величин $\frac{P_d}{P_s}$. Компрессор одноступенчатый.

Работа на каждый миллион куб. метров при 15,56° С и давление в 1 *ат* в сутки при коэфициенте сжатия $\frac{P_d}{P_s}$; температура у присоса 15,56° С. Газ взят из района Кетхмени. Отношение теплоемкостей 1,275.

Применение общих рабочих формул к составлению формул работы компрессоров на практике

Формулы для вычисления работы компрессора обычно составляются из расчета для нагнетания газа под атмосферным давлением.

Допустим:

T_s — абсолютная температура у присоса;

T_0 — стандартная абсолютная температура в °С;

P_s — абсолютное давление у присоса;

P_0 — стандартное абсолютное давление в *ат*;

V_s — объем газа определенного веса в $м^3$ при давлении P_s и температуре T_s;

V_0 — объем газа того же веса в $м^3$ при давлении P_0 и температуре T_0.

Так как $P_sV_sT_s = \frac{P_0V_0}{T_0}$ во всех уравнениях, то результат P_sV_s можно заменить эквивалентной величиной $\frac{P_0V_0T_s}{T_0}$.

Примем практическую номенклатуру обозначений, в которой:

p_0 — стандартное давление, равное 1 *ата*;

p_s — давление в линии присоса в *ата*;

p_d — давление у выходной линии в *ата*;

r — отношение абсолютного давления у присоса к абсолютному давлению у выхода — $\frac{p_a}{p_н}$;

Q_0 — количество нагнетаемого в сутки газа в млн. $м^3$ при давлении в 1 *ат* и температуре 15° С;

HP — работа компрессора в *л. с.* при сжатии Q_0 $м^3$/*сутки*;

n — отношение теплоемкостей;

T_0 — стандартная температура, взятая в основу 15° С;

T_s — абсолютная температура газа у присоса в °С.

Работа при изотермическом расширении (без потерь). Работа в *кгм/сутки* =

$$= W = \frac{P_0 V_0 T_s \lg_e r}{T_0},$$

где V_0 — количество передаваемого газа в $м^3$/*сутки*.

$$HP = 5{,}46\, Q_0 T_s \lg_e r.$$

Работа при адиабатическом процессе (без потерь)

$$W = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{P_0 V_0 T_s}{T_0}\left(r^{\frac{n-1}{n}} - 1\right);$$

$$HP = 5{,}46 \frac{n}{n-1}\, Q_0 T_s \left(r^{\frac{n-1}{n}} - 1\right).$$

Для естественного газа при $n = 1{,}275$:

$$HP = 25{,}28\, Q_0 T_s (r^{0{,}216} - 1).$$

Индикаторная работа компрессора по Weymouth'у (для естественного газа). Weymouth дает следующее уравнение для сэд и E_v объемный коэфициент полезного действия):

$$W = \text{сэд};\ V = \text{сэд}\,\frac{V_s}{E_v};$$

$$W = \frac{P_s V_s \left[1{,}08 + 0{,}5\left(\frac{1}{r}\right)^2\right] \lg_e r}{0{,}97 - 0{,}03\, r};$$

$$IHP = 5{,}46\, Q_0 T_s \frac{\left[0{,}08 + 0{,}5\left(\frac{1}{r}\right)^2\right] \lg_e r}{0{,}97 - 0{,}03\, r}.$$

Индикаторная работа компрессора по Biddison'у для естественного газа

$$\text{сэд} = 6{,}38\, P_s (r^{0{,}15} - 0{,}98);$$

$$E_v = 0{,}97 - 0{,}03\, r;$$

$$W = 6{,}38 \frac{P_s V_s (r^{0{,}15} - 0{,}98)}{0{,}97 - 0{,}03\, r};$$

$$IHP = 34{,}83 \frac{Q_0 T_s (r^{0{,}15} - 0{,}98)}{0{,}97 - 0{,}03\, r}.$$

Индикаторная работа компрессора по данным Компрессорного комитета Тихоокеанской газовой ассоциации. Компрессорный комитет нашел, что для естественного газа теоретическая работа компрессора при адиабатическом сжатии может быть принята за 85% фактически потребной индикаторной работы. Таким образом, работа в лошадиных силах выразится в следующем уравнении:

$$IHP = 29{,}78\, Q_0 T_s\, (r^{0{,}216} - 1) \text{ (при } n = 1{,}275).$$

Эта формула может рассматриваться в значительной степени как постоянная, так как она построена на основе средних эксплоатационных данных, полученных при исследовании работы нескольких компрессорных станций, в которых рабочие условия были весьма различны друг от друга.

Работа согласно пяти приведенным формулам показана на диаграмме (фиг. 100).

Работа в тормозных лошадиных силах. Работа, передаваемая поршню компрессора, должна учитывать механические потери компрессора. Применяя механический коэфициент полезного действия (к. п. д.) к предыдущей формуле, получим следующую формулу для работы в тормозных лошадиных силах:

$$BHP = \frac{\text{механический к. п. д. (в \%)} \cdot IHP}{100}.$$

Механический к. п. д. изменяется в широких пределах. Большинство фирм, выпускающих компрессоры, в целях единообразия принимает механический к. п. д. в размере 95% только для цилиндров компрессора. Weymouth полагает, что такой коэфициент должен быть близок к 80%, чтобы покрыть механические потери в компрессоре.

Тепловой коэфициент полезного действия. Тепловой к. п. д. компрессора в значительной степени зависит от опыта, которым обладают работники, обслуживающие компрессор. Достаточно высокий тепловой к. п. д. может быть достигнут как при начальном испытании, так и при хорошо проведенных периодических испытаниях в дальнейшем. Своевременное зажигание, правильная работа клапанов, а также соответствующее количество избытка воздуха представляют собой три средства регулирования компрессора, и если их применять как следует, то компрессор будет работать исправно.

При благоприятных эксплоатационных условиях можно получить тепловой к. п. д. в размере 25% по отношению к общей теплотворной способности топлива. Эту величину нужно принимать при предварительных исследованиях, хотя во многих случаях тепловой к. п. д. бывает ниже (до 20%). Если считать на нижнюю теплотворную способность топлива, то эти величины к. п. д. могут составить соответственно 28 и 23%. Процент, выражающий собой тепловой к. п. д., взят здесь на индикаторную мощность в цилиндре. Он вычисляется следующим образом:

$$\text{Тепловой к. п. д. (в \%)} = \frac{(IHP, \text{ переведенные в } Кал/час) \times 100}{(\text{расход топлива } м^3/час) \times \text{теплотворная способность}}.$$

Эксплоатационные ведомости показывают, что от 30 до 50% эксплоатационных расходов по компрессору приходится на топливо; поэтому необходимо добиваться получения возможно высокого теплового к. п. д.

Производительность компрессора. Передаточная мощность компрессора выражается формулой:

$$Q_0 = 0{,}6211\, E_v S N \left(D^2 - \frac{d^2}{2}\right) \frac{P_s}{T_s},$$

где S — ход поршня в *см*;
N — число об/мин;
D — диаметр цилиндра в *см*;
d — диаметр поршневого стержня в *см*.

Значение E можно получить по диаграмме (фиг. 99).

Это уравнение применимо к компрессору двойного действия с одним цилиндром. При наличии стержня выражение в скобках превращается в $(D^2 - d^2)$ при условии, что диаметр стержня и диаметр поршневого стержня одинаковы.

Температура сжатия. Обычно цилиндры компрессоров естественного газа имеют большие размеры, что дает низкую теплопередачу от газа к стенкам цилиндра. В связи с этим температура сжатия близко подходит к закону адиабатического сжатия, и при конструировании холодильников применяется следующая формула:

$$\frac{T_d}{T_s} = \left(\frac{P_d}{P_s}\right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

На диаграмме 101 представлено изменение отношения температуры при выходе и при присосе в зависимости от изменения отношения давлений.

Двухступенчатое сжатие. Для отношений давлений от 5 до 6 в обычной практике применяется многоступенчатая компрессия. Промежуточное охлаждение между ступенями представляет определенные преимущества, так как изменения большей частью носят изотермический характер, при котором требуется меньший первоначальный расход мощности. Кроме того, влияние вредного пространства

здесь можно значительно уменьшить, что дает большую мощность при низком давлении. Другими преимуществами промежуточного охлаждения являются снижение конечной температуры газа и большее удаление влаги.

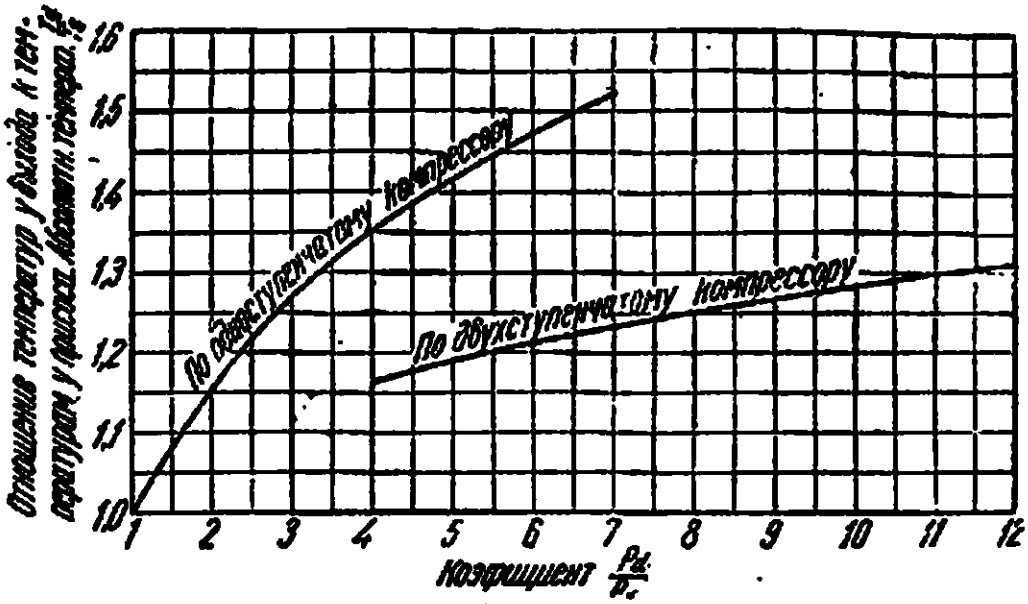
При двухступенчатом сжатии получаются лучшие результаты, когда работа компрессора на обоих ступенях одинакова. При таком условии:

Лучшее давление в ресивере $= \sqrt{\text{давление у присоса} \times \text{давление у выхода}}$

или

Коэффициент сжатия на каждой ступени $= \sqrt{\text{общий коэффициент сжатия}}$.

Таким образом, работа компрессора при двух ступенях равна двойной работе, проделанной на каждой ступени, в которой коэффициент сжатия равен квадратному корню из общего коэффициента сжатия. Это, однако, верно только тогда, когда газ выходит из промежуточного холодильника при той же температуре, при которой он входит у присоса первой ступени.



Фиг. 101. Отношение температур (абс.) у выхода к температуре у входа, выраженное в величинах коэффициента сжатия. Кривая построена для природного газа.
Данные по двухступенчатому компрессору основаны на температуре у выходного отверстия промежуточного холодильника, равной температуре у присоса на первой ступени. $n = 1{,}275$.

В нижеследующих формулах приводятся значения общего коэффициента сжатия r.
Формула мощности двухступенчатого компрессора при адиабатическом сжатии:

$$HP_{(a)} = 10{,}9\frac{n}{n-1} Q_0 T_s \left(r^{\frac{n-1}{2n}} - 1\right),$$

где $n = 1{,}275$ (для естественного газа);

$$HP_{(2)} = 50{,}63\, Q_0 T_s (r^{0{,}196} - 1).$$

Формула мощности двухступенчатого компрессора по Weymouth'у для естественного газа.

$$IHP_{(2)} = 5{,}461\, Q_0 T_s \cdot \left[\frac{1{,}08 + 0{,}5\frac{1}{r}}{0{,}97 - 0{,}03\sqrt{r}}\right] \lg_e r.$$

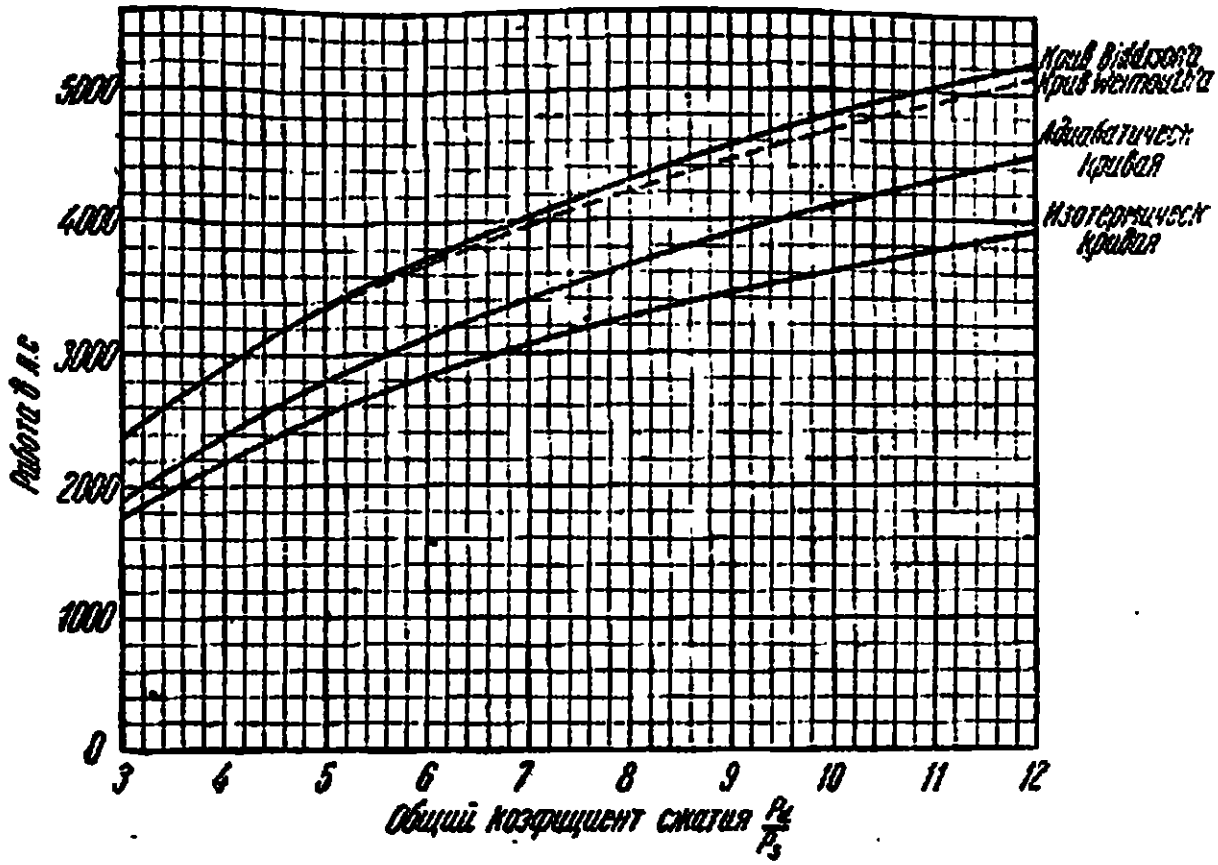
Формула мощности двухступенчатого компрессора (по Биддисону) для естественного газа.

$$IHP_{(2)} = 69{,}67\, Q_0 T_s \frac{(r^{0{,}075} - 0{,}98)}{0{,}97 - 0{,}03\sqrt{r}}.$$

Индикаторные диаграммы компрессора как руководство в процессе его эксплоатации

Индикаторные диаграммы компрессора оказывают ценную помощь при контроле его работы, давая возможность проверять неисправности клапанов поршневых колец и прокладок, а также определять мощность компрессора.

Индикаторы обычно снабжаются двумя размерами поршней; один из них с площадью сечения в 12,7 *мм*² и с расчетом на мощности компрессора до 14 *ат* (200 фун/кв. дм); другой с площадью сечения в 6 *мм*² для компрессоров, дающих



Фиг. 102. Работа компрессора в индикаторных лошадиных силах при меняющейся величине $\frac{P_d}{P_s}$. Компрессор двухступенчатый.

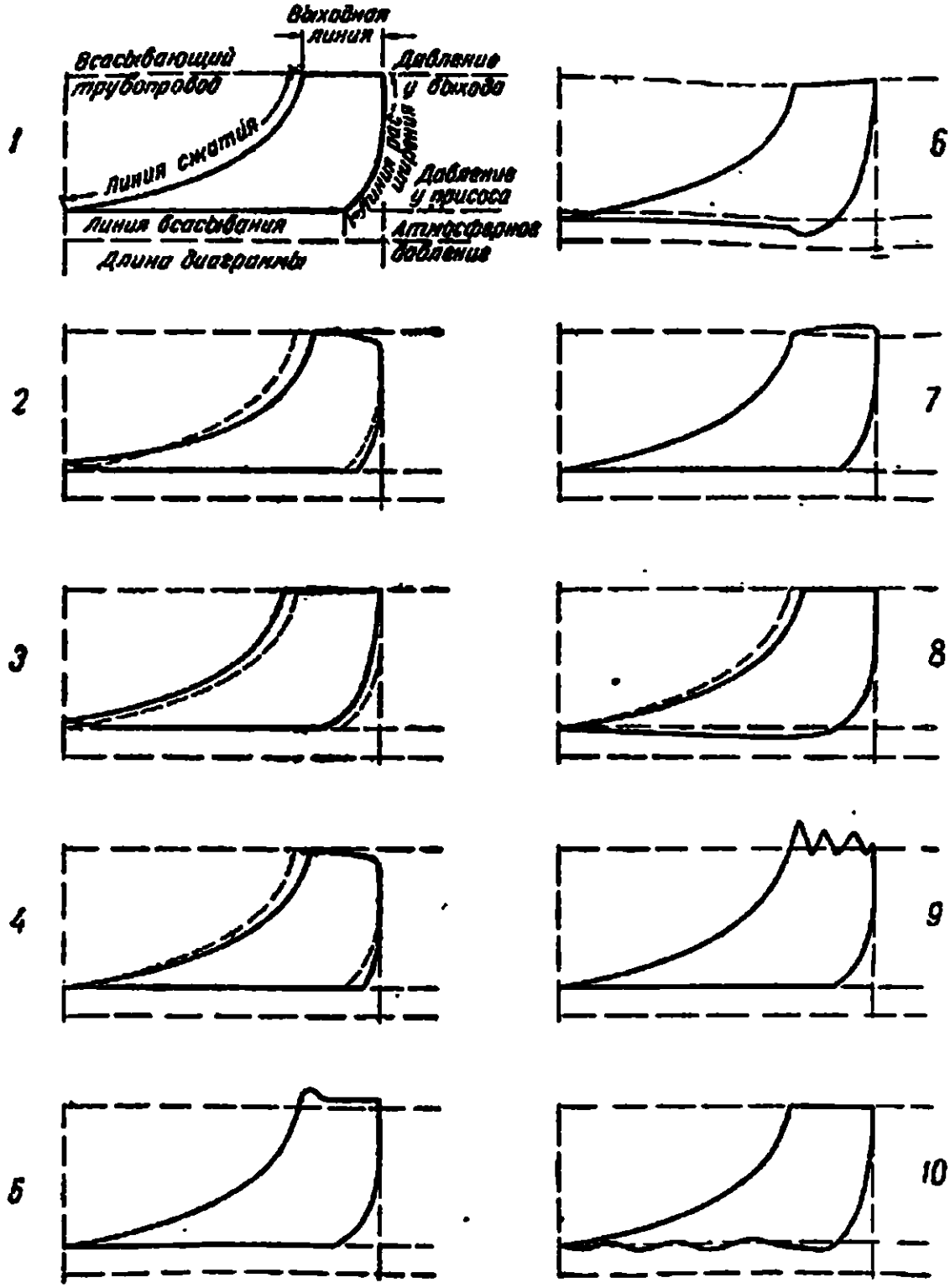
Работа на каждый миллион куб. метров при 15,56° С и давлении в 1 *ат* в сутки; температура у присоса 15,56° С; температура у выходного отверстия промежуточного холодильника 15,56° С. Газ взят из района Кетлмени. Отношение теплоемкостей 1,275.

давление до 70 *ат* (1000 фун.). Эти пределы достигаются применением различных пружин. В общем, следует выбирать пружины так, чтобы дать наибольший размах движению карандаша — около 38 *мм* (1,5″).

На фиг. 103 дано несколько образцов хороших индикаторных диаграмм. Идеальная диаграмма практически не осуществима; диаграмма должна по возможности приближаться к этому идеалу. Недостатки конструкции индикатора не дают возможности отмечать все фазы сжатия и расширения газа.

Тем не менее, индикатор особенно полезен при испытании работы газовых машин; сжатие, пиковое, конечное и возвратное давления могут быть удовлетворительно изучены при помощи диаграмм, так же как момент воспламенения, открытие и закрытие клапанов и т. д.

Давление при полной нагрузке компрессора следует поддерживать на возможно большей высоте, не допуская преждевременного воспламенения. Для есте-

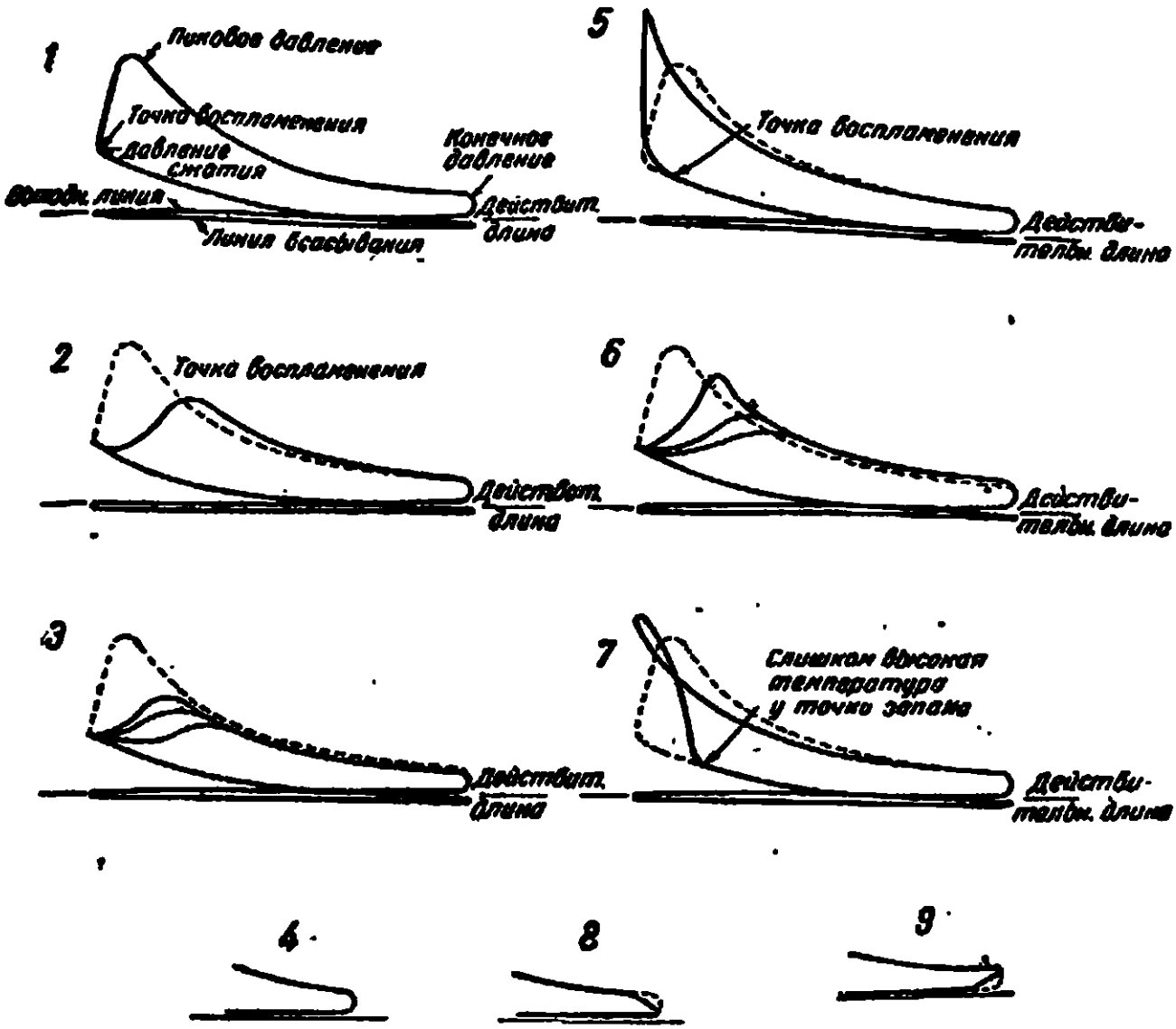


Фиг. 103. Анализ характерных недостатков компрессора по индикаторным кривым.

1 — вполне правильная диаграмма; *2* — поршневые кольца пропускают; *3* — выхлопной клапан пропускает; *4* — клапан у присоса пропускает; *5* — пружина клапана у выхода слишком туга; *6* — пружина клапана у присоса слишком туга; *7* — выходное отверстие слишком мало; *8* — всасывающее отверстие слишком мало; *9* — клапан у выхода не исправен (дрожит); *10* — клапан у присоса не исправен (дрожит).

ственного газа работа без охлаждения желательна при давлениях 5,6 до 7,7 *ат* (от 80 до 100 фун/кв. дм); при давлениях от 8 до 9,2 *ат* следует применять водяное или масляное охлаждение.

Пиковое давление следует поддерживать на возможно низком уровне, без потери среднего эффективного давления. Излишнего пикового давления следует избегать, так как оно влечет за собой изнашивание частей машины, а получающееся при этом повышение температуры в водяной рубашке является причиной потери мощности. Высокие пиковые давления обычно объясняются опережением зажигания.



Фиг. 104. Анализ компрессора природного газа по индикаторным диаграммам.

1 — диаграмма показывает хорошую работу; *2* — слишком позднее воспламенение; *3* — слишком бедная смесь; *4* — выходное отверстие открыто правильно; *5* — слишком раннее воспламенение; *6* — слишком богатая смесь; *7* — слишком раннее зажигание; *8* — выходное отверстие открыто слишком рано; *9* — выходное отверстие открыто слишком поздно.

Конечные давления должны быть возможно низки, так как они являются причиной потери мощности. Обычно высокие конечные давления являются результатом запаздывания зажигания или получаются вследствие очень богатой смеси.

Следует старательно избегать высокого противодавления. Установка муфелей и подогревателей у выхлопных линий часто вызывает повышенное противодавление, а оно в свою очередь снижает количество воздуха, которое необходимо впустить в цилиндр для следующего хода поршня.

При запаздывании зажигания получается серьезная потеря среднего эффективного давления. При таких условиях компрессор работает весьма плавно, и запазды-

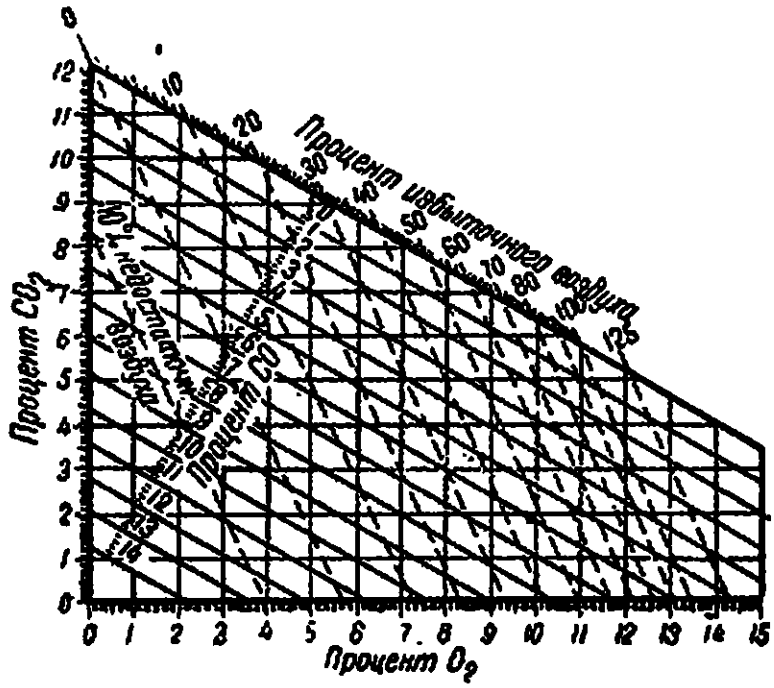
вание зажигания часто не замечается, если оно не сопровождается значительной потерей мощности.

Выхлопной клапан следует отрегулировать таким образом, чтобы его действие отражалось на диаграмме в виде закругления. Если вместо этого край диаграммы имеет вид острого угла с вершиной угла, близкой к атмосферному давлению, то это означает сильное опережение зажигания. Если вершина угла находится на кривой расширения, то это означает, что зажигание произошло поздно. Если открытие и закрытие входных и выходных клапанов не совпадают на диаграмме соответствующей хорошо функционирующей системе сжатия, то обычно принято вновь отрегулировать систему клапанов для улучшения условий их работы.

Если получается плохой контур диаграммы, то это является признаком плохой смеси; либо она слишком богата, либо слишком бедна. Беднейшая возможная смесь должна применяться так, чтобы иметь нагрузку и давать хороший контур на диаграмме; однако слишком бедная смесь может быть причиной преждевременных взрывов.

Возможными причинами опережения зажигания являются сильное нагревание в центре неохлажденного поршня, недостаточное охлаждение кожуха, окалина на стенках последнего, слишком высокое сжатие, перегрев выхлопного клапана и плохое регулирование зажигания.

Диаграммы, представленные на фиг. 104, дают возможность установить ряд недостатков в работе системы по сравнению с хорошей диаграммой, снятой с нормально функционирующего цилиндра.



Фиг. 105. Номограмма анализа выхлопного газа для определения количества необходимого воздуха.

Анализ выхлопного газа

Машинный индикатор не в состоянии один обеспечить работнику правильную регулировку момента зажигания и соответствующую смесь. Если смесь слишком богата или слишком бедна, то она сгорает гораздо медленнее, чем теоретически правильная смесь; следствием этого является преждевременное зажигание, что не дает хороших контуров диаграммы. Такая диаграмма обманчива, потому что по ней нельзя определить, что смесь является неподходящей. Лучше всего применять анализатор выхлопного газа, комбинируя его с индикатором: это даст возможность определить, насколько подходящей является смесь, прежде чем изменять регулировку.

Проценты CO_2, O_2 и CO — по данным анализа сухого газа аппаратом Орса, исходя из условий, при которых выхлопной газ не содержит несгоревшего газа, H_2 или несвязанного углерода. Достаточно знать только два из трех элементов CO_2, CO и O_2. Номограмма служит для проверки точности анализа, при котором определены три упомянутых выше составных элемента газа.

Номограмму можно использовать при анализе любого природного газа с небольшой неточностью при условии, если содержание CO_2 и азота не превышает 1,5 — 2% количества газа.

Номограмма 105 оказывает большую помощь при определении процента наличного воздуха. Так как в выхлопную трубу попадает некоторое количество несгоревших газов, то по номограмме можно быстро и довольно точно определить, в какой мере смесь бедна или богата.

Желательно, конечно, иметь минимум воздуха и окиси углерода и максимум углекислого газа. При обычных условиях количество окиси углерода надо поддерживать на возможно низком уровне даже в том случае, если количество избыточного воздуха несколько больше нормального; этим достигается минимальная потеря топлива. Если нельзя добиться понижения содержания окиси углерода до минимума без большого избытка воздуха, то это обычно объясняется неисправностью смешивающего клапана. Некоторая степень турбулентности в клапане содействует более полному сгоранию.

Водяное охлаждение

В применяемой для охлаждения воде весьма существенно, чтобы образующие окалины твердые частицы составляли не свыше 0,05 *г* на 1 *л* воды. Для того чтобы предупредить слишком большое образование окалины, применяются смягчающие воду средства или же используется закрытая система циркуляции воды. В состав закрытой системы входят циркуляционные насосы и теплообменники, необходимые для осуществления теплопередачи от закрытой к открытой системе охлаждения.

При открытой системе охлаждения, при которой вода в кожухе охлаждается окружающим воздухом, расход воды составляет 93 *л* (24 галл.) в час на тормозную лошадиную силу. При закрытой системе охлаждения расход воды составляет 186 *л* (48 галл.), так как половина этого количества циркулирует по кожухам, половина — по градирне. Обычно более желательной считается циркуляция значительного количества воды при медленном повышении ее температуры, чем пропускание небольших количеств воды при быстром повышении ее температуры.

При охлаждении водой поршневых штоков систему эту следует отделить от системы охлаждения водяной рубашки, поскольку в системе охлаждения штоков может потребоваться применение большого давления.

Там, где замечаются явления коррозии вследствие насыщения охлаждающей воды кислородом, к ней добавляют двухромовокислый калий, что дает хорошие результаты. Для получения эффекта против коррозии достаточна концентрация в размере 0,1%.

8. ПРОЕКТЫ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗА

Основные определения

Газовая проводка — боковая линия, по которой газ подается непосредственно из городской магистрали к счетчику потребителя.

Питающая магистраль. Питающей магистралью называется газовая линия, которая предназначена исключительно для передачи газа от источника снабжения (например от главной магистральной линии) присоединенным к ней газопроводам.

Питающая распределительная магистраль — газовая магистраль, которая выполняет двоякую функцию: подачу газа от источника снабжения связанным с ней газовым проводкам и подачу газа другим типам распределительных линий.

Распределительная магистраль. Распределительная магистраль имеет целью только подачу газа от главного источника снабжения, например с центральной станции, из района или из газгольдера, к распределительным трубопроводам, связанным с ним. Технически предполагается, что она не подает газа к отводам.

Главная подающая магистраль. Главная магистраль подает газ только от одного центрального источника к другому, например с завода к районной станции или к газгольдеру. Технически предполагается, что она не подает газа к другим распределительным линиям, или к газоотводам.

Прочие промежуточные газопроводы. Имеется ряд типов промежуточных газопроводов, например распределительные подающие газопроводы, главные магистрали-распределители и др. Для проектирования все эти названия особого значения не имеют.

Условные обозначения

a — среднее давление в газопроводе в *ата* (абсолютное начальное давление минус половина потери давления);

A — число газовых аппаратов, как-то: плиты, подогреватели воды, отопительные приборы, холодильники и т. д.;

D — внутренний диаметр трубы в дм.;
D_L — проектная нагрузка в $м^3/час$;
h — потеря давления между конечными пунктами участка в *мм* водяного столба;
J — фактор допускаемого риска или степень достоверности расчетной нагрузки;
k — фактор одновременности;

K — константа Spitzglass'a $\left(\frac{D^5}{1+\frac{3,6}{D}+0,03D}\right)^{\frac{1}{2}}$,

где D — в дм. (см. табл. 107);
L — длина отрезка трубы в *м*;
lg — десятичный логарифм;
m — число потребителей в группе;
n — число точек потребления газа;

$n_1 = \frac{Q_1 n}{Q - Q_1}$;

$n_2 = n + n_1 = \frac{Q_n}{Q - Q_1}$;

P — потеря давления между двумя конечными пунктами линии в *кг/см*;
P_1 — начальное давление в *ата*;
P_2 — конечное давление в *ата*;
P_{a_1} — атмосферное давление у наиболее высокого конца линии в *ата*;
P_{a_2} — атмосферное давление у наиболее низкого конца линии в *ата*;
Q — общая нагрузка на линию поступающего газа в $м^3/час$;
Q_1 — расход газа у конца распределительной линии в $м^3/час$;
Q_c — сумма отдельных количеств газа, требующихся данной группе потребителей, в $м^3/час$;
Q_E — эквивалентное количество газа, дающего данную потерю давления, в $м^3/час$;
Q_m — общее количество газа, потребляемое данной группой потребителей при максимальном расходе за 1 месяц, в $м^3/час$;
Q_R — общее количество газа, проходящее по всем присоединенным к линии отвода приборам для подачи газа, в $м^3/час$ или, что то же, расчетная нагрузка;

$$\left.\begin{aligned} &R\left\{\frac{6n^2}{(n+1)(2n+1)}\right\}^{\frac{1}{2}};\\ &R_1\left\{\frac{6n_1^2}{(n_1+1)(2n_1+1)}\right\}^{\frac{1}{2}};\\ &R_2\left\{\frac{6n_2^2}{(n_2+1)(2n_2+1)}\right\}^{\frac{1}{2}};\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

S — удельный вес газа по отношению к воздуху;
W — давление, производимое весом колонны газового потока, в *ат*.

Формула для определения потока газа. Когда все количество газа, поступающее у одного конца распределительного трубопровода, выходит у другого конца, так сказать, транзитом, то пропускная способность данного участка линии при данной потере давления может быть получена по одной из формул, применяемых для этой цели, например по формуле Spitzglass'a.

При давлении, не превышающем 650 *мм* (1 фунт) по манометру, формула расхода газа выражается следующим образом:

$$Q = 11K\sqrt{\frac{h}{SL}}, \quad (2)$$

где Q — в $м^3$;
h — в *мм* водяного столба;
L — в *м*.

При давлениях, превышающих это количество:

$$Q = 1073K\sqrt{\frac{Pa}{SL}}, \tag{3}$$

где

$$K = \sqrt{\frac{D^5}{1+\frac{3,6}{D}+0,03D}};$$

D — в дм.

Формулы Spitzglass'a будут применяться по всему тексту этой статьи, причем, как указано выше, эту формулу можно применять одинаково к любому случаю передачи газа по трубам.

Изменения в формуле. Когда газ, проходящий по трубе, частично расходуется на пути, в формулу пропускной способности трубы вносятся изменения.

Для распределительных труб в формулу вводится фактор R:

$$Q = 11K\left(\frac{h}{SL}\right)^{\frac{1}{2}}R; \tag{4}$$

$$Q = 1073K\left(\frac{Pa}{SL}\right)^{\frac{1}{2}}R. \tag{5}$$

Коэфициент R теоретически верен для идеального распределительного трубопровода, но на практике его применение дает результаты, которые правильны только в известных пределах. Величина n представляет количество отводов от трубопровода, если это количество известно; иначе берется количество из расчета отводов, причем расстояние между ними принимается в 15 *м*.

Применение формулы для распределительных магистралей. Расход газа в распределительных магистралях вычисляется при помощи формул для транзитного движения со следующими изменениями.

При низком давлении:

$$Q_E = 11K\left(\frac{h}{SL}\right)^{\frac{1}{2}}; \tag{6}$$

$$Q_E = 1073K\left(\frac{Pa}{SL}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{7}$$

где

$$Q_E = \sqrt{\frac{\frac{Q^3}{R_2^2}-\frac{Q_1^3}{R_1^3}}{Q-Q_1}} \tag{8}$$

или

$$Q_E = \sqrt{\frac{Q^2+Q_1^2}{R^2}+\frac{QQ_1}{3}\cdot\left(1-\frac{1}{n^2}\right)-\frac{Q_1^2}{n}}. \tag{9}$$

По уравнению (9) вычисляют приблизительную величину расхода газа по следующей формуле:

$$Q_E = \sqrt{\frac{Q^2+Q_1^2}{R^2}+\frac{QQ_1}{3}}. \tag{10}$$

Наибольшей ошибкой в уравнении (10) будет $\frac{1}{n}+\frac{1}{3n^2}$, когда $Q_1 = Q$; когда Q_1 делается малым по сравнению с Q, то уменьшается и погрешность, которая доходит до нуля при $Q_1 = 0$. Надо заметить, что количество, выпавшее из уравнения (9) [после чего получилось уравнение (10)], является отрицательным, и следовательно, приближенная величина Q_E становится большей, что увеличивает надежность подсчетов.

В случаях с распределительными трубами, когда n, означающее число отводов, не известно, принимают расстояние между ними около 15 *м*.

Таблица 107

Константа Spitzglass'a

Эта константа выражается следующей формулой:

$$\left(\frac{D^5}{1+\frac{3{,}6}{D}+0{,}03D}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Номинальный диаметр трубы в дм.	Внутренний диаметр в дм.	Константа K	Номинальный диаметр трубы в дм.	Внутренний диаметр в дм.	Константа K
1/2	0,622	0,117	5	5,047	41,75
3/4	0,824	0,265	6	6,065	68,0
1	1,049	0,532	8	7,981	138,5
1 1/4	1,380	1,171	10	10,020	246,8
1 1/2	1,610	1,816	12	—	387,5
2	2,067	3,675	14	—	567,0
2 1/2	2,469	6,015	16	—	785,0
3	3,068	10,940	20	—	1 340,0
3 1/2	3,548	16,230	24	—	2 065,0
4	4,026	22,950	30	—	3 470,0
			36	—	5 265,0

ПРИМЕНЕНИЕ ФОРМУЛ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА

При применении приведенных выше формул часто возникает необходимость ввбдить исправления в значение переменных величин или вычислять одну или несколько из них отдельно, чтобы внести поправку в условия, которые не были предусмотрены при выведении основной формулы газового потока.

Фактор одновременности. Практика распределения газа показывает, что из аппаратов, установленных у потребителей и присоединенных к газовой сети, только часть работает одновременно. При проектировании газовой сети необходимо это учитывать. Поэтому в расчеты вводится коэфициент одновременности, т. е. отношение максимального фактически расходуемого газа к максимальному возможному расходу газа всеми аппаратами, находящимися у потребителей.

Проектная нагрузка, основанная на количестве или пропускной способности присоединенных к трубопроводам аппаратов может быть подсчитана по следующей формуле с учетом фактора одновременности и „теории вероятностей":

$$D_L = \frac{Q_R}{\lg\left(\frac{48}{\lg J}+A\right)}. \qquad (11)$$

Значение D_L, получаемое из уравнения (11), подставляют вместо Q и Q_1 в формулу газового потока; таким образом, уравнение (2) получает следующий вид:

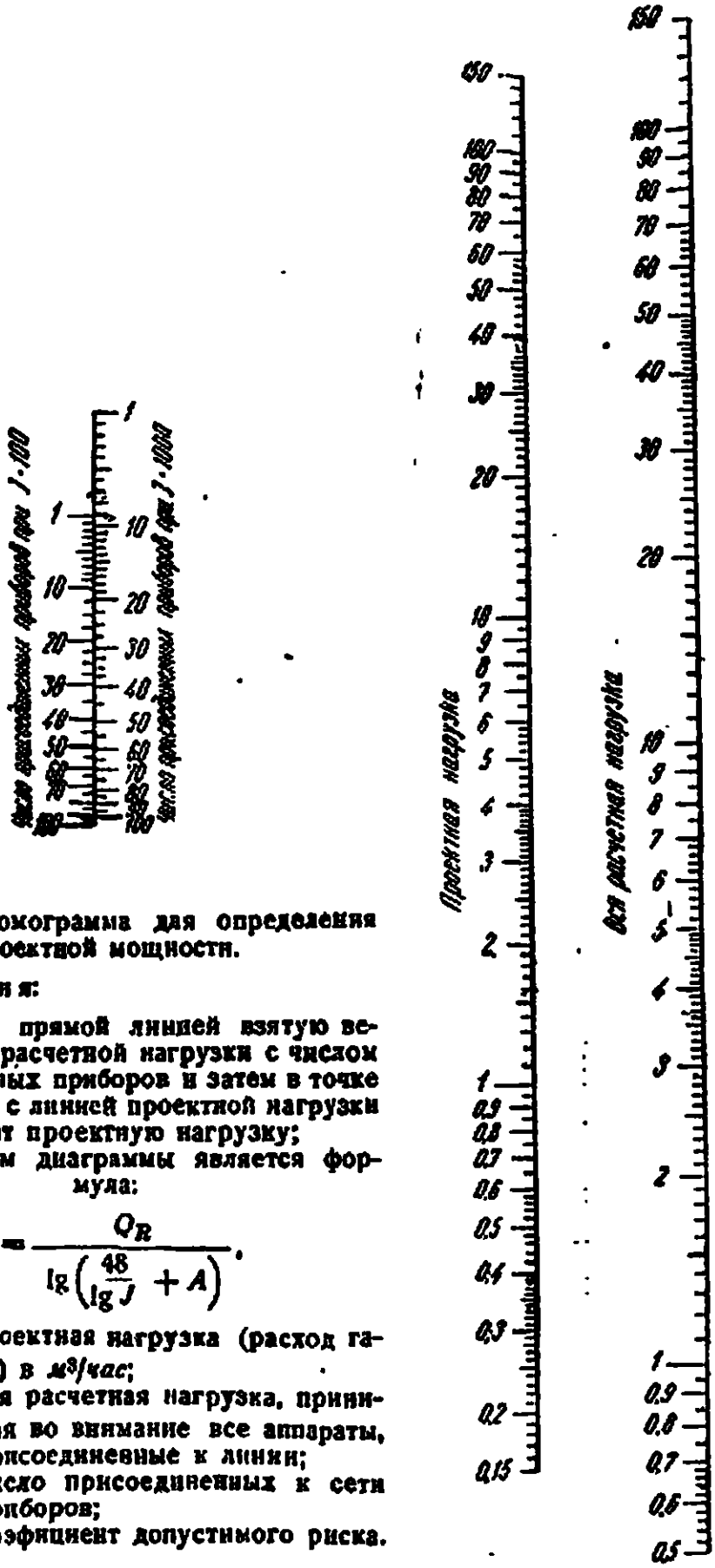
$$\frac{Q_R}{\lg\left(\frac{48}{\lg J}+A\right)} = 11\,K\sqrt{\frac{h}{SL}}.$$

На фиг. 106 представлена диаграмма для вычисления проектных нагрузок, исходя из уравнения (11). На фиг. 107 дано сравнение между отдельными случаями спроса и величинами, вычисленными на основании уравнения (11).

Величины R и R^2

$$R = \left[\frac{6n^3}{(n+1)(2n+1)}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad R^2 = \frac{6n^3}{(n+1)(2n+1)}$$

n	R	R^2	n	R	R^2
1	1,0000	1,0000	41	1,7010	2,8933
2	1,2649	1,6000	42	1,7017	2,8958
3	1,3887	1,9286	43	1,7024	2,8981
4	1,4606	2,1333	44	1,7030	2,9004
5	1,5076	2,2727	45	1,7037	2,9025
6	1,5407	2,3736	46	1,7043	2,9046
7	1,5652	2,4500	47	1,7049	2,9066
8	1,5842	2,5098	48	1,7054	2,9085
9	1,5993	2,5579	49	1,7060	2,9103
10	1,6116	2,5974	50	1,7065	2,9121
11	1,6219	2,6304	55	1,7088	2,9199
12	1,6305	2,6585	60	1,7107	2,9264
13	1,6378	2,6825	65	1,7123	2,9320
14	1,6442	2,7034	70	1,7137	2,9368
15	1,6498	2,7218	75	1,7149	2,9409
16	1,6547	2,7380	80	1,7160	2,9446
17	1,6590	2,7524	85	1,7169	2,9478
18	1,6629	2,7653	90	1,7177	2,9506
19	1,6664	2,7769	95	1,7185	2,9532
20	1,6696	2,7875	100	1,7192	2,9555
21	1,6724	2,7970	125	1,7217	2,9643
22	1,6751	2,8058	150	1,7234	2,9702
23	1,6774	2,8138	175	1,7247	2,9745
24	1,6796	2,8212	200	1,7256	2,9776
25	1,6817	2,8281	250	1,7269	2,9821
26	1,6836	2,8344	300	1,7277	2,9851
27	1,6853	2,8403	400	1,7288	2,9888
28	1,6869	2,8457	500	1,7295	2,9910
29	1,6884	2,8508	600	1,7299	2,9925
30	1,6899	2,8556	700	1,7302	2,9936
31	1,6912	2,8601	800	1,7304	2,9944
32	1,6924	2,8643	900	1,7306	2,9950
33	1,6936	2,8683	1 000	1,7308	2,9955
34	1,6947	2,8720	2 000	1,7314	2,9978
35	1,6958	2,8756	3 000	1,7316	2,9985
36	1,6967	2,8789	4 000	1,7317	2,9989
37	1,6977	2,8821	5 000	1,7318	2,9991
38	1,6986	2,8851	10 000	1,7319	2,9996
39	1,6994	2,8880	∞	1,7321	3,0000
40	1,7002	2,8907			



Фиг. 106. Номограмма для определения проектной мощности.

Указания:

1) Соединяют прямой линией взятую величину всей расчетной нагрузки с числом присоединенных приборов и затем в точке пересечения с линией проектной нагрузки находят проектную нагрузку;

2) основанием диаграммы является формула:

$$D = \frac{Q_R}{\lg\left(\frac{48}{\lg J} + A\right)},$$

где D_L — проектная нагрузка (расход газа) в $м^3/час$;

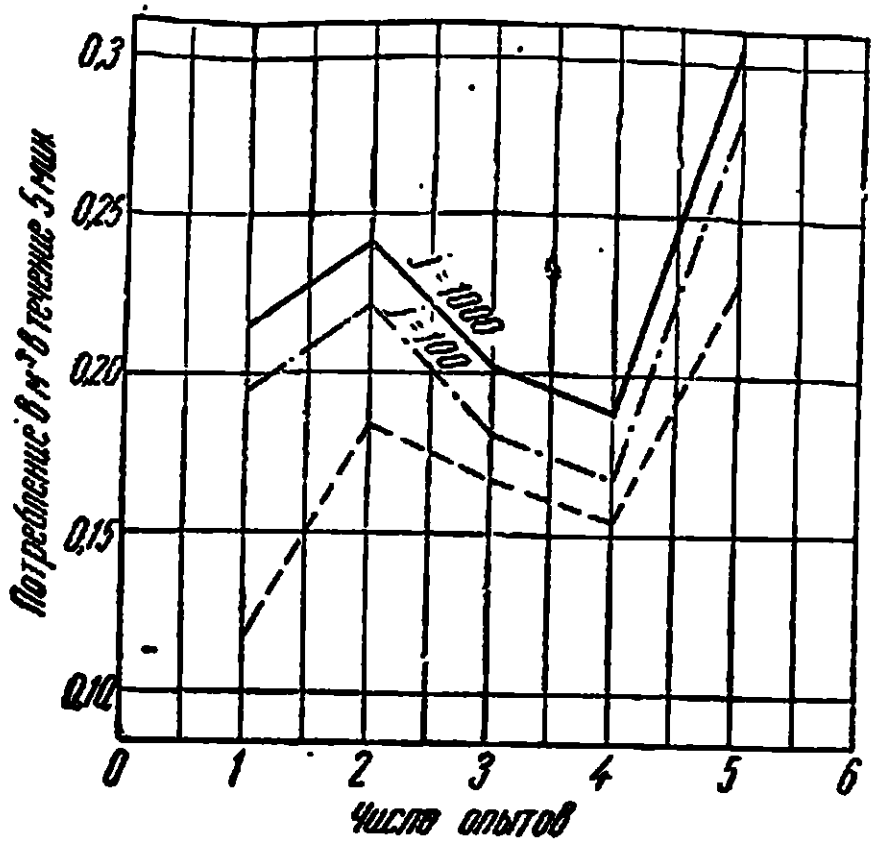
Q_R — вся расчетная нагрузка, принимая во внимание все аппараты, присоединенные к линии;

A — число присоединенных к сети приборов;

J — коэфициент допустимого риска.

Хотя уравнение (11) большей частью дает удовлетворительное решение, все-таки предпочтительнее иногда применять нижеследующее уравнение, построенное на основе учета суммы максимальных отдельных часовых нагрузок:

$$D_L = \frac{Q_0}{1 + k + 2k\left[1 - \left(\frac{1}{8}\right)^{m-2}\right]}. \qquad (12)$$



Фиг. 107. Фактор одновременности. Действительный спрос по сравнению со спросом, предусмотренным расчетами.

1, 2 — расчетное давление в течение 5 мин.; вычислено на основании уравнения:

$$D_L = \frac{Q_R}{\lg\left(\frac{48}{\lg J} + A\right)};$$

3 — фактический спрос на газ в течение 5 мин. на основе действительных промеров по счетчикам потребителей.

Опыт № 1. Плита, водонагреватель, 2 комнатных камина.
Опыт № 2. Плита, нагреватель с запасом воды, 4 комнатных нагревателя.
Опыт № 3. Плита, нагреватель для воды, 2 комнатных нагревателя.
Опыт № 4. Плита, нагреватель для воды, 1 комнатный нагреватель.
Опыт № 5. Плита, непрерывный нагреватель воды, 3 комнатных нагревателя.

Отводы, клапаны и фасонные части. Наличие в линии отводов, клапанов и фасонных частей создает известное добавочное сопротивление для потока, которое можно компенсировать добавлением эквивалентного сопротивления прямой

трубы, оказывающей такое же сопротивление движению потока, как указанные фасонные части.

Ниже на стр. 275 приводится таблица длин труб, которые необходимо вставить вместо фасонных частей.

Различие уровней. Если имеется значительное различие уровней между двумя рассматриваемыми точками данного участка линии, то надо принять в расчет вес всего количества движущегося между этими двумя точками газа. Этот вес вычисляется при помощи следующей формулы:

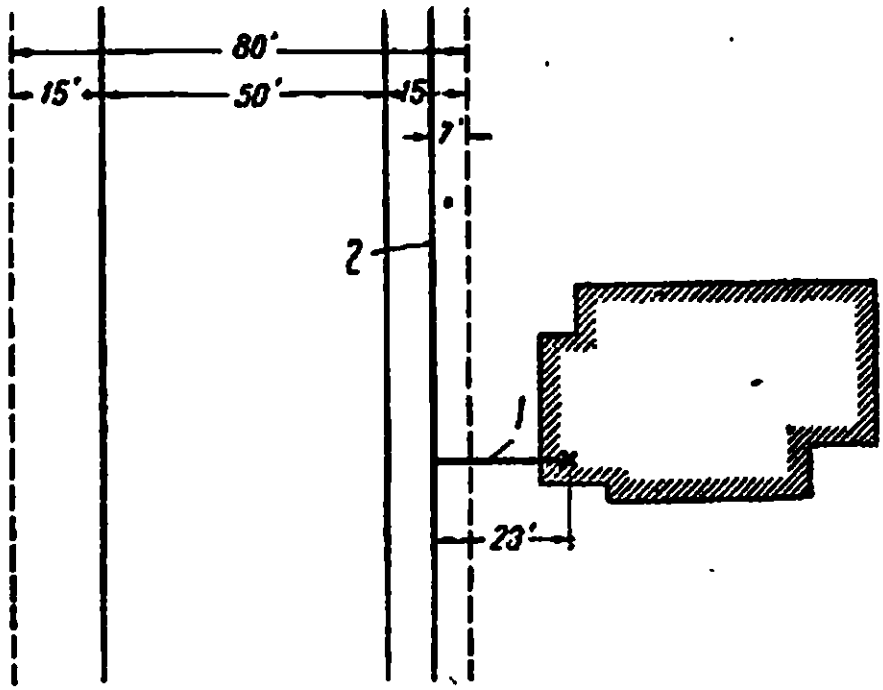
$$W = \frac{4S}{3}\left(\frac{P_{a_1} - P_{a_2}}{P_{a_1} + P_{a_2}}\right)\left\{\frac{[(P_1 + P_2)^2 - P_1 P_2]}{P_1 + P_2}\right\}. \qquad (13)$$

Величина погрешностей, которые получаются вследствие недоучета влияния разности уровней у обеих рассматриваемых точек линии, зависит как от эксплоатационных условий линии, так и от величины этой разности. Чем выше рабочее давление на линии, тем больше будет вес газовой колонны, хотя он уменьшается с увеличением разности давления.

При применении уравнения (13) величину W нужно вычесть из наблюденной величины давления в нижнем конце линии раньше, чем подставить полученные величины в формулу газового потока.

Проблемы, возникающие при проектировании газораспределительных линий

Ниже рассматривается ряд вопросов, связанных с проектированием распределительных линий. Постановку этих вопросов надо понимать в том смысле, что они даются только для иллюстрации применяемых методов, и рассматриваемые в них случаи не являются ни типичными, ни идеальными.



Фиг. 108. Чертеж к примеру 1.

Построен на основании формулы:

$$\frac{Q_B}{\lg\left(\frac{48}{\lg J} + A\right)} = 11\,K\left(\frac{h}{SL}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Пример 1. *Газовая проводка.* Предположим, что газовая проводка прокладывается для подачи газа к определенному пункту, как это показано на фиг. 108.

Данные:

1) спрос на газ со стороны потребителя ограничивается исключительно домашними потребностями, и здесь, следовательно, приложим фактор одновременности;
2) потребитель имеет четыре газовых аппарата с максимальным расходом в 6,2 $м^3$ (219 куб. фут/час);
3) установка низкого давления;
4) удельный вес подаваемого газа составляет 0,7, его теплотворная способность 9900 *Кал/м*^{3};
5) длина проводки, включая отводы, фасонные части, задвижки и диафрагму у верхней части линии, составляет 7,1 *м* (23 фут.).

Предположения:

1) потребитель не имеет в виду ставить новые аппараты, так как у него имеются все газовые устройства;
2) потеря давления в 12,7 *мм* ($^1/_2$") водяного столба является достаточной для удовлетворения правил нормального обслуживания;
3) давление по барометру в этом месте составляет 76 *см* Hg;
4) предел допустимого риска находится между $J = 100$ и $J = 1000$.

Решение. Условия, существующие на данном участке линии, подходят под уравнение (2); подставляя действительное значение уравнения (11) вместо Q и переводя все это в значение K, получим:

$$K = \frac{Q_R (SL)^{\frac{1}{2}}}{\lg\left(\frac{48}{\lg J} + A\right) 11h^{\frac{1}{2}}}.$$

При $J = 100$:

$$K = \frac{6{,}2\,(0{,}7 \cdot 7)^{\frac{1}{2}}}{\lg\left(\frac{48}{\lg 100} + 4\right) \cdot 11 \cdot (12{,}7)^{\frac{1}{2}}} = 0{,}24.$$

При $J = 1000$:

$$K = \frac{6{,}2\,(0{,}7 \cdot 7)^{\frac{1}{2}}}{\lg\left(\frac{48}{\lg 1000} + 4\right) \cdot 11 \cdot (12{,}7)^{\frac{1}{2}}} = 0{,}269.$$

Если обратиться к табл. 107, то можно видеть, что эта величина K соответствует диаметру $^3/_4$", который лежит между вычисленными величинами 0,24 и 0,269. Поэтому диаметр $^3/_4$" подходит к предположению 4 и может считаться решением задачи.

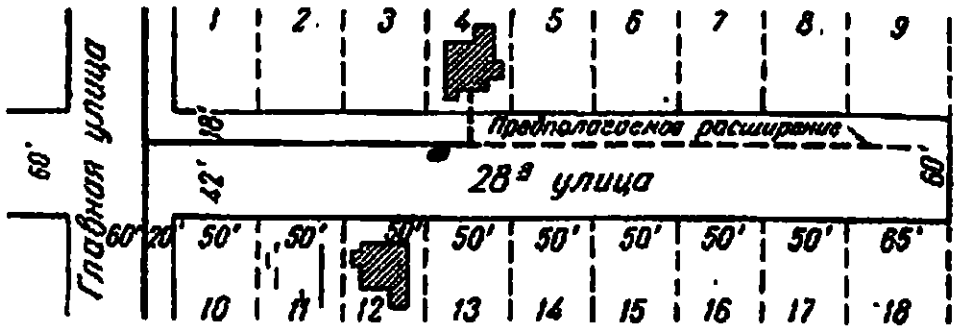
Пример 2. *Распределительный трубопровод.* Допустим, что продолжение газовой линии предполагается проложить через какую-нибудь определенную улицу, как показано на фиг. 109. Каков должен быть диаметр трубы?

Данные:

1) район подачи разбит на отдельные домовладения;
2) улицу не предполагается продолжить;
3) имеется 18 участков, годных для застройки жильем, но в момент прокладки линии занято только два домовладения (фиг. 109);
4) удельный вес подаваемого газа составляет 0,7, его теплотворная способность 9900 *Кал/м*^{3};
5) трубопровод рассчитан на низкое давление;
6) расстояние от распределительного коллектора до центрального пункта последнего домовладения составляет 130 *м* (455 фут.);
7) в домах в момент прокладки линии через улицу имеются две плиты, два подогревателя для воды с запасным баком, два больших и два малых непрерывно действующих подогревателя воды.

Предположения:

1) нагрузка линии рассчитана исключительно на бытовое снабжение, почему при проектировании должен быть принят фактор одновременности;
2) длина распределительной линии будет приблизительно 130 *м* (455 фут.);
3) потеря давления между уличным трубопроводом и аппаратами у потребителя составит 25,4 *мм* (1″) водяного столба, что вполне соответствует правилам нормального обслуживания;
4) застройка приблизительно рассчитана в количестве одного дома на каждый участок, всего 18 домов;
5) уличный трубопровод обладает достаточной мощностью для подачи газа;
6) остальные дома после постройки будут оборудованы такими же аппаратами и в таком же количестве, как и у соседних домов; в общем 72 аппарата с общей максимальной нагрузкой 80 $м^3$/час (2880 куб. фут/час);
7) давление по барометру на этом участке составит 76 *см* Hg;
8) предел допустимого риска не меньше чем $J = 1000$.



Фиг. 109. Чертеж к примеру 2. Распределительная линия низкого давления.

Расчет делается по формуле:

$$K = \frac{Q_R}{\lg\left(\frac{48}{\lg J} + A\right)} = 11\,KR\left(\frac{h}{SL}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Решение. Из уравнения (4) получаем K и вставляем вместо Q его значение из формулы (11):

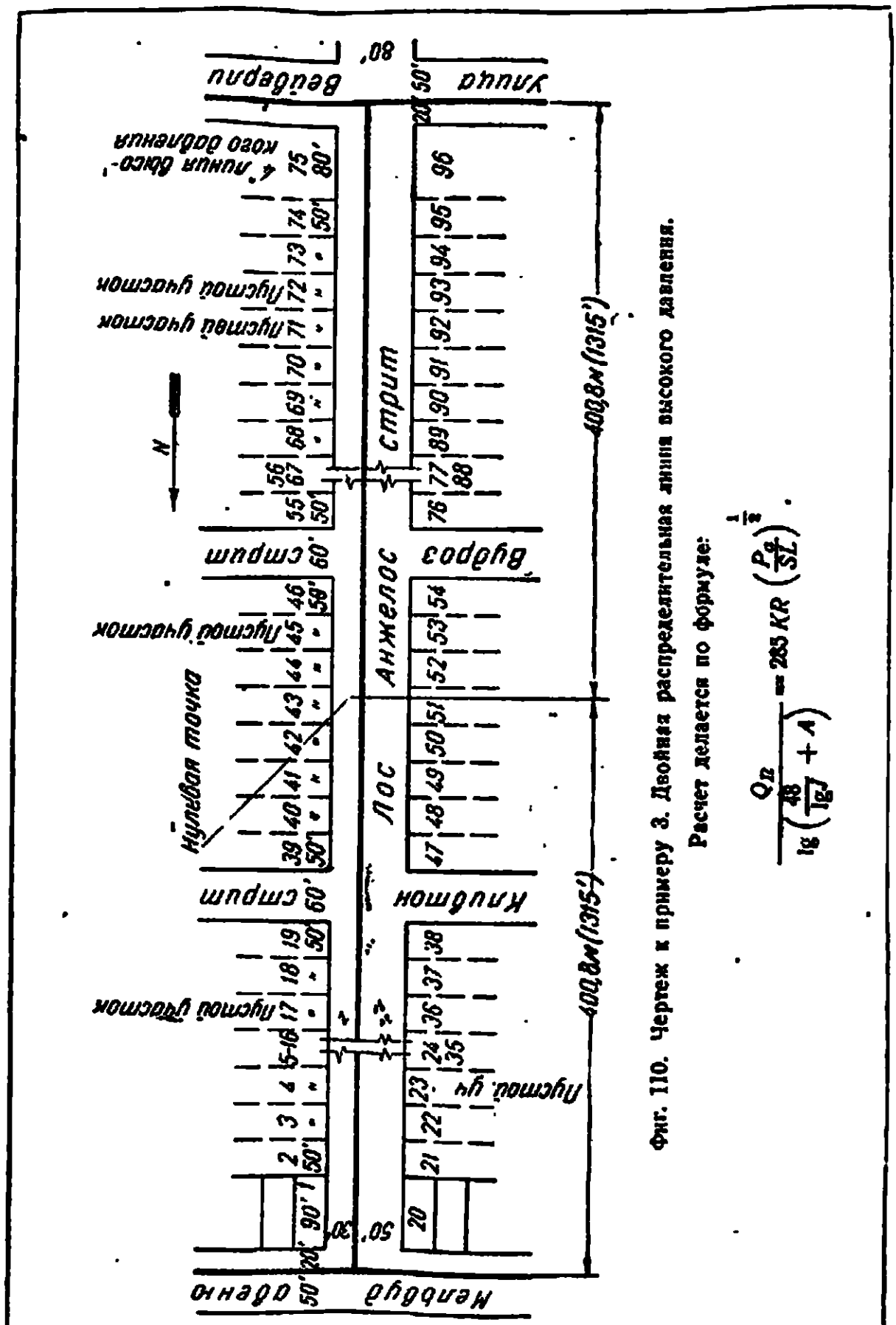
$$K = \frac{Q_R\,(SL)^{\frac{1}{2}}}{\lg\left(\frac{48}{\lg J} + A\right)11Rh^{\frac{1}{2}}}.$$

По фиг. 109 $n = 9$, расстояние до аппаратов 130 *м*, а по табл. 108 $R = 39{,}6\,(1{,}5993)$; отсюда:

$$K = \frac{81{,}5\,(0{,}7 \cdot 188{,}7)^{\frac{1}{2}}}{\lg\left(\frac{48}{\lg 1\,000} + 72\right) \cdot 11 \cdot 1{,}5993 \cdot (25{,}4)^{\frac{1}{2}}} = 4{,}65.$$

По табл. 107 можно видеть, что величина K лежит в пределах между 3,675 для трубы в 2″ и 6,015 для трубы в $2\frac{1}{2}$″. Таким образом, верным решением в этом случае будет труба диаметром $2\frac{1}{2}$″.

Пример 3. *Двойной распределительный трубопровод.* Предположим, что имеющийся 4-дюймовый трубопровод, проложенный несколько лет назад, необходимо заменить вследствие сильной изъеденности труб (схема линии показана на фиг. 110). Какой диаметр должен иметь газопровод для замены старого?



Фиг. 110. Чертеж к примеру 3. Двойная распределительная линия высокого давления.

Расчет делается по формуле:

$$\frac{Q_{12}}{\lg\left(\frac{48}{\lg J}+A\right)}=285\,KR\left(\frac{P_{\phi}}{SL}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Данные:

1) старый газопровод обнаруживает признаки серьезной порчи;
2) улица, через которую прокладывается новый газопровод, должна быть покрыта усовершенствованной мостовой; поэтому замену старого газопровода новым нужно произвести до мощения улицы;
3) до решения проложить новую линию вместо старой, участок, через который она должна проходить, был предназначен для строительства домов на продолжительное время;
4) из всех 96 участков, предназначенных для строительства, только 5 не застроены;
5) старая линия имеет длину около 4 *км*, и газ подается в нее с двух концов;
6) предполагается повышенное давление;
7) с каждой стороны улицы подается газ повышенного давления с удельным весом 0,7 и с теплотворной способностью 9900 *Кал/м*³;
8) до переустройства уличной магистрали здесь были 403 газовых прибора, снабжавшихся от указанного трубопровода.

Предположения:

1) нагрузка линии рассчитана исключительно на снабжение квартир, почему при проектировании должен быть учтен фактор одновременности;
2) на каждом участке предполагается иметь один дом;
3) участки *17*, *23*, *45*, *71* и *72*, которые в настоящее время пустуют, будут иметь 20 приборов с нагрузкой присоединенной к ним ветки максимум 29 *м*³/*час*, когда дома будут построены;
4) будут установлены всего 423 прибора с максимальным расходом 480 *м*³/*час*;
5) питательные коллекторы, находящиеся у обоих концов улицы, будут подавать достаточное количество газа при давлении в 0,35 *ат* (5 фун.) по манометру;
6) газ, входящий в линии с двух сторон, будет проходить к точке, расположенной на полпути между точками входа; расстояние прохода — около 400 *м*;
7) а) на северной стороне магистрали имеются 211 приборов с максимальным возможным расходом 240 *м*³/*час*;
б) на южной стороне магистрали имеются 212 приборов с максимальным возможным расходом 250 *м*³/*час*;
8) потеря давления между конечными пунктами линии составляет 0,067 *ат* (670 *мм* водяного столба), причем средняя точка трубопровода соответствует принятым правилам хорошего обслуживания;
9) давление по барометру составляет 76 *см* Hg;
10) предел допустимого риска составляет не меньше $J = 1000$.

Решение. Подставляя полученные величины в формулу (5), получаем:

$$K = \frac{Q_R\,(SL)^{\frac{1}{3}}}{\lg\left(\frac{48}{\lg J} + A\right) \cdot 285 R\,(Pa)^{\frac{1}{2}}}.$$

Принимая по фиг. 110 (северное направление) $n = 24$, а из таблицы 108 $K = 1{,}6796$, получаем:

$$K = \frac{236{,}2\,(0{,}7 \cdot 400{,}8)^{\frac{1}{3}}}{\lg\left(\frac{48}{\lg 1\,000} + 211\right) \cdot 285 \cdot 1{,}6796 \cdot 1{,}15} = 3{,}2.$$

По табл. 108 можно видеть, что величина K находится в пределах 1,816 для $1^1/_2$-дюймовой и 3,675 для 2-дюймовой линии; поэтому наиболее правильным решением нужно признать 2-дюймовую линию.

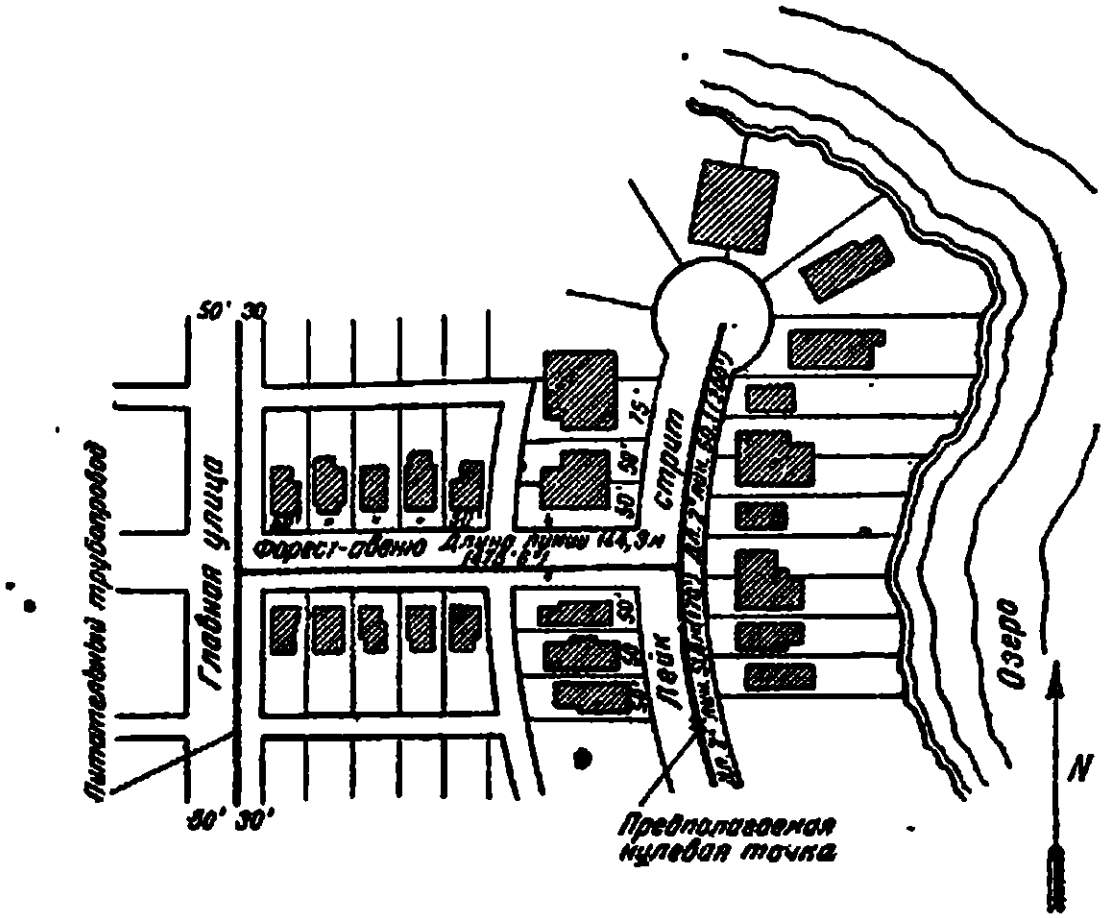
Равным образом, если считать южное направление, то K будет равно 3,145; наиболее правильным решением для этого участка распределительной линии будет диаметр в $2^{"}$.

Пример 4. *Распределительный фидер.* Предположим, что улица Форест Авеню, между главной улицей и Лейкстрит (фиг. 111), нивелируется и покрывается постоянной мостовой. По схеме планировки улицы придется сделать зна-

чительную планировку, вследствие чего потребуется заменить 6-дюймовую линию низкого давления. Какого диаметра должна быть вновь прокладываемая линия?

Данные:

1) линия требует замены;
2) улица, выходящая на Лейкстрит, сильно населена, и на ней очень скученные участки;
3) на улице свободных участков нет;



Фиг. 111. Чертеж к примеру 4. Пятательный распределитель.

Расчет сделан по формуле:

$$Q_E = 11\ K\left(\frac{h}{SL}\right)^{\frac{1}{2}},$$

где

$$Q_E^2 = \frac{Q^2 + Q_1^2}{R^2} + \frac{QQ_1}{3}\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) - \frac{Q_1^2}{n}.$$

4) улица Форест Авеню длиной 152 *м*;
5) предполагается линия низкого давления;
6) на Мэйнстрит имеется большая магистраль, проводящая газ с удельным весом 0,7 и теплотворной способностью 9900 *кал/м*³;
7) обследование показало: а) на Форест Авеню, между Мэйнстрит и Лейкстрит, имеются 59 приборов с наибольшим возможным расходом 116,2 *м*³/*час* газа; б) на Лейкстрит, начиная от Форест Авеню до точки нулевой скорости, имеются 23 газовых прибора с максимальным возможным потреблением 2,21 *м*³/*час* газа (795 куб. фут.); в) на Лейкстрит, к северу от Форест Авеню, имеются 33 прибора с максимальным потреблением 31 *м*³/*час* газа 1100 куб. фут.).

Предположения:

1) линия рассчитана исключительно на бытовое потребление, и, следовательно, при проектировании должен быть учтен фактор одновременности;
2) на улице не будет никаких новых построек;
3) проект предусматривает низкое давление;
4) газ, передаваемый к югу от Лейкстрит, достигнет нулевой точки на расстоянии 51,8 *м* (170 фут.) от линии на Форест Авеню; другие вычисления показали, что остаток газа на Лейкстрит, к югу от Форест Авеню, пойдет в северном направлении до нулевой точки и оттуда к ближайшему питающему трубопроводу с юга;
5) потеря давления между главной магистралью и последним потребителем по пути газа — 25,4 *мм* водяного столба, что является условием хорошего обслуживания;
6) барометрическое давление в этом месте составляет 76 *см* Hg;
7) предел допустимого риска не меньше, чем $J = 1000$.

Решение. Как сказано выше, предполагается питание потребителей газом под низким давлением; следовательно, сюда подходит уравнение (6). Однако предварительно необходимо определить потерю давления в распределительных линиях, куда газ подходит от главной магистрали. Для этого необходимо выразить уравнение (4) в величинах h:

$$h = \left[\frac{Q_R (SL)^{\frac{1}{2}}}{\lg\left(\frac{48}{\lg J} + A\right) 11\, KR} \right]^2.$$

Выбирая распределитель на Лейкстрит, идущий от Форест Авеню к северному концу линии, и обращаясь к фиг. 111, увидим, что диаметр трубы составляет 2″, а $n = 6$. Тогда, подставляя, получаем:

$$h = \left[\frac{31{,}2\,(0{,}7 \cdot 61)^{\frac{1}{2}}}{\lg\left(\frac{48}{\lg 1\,000} + 33\right) \cdot 11 \cdot 3{,}675 \cdot 1{,}5407} \right]^2 = 3{,}734.$$

Выбирая распределитель на Лейкстрит, на том участке, который проходит от Форест Авеню к югу до нулевой точки, и обращаясь к фиг. 111, видим, что диаметр трубы составляет 2″, а $n = 3$.

Подставляя, получаем:

$$h = \left[\frac{22{,}135 \cdot (0{,}7 \cdot 51{,}7)^{\frac{1}{2}}}{\lg\left(\frac{48}{\lg 1\,000} + 23\right) \cdot 11 \cdot 3{,}675 \cdot 1{,}3887} \right]^2 = 2{,}62.$$

Выбирая распределитель с наибольшей потерей давления — 3,73 *мм* (0,147″) — и вычитая эту потерю из всей допустимой потери в 25,4 *мм* (1″), находим, что распределительный коллектор на Форест Авеню будет иметь потерю давления не более 21,74 *мм* (0,853″).

Выражая уравнение (6) через K и подставляя значение Q_R из уравнения (9), получаем:

$$K = \frac{\left[\frac{Q^2 + Q_1^2}{R^2} + \frac{QQ_1}{3}\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) - \frac{Q_1^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}} (SL)^{\frac{1}{2}}}{11 \cdot 25{,}4\, h^{\frac{1}{2}}}.$$

Однако проектную нагрузку нужно высчитывать как для Q, так и для Q_1; отсюда, пользуясь уравнением (11), получим следующие уравнения:
для Q:

$$D_L = \frac{169{,}52}{\lg\left(\frac{48}{\lg 1\,000} + 115\right)} = 80{,}06;$$

для Q_1:

$$D_{L_1} = \frac{53{,}34}{\lg\left(\frac{48}{\lg 1000} + 56\right)} = 28{,}72.$$

На основании фиг. 111 число отводов у распределительного коллектора составляет 6, а $R^2 = 2{,}3736$ (по табл. 108).

Подставляя, получаем:

$$K = \frac{\left[\frac{80{,}06^2 + 28{,}72^2}{2{,}3736} + \frac{80{,}06 \cdot 28{,}72}{3} \cdot \left(1 - \frac{1}{6^2}\right) - \frac{28{,}72^2}{6}\right]^{\frac{1}{2}} \cdot (0{,}7 \cdot 144{,}8)^{\frac{1}{2}}}{11 \cdot (25{,}4)^{\frac{1}{2}}} = 11{,}88.$$

Обращаясь к табл. 107, находим, что вычисленное значение $K = 11{,}88$ находится между величинами 10,94 для 3-дюймовой трубы и 16,24 для трубы в 3,5"; поэтому должна быть выбрана труба большего диаметра (3,5"), что и явится правильным решением.

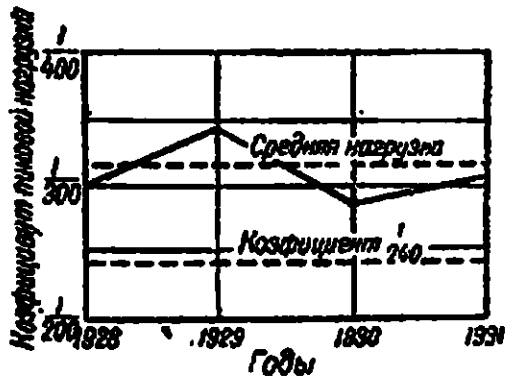
Для проверки может быть применена формула (10). Подставляя вместо букв соответствующие числа и решая для K, получаем:

$$K = \frac{\left(\frac{80{,}06^2 + 28{,}72^2}{2{,}3736} + \frac{80{,}06 \cdot 28{,}72}{3}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (0{,}7 \cdot 144{,}8)^{\frac{1}{2}}}{11 \cdot (25{,}4)^{\frac{1}{2}}} = 12{,}14,$$

что в конечном счете разницы не составит. Однако иногда разница может быть достаточно велика; в этом случае при выборе диаметра надо исходить из имеющихся условий.

Дополнительные данные

Нагрузка. В практике последних лет принято рассчитывать нагрузку линии скорее на основе пиковой часовой нагрузки и выработки газа на заводе, чем на основе данных потребления газа аппаратами у потребителей и их расчетной мощности. Такой способ имеет решительное преимущество. Месячные данные о расходе газа на заводе и данные о снабжении потребителей можно легко получить, не связываясь совершенно с потребителем; с другой стороны, такие расчетные данные, которые выводятся на основании факторов пиковой часовой нагрузки, не являются достаточно гибкими и не могут быть с уверенностью использованы тогда, когда рассчитывается снабжение небольших групп потребителей.



Фиг. 112. Коэффициент пиковой часовой нагрузки, основанной на максимальном месячном расходе газа.

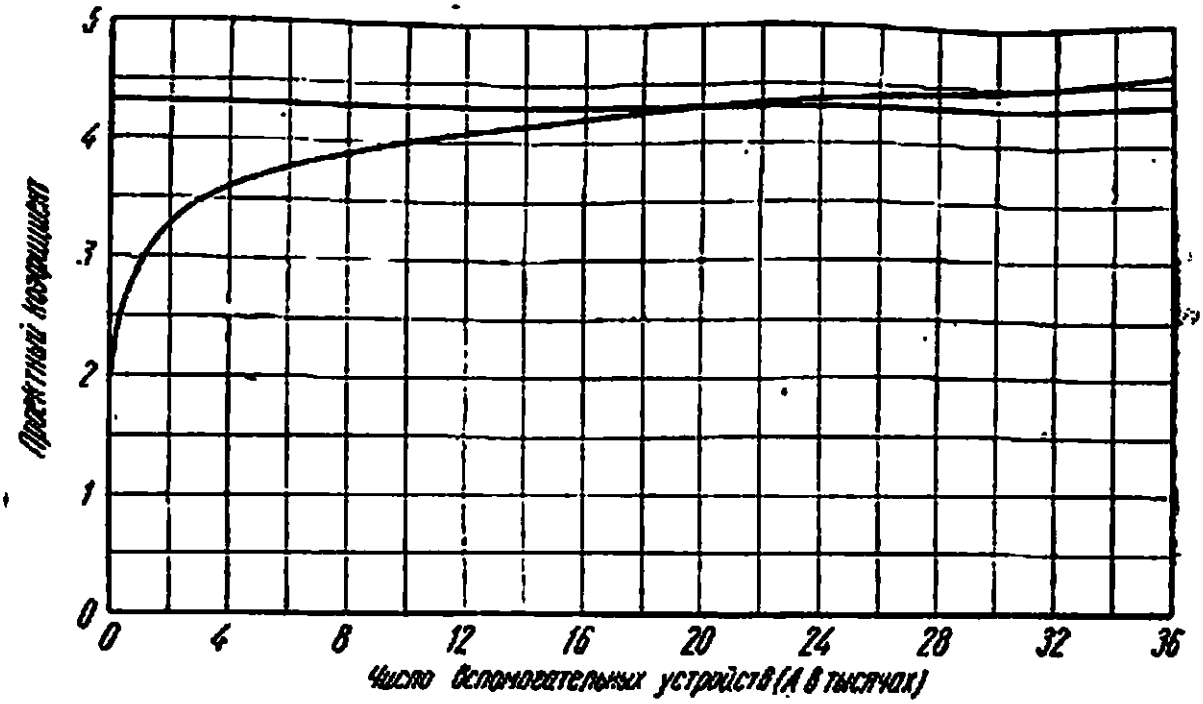
Часовая пиковая нагрузка. Часовая пиковая нагрузка выводится путем вычисления отношения максимального часового расхода к максимальному месячному расходу газа на заводе; так как условия в смысле суровости климата зимой меняются из года в год, то лучше всего вычислять среднюю за пятилетний период и увеличить ее еще на некоторую величину для надежности.

Так, например, установлено, что часовой расход газа на заводах газовой и электрической корпорации Лос-Анжелоса во время наибольшей часовой нагрузки составляет $\frac{1}{310}$ максимального месячного расхода. Этот коэффициент заменили коэффициентом $\frac{1}{240}$ (увеличили коэффициент надежности) (фиг. 112).

Практический расчет. При определении часовой пиковой нагрузки по отчетам последнего зимнего месяца максимальная нагрузка складывается и делится на 240 согласно формуле (14):

$$D_L = \frac{Q_m}{240}.$$

Полученная таким способом величина D_L используется для вычислений по формулам точно так же, как и в том случае, когда она выведена на основании расхода газа потребителями.



Фиг. 113. Отношение между эмпирическим фактором одновременности и коэффициентом пиковой нагрузки $\frac{1}{240}$.

1 — кривая построена на основании формулы:

$$D_L = \frac{Q_R}{\lg\left(\frac{48}{\lg J} + A\right)};$$

2 — кривая построена на основании формулы:

$$D_L = \frac{Q_m}{240},$$

где Q_R — расчетная нагрузка на все приборы;
Q_m — месячное потребление газа.

Сравнение факторов, имеющих место при проектировании газопроводов. На фиг. 113 приведены кривые, определяющие предел допустимых условий при проектировании линий с учетом данных уравнения (12); здесь можно видеть, что при небольшом количестве газовых приборов показатель, основывающийся на уравнении (12), указывает значительно больший фактор одновременности, чем те, которые имеют место при рациональном определении пределов риска. Производить расчет по уравнению (14) не рекомендуется в том случае, если число потребителей меньше 100.

Движение газа по газопроводной сети. Если движение газа от места его подачи до пункта спроса происходит более чем по одному направлению, например в том случае, когда приходится подавать газ по целой сети трубопроводов, то ясно, что газ будет итти по такому пути, где сопротивление, связанное с потерей давления, меньше. Обычно бывает трудно определить на-глаз, где движе-

ние газа испытывало бы наименьшее сопротивление; поэтому подсчет газопровода с сетью ответвлений приходится производить приближенно, считаясь с возможностью ошибок.

Для расчета сети ответвлений нельзя установить здесь определенных правил расчета. Обычно намечают произвольно нулевые точки и производят полный расчет, пользуясь различными изменяемыми и неизменяемыми уравнениями газового потока. Такие расчеты продолжают до тех пор, пока нулевые точки удастся разместить так, что потери давления до любой нулевой точки по любому направлению, начиная от источника подачи газа до рассматриваемой нулевой, будут приблизительно одинаковы.

Сравнение экономической выгодности высокого и низкого давления. Выбор при проектировании линии высокого или низкого давления должен быть основан на тщательном анализе многочисленных факторов; в общем же, можно сказать, что для снабжения потребителей в том случае, когда их приходится меньше 100 на 1 *км* (или меньше 150 потребителей на милю), более выгодной является линия высокого давления. Если число потребителей превышает 100 на 1 *км*, то линия низкого давления экономически выгоднее.

ТАБЛИЦЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ПРОКЛАДКЕ ТРУБОПРОВОДОВ

Почвы, встречающиеся при копке канав, могут быть разделены на две основные группы: 1) мягкая почва, содержащая песок и ил, которая разрыхляется по объему на 20% и 2) твердая глина, выветрившиеся горные породы, могущие разрыхляться по объему на 35%; скалистый грунт может разрыхляться до 50%.

В табл. 110 приведены данные по канавам соответственно этим двум группам с углом уклона в 33° и отношением глубины к ширине канавы 1 : 3.

Всю извлеченную из канав землю, если она достаточно влажная, вновь засыпают в канаву за исключением того количества, которое вытеснено объемом трубы. Этот объем показан в табл. 111 для почвы обеих групп.

В табл. 112 приводится различная ширина канавы соответственно различным диаметрам труб.

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ДЛИНЫ ТРУБ, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ФИТИНГАМ И ДРУГИМ СОЕДИНЕНИЯМ

(выраженные в величинах добавочных длин труб того же диаметра)

Эквивалентные длины для отводов и поворотных колен. Они вычисляются по следующей формуле (Spitzglass'a):

$$L_e = \frac{22{,}47\,D}{1 + \frac{3{,}6}{D} + 0{,}03\,D},$$

где L_e — эквивалентная длина прямой трубы в *м*;
D — действительный внутренний диаметр в дм.

Для разных диаметров эквивалентные длины выражаются величинами следующей таблицы:

Диаметр в дм.	Эквивалентная длина в *м*	Диаметр в дм.	Эквивалентная длина в *м*
1/2	0,183	3 1/2	3,352
3/4	0,366	4	4,267
1	0,488	5	5,486
1 1/4	0,793	6	7,010
1 1/2	1,037	8	9,753
2	1,554	10	12,497
2 1/2	2,041	12	15,240
3	2,835		

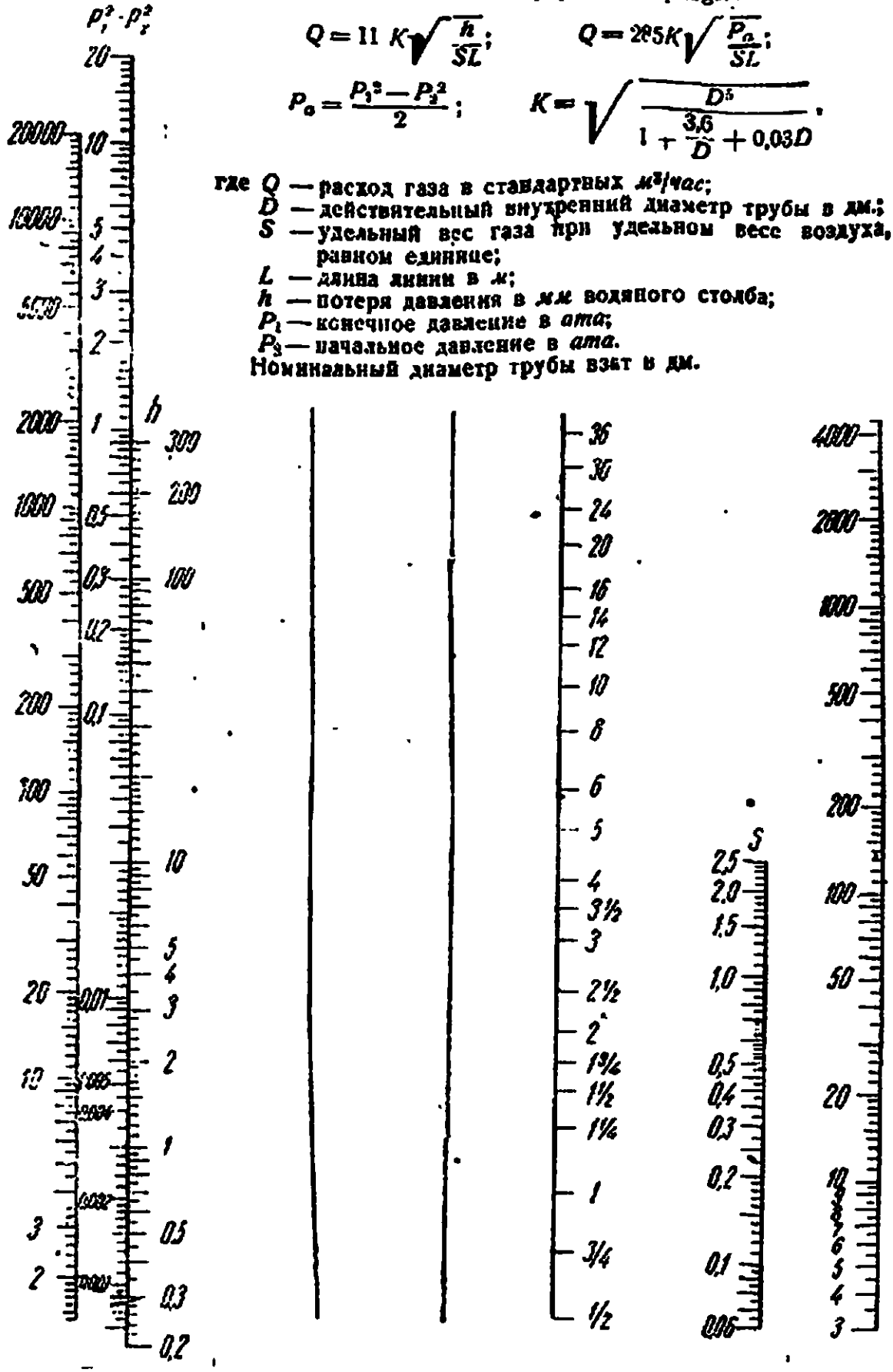
При вычислении эквивалентной длины шаровых клапанов приводимые выше величины нужно увеличить на 50%.

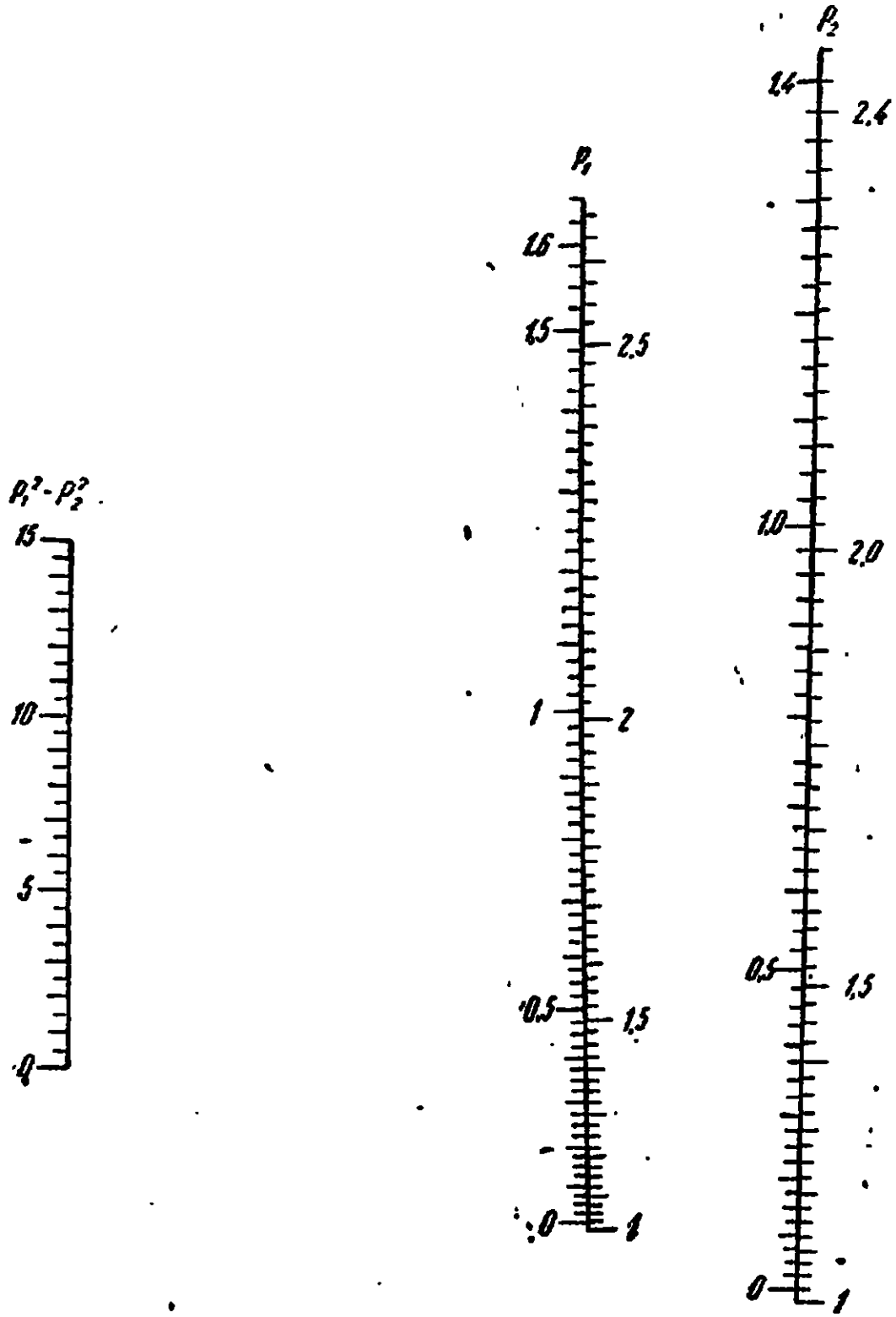
Фиг. 114. Номограмма газового потока в распределительных линиях по формулам Spitzglass'a:

$$Q = 11\,K\sqrt{\frac{h}{SL}}; \qquad Q = 285K\sqrt{\frac{P_a}{SL}};$$

$$P_a = \frac{P_1^2 - P_2^2}{2}; \qquad K = \sqrt{\frac{D^5}{1 + \frac{3{,}6}{D} + 0{,}03D}}.$$

где Q — расход газа в стандартных $м^3/час$;
D — действительный внутренний диаметр трубы в $дм$.;
S — удельный вес газа при удельном весе воздуха, равном единице;
L — длина линии в $м$;
h — потеря давления в $мм$ водяного столба;
P_1 — конечное давление в $ата$;
P_2 — начальное давление в $ата$.
Номинальный диаметр трубы взят в дм.





Фиг. 115. Номограмма для коэфициента $P_1^2 - P_2^2$ по формуле Spitzglass a и другим формулам газового потока высокого давления.

P_1 и P_2 в *ат.*

Шкалы давления — по манометру; построены, исходя из атмосферного давления в 1 *ат.*

Эквивалентность труб

Величины, вычисленные по формуле Spitzglass'a

Номинальный размер в дм.	Внутренний диаметр в дм.	Номинальный размер в дм.									
		3/8	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4
1/2	0,622	1,00	5,13	20,70	100,00	241,00	987,00	2 640,00	8 740,00	—	—
3/4	0,824	2,26	1,00	4,03	19,50	47,00	193,00	515,00	1 700,00	3 750,00	7 500,00
1	1,049	4,55	2,01	1,00	4,84	11,70	47,70	128,00	423,00	931,00	1 860,00
1 1/4	1,380	10,00	4,42	2,20	1,00	2,40	9,85	26,40	87,30	192,00	393,00
1 1/2	1,610	15,50	6,85	3,41	1,55	1,00	4,09	11,00	36,20	79,90	160,00
2	2,067	31,40	13,90	6,91	3,14	2,02	1,00	2,68	8,86	19,50	39,00
2 1/2	2,469	51,40	22,70	11,30	5,14	3,31	1,64	1,00	3,31	7,28	14,60
3	3,068	93,50	41,30	20,60	9,34	6,02	2,98	1,82	1,00	2,20	4,40
3 1/2	3,548	—	61,20	30,50	13,90	8,94	4,42	2,70	1,48	1,00	2,00
4	4,026	—	86,60	43,10	19,60	12,60	6,24	3,82	2,10	1,41	1,00
5	5,047	—	—	78,50	35,70	23,00	11,40	6,94	3,82	2,57	1,82
6	6,065	—	—	—	58,10	37,40	18,50	11,30	6,22	4,19	2,96
8	7,981	—	—	—	—	76,30	37,70	23,00	12,70	8,53	6,03
10	10,020	—	—	—	—	—	67,20	41,00	22,60	15,20	10,80
12	12,000	—	—	—	—	—	—	64,40	35,40	23,90	16,90
14	14,250	—	—	—	—	—	—	99,20	54,50	36,70	26,00
16	15,532	—	—	—	—	—	—	—	66,80	45,10	31,90
20	19,456	—	—	—	—	—	—	—	—	77,40	54,70
24	23,340	—	—	—	—	—	—	—	—	—	84,20
30	29,136	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Номинальный размер в дм.	Номинальный размер в дм.									
	5	6	8	10	12	14	16	20	24	30
1/2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3/4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	6 160,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1 1/4	1 270,00	3 370,00	—	—	—	—	—	—	—	—
1 1/2	529,00	1 500,00	5 820,00	—	—	—	—	—	—	—
2	129,00	342,00	1 420,00	4 510,00	—	—	—	—	—	—
2 1/2	48,20	128,00	530,00	1 680,00	4 140,00	9 830,00	—	—	—	—
3	14,60	38,60	160,00	509,00	1 250,00	2 970,00	4 570,00	—	—	—
3 1/2	6,62	17,60	72,80	231,00	569,00	1 350,00	2 030,00	5 980,00	—	—
4	3,31	8,78	36,40	116,00	285,00	675,00	1 020,00	2 990,00	7 090,00	—
5	1,00	2,65	11,00	35,90	86,00	204,00	307,00	904,00	2 140,00	6 030,00
6	1,63	1,00	4,15	13,20	32,40	76,90	116,00	341,00	803,00	2 270,00
8	3,32	2,04	1,00	3,18	7,82	18,50	27,90	82,20	195,00	548,00
10	5,91	3,63	1,78	1,00	2,46	5,84	8,78	25,90	61,30	173,00
12	9,27	5,69	2,80	1,57	1,00	2,37	3,57	10,50	24,90	70,10
14	14,30	8,77	4,31	2,42	1,54	1,00	1,50	4,43	10,50	29,60
16	17,50	10,80	5,28	2,96	1,89	1,23	1,00	2,95	6,99	19,70
20	30,10	18,50	9,06	5,09	3,24	2,11	1,72	1,00	2,37	6,67
24	46,30	28,40	14,00	7,83	4,99	3,24	2,64	1,54	1,00	2,81
30	77,70	47,70	23,40	13,10	8,37	5,44	4,43	2,58	1,68	1,00

Цифры ниже 1,0 показывают число труб равной пропускной способности.
Цифры выше 1,0 показывают отношение длин для одной и той же пропускной способности.

Объемы канав

Принят угол 33°

Глубина траншей в *м*	Объем канав в *м*³/100 *м* длины	Размеры при расширении на 20 %		Размеры при расширении на 35%	
		высота в *см*	ширина в *см*	высота в *см*	ширина в *см*
		Канава 8" (20 *см*)			
0,46	8,91	27,94	81,28	27,94	86,36
0,61	11,79	30,48	93,98	33,02	99,06
0,76	14,92	35,56	106,68	38,10	111,76
0,91	17,81	38,10	116,84	40,64	121,92
1,07	20,70	40,64	124,46	43,18	132,08
		Канава 12" (30 *см*)			
0,46	13,48	33,02	99,06	35,56	106,68
0,61	17,81	38,10	116,84	40,64	121,92
0,76	22,38	43,18	129,54	45,72	137,16
0,91	26,72	48,26	142,24	50,80	149,86
1,07	31,29	50,80	152,40	53,34	162,56
		Канава 16" (40 *см*)			
0,76	29,61	50,80	149,35	53,34	157,48
0,91	36,62	53,34	165,10	58,42	172,72
1,07	41,64	58,42	177,80	63,50	187,96
1,22	47,42	63,50	187,96	66,04	200,66
1,37	53,44	66,04	200,66	71,12	213,36
1,52	59,21	71,12	206,74	78,66	223,52
		Канава 18" (46 *см*)			
0,76	33,46	53,34	157,48	55,88	167,64
0,91	40,20	58,42	172,72	60,96	182,88
1,07	46,70	63,50	187,96	66,04	198,12
1,22	53,44	66,04	200,66	71,12	213,36
1,37	60,18	71,12	213,36	76,20	226,06
1,52	66,91	73,66	223,52	78,74	236,76
		Канава 20" (50 *см*)			
0,91	44,53	60,96	182,88	63,50	193,04
1,07	51,99	66,04	198,12	71,12	210,82
1,22	59,45	71,12	210,82	73,66	218,44
1,37	66,91	73,66	223,52	78,74	238,76
1,52	74,14	78,74	236,22	83,82	246,38
1,68	81,84	83,82	248,92	88,90	261,62
		Канава 22" (56 *см*)			
0,91	49,10	63,50	193,04	63,58	203,20
1,07	57,29	68,58	208,28	73,66	220,98
1,22	65,47	73,66	220,98	78,74	233,68
1,37	73,66	78,74	236,22	83,82	246,92
1,52	81,84	83,82	248,92	88,90	261,62
1,68	90,02	88,36	259,08	91,44	274,32
		Канава 24" (61 *см*)			
1,22	71,25	76,20	231,14	81,28	246,38
1,37	80,15	81,28	246,38	86,36	259,08
1,52	89,06	88,36	259,08	91,44	274,32
1,68	97,96	91,44	271,78	96,52	287,02
1,83	107,11	93,98	284,48	99,06	299,72
		Канава 30" (76 *см*)			
1,22	89,06	83,36	259,08	91,44	274,32
1,37	100,37	91,44	274,32	96,52	292,10
1,52	111,44	96,52	289,56	101,60	307,34
1,68	122,52	101,60	302,26	106,68	322,58
1,83	133,83	106,68	317,50	111,76	335,28
		Канава 36" (91 *см*)			
1,37	120,35	99,06	299,72	106,68	320,04
1,52	133,83	106,68	317,50	111,76	335,28
1,68	147,07	111,76	332,74	116,84	353,06
1,83	160,55	116,84	347,98	121,92	368,30
1,98	173,79	119,38	360,68	127,00	383,54
		Канава 40" (100 *см*)			
1,37	123,83	106,68	317,50	111,76	335,28
1,52	148,61	111,76	335,28	119,38	358,60
1,68	163,44	116,84	350,52	124,46	370,84
1,83	178,36	121,92	365,76	129,54	388,62
1,98	193,04	124,46	376,92	132,08	398,78

Таблица 111

Излишек земли для канав различных диаметров труб

Диаметр трубы в дм.	Объем избыточной земли в $м^3$ на 100 м длины канавы			
	Железные трубы		Чугунные трубы	
	разрыхление на 20%	разрыхление на 35%	разрыхление на 20%	разрыхление на 35%
2	0,24	0,24	—	—
3	0,72	0,72	0,96	0,96
4	1,20	1,44	1,44	1,68
6	2,65	2,89	2,89	3,13
8	4,33	4,81	4,81	5,54
10	6,74	7,70	7,22	8,18
12	9,39	10,59	11,79	13,24
16	14,92	16,85	18,05	20,22
20	23,35	26,24	27,44	31,05
24	33,70	37,79	39,23	44,29
30	52,47	59,21	59,45	66,91

Таблица 112

Ширина канав в зависимости от диаметра труб

Диаметр трубы в дм.	Ширина канавы в см		
	по L. A. G. & E. Corp.	по J. J. Morgan, т. II	по U. G. Imp. Co.
Обслуж. трубопровод	20,32—30,48	—	—
2	40,64	45,72—55,88	50,80
3			
4			
6	45,72	45,72—60,96	55,88
8	45,72	45,72—66,04	60,96
10	45,72	—	—
12	50,80	55,88—76,20	76,20
16	55,88	66,04—91,44	88,90
20	60,96—76,20	—	101,60
24	91,44	91,44—106,68	111,76
30	101,60	106,68—121,92	127,00

Эквивалентная длина отводов большого радиуса определяется по формуле:

$$L_0 = 12{,}85\, L \left(\frac{r}{R}\right)^{0{,}93},$$

где r — радиус трубы;
R — радиус отводов в тех же величинах, что и радиус трубы;
L — длина отвода, измеряемая по длине оси трубы, в *м*;
L_0 — эквивалентная длина отрезка прямой трубы в *м*.
Эквивалентные длины прямых труб приводятся в табл. 113.

Таблица 113

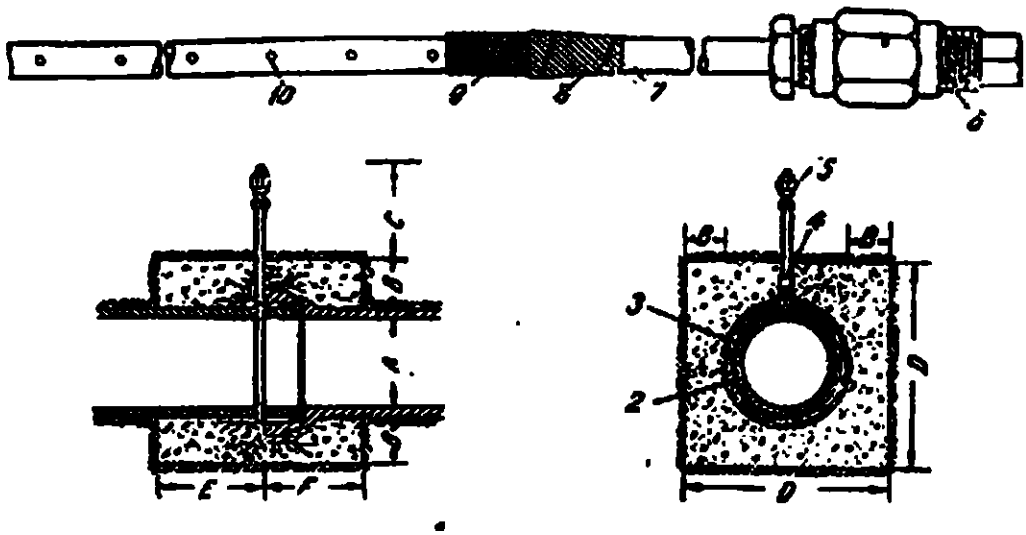
Эквивалентные длины для кранов

Диаметр крана в дм.	Эквивалентная длина в *м*	Диаметр крана в дм.	Эквивалентная длина в *м*
3/4	0,854	2	4,260
1	1,280	2 1/2	5,486
1 1/4	2,102	3	7,315
1 1/2	2,740	4	11,277

Примечание. Вычислено по формуле Spitzglass'a.

НОВЫЙ МЕТОД ИСПРАВЛЕНИЯ УТЕЧЕК ИЗ РАСТРУБОВ (ANTILEKE PIPE JOINT) ЧУГУННЫХ ТРУБ

При этом методе медная труба диаметром в 1" с отверстиями, расположенными на расстоянии около 25 *мм* друг от друга (фиг. 116), обернутая пористой бумажной тканью, прокладывается по окружности раструба отверстиями к раструбу и



Фиг. 116. Поперечный разрез герметического соединения, где видна гипо-трубка, уложенная в бетон.

1 — медная трубка; *2* — обмотка из хлопчатобумажной материи; *3* — отверстия трубки (должны быть повернуты к раструбу); *4* — лента; *5* и *6* — пробка, закрывающая трубку; *7* — медная трубка; *8* — ленты; *9* — обмотка из хлопчатобумажной материи; *10* — отверстия в трубке.

затем заливается раствором быстро схватывающего цемента (могущего давать крепость в 3000 фун/кв. дм на сжатие через 28 дней после заливки). После того как цемент затвердел, в трубку сверху специальным прибором нагнетают мыльный раствор густоты мягкого сала. При этом мыло проникает вокруг трубки и реагирует с известью цемента, образуя стеарат кальция, который затвердевает вместе с цементом и делает его не проницаемым для газа и воды. При пробе, сделанной в 1933 г., соединение оставалось герметичным при давлении 20 фун. в течение 52 дней при постоянном токе воды и больших колебаниях температуры.

ЧУГУННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ТРУБ

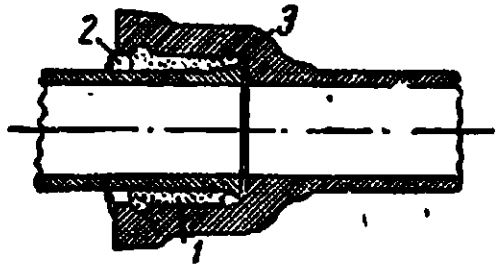
До последних лет цементная заделка раструбных соединений (фиг. 117), а также их заливка свинцом применялись почти исключительно в газопроводах с чугунными трубами. Цементная заделка применялась также в раструбном соединении, имевшем форму конуса, внутренний диаметр которого был больше наружного.

Таблица 114

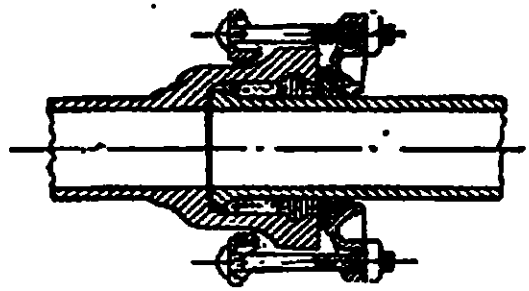
Диаметр линии, диаметр гипо-трубки и количество потребного бетона

№ труб	Номинальный диаметр труб в дм.	Размеры в дюймах						Требуемое количество цемента в $м^3$
		A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	
1	3	4,0	5	4	14	9	8	0,05
1	4	5,0	6	4	17	9	8	0,08
2	6	7,1	6	4	19	9	8	0,09
3	8	9,3	6	4	21	9	8	0,12
4	10	11,4	8	4	27	10	9	0,21
5	12	13,5	8	4	30	10	9	0,23
6	14	15,6	8	4	32	10	9	0,26
7	16	17,8	10	4	38	11	10	0,42
7	18	19,9	10	4	40	11	10	0,46
8	20	22,0	10	4	42	11	10	0,48
8	22	24,1	11	4	46	11	10	0,57
8	24	26,3	11	4	48	12	11	0,67
9	26	28,3	11	4	50	12	11	0,71
9	28	30,4	11	4	52	12	11	0,75
9	30	32,4	12	4	56	12	11	0,87
10	32	34,5	12	4	58	13	12	1,00
10	34	36,6	12	4	61	13	12	1,05
10	36	38,7	12	4	63	13	12	1,08

Цемент, свинец и комбинация того и другого в раструбном соединении были вполне удовлетворительны во многих случаях при распределении газа с большим



Фиг. 117. Заделка раструбов бетоном.
1 — цемент; *2* и *3* — пряжа.

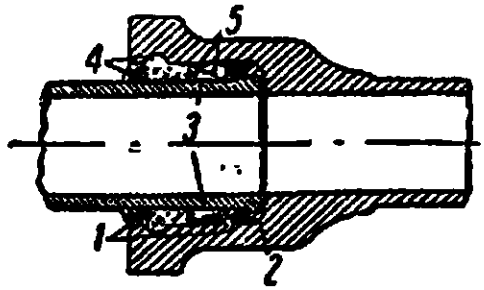


Фиг. 118. Заглушка утечки с каучуковой прокладкой.

содержанием в нем влаги под низким давлением. Однако было найдено, что на цементное соединение нельзя рассчитывать при распределении сухого газа под давлением выше 250 *мм* водяного столба, а обычное свинцовое соединение неудовлетворительно, независимо от давления или от качества газа.

Во многих случаях было необходимо устранять течь в раструбах, применяя зажимное устройство (фиг. 118), которое дает очень хорошие результаты.

Хорошие устройства при давлении до 1,5 *ат* получаются, если в раструбном соединении применяются каучуковые кольца. Такое устройство показано на фиг. 119. Следует обратить внимание на то, чтобы кольца были введены встык внутрь и закреплены цементом. Вместо цемента можно заливать свинцом, но в этом случае стык обойдется дороже. В этом случае цемент действует как



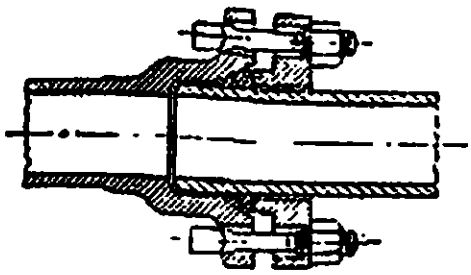
Фиг. 119. Стык с каучуковыми кольцами, могущий выдерживать давление до 1,76 *ат* (25 фун.).

1 — джутовая прокладка; *2* — пряжа; *3* — водонепроницаемое цементное покрытие, *4* — цемент; *5* — каучуковые кольца.

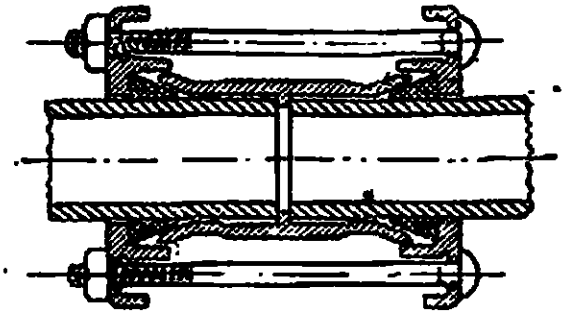
нажимная втулка сальника, которая удерживает каучуковые кольца прочно на месте.

На фиг. 120 и 121 показаны два типа механических соединений, которые хороши для высоких давлений и применялись с успехом при давлениях в несколько десятков атмосфер.

Главные части соединения, показанные на фиг. 120, могут быть отлиты в литейной независимо от труб. Этот тип выполняется разными заводами по-разному, и части одного завода могут не подходить к частям другого.



Фиг. 120. Раструбное соединение, рассчитанное на высокое давление.



Фиг. 121. Соединение муфтой, рассчитанное на высокое давление. Стык при прямых концах труб.

Однако стык, показанный на фиг. 121, можно применять для соединения труб с прямыми концами, сделанными в любой литейной.

В соединениях обоих типов каучуковая прокладка или кольца втискиваются на место при помощи болтов.

Таблица 115

Материалы, требуемые для стыков чугунных труб

Диаметр трубы в дм.	Толщина слоя свинца в дм.	Количество требуемого свинца в кг	Количество требуемого цемента в кг	Количество потребной пряжи в кг	
				со свинцом	с цементом
4	1 1/2	2,72	10,16	0,14	0,06
6	1 5/8	4,08	15,24	0,21	0,13
8	2	5,44	16,51	0,25	0,14
12	2 1/4	9,97	29,21	0,40	0,28
16	2 1/2	16,31	41,91	0,62	0,38
20	2 1/2	22,65	60,96	1,25	0,45
24	2 3/4	28,09	76,20	1,61	0,59
30	3	33,98	88,90	1,90	0,73

Таблица 116

Материалы, требуемые для заделки раструбов

Диаметр трубы в дм.	Количество свинца на один стык в кг	Количество пеньки на один стык в кг	Диаметр трубы в дм.	Количество свинца на один стык в кг	Количество пеньки на один стык в кг
4	3,69	0,10	20	18,70	0,63
6	5,12	0,15	24	22,23	0,76
8	6,60	0,22	30	27,21	1,03
10	8,00	0,27	36	32,42	1,50
12	9,45	0,30	42	37,66	1,81
16	12,32	0,47	48	46,49	2,36

ИНДИКАТОРЫ УТЕЧКИ ГАЗА

Газовые индикаторы применяются для обнаружения утечек в газопроводах и для определения содержания газа в колодцах уличных сооружений или же в других закрытых местах, в которые возможно попадание газа.

Если количество газа достаточно для образования взрывчатых смесей, то всегда можно бояться воспламенения их и взрыва. Для устранения этой опасности необходим переносный индикатор концентрации смеси, при помощи которого можно было бы обследовать указанные выше закрытые места.

В США применяется несколько типов индикаторов, которыми можно определить утечку газа и концентрацию газовой смеси, опасной в смысле взрыва и воспламенения. Описание важнейших из этих приборов дается ниже.

Прибор Шотта и Месана. Этот прибор представляет собой небольшой цилиндрический сосуд, работающий на принципе диффузии газа. Задняя часть сосуда состоит из пористой диафрагмы, которая соединяется с камерой, закрытой с одной стороны металлической диафрагмой, напоминающей те, которые употребляются в анероидных барометрах. При помощи цепного соединения диафрагма приводит в действие показатель — стрелку, двигающуюся по градуированной шкале спереди прибора. Градуировка имеет целью сравнительный замер. Прибор показывает наличие газов, как тех, которые легче, так и тех, которые тяжелее воздуха, отклоняя стрелку в ту или другую сторону в зависимости от удельного веса газа. Для того чтобы установить утечку в подземных трубах, в месте предполагаемой утечки вырывают небольшую ямку и устанавливают прибор над этой ямкой пористой диафрагмой вниз. По своему характеру прибор недостаточно точен, но он может быть применен с пользой тогда, когда нужно получить ориентировочные результаты замера; он хорош также для контроля других приборов. Прибор портативный, и для пользования им не требуется каких-нибудь устройств в роде батарей, а также не требуется жидкого топлива.

Метановая лампа. Эта лампа в качестве индикатора утечки или наличия газовой смеси пригодна только там, где достаточны приблизительные данные, а также для проверки других приборов. В этой лампе небольшое пламя горит в стеклянном цилиндре, который открыт для доступа воздуха через трехслойную предохранительную сетку и протектор. Горение пламени поддерживается фитилем, подводимым снизу из резервуара; высоту пламени можно регулировать. Когда лампу помещают в атмосферу, содержащую метан или другой горящий газ, то высота пламени увеличивается соответственно количеству имеющегося горючего газа. Если концентрация воспламеняющейся смеси находится выше нижнего предела воспламенения и взрыва, то получится легкий взрыв, и пламя будет потушено. Если лампу поместить в атмосферу, содержащую углекислый или какой-нибудь другой негорючий газ, содержащийся в атмосфере в достаточном количестве, то высота пламени уменьшится, и если концентрация газа достаточно высока, то оно потухнет, но без взрыва. По изменению высоты пламени можно судить о количестве горючих газов.

Индикатор газа J-W. В основу устройства этого индикатора положен принцип измерения количества тепла, получающегося при окислении газа воздухом на поверхности нагретой платиновой проволоки. Количество тепла измеряется при этом по изменению электропроводности проволоки. Гальванометр (индикатор) отмечает изменение электропроводности плеча мостика Уитстона. Проволока, соприкасающаяся с испытуемым газом, является одной из четырех веток мостика, причем противоположная ей ветка запаяна в стеклянную трубку, наполненную воздухом. Эта вторая проволока компенсирует некоторые небольшие изменения напряжения, изменения в температуре, а равным образом в инструменте и в окружающем его воздухе. Другие две ветви мостика содержат равные и постоянные сопротивления. Проволоки накаляются докрасна двумя сухими элементами № 6. Изменения напряжения в батарее компенсируются реостатом, причем вольтметр включен так, что можно поддерживать надлежащее напряжение в мостике, а следовательно, и температуру проволоки; однако колебания напряжения в ту или другую сторону на 5% не окажут заметного влияния на точность инструмента.

При работе испытываемый газ помещают за нагретой проволокой в аспираторной колбочке, причем обратную вспышку предупреждают при помощи специальных гасителей. Проволока должна быть нагрета до достаточной температуры, чтобы любой газ, который будет испытан, мог воспламениться. Газ сгорает на поверхности проволоки, увеличивая ее температуру, а следовательно, и сопро-

тивление, в результате чего нарушается равновесие тока, идущего в мостике, что отмечается показаниями гальванометра.

Температурный эффект сгорания газа и объемный процент содержания газа в газовой смеси при низшем пределе взрывчатости для всех промышленных газов практически могут считаться постоянными; поэтому гальванометр можно проградуировать в процентах взрывчатости или горючести газа, и такой способ калибровки является подходящим почти для любого вида газа или газовой смеси. Показания гальванометра будут невелики в том случае, когда горючий газ содержит в большом количестве водород, ацетилен или сероуглерод.

Шкала гальванометра градуирована от нуля до 1,2 в десятых долях, причем 1,0 будет низшим пределом взрывчатости. Выше этой точки шкала — красная; начиная от 0,2 до 1,0 она желтая.

Если смесь слишком богата, чтобы гореть, то стрелка счетчика вначале отклоняется вправо до тех пор, пока воздух в индикаторе и в шланге не будет израсходован, затем опускается до нуля и остается на этом уровне.

Прибор не показывает процента содержания горючего газа в смеси. Эту цифру можно получить из таблицы, если известен состав пробы. Для каждого газа необходима отдельная таблица.

Индикатор горючего газа образца UCC. Этот прибор работает по тому же принципу, что и предыдущий — J-W. Механическая конструкция его отлична от предыдущего, так как он состоит из трех отдельных частей. Одна часть содержит четырехвольтовую аккумуляторную батарею, которая применяется вместо сухих элементов; вторая содержит индикатор и регулирующее приспособление, причем шкала счетчика градуирована от 0 до 50 при низшем пределе взрывчатости 40. Третья часть составляет детектор, содержащий нагретую платиновую проволоку, защищенную тройной предохранительной сеткой. Этот детектор помещают в атмосферу испытываемого газа. Индикатор работает так же, как и индикатор прибора J-W. К прибору прилагаются диаграммы, по которым можно вычислить содержание газа, если известен состав смеси.

4. РЕГУЛЯТОРЫ

РЕГУЛЯТОРЫ С УРАВНОВЕШЕННЫМИ КЛАПАНАМИ

Регуляторы с уравновешенным клапаном подразделяются в зависимости от способа нагрузки. Имеются три рода регуляторов: 1) с весовой нагрузкой, 2) с пружиной и 3) с давлением, устанавливающимся газом.

Обычно большинство заводов (в Америке) изготовляет регуляторы так, что корпус их может быть применен во всех случаях для различных типов нагрузки.

Помимо этих трех подразделений, регуляторы могут быть классифицированы также и по другим признакам: по твердым и мягким седлам клапанов, по механическому способу передачи газа от диафрагмы к клапанам, по типу применяемых клапанов и т. д.

Пропускная способность регуляторов. Для определения пропускной способности регуляторов при совокупности тех или иных условий необходимо не только знать, к какому виду отнести данный регулятор, но и конструкцию его корпуса.

У некоторых регуляторов имеются хорошо сконструированные обтекаемые корпуса; в других же корпуса сконструированы так, что возникает значительная турбулентность при движении газа с соответствующей потерей производительности. Максимальной производительностью, какую может развить регулятор при данных условиях, является то количество газа, которое может пройти через клапаны (рассматривая их как диафрагмы). Эта идеальная максимальная производительность не достигается ни в одном из известных теперь регуляторов. Опыты показали, что разные типы регуляторов приближаются к идеальной производительности в разной степени.

Наибольшее влияние на пропускную способность регуляторов имеют следующие условия: 1) конструкция корпуса, 2) устройство клапана, 3) утечки при высоком давлении в камере диафрагмы, препятствующие открытию клапанов, 4) небольшие жесткие диафрагмы, ограничивающие ход клапанов.

Выбор регуляторов. При выборе регуляторов для определенной работы необходимо знать максимальное и минимальное количество газа, которое регулятор должен будет пропускать; равным образом необходимо знать допустимое колебание в давлении у выходного отверстия, максимальное и минимальное давления у впускного отверстия, характер нагрузки регулятора (является ли спрос на газ

постоянным и однообразным или колеблющимся), а также частоту колебаний. Если давление у выходного отверстия низкое, а спрос на газ более или менее постоянный, то можно с успехом применять регулятор с весовой нагрузкой. Для высоких выходных давлений, когда применяется регулятор с весовой или пружинной нагрузкой, необходима небольшая жесткая диафрагма. Это ограничивает величину перемещения клапана и препятствует хорошей регулировке.

При применении регуляторов с нагрузкой, создаваемой давлением газа, необходимы диафрагмы больших размеров. Эти регуляторы имеют большую чувствительность. Когда требуется полное закрытие регулятора, то в регуляторе с уравновешенным клапаном наиболее подходящими являются мягкие седла; однако, когда в этом нет необходимости, мягких седел следует избегать, так как их надо часто менять и они могут быть причиной плохого регулирования при небольших количествах пропускаемого газа.

При применении регуляторов с нагрузкой, создаваемой давлением газа, надо иметь в виду, что общая работа всего устройства зависит как от главного регулятора, так и от небольшого вспомогательного регулятора, который ставится вместе с главным. Экономия при установке ненадежного малого регулятора практикой не оправдывается.

Установка регулятора. При установке регулятора необходимо обращать внимание на место и размер трубопроводов. Объем трубопроводов, соединенных с регуляторами, должен быть достаточно больших размеров, иначе работа регулятора будет неудовлетворительна. Регуляторы часто дают очень слабую производительность, в то время как в действительности они могли бы дать гораздо больше, если бы пропускная способность всего агрегата не ограничивалась объемом труб, в которые газ входит после регулятора. Установка клапанов или других устройств, задерживающих движение газа в трубопроводе вблизи регулятора, приводит к плохому регулированию.

Обслуживание и наблюдение за регуляторами. Регуляторы следует периодически осматривать и приводить в порядок, так как седла и диски клапанов часто истираются, диафрагмы от постоянного нажима на них и колебаний разрываются и дают течь, шпиндели клапанов изнашиваются; изнашиваются и все движущиеся части. Всякий износ должен сейчас же исправляться, в противном случае в дальнейшем могут создаться большие затруднения: в частности, появляются вибрации в клапанах, разрыв диафрагм может быть причиной аварии; изношенные диски клапанов или седла могут быть причиной пропуска газа в линии низкого давления в то время, когда регулятор должен был бы прекратить подачу газа и т. д.

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ РЕГУЛЯТОРОВ С УРАВНОВЕШЕННЫМИ КЛАПАНАМИ

Приводимые ниже кривые и формулы получены на основании опытов, проведенных Комитетом распределения газа при Газовой ассоциации тихоокеанского побережья. Основанием для выбора размеров регулятора должно быть максимальное количество газа, пропускаемое регулятором при возможно минимальном давлении у входа в регулятор. При выборе диаметра регулятора рекомендуется, чтобы диаметр каждого клапана был приблизительно равен половине диаметра выходного отверстия регулятора.

1. Для регуляторов, выпускающих газ с давлением ниже 0,07 *ат* по манометру и имеющих давление у входа, равное 0,7 *ат* (10 фун.) и меньше, применяется следующая формула:

$$Q = 0{,}402\,K\sqrt{P_1 h},$$

где Q — пропускная способность регулятора в *м³/час*;
P_1 — давление при входе в *ата*;
h — потери давления в *кг/см²*;
K — одна из величин, приводимых ниже:

Диаметр клапана в дм.	K	Диаметр клапана в дм.	K
1	970	2	4 195
1 1/4	1 935	2 1/4	5 160
1 1/2	2 260	2 3/4	5 680

Диаметр клапана в дм.	K
$2^1/_2$	6 260
$2^7/_8$	8 260
3	8 710
$3^1/_2$	12 900
4	16 780
$4^1/_4$	19 050

Диаметр клапана в дм.	K
5	26 650
$5^1/_2$	32 250
$5^3/_4$	35 350
7	51 800
$7^1/_4$	56 200
$8^1/_2$	77 800

2. Для регуляторов, выпускающих газ с давлением больше 0,07 *ат* (1 фун.) по манометру и имеющих давление при входе меньше 0,7 *ат* (10 фун.), применяются уравнения, указанные в п. 5 при

$$A = \frac{\sqrt{P_1 h}}{0{,}7P_1}.$$

3. Для регуляторов, имеющих давление при входе больше 0,7 *ат* (10 фун.) по манометру и менее 7 *ат* (100 фун.), применяют уравнение, указанное в п. 5, при величине A, показанной на фиг. 122; если же дифференциальное давление слишком мало для того, чтобы можно было взять величину A с кривой, то вместо A ставят

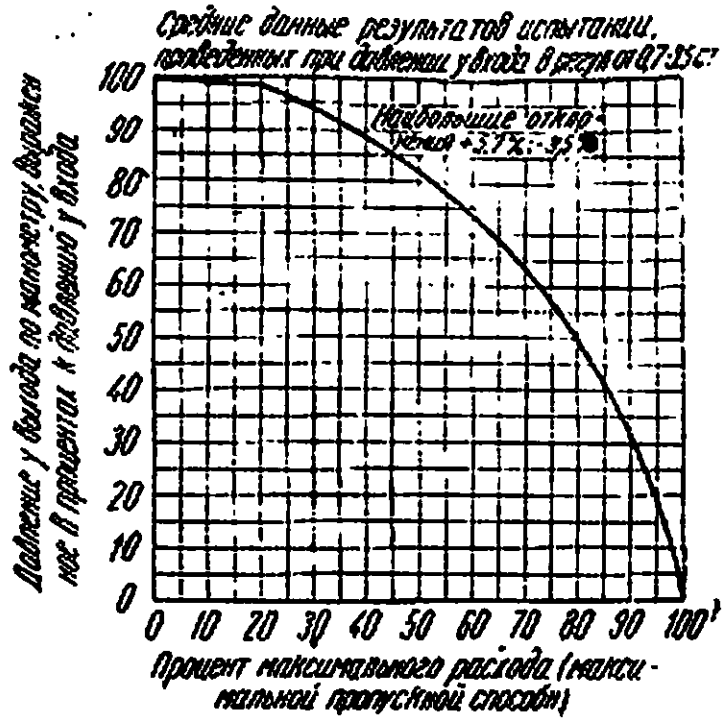
$$\frac{\sqrt{P_1 h}}{0{,}7P_1}.$$

4. При давлениях при входе, превышающих 7 *ат* (100 фун.) по манометру, и при дифференциальном давлении, составляющем менее 25% абсолютного давления при входе, применяют уравнения, указанные в абзаце E при

$$A = \frac{\sqrt{P_1 h}}{0{,}7P_1}.$$

5. При давлениях при входе, превышающих 7 *ат* (100 фун.) по манометру, когда дифференциальное давление превышает 25% абсолютного давления при входе, применяются показанные ниже уравнения при величине A, данной на фиг. 122.

На фиг. 123 и 124 показаны кривые величин, стоящих в скобках в приведенных выше уравнениях.



Фиг. 122. Кривые значений A в формулах емкости. Основание для вычислений:

Давление 1,035 *ат*. Температура 15,56° С. Удельный вес 0,63.

Поправочные коэфициенты:

На давление — $Q \cdot \frac{1{,}035}{\text{основное давление в } ат}$.

Температура —

$$Q \cdot \frac{271{,}11}{237{,}78 + \text{действительная температура в °C}}.$$

Удельный вес —

$$Q \cdot \sqrt{\frac{0{,}63}{\text{действительный удельный вес}}},$$

где Q — расход газа в $м^3/час$ при давлении в 1,035 *ат*, температуре 15,56°С и удельном весе газа 0,63;

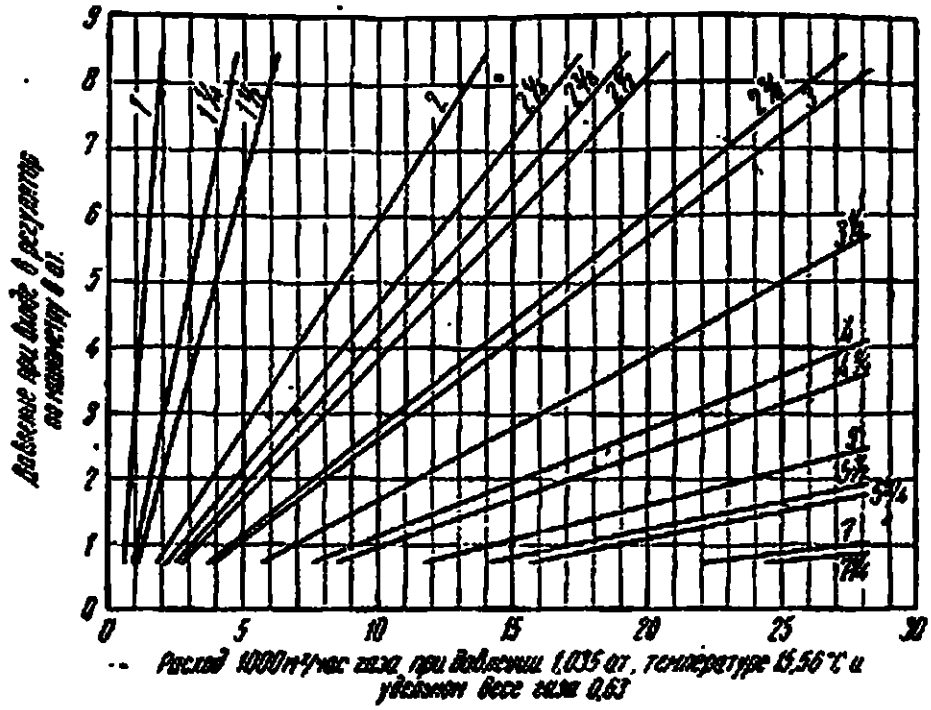
P — давление при входе в регулятор по манометру в *ат*;

A — процентное отношение к максимальному расходу газа, показанному на кривой (берется в десятых долях).

Таблица производительности регуляторов

Диаметр клапана в дм.	Пропускная способность регулятора	Диаметр клапана в дм.	Пропускная способность регулятора
1	$Q = (216P + 196)A$	$3^1/_2$	$Q = (4\,570P + 2\,430)A$
$1^1/_4$	$Q = (517P + 485)A$	4	$Q = (6\,270P + 2\,880)A$
$1^1/_2$	$Q = (685P + 510)A$	$4^1/_2$	$Q = (7\,100P + 3\,230)A$
2	$Q = (1\,580P + 703)A$	5	$Q = (10\,000P + 4\,670)A$
$2^1/_4$	$Q = (1\,950P + 865)A$	$5^1/_2$	$Q = (11\,750P + 5\,860)A$
$2^3/_8$	$Q = (2\,160P + 965)A$	$5^3/_4$	$Q = (13\,100P + 6\,300)A$
$2^1/_2$	$Q = (2\,330P + 1\,100)A$	7	$Q = (19\,500P + 8\,900)A$
$2^7/_8$	$Q = (3\,060P + 1\,470)A$	$7^1/_4$	$Q = (20\,900P + 10\,000)A$
3	$Q = (3\,300P + 1\,530)A$	$8^1/_2$	$Q = (28\,400P + 11\,050)A$

P — давление при входе в регулятор по манометру в $кг/см^2$.



Фиг. 123. Наибольшие величины пропускной способности регуляторов при данном давлении при входе в регулятор 1 — $7^1/_4$".

Правила для пользования кривыми

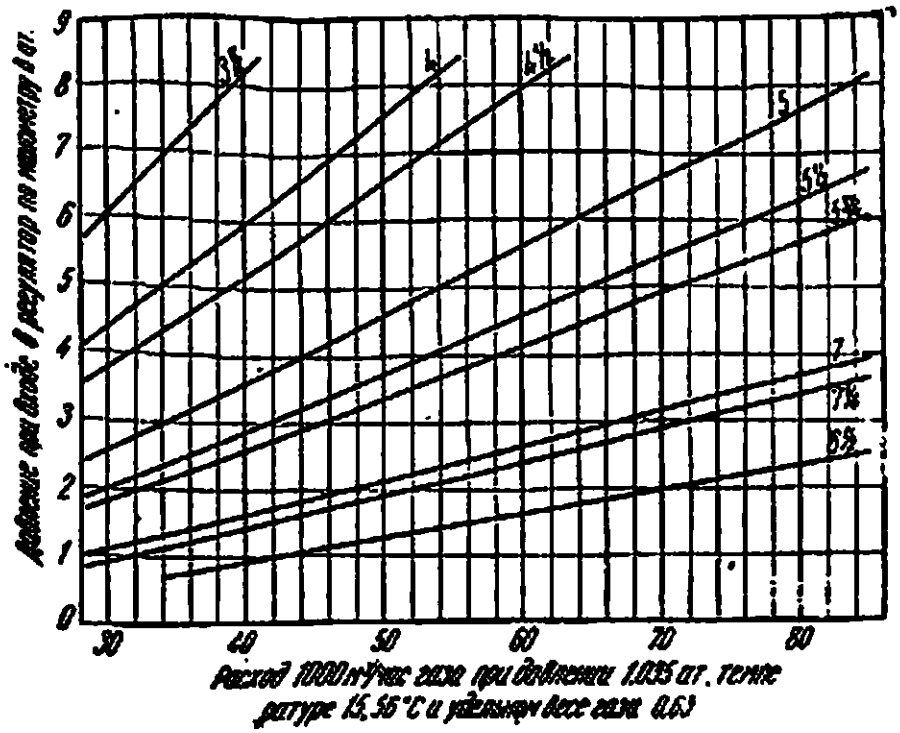
Для получения максимальной производительности регулятора с клапаном, уравновешенным грузом:

а) определяют диаметр клапана до $^1/_8$" и предполагают, что диаметр у обоих клапанов одинаков;

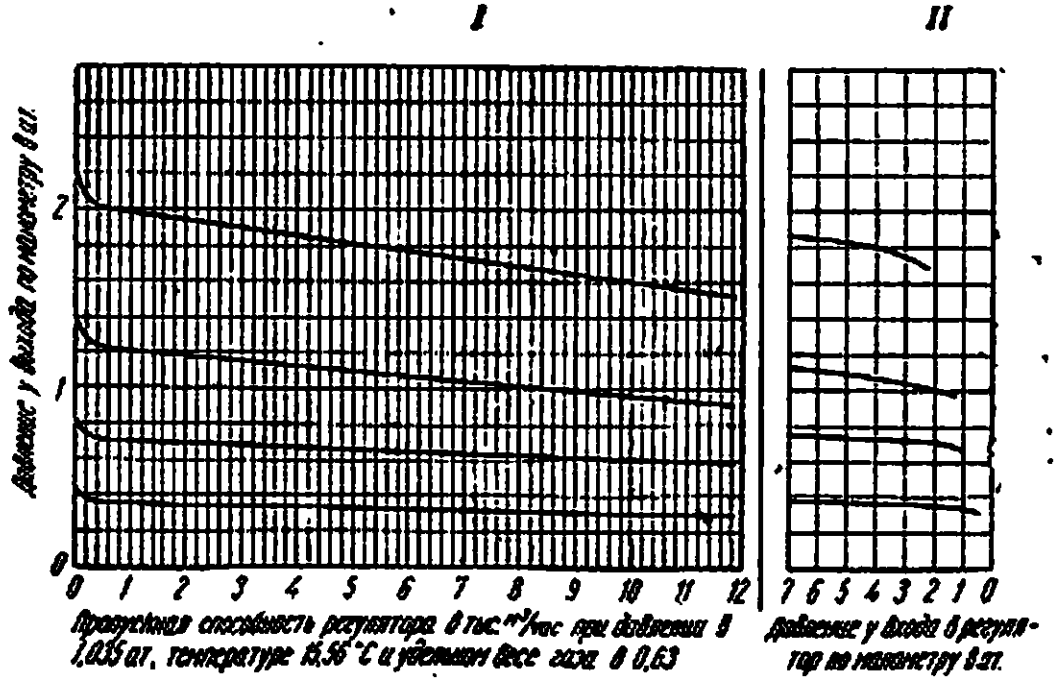
б) берут величину давления при входе по оси ординат (фиг. 123 и 124), проводят горизонтальную линию до пересечения ее с наклонной, на которой нанесен диаметр рассматриваемого клапана; дальше следуют по вертикали вниз для определения максимальной возможной производительности; к найденной величине делается поправка на давление при выходе;

в) умножают величину, полученную по п. „б", на величину A, полученную на фиг. 122; полученное произведение укажет производительность регулятора;

г) по фиг. 125 (левая часть) находят на оси ординат давление, наиболее близко подходящее к тому выходному давлению, которое необходимо применить в работе; расстояние по вертикали на кривой между двумя выбранными величинами



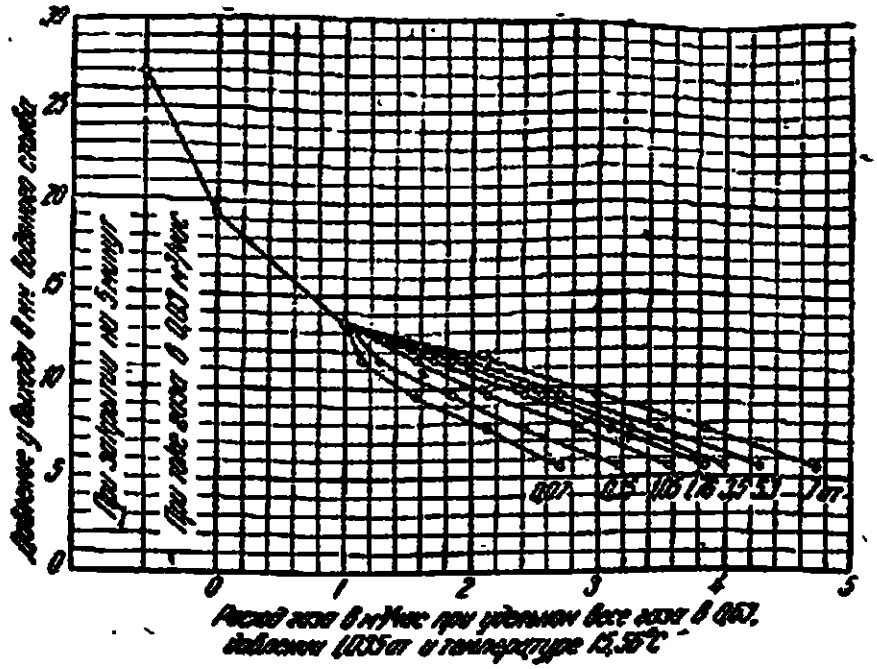
Фиг. 124. Наибольшие величины пропускной способности регуляторов при данном давлении при входе в регулятор $3^1/_2 - 8^1/_2$".



Фиг. 125. Кривые пропускной способности для регуляторов с уравновешенным клапаном и высоким давлением газа при выходе из регулятора.

I. На кривых показаны предполагаемые колебания в давлении при постоянном давлении у входа в регулятор. Линия (статическая) протянута дальше фланца у выходного отверстия регулятора.

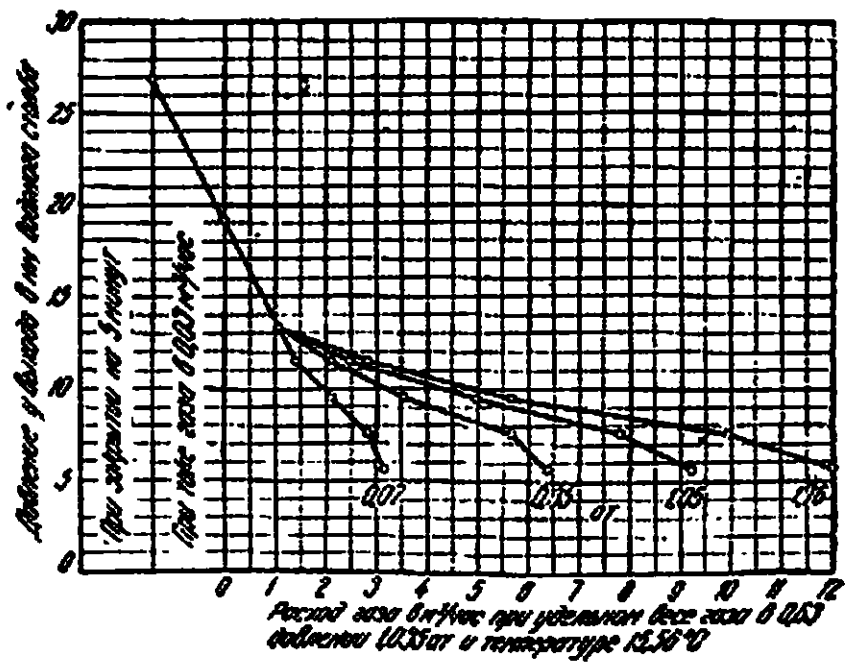
II. Кривые показывают действие меняющегося давления при входе в регулятор на давление у выхода при постоянном количестве проходящего газа.



Фиг. 126. Регулятор домашнего типа № 1 при диаметре проходного отверстия 4,76 *мм* ($^{3}/_{16}''$).

Предполагаемая минимальная величина пропускной способности регулятора домашнего типа № 1 (регулятор с нагрузкой пружины).

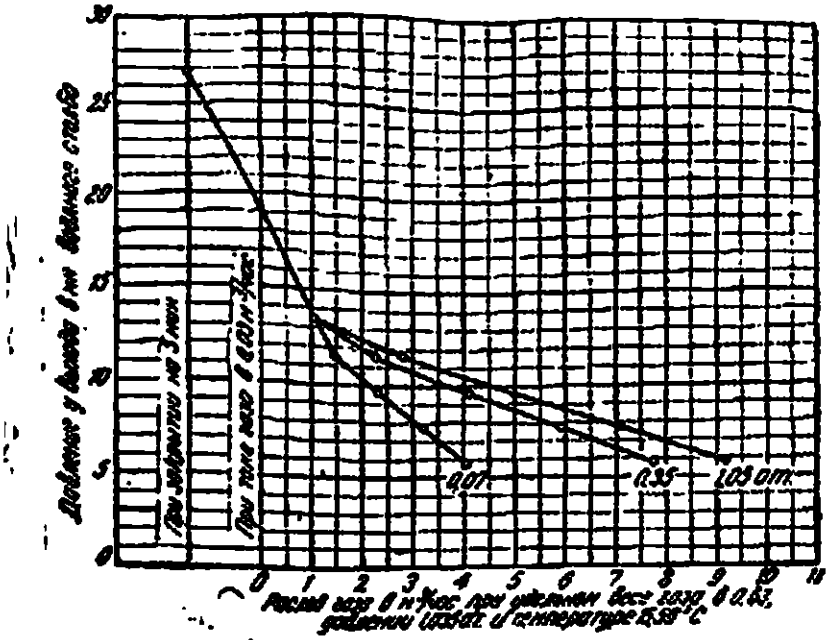
Диафрагма — 4,76 *мм* ($^{3}/_{16}''$). Цифры означают начальное давление. Регуляторы при начальном давлении установлены на давление в 190,5 *мм* ($7^{1}/_{2}''$) водяного столба.



Фиг. 127. Регулятор домашнего типа № 1 с диаметром проходного отверстия в 7,9 *мм* ($^{5}/_{16}''$).

Предполагаемая минимальная величина пропускной способности регулятора домашнего типа № 1 (регулятор с нагрузкой пружины).

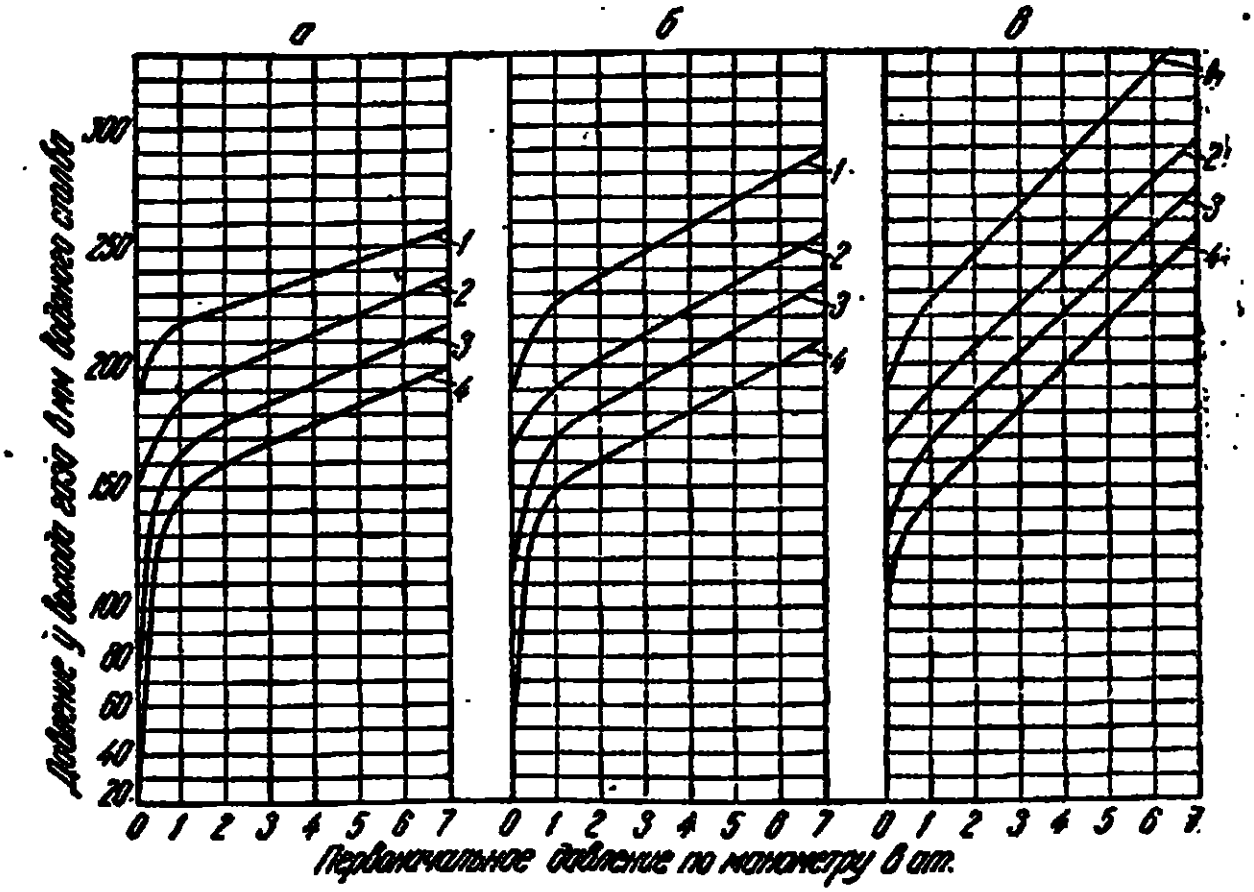
Диафрагма 7,9 *мм* ($^{5}/_{16}''$). Цифры означают начальное давление. Регуляторы при начальном давлении установлены на давление в 190,5 *мм* ($7^{1}/_{2}''$) водяного столба.



Фиг. 128. Регулятор домашнего типа № 1 при диаметре проходного отверстия в 11,12 *мм* ($^7/_{16}$").

Предполагаемая минимальная величина пропускной способности регулятора домашнего типа № 1 (регулятор с нагрузкой пружины).

Диаметр проходного отверстия 1.12 *мм* ($^7/_{16}$"). Цифры означают начальное давление. Регуляторы при начальном давлении установлены на давление в 190,5 *мм* ($7^1/_2$") водяного столба.



Фиг. 129. Предполагаемое изменение в выходном давлении благодаря увеличению первоначального давления в регуляторе № 1.

Все регуляторы устанавливены на первоначальное давление в 1,95 *ат* (15 фун.) при давлении у выхода в 190,5 *мм* ($7^1/_2$") водяного столба. Во всех регуляторах имеются клапаны с кожаными седлами. Регулятор закрывается из периоды в 5 мин. Диаметр регулятора проходного отверстия: *а* — 4,76 *мм* ($^3/_{16}$"); *б* — 7,9 *мм* ($^5/_{16}$"); *в* — 11,12 *мм* ($^7/_{16}$").

1 — кривая периодов закрытия клапанов регуляторов; *2* — расход газа 0,71 *м³/час* (25 куб. фут.); *3* — то же 2,83 *м³/час* (100 куб. фут.); *4* — то же 5,66 *м³/час* (200 куб. фут.).

производительности на нижней шкале и даст размеры колебания давления при выходе из регулятора при условии постоянного давления при входе;

д) если берут слишком большие колебания давления при входе, то обращаются к правой части фиг. 125; выбирают кривую с величиной, наиболее близкой к предполагаемому давлению при выходе, как показано на крайней левой стороне фиг. 125. Расстояние по вертикали на этой кривой между двумя любыми выбранными величинами давления при входе, как это видно по нижней шкале, даст колебания давления при выходе, получающиеся в связи с переменным давлением при входе.

Все эти стадии необходимы для определения размеров клапанов, давления при входе, а также требуемого дифференциального давления.

Надо заметить, что величины, вычисляемые по пп. „в" и „г", в некоторых случаях могут прибавляться, а в других вычитаться. Это можно определить путем изучения таблиц давления на магистралях, откуда газ поступает к регулятору.

5. ГАЗГОЛЬДЕРЫ

Таблица 117

Стандартные газгольдеры низкого давления

Емкость в тыс. м³	Число колоколов	Размеры бассейна в м	Номера стандартов	Вес газгольдеров в т	Давление в газгольдере в мм (водного столба)		Нагрузка на фундамент							Диаметр фундамента	Объем фундамента в м³
							Опорные блоки			Нагрузка на 1 м² днища	нагрузка на 1 пог. м				
					макс.	миним.	число	длина в м	нагрузка на каждый из		вес стали	ветровая нагрузка на 1 м² площади проекции			
0,708	1	12,878 × 6,350	6	44,394	—		109,220	12	0,305	1 050,960	6 477,100	564,680	847,020	13,538	46,635
1,415	1	16,231 × 7,772	8	74,292	—		124,460	12	0,305	1 766,700	7 829,400	705,850	955,900	16,840	69,570
2,123	1	18,974 × 8,433	10	102,378	—		116,840	20	0,610	1 291,050	8 522,500	876,740	1 010,480	19,609	91,740
2,123	2	15,697 × 6,782	9	95,130	248,920		147,320	18	0,610	2 115,510	6 915,400	832,160	1 218,520	16,332	65,747
2,830	1	20,193 × 9,905	9	133,182	—		121,920	18	0,381	1 884,480	10 032,200	1 188,800	1 292,820	20,853	122,320
2,830	2	18,974 × 6,096	10	113,703	198,120		119,380	20	0,610	2 342,010	6 184,900	772,720	1 129,360	19,609	91,740
4,245	1	25,603 × 9,144	10	183,012	—		111,760	20	0,381	2 192,520	9 253,000	1 173,940	1 396,840	26,269	187,303
4,245	2	20,931 × 7,366	10	146,772	203,200		121,920	20	0,610	2 894,670	7 499,800	943,610	1 515,720	21,717	110,853
5,660	2	23,241 × 7,798	10	180,747	200,660		121,920	20	0,610	3 515,280	7 889,400	1 055,060	1 515,720	23,876	132,259
7,075	2	25,070 × 8,306	10	212,910	195,580		119,380	20	0,610	3 479,040	8 425,100	1 188,800	1 619,740	25,781	151,371
8,490	2	25,603 × 9,576	10	250,509	210,820		129,540	20	0,610	3 990,930	9 691,300	1 441,420	2 030,400	26,416	191,125
14,150	2	31,623 × 10,211	12	380,520	200,660		127,000	24	0,610	4 557,180	10 324,400	1 857,500	1 916,940	32,309	277,514
14,150	2	33,223 × 9,296	12	377,349	180,340		114,300	24	0,610	4 711,200	9 899,100	1 664,320	1 515,720	34,061	307,329
14,150	3	29,413 × 8,331	10	366,930	279,400		134,620	20	0,914	7 130,220	8 425,100	1 619,740	2 481,620	30,251	244,640
21,225	3	32,918 × 9,754	12	491,505	281,940		139,700	24	1,067	7 664,760	9 837,400	2 050,680	2 912,560	33,757	301,978
28,300	3	37,948 × 9,652	12	623,328	276,860		134,620	24	1,067	9 911,640	9 740,000	2 199,280	2 481,620	38,862	395,247
42,450	3	43,815 × 11,125	15	886,521	264,160		129,540	30	1,524	10 043,010	11 006,200	2 882,840	2 719,380	44,653	554,263
42,450	4	40,843 × 9,754	14	864,324	363,220		144,780	28	1,524	13 150,590	10 811,400	2 734,240	3 566,400	41,656	488,516
56,600	4	43,815 × 11,125	15	1 075,875	360,680		144,780	30	1,625	14 024,880	11 249,700	3 358,360	4 383,700	44,658	559,085
84,900	4	52,375 × 11,430	18	1 475,874	330,200		137,160	36	1,625	15 338,580	11 541,900	3 937,900	3 863,600	53,289	778,261
141,500	5	60,960 × 11,430	21	2 188,896	378,460		147,320	42	2,134	20 729,280	11 541,900	4 888,940	4 725,480	61,976	1 045,836
169,800	5	66,548 × 11,506	22	2 476,098	347,980		139,700	44	2,286	21 635,280	11 541,900	5 438,760	4 353,980	67,569	1 236,197
283,000	5	80,671 × 12,802	28	3 986,400	342,900		139,700	84	2,286	17 214,000	12 954,200	7 430,000	4 458,000	81,882	1 743,826

Таблица 118

Размеры газгольдеров и величины их поверхностей, покрываемых краской

Число секций газгольдера	Одно-телескопический	Двутелескопический					
Емкость в $м^3$	2 830	2 830	4 245	5 660	7 075	8 490	9 905	11 320
Общие размеры:								
Диаметр 1-й секции в м	21,184	16,459	18,999	20,650	23,165	24,079	26,060	27,432
Высота в м	8,077	6,706	7,468	8,534	8,534	9,296	9,449	9,754
Диаметр 2-й секции в м	—	17, 69	19,690	21,260	23,774	24,689	26,670	28,042
Высота в м	—	6,706	7,468	8,534	8,534	9,296	27,737	9,754
Диаметр водяного резервуара в м	22,037	17,831	20,422	22,174	24,536	25,451	27,432	28,804
Высота в м	8,460	7,010	7,790	8,839	8,839	9,601	9,757	10,109
Число колонн	8	9	9	10	10	10	10	10
Днище стального резервуара в $м^2$	383,218	949,715	327,658	380,890	434,650	509,032	590,844	645,376
Пояс стального резервуара в $м^2$	583,412	392,874	498,594	611,468	681,422	767,819	840,745	910,141
Площадка в $м^2$	119,841	145,853	182,064	189,144	190,445	191,889	211,812	213,670
Пояс резервуара (внутренний диаметр 1,219 м) в $м^2$	83,982	68,282	78,036	83,982	92,900	97,545	105,442	109,994
Главный каркас в $м^2$	235,037	445,920	456,133	579,882	611,282	680,028	806,230	854,680
Лестницы в $м^2$	31,586	52,024	11,613	12,077	40,133	48,308	138,421	138,350
Крыша в $м^2$	352,856	223,889	294,121	348,216	429,755	484,095	543,001	592,981
1-я секция в $м^2$	537,519	398,541	506,770	617,765	698,084	777,109	853,781	930,858
2-я „ „ „	—	391,852	535,104	669,809	749,703	837,029	918,781	1 000,440
Каретки в $м^2$	16,722	32,515	32,515	37,160	37,160	55,740	55,740	74,320
Всего в $м^2$	2 343,957	2 401,465	2 922,634	3 527,413	4 010,493	4 428,543	5 086,766	5 471,810

Число секций газгольдера	Трехтелескопический						
Емкость в $м^3$	8 490	11 330	14 160	16 990	21 225	28 300	42 450
Общие размеры:							
Диаметр 1-й секции в м	21,793	22,555	26,822	26,822	31,699	34,900	41,605
Высота в м	7,468	9,449	8,382	9,982	9,144	9,754	10,565
Диаметр 2-й секции в м	22,402	23,165	27,432	27,432	32,300	35,636	42,367
Высота в м	7,496	9,449	8,382	9,982	9,144	9,754	10,414
Диаметр 3-й секции в м	23,012	23,774	28,042	28,042	33,918	36,373	43,129
Высота в м	7,493	9,449	8,382	9,982	9,144	9,754	10,414
Диаметр водяного резервуара в м	23,774	24,536	28,804	28,804	33,680	37,186	43,891
Высота в м	25,657	32 000	28 500	33 750	31 000	33 000	35 333
Число колонн	10	10	10	10	12	12	14
Днище стального резервуара в $м^2$	443,876	472,861	645,655	645,376	891,840	1 066,001	1512,989
Пояс стального резервуара в $м^2$	584,155	750,911	786,389	930,785	999,804	1 175,185	1 485,007
Площадка в $м^2$	18 ,800	190,445	213,670	213,670	269,410	318,647	474,790
Пояс резервуара (внутренний диаметр 1,219 м) в $м^2$	91,042	92,900	110,087	109,994	127,131	142,692	168,149
Главный каркас в $м^2$	1 114,800	1 285,570	929,000	1 253,440	1 767,587	1 800,330	1 858,000
Лестницы в $м^2$	148,640	167,930	176,561	185,800	261,049	185,800	309,357
Крыша в $м^2$	353,891	409,689	573,051	573,051	817,620	961,980	1 346,598
1-я секция в $м^2$	692,145	742,271	788,721	892,769	1 057,965	1 175,650	1 437,628
2-я „ „	675,363	812,225	936,432	1 047,965	1 179,830	1 356,805	1 624,542
3-я „ „	671,697	801,170	870,473	1 003,220	1 100,865	1 320,668	1 607,256
Каретки в $м^2$	74,320	92,900	92,900	111,480	111,480	111,480	134,706
Всего в $м^2$	4 962,716	5 723,871	6 123,993	6 989,630	8 536,681	9 634,859	11 958,088

Продолжение табл. 118

Число секций газгольдера	Четырехтелескопический					
Емкость в м³	28 300	42 450	56 600	70 750	84 900	113 200
Основные размеры:						
Диаметр 1-й секции в м	31,090	37,338	40,691	45,720	50,927	54,153
Высота в м	9,144	9,449	10,617	10,668	10,363	12,116
Диаметр 2-й секции в м	31,699	38,151	41,503	46,482	51,740	54,965
Высота в м	9,144	9,449	10,617	10,668	10,363	12,116
Диаметр 3-й секции в м	32,309	38,963	42,316	47,244	52,553	55,778
Высота в м	9,144	9,449	10,617	10,668	10,363	12,116
Диаметр 4-й секции в м	32,918	39,776	43,129	48,006	53,340	56,388
Высота в м	9,144	9,449	10,617	10,668	10,363	12,116
Диаметр стального резервуара в м	33,680	40,538	43,891	48,768	54,102	57,455
Высота в м	31,000	32,000	36,000	36,000	36,000	41,100
Число колонн	12	14	14	16	18	20
Днище стального резервуара в м²	891,840	1 290,846	1 512,969	1 866,219	2 298,811	2 592,569
Пояс стального резервуара в м²	999,604	1 242,168	1 512,969	1 681,026	1 839,048	2 280,071
Площадка в м²	250,830	418,050	473,790	780,360	506,805	538,820
Пояс (внутренний диаметр 1,219 м) в м²	129,131	155,236	168,149	186,822	206,610	220,080
Главный каркас в м²	2 382,885	2 506,200	3 361,122	3 795,018	4 357,010	6 224,300
Лестница в м²	261,049	278,700	309,357	392,038	350,8.0	445,920
Крыша в м²	759,922	1 092,295	1 312,206	1 711,218	2 116,202	2 333,276
1-я секция в м²	987,527	1 183,382	1 438,640	1 696,600	1 764,171	2 173,860
2-я » » »	1 100,865	1 350,302	1 615,903	1 963,415	1 980,442	2 401,930
3-я » » »	1 122,161	1 379,101	1 649,904	2 011,926	2 007,105	2 442,062
4-я » » »	1 090,646	1 362,936	1 636,145	1 985,368	1 981,743	2 405,924
Каретка в м²	139,260	167,220	167,220	167,220	222,260	226,150
Всего в м²	10 116,810	12 428,162	15 158,493	18 249,276	19 870,646	24 363,954

Число секций газгольдера	Пятителескопический					
Емкость в м³	84 900	113 200	141 500	169 800	226 400	283 600
Основные размеры:						
Диаметр 1-й секции в м	44,958	50,241	54,940	60,503	68,909	74,835
Высота в м	10,566	11,176	11,785	11,659	12,040	12,802
Диаметр 2-й секции в м	45,720	50,978	55,702	61,265	67,985	75,539
Высота в м	10,566	11,176	11,785	11,659	12,040	12,802
Диаметр 3-й секции в м	46,482	51,714	56,464	62,027	70,586	76,479
Высота в м	10,566	11,176	11,785	11,659	12,040	12,802
Диаметр 4-й секции в м	47,244	52,426	57,226	62,789	71,476	77,594
Высота в м	10,566	11,176	11,785	11,659	12,040	12,802
Диаметр 5-й секции в м	48,006	53,162	57,988	63,551	72,365	78,834
Высота в м	10,566	11,176	11,785	11,659	12,040	12,802
Диаметр стального резервуара в м	48,768	54,102	59,039	64,399	73,457	79,248
Высота в м	36,000	36,000	39,633	39,780	41,000	43,500
Число колонн	16	18	20	22	24	26
Днище стального резервуара в м²	1 866,219	2 313,210	2 717,790	3 260,790	4 206,370	4 923,700
Пояс стального резервуара в м²	1 681,026	1 968,060	2 253,104	2 452,560	2 833,450	3 297,950
Площадка в м²	780,360	868,124	1 006,894	1 207,700	891,840	996,675
Пояс (внутренний диаметр 1,219 м) в м²	186,822	209,954	225,783	247,114	281,487	308,788
Главный каркас в м²	5 351,040	7 004,690	8 028,558	8 918,400	11 519,600	13 749,200
Лестницы в м²	417,121	427,340	427,340	427,340	473,790	594,060
Крыша в м²	1 886,918	2 122,765	2 371,365	2 991,380	4 7.9,320	5 845,000
1-я секция в м²	1 602,739	1 963,080	2 220,813	2 452,560	3 032,256	3 463,886
2-я » » »	1 860,787	2 401,485	2 557,444	2 966,297	3 716,000	4 237,169
3-я » » »	1 906,122	2 461,860	2 563,111	3 038,750	3 761,521	4 288,264
4-я » » »	1 928,256	2 517,690	2 568,964	3 107,505	3 801,468	4 341,217
5-я » » »	1 8:9,639	2 499,010	2 599,979	3 084,290	3 519,981	4 048,037
Каретка в м²	278,700	317,718	333,020	388,322	492,870	492,870
Всего в м²	21 307,544	27 139,806	29 771,663	34 548,007	43 261,453	50 685,311

Безводные газгольдеры системы Bartlett — Hayward'a

Емкость в $м^3$	Диаметр в $м$	Полезная высота газгольдера в $м$	Общая высота в $м$	Число боковых стенок	Отношение общей высоты к диаметру	Ширина стенки в $м$	Площадь в $м^2$
2 830,00	13,72	21,34	23,77	8	1,74	5,24	132,66
5 660,00	17,07	26,82	30,48	10	1,79	5,24	211,44
8 490,00	19,20	29,26	32,92	10	1,65	6,16	291,71
14 150,00	24,99	31,09	35,05	10	1,41	7,68	453,91
16 980,00	24,59	37,80	41,76	10	1,68	7,68	453,91
21 225,00	29,57	32,31	36,88	12	1,24	7,68	660,52
22 640,00	29,57	34,44	36,88	12	1,31	7,68	660,52
25 470,00	29,57	38,71	43,28	12	1,46	7,68	660,52
28 300,00	29,57	42,98	47,55	12	1,60	7,68	660,52
42 450,00	34,44	46,94	52,12	14	1,51	7,68	904,66
56 600,00	39,32	47,85	53,34	16	1,35	7,68	1 186,33
70 750,00	44,20	46,94	53,04	18	1,20	7,68	1 505,63
84 900,00	44,20	56,39	62,48	18	1,42	7,68	1 505,63
99 050,00	49,07	53,34	59,74	20	1,21	7,68	1 862,37
113 200,00	49,07	60,96	67,36	20	1,37	7,68	1 862,37
141 500,00	55,47	59,74	66,75	20	1,21	8,67	2 373,87
149 141,00	53,04	68,88	76,81	20	1,45	8,28	2 165,68
169 800,00	55,47	71,63	78,64	20	1,42	8,67	2 373,87
198 100,00	58,83	74,07	82,60	22	1,40	8,36	2 674,31
198 100,00	60,96	68,88	76,81	22	1,26	8,67	2 874,14
226 400,00	60,96	78,94	86,87	22	1,43	8,67	2 874,14
254 700,00	66,45	74,37	83,52	24	1,25	8,67	3 424,48
283 000,00	66,45	82,60	91,74	24	1,38	8,67	3 424,48
311 300,00	71,93	77,42	87,17	26	1,21	8,67	4 022,57
339 600,00	71,93	84,43	94,18	26	1,31	8,67	4 022,57
424 500,00	77,42	91,14	101,19	28	1,31	8,67	4 668,23
566 000,00	85,04	100,89	111,86	28	1,31	9,51	5 618,22
849 000,00	96,93	117,04	129,84	28	1,34	10,82	7 273,33

Таблица 120

Безводные газгольдеры системы Stacey — Klonne

Емкость в $м^3$	Диаметр в $м$	Высота в $м$	Число колонн
849	19,11	35,93	12
1 415	2,23	42,77	14
2 123	25,79	48,62	16
2 830	28,66	51,61	18
4 245	31,85	61,21	20
5 660	35,04	67,06	22
8 490	39,82	71,17	25
11 320	44,60	82,14	28
14 150	47,78	89,31	30
16 980	50,91	93,88	32
22 640	55,74	104,24	35
28 300	60,52	110,03	38
35 375	66,89	113,69	42
42 450	70,08	123,44	44
56 600	76,45	137,46	48

Таблица 121

Газгольдеры высокого давления (цилиндрические)

Диаметр в *м*	Длина в *м*	Объем в *м*³	Рабочее давление в *ат*	Емкость в *м*³	Толщина стенок в *мм*	Покрытая краской поверхность в *м*²
Горизонтальные газгольдеры						
6,13	82,76	904,13	3,13	2 823,49	11,11	683,74
6,13	47,44	1 181,17	3,13	3 713,64	11,11	891,84
8,05	39,01	1 850,54	4,42	8 166,02	20,64	992,43
8,05	48,52	2 334,75	4,42	10 302,78	20,64	1 154,93
8,05	62,76	3 057,82	5,10	15 569,16	23,81	1 654,64
8,42	44,21	2 303,28	3,40	7 818,24	16,67	1 102,63
Вертикальные газгольдеры						
9,98	26,44	1 731,05	3,40	5 875,87	19,05	902,99
15,26	30,50	4 630,59	3,40	15 718,07	4,76	1 861,34
16,42	27,47	4 655,35	3,40	15 802,10	31,75	1 714,19

Таблица 122

Малые газгольдеры высокого давления системы Horton'a

Диаметр [1] в *м*	Давление в *ат*	Толщина стенки в *мм*	Емкость в *м*³	Покрытая краской поверхность в *м*²
9,75	2,04	7,87	990,50	299,14
	3,40	4,06	1 641,40	—
10,97	2,04	8,64	1 415,00	378,10
	3,40	12,70	2 348,90	—
12,19	2,04	9,14	1 924,40	466,82
	3,40	14,22	3 226,20	—
13,72	2,04	10,41	2 745,10	590,84
	3,40	14,22	4 584,60	—
15,24	2,04	10,67	3 763,90	729,73
	3,40	16,00	6 282,60	—
15,85	2,04	11,18	4 245,00	789,19
	3,40	16,76	7 075,00	—
17,53	2,04	12,19	5 744,90	964,77
	3,40	18,54	9 622,00	—
18,29	2,04	12,70	6 509,00	1 050,70
	3,40	19,81	10 895,50	—

[1] Количество газа, выделяющееся из газгольдера при снижении рабочего давления.

Таблица 123

Газгольдер высокого давления

Емкость при давлении в 3,4 *ат* (50 фун. на кв. дм.)	Диаметр в *м*	Общая длина в *м*	Емкость длиц при нулевом давлении в $м^3$	Емкость на линейный метр при нулевом давлении в $м^3$
849,000	4,877	14,991	59,996	5,646
970,690	4,877	17,069	59,996	5,646
1 132,000	4,877	19,609	59,996	5,646
1 182,000	5,486	16,027	85,523	7,151
1 415,000	5,486	19,583	85,523	7,151
1 415,000	6,096	16,108	117,417	8,830
1 698,000	6,096	19,279	117,417	8,830
2 122,500	6,096	23,596	117,417	8,830
2 830,000	7,315	22,250	204,609	12,792
4 245,000	7,315	32,182	204,009	12,792
4 245,000	8,636	24,232	336,770	17,829
5 660,000	8,636	31,318	336,770	17,829
7 075,000	8,636	38,430	336,770	17,829
8 490,000	10,007	35,128	523,550	23,962
9 905,000	10,007	40,411	523,550	23,962
11 320,000	10,007	45,720	523,550	23,962
12 735,000	10,007	51,003	523,550	28,962
14 150,000	10,007	56,312	523,550	28,962

Таблица 124

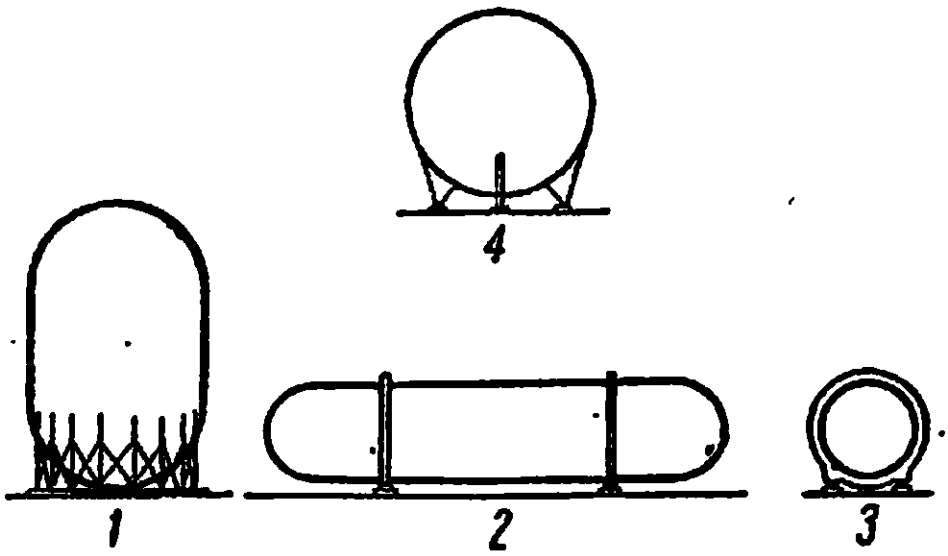
Горизонтальные газгольдеры высокого давления

Диаметр и общая длина в *м*	Объем в $м^3$	Объем при давлении в 2,1 *ат* в $м^3$	Объем при давлении в 2,8 *ат* в $м^3$	Объем при давлении в 3,5 *ат* в $м^3$	Объем при давлении в 4,2 *ат* в $м^3$
5,486 × 18,792	283	577	769	962	1 154
5,486 × 19,812	424	865	1 154	1 443	1 731
6,096 × 18,593	481	982	1 307	1 635	1 964
6,096 × 21,412	566	1 154	1 539	1 924	2 309
6,096 × 26,289	707	1 443	1 924	2 405	2 886
7,315 × 19,228	707	1 443	1 924	2 405	2 886
6,096 × 33,833	927	1 893	2 524	3 152	3 786
7,315 × 33,833	926	1 890	2 518	3 149	3 775
7,315 × 29,413	1 132	2 309	3 079	3 848	4 618
7,315 × 36,119	1 415	2 886	3 848	4 811	5 773
8,230 × 29,337	1 415	2 886	3 848	4 811	5 773
7,315 × 42,875	1 698	3 463	4 612	5 773	6 927
8,230 × 34,671	1 698	3 463	4 612	5 773	6 927
8,230 × 42,672	2 122	4 329	5 773	7 216	8 659
9,144 × 40,081	2 122	4 329	5 773	7 216	8 659
9,754 × 41,148	2 830	5 773	7 697	9 622	11 546
9,754 × 50,622	3 537	7 216	9 622	12 027	14 433
9,754 × 60,096	4 245	8 659	11 546	14 433	17 319

Таблица 125

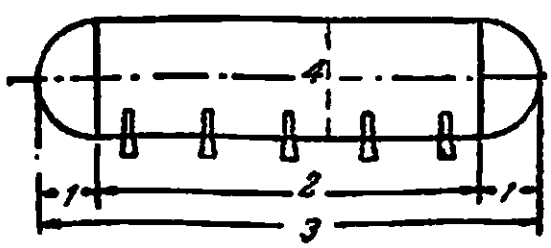
Вертикальные газгольдеры высокого давления

Диаметр и высота над фундаментом в *м*	Объем в $м^3$	Объем при давлении в 2,1 *ат* в $м^3$	Объем при давлении в 2,8 *ат* в $м^3$	Объем при давлении в 3,5 *ат* в $м^3$	Объем при давлении в 4,2 *ат* в $м^3$
6,096 × 19,202	481	982	1 307	1 635	1 964
6,096 × 22,022	566	1 154	1 539	1 924	2 309
7,315 × 19,837	707	1 443	1 924	2 405	2 886
7,315 × 23,292	849	1 731	2 309	2 886	3 463
9,144 × 18,770	990	2 026	2 694	3 367	4 041
9,144 × 20,929	1 132	2 309	3 079	3 848	4 618
9,144 × 23,089	1 273	2 597	3 463	4 329	5 195
9,144 × 25,247	1 415	2 886	3 848	4 811	5 773
9,754 × 22,809	1 415	2 883	3 848	4 811	5 773
9,754 × 26,619	1 698	3 463	4 612	5 773	6 927
11,582 × 24,650	2 122	4 329	5 773	7 216	8 659
11,582 × 27,330	2 405	4 907	6 542	8 178	9 814
11,582 × 31,343	2 830	5 773	7 697	9 622	11 546



Фиг. 130. Эскизы газгольдеров высокого давления.

1 — вертикальный газгольдер высокого давления; *2* — горизонтальный газгольдер высокого давления; *3* — другой вид горизонтального газгольдера; *4* — сфероидальный газгольдер высокого давления.



Фиг. 131. Стандартные газгольдеры высокого давления.

6. СВАРКА ТРУБОПРОВОДОВ

(Перевод *Л. Г. Климашевского*)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применяются два основных способа сварки труб, а именно: автогенная сварка (с применением кислородно-ацетиленового пламени) и электродуговая сварка. Каждый из этих способов делится в свою очередь на две части. В случае применения ацетиленовой сварки первоначальный метод сварки швом с чешуйчатой поверхностью, когда на металл трубы направляется нейтральное пламя с целью подогреть металл трубы до сварки частично заменяется сваркой по непрямому способу, характеризующемуся применением восстановительного пламени с избытком ацетилена, которое направляется на сваренное место трубы. В начале применения электросварки на трубопроводах электрод был голый, и допускалась сравнительно незначительная, с современной точки зрения, сила тока; в настоящее же время большинство электросварочных работ на местах производится покрытым флюсом электродом при значительно более высокой силе тока, причем эта сила тока в связи с достижениями сварочного дела обещает в будущем еще увеличиться. Надзор за работой при применении сварки любого типа дает руководящие указания, следуя которым, можно составить детальные технические условия для любой данной работы. В эти технические условия входят следующие шесть факторов.

а) Проверка сварщиков с целью убедиться, что к работе допущены лишь компетентные лица; кроме того, сварщики должны подтвердить свою квалификацию путем сдачи техминимума предпочтительно в области производимой ими работы и в тех же условиях работы.

б) Выбор и осмотр материала с тем, чтобы убедиться, что применяется исключительно материал, годный для сварки, и что выбран правильный электрод.

в) Проверка конструкции и расположения сварных швов с целью иметь гарантию, что шов сконструирован под сварку правильно.

г) Надзор за подготовкой к сварке с целью убедиться, что эта подготовка и сборка проведены должным образом.

д) Наблюдение за тем, чтобы организация работ и сварка проводились наилучшим и самым экономным образом, а самая сварка производилась правильно.

е) Осмотр и испытание с целью проверить, осуществлены ли вышеуказанные пункты процесса сварки и получаются ли надлежащие результаты. Испытание готовой работы дает дополнительную гарантию в том, что сварная конструкция будет работать удовлетворительно.

ПРОЦЕССЫ И СПОСОБЫ СВАРКИ

Кислородно-ацетиленовая сварка

Газы. *1. Кислород* доставляется в стальных баллонах под давлением 140 *кг/см*^{2}, содержащих 6,2 *м*^{3} кислорода при атмосферном давлении. Кислородные баллоны можно применять либо в отдельности, либо в виде батарей. Вес баллона с кислородом 430 *кг*.

2. Ацетилен. а) Баллоны с жидким ацетиленом емкостью примерно 500 *л*, весом около 104 *кг*. Эти баллоны следует применять в виде батарей и оборудовать приспособлением, задерживающим обратный удар пламени в том случае, если газ должен выпускаться со скоростью больше $^1/_7$ емкости баллона в час.

б) Ацетилен, полученный из карбида кальция, доставляется в барабанах весом 45 *кг*, что соответствует объему 12 700 *л* газа; обычные генераторы, применяемые при сварке трубопровода, имеют емкость от 23 до 45 *кг* карбида и дают от 1400 до 2800 *л* ацетилена в час.

Оборудование. Все, кому приходится иметь дело с кислородно-ацетиленовым процессом для сварки трубопроводов, должны точно соблюдать необходимые меры предосторожности при хранении и применении оборудования для кислородно-ацетиленовой сварки и резки. Печатные правила и инструкции заводов об уходе

обслуживании и ремонте ацетиленовых генераторов должны строго выполняться.

1. Сварочные горелки: а) инжекторные; б) полунизкого постоянного давления; в) высокого постоянного давления.

Выбор той или иной горелки зависит от личного усмотрения, причем в основу этого выбора кладется смешивающая способность горелки. Горелка должна конструироваться так, чтобы давать полное сгорание при любых размерах наконечников.

2. Регуляторы. Регуляторы должны гарантировать однообразное течение газа, так как даже незначительные колебания давления оказывают разрушительное влияние на сварку. Указанные заводами правила безопасности должны соблюдаться. Не следует допускать контакта масла с кислородным регулятором.

3. Горелки для резки. Все заводы снабжают своих потребителей данными о размерах наконечников и давлений, которые следует применять для резки. Необходимо соблюдать следующие правила:

а) не применять наконечника большего размера, чем требуется;

б) не применять давления больше, чем требуется;

в) поддерживать диафрагмы наконечников чистыми.

Пламя. *1. Размер пламени.* Хороший сварщик должен уметь определять правильное пламя, не применяя манометров и не руководствуясь для этой цели стандартными размерами наконечников, потому что:

а) номерные размеры горелок различных типов выбраны произвольно, и они неодинаковы;

б) для пламени данного размера горелки различных типов работают наиболее успешно при различных давлениях;

в) показания манометра могут вводить в заблуждение в том случае, если манометр не в порядке.

Необходимо соблюдать следующие правила:

а) для получения правильного пламени никогда не применять большего давления, чем нужно;

б) для достижения требуемой скорости выбирать пламя достаточного размера.

Слишком большое пламя вызывает: непроизводительный расход газа, перегрев металла; затруднения контролирования плавки; внутри трубы смогут образоваться сосульки. Слишком малое пламя вызывает: непроизводительную трату времени, холодные кромки, недостаток глубины проварки, деформацию, сжатие и искривление трубы.

2. Тип пламени. а) Нейтральное пламя не окисляющее и не науглероживающее металл. Конус в непосредственной близости к наконечнику раскален добела, а дальше идет длинное голубое пламя. Расплавленный металл — покойный и чистый и хорошо течет. Получается немного искр, в особенности при сильном пламени или при применении сварочных прутков из сплавов. Пламя такого типа применяется при сварке швов с чешуйчатой поверхностью.

б) Восстановительное и науглероживающее пламя является результатом несбалансированного сгорания, вызываемого недостатком кислорода для полного сгорания, так что в пламени остается свободный углерод. У наконечника горелки появляются белый конус и дальше белая оболочка более холодного пламени. Поток пламени длинный, голубого цвета. Пламя этого типа применяется при непрямой сварке, но не должно применяться при сварке шва с чешуйчатой поверхностью.

в) Окислительное пламя указывает на несбалансированное сгорание, вызванное избытком кислорода. Кислород соединяется со всем имеющимся ацетиленом, и избыток его соединяется с металлом свариваемого предмета. Белый конус — очень короткий и окружен голубовато-белой оболочкой. Сварка получается блестящая и непрочная, потому что в ней содержится окисленный металл.

Сварочный пруток. Выбор сварочных прутков определяют пять факторов, а именно: 1) прочность, 2) растяжимость, 3) свариваемость, 4) однородность и 5) стоимость.

Следует обращать особое внимание на анализ применяемого прутка. Основные виды прутков, применяемых при ацетиленовой сварке трубопроводов, следующие:

1. Норвежское железо. Мягкий пруток с низким содержанием углерода (от 0,04 до 0,08% С). Оно очень мягкое и для получения 100-процентной сварки должно быть усилено. Сопротивление разрыву сварки составляет примерно 3150 *кг/см*^{2}.

2. Мягкая сталь. Несколько менее растяжима, чем норвежское железо и несколько прочнее его. Сопротивление разрыву — примерно от 3500 до 3850 *кг/см²*.

3. Сплав. Смесь металлов, составленная для достижения специальных результатов. Обычно имеет высокое содержание углерода и высокое сопротивление разрыву.

4. Патентованный пруток. Обычно содержит кремний и марганец. Образуется тонкий слой силиката марганца, который плавает в сварочной ванне, создавая предохранительное покрытие, предотвращающее окисление. Содержание углерода низкое, что гарантирует растяжимость. Марганец дает повышенную прочность. Сопротивление разрыву — свыше 4200 *кг/см²*.

5. Бронза: а) марганцевая бронза: сопротивление разрыву — свыше 2800 *кг/см²*;

б) бронза Тобина: сопротивление разрыву — примерно 2450 *кг/см²*;

в) другие виды патентованной бронзы большой прочности с сопротивлением разрыву больше 2800 *кг/см²*.

С бронзой следует применять крепкий припой.

Практика ацетиленовой сварки. *Сварка швом с чешуйчатой поверхностью.* Пламя следует направлять на металл так, чтобы расплавить обе кромки канавки, но не перегреть металл значительно выше его температуры плавления; в то же время нагреть пруток до его температуры плавления и поддерживать его течение ровной, устойчивой струей в ванночку. Если пруток расплавляется слишком быстро, то он потечет на металл еще до того, как этот металл дойдет до расплавленного состояния; если же пруток не расплавляется достаточно быстро, то сварка будет вогнутой и, следовательно, недостаточно прочной. Пруток следует двигать в ванночке для того, чтобы выделялись газы, которые могут быть причиной возникновения раковин, и чтобы создать тесную смесь сварочного прутка с металлом.

Ванночка должна находиться под действием пламени непрерывно, потому что в случае, если она придет в контакт с атмосферой, сварка получится окисленной. При правильно произведенной сварке металл нагреется до такого состояния, что сделается достаточно жидким и пруток сможет в нем свободно двигаться. Добавляя в металл расплавленный пруток при той же температуре и давая ему возможность равномерно затвердевать (по мере того как сварка подвигается вперед с равномерной скоростью), мы получим в результате хорошую, прочную сварку. Этого нельзя достигнуть путем применения слишком большого пламени, так как в этом случае накаливание происходит с такой быстротой, что часть ванночки непрерывно подвергается действию атмосферы и окисляется. Равным образом, если процесс идет слишком быстро, у сварщика нет достаточно времени для освобождения захваченных газов.

Непрямая или быстрая сварка. Указанные выше меры предосторожности не относятся к новому способу быстрой сварки с применением избытка ацетилена. При сварке по этому способу качество ее не ухудшается даже и при достижении максимальной скорости, потому что большое восстановительное пламя создает предохранительную оболочку, не допускающую действия атмосферы, а также и потому, что лишь незначительная поверхность основного металла доводится до температуры плавления. Способ этот осуществляется на практике так.

Существенно важно использовать то, что обычно определяется как „непрямой способ сварки", т. е. такой способ, в котором пламя направлено на уже выполненную сварку. Сварка производится около верхней центральной линии трубы, причем наконечник горелки и пламя поддерживаются в плоскости шва так, что пламя составляет угол от 20 до 30° с касательной, охватывает поверхность конца трубы, немного не доходя до ванночки, и в то же время расплавляет конец прутка, который держится в плоскости шва, но направлен туда, где происходит сварка. Для достижения надлежащих результатов следует применять правильно отрегулированное пламя и специальный пруток и соблюдать точное расстояние между трубами. Избыточное ацетиленовое пламя дает сплав с более низкой температурой плавления на кромках скоса, вызывая увлажнение или потение. Ванночке расплавленного прутка дают течь в скос, что гарантирует хорошее сплавление обоих концов трубы. Получается весьма прочная сварка, причем эта прочность достигается в сплавах путем применения специального сварочного прутка; при правильной регулировке пламени содержание углерода в сваренном металле поддерживается в пределах, гарантирующих надлежащую мягкость. Процесс этот можно применять к стальной трубе с любым содержанием углерода. Преимущества этого процесса следующие:

1) сварочный пруток применяется в меньшем количестве, потому что расстояние между свариваемыми частями меньше, и вместо скоса в 45° берется скос в 35°;

2) скорость сварки по этому способу примерно в три раза больше скорости сварки швом с чешуйчатой поверхностью; следовательно, в первом случае уменьшаются расходы на газ и рабочие руки;

3) можно получить сварки, дающие полное сопротивление трубы разрыву, превышающее 5600 кг;

4) вследствие большой скорости и незначительной поверхности обогрева получается небольшая остаточная деформация;

5) вследствие восстановительного свойства пламени уменьшается возможность образования раковин и включения посторонних тел;

6) сваренный металл получается плотный, что уменьшает возможность течи.

Пайка на крепком припое или бронзовая сварка

Пайка на крепком припое отличается от сварки в том смысле, что представляет собой скорее сцепление металлов, а не их сплавление. При этой сварке металл нагревается до температуры выше температуры плавления бронзы, и применяются бронзовый припой и бронза, причем процесс работы аналогичен работе с мягким припоем. Расплавленная бронза легко растекается и не требует сварочной ванночки. Пламя должно быть направлено на участок перед тем местом, где производится пайка, во избежание того, что непрерывное тепло, сообщаемое бронзовой ванночке, будет выжигать цинк в сплаве. Передвигая пламя поперек шва с равномерной скоростью и давая бронзовому прутку, который держат против пламени, расплавляться ровным потоком, достигают распределения металла полукруглыми чешуйками.

При работе можно применять разнообразные методы. Расплавленная бронза весьма текуча и проникает и прилипает туда, где железо нагрето до надлежащей температуры. Поверхности, подлежащие пайке, должны быть совершенно чистыми.

При пайке чугуна бронзой нагрев не следует применять слишком внезапно, так как сконцентрированное в одном месте тепло может вызвать трещины в трубе. Если нагрев применяется медленно по окружности трубы, то происходит равномерное круговое расширение при условии, что один или оба конца трубы могут свободно двигаться. Если концы закреплены, то на трубу будет действовать усилие, имеющее тенденцию дать в трубе трещины по мере охлаждения. При пайке бронзой чугунной трубы большого диаметра весьма важно нагревать трубу медленно по окружности, а также обеспечить равномерное медленное охлаждение.

Электродуговая сварка

При электродуговой сварке электрический ток, проходящий между свариваемыми частями, создает интенсивный нагрев (4500—6000° С). Можно применять либо постоянный, либо переменный ток, но обычно предпочитают ток постоянный, потому что дуга его горячее и устойчивее дуги переменного тока. Дуга образуется между трубой или куском свариваемого металла и электродом, находящимся в руках сварщика. При угольной дуговой сварке этим электродом является уголь или графит, а при металлической дуговой сварке — сварочный пруток. Сварочный пруток представляет собой катод или отрицательный электрод, а свариваемый металл — анод или положительный электрод. В газовом деле обычно применяют металлическую дуговую сварку.

Длина дуги. Длина дуги обычно контролируется сварщиком по звуку. Важно, чтобы дуга была короткой; такая дуга характеризуется постоянным треском, сопровождаемым градом красивых мелких искр. Для обыкновенных углеродистых сталей напряжение тока, проходящего через дугу, должно равняться 18—22 V. Для специальных сталей или в случаях, когда применяется особо тяжелый электрод, покрытый флюсом, напряжение тока может доходить до 40 V.

Пруток для электрической сварки. Пруток для электросварки может быть или голый, или покрытый флюсом, причем последний обычно применяют при сварке трубопроводов. В спецификациях Американского общества сварщиков (American Welding Society) даются детали сплавов, применяемых для различных целей. Применение электродов, покрытых флюсом, значительно увеличило ско-

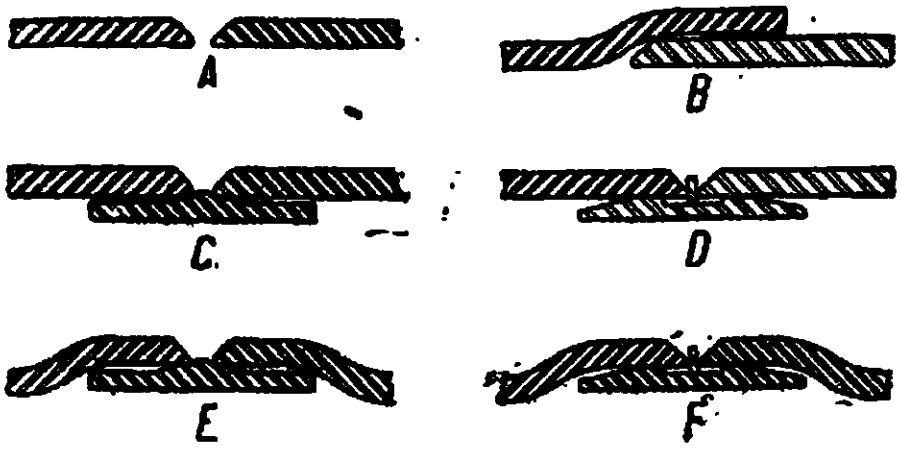
рость электросварки и улучшило ее качество. Можно видоизменять сплав сварки путем применения второго электрода в руках сварщика.

Оборудование. Ток для электросварки подается переносными генераторами постоянного тока, приводимыми в движение либо мотором, либо газовым двигателем. Заводы, производящие оборудование, сообщают своим заказчикам детальные данные по контролю силы и напряжению тока.

Типы швов

На фиг. 132 изображены различные типы сварных соединений, применяемых для железных труб.

A изображает простое соединение встык, применявшееся прежде при кислородно-ацетиленовой сварке, а в некоторых случаях и для электрической сварки голым электродом. Для большинства работ общий угол между свариваемыми частями принимается в 90°, но при кислородно-ацетиленовой непрямой сварке с применением избытка ацетилена лучшие результаты получаются, когда общий угол берется равным 70°. Значительная часть стенки трубы изображена нескошенной, и так именно и следует делать при сварке чешуйчатым швом. В случае применения непрямой сварки лучшие результаты получаются, когда скошена вся толщина стенки трубы или, по крайней мере, нескошенной остается только 1,5 *мм*.



Фиг. 132. Различные типы швов, применяемых при соединении труб сваркой.

B — соединение труб раструбом, редко применяемое для сварки, а если и применяемое, то в большинстве случаев для труб, импортированных из-за границы. Испытание таких труб часто указывает на слабость сварки, причем последняя особенно выявляется при разрыве вырубленных частей из таких швов. Напряжения от изгиба вследствие кривизны частей, составляющих отрезки, могут разрушительно влиять на сварку. В том случае, когда представляется возможным испытать на разрыв весь шов этого типа, результаты без сомнения будут гораздо лучше, чем при разрыве образцов. Сжатие и расширение трубопровода создает в сварке этого типа срезывающее усилие.

C — шов с плоским концом и подкладочным кольцом; применяется фактически во всей электрической сварке больших трубопроводов. Выступ в центре подкладочного кольца должен иметь надлежащие размеры для того, чтобы между концами труб был соответствующий зазор.

D — то же самое, что и *C*, за исключением того, что подкладочное кольцо имеет кольцевую канавку вместо выступающего края с целью приспособить такой шов для кислородно-ацетиленовой сварки. Это подкладочное кольцо проплавляется на различных точках окружности так, чтобы была возможность вставить штифты для создания зазора между концами трубы, причем во время сварки эти штифты расплавливаются.

E и *F* — соответственно одинаковы с *C* и *B*, за исключением того, что *E* и *F* представляют собой швы в трубе с двойным раструбом, а не с плоским концом. До настоящего времени определенно не выяснено, насколько велика потеря пропускной способности трубопровода вследствие уменьшения диаметра, вызываемого наличием кольца в каждом шве, а также не установлена стоимость раструба на каждом конце трубы, с тем, чтобы можно было сравнить избыточную стоимость двойного раструба со стоимостью от возможной потери пропускной способности при применении подкладочного кольца в трубе с плоским концом. Общий угол скошенных концов при применении подкладоч-

ного кольца для непрямой сварки должен равняться примерно 70, а для электрической сварки 90°.

Заметки по практике сварки

1. Скос. Все концы отрезков труб должны быть правильно скошены. Обычно скос делается на 45° для сварки чешуйчатым швом и для электрической сварки и в 35° для непрямой ацетиленовой сварки (общий угол равен 70°).

В большинстве случаев труба поступает со скосом, сработанным механически; в случае же, если сварщику потребуется самому сделать скос куска трубы резаком, следует руководствоваться данными предыдущего параграфа относительно углов скоса; при этом сварщик должен попытаться получить скос, аналогичный механически обработанному скосу, причем внутри стенки трубы следует оставить небольшую кромку. В современной практике сварки наблюдается тенденция к прямому скосу совершенно без кромки, в особенности при сварке с избытком ацетилена. Шлак и шероховатости в результате скосов резаком должны удаляться выбиванием или вырубанием. Это особенно важно при быстрой сварке.

2. Зазоры между трубами. Трубы должны располагаться одна за другой на расстоянии в соответствии с размерами и толщиной стенок. Точность расположения труб особенно важна при применении процесса непрямой сварки.

Таблица 126

Количество, расположение и размер прихваток

Размер в дм	Количества	Расположение прихваток	Начинать сварку		Длина прихватки в мм
			вращаемая труба	потолочная сварка	
1	1	Сбоку	С противоположного бока	Снизу	12,7
1¼	1	»	То же	»	12,7
1½	1	»	» »	»	12,7
2	1	»	» »	»	12,7
3	2	Бок — верх	» »	»	19,0
4	2	Верх — бок	С противоположного бока	»	19,0
6	3	Бок — верх — бок	Сбоку над прихваткой	»	25.0
8	3	»	То же	»	25,0
10	3	»	» »	»	38,0—50,0
12	3	»	» »	»	38,0—50,0
16	3	»	» »	»	38,0—50,0
20	3	»	» »	»	63,5
Больше 20	3	»	» »	»	63,5

При сварке чешуйчатым швом зазор между кромками свариваемых труб должен равняться 3 *мм* для размеров до 2″, 4 *мм* — для трубы диаметром 3 и 4″, 6 *мм* — для диаметров от 6 до 16″ и примерно 8 *мм* — для диаметра больше 16″. Эти зазоры даются для средних толщин стенки.

При сварке с избытком ацетилена без накладки зазор между трубами должен равняться 4 *мм* для полного скоса и 5 *мм*, когда оставлена кромка. Минимальный зазор после прихватки должен в этом случае соответственно равняться 2 и 3 *мм*. При применении накладки расстояние между трубами до прихватки должно равняться 4 *мм*, а после прихватки — 3 *мм* на полном скосе и 3,5 *мм* — 4 *мм* — на скосе с кромкой.

При электрической сварке расстояние определяется накладкой, причем труба выравнивается с обеих сторон.

Если по каким-либо причинам во время процесса сварки концы труб сойдутся настолько, что зазор между ними будет меньше требуемого, их следует обработать резаком для получения необходимого правильного зазора.

3. Выравнивание. Трубы должны быть выравнены. Это значит, что расстояние между ними должно быть одинаковое, а кромки расположены по одной прямой линии. На практике достичь этого иногда бывает затруднительно, особенно если концы труб обрезаны неровно; в этом случае иногда требуется обработка концов для того, чтобы получить правильный зазор между трубами по всей окружности. Правильное выравнивание весьма облегчается применением подкладочного кольца достаточной прочности.

4. Прихватки. Трубы должны надлежащим образом прихватываться, причем прихватки следует делать сбоку и сверху трубы, но никогда не делать их снизу. Прихватки должны представлять собой высококачественную сварку и иметь толщину примерно в половину толщины стенки трубы. Соответствующее количество и размер прихваток приведены в табл. 126. В докладе 1928 г. Комиссии по сварке A. G. A. рекомендуются шесть прихваток.

Когда труба повертывается на поддержках, можно делать прихваток меньше, чем показано в таблице.

5. Сварка вращаемой трубы. При сварке труб небольшого размера с одной прихваткой начинать работу нужно со стороны, противоположной прихватке, в точке, лежащей примерно на половинном расстоянии от прихватки, и варить вверх до точки, лежащей примерно на $^3/_4$ расстояния по направлению к верхнему центру трубы; затем повернуть трубу и продолжать работу. Сваривать и повертывать трубу следует до тех пор, пока шов не будет окончен. При правильной сплавке прихватки должны быть наварены, а не выжжены.

При сварке труб среднего размера с двумя прихватками — начинать работу на стороне, противоположной прихватке, и выполнять всю эту работу так, как это указано для труб малого размера.

При сварке труб большого размера с тремя прихватками — начинать сбоку, как раз над боковой прихваткой, и производить работу, как указано выше.

При возможности повертывать трубу непрерывно лучше предоставить сварщику работать так, как ему удобнее, т. е. в верхней части или поблизости от нее.

6. Потолочные сварки. Потолочные сварки должны выполняться только в исключительных случаях.

Для выполнения сварки следует сделать под трубой в канаве выемку достаточного размера.

К потолочной сварке допускаются только квалифицированные и специально тренированные сварщики.

7. Отжиг. Мнения авторитетов по вопросу о ценности и желательности отжига сварок труб обычных размеров и с обычной толщиной стенок, применяемых при постройке трубопроводов, расходятся. Если отжиг желателен, то рекомендуется производить его следующим образом.

По выполнении сварки сваренный металл, начиная от точки, где закончена сварка, и примерно на $^1/_8$ сваренной окружности трубы должен нагреваться до темнокрасного каления. В целях создания равномерного теплового эффекта нагревать следует как сваренный металл, так и металл, непосредственно примыкающий к сваренному. Нет необходимости нагревать всю поверхность сварки.

Место сварки должно охлаждаться естественным путем; ни в коем случае не следует обливать его водой до тех пор, пока весь металл достаточно не охладится. Для непрерывных сварок нет надобности в повторном отжиге; для потолочных же сварок нижняя часть сваренной трубы должна нагреваться до темнокрасного каления, прежде чем сварка будет продолжена на верхней стороне трубы.

8. Маркировка. Каждая сварка должна соответствующим образом маркироваться в соответствии с кодом для того, чтобы можно было легко установить, какой сварщик выполнял данную работу. Эта маркировка производится сварщиком на строго определенном месте около сварки.

9. Окраска. Как только сваренные швы остынут, их следует окрасить. Нужно строго следить за тем, чтобы не начинать окраску, пока труба еще горяча.

10. Квалификация и испытание. а) Проверка. Сварщики должны быть достаточно квалифицированы и проверены путем сдачи испытаний. На вырубленных кусках образцовых сварок рекомендуется сделать испытания на излом, на изгиб и на разрыв.

б) Испытание на месте. Необходимо иметь по меньшей мере одного инспектора, ответственного за качество сварки. Если установка небольшая, то таким инспектором может быть старший сварщик.

Сварки должны испытываться на течь путем обмыливания в то время, когда

трубопровод находится под давлением газа или воздуха. Обычно это давление равняется 3,5—7,5 *кг/см²*. Очень маленькие отверстия в сварке можно зачеканивать, но всякая сварка, где имеется утечка, проявляющаяся в общем выпотевании вдоль кромки или в появлении капель воды как в сваренном металле, так и на кромке, должна вырубаться и перевариваться.

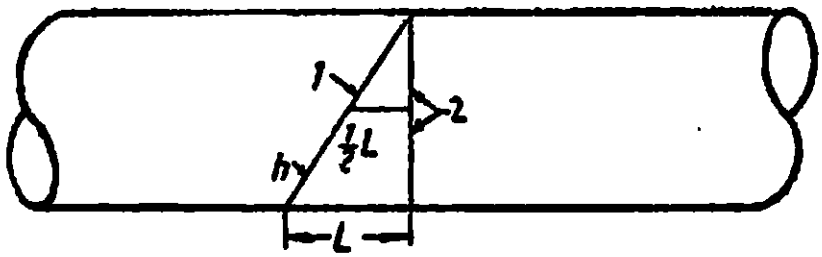
в) Испытания в мастерской. Сваренные отрезки металла и сваренные бомбы испытываются в лаборатории на разрыв. При этом можно высчитать напряжение на единицу сечения.

Испытание на излом, которое можно выполнить в мастерской, заключается в вырезании образца шириной примерно в 38 *мм* и в 152 *мм* по каждой стороне сварки. Для проведения этого испытания следует заложить один конец в тиски, а другой загибать молотком таким образом, чтобы на месте сварки образовался угол в 90°. Сварка должна быть под напряжением. Удовлетворительный образец при таком испытании не должен давать трещин.

Изготовление сварных отводов

Для изготовления нужного отвода из прямого куска трубы надо поступать так. Вокруг трубы, на том месте, которое должно быть вырезано, начертить полную окружность при помощи сварочного прутика, проволоки или каким-либо иным путем, как это показано на фиг. 133.

Пруток или проволоку полученной длины складывают вдвое и накладывают в таком виде на окружность трубы. Делают отметки на каждой ее стороне, разделив, таким образом, окружность на две равные части. Еще раз складывают проволоку вдвое и замечают точку посредине полуокружности.



Фиг. 133. Схема изготовления угольников.
1 — в этом месте вырезать вдоль; *2* — начертить окружность.

От одной из точек, делящих окружность пополам, проводят линию *L* (величина ее берется из табл. 127), горизонтальную по отношению к оси трубы (фиг. 133), а из средней точки (указывающей четверть окружности) проводят параллельную линию, равную половине *L*. От конечной точки линии *L* проводят диагональ *h*

Таблица 12

Величина *L* для различных размеров труб и углов

Номинальный диаметр в дм.	Действительный внешний диаметр в мм	Окружность в мм	Величины *L* в мм				
			φ = 22,5°	φ = 30°	φ = 45°	φ = 60°	φ = 90°
2	60,325	188,91	12,70	15,88	23,40	34,93	60,325
3	88,90	279,40	17,46	23,81	36 52	50,80	88,90
4	114,30	358,78	22,22	30,16	47,63	66,68	114,30
6	168,27	528,62	33,34	44,45	69,85	96,84	168,27
8	219,08	688,98	42,86	58,74	90,49	127,00	219,08
10	273,05	857,25	53,98	73,03	112,71	157,16	273,05
12	323 85	1 017,60	65,09	87,31	133,35	187,32	323,85
16	406,40	1 276,35	80,96	125,41	168,28	234,95	406,40
20	508,00	1 595,45	101,60	136,53	211,15	293,70	508,00
24	609,60	1 914,50	120,65	163,51	252,42	352,42	609,60
30	762,00	2 393,95	150,81	204,79	315,90	439,72	762,00
36	914,00	2 873,34	182,56	244,48	379,42	528,62	914,00

до противоположной точки через конечную точку линии „половина L", взяв для этого сварочный пруток (не рекомендуется применять стальную линейку).

Далее разрезают трубу горелкой для резки полностью по окружности по линии h и поворачивают отрезанную часть на 180° по отношению к другой части; после этого производят прихватку и сварку. Очевидно, что точка, от которой проведена линия L, определяется направлением, в котором следует загнуть угол. В табл. 127 дается длина L в дюймах, необходимая для изготовления сварных отводов в трубах разных диаметров. Следует принимать во внимание наружный диаметр трубы, и в тех случаях, когда этот диаметр или нужный угол не соответствует таблице, расстояние L высчитывать из формулы:

$$L = D \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}.$$

СЛОВАРИК СВАРОЧНЫХ ТЕРМИНОВ

Автогенный. Самопроизвольная сварка. Пайка крепким припоем требует флюса и, следовательно, не является автогенной.

Амальгирование. Смешение, соединение различных металлов.

Ванночка. Небольшое количество расплавленного металла, получаемого под действием сварочного пламени или электрической дуги.

Вогнутая сварка. Поверхность сварки ниже уровня свариваемого металла.

Выравнивание. Относится к трубам. Указывает, что боковые стенки должны лежать на одной определенной линии.

Нейтральное пламя. Пламя с совершенным сгоранием, ни окислительное, ни восстановительное.

Непрямой способ сварки. Сварочный пруток следует за пламенем; пламя действует на готовую сварку.

Неуглерожывающее пламя. Содержит кислород в недостаточном для полного сгорания количестве.

Окислительное пламя. Пламя с избытком кислорода.

Отжиг. Процесс нагрева для уничтожения внутренних напряжений.

Потолочная сварка. Название, применяющееся для сварки труб, когда сварщик сваривает трубу над головой.

Прихватка. Небольшое количество сварочного металла в наиболее выгодных точках для выравнивания свариваемых частей до сварки.

Провар. Процент толщины стенки, тщательно расплавленной и сваренной; недостаточный провар, особенно в нижней части скоса, представляет собой чаще всего встречающийся недостаток сварки.

Раковина. Пустота в сварочном шве, вызванная попавшим в сварку газом.

Растяжимость. Свойство металлов вытягиваться без повреждений.

Сварка встык. Сварка кромка к кромке.

Сварка по прямому способу. Пламя направляется вслед за прутком.

Сварка с избытком ацетилена. Другой термин для сварки по непрямому способу.

Сварка швов внахлестку. Кромки сварки лежат одна на другой.

Скос. Скос кромок при подготовке к сварке.

Твердая пайка. Пайка крепким припоем.

Цементация с закладкой верхнего слоя железа. Цементация железа путем введения углерода.

ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ СВАРКИ БОЛЬШИХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЛИНИЙ

Электросварка. *а) Амперaж.* В течение всего времени производства работ должна применяться надлежащая сила тока, соответствующая размеру и виду применяемого электрода. Инспектор должен утвердить силу тока, применяемого для сварки; все вольтметры и амперметры должны всегда быть в хорошем состоянии и доступны для осмотра инспектором.

б) Сварка вращаемой трубы. Такая сварка должна производиться с прихват-

ками и на подпержках путем непрерывного повертывания трубы в одном направлении до тех пор, пока не будет закончена сварка.

Сварка вращаемой трубы должна производится вокруг соединения за два раза; при первом проходе соединение должно быть тщательно очищено от окислов, грязи, шлака и других загрязнений.

Ванночка должна быть в верхней части трубы, и для обоих электродов следует применять сварочный пруток размером 7,9 *мм*. При сварке вращаемой трубы следует делать две прихватки.

в) Сварка раструбом. Сварка раструбом должна производиться с надлежащей выверкой, и концы труб должны соединяться вместе в четырех точках, отстоящих на 90° одна от другой. Для выполнения сварки вокруг трубы следует сделать достаточное количество обходов. Каждый обход надлежит тщательно очистить от окалины и других посторонних примесей до того, как приступать к следующему.

г) Размер сварки. Все сваренные места должны быть свободны от наплывов или прогибов, и все точки на наружной поверхности места сварки должны лежать снаружи внешней окружности трубы. Ширина каждого сваренного шва должна быть не меньше 19 *мм*.

Ацетиленовая сварка. Кислородно-ацетиленовая сварка должна представлять собой процесс, в котором применяются восстановительное пламя и „быстроходный" сварочный пруток диаметром примерно 8 *мм* (минимум).

В процессе сварки вращаемой трубы должна достигаться скорость минимум 76 линейных *мм* в минуту.

В тех случаях, когда применяются накладки, следует делать две (или больше) прихватки, а когда накладки не применяются, нужно делать четыре прихватки (или больше).

Все прихватки должны располагаться равномерно по окружности трубы, иметь в длину 50,8 *мм* (или больше) и проникать во внутреннюю стенку трубы. Сварочные швы должны быть усилены на 25% с тем, чтобы поперечный разрез места сварки через продольную ось трубы был по меньшей мере на 25% толще номинальной толщины стенки трубы. Металл следует тщательно наплавлять на трубу, и этот наплавленный металл должен быть свободен от недоваров, маленьких отверстий, посторонних окисленных тел и других дефектов. Наплавляемый металл должен провариваться до внутренней стенки трубы. В конце сварки восстановительное пламя заменяется нейтральным, и сварка ведется особо тщательно для того, чтобы исключить возможность каких бы то ни было дефектов.

Сварка вращаемой трубы должна выполняться путем непрерывного повертывания трубы в одном направлении до тех пор, пока сварка не будет закончена.

Стационарная сварка или сварка раструбом должна выполняться тщательным выравниванием и с надлежащим количеством прихваток между частями соединяемых труб.

Соединения должны выполняться путем первой сварки по меньшей мере на 250 *мм* от низа соединения и на 125 *мм* от каждой стороны центра дна и затем заканчиваться по заранее строго определенному способу.

Течи, получающиеся между наплавленным металлом и концами трубы, должны исправляться путем вырезания куска трубы длиной 100 *мм* и замены ее куском однотипной трубы.

Метод испытания сварок, одинаково применимый и к электросварке и к кислородно-ацетиленовой, заключается в следующем.

Подрядчик обязан вырезать и доставить инспектору отмеченные последним куски металла из любого места любой сварки. Предельное сопротивление разрыву наплавленного металла в этих отрезках металла должно равняться предельному сопротивлению разрыва трубы или быть больше этого сопротивления. Если вырезанный кусок металла соответствует этим требованиям, то подрядчик наваривает кусок точно такого же металла на вырезанном месте. Если же вырезанный металл не соответствует этим требованиям, то вырезается сварка по всей линии и делается заново по способу, который инспектор признает удовлетворительным.

Характеристика сварки. Назначение и цель этих технических условий заключается в том, чтобы сделать возможной 100-процентную сварку в смысле прочности, растяжимости, сплавления и провара по всей окружности сваренного шва, включая и те точки, на которых сделаны прихватки.

Каждому сварщику присваивается определенный номер, и этот номер ставится на каждой его работе с целью в будущем установить, кто именно произвел данную работу.

7. КОРРОЗИЯ ТРУБ

ЭЛЕКТРОЛИЗ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Теория. Электролиз представляет собой разделение химического компонента на его составные части под действием электрического тока. Действие это происходит в электрической цепи, на поверхности металлов, между металлами и растворами почвенных солей, соприкасающихся с трубопроводами.

Раствор представляет собой электролит, а металлические пластинки или полюсы — электроды. Полюс с более высоким потенциалом является анодом, а другой — катодом. Продукты разложения представляют собой отрицательные и положительные ионы. Положительные ионы (или катионы) освобождаются на катоде, а отрицательные ионы (или анионы) освобождаются на аноде. Анод теряет в весе вследствие разряда ионов[1].

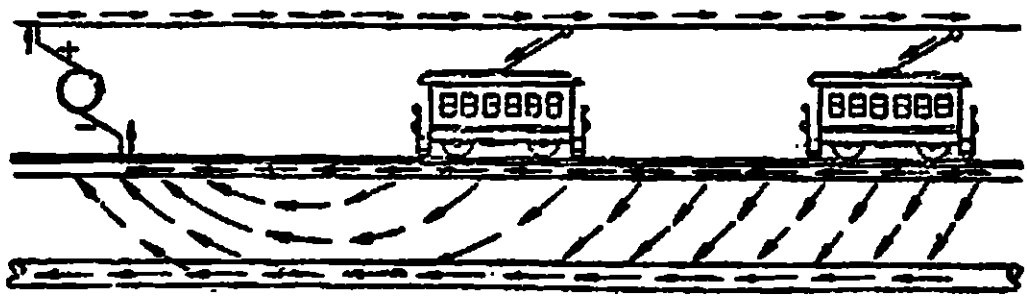
Виды электролиза. Можно считать, что электролиз имеет две разновидности, т. е. бывает либо конструктивным, либо деструктивным, в зависимости от того, происходит ли он по воле человека, или против его воли. Деструктивный электролиз происходит на тех подземных трубах, которые являются анодными благодаря гальваническим или динамическим источникам тока. Электрический ток может иметь конструктивное или предохранительное значение для тех труб или металлических поверхностей, которые делаются катодными. Так называемая „катодная защита" против химической или почвенной коррозии является результатом отрицательного заряда. Хотя действие гальванических токов одинаково с действием динамических токов, оно обычно рассматривается как разновидность почвенной коррозии. Оно возникает вследствие разности потенциалов, существующей между разнородными веществами металлов, окислами, окалиной, почвой и т. д.

„Точки" на линиях трубопроводов значительного протяжения вызываются гальваническим контактом разнородных почв. Трудно установить и измерить эти относительно небольшие токи в том случае, когда они сопровождают токи утечки динамического происхождения[2].

Законы. потери и сила коррозии. Законы Фарадея, относящиеся к электролизу, состоят в следующем:

1. Количество разложенного электролита пропорционально количеству проходящего электричества.

2. Масса иона, освобожденная данным количеством электричества, пропорциональна химическому эквивалентному весу иона. Другими словами, равные коли-



Фиг. 134. Упрощенная схема электрического трамвая, иллюстрирующая условия, существующие для электролиза.

чества электричества при идеальных условиях всегда будут разлагать одинаковые по весу количества данного металла. Так, например, количество электричества, равное одному ампер-году, при идеальных условиях разложит примерно 9 *кг* железа и 33 *кг* свинца. При идеальных условиях в чистой влажной земле электролиз трубопроводов не происходит. Действительные потери в весе от коррозии колеблются в пределах между 20 и 140% от теоретического количества.

Отношение фактической коррозии к теоретической представляет собой коэ-

---

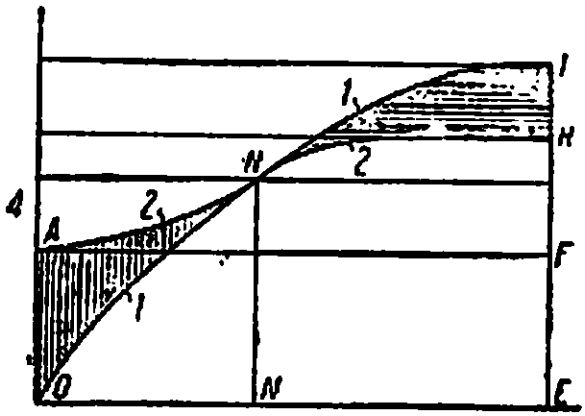
[1] Более подробные сведения можно найти в руководствах по физике.

[2] „Western Gas", 1932; Шеперд, Токи трубопроводов и удельное сопротивление почвы как показатели местных разъедающих участков почвы, Доклад Бюро стандартов, 298, 1931.

фициент степени коррозии. Отношение максимальной глубины коррозии к средней глубине дает коэфициент разъедания.

Законы Фарадея одинаково относятся и к стали, и к ковкому железу, и к чугуну. Для чугуна потеря металла при поверхностном наблюдении может быть не замечена вследствие того, что углеродный компонент не меняется. Размягчение графита представляет собой явление, обычное и при электрической и при химической коррозии[1].

Распределение потенциалов по рельсам и трубам. На фиг. 134 показана упрощенная схема электрического трамвая с генератором, дающим на провод ток в 600 V, при однопутной колее, проложенной по прямой линии, с рядом вагонов, расположенных на одинаковом расстоянии один от другого. К рельсам в одной точке присоединен отрицательный полюс. Путь и проходящий с ним рядом параллельный трубопровод имеют одинаковое по своей длине линейное сопротивление. Мы будем иметь некоторое падение потенциала в контактном проводе и путях, предположим по 25 V, так что для мотора вагона останется 550 V. Это и есть падение потенциала в колее, вызывающее ток утечки. Таким путем создаются два электролитических элемента: один — на конце колеи, где она анодная, а труба катодная. В этой „отрицательной зоне" рельсы разъедаются другим элементом является „положительная зона" рядом с подстанцией, где колея — катодная и где разъедается труба, являющаяся анодом. Между этими двумя зонами находится „нейтральная зона", в которой труба по отношению к колее является попеременно то положительно, то отрицательно заряженной.



Фиг. 135. Распределение потенциалов: городской трамвай и параллельный трубопровод.

1 — потенциал рельсов; *2* — потенциал трубы.

На фиг. 135 изображены диаграммы потенциалов трамвайной колеи и трубопровода для простейшего случая, изображенного на фиг. 134. Точка *O* представляет собой потенциал отрицательной шины. Падение потенциала на рельсах по направлению к подстанции представлено кривой *INO*. Степень падения потенциала трамвайной колеи в любой точке, измеряемая обычно в единицах падения потенциала на определенную длину пути, указывается уклоном этой кривой, из которого видно, насколько сильнее ток в рельсах ближе к подстанции, чем в других точках. Общее падение потенциала на трамвайной колее определяется расстоянием *IE* по вертикали. Так как через трубопровод проходит часть трамвайного тока, то он также имеет свой потенциал, обозначенный кривой *HNA*, градиент потенциала в каждой точке, изображаемый уклонами кривой, и общее падение потенциала *HF*. Математический центр нейтральной зоны для некоторых заданных величин пути падает в точку *N*, где *ON* равняется $0{,}420E$[2].

Общие соображения по смягчению электролиза. Относительные величины линейных расстояний и напряжений потенциалов трубопровода и трамвайной колеи в положительной и отрицательной зонах представлены соответственно горизонталями и вертикалями в заштрихованных площадях *ANO* и *INH*. Таким образом, разница потенциалов между трубопроводом (положительная) и рельсами у подстанции *AO* будет больше разницы между линией (отрицательной) и рельсами на конце трамвайной колеи *HI*. Эти потенциалы между трубопроводом и железнодорожной колеей вызывают утечку от трубы к трубо. Так как они зависят от общего падения потенциала в трамвайной колее, то первое условие смягчения электролиза заключается в уменьшении общих падений потенциала с целью свести до минимума тенденцию к утечке тока. Вторым условием будет увеличение сопротивления току утечки с целью его возможного уменьшения.

---

[1] Буртон Мак-Коллум и Логан, Электролитическое разъедание железа в почве, Технический доклад Бюро стандартов, 25, 1913.

[2] А. Ганц, „Электролиз" в „Стандартном справочнике инженеров-электриков".

Особенности железнодорожного строительства и эксплоатации, влияющие на электролиз и его смягчение

Рельсы и рельсовые соединения. Сопротивление трамвайной колеи зависит прежде всего от ее длины, веса, сорта стали, установки и качества текущего ремонта рельсовых соединений, включая крестовины и специальные соединения вокруг стрелок, переходов и т. д. Укладка тяжелых желобчатых рельсов на каменном балласте и хорошо дренированное полотно в связи с улучшением улиц — все это за последние годы очень помогло уменьшению утечки. Силу тока в рельсах можно определить довольно точно по показаниям милливольтметра, дающим падение потенциала по длине однопутного рельса. Для этой цели далее приводится табл. 128 с данными веса и сопротивлений рельсов [1].

Отрицательные изолированные фидеры. Относительное и общее падение потенциала можно уменьшить до любой величины, устанавливая соответствующие изолированные фидеры. Сопротивление этих фидеров рассчитано так, чтобы дать достаточно высокий вольтаж и таким путем с соответствующей эффективностью отводить токи от рельсов. В особенности эти фидеры приемлемы на городских участках с очень сильным уличным движением.

Подстанции с автоматическим контролем и контролем на расстоянии. Если длина пути укорочена наполовину, а другие факторы — размер рельсов и т. д. — остаются прежними, то и сопротивление пути и сила тока уменьшатся на такую же величину. Общее падение потенциала, пропорциональное сопротивлению и току, уменьшится до одной четверти своей прежней величины.

В прежнее время, когда только что начиналась эксплоатация трамвая, строились подстанции большой производительности с целью снижения стоимости их обслуживания. Последние достижения в области автоматического контроля и контроля на расстоянии сделали экономически возможным установку подстанций небольших размеров.

Система трех проводов. Трехпроводная система эксплоатации трамвайного вагона представляет собой хорошо известную систему Эдисона, в которой путь является средним или нейтральным проводником, что значительно уменьшает ток утечки, идущий в том или ином направлении в зависимости от того, находится ли несбалансированная нагрузка в отрицательной или положительной секции.

Одно из возражений против трехпроводной системы заключается в трудности поддерживать ее сбалансированной. Другое возражение направлено против невыгодности работы двух генераторов в периоды легких нагрузок; в это время двухпроводная система была бы более экономной.

Двухтролейная система. В двухтролейной системе передача энергии производится по двум роликам: одному — для передачи тока к вагону и другому — для возвращения тока обратно.

Такая система характеризуется полным освобождением от электролиза, так как по рельсам ток не проходит. Возражения против этой системы касаются затруднений с изоляцией токоприемного устройства и высоких капиталовложений.

Изоляция пути. Изоляция пути междугородных электрических железных дорог, проходящих по частным полосам отчуждения и имеющих каменный балласт пути и пропитанные шпалы, должна быть достаточно хорошей. На городских улицах изоляция в значительной степени зависит от размера рельсов, пропитки шпал, вида, глубины и дренажа балласта полотна, времени года, сопротивления почвы и т. д. Сопротивление утечке между однопутной колеей и землей [2], как известно, колеблется в пределах между 0,0013 и 4,0 ом на 100 *м*.

Особенности конструкции подземных металлических сооружений и их эксплоатации, влияющие на электролиз и его ослабление

Работа инженера, специалиста по трубопроводам, в области уменьшения электролиза путем увеличения сопротивления по пути тока утечки весьма ограничена. Сопротивление на пути тока утечки от вагона до подстанции склады-

---

[1] Шеперд, Современная практика постройки и текущего ремонта рельсовых соединений электрических железных дорог, Технический доклад Бюро стандартов, 62.

[2] Бурton Макколлам и Логан, Утечка тока в электрических железных дорогах, Технический доклад Бюро стандартов, 63, 1916; Эльборн, Данные по утечке тока пути электрических железных дорог, Технический доклад Бюро стандартов, 75, 1916.

вается на: 1) изоляции пути, 2) сопротивления почвы, 3) изоляции поверхности труб и 4) сопротивления трубы. Изоляция пути и сопротивление почвы лежат вне пределов контроля этого инженера. Изоляция поверхности малоэффективна; сопротивление же трубопроводов точно устанавливается их размерами, разновидностями и конструкцией, которые обычно заранее определяются на основании соображений, не имеющих ничего общего с электролизом.

Изоляция поверхности. „Прежде в качестве возможного способа предохранения труб от электролиза применяли их окраску или какую-либо другую изоляцию поверхности труб вроде специально обработанной бумаги или текстильных изделий; этот способ применяется иногда и до сих пор. Однако сомнительно, имели ли место такие случаи, когда изолирующие краски оправдывали себя как действительно предохраняющие от электролиза в течение длительного периода времени; в то же время известно много случаев, когда такая окраска совершенно не давала никаких результатов, а причиняла вред". Слабая сторона изоляции трубы против тока утечки заключается в том, что в изоляции всегда имеются дефекты в виде крохотных отверстий, на которых электролиз и концентрируется, давая в результате глубокое разъедание[1].

Сопротивление труб и их соединений. Сопротивление чугуна примерно в десять раз больше сопротивления стали, причем свинцовая заливка раструбов еще более увеличивает эту разницу. Если бы случайно оказалось, что соединенные вместе газораспределительная и водораспределительная системы были обе сконструированы из чугуна, то электролиз значительно бы уменьшился. Однако обычно или та или другая из этих систем полностью или частично конструируются из стали, так что преимущество это редко реализуется на практике.

Случайное изолирующее соединение, как, например, на задвижках и т. д., в стальной магистрали представляет собой определенный источник опасности вследствие того, что ток утечки, проходящий через почву между концами трубы, создает, таким образом, электролиз соединения. С целью предотвращения электролиза трубных соединений рекомендуется соединять концы труб специальными железными проводниками, в особенности в тех случаях, когда на трубопровод действует сильный ток.

Расположение трубопроводов. Часто бывает, что все усилия электрических железных дорог ограничить утечку из рельсов частично парализуются вследствие прокладки больших магистральных трубопроводов параллельно и в непосредственной близости к путям. Магистральные трубопроводы должны прокладываться как можно дальше от путей, а пересекающие их трубы домовых водопроводов должны лежать на значительном расстоянии от рельсов. Там, где это экономически возможно, передаточные линии не должны прокладываться параллельно и в непосредственной близости к путям электрической железной дороги.

Сопротивление почвы. Сопротивление почвы имеет большое значение для проводимости цепи тока утечки. Следует считать неблагоприятным стечением обстоятельств, когда положительная зона подстанции расположена на участке с влажной почвой малого сопротивления. Сопротивление почвы определяется ее влажностью и содержанием солей. Некоторые почвы, в особенности сухие, фактически являются непроводниками. Было найдено, что сопротивление почвы колеблется в пределах примерно между 100 и 500 000 *ом* на 1 *см*^{2}.

Электрический дренаж подземных металлических сооружений. Инженер по трубопроводам имеет очень небольшие возможности (или совсем их не имеет) контролировать факторы проводимости цепей обратного тока электрической железной дороги и сопротивление цепи тока утечки, вследствие чего он обычно прибегает к установке дренирующих соединений. Принцип электрического дренажа заключается в разряде тока утечки из сооружений, подвергающихся действию этого тока в положительных зонах подстанции. Посредством изолированных проводов, присоединенных к отрицательной шине, предотвращается течение этого тока в землю. Установка дренирующих соединений нарушает теорию, что сопротивление цепи тока утечки следует поддерживать на наивысшем возможном уровне.

Необходимость электрического дренажа объясняется тем фактом, что в положительных зонах, прилегающих к подстанциям большой мощности и не имеющих

---

[1] Роза и Бертон Мак-Коллом, Электролиз и его ослабление, Технический доклад Бюро стандартов, 52, 1915; Бертон Мак-Коллом и Питерс, Поверхностная изоляция труб как способ предотвращения электролиза, Технический доклад Бюро стандартов, 15, 1914.

отрицательных фидеров или же имеющих недостаточное количество их, системы трубопроводов имеют высокий анодный потенциал.

Преимущество дренирующих соединений заключается в том, что они снижают потенциал трубы в положительной зоне. Недостаток же их состоит в том, что они значительно увеличивают течение тока утечки путем уменьшения сопротивления на его пути. Это увеличение тока дает больший риск электролиза трубных соединений и опасность пожаров и взрывов вследствие сильного искрения во время ремонта и добавления труб, причем между различными подземными металлическими сооружениями устанавливаются неравномерные потенциалы, а также имеет место повышенный электролиз в отрицательных зонах. Ограничение применения дренирующих соединений заключается в том, что в системе подземных чугунных труб или в нескольких таких системах, имеющих высокое сопротивление, дренаж и его благодетельные результаты ограничиваются небольшим местным участком. Степень дренажа должна ограничиваться минимальным количеством тока, нужного для доведения потенциала трубы до потенциала земли. Вместе с дренирующими соединениями должны быть установлены сигнальные провода к различным подземным сооружениям и должно быть предусмотрено все необходимое для регулирования и измерения силы тока.

Выключатели обратного тока для дренирующих соединений. В систему электрических железных дорог обычно входит несколько подстанций, бездействующих по ночам и в периоды небольших загрузок. При выключении их из линии их положительные зоны делаются отрицательными; в результате соединения для дренажа становятся источником тока, идущего к трубопроводу. Для предотвращения этого обратного тока следует предусмотреть способы разрыва цепи дренирующего тока, когда меняется его направление. Эти выключатели при установке их на подстанции могут быть либо ручного, либо автоматического типа. Когда эти выключатели установлены на линии, они должны быть либо автоматические, типа купроксного выпрямителя, либо магнитного типа с контактом медь—ртуть. Выключатель купроксного типа перегорит, если будет подвергнут избыточным нагрузкам тока или если ток пойдет в обратном направлении. Контактные выключатели требуют периодических осмотров для возобновления ртути.

Металлические соединения между домовыми и подземными трубопроводами. На территории электрической железной дороги, где трубопроводы проводят ток в количестве, достаточном для того, чтобы вызвать воспламенение газа между концами трубы при включении и выключении тока, бригады трубопроводчиков должны иметь изолированный гибкий медный кабель и соответствующие клеммы для получения параллельной цепи вокруг открытых концов трубы и между прилегающими трубами. Если оказывается, что напряжение между двумя параллельными или пересекающимися трубопроводами равняется примерно 0,3 V или больше, то для предотвращения электролитического тока между ними выгодно применение постоянных металлических соединений. Такое положение в особенности может иметь место в случае, когда имеют дело с металлом изолированной передаточной линии, пересекающей участки распределительных труб. В газо- и водораспределительных системах функция металлических соединений выполняется соединенными одна с другой домовыми проводками. Иногда чередование тока в домовых трубопроводах весьма затрудняется вследствие наличия в одной из магистралей соединений с высоким сопротивлением. Этого может быть достаточно для того, чтобы вызвать искрение в случае разрыва соединений с домовым счетчиком. В таких случаях металлическое соединение следует установить между стояком и системой домовых проводок. Если напряжение достаточно для того, чтобы вызвать удары от электрического тока при установке счетчиков, то следует произвести испытания с целью определить, заземлены ли провода электрического освещения.

Действие переменного тока и тока, периодически меняющего направление при электролизе. Переменные токи обычно применяемых в городской сети частот электролиза не дают. Даже токи обратного направления, случающиеся в нейтральных зонах на участках электрических железных дорог, а также токи, сопровождающие работу трехпроводной системы, характеризующейся переменой направления тока каждые 15 мин. или чаще, заметного разъедающего действия не оказывают[1].

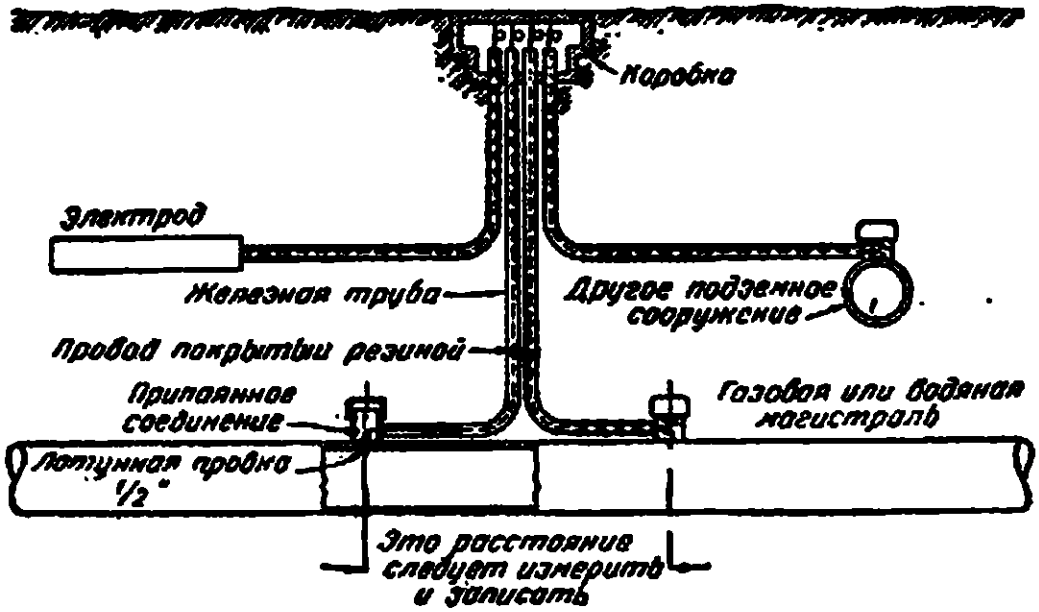
---

[1] Бертон Мак-Коллом и Эльборн. Влияние частоты переменного тока на электролитическую коррозию, Технический доклад Бюро стандартов, 72.

Электролиз железа в бетоне. Влажный бетон подобно почве является проводником электричества. Когда железо помещено в бетон (для усиления либо для других целей), оно может подвергаться электролизу разрядом электричества, которое проходит через систему трубопроводов. Это может произойти в мостовых конструкциях и зданиях. Окислы железа, появляющиеся вследствие электролиза, занимают больший объем, чем железо, из которого они образовались, в результате чего давление может с течением времени вызвать трещины в бетоне. Следует особенно тщательно предохранять от электролиза стальные укрепленные основания фундаментов в положительных зонах[1].

Соображения по электролизу передаточных линий

В современной газовой промышленности наблюдается тенденция разрабатывать обширные промыслы естественного газа и передавать его на большие расстояния по трубопроводам. Ввиду важности последних с точки зрения снабжения населения газом и бесперебойности в подаче его следует обратить внимание на безопасность этих трубопроводов. Так как эти трубопроводы имеют металлическую изоляцию, то они подвержены некоторому действию электролиза. Огромное значение трубопроводов должно оправдать некоторые расходы на уста-



Фиг. 136. Распределение проводов вольтметров для испытательной установки на газовой или водяной магистрали.

новку испытательных станций в пунктах, которым придается важное значение. На этих станциях следует испытывать интенсивность тока, определяемую по методу падения потенциала по измеренной длине, разность потенциалов по отношению к другим подземным сооружениям и потенциал трубы по отношению к земле (фиг. 136). Представление о разности потенциалов трубы и земли можно получить путем установки электрода на небольшом расстоянии от трубопровода.

Цели и задачи исследования электролиза. Целью исследования электролиза в системах трубопроводов являются установление и определение возможных участков, в которых происходит электролитическое разрушение, измерение скорости этого разрушения, определение источника и причины утечки тока и получение дополнительных данных, которые можно использовать для принятия надлежащих мер к ослаблению электролиза.

Исследования электролиза можно разделить на предварительные, периодические и более глубокие — систематические.

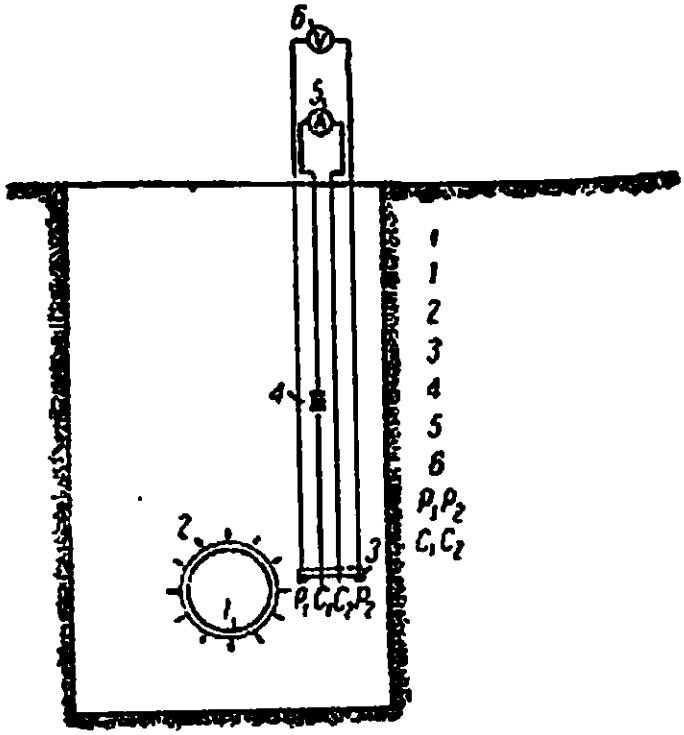
---

[1] Роза, Бертон Мак-Коллем и Питерс, Электролиз в бетоне: Технический доклад Бюро стандартов, 18, 1915.

Предварительные исследования заключаются главным образом в измерении потенциалов, существующих между трубопроводами и подземными сооружениями, а также падения потенциалов в рельсах, расчете тока в основных трубопроводах по методу падения потенциала, наблюдении за размерами рельсов, длиной путей, состоянием железнодорожного полотна, периодами работы подстанций, напряжением тока между параллельными путями, присутствием отрицательных обратных фидеров и т. п.

Периодические исследования заключаются в измерениях с целью сравнения таких важных величин, как ток в дренирующих связях, потенциал трубы по отношению к рельсу в наиболее важных и изолированных пунктах и потенциалы трубы по отношению к земле на тех участках, где электролиз происходил или предполагался.

Глубокие систематические исследования обычно требуют больших персонала и оборудования, чем это может предоставить одна организация. Одновременные изменения тока в дренирующих связях, разности потенциалов между различными подземными конструкциями, общие падения потенциала в рельсах и трубах, потенциалы проводников по отношению к земле и т. д. — все это требует работы целых бригад, значительного количества регистрирующих инструментов и применения телефонных проводов. Систематическое исследование обычно преследует цель определить причину, интенсивность и способ ослабления электролиза. Признано, что проблема электролиза интересует все организации, связанные с сооружениями, проложенными по проездам, и решить ее можно лишь путем совместных усилий[1].



Фиг. 137. Принципы счетчика земных токов.

1 — труба; *2* — направление тока; *3* — контактор; *4* — батарея; *5* — амперметр; *6* — вольтметр; P_1, P_2 — провода для измерения потенциала; C_1, C_2 — провода для измерения тока.

Необходимые инструменты. Инструменты, нужные для исследования электролиза, представляют собой один указывающий и несколько регистрирующих милливольтметров с несколькими шкалами. Шесть или больше шкал должны быть градуированы от 10 mV до 50 V. Внутреннее сопротивление на 1 V должно равняться по меньшей мере 400 *ом*. Для этих милливольтметров должны иметься калиброванные шунты, дающие возможность измерять ток силой от 10 до 500 А. При измерениях тока в качестве шунтов можно калибровать и применять отрезки трубопроводов или же приблизительно определять ток на основании величин трубных сопротивлений, имеющихся в соответствующих таблицах[2].

Счетчик Мак-Коллэма для определения блуждающих токов. Токи от трубы к почве или обратно идут по радиальным линиям в плоскости, перпендикулярной к оси трубы. Ниже приводится краткое описание отдельных моментов и принципов измерения блуждающих токов, заряжающих трубу или разряжающих ее в землю (фиг. 137).

Пример 1. Измерить по направлению и величине падение потенциала между двумя точками P_1 и P_2. Если P_1 имеет более высокий потенциал, чем P_2, то возникает ток разряда, что указывает на электролиз. Наоборот, если потенциал P_2

[1] Доклад американской комиссии по электролизу, 1921; Спеллер, Коррозия, ее причины и предотвращение; Роза и Бертон Мак-Коллэм, Специальное исследование по ослаблению электролиза, Технический доклад Бюро стандартов, 27.

[2] Электрические измерительные инструменты, Циркуляры Бюро стандартов, 20, 1915.

Таблица 128

Характеристика тока для стальных рельсов[1]

Принято, что удельное сопротивление стали приблизительно в 11 раз выше удельного сопротивления меди

Вес в кг на 1 м	Ток для 1 mV на 1 м в А	Вес в кг на 1 м	Ток для 1 mV на 1 м в А	Вес в кг на 1 м	Ток для 1 mV на 1 м в А
29,8	20,3	47,1	32,3	62,0	42,4
32,2	22,0	49,6	33,8	64,5	43,9
31,7	23,7	52,0	35,7	67,0	45,7
37,2	25,4	54,6	37,2	69,4	47,6
39,7	27,1	57,0	39,0	71,9	49,1
42,1	28,8	59,5	40,6	74,4	50,9
44,6	30,5				

Таблица 129

Характеристика тока для стальных труб

Стандартные			Усиленные	
номинальный внутренний диаметр в дм.	вес в кг на 1 м	ток для 1 mV на 1 м в А	вес в кг на 1 м	ток для 1 mV на 1 м в А
0,125	0,36	0,34	0,46	0,44
0,25	0,62	0,59	0,80	0,76
0,375	0,84	0,81	1,10	1,05
0,50	1,26	1,20	1,81	1,53
0,75	1,67	1,59	2,18	2,07
1,00	2,49	2,38	3,21	3,08
1,25	3,36	3,20	4,44	4,24
1,50	4,03	3,80	5,37	5,12
2,00	5,40	5,20	7,43	7,11
2,50	8,57	8,20	11,34	10,80
3,00	11,22	10,70	15,17	14,50
3,50	13,48	12,90	18,51	17,70
4,00	15,97	15,30	22,17	21,00
4,50	18,56	17,70	26,06	25,00
5,00	21,64	20,70	30,75	29,30
6,00	28,08	26,80	42,28	40,30
7,00	34,84	33,20	56,31	53,70
8,00	36,56	34,80	64,22	61,30
8,00	42,25	40,30	—	—
9,00	50,19	47,90	72,12	68,90
10,00	46,18	44,20	81,02	77,50
10,00	50,68	48,50	—	—
10,00	59,91	57,50	—	—
11,00	67,43	64,50	88,92	84,80
12,00	64,78	62,00	96,82	92,40
12,00	73,35	70,00	—	—
13,00	80,76	77,00	106,69	102,00
14,00	86,68	82,50	114,60	109,50
15,00	92,62	88,50	122,50	117,00
19,00	126,66	121,00	154,11	147,00

[1] Не включены рельсовые соединители.

Таблица 130

Характеристика тока для труб из ковкого железа

Стандартные			Усиленные	
номинальный внутренний диаметр в дм.	вес в кг на 1 м	ток для 1 mV на 1 м в А	вес в кг на 1 м	ток для 1 mV на 1 м в А
0,125	0,35	0,35	0,43	0,42
0,25	0,62	0,61	0,80	0,79
0,375	0,83	0,82	1,10	1,08
0,50	1,25	1,23	1,62	1,59
0,75	1,66	1,65	2,06	2,01
1,00	2,48	2,44	3,22	3,17
1,25	3,34	3,29	4,46	4,36
1,50	4,00	3,93	5,39	5,30
2,00	5,44	5,34	7,45	7,30
2,50	8,57	8,40	11,39	11,20
3,00	11,20	11,00	15,22	14,90
3,50	13,44	13,20	18,52	18,30
4,00	15,92	15,60	22,23	22,00
4,50	18,55	18,30	27,06	26,50
5,00	21,62	21,40	30,50	30,00
6,00	27,88	27,50	42,44	42,00
7,00	34,76	34,20	55,94	55,00
8,00	37,13	36,60	63,86	63,00
8,00	42,08	41,50	—	—
9,00	50,04	49,10	72,36	71,00
10,00	47,52	46,70	—	—
10,00	51,98	51,00	—	—
10,00	59,40	58,30	81,29	80,00
11,00	66,83	65,60	89,22	87,50
12,00	66,83	65,60	—	—
12,00	72,77	71,40	97,85	95,50

Таблица 131

Характеристика тока для стандартных газовых труб (отливка в песчаной форме)

Американская газовая ассоциация (A. G. A.)

Номинальный внутренний диаметр в дм.	Вес в кг на 1 м	Ток для 1 mV на 1 м в А
4	29,0	4,9
6	45,4	7,6
8	63,0	10,5
10	83,0	13,9
12	109,6	18,5
16	167,2	28,0
20	228,4	38,1
24	300,5	51,6
30	421,7	70,8
36	563,3	93,7
42	739,1	123,6
48	985,3	164,3

Таблица 132

Характеристика тока для свинцовых труб

Номера по спецификации	Диаметр в дм.	Вес в *кг* на 1 *м*	Ток для 1 mv на 1 *м* в A
1	0,25	0,7	0,279
2	0,25	0,7	0,277
3	0,25	0,7	0,267
4	0,75(AA)	5,2	2,213
5	0,75(AA)	5,2	2,236
6	0,75(AA)	5,2	2,228
7	0,75(AA)	5 2	2,173
8	0,75(AA)	5,2	2,180
9	0,75(AA)	5,2	2,165
10	1,00(C)	3,7	1,499
11	1,00(C)	3,7	1,501
12	1,00(C)	3,7	1,512
13	1,00(AA)	7,1	2,984
14	1,00(AA)	7,1	2,999
15	1,00(AA)	7,1	2,979
16	2,00(C)	8,9	3,600
17	2,00(C)	8,9	3,590
18	2,00(C)	8,9	3,590
19	2,00(AA)	13,4	5,530
20	2,00(AA)	13,4	5,520
21	2,00(AA)	13,4	5,520
22	0,25	0,7	0,279
23	0,25	0,7	0,279
24	0,25	0,7	0,279
25	0,75(C)	2,6	1,007
26	0,75(C)	2,6	1,020
27	0,75(C)	2,6	1,013

больше потенциала P_1, то труба заряжается. Потенциал измеряется чувствительным вольтметром V в точке *б*.

Пример 2. Измерить сопротивление почвы, заставив течь ток, полученный на батарее в точке *в* и измеренный амперметром A в точке *б*, в почве между металлическими электродами C_1 и C_2. Ток в почве между точками C_1 и C_2 установит некоторую разность потенциалов между точками P_1 и P_2 в зависимости от сопротивления почвы и калибровочной константы инструмента. Так как все эти величины, за исключением одной, либо известны, либо могут быть измерены, легко высчитать неизвестную, представляющую собой сопротивление почвы.

Пример 3. Определив путем отдельных операций разность потенциалов в почве между точками P_1 и P_2, получающуюся вследствие блуждающего тока, и сопротивление почвы, легко применить формулу и константы счетчика, которые даются вместе с инструментами для расчета плотности тока.

Инструмент измеряет направление течения блуждающего тока, сопротивление земли в омах на куб. сантиметр и силу тока в миллиамперах на кв. фут поверхности трубы. Если труба анодная, то скорость электролитического разрушения пропорциональна последнему количеству. Разряд в 3 mA или больше на кв. фут поверхности трубы считается сильным электролизом[8].

[8] Буртон Мак-Коллэм и Логан, Практическое применение счетчика блуждающего тока, Технический доклад Бюро стандартов, 251, 1927; Буртон Мак-Коллэм и Логан, Испытания электролиза, Технический доклад Бюро стандартов, 355, 1927.

Потенциалы между металлами

Когда два различных металла соприкасаются, то между ними возникает электродвижущая сила, величина которой зависит от вида металла, свойств контактных поверхностей, среды, в которой контакт происходит, условий, существующих в этой среде, и т. д.

Таблица 133

Контактный ряд металлов

1. Алюминий
2. Цинк
3. Олово
4. Кадмий
5. Свинец
6. Сурьма
7. Висмут
8. Нейзильбер
9. Латунь
10. Ртуть
11. Железо
12. Сталь
13. Медь
14. Серебро
15. Золото
16. Углерод
17. Уран
18. Теллур
19. Платина
20. Палладий

Таблица 134

Ряд электродвижущей силы металлов [1]

Металл	Ион	Потенциал в V	Металл	Ион	Потенциал в V
Li	Li^+	2,96	Cd	Cd^{++}	0,401
Rb	Rb^+	2,926	Co	Co^{++}	0,28
K	K^+	2,924	Ni	Ni^{++}	0,23
Ba	Ba^{++}	—	Sn	Sn^{++}	0,14
Sr	Sr^{++}	—	Pb	Pb^{++}	0,12
Ca	Ca^{++}	2,8	$^1/_2H_2$	$^1/_2H^+$	0,000
Na	Na^{++}	2,715	Sb	Sb^{+++}	—0,24
Mg	Mg^{++}	1,6	Bi	Bi^{+++}	—
Al	Al^{+++}	1,3	As	As^{+++}	—
Mn	Mn^{++}	1,0	Fe	Fe^{+++}	—0,31
Cr	Cr^{+++}	0,96	Cu	Cu^{++}	—0,344
Zn	Zn^{++}	0,762	Ag	Ag^+	—0,798
Cr	Cr^{++}	0,56	2Hg	$2Hg_2^{++}$	—0,799
Fe	Fe^{++}	0,44	Au	Au^{+++}	—1,4

Существуют разные мнения не только о величине этой электродвижущей силы, но даже и относительно места, на котором эта сила стоит в так называемом контактном ряду. В табл. 133 и 134 дан ряд, начинающийся с самых поло-

Таблица 135

Приблизительная потеря в весе металла от электролиза

Металл	Вес в *кг* на ампер-год	Металл	Вес в *кг* на ампер-год
Латунь (всех составов) . .	10,3	Железо	9,0
Кадмий	18,1	Свинец	33,5
Хром	5,4	Серебро	34,9
Медь	10,3	Цинк	10,3

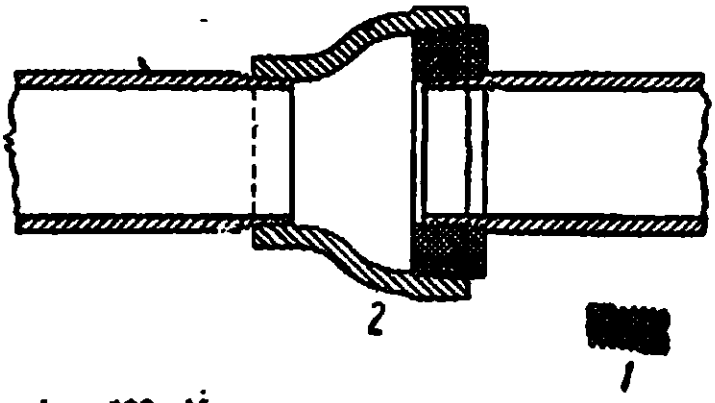
[1] Из I. C. T.

жительных металлов и достаточно удовлетворительно согласующийся с большей частью результатов, полученных на опыте.

Изолирующие соединения[1]. Для сведения до минимума возможности электролиза полезно применять изолирующие соединения, установленные надлежащим образом в газовых линиях. В случае применения изолирующих соединений вся линия должна быть изолирована, ввиду того что течение тока нужно предотвратить. Установка изолирующих соединений должна начинаться на отрицательном участке и итти в противоположный или нейтральный участок. Иногда оказывается необходимым устанавливать изолирующие соединения в положительном участке, но это бывает лишь в исключительных случаях (как правило, этого следует избегать). В тех случаях, когда изолирующие соединения установлены, не следует применять электрический дренаж, а также не следует устанавливать изолирующие соединения в дренируемой газовой линии.

Установка соединений. В местах входа тока и в обратных участках изолирующие соединения должны устанавливаться с обеих сторон пересечений трамвайного пути. Важно, чтобы эти соединения не устанавливались слишком близко к пересечениям, причем рекомендуется расстояние от 30 до 60 *м*.

Вообще говоря, изолирующие соединения должны устанавливаться на одинаковом расстоянии одно от другого в количестве, достаточном для того, чтобы поддерживать падение напряжения менее 1 V через соединение. В тех случаях, когда газовая магистраль идет параллельно падению напряжения, расстояние между соединениями должно лежать в пределах между 150 и 300 *м* в зависимости от падения напряжения сопротивления почвы и сопротивления между источником тока и газовой магистралью. В особых случаях можно рекомендовать более частые помещения изолирующих соединений.



Фиг. 138. Изолирующее соединение для домовых труб марки „U.G.I.".

1 — проходной изолятор марки „Формика", сорт *R*; *2* — переходная муфта.

Изоляция домовых трубопроводов. Во всех случаях применения изолирующих соединений в газовых магистралях весьма существенным является избежать контакта их с другими конструкциями. Электрический контакт между трубопроводами и другими сооружениями происходит через домашние приспособления;

Таблица 136

Спецификация изолирующих соединений домовых трубопроводов марки „U. G. I."

Условный № и размеры в дм.	Фитинги в дм.		Размеры проходного изолятора „Формика" в *мм*				Резьба
	A труба	*B* муфта	внутренний диаметр	наружный диаметр	толщина стенки	длина изолятора	
1—$^3/_4$	$^3/_4$	$1^1/_4$	26,5	42,0	7,75	19,0	Стандартная трубная резьба. Резьба, как показано в детальном поперечном разрезе
2—1	1	$1^1/_2$	33,5	48,5	7,50	19,0	
3—$1^1/_4$	$1^1/_4$	2	42,0	60,5	9,25	25,5	
4—$1^1/_2$	$1^1/_2$	$2^1/_2$	48,5	73,0	12,25	25,5	
5—2	2	3	60,5	89,0	14,25	32,0	

[1] Сообщено компанией United Gas Improvement Co, Филадельфия.

вследствие этого они должны быть изолированы. Это достигается путем установки изолятора в соединительной муфте, как это показано на фиг. 138.

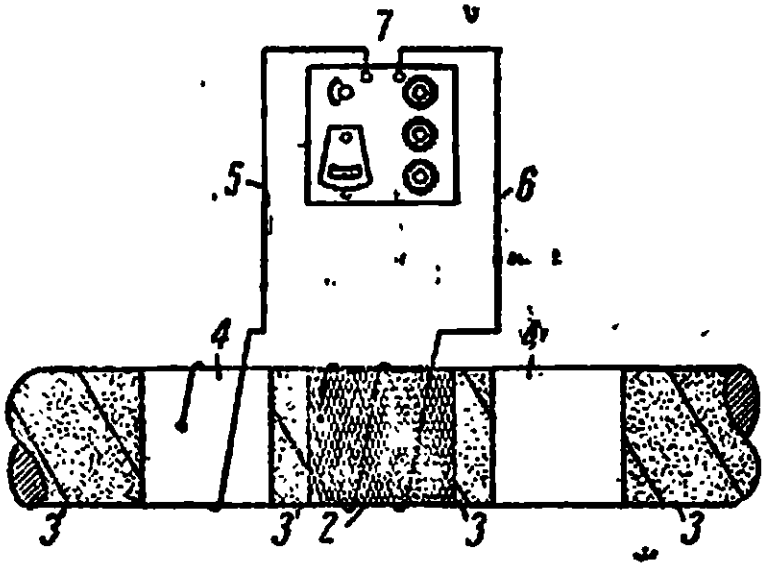
Предохранение изолирующих соединений. Необходимо предотвратить контакт почвенных вод с изолирующими прокладками изолирующих соединений. Все изолирующие соединения, установленные в земле, должны заливаться смолой таким образом, чтобы все части соединения были покрыты по крайней мере на 50 *мм*. Лучше всего это достигается установкой вокруг соединения плотной деревянной формы и заливкой ее горячей смолой.

Весьма важно, чтобы при установке все изолирующие соединения были сухими. Они не должны стоять на дожде, на снегу или же в наполненных водой канавах до заливки смолой.

Станции для испытания изолирующих соединений. Всюду, где в земле установлены изолирующие соединения, следует вывести на поверхность провода от каждой стороны соединения, для того чтобы обеспечить возможность повседневных поверочных испытаний.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ТРУБНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРОХОЖДЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Для определения на месте сопротивления предохранительных изоляций труб компания Los Angeles Gas and Electric Corporation рекомендует следующую методику:



Фиг. 139. Схема применения метода определения электрического сопротивления предохранительных покрытий.

1 — лента из брезента, пропитанная соленой водой; *2* — предохранительное покрытие; *3* — обнаженная поверхность трубы; *4* — отрицательный провод; *5* — положительный провод; *6* — аппарат для измерения сопротивления.

1. Фиксировать время испытания так, чтобы это испытание проводилось непосредственно вслед за раскопкой канавы; делается это с той целью, чтобы изоляция находилась в условиях, аналогичных тем, в каких она была до вскрытия грунта, т. е. эта изоляция не должна быть ни высушенной, ни увлажненной под действием атмосферы или иных внешних влияний.

2. Иметь: комплект инструментов для испытания сопротивления чувствительностью до 10 *мегом*; несколько кусков брезента (предпочтительно — подрубленного) различной ширины и такой длины, чтобы можно было с запасом обернуть подлежащую испытанию трубу; голые и изолированные медные провода; насыщенный раствор хлористого натрия (обыкновенная соль).

3. Выбрать некоторый участок трубы на 50 *мм* шире (шириной будет расстояние, отмеренное по длине трубы) любого отобранного куска брезента[1], с некоторым запасом охватывающего по окружности всю трубу и не имеющего дефектов.

4. Очистить от земли испытуемое покрытие.

5. Снять предохранительное покрытие с обеих сторон испытуемого участка

[1] Излишек ширины испытуемого участка по сравнению с шириной брезента (по 25 *мм* от каждой кромки брезента) будет достаточен для предупреждения возможности короткого замыкания, которое может возникнуть вследствие соприкасания обнаженного металла с влажным брезентом. Этот излишек предохранит также от ошибок, обусловленных разрывом ткани, неровными кромками и т. п. С другой стороны, этот излишек не будет настолько широк, чтобы проходящий через него ток мог серьезно отразиться на правильности расчетов.

трубы[1], приняв все возможные меры предосторожности, чтобы его не повредить. Это можно сделать соскабливанием или срезыванием покрытия с испытуемого участка каким-либо острым режущим инструментом. Обнажившиеся части с каждой стороны испытуемого участка должны быть не меньше 50 *мм* шириной, а также должны очищаться до голого металла и тщательно высушиваться (фиг. 139).

6. Сделать хорошее электрическое соединение голым медным проводом с обнаженной частью трубы. Этот провод должен быть присоединен к испытательному аппарату.

7. Испытуемый участок трубы плотно и аккуратно обернуть лентой из брезента, пропитанного насыщенным раствором хлористого натрия и слегка выжатого, чтобы влага не просачивалась при испытании. По обеим сторонам испытуемого участка трубы остается, как указано выше, не покрытое брезентом пространство шириной по 25 *мм* с каждой стороны[2]. Брезент должен полностью покрыть окружность трубы, по меньшей мере один раз. Затем этот брезент следует прочно прикрепить к трубе голой медной проволокой в несколько оборотов и сделать отвод от этой проволоки к испытательному аппарату.

8. Прикрепление влажного брезента будет последней операцией, после чего следует немедленно измерить сопротивление. Первое показание аппарата будет величиной сопротивления покрытия трубы в условиях почвы во время извлечения этой трубы из почвы или в ближайшее к этому процессу время. Замечать последующие показания следует на одинаковых интервалах; в случае, если показания укажут на понижение сопротивления, можно предположить, что влага из брезента просачивается на предохранительное покрытие.

9. Высчитать сопротивление в *ом/см*^{2}.

$$r = RA,$$

где r — сопротивление в *ом/см*^{2};
R — измеренное сопротивление в *ом*;
A — участок, покрытый брезентом, в *см*^{2}.

Осмотры на месте

Тщательно и правильно организованные осмотры закопанных труб на месте дают целый ряд сведений относительно срока службы трубы и предохранительного ее покрытия на различных участках данной площади; эти сведения оказываются полезными в методике испытания и проверки почвы.

Методика осмотра должна основываться на определенных стандартных оценках, каковых должны строго придерживаться все инспектора, с тем, чтобы личному мнению каждого из них оставалось как можно меньше места. Каждому инспектору нужен простой и недорогой микрометр, при помощи которого он должен делать точные измерения ржавления и разъедания. Если представляется возможность, то отбирают также образцы труб, которые и сохраняются.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРОЗИИ

Коррозия вызывается гальваническим действием, которое является следствием разнородности металлов, разнообразия почвы и т. д., а также электролиза, причиняемого блуждающими токами. В первом случае коррозию можно предотвратить путем правильного предохранения трубы, во втором — устранением причины тока (устройства, отводящие ток). Гальваническое действие, часто называемое поч-

[1] Требование снимать предохранительное покрытие с обеих сторон мотивируется следующими соображениями. Аналогично тому, что сказано в предыдущем примечании, испытанию будет подвергаться только выбранный участок и под брезентом. Если будет обнажена лишь одна сторона испытуемого участка, то возможно, что ток в поисках пути к трубе пройдет на значительное расстояние вдоль через сырую наружную поверхность предохранительного слоя, дойдет, наконец, до невидимой слабой точки или отверстия (возможно образовавшегося механически, а не от неправильного покрытия) и пройдет через трубу, вызвав короткое замыкание или пок-ав очевидное отсутствие сопротивления; может случиться, что ток пройдет через эту же сырую наружную поверхность предохранения в землю, а через землю — в обнаженную трубу домового водопровода, и короткое замыкание произойдет именно там.

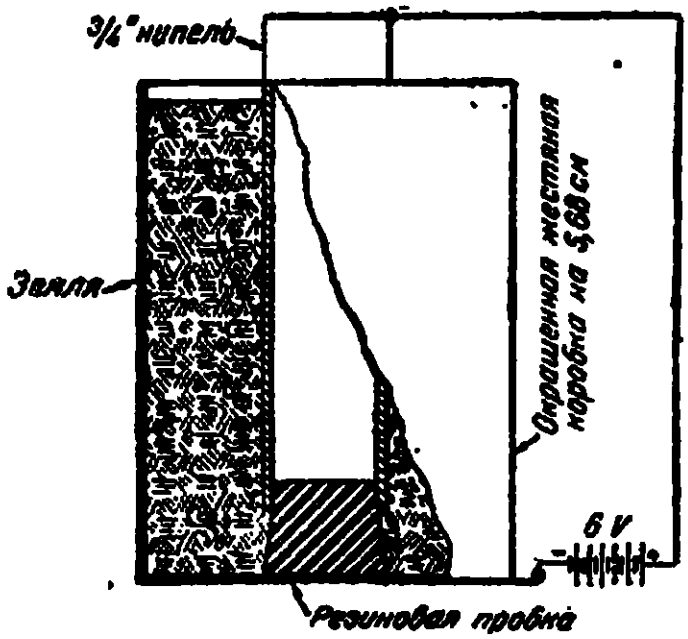
[2] См. примечание на стр. 329.

венной коррозией, будет сильно тогда, когда почва отличается высокой проводимостью. Путем измерения проводимости (или сопротивления) почвы можно заранее определить необходимость предохранения трубы. Ниже дается описание двух методов исследования почвы, рассматривается вопрос о действии влажности, а также разбирается в общих чертах применение этих методов.

Метод определения потери веса. В испытуемом месте на глубине залегания трубы берется образец почвы, который пропускается затем через сито в 4 меш (после предварительной просушки и размельчания в ступке, если это нужно). К нему прибавляется столько насыщенной воздухом дестиллированной воды, сколько впитает в себя земля без появления воды на поверхности. Для впитывания максимального содержания воды твердые почвы требуют большего времени. При этом следует избегать избытка, так как вода вместе с некоторыми растворимыми солями может быть потеряна вследствие вспучивания почвы или образования водорода. Для производства испытания берется кусок стандартной

Индекс коррозии в г	Характеристика	Требующееся предохранение для трубы
Меньше 1,00	Хорошо	Незначительное или никакого
1,00—1,99	Удовлетворительно	Умеренное
2,00—2,99	Плохо	Большое
3,00 и выше	Очень плохо	Весьма большое

3/4-дюймовой трубы из мягкой стали (длиной 100 *мм*), очищенный пескоструйным аппаратом и промытый бензином; на одном конце его ставится номер. Этот кусок трубы и будет служить испытательным образцом. Образец взвешивается в граммах с точностью до одной сотой. В ненумерованный конец вставляется резиновая пробка, и образец устанавливается в центре окрашенной жестяной коробки (без крышки и без верхнего ободка) емкостью 500 $см^3$, причем конец, заткнутый резиновой пробкой, опускается вниз. Пространство вокруг образца заполняется влажной землей, не доходящей доверху на 1,5 *мм*. Положительная клемма батареи в 6 V присоединяется к образцу, а отрицательная — к жестяной коробке. На фиг. 140 изображена схема ординарного испытания. Можно изготовить устройство для производства одновременно 12—16 испытаний, используя одну батарею путем соединения жестяных коробок параллельно. По прошествии 24 час. ток выключается, что можно делать либо вручную, либо при помощи часов.

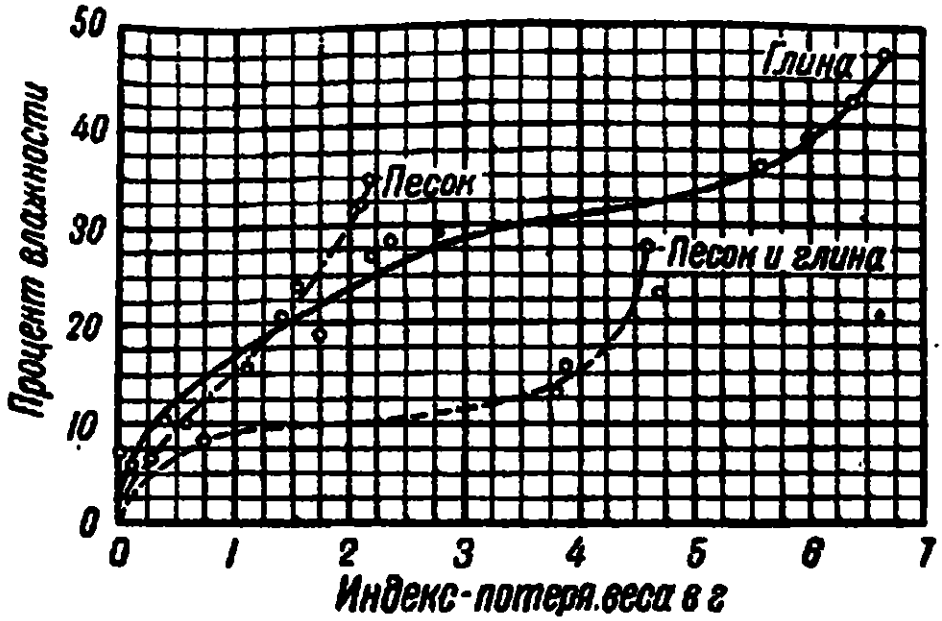


Фиг. 140. Схема аппарата для испытания почвы.

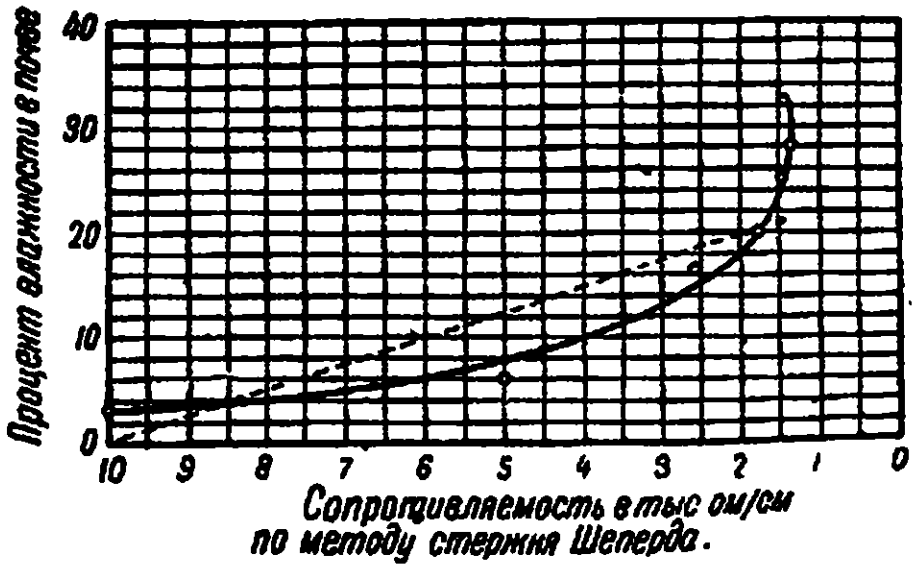
После этого образец вынимается, прочищается и снова взвешивается. Потеря в весе, являющаяся мерилом проводимости почвы, представляет собой „индекс коррозии", который для образца почвы и является критерием возможности разъедания. В приводимой выше таблице показано, как можно истолковывать эти результаты.

Метод измерения сопротивления почвы. Для проведения испытаний по принципу сопротивления почвы разработано несколько методов. Один из них

Сопротивление в *ом/см*	Характеристика	Требуемое предохранение трубы	Срок службы обнаженной трубы в годах
10 000 — 6 000	Хорошо	Незначительное или никакого	От 25 и больше
6 000 — 4 500	Удовлетворительно	Умеренное	17 — 25
4 500 — 2 000	Плохо	Значительное	10 — 17
2 000 — 0	Очень плохо	Весьма значительное	0 — 10

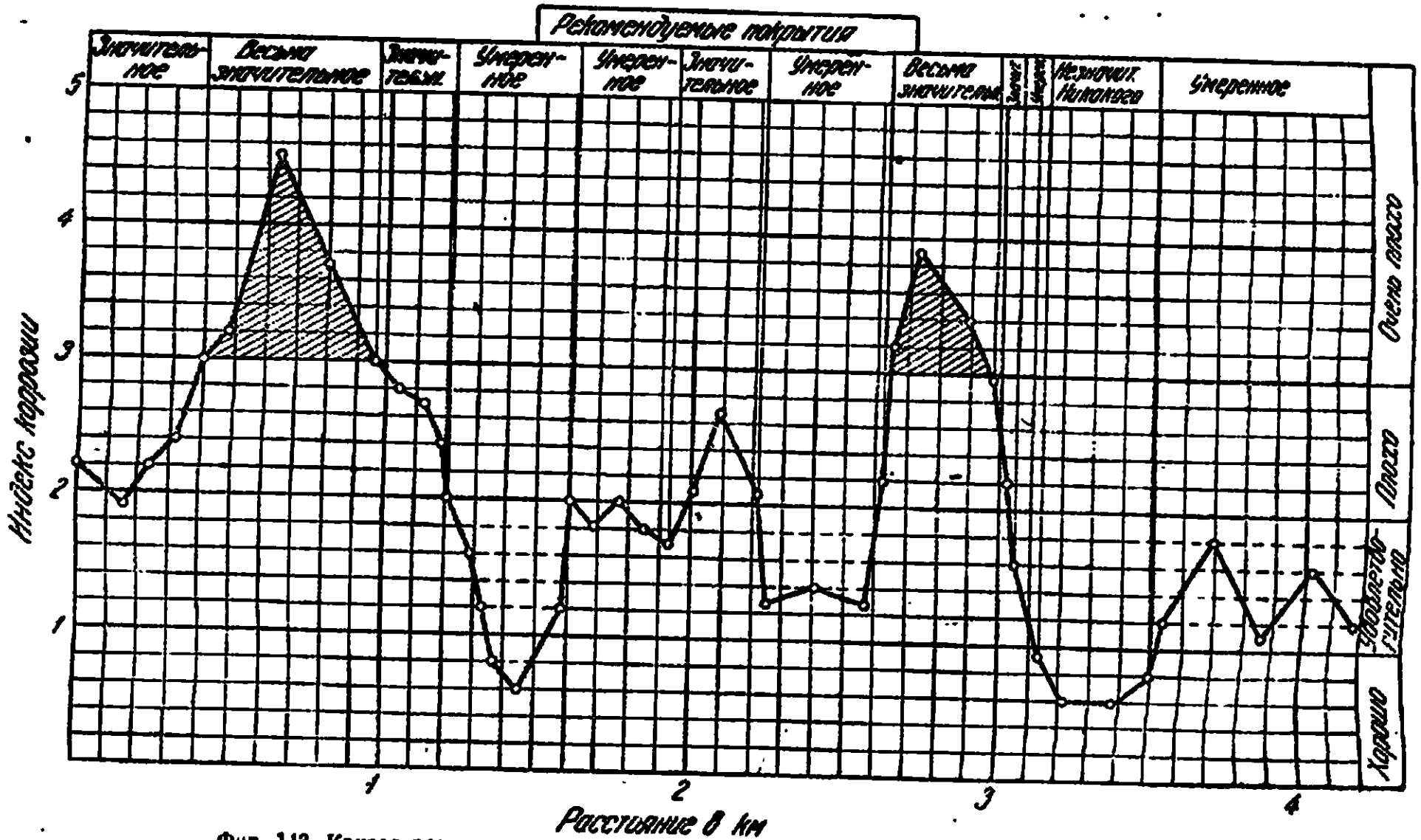


Фиг. 141. Зависимость индекса коррозии от влажности почвы.



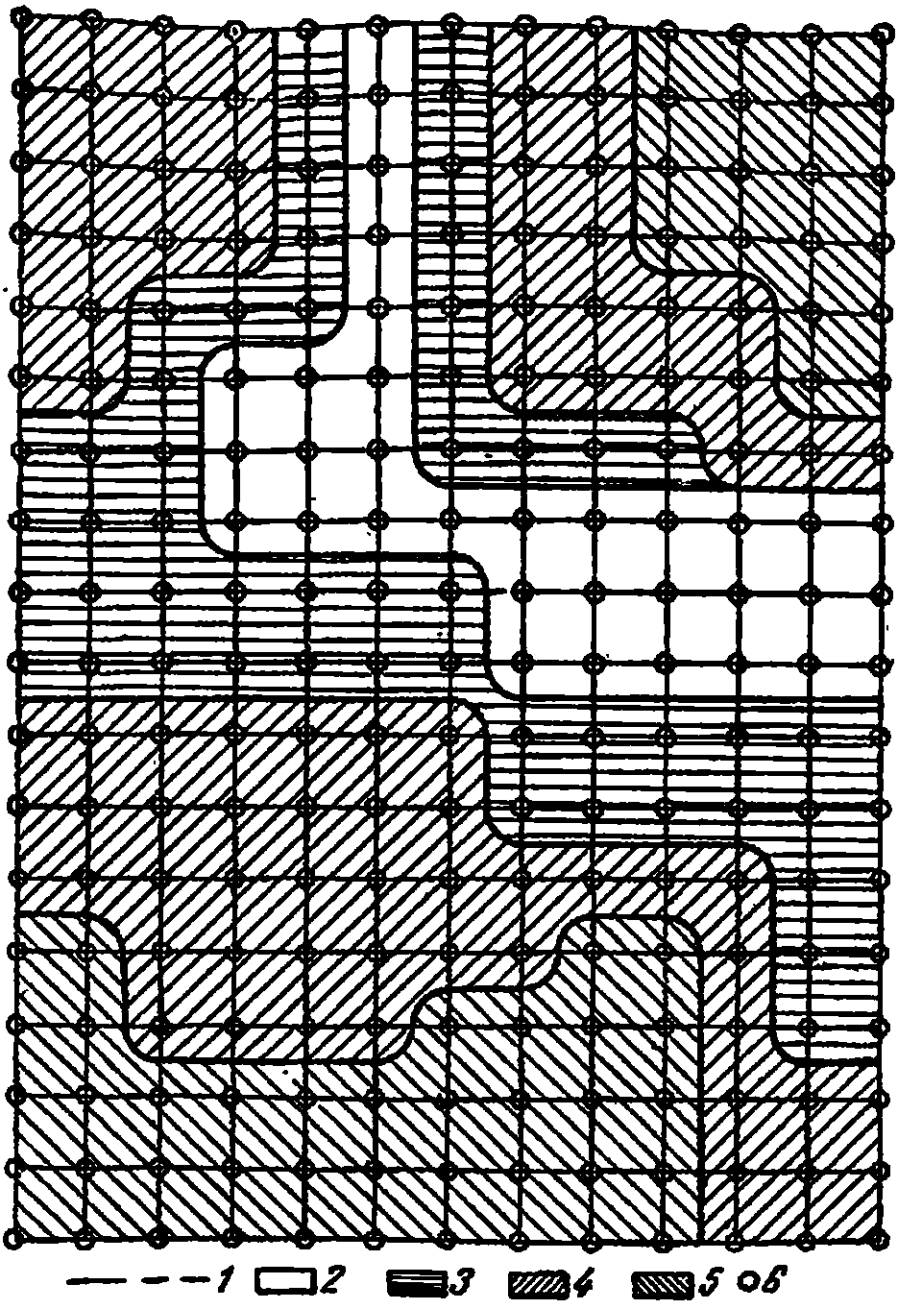
Фиг. 142. Сопротивляемость почвы по методу стержня Шеперда.

заключается в том, что увлажненную по желанию почву помещают между двумя металлическими пластинками и измеряют сопротивление, используя принцип мостика Уитстона. Более практичный метод для применения на месте разработан Американским бюро стандартов с использованием стержней Шеперда. Эти



Фиг. 143. Кривая результатов исследований почвы для трубопровода. Метод потери веса.

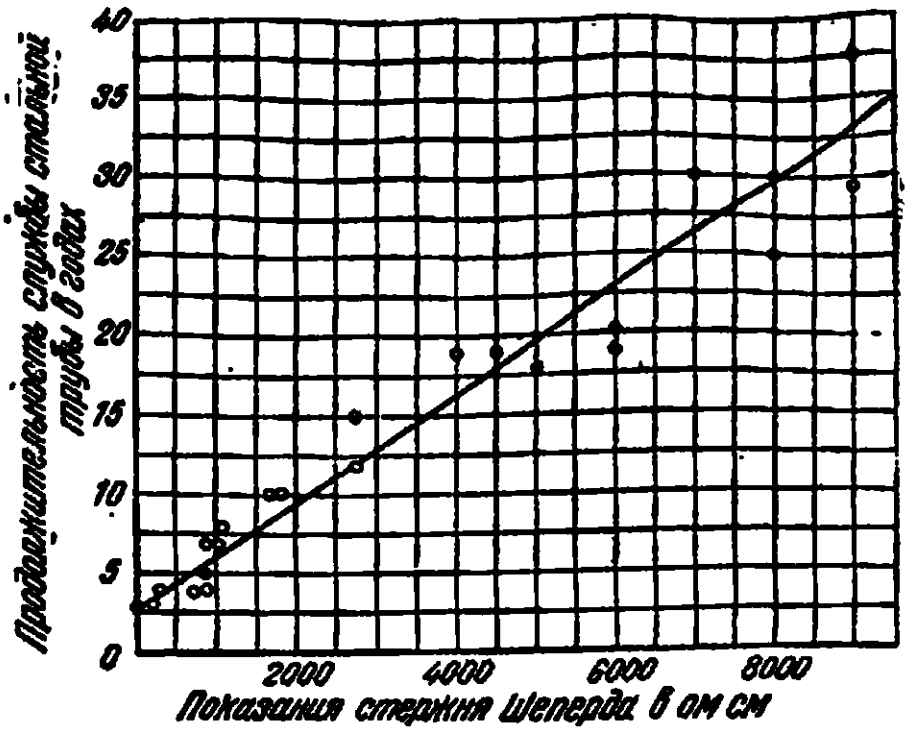
стержни состоят из двух стальных электродов длиной примерно 914 *мм* и, за исключением концов, покрыты бакелитом. В ручке одного из них имеются два сухих элемента, а снаружи смонтирован счетчик сопротивления, измеряющий непосредственно сопротивление почвы на той глубине, на которую погружены концы стержней. Испытание проводится так.



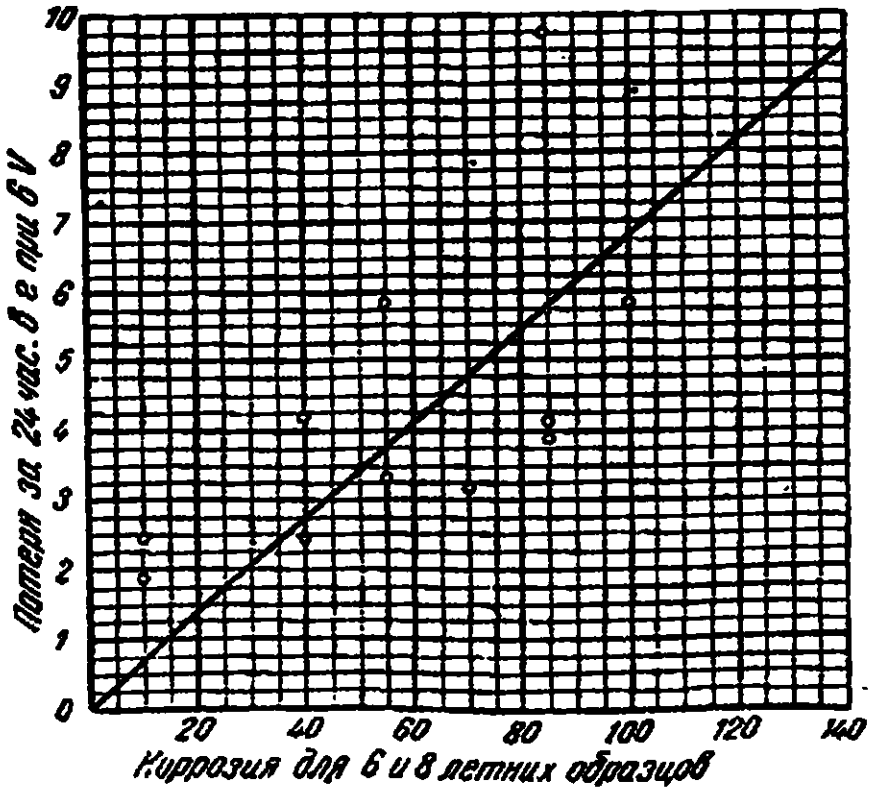
Фиг. 144. Предлагаемая схема для нанесения на карту записей почвенной коррозии или результатов исследования почвы.

1 — класс почвы; *2* — хорошая; *3* — удовлетворительная; *4* — плохая; *5* — очень плохая; *6* — местоположение испытания.

Концы стержней вставляются в землю на дне открытой выемки или же на дне отверстий, отстоящих одно от другого примерно на 0,3 *м* (отверстия делаются 2-дюймовым ложечным буром). Наверху стержни соединяются с проводкой батарей. Стрелка счетчика указывает сопротивление в омах на сантиметр. В помещаемой выше таблице показано, как были истолкованы эти результаты на участке,



Фиг. 145. Соотношение между показаниями стержня Шеперда и известным сроком службы обнаженной стальной трубы. Основано на данных, собранных на территории Лос-Анжелоса.



Фиг. 146. Соотношение между результатами опытных испытаний на потерю веса и действительной коррозией в щелочных почвах.

где была известна продолжительность срока службы обнаженной трубы. Результаты на других участках будут аналогичны приводимым, но не обязательно такие же.

Действие влаги. Основной переменной величиной почвы является ее влажность. Изучение ее важно потому, что содержание влаги определяет потенциальную возможную коррозию.

Средняя влажность определяется путем периодического отбора образцов на глубине трубы за определенный сезон. Кривые фиг. 143 указывают соотношение между индексом коррозии и влажностью. Выше точки, на которой эти кривые делаются вертикальными, повышение влажности не будет вызывать усиления разъедаемости. Эта точка называется „влажностью для максимальной коррозии". Непрактично определять фактическую среднюю влажность и „влажность для максимальной коррозии" для каждого отдельного образца; делать это следует для каждого типа почвы. Так как нижние отрезки кривых фиг. 141 представляют собой почти прямые линии, все величины для индексов коррозии, определяемые в насыщенной почве, можно исправить на влажность путем умножения на коэфициент:

$$\frac{\text{фактическая средняя влажность}}{\text{влажность для максимальной коррозии}}.$$

что дает величины фактической коррозии. Кривая фиг. 142 указывает соотношение между сопротивлением в омах на сантиметр (показания стержня Шеперда) и содержанием влаги. При влажности свыше 20% кривая фактически вертикальна. От 20 до 0% она приближается к прямой линии. Кривые, аналогичные этой, можно применять для каждого типа почвы с целью делать поправки показаний испытательного прибора, полученных при любом содержании влажности, для величин средней влажности.

Рассмотрение методики исследования. Испытания, произведенные Американским бюро стандартов, указывают, что каждый из описанных выше двух методов дает хорошие результаты для щелочных почв, таких, например, как имеющиеся в западной части Америки. Метод потери веса указывает также тип разъедания, который можно ожидать в исследуемой по этому методу почве. Существует видоизменение этого метода, характеризующееся применением 2V вместо 6V. Недостатки видоизмененного „2-вольтного" метода заключаются в том, что он требует более точного взвешивания и не указывает разъедания.

Результаты исследования почвы для ординарного трубопровода можно лучше всего выразить так, как это иллюстрировано кривой фиг. 143. Исследование почвы следует производить на расстоянии каждых 160 *м* или чаще в зависимости от топографии местности и внешнего вида почвы. Если испытания укажут на значительную разницу в результатах испытания двух соседних участков, то почва между этими участками должна быть тщательно исследована путем отбора образцов с целью определить ту точку, на которой происходит изменение свойств почвы.

Результаты исследования почвы на некотором определенном участке лучше всего изображать путем нанесения на карту цветных отметок в том месте, где была отобрана проба (зеленая отметка — для хорошей почвы, голубая — для удовлетворительной, желтая — для плохой и красная — для очень плохой). Когда наберется достаточно данных, набрасываются черновые карты небольших участков сплошными красками. На фиг. 144 изображена такая карта с различными штриховками вместо красок.

На фиг. 145 приводится соотношение между показаниями стержня Шеперда (омы на сантиметры) и сроком службы обнаженной стальной трубы (в годах), определенными одной фирмой.

На фиг. 146 представлена копия части кривой, построенной Бюро стандартов, которая показывает соотношение между потерей веса и коррозией. Коррозия определяется как „произведение потери веса на кв. фут в год и глубина проникновения разъедания в тысячных долях дюйма в год" на образцах обнаженной трубы, зарытой в землю в различных почвах на шесть и на восемь лет. Результаты таких испытаний даны только для щелочных почв.

РУКОВОДСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРОЗИИ[1]

Общие указания

Трубу осматривают на возможно большем протяжении. Сметают щеткой прилипшую грязь и тщательно обследуют поверхность трубы сверху, снизу и по бокам. Оценивают трубу буквой, характеризующей ее состояние, выбрав эту букву из приводимой ниже таблицы. Обозначения этой таблицы отражают максимальную глубину коррозии, указываемую глубинным измерительным прибором для любого состояния трубы.

Таблица 137

Классификация труб по степени коррозии

Размеры в дм.	Толщина стенки в мм	Класс A	Класс B	Класс C	Класс D	Класс E
			Сталь, ковкое железо			
1	3,38	Нет	1,12	2,26	3,38	Отверстие
1¼	3,56	»	1,19	2,36	3,56	»
1½	3,68	»	1,22	2,46	3,68	»
2	3,91	»	1,30	2,62	3,91	»
3	5,49	»	1,83	3,66	5,49	»
4	6,02	»	2,01	4,01	6,02	»
6	7,11	»	2,36	4,75	7,11	»
8	8,18	»	2,72	5,46	8,18	»
10	7,09	»	2,36	4,72	7,09	»
12	8,38	»	2,79	5,59	8,38	»
16	9,53	»	3,18	6,35	9,53	»
20	11,13	»	3,71	7,42	11,13	»
			Чугун			
3	9,91	Нет	3,30	6,60	9,91	Отверстие
4	10,16	»	3,30	6,06	10,16	»
6	10,92	»	3,56	7,37	10,92	»
8	11,43	»	3,81	7,62	10,43	»
10	12,45	»	4,06	8,38	12,45	»
12	13,72	»	4,57	9,14	13,72	»
16	15,75	»	5,33	10,41	15,75	»
20	17,27	»	5,84	11,43	17,27	»
24	19,30	»	6,35	12,95	19,30	»
30	21,59	»	7,11	14,48	21,59	»

Состояние покрытия

Класс A. Весьма хорошее: ни трещин, ни маленьких отверстий, ни поврежденных точек.

Класс B. Хорошее: покрытие слегка поцарапано или стерто; в остальных отношениях хорошее.

Класс C. Удовлетворительное: имеется влага под покрытием, оно растрескано или имеет крохотные отверстия.

Класс D. Неудовлетворительное: обнаженные точки, каверны, прогибы.

Класс E. Плохое: на трубе осталось весьма мало покрытия, либо его вовсе нет.

[1] Более подробные сведения можно найти в журнале „Western Gas", август 1931, стр 128, а также в протоколах P. C. O. A., 1931.

Предохранительные покрытия для труб. С целью дать возможность высчитать нужное для данной работы количество предохранительного покрытия приводится табл. 138. Цифры этой таблицы составлены на основе практики изготовления таких покрытий на месте производства труб, когда наложение покрытия производится при помощи машины. Материал для покрытия соединений, испытываемых на месте, в таблицу не включен; его потребуется на линейный фут примерно вдвое больше. Если все покрытие делать на месте, то материала потребуется примерно на 25% больше, чем указано в таблице, т. е. покрытие будет приблизительно на 15% толще и будет около 10% потерь.

Таблица 138

Материалы для трубного покрытия на 1 км трубы

Размер трубы в дм.	1	2	3	4	6	8	10	16
Толщина стенки в *мм* .	3,38	3,91	5,48	6,02	7,11	8,18	7,09	9,6
Грунтовка в *л*	26,0	33,0	45,7	61,0	89,0	118,0	139,0	247,0
Обертка в $м^2$	121,07	220,83	328,90	428,67	628,20	827,70	1 114,0	1 978,0
Холодная окраска в *л* .	42	59	78	103	153	195	238	423
Смазка в *кг*	8,2	20,5	26,7	44,5	59,0	86,0	114,0	195,0
Асфальт (горячий) в *кг* .	107	217	344	489	762	1 110	1 245	2 500
Каменноугольная смола (горячая) в *кг*	170	345	546	778	1 210	1 770	1 980	4 000
Толщина[1] горячего компонента в *мм*	1,04	1,17	1,24	1,34	1,45	1,60	1,45	1,85

[1] Общая толщина двух слоев горячего компонента за исключением лежащей между ними обертки.

Таблица 139

Предохранительные покрытия для подземных труб

Вид покрытия	Состав или тип обертки	Выполнение покрытия или накладывание обертки
Холодное покрытие без обертывания.		
Краска	Асфальт Гильсонит Нефть Каменноугольная смола Свинец и масло	Окраска производится при помощи кисти или куска материи, либо путем пульверизации
Эмульсия	Асфальт	Эмульсию можно накладывать кистью или куском материи
Жиры	Нефтяная основа	Жиры можно накладывать кистью либо руками
Минеральные масла	Нефть	Минеральным маслом труба обливается или покрывается им при помощи кисти

Вид покрытия	Состав или тип обертки	Выполнение покрытия или накладывание обертки
Горячее покрытие без обертывания		
Асфальт	Нефть в соединении с естественным асфальтом и наполнителями	Горячий асфальт можно наложить кистью или шваброй с длинной рукояткой, или при помощи куска материи, или путем погружения трубы в асфальт
Эмали каменноугольной смолы	На основе — каменноугольная смола	Так же, как и асфальт
Холодное покрытие с обертыванием		
Окраска	Бумажный войлок Брезент Кисея	Обертку можно накладывать вручную или переносной машиной на месте, или стационарной машиной в мастерской
Эмульсии	Те же обертки, что и при холодной окраске	То же, что и выше
Жиры	Резина Асбестовая ткань Пропитанное полотно	Обычно обертка делается вручную на месте
Горячее накладывание с обертыванием		
Асфальт — нефтяной или смешанный с естественным асфальтом или наполнителями	Та же обертка, что и при холодной окраске	Обертку можно накладывать вручную либо переносной машиной на месте, либо стационарной машиной в мастерской
Эмали каменноугольной смолы	Асбестовая ткань	Обычно накладывается машиной

Глава III

УТИЛИЗАЦИЯ ГАЗА

(Перевод *Л. Г. Климашевского*)

1. РАСПОЛОЖЕНИЕ ГАЗОПРОВОДОВ

Отсутствие правильно устроенной и отвечающей всем требованиям сети домовых газопроводов ограничивает область утилизации газа и мешает выбрать для каждой данной установки наилучшее газовое оборудование. При постройке новых зданий архитекторы и строители должны настаивать на прокладке полной газовой сети, потому что хотя в настоящее время многие и не выражают особого желания универсально использовать газ в качестве топлива, однако, в будущем несомненно захотят установить полное газовое оборудование; между тем, прокладка дополнительной газовой сети вызовет значительные расходы, и может даже случиться, что она окажется вообще невозможной.

Инструкция городских самоуправлений по газопроводам. Вся установка газопроводов обычно регулируется городскими властями, и все их требования должны выполняться.

Общие технические условия для газопроводов. Вся домовая сеть газопроводов должна устанавливаться с уклоном по направлению к входу; однако в тех случаях, когда такой уклон не возможен и представляется необходимым сделать уклон газопроводов по направлению от входа, следует установить отводные трубы во всех тех точках, где по условиям такого изменения уклона для газопровода установлены конденсационные горшки. Отводные трубы следует располагать так, чтобы к ним всегда был легкий доступ. Отводные трубы не должны служить для присоединения какой-либо арматуры или газовых устройств. Отводные трубы длиной минимум 15 *см* должны устанавливаться также у основания всех вертикальных труб, идущих от концов горизонтальной трубы.

Вся сеть домовых газопроводов должна плотно укрепляться на месте так, чтобы сохранялся постоянный уклон; эту сеть не следует использовать в виде опоры для каких-либо тяжестей за исключением присоединенной к ней легкой арматуры. Вся домовая сеть газопроводов должна прокладываться из новых труб ковкого железа либо стали стандартного веса, тщательно вычищенных и продутых.

Перед установкой на место концы труб после их нарезки должны быть основательно пригнаны. Газопроводы, уложенные под землей или в местах, подвергающихся внезапной перемене температуры или с широкой амплитудой колебания, должны предохраняться от коррозии и покрываться соответствующей изоляцией. Все ответвления выводящих труб должны делаться от верха или с боков горизонтальных линий, а не от дна их. На горизонтальных линиях не следует устанавливать пересечений.

Выше подвального этажа труба не должна итти под половыми балками, где она будет покрыта дранкой и штукатуркой, а должна прокладываться над балками с тем, чтобы к ней был легкий доступ путем простой выемки одной или двух досок из пола.

При закрытой прокладке сети не следует применять ни соединений, ни газовых кранов, ни вентилей. Каждый газовый кран или вентиль должны быть легко доступны для осмотра и ремонта. Трубы, выходящие из потолка, полов или стен, должны выступать на 25 *мм*; каждый фитинг такой трубы или самая труба должны плотно прикрепляться к стенке или перегородке. В том случае, когда стены

каменные, их следует закреплять либо деревянной, либо металлической пробкой. Для предотвращения ржавания арматуры потолочные подвески должны иметь между балками поддержки.

После установки на место и закрытия всей домовой газовой сети, но до установки арматуры и газовых устройств следует произвести испытание. Газопроводы должны выдерживать давление воздуха, равное не меньше 150 *мм* ртутного столба, причем они должны выдерживать это давление (без заметного падения его) в течение не меньше 10 мин.

Вход газа в любой системе домовой сети следует располагать на расстоянии 0,75 *м* от предполагаемого расположения газового счетчика и на 0,75 *м* выше его. При установке в одном и том же здании двух систем газовой сети (или больше) выходы должны отстоять один от другого не меньше чем на 0,45 *м* в горизонтальной плоскости и не больше чем на 0,60 *м* — в вертикальной; при этом их следует снабдить постоянными, отчетливо написанными краской ярлыками с обозначением системы.

Все газопроводы, за исключением выходов на потолке, стенках и на полу, должны быть не меньше $^3/_4''$ в диаметре.

Если трубопроводы замурованы в бетоне, они должны быть не меньше $1''$ в диаметре.

Трубы для кухонного оборудования должны иметь не меньше $^3/_4''$ в диаметре, а для газовых водяных нагревателей — не меньше $1''$. Диаметр домовой трубы, подводящей газ к оборудованию, ни в коем случае не должен быть меньше диаметра ввода к этому оборудованию.

Нагреватели воды и печи или котлы должны иметь отдельные подводящие линии от счетчика за исключением нагревателей воды, берущих меньше 12 600 *кал/час*, которые не требуют отдельной подводящей линии.

Расчет домовой сети газопроводов. *Факторы, влияющие на размер трубы.* Нужный размер устанавливаемого трубопровода определяется следующими факторами: а) максимальный расход газа, который следует предусмотреть; б) длина трубы и количество фитингов; в) допускаемая потеря давления от ввода или счетчика до аппарата; г) удельный вес газа и д) коэфициент одновременности (отношение максимальной вероятной нагрузки к максимальной возможной нагрузке газовой сети).

Расход газа для всего оборудования, подлежащего присоединению к газовой сети, должен высчитываться до расчета размеров труб. Достаточно точные цифры по расходу газа можно получить от заводов и потребителей.

В табл. 140 и 141 даны величины пропускной способности труб различных размеров и различной длины в куб. метрах в час для падения давления в 5,08 и 12,7 *мм* водяного столба. Табл. 140 составлена для газа с удельным весом 0,45 и годится для нефтяного и каменноугольного газа; табл. 141 — для газа с удельным весом 0,65 и годится для естественного и водяного газов. Сведения о фактическом удельном весе газа, применяемого в любой местности, можно получить от газовой компании. Этот удельный вес отклоняется в широких пределах от величин 0,45 и 0,65, для которых составлены табл. 140 и 141, вследствие чего в табл. 142 даны множители для перевода величин, приведенных в табл. 141 для газов с другими удельными весами. Для труб большей длины, чем те, которые приведены в табл. 140 и 141, можно использовать коэфициент табл. 144.

Давление газа обычно измеряется высотой водяного столба, и падение давления между счетчиком и оборудованием, работающим с полной нагрузкой, не должно превышать 12,7 *мм*; для труб же, проложенных горизонтально, следует применять 5,08 *мм*. Отводы и фитинги в линии должны компенсироваться путем добавления к величинам их длины величин, приведенных в табл. 145 и 146.

Расчет газопроводной сети. При определении требуемых размеров различных секций вертикальной или горизонтальной трубы с несколькими выходами и при условии, чтобы общее падение давления не превышало 12,7 *мм* в вертикальной трубе или 5,08 *мм* в горизонтальной трубе, применяется (в связи с табл. 140 и 141) следующая методика: зная максимальную потребность газа у каждого выхода, можно составить сводку на общее количество газа, подлежащего передаче к каждому выходу и после этого выхода. Минимальный размер трубы, требуемый в секции, предшествующей каждому выходу, устанавливается из таблицы для количества газа, подаваемого к каждому выходу и после него; при этом следует брать длину, равную общей длине вертикальной или горизонтальной трубы.

Таблица 140

Поток газа в трубах в *м³/час* при перепаде давления 5,08 и 12,7 *мм* водяного столба и удельном весе 0,45 (формула Spitzglass'a)

Брать 5,08 для горизонтальных трубопроводов и 12,7 — для вертикальных

Номинальный размер трубы в дм.	Падение давления в десятых долях дм.	Падение давления в *мм*	Длина прямой трубы в фут.											
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200
			Длина прямой трубы в *м*											
			3,04	6,09	9,14	12,19	15,24	18,28	21,33	24,38	27,43	30,48	45,64	60,99
¾	2	5,08	5,61	3,97	3,23	2,80	2,52	2,29	2,12	1,98	1,87	1,78	1,44	1,25
	5	12,70	8,90	6,29	5,13	4,45	3,97	3,63	3,37	3,14	2,97	2,80	2,29	1,98
1	2	5,08	11,28	7,99	6,52	5,64	5,04	4,59	4,25	3,99	3,77	3,57	2,92	2,52
	5	12,70	17,85	12,61	10,28	8,92	7,99	7,28	6,74	6,32	5,95	5,64	4,62	3,99
1¼	2	5,08	24,82	17,56	14,31	12,41	11,11	10,11	9,38	8,78	8,27	7,85	6,40	5,55
	5	12,70	39,29	27,79	22,66	19,63	17,56	16,03	14,84	13,88	13,09	12,44	10,14	8,78
1½	2	5,08	38,50	27,23	22,21	19,24	17,22	15,69	14,53	13,60	12,83	12,18	9,94	8,61
	5	12,70	60,94	43,09	35,16	30,45	27,25	24,85	23,03	21,53	20,31	19,26	15,72	13,63
2	2	5,08	77,88	55,10	44,93	38,81	34,85	31,79	29,43	27,54	25,95	24,65	20,11	17,42
	5	12,70	123,29	87,23	71,14	61,62	55,13	50,31	46,60	43,60	41,11	38,98	31,84	27,57
2½	2	5,08	127,49	90,20	73,54	63,71	57,00	52,01	48,19	45,07	42,50	40,31	32,92	28,50
	5	12,70	201,79	142,75	116,41	100,83	90,23	82,33	76,26	71,36	67,26	63,80	52,10	45,13
3	2	5,08	231,85	164,03	133,75	115,87	103,69	94,59	87,62	81,99	77,28	73,32	59,89	51,87
	5	12,70	367,02	259,67	211,71	183,38	164,14	149,75	138,70	129,78	122,36	116,07	94,76	82,10
4	2	5,08	486,43	344,12	280,61	243,07	217,52	198,45	183,83	171,99	162,13	153,83	125,62	108,79
	5	12,70	769,95	544,73	441,16	384,75	344,32	314,12	290,98	272,25	256,64	243,50	198,82	172,22
6	2	5,08	1 441,26	1 019,65	831,40	720,18	644,51	587,69	546,12	509,60	480,42	455,80	372,17	322,34
	5	12,70	2 281,36	1 613,99	1 316,01	1 139,94	1 020,19	930,73	862,20	806,64	760,46	721,48	589,09	510,25
8	2	5,08	2 935,53	2 076,76	1 693,37	1 466,84	1 312,73	1 197,59	1 109,40	1 037,93	978,52	928,37	758,03	656,55
	5	12,70	4 648,63	3 287,33	2 680,41	2 321,84	2 077,92	1 895,70	1 756,09	1 642,94	1 548,89	1 469,51	1 199,86	1 039,23

Таблица 141

Поток газа в трубах в $м^3/час$ при перепаде давления 5,08 и 12,7 *мм* водяного столба и удельном весе 0,65 (формула Spitzglass'a)

Брать величину 5,08 для горизонтальных трубопроводов и 12,7 — для вертикальных

Номинальный размер трубы в дм.	Падение давления в десятых долях мм.	Падение давления в мм	Длина прямой трубы в фут.											
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200
			Длина прямой трубы в м											
			3,04	6,09	9,14	12,19	15,24	18,28	21,33	24,38	27,43	30,49	45,64	60,90
3/4	2	5,08	4,67	3,31	2,69	2,32	2,10	1,90	1,76	1,64	1,56	1,47	1,22	1,05
	5	12,70	7,39	5,24	4,25	3,68	3,31	3,00	2,80	2,61	2,46	2,35	1,90	1,64
1	2	5,08	9,38	6,63	5,41	4,67	4,19	3,82	3,54	3,31	3,11	2,97	2,41	2,10
	5	12,70	14,84	10,51	8,56	7,42	6,63	6,06	5,61	5,24	4,96	4,70	3,82	3,31
1 1/4	2	5,08	20,62	14,62	11,90	10,31	9,24	8,41	7,79	7,31	6,88	6,52	5,33	4,62
	5	12,70	32,66	23,12	18,84	16,32	14,62	13,32	12,35	11,56	10,88	10,34	8,44	7,31
1 1/2	2	5,08	32,01	22,66	18,47	16,01	14,31	13,06	12,10	11,33	10,68	10,11	8,27	7,17
	5	12,70	50,65	35,84	29,21	25,30	22,64	20,65	19,15	17,90	16,88	16,01	13,09	11,33
2	2	5,08	64,79	45,84	37,37	32,38	28,98	26,43	24,48	22,92	21,59	20,48	16,74	14,50
	5	12,70	102,50	72,50	59,12	51,22	45,84	41,82	38,73	36,23	34,17	32,41	26,46	22,92
2 1/2	2	5,08	106,04	75,02	61,16	52,98	47,42	43,26	40,09	37,51	35,36	33,54	27,40	23,71
	5	12,70	167,74	118,67	96,78	83,83	75,02	68,45	63,40	59,32	55,92	53,06	43,32	37,51
3	2	5,08	192,87	136,47	111,25	96,38	86,26	78,70	72,89	68,19	64,28	60,99	49,80	43,15
	5	12,70	305,11	215,85	176,01	152,44	136,44	124,48	115,30	107,88	101,70	96,49	78,79	59,12
4	2	5,08	404,61	286,25	233,41	202,19	180,94	165,08	152,93	143,07	134,88	127,97	104,48	90,49
	5	12,70	640,06	452,83	369,22	319,82	286,22	261,12	241,88	226,30	213,35	202,42	165,28	143,15
6	2	5,08	1 198,87	848,14	691,56	599,04	536,12	489,09	453,08	423,87	399,62	379,14	309,56	268,14
	5	12,70	1 896,47	1 341,68	1 093,99	947,64	848,06	773,69	716,72	670,54	632,16	599,75	489,71	424,16
8	2	5,08	2 441,79	1 727,48	1 408,54	1 220,12	1 091,92	996,17	922,82	863,36	813,92	772,22	630,54	546,12
	5	12,70	3 862,65	2 732,68	2 228,18	1 930,09	1 727,34	1 575,86	1 459,79	1 365,73	1 287,54	1 221,56	997,41	863,90

Таблица 142

Множители для перевода потока газа удельного веса 0,65 в поток для газа иного удельного веса

Уд. вес	Множитель	Уд. вес	Множитель
0,75	0,931	0,50	1,140
0,70	0,964	0,45	1,202
0,65	1,000	0,40	1,275
0,60	1,040	0,35	1,362
0,55	1,080	0,30	1,470

Таблица 143

Множители для перевода потока газа при перепаде давления 5,08 *мм* водяного столба в поток газа при иных перепадах давления

Перепад давления в *мм*	Множитель	Перепад давления в *мм*	Множитель
2,54	0,707	15,24	1,732
5,08	1,000	17,78	1,871
7,62	1,225	20,32	2,000
10,16	1,414	22,86	2,121
12,70	1,581	23,40	2,136

Таблица 144

Множители для перевода потока газа для трубы длиной *L м* в поток для труб длиной в *N* раз больших

N	Множитель	*N*	Множитель	*N*	Множитель	*N*	Множитель
1,0	1,000	1,8	0,745	8,0	0,354	16,0	0,250
1,1	0,955	1,9	0,726	9,0	0,333	17,0	0,243
1,2	0,913	2,0	0,707	10,0	0,316	18,0	0,236
1,3	0,877	3,0	0,577	11,0	0,302	19,0	0,230
1,4	0,846	4,0	0,500	12,0	0,289	20,0	0,224
1,5	0,817	5,0	0,447	13,0	0,277		
1,6	0,791	6,0	0,408	14,0	0,267		
1,7	0,767	7,0	0,378	15,0	0,258		

Таблица 145

Длина трубы, добавляемая на каждое колено или тройник на газопроводе

Размер трубы в дм.	Дополнительная длина в *м*	Размер трубы в дм.	Дополнительная длина в *м*
3/4	0,39	2 1/2	2,04
1	0,51	3	2,83
1 1/4	0,79	4	4,25
1 1/2	1,00	6	7,30
2	1,55	8	9,74

Таблица 146

Длина трубы, добавляемая на каждый вентиль на газопроводе

Размер трубы в дм.	Дополнительная длина в *м*	Размер трубы в дм.	Дополнительная длина в *м*
3/4	0,61	2 1/2	3,07
1	0,79	3	4,25
1 1/4	1,19	4	6,40
1 1/2	1,52	6	10,96
2	2,39	8	14,62

Таблица 147

Расчет ответвлений к приборам

Выходы	Максимальный расход газа на каждый кран и дальнейшую линию в $м^3$	Общая длина ответвлений до последнего крана в *м*	Размер трубы в дм. при перепаде давления 5,08 *мм* вод. столба на каждом выходе
Для крана 1	1,70	32,2	1
» » 2	3,40	32,2	1 1/4
» » 3	5,10	32,2	1 1/4
» » 4	1,70	30,4	1
» » 5	3,40	30,4	1 1/4
» » 6	5,10	30,4	1 1/4

Таблица 148

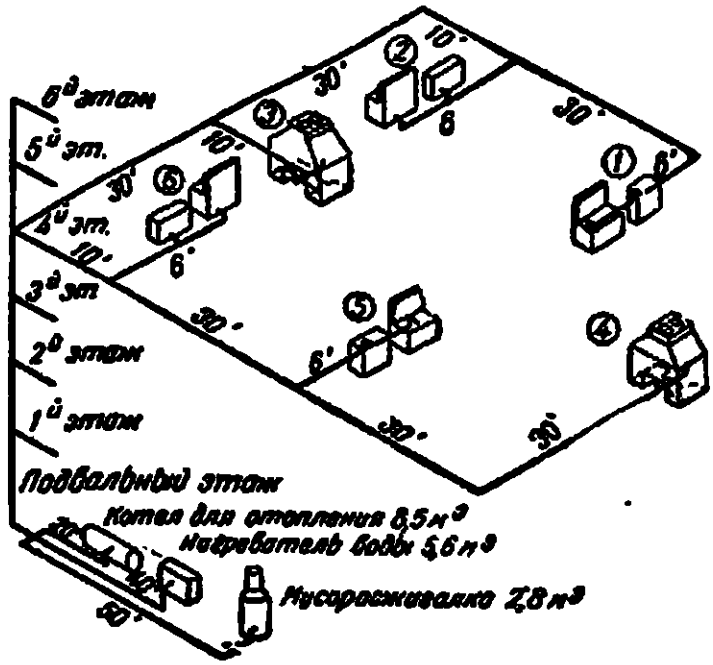
Метод подсчета минимальных размеров применяемых вертикальных труб

Этаж	Максимальный расход газа на каждый кран и дальнейшую линию в $м^3$	Общая длина вертикальной трубы в *м*	Размер вертикальной трубы в дм. при перепаде давления 12,7 *мм* вод. столба (по табл. 141)
6	10,2	19,8	1 1/4
5	20,4	19,8	2
4	30,6	19,8	2
3	40,7	19,8	2 1/2
2	50,9	19,8	2 1/2
1	61,0	19,8	2 1/2

Пример. Предположим, что нужно построить шестиэтажный жилой дом. В подвальном этаже помещаются установка для центрального отопления, установка для нагрева воды и мусоросжигательная печь. В каждом этаже расположены по четыре квартиры, причем в каждой квартире имеются газовая плита, газовый отражательный камин-нагреватель и газовый холодильник. В системе применяется естественный газ с теплотворной способностью 9800 *Кал/м*³ и удельным весом 0,65. Общее расположение показано на фиг. 147. Ответвления на каждом верхнем этаже будут одни и те же. Можно предполагать, что кухонная плита и холодильник потребуют максимально 1,69 *м*³/*час*, а каждый камин — 0,84 *м*³/*час*. От вертикальной трубы имеются два ответвления, каждое с тремя выходами, с максимальной общей потребностью 5 *м*³/*час* и длиной 30,5 *м*. Метод

расчета показан в табл. 147, а размеры трубы берутся из табл. 144, причем падение давления принимается равным 5,08 *мм*. Вентили и отводы во внимание не принимаются, а коэфициент одновременности берется равным единице.

Следует заметить, что на каждом выходе нагрузка выше его рассматривается как концентрированная на конце полной длины ответвления. Это дает уверенность в достаточном снабжении газом каждого газового устройства при максимальной нагрузке. Вертикальная труба от счетчика на шестой этаж имеет 19,8 *м* в длину с выходом на каждом этаже. Размеры трубы берутся из табл. 141, допускающей падение давления 12 *мм*. Характеристика труб приведена в табл. 148, причем она сделана по тому же общему методу, который применялся для ответвлений.



Фиг. 147. Типичное расположение газопроводов в подвальном этаже и в остальных этажах жилого дома.

На фиг. 147 показано также расположение труб в подвальном этаже. Здесь имеются три больших автоматических устройства, так что хорошо провести к каждому из них особую газовую линию. Характеристика этих устройств следующая (величины взяты из табл. 141):

Мусоросжигательная печь	2,8 *м³/час*	15 *м*	трубы в 1″
Нагреватель воды	5,6 „	12 „	„ 1¼″
Котел для отопления	8,5 „	6 „	„ 1¼″

Магистральные газопроводы. Магистрали можно рассчитать по методу, принятому для расчета вертикальных трубопроводов и ответвлений в домовой газовой сети. Однако в промышленных предприятиях часто представляется необходимым обеспечить достаточно равномерное распределение газа в ответвления, не регулируя каждое из них в отдельности. Следовательно, желательно применить такую магистраль, диаметр которой будет всюду однообразен и площадь которой будет иметь определенное отношение к общей площади отверстий ответвлений.

Если

a_m — поперечное сечение площади магистрали в $м^2$;

a_L — общая площадь отверстий кранов, расположенных между соединением подающей линии и концом магистрали, в $м^2$;

X — разница в давлении, допускаемом между средним давлением в магистрали и средним давлением либо в ближайшей точке к падающей линии, либо в самой отдаленной от этой линии точке;

N — число кранов в ответвлениях;

$$N_2 = \frac{1 + 2^2 + 3^2 + \ldots + N^2}{N^3};$$

f_s — сопротивление трения секции магистрали между кранами в скоростных напорах;

F_L — общее сопротивление трения в ответвлении в единицах скоростных напоров у отверстия крана,

то

$$\frac{a_m}{a_L} = \sqrt{\frac{1}{2X}\left(\frac{1-N_s f_s}{1+F_L}\right)},$$

где $N_s f_s < 1$,
или

$$\frac{a_m}{a_L} = \sqrt{\frac{1}{2X}\left(\frac{N_s f_s - 1}{1+F_L}\right)},$$

где $N_s f_s > 1$.

Размер газового фидера. Размер газового фидера можно легко высчитать, применив обычную формулу для допускаемого падения давления. В тех случаях, когда на линии фидера установлен регулятор давления, расположенный на некотором расстоянии от магистрали, и ответвления от магистрали могут работать либо в отдельности, либо группами, сопротивление трения на линии фидера от регулятора до магистрали определяет изменение давления, которое может произойти в любом ответвлении во время изменения расхода газа.

Если

$Q_{макс}$ — количество *м³/час* газа, проходящего в линии фидера во время максимальной нагрузки;

$Q_{мин}$ — количество *м³/час* газа, проходящего в линии фидера во время минимальной нагрузки;

H_v — допускаемое изменение давления в любой горелке во время наибольшего изменения нагрузки в *мм* водяного столба;

L_f — длина подающей линии от регулятора до магистрали в *м*;

P_1 — давление на выходе регулятора;

P_2 — давление в магистрали в *кг/см²* абс.,

то для формулы Weymouth'a для высокого давления:

$$\sqrt{Q_{макс}^2 - Q_{мин}^2} = 4{,}513\sqrt{\frac{H_v(P_1+P_2)D^{6\frac{1}{3}}}{SL_f}}$$

Для формулы Spitzglass'a для высокого давления:

$$\sqrt{Q_{макс}^2 - Q_{мин}^2} = 10{,}71K\sqrt{\frac{H_v P_a}{SL_f}}.$$

Для формулы Spitzglass'a для низкого давления:

$$\sqrt{Q_{макс}^2 - Q_{мин}^2} = 11{,}0K\sqrt{\frac{H_v}{SL_f}}.$$

где K — константа Spitzglass'a для диаметра;

P_a — среднее давление в *кг/см²*.

Формулы для высокого давления применяются для давлений выше 0,1 *кг/см²*.

2. ДЫМОХОДЫ И ВЫТЯЖНЫЕ ТРУБЫ

Каждое новое здание должно иметь соответствующие дымоходы и вытяжные трубы для газового оборудования. Выводные отверстия в газовом оборудовании предназначаются для отвода продуктов сгорания из здания в воздух. Нормально эти продукты представляют собой углекислый газ и пары воды, но в некоторых случаях они могут содержать серу или другие компоненты, имеющие неприятный запах. Во всяком климате, за исключением очень сухого, даже одни пары воды являются уже весьма неприятными в комнатном воздухе, так как они конденсируются на холодной поверхности. Американская газовая ассоциация (А. О. А.) рекомендует соединять с вытяжной трубой всякое газовое оборудование, в котором расходуется свыше 12 600 *Кал/час* или же больше 267 *Кал* на 1 *м³* объема комнаты.

Таблица 149

Поток газа (удельный вес 0,45) в трубах при падении давления, составляющего 5% от начального по манометру (формула Spitzglass'a)

Начальное давление газа	Диаметр трубы в дм.											
	½	¾	1	1¼	1½	2	2½	3	4	5	6	8
	Пропускная способность $м^3$/час через отрезок в 30, 48 м (100 фут.)											
в мм водяного столба												
102	0,79	1,75	3,54	7,82	12,18	24,05	40,23	73,09	153,55	279,62	456,11	929,23
127	0,88	1,96	3,99	8,75	13,63	27,62	45,04	82,16	171,96	311,63	507,11	1 042,54
152	0,96	2,18	4,38	9,60	14,96	30,21	49,29	89,81	188,68	342,79	559,10	1 141,70
177	1,05	2,35	4,78	10,40	16,18	32,86	53,54	97,46	203,96	371,12	603,43	1 235,19
203	1,10	2,52	5,04	11,18	17,31	35,13	57,23	104,25	218,14	389,65	645,92	1 320,18
228	1,19	2,69	5,31	11,81	18,39	37,11	60,63	110,77	231,74	422,12	688,42	1 402,31
254	1,25	2,83	5,64	12,47	19,36	39,10	64,03	116,72	244,49	444,78	725,25	1 481,88
279	1,30	2,97	5,95	13,12	20,37	41,08	67,43	122,67	256,95	467,45	759,24	1 555,32
305	1,38	3,08	6,23	13,65	21,23	42,34	70,26	128,05	268,57	484,44	788,24	1 622,31
в мм												
0,035	1,47	3,34	6,71	14,73	22,91	46,16	75,61	137,92	288,86	523,92	855,23	1 750,18
0,05	1,81	4,11	8,27	18,19	28,30	57,23	93,49	170,26	356,96	651,59	1 050,64	2 161,68
0,07	2,19	4,79	9,80	21,19	32,86	66,86	108,80	198,08	416,45	756,41	1 229,52	2 512,87
0,09	2,38	5,41	10,85	23,91	37,11	75,26	122,67	223,81	470,28	849,90	1 388,17	2 838,00
0,11	2,63	5,95	11,96	26,32	40,80	83,01	135,13	246,47	518,44	940,56	1 529,82	3 116,30
0,13	2,86	6,52	13,00	28,61	44,48	90,69	147,98	268,00	560,93	1 022,71	1 665,80	3 399,60
0,14	3,09	6,97	14,02	30,85	47,88	97,17	158,65	288,97	606,26	1 099,80	1 790,46	3 682,90
0,18	3,51	7,93	15,89	35,13	54,39	110,20	179,90	328,63	689,42	1 249,35	2 031,96	4 164,51
0,21	3,88	8,81	17,68	38,81	60,63	123,67	199,73	365,46	762,08	1 388,17	2 257,90	4 617,79
0,25	4,25	9,68	19,35	42,50	66,01	134,28	218,71	399,43	838,80	1 518,49	2 473,21	5 042,74
0,28	4,59	10,45	20,94	45,89	71,96	145,32	236,84	433,45	906,58	1 643,14	2 680,02	5 467,69
0,32	4,76	11,33	22,49	49,58	77,05	155,82	254,69	461,78	971,72	1 767,79	2 889,05	5 892,64
0,35	5,27	11,98	24,02	52,69	82,44	166,58	271,68	492,94	1 039,71	1 886,78	3 059,64	6 260,93
0,42	5,92	13,48	26,97	59,21	92,38	186,96	305,96	556,27	1 164,86	2 119,08	3 437,53	7 054,17
0,56	7,20	16,23	32,58	71,96	111,62	226,07	368,29	671,42	1 405,17	2 561,03	4 164,51	8 499,00
0,70	8,39	18,92	38,25	83,86	130,03	263,19	427,78	781,91	1 640,31	2 974,65	4 872,76	9 943,83
	На каждое колено трубопровода добавить к составным отрезкам прямой трубы указанную ниже длину (в м)											
—	0,3	0,4	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	2,8	4,2	5,3	7,3	9,7

Для полных отрезков длиной меньше или больше 30,4 м цифру, указанную в таблице, умножить на коэфициент, соответствующий требуемой длине, а именно:

Длина трубы в м	7,6	15,2	30,4	45,6	60,9	76,1	91,4	106,6	121,9	152,4
Коэфициент	2,000	1,410	1,000	0,817	0,707	0,632	0,577	0,535	0,500	0,447

Таблица 150

Поток газа (удельный вес 0,65) в трубах при падении давления, составляющего 5% от начального по манометру (формула Spitzglass'a)

Начальное давление газа	Диаметр трубы в дм.											
	½	¾	1	1¼	1½	2	2½	3	4	5	6	8
	Пропускная способность в м³/час через отрезок 30,48 м (100 фут.)											
в мм водяного столба												
102	0,65	1,47	2,95	6,52	10,14	20,51	33,43	60,91	127,77	232,59	379,63	773,41
122	0,74	1,64	3,31	7,28	11,33	22,93	37,40	68,28	143,07	260,35	422,12	860,90
152	0,79	1,81	3,63	7,99	12,44	25,19	41,08	74,79	156,95	285,13	464,61	949,06
177	0,88	1,95	3,94	8,64	13,46	27,25	44,48	81,02	169,70	308,80	503,44	1 028,38
203	0,93	2,10	4,19	9,26	14,39	29,18	47,69	86,69	181,63	331,46	538,27	1 099,20
228	0,99	2,24	4,48	9,83	15,30	30,88	50,43	92,07	192,93	351,29	572,27	1 167,20
254	1,05	2,35	4,70	10,37	16,12	32,68	53,26	97,17	203,41	371,12	603,43	1 232,38
279	1,08	2,46	4,96	10,91	16,94	34,21	56,09	101,99	213,89	388,12	631,76	1 294,68
305	1,13	2,58	5,18	11,39	17,71	36,26	58,36	106,52	223,52	405,12	660,09	1 351,34
в ати												
0,035	1,22	2,78	5,58	12,26	19,06	38,52	62,87	114,70	240,44	436,13	710,53	1 455,65
0,05	1,50	3,43	6,85	15,13	23,54	47,59	77,91	141,65	297,47	541,10	881,06	1 798,96
0,07	1,78	3,99	7,99	17,62	27,40	55,53	90,37	164,88	346 63	628,93	1 022,71	2 080,75
0,09	1,98	4,50	9,04	19,89	30,88	62,61	101,99	186,13	390,95	708,25	1 155,86	2 359,69
0,11	2,18	4,96	9,94	21,90	34,00	69,13	112,47	205,11	430,62	781,91	1 272,02	2 600,89
0,13	2,38	5,41	10,82	23,85	37,11	75,07	122,39	222 96	467,45	849,90	1 385,44	2 830,17
0,14	2,58	5,81	11,67	25,67	39,95	80,74	132,02	240,24	504,27	915 06	1 490,16	3 059,64
0,16	2,68	6,61	13,23	29,18	45,33	91,79	149,58	272,53	572,27	1 039,71	1 691,30	3 456,28
0,21	3,23	7,34	14,70	32,30	50,43	101,99	166,30	3 3,13	634,59	1 156,96	1 878,28	3 662,86
0,25	3,54	8,02	16,09	35,41	54,96	111,62	181,88	331,46	694,09	1 263,52	2 056,76	4 152,84
0,28	3,82	8,70	17,42	38,25	59,78	120,97	197.18	359,79	753,56	1 368,34	2 229,57	4 .61.13
0,32	4,14	9,35	18,73	41,36	64,03	129,75	211,91	385,29	807,41	1 470,33	2 393,89	4 901,09
0,35	4,39	9,97	20,00	43,91	68,56	138,53	225,07	410 79	864,07	1 569,43	2 536,57	5 212,72
0,42	4,93	11,19	22,44	49,29	76,77	155,53	253,84	461,78	968,80	1 702,13	2 861,33	5 864,31
0,56	5,86	13,51	27.11	59,78	92,92	188,11	305,96	558,10	1 170,03	2 130,42	3 456,26	7 062,50
0,70	6,97	15,75	31,73	69,69	108,22	218,99	356,96	651,59	1 365,51	2 481,71	4 031,19	8 272,36
На каждое колено трубопровода добавить к составным отрезкам прямой трубы указанную ниже длину (в м)												
—	0,3	0,4	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	2,8	4,2	5,8	7,3	9,7

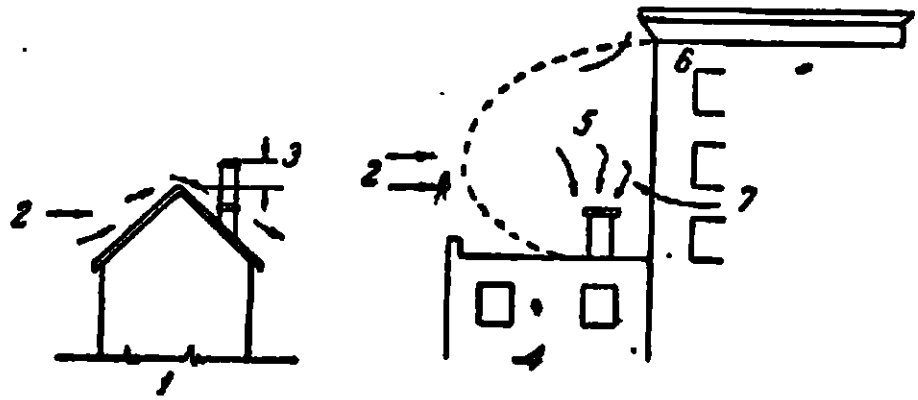
Для полных отрезков длиной меньше или больше 30,4 м цифру, указанную в таблице, умножить на коэфициент, соответствующий требуемой длине, а именно:

Длина трубы в м	7,6	15,2	30,4	45,6	60,9	76,0	91,4	106,6	121,9	152,4
Коэфициент	2,000	1,410	1,000	0,817	0,707	0,632	0,577	0,535	0,500	0,447

КОНСТРУКЦИЯ ВЫТЯЖНОЙ ТРУБЫ ИЛИ ВЫХОДА ДЛЯ ГАЗА

Вытяжные трубы, применяемые для отвода газа, должны быть вертикальными без ответвлений и без уменьшения площади в верхней своей части. Они должны быть по меньшей мере на 0,6 *м* выше самой высокой точки крыши, как это показано на фиг. 148. Тяга происходит вследствие разности давлений между горячими газами в вытяжной трубе и холодным наружным воздухом. Если по какой-либо причине (например, от давления ветра) наружное давление сделается больше внутреннего, продукты сгорания будут лишены возможности подниматься вверх, и произойдет обратная тяга; для устранения ее устраивается вытяжной колпак над газовым оборудованием. Единственным средством против обратной тяги является освобождение дымохода от влияния, создаваемого давлением ветра.

Расположение дымохода. Там, где это возможно, дымоходы должны устанавливаться около внутренней стены, потому что при их нахождении около наружной стены продукты сгорания будут охлаждаться. Это уменьшит разность давлений и вызовет конденсацию, которая может повредить вытяжную трубу. Очевидно, что стена, в которой предполагается проложить дымоход, должна быть достаточно широкой, чтобы в ней можно было поместить вытяжную трубу соответствующего размера.



Фиг. 148. Высота труб при различных условиях.

Примечание. Установить вытяжную трубу выше крыши высоких зданий. Наружные металлические вытяжные трубы неудовлетворительны.

Материалы для изготовления вытяжной трубы. Кирпичные вытяжные трубы могут иметь 10-сантиметровые стенки, но в этом случае они должны футероваться терракотой или черепицей из огнеупорной глины. Следует применять жирный цементный раствор, так как очень важно, чтобы через швы не просачивались продукты конденсации.

В качестве материала для газовых вытяжных труб с успехом применяют металлические, терракотовые, цементные, глазурованные канализационные и асбестовые трубы.

Нефутерованные металлические трубы никогда не следует закладывать в стенах. Из металлических долговечными являются трубы медные (453-граммовые) и из монель-металла (26-го калибра). Оцинкованное железо дешевле, но оно будет служить недолго, в особенности когда оно применяется на установках с искусственным газом. Выходные отверстия из листового металла следует изолировать тремя слоями асбестовой бумаги (58,5 *кг* на 100 $м^2$) или же асбестово-воздушной изоляцией. В продаже имеются патентованные готовые вытяжные трубы различных типов, изготовленные из комбинированного материала (из числа указанных выше).

Отверстия дымоходов, их очистка и осушка конденсации. Никакая отводная труба не должна входить в дымоход ближе 0,5 *м* от дна и торчать в дымоходе, создавая этим затруднения движению газа. Около дна следует установить герметически закрывающуюся дверку для очистки.

Газовое оборудование следует расположить по возможности ближе к его дымоходу, так как важно, чтобы соединение с выходным отверстием было коротким и свободным от колен. Соединение с дымоходом должно иметь уклон по напра-

влению вверх примерно в 40 *мм* на 1 *м* длины; для домовых установок его длина не должна превышать 6 *м*; оно не должно иметь больше двух колен, а его площадь должна быть не меньше площади выходного отверстия газового оборудования, к которому оно присоединено.

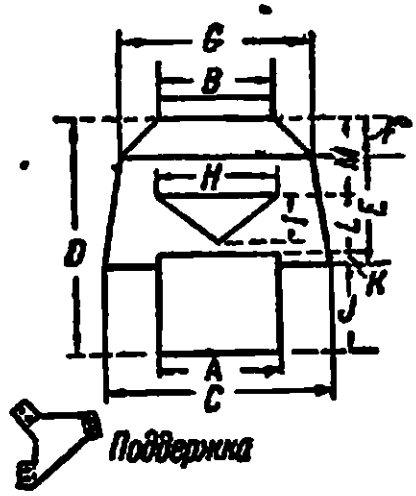
Когда несколько соединений сходятся в одной общей горизонтальной трубе, их ответвления лучше соединять под тупым, а не под прямым углом. При таком соединении продукты сгорания будут лучше направляться к вытяжной трубе.

Установка соединений вытяжной трубы. Соединения выходных отверстий следует устанавливать не ближе 7,5 *см* от любого незащищенного горючего материала. В том случае, когда горючий материал предохранен, их можно устанавливать на расстоянии 2,5 *см*. Когда они проходят через стены, перегородки или полы из горючего материала, следует установить вентилируемые или изолированные муфты.

На промежутках около 2 *м* соединение вытяжной трубы должно надежно поддерживаться, чтобы обыкновенным ударом его нельзя было повредить.

Материалы для вытяжной трубы. Соединения с выходными отверстиями обычно представляют собой металлические или асбестовые трубы. Труба из чер-ного железа рекомендуется только для газовых кухонных плит, но даже и для этой цели больше подходят такие металлы, как медь, монель или металл Allegheny.

Соединения вытяжных труб с выходными отверстиями на газовых кухонных плитах располагаются иногда на видном месте и могут украсить кухню, если их выкрасить под цвет стен или же сделать из меди или специального металла.



Фиг. 149. Размеры вертикальных вытяжных колпаков.

Таблица размеров в *дм*.

Диаметр трубы	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
3	3	3	5,5	7,0	3,8	0,7	4,4	3,0	1,5	2,5	0,7	1,5	2,3
4	4	4	7,2	9,5	5,0	1,0	6,0	4,0	2,0	3,5	1,0	2,0	3,0
5	5	5	9,4	10,5	5,3	1,5	8,0	5,0	2,3	4,0	0,9	2,4	3,5
6	6	6	11,5	12,0	5,6	1,9	9,8	6,0	2,5	4,5	0,8	2,7	4,0
7	7	7	13,5	13,5	6,4	2,3	11,6	7,0	2,9	5,3	0,9	3,1	4,6
8	8	8	15,5	15,8	7,1	2,7	13,4	8,0	3,2	6,0	1,0	3,5	5,3
9	9	9	17,5	17,5	7,7	3,1	15,2	9,0	3,5	6,7	1,0	4,0	5,8
10	10	10	19,7	19,8	7,9	3,6	17,2	10,0	3,8	7,3	1,0	4,3	6,2
11	11	11	22,2	20,7	8,4	4,3	19,6	11,0	4,1	8,0	1,5	4,6	6,6
12	12	12	24,7	22,2	8,7	5,0	22,0	12,0	4,4	8,5	1,7	5,0	7,0

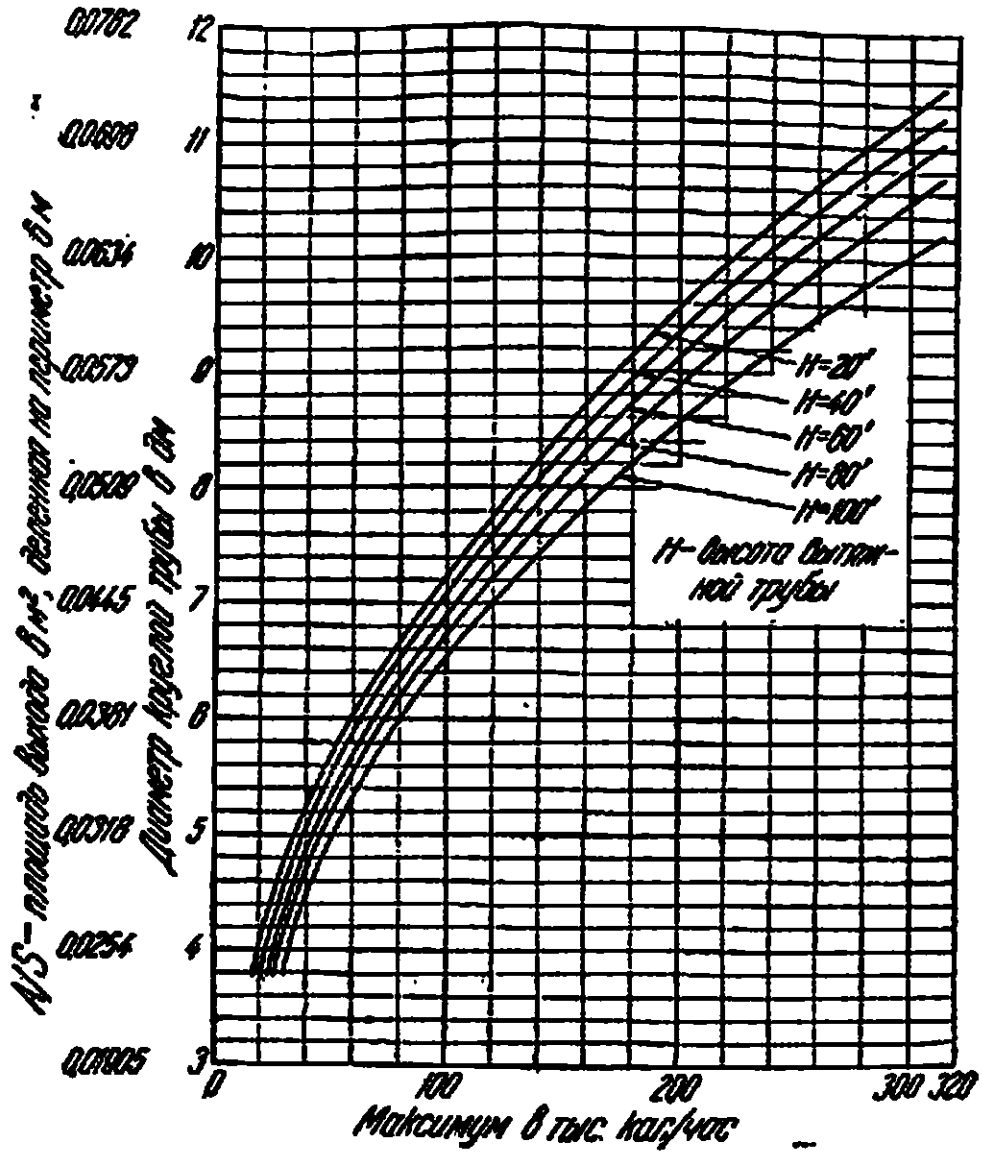
Вытяжные колпаки. Вытяжной колпак обычно доставляется заводчиком как часть оборудования; в одобренных Американской газовой ассоциацией требованиях, предъявляемых к оборудованию для центрального газового отопления, вытяжной колпак определяется так: вытяжной колпак представляет собой фитинг или приспособление, установленное в вытяжной трубе и составляющее часть этой трубы или же установленное на самом оборудовании с целью: 1) гарантировать быстрое улетучивание отработанных (топочных) газов в случае отсутствия тяги, наличия обратной тяги или закупорки за вытяжным колпаком; 2) предупредить движение обратной тяги в оборудование и 3) нейтрализовать влияние тяги в вытяжной трубе на работу оборудования.

Независимо от формы вытяжного колпака следует принимать во внимание при его конструировании еще некоторые факторы. Габарит вытяжного колпака, насколько это возможно, должен быть таким, чтобы дать возможность его применения даже на ограниченной площади. Внутренний профиль и размеры должны быть такими, чтобы топочные газы не сифонили из оборудования ни при прямой, ни при обратной тяге.

В случае полного отсутствия тяги или наличия обратной тяги топочные газы должны выводиться через разгрузочные отверстия достаточно быстро, чтобы исключить возможность обратного давления на вытяжном выходе оборудования. При пониженной тяге не должна иметь места утечка топочных газов у разгружающих отверстий. Для удовлетворения этим требованиям движение газа через вытяжной колпак должно итти, насколько это возможно, потоком, и свободная поверхность любой секции должна быть такой, чтобы оказать минимальное сопро-

тивление движению в разгрузочных отверстиях топочных газов или топочных газов и втянутого с ними воздуха. Конструкция и размеры вытяжного колпака вертикального типа с перегородкой в виде перевернутого конуса показаны на фиг. 149.

Пропускная способность дымоходов. Диаграмма на фиг. 150 дает теоретические размеры дымохода как функцию расхода газа в Калориях в час для вытяжных труб различной высоты. Величины пропускной способности основаны на данных, представленных лабораторией фирмы Portland Gas and Coke Company

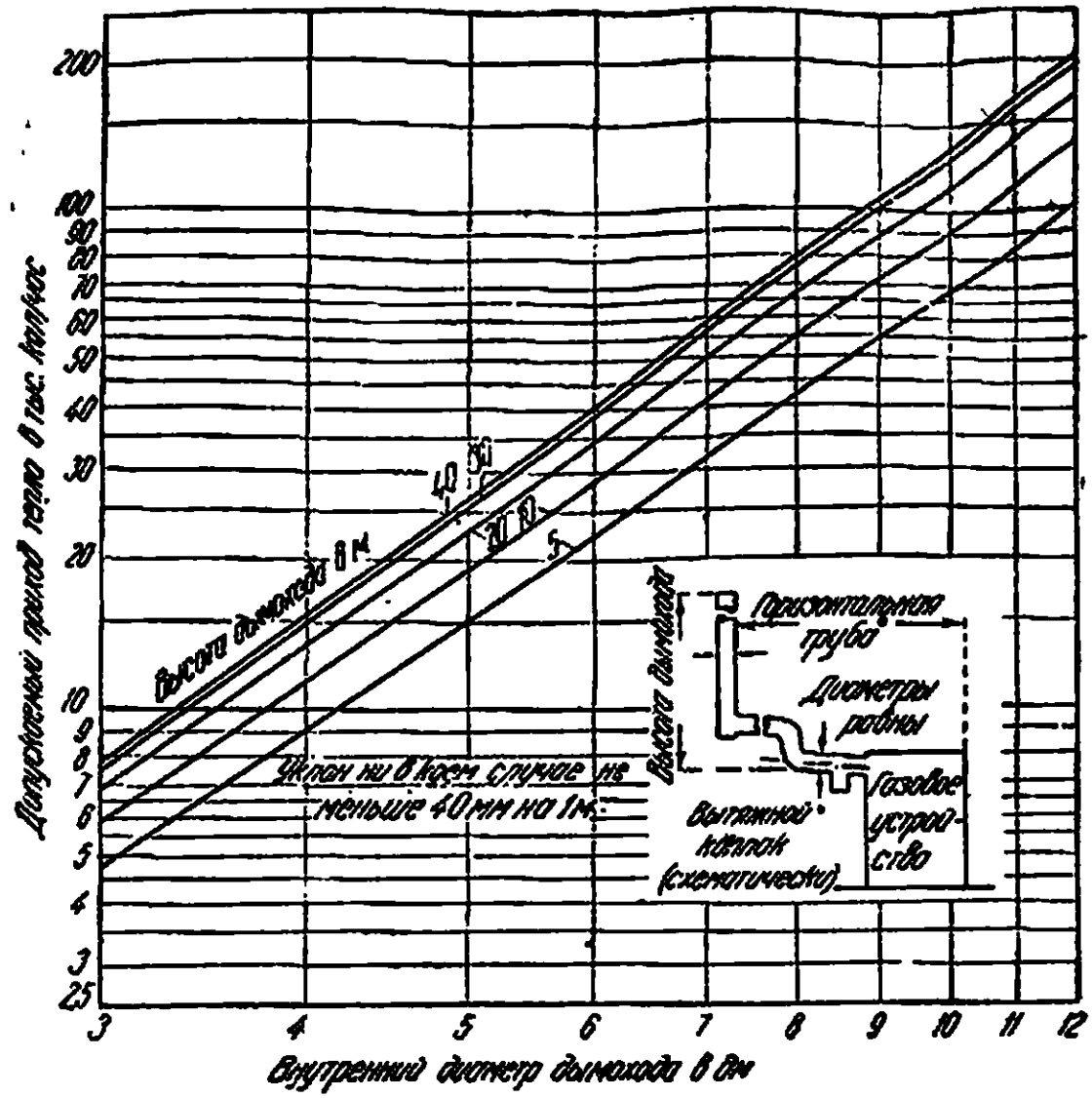


Фиг. 150. Пропускная способность дымоходов газового оборудования в *Кал/час.*

(в Портланде, Орегон)[1]. Там, где, базируясь на местной практике и опыте, применяют дымоходы большего размера, эти большие размеры следует оставить.

Согласно последним исследованиям Frank Wills'a [2] обычно применяемые вытяжки не соответствуют своему назначению в условиях, часто встречающихся на практике. Так например, на фиг. 150 не принято во внимание добавочное сопротивление вытяжки и вытяжного колпака, а также не сделано допуска на разбавление продуктов сгорания. Этот последний фактор может увеличить

[1] Опубликовано в „Ежемесячнике Американской газовой ассоциации" (A. G. A. Monthly), июнь 1926.
[2] Flues and Chimneys for Gas Burning Equipment. „Proc. P. C. G. A.", 1932, 1933; „Western Gas", октябрь 1932.



Фиг. 151. Допускаемая пропускная способность (в *Кал*) для металлических и футерованных терракотой круглых дымоходов с вытяжным колпаком от бытовых газовых приборов (искусственный и естественный газ). Для неотделанных кирпичных дымоходов пропускная способность подлежит уменьшению на 15%.

Длина горизонтальной трубы не больше 6 *м*, за исключением тех случаев, когда высота дымохода меньше 6 *м*. В этих случаях длина горизонтальной трубы не должна быть больше высоты дымохода. Коэфициент трения $f = 0{,}0083$. В горизонтальной трубе диаметром, равным диаметру дымохода, имеются два колена большего радиуса.

В случае, когда присоединенное газовое устройство не имеет вытяжного колпака, пропускная способность вытяжной трубы примерно двухкратная по сравнению с указанной на диаграмме.

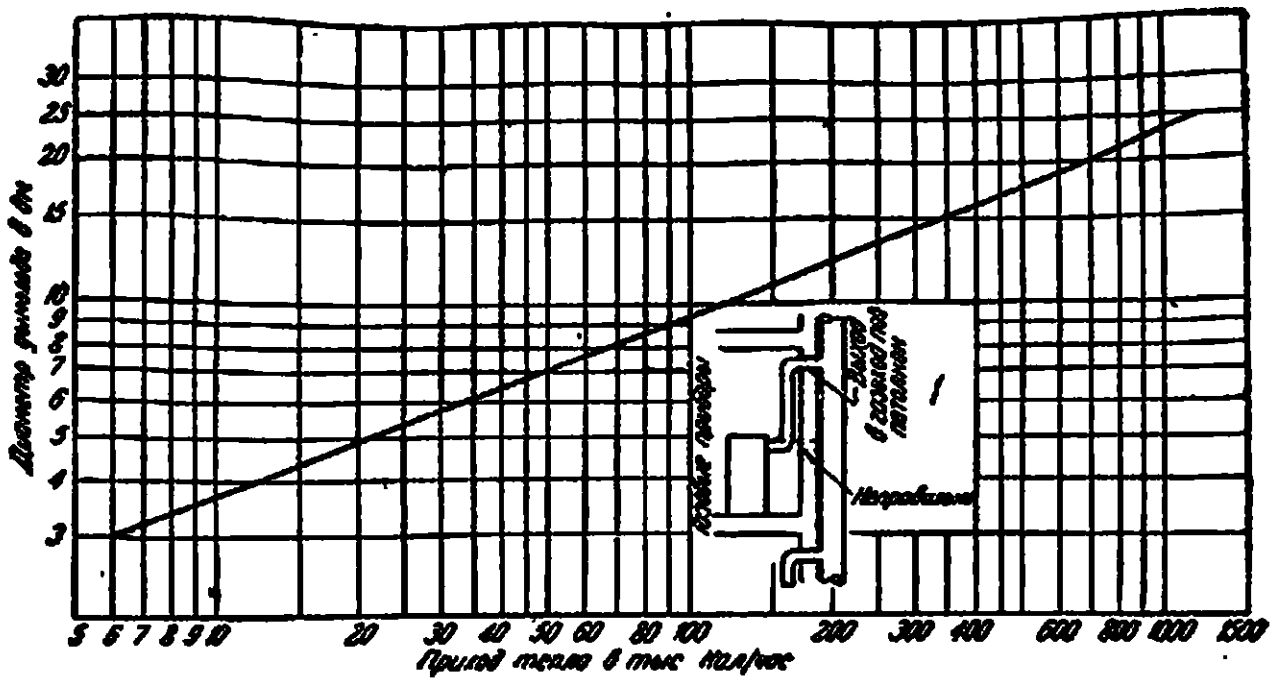
Каждое добавочное колено уменьшает допускаемую горизонтальную длину трубы на длину в метрах, равную диаметру в дюймах, умноженному на 3,28.

Если расчетная длина горизонтальной трубы превышает данную длину (или добавочные колена), то следует выбрать следующий по порядку больший размер дымохода.

Для других дымоходов, кроме круглых, и для дымоходов, присоединенных к нескольким газовым устройствам, см. фиг 151е или 160 и табл. 15; для других температур и давлений см. фиг. 157 и 158. Диаграмма рассчитана для средней температуры дымохода 65,5° С и наружной температуры 15,5° С (разность температур 50° С при давлении 760 *мм* ртутного столба) и основана на 100-процентном избытке воздуха и 100-процентном разрежении у вытяжного колпака.

объем продуктов сгорания на 100% и значительно понизить их температуру. Предполагается, что все газовые приборы вентилируются сами через кольцо вытяжки.

Фиг. 151 и 151а и табл. 151—153 основаны на работе Wills'a, и приведенные в них в удобном виде данные позволяют решить даже и более сложные вопросы вытяжки.



Фиг. 151а. Зависимость диаметра дымоходов жилого дома от притока в газовые устройства тепла (в *Кал*). Диаграмма основана на следующих условиях: горизонтальные трубы на всех этажах настолько коротки, что их можно не принимать во внимание; наружная температура воздуха 15,5° С, средняя температура дымохода 38° С.

Диаметр дымохода на любом этаже должен быть не меньше диаметра, указанного на диаграмме для притока тепла (в *Кал*), равного суммарному притоку тепла на всех нижних этажах.

Диаметр дымохода над верхним этажом зависит, следовательно, от общего притока тепла в дымоход. Для упрощения конструкции этот размер можно взять для всей высоты дымохода или же размер дымохода уменьшать постепенно, начиная от верха, при условии, если такое устройство согласуется с правилом п. 1.

1 — соединение дымохода, рекомендуемое для всех уравнений с целью предотвратить попадание продуктов горения в комнаты.

Таблица 151

Количество параллельных горизонтальных газопроводов различных размеров, которым можно заменить один газопровод диаметром, равным диаметру дымохода

Для бытовых установок (фиг. 151)

Диаметр горизонтальных газопроводов в дм.	Размер дымоходов в дм.						
	3	4	5	6	8	10	12
	Количество параллельных газопроводов						
3	1	2	3	5	9	12	22
4	—	1	2	3	5	7	11
5	—	—	1	2	3	4	7
6	—	—	—	1	2	3	5
8	—	—	—	—	1	2	3

Условия работы бытовых и индустриальных установок весьма разнообразны в отношении длины и размера горизонтальных газопроводов, количества колен и ответвлений в вытяжной трубе. Вследствие этого ниже приводятся данные для таких установок в удобном для решения указанных выше вопросов виде. Размер горизонтального дымохода у оборудования должен быть не меньше размера кольца на оборудовании, которое обычно рассчитывается на основе максимального прихода тепла в 2 700 000 *Кал/час* на 1 $м^2$ поперечного сечения площади вытяжки. На некоторых бытовых установках могут потребоваться горизонтальный дымоход и вытяжная труба большего размера, а иногда и дымоход и вытяжная труба могут оказаться без надобности большими, если они по всей своей длине изготовлены такого же размера, как и кольцо.

Во всех случаях та часть дымохода, которая присоединена к оборудованию, должна быть одинакового размера с кольцом. Непосредственно вслед за регулятором тяги можно установить соответствующий переходный ниппель, если только все соединения герметичны и надежны. Горизонтальный дымоход должен иметь подъем не меньше 40 *мм* на 1 *м* горизонтальной длины.

Если ответвление имеется в вертикальной вытяжной трубе, то его длина на горизонтальной плоскости должна приниматься во внимание при расчете общей длины горизонтального течения газа в соответствии с указанной здесь методикой.

Примечание. Вместо трубы в 10″ можно взять две трубы по 8″ или одну в 8″ и две по 6″, или другую комбинацию, которой можно заменить одну трубу в 8″.

Колена или другие изгибы вытяжек и дымоходов должны иметь радиусы центральной линии, не меньше 1-2-кратной величины их диаметров. Каждое колено в 90° может рассматриваться как сопротивление, эквивалентное сопротивлению длины вытяжной трубы в метрах и равное 0,1 диаметра трубы в миллиметрах. В поворотах на 45° потеря составляет примерно половину потери колен под углом 90°.

Расчет пропускной способности вытяжных труб

Пропускная способность вытяжной трубы изменяется в зависимости от отношения длины хода горизонтальных труб и ответвлений (если они имеются) к вертикальной высоте вытяжной трубы, а также в зависимости от площади поперечного сечения. Хотя горизонтальная труба и не должна быть такого же размера, как вытяжная, но расчет пропускной способности и правильных размеров упростится, если и та и другая будут одинакового размера.

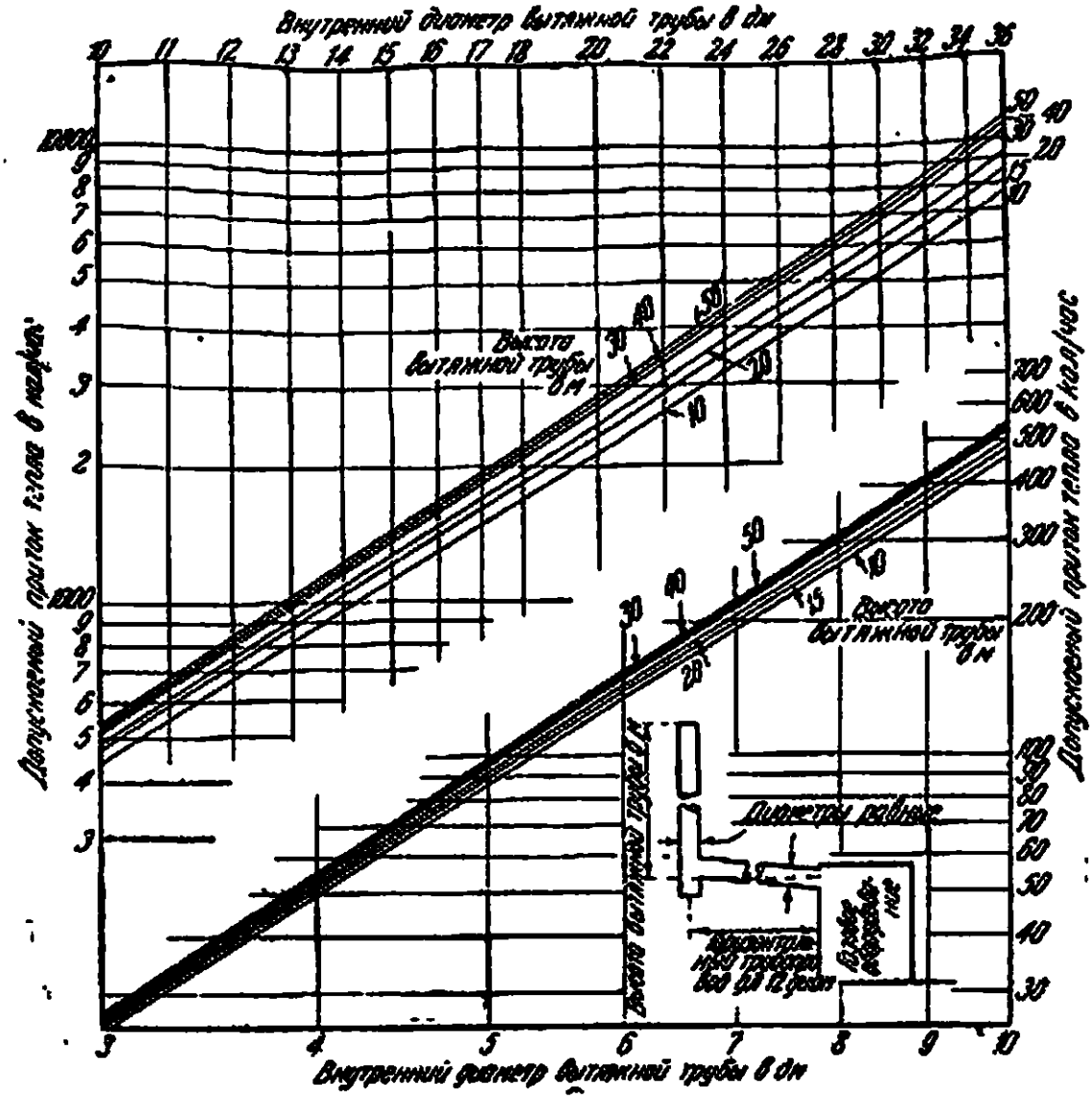
Если диаметр горизонтальной трубы не одинаков с диаметром вытяжной трубы, то эквивалентную длину в единицах диаметров вытяжной трубы можно взять из табл. 154. Пропускную способность вытяжных труб с короткими горизонтальными ходами без колен можно определить из фиг. 155.

Если горизонтальная труба длиннее 12 диаметров или имеет какие-либо колена, то ее допускаемая пропускная способность будет меньше пропускной способности, данной в диаграмме на фиг. 151б.

Степень уменьшения пропускной способности зависит от отношения полной эквивалентной длины горизонтальной трубы (включая все ответвления в дымовой трубе и прибавку на длину для всех колен) к высоте вытяжной трубы плюс длина в метрах, равная двукратному диаметру в дюймах: 3,28. Уменьшение пропускной способности в процентах, соответствующее этому отношению, приведено в диаграмме на фиг. 156.

Если газовое оборудование не вентилируется само собой через кольцо вытяжного отверстия, а требует тяги, то при определении эквивалентной длины горизонтальной трубы (фиг. 156) следует взять 15 диаметров на потери при входе и 30 диаметров для скоростного напора потока.

В том случае, когда с вытяжной трубой посредством горизонтальной трубы с несколькими ответвлениями, работающими параллельно, соединяется целый ряд газовых устройств, размер одиночной линии с пропускной способностью, равной пропускной способности группы параллельных ответвлений, можно высчитать, применив коэфициенты относительной пропускной способности по табл. 152.



Фиг. 151б. Допускаемая пропускная способность (в *Кал*) для металлических и футерованных терракотой дымоходов от бытовых и индустриальных газовых установок (газ — искусственный и естественный). Для неотделанных кирпичных дымоходов пропускную способность следует уменьшить на 15%.

Отношение длины горизонтальной трубы к ее диаметру не более 12; эта труба не имеет колец. Коэфициент трения $f = 0{,}0083$; диаметры вытяжной и горизонтальной труб равны. Эти величины обеспечивают 25-процентный избыток воздуха.

Для случая, когда горизонтальные трубы длиннее и имеют много фитингов, см. фиг. 151в.

Для других дымоходов, кроме круглых, и для дымоходов, присоединенных к нескольким газовым устройствам, см. фиг. 159 и 160 и табл. 152; для других температур и давлений дымоходов см. фиг. 157 и 158. Диаграмма рассчитана для средней температуры в 121 и наружной в 15,5° С (разность температур 105,5° С при давлении 760 *мм* ртутного столба).

Сумма коэфициентов относительной пропускной способности для каждого из нескольких параллельных ответвлений равняется коэфициенту для одиночной линии с такой же пропускной способностью, по которому можно вычислить диаметр одиночной линии.

Длина одиночной линии берется равной длине более длинного параллельного ответвления, включая увеличение длины на колена и другие сопротивления. Общая длина горизонтальной трубы равняется длине одиночной линии, взятой вместо параллельных ответвлений, плюс расстояние от скрещивания ответвлений до вытяжной трубы. На практике допускается, что общий приход тепла сконцентрирован на самом отдаленном участке одиночной линии.

Пример 1. Приход тепла в котел равняется 907 200 *Кал/час*. Высота вытяжной трубы — 30,5 *м*. Длина горизонтальной трубы — 60,9 *м*.
Определить диаметр вытяжной и горизонтальной труб.

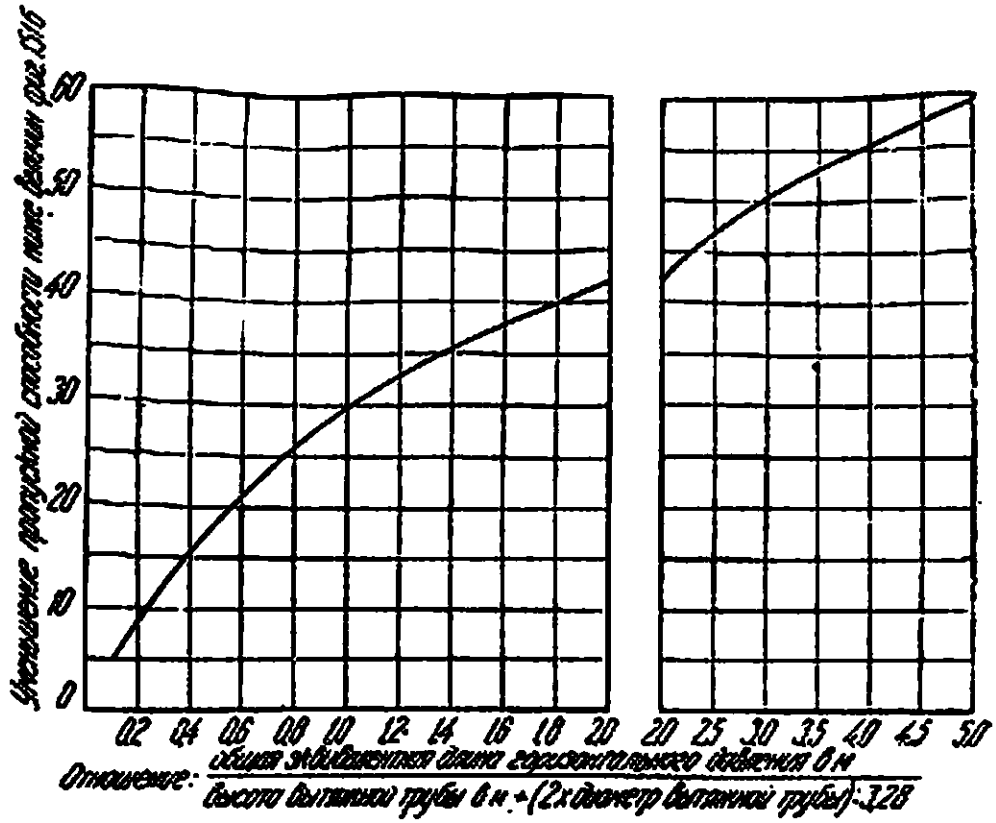
Решение. Для первого приближения можно считать, что отношение горизонтальной длины вытяжной трубы к ее вертикальной длине равно 2. Обращаясь к фиг. 151в, находим, что это отношение указывает на уменьшение пропускной способности на 42% ниже величин пропускной способности, имеющихся на диаграмме (фиг. 151б), что объясняется длиной горизонтальной трубы. Пропускная способность по диаграмме на фиг. 151б, указанная для дымоходов с короткими горизонтальными трубами и допускающая такое уменьшение, будет равна (3,6 · 0,252) : (1,00—0,42) или 1 560 000 *Кал/час*. Для такой пропускной способности при вытяжной трубе высотой 30,4 *м* требуется 16-дюймовая вытяжная и 16-дюймовая горизонтальная трубы.

Теперь можно получить величину этого отношения с более точным приближением. Так как эквивалентная длина в метрах горизонтальной трубы и двух колен равняется $60{,}9 + \left(\frac{2 \cdot 16}{3{,}28}\right)$, то отношение получится равным величине $\left(60{,}9 + \frac{32}{3{,}28}\right)$, деленной на $\left(30{,}4 + \frac{32}{3{,}28}\right)$, что дает 1,75, а эта последняя величина в диаграмме на фиг. 151в указывает, что уменьшение пропускной способности фактически будет составлять около 40% вместо 42%, найденных по диаграмме на фиг. 151б. Отсюда вытекает, что необходимая пропускная способность будет (3,6 · 0,252) : (1,00—0,40), т. е. 1 512 000 *Кал/час*. Из диаграммы на фиг. 151б находим, что этим условиям будет удовлетворять 16-дюймовая вытяжная и 16-дюймовая горизонтальная трубы.

Пример 2. Допустим, что в первом примере тепло в 907 200 *Кал* поступает к двум котлам, причем один дает 504 000, а другой — 403 200 *Кал/час* при вытяжной трубе длиной 30,4 *м*; при этом котел большого размера находится на расстоянии 60,9 *м* от трубы, а меньшего размера — на более близком расстоянии. Ввиду того что с целью определения размеров вытяжной и горизонтальной труб общую нагрузку можно сконцентрировать на более отдаленном котле, задача решается аналогично предыдущей, где требовались 16-дюймовые труба и газоход. При наличии двух котлов необходимо также определить размер ответвлений.

Решение. Котел большого размера дает $\frac{5}{9}$ прихода тепла, а меньшего размера $\frac{4}{9}$. Из табл. 152 находим, что коэфициент относительной пропускной способности для трубы в 16″ равняется 79. Для ответвления к большему котлу $\frac{5}{9}$ от 79 составит 44, что требует отвода в 13″, а для меньшего котла $\frac{4}{9}$ от 79 даст 35, что требует отвода в 12″. Так как согласно обычному стандарту для вытяжных труб (2 712 600 *Кал/м² час*) больший котел будет иметь кольцо в 19″, а другой — в 17″, то потребуются 2 ниппеля (19″ к 13-дюймовому отводу и 17″— к 12-дюймовому).

Примечание. Один дымоход в 12″ и три дымохода в 8″, взятые вместе, имеют такую же пропускную способность, как один дымоход в 16″, а именно: (1 · 38) + (3 · 13) = 77 (почти 79 для диаметра в 16″).



Фиг. 151в. Уменьшение пропускной способности (в %) по сравнению с величинами фиг. 151б, обусловленное длинными горизонтальными трубопроводами и другими сопротивлениями. Подлежит применению в том случае, когда горизонтальные трубопроводы имеют колена и другие фитинги и когда отношение их длины к диаметрам более 12 *м*.

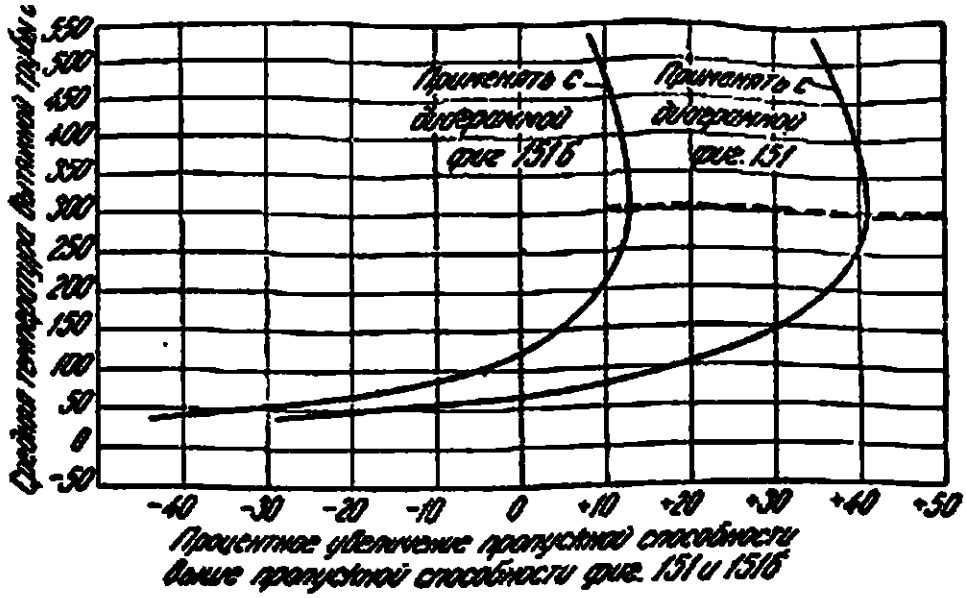
Примечание. Общая эквивалентная длина движения газа по горизонтальному дымоходу представляет собой эквивалентную длину существующего горизонтального трубопровода и ответвлений вытяжной трубы, выраженную в метрах вытяжной трубы (табл. 153) плюс отрезки длины в метрах для каждого 60-градусного колена, равные диаметру в дюймах, умноженному на 3,28, плюс эквивалентные отрезки длины для других фитингов. Высота вытяжной трубы определяется расстоянием по вертикали от вытяжного кольца на газовом оборудовании до верха вытяжной трубы.

Таблица 152

Коэфициенты относительной пропускной способности для параллельных вытяжек в бытовых и индустриальных установках (для равного падения давления)

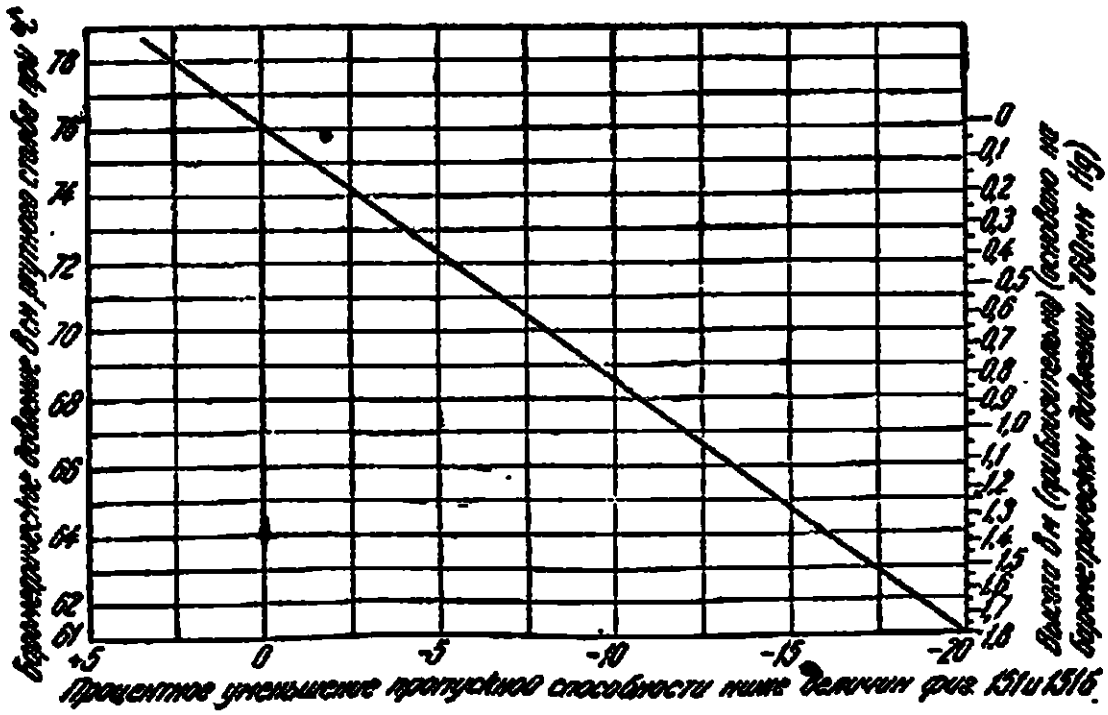
Для применения с фиг. 151б

Диаметр трубопровода в дм. .	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Коэфициент относительной пропускной способности . .	1	2,2	4	6,4	9,6	13	18	24	30	38	46
Диаметр трубопровода в дм. .	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Коэфициент относительной пропускной способности . .	56	67	79	92	107	123	139	158	178	199	221
Диаметр трубопровода в дм. .	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Коэфициент относительной пропускной способности . .	244	270	296	325	354	386	419	453	489	527	609



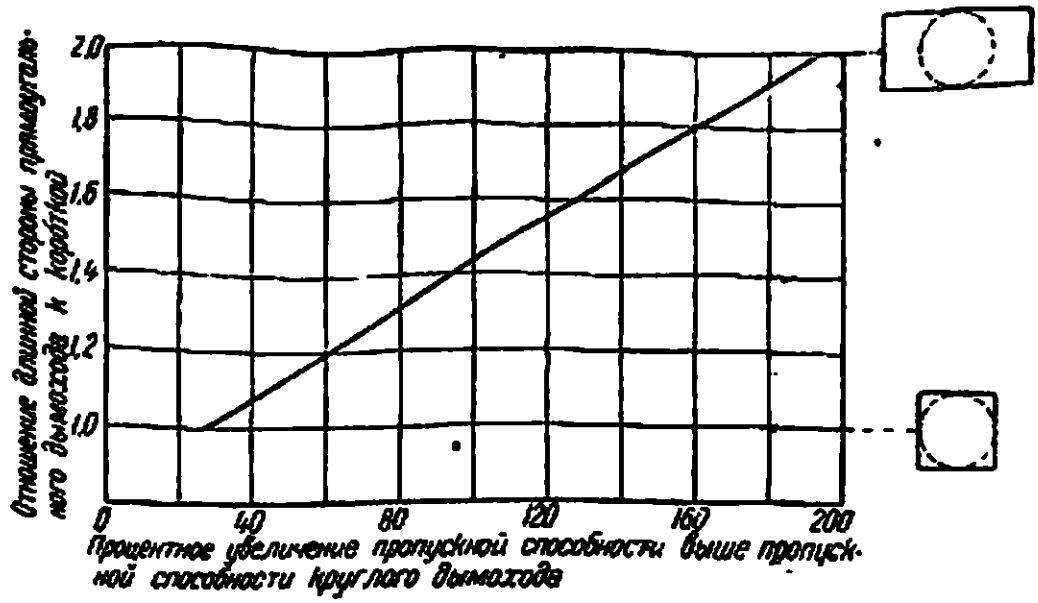
Фиг. 151г. Влияние температуры вытяжной трубы на пропускную способность дымоходов.
Увеличение или уменьшение пропускной способности в процентах для средних температур вытяжной трубы, отличающихся от средних температур на фиг. 151 и 151б.
Предполагается, что наружная атмосферная температура равна 15,5° С.

Примечание. Диаграмма на фиг. 151г построена на средней температуре 65,5° С вытяжной трубы, а диаграмма на фиг. 151б — на средней температуре 121° С.



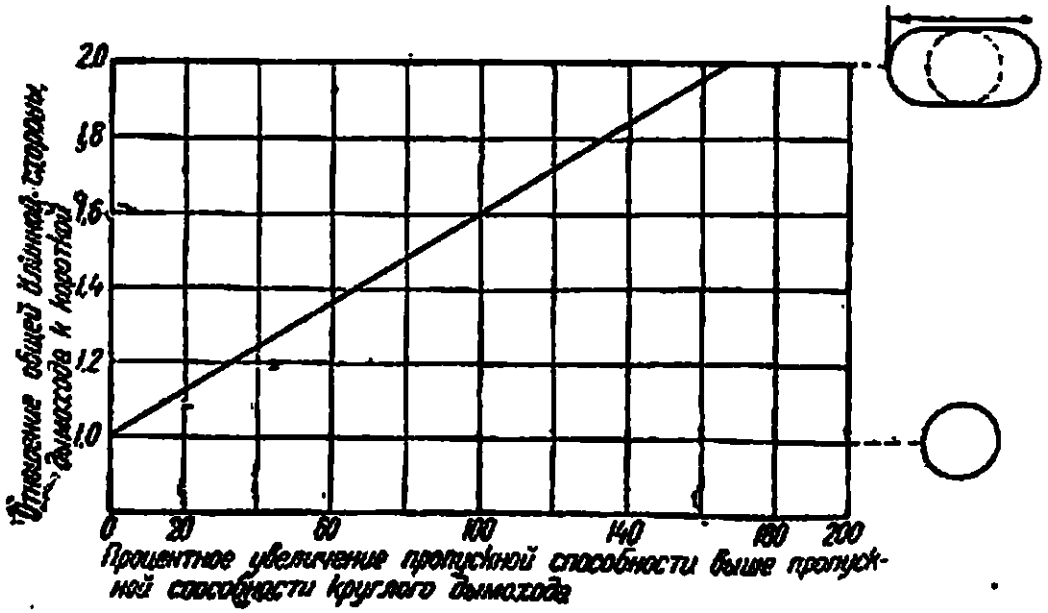
Фиг. 151д. Влияние барометрического давления и высоты на пропускную способность дымоходов.
Уменьшение или увеличение пропускной способности в процентах для барометрического давления, отличающегося от давления в 760 *мм* ртутного столба.

Примечание. Диаграммы на фиг. 151 и 151б построены на давлении в 760 *мм* ртутного столба.



Фиг. 151е. Пропускная способность прямоугольного дымохода минимальной ширины, равной диаметру круглого дымохода, по сравнению с пропускной способностью круглого дымохода.
Процентное увеличение пропускной способности для круглых дымоходов, указанных в диаграммах фиг. 151 и 151б.

1 — самый узкий рекомендуемый дымоход; *2* — квадратный дымоход.



Фиг. 151ж. Пропускная способность полуэллиптического дымохода с полукруглыми краями и минимальной шириной, равной диаметру круглого дымохода, по сравнению с пропускной способностью круглого дымохода.
Процентное увеличение пропускной способности для круглых дымоходов, указанных на диаграммах фиг. 151 и 151б.

1 — длинная сторона; *2* — самый узкий рекомендуемый дымоход; *3* — круглый дымоход.

Таблица 183

Отрезки дымоходов различных диаметров, имеющие одинаковую пропускную способность для одной и той же разности давлений

(Основано на D^5)

Подлежит применению для бытовых и индустриальных установок

Диаметр вытяжной трубы в дм.	Диаметр горизонтального участка вытяжки в дм.																
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
	Эквивалентные длины горизонтальных участков вытяжных труб для равных диаметров, отнесенные к 1 м заменяемой трубы																
4"	1,00	0,13	0,031	0,01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	7,60	1,00	0,24	0,078	0,031	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	32,00	4,20	1,00	0,33	0,13	0,061	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	97,60	12,80	3,00	1,00	0,40	0,19	0,095	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	243,00	32,00	7,60	2,50	1,00	0,46	0,24	0,13	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	525,00	69,20	16,40	5,40	2,20	1,00	0,51	0,29	0,17	—	—	—	—	—	—	—	—
16	1 020,00	135,00	32,00	10,50	4,20	2,00	1,00	0,56	0,33	0,20	—	—	—	—	—	—	—
18	—	242,00	57,70	18,90	7,60	3,50	1,80	1,00	0,59	0,37	0,24	—	—	—	—	—	—
20	—	—	97,60	32,00	12,90	6,00	3,10	1,70	1,00	0,62	0,40	0,27	—	—	—	—	—
22	—	—	—	51,50	20,70	9,80	4,90	2,70	1,60	1,00	0,65	0,43	0,30	—	—	—	—
24	—	—	—	—	32,00	14,80	7,60	4,20	2,50	1,50	1,00	0,67	0,46	0,33	—	—	—
26	—	—	—	—	—	22,10	11,30	6,30	3,70	2,30	1,50	1,00	0,69	0,49	0,35	—	—
28	—	—	—	—	—	—	16,40	9,10	5,40	3,30	2,20	1,40	1,00	0,71	0,51	0,38	—
30	—	—	—	—	—	—	—	12,90	7,60	4,70	3,10	2,00	1,40	1,00	0,72	0,54	0,40
32	—	—	—	—	—	—	—	—	10,50	6,50	4,20	2,80	2,00	1,40	1,00	0,74	0,56
34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,80	5,70	3,80	2,60	1,90	1,40	1,00	0,75
36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,60	5,10	3,50	2,50	1,80	1,30	1,00

Примечание. Трубопровод, составленный из 3 *м* 10-дюймовой и 15 *м* 12-дюймовой труб, соединенный вытяжной трубой в 14", эквивалентен (6,4-3) + (2,2-15) = 49 *м* трубы в 14", соединенной с вытяжной трубой в 14".

8. ГАЗОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ГАЗОВЫЕ ПЛИТЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПИЩИ

Устройства и принадлежности. *Выводные отверстия.* Духовку газовой плиты для удаления кухонного запаха рекомендуется оборудовать выводными отверстиями. Для этого применять:

1) для одной духовки — минимум 4-дюймовый дымоход;

2) для плиты с двумя духовками — минимум 5-дюймовый дымоход;

3) для плиты с горелкой для сжигания мусора — минимум 6-дюймовый дымоход.

Газопроводная сеть. Подающая труба должна быть одинакового диаметра с коллектором плиты и должна отводиться к счетчику, имея диаметр, соответствующий высчитанному в разделе о домовых газопроводах.

Ниже дается характеристика горелок средней газовой плиты.

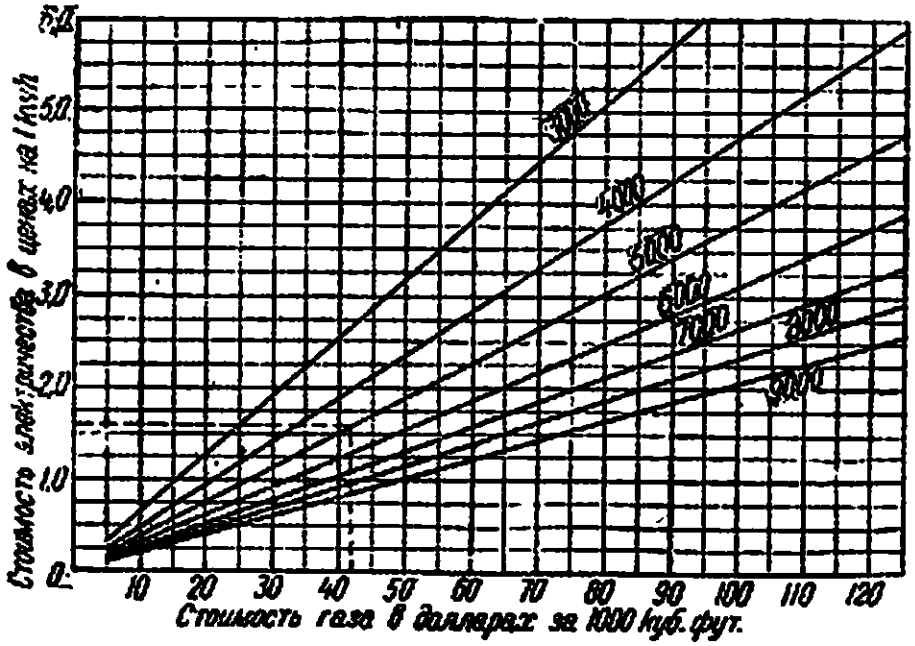
Тип горелки	Приход тепла
Горелка малого огня	454 *Кал/час*
Нормальная верхняя горелка . . .	2 268 "
Большая горелка	3 024 "
Горелка духовки	71 120 *Кал/час* на 1 $м^3$ объема духовки
" для жаркини	4,7 *Кал/час* на 1 $см^2$ обжариваемой поверхности

Сравнительная стоимость газа и электричества. При приготовлении пищи было проделано много экспериментов на различных видах топлива, причем испытания эти производились и в Америке и в других странах — в университетских лабораториях, лабораториях средних учебных заведений, частных

Таблица 154

Требования, предъявляемые к некоторым общепринятым газовым установкам [1]

Установки	*Кал/час*
Домашняя газовая плита—4 горелки	15 750
» » » 6 горелок с лобавочной духовкой	27 090
Домашний нагреватель воды с циркуляцией	6 300 — 9 450
Домашняя подогревательная плитка или печь для прачечной, на горелку	3 150
Газовый паровой радиатор, на секцию	504
Домашний комнатный нагреватель—радиантные нагреватели, на радиант	3 500 — 5 300
Домашний комнатный нагреватель—светящееся пламя, на горелку	315
Осветительная арматура на точку	1 260
Автоматические нагреватели воды непрерывного действия:	
15 *л/мин*	37 800
23 »	56 700
30 »	75 600



Фиг. 152. Сравнительные тарифы на газ и электричество для одинаковых стоимостей приготовления пищи.

Примечания. 1. Цифры у линий означают теплотворную способность газа в *Кал/м³*.

2. Пунктирные линии определяют соотношения тарифов на электричество и на газ.

лабораториях, а также в условиях бытового обслуживания [2]. Конечно, установить точно какое-либо определенное соотношение между газом и электричеством было невозможно, так как цены на эти источники энергии колеблются в весьма

[1] Требования, предъявляемые к домашним трубопроводам и газовым устройствам.—Американская газовая ассоциация (A.G.A.), 1931.

[2] Сводку результатов этих испытаний см. A. G. A., Testing Laboratory, Bull. 4 (исследования домашнего приготовления пищи и водяного отопления газом и электричеством).

широких пределах. Однако, если взять среднюю плату 0,0352 долл. за 1 kWh за электричество для приготовления пищи (цифра из годичного обозрения Национальной ассоциации по электрическому освещению — National Electric Light Association — за 1930 г.) и среднюю плату 0,0403 долл. за 1 $м^3$ искусственного газа (цифра, сообщенная отделом статистики A. G. A.), то найдем, что во всех разнообразных исследованиях, проделанных в Америке по этому вопросу за время 1917—1931 гг., среднее соотношение стоимости электричества к стоимости газа равняется 2,17. Средняя плата за естественный газ со средней теплотворной способностью 9272 *Кал/м*³ в 25 городах 15 штатов Америки была 0,025 долл. за 1 $м^3$. Таким образом, с этой точки зрения электричество не может выдержать конкуренции с газом при применении для приготовления пищи. Электричество может выдержать конкуренцию только в том случае, если искусственный газ продается по весьма высокой цене, а стоимость электрической энергии очень низка.

Кроме более низкой стоимости энергии, газовое оборудование имеет и другие вполне определенные преимущества, а именно:

1) меньшие капиталовложения, чем на какое-либо другое аналогичное оборудование;

2) более низкие расходы на текущий ремонт;

3) возможность более быстрого приготовления пищи;

4) более широкая и более точная регулировка при работе с верхними горелками плиты.

В настоящее время имеются газовые плиты с такими же изолированными духовками и таким же автоматическим контролем температуры, как и в лучших электрических плитах; по желанию можно получить и газовые плиты с верхними горелками такой конструкции, что воздух в кухне совершенно не будет портиться. Жалобы на то, что от газа коптятся стены и потолок, неосновательны, так как загрязнения вызываются жирами приготовляемой пищи, а не газом; поэтому при одинаковой температуре при жарении и аналогичных операциях загрязнения от жира все равно будут происходить независимо от источника тепла.

ГАЗОВЫЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ

В жилых домах применяются водонагреватели трех типов:

1) резервуарный водонагреватель;

2) автоматический водонагреватель непрерывного действия и

3) автоматический нагреватель водохранилища.

Там, где расходуется мало горячей воды или где она расходуется с большими промежутками, можно применять резервуарный нагреватель воды. Но для жилых домов или там, где горячая вода требуется в больших количествах и часто, следует применять либо автоматические нагреватели непрерывного действия, либо автоматические нагреватели водохранилищ. Нагреватели двух последних типов работают очень хорошо при условии если они имеют достаточную пропускную способность для удовлетворения всех требований на горячую воду.

Нагреватель непрерывного действия лучше всего подходит тогда, когда спрос на горячую воду периодический, но с большими нагрузками. Для бесперебойной работы такого нагревателя весьма важен хороший водяной напор.

Нагреватель водохранилища пригоден лучше всего при однообразной нагрузке.

Резервуарные нагреватели воды. Нагреватель этого типа можно подразделить на две группы: с медным змеевиком и без змеевика. Установка состоит из нагревателя воды и котла кухонной плиты.

Резервуарные нагреватели следует устанавливать только на открытом месте, как можно ближе к резервуару, с которым они соединены. Дно нагревателя никогда не следует устанавливать выше дна резервуара.

Автоматические нагреватели воды непрерывного действия. Эти нагреватели всегда снабжены медными змеевиками и работают без водохранилища. Нагрев воды происходит только тогда, когда газовый вентиль открыт, что выполняется поворотом регулирующего крана для горячей воды. Нагреватель этого типа экономнее резервуарного, потому что газ в первом случае расходуется только тогда, когда есть спрос на горячую воду. Когда нужна горячая вода, она имеется немедленно и в желательном количестве. В тех местностях, где вода подается из магистралей очень холодной, можно добиться еще большей экономии в расходовании газа путем установки промежуточного резервуара, в котором воде дают

дойти до комнатной температуры и только после этого пропускают ее через нагреватель.

При работе автоматический нагреватель непрерывного действия расходует газ с весьма большой скоростью, так что требуются дымоходы или выходные отверстия большего диаметра, чем для нагревателей воды других типов.

В этой установке должен применяться хороший вытяжной колпак; кроме того, следует провести от счетчика отдельную линию для подачи газа к нагревателю с пропускной способностью, достаточной для удовлетворения спроса.

Выбор нагревателя. Автоматические нагреватели конструируются для нагрева 7,5; 9,5; 11,5; 15; 23 и 30 *л/мин*, когда вода нагревается до 15° С, и для пропорционально меньших количеств — при нагреве выше указанной температуры. В табл. 155 показана пропускная способность нагревателей воды при различных повышениях температуры.

Таблица 155

Пропускная способность нагревателя непрерывного действия в *л/мин* при повышении температуры от 15,5 до 49° С

15,5°	26,6°	37,7°	49,0°
11,3	8,7	6,8	5,7
15,1	11,3	9,1	7,5
22,6	17,0	13,6	11,3
30,2	22,7	18,1	15,1

Температура холодной воды, входящей в нагреватель, имеет определенную зависимость от пропускной способности нагревателя. Автоматический нагреватель обычно регулируется для подачи горячей воды при температуре 60° С; таким образом, температура воды, входящей при 15,5°, должна повыситься на 44,5°. Из табл. 155 видно, что нагреватель с пропускной способностью 11,5 *л/мин* дает только 8,7 *л* при повышении температуры на 44,5°.

Количество точек потребления зависит от пропускной способности нагревателя. В табл. 156 указано количество кранов, которые можно применять одновременно и которые будут иметь надлежащую подачу воды из нагревателя любого размера.

Таблица 156

Количество кранов, которые можно применять одновременно от нагревателей непрерывного действия

Нагреватель №	Примерный спрос на газ в м³/час		Количество кранов, применяемых одновременно	Количество кранов, которое можно безопасно присоединить к одному нагревателю
	искусственный	естественный		
3	5,09	2,74	1,5	6
4	6,79	3,67	2	8
6	10,18	5,51	3	12
8	13,58	7,07	4	16

Ввиду того что одновременный спрос не бывает обычно больше 25% общей пропускной способности кранов, допускается устанавливать нагреватель, дающий 25% от общего спроса в минуту. Однако следует также принимать во внимание спрос семьи на горячую воду: четыре ванны утром или вечером потребуют горячей воды на 75% больше, чем две ванны утром или вечером.

Расположение нагревателей. Нагреватель этого типа должен быть установлен как можно ближе к арматуре для потребления воды; при этом следует принимать

во внимание и условия прокладки дымоходов. Однако укоротить соединение дымохода важнее, чем считаться с удобствами при прокладке газопроводов и водопроводов. Если длина трубы до дымохода большая, то горячие газы, нужные для достижения правильной тяги, будут охлаждаться по пути, и поток газа пойдет медленнее, часто забивая дымоход и соединение, а в случае отсутствия вытяжного колпака будет вызывать выпадение сажи в горелках и змеевиках и понижать коэфициент полезного действия прибора.

После определения местоположения нагревателя по отношению к дымоходу или выходному отверстию следует выяснить его местоположение по отношению к применяемой арматуре. Задача заключается в том, чтобы уменьшить время от момента открытия регулирующего крана до момента, когда горячая вода дойдет до арматуры, а также снизить тепловые потери от радиации, которая прямо пропорциональна длине трубы и количеству подач воды.

Горячую воду желательно всегда подавать непосредственно из нагревателя в кухню или к раковине буфетной, потому что вода в этих точках нужна чаще всего; кроме того, здесь требуется быстрая подача воды. Это дает также экономию в эксплоатационных расходах.

Автоматические нагреватели с запасом воды. Можно указать три следующие системы:

1. Системы в собранном виде, включающие изолированный резервуар (обычно вертикальный) и термостат, собранные на заводе и готовые к установке на место. Метод нагрева может заключаться либо в применении нагревателя с циркуляцией, присоединенного к резервуару, либо в помещении нагревательного элемента внутри резервуара.

Эти системы можно отправлять либо полностью в собранном, либо в разобранном виде.

2. Смонтированные системы с прямой циркуляцией, состоящие из резервуара (вертикального или горизонтального), термостата и отдельного нагревателя. Эти нагреватели бывают, начиная от небольшого резервуара с медным змеевиком и кончая большими чугунными котлами.

3. Смонтированные системы, состоящие из горизонтального резервуара с помещенными в нем паровыми змеевиками, парового котла низкого давления и термостата. Контроль температуры можно установить непосредственно по линии подачи газа или же по линии подачи пара от парового котла к змеевику внутри резервуара. При последнем методе контроля давление пара автоматически поддерживается регулятором давления пара по линии подачи газа.

Выбор типа нагревателя. Сравнение нагревателя непрерывного действия и нагревателя с запасом воды уже было сделано выше. Между типами нагревателей водохранилища нельзя провести резкую демаркационную линию. Для больших домов приходиться делать выбор между многозмеевиковым нагревателем и чугунным котлом. В прямых системах следует применять нагреватель многозмеевикового типа; паровой же котел может испортить цвет воды. Нагреватель многозмеевикового типа рекомендуется там, где спрос на воду периодический, но с большими нагрузками. Во всех тех случаях, когда спрос на горячую воду очень велик, лучшим методом нагрева воды будет применение системы с чугунным котлом.

Замечания, касающиеся всех систем с запасом воды. К нагревателям этого типа можно отнести все то, что было сказано о газовых нагревателях непрерывного действия, а именно: отношение местоположения нагревателя к точкам потребления и необходимость принимать во внимание длину выводной линии или дымохода.

Ради экономии следует избегать всюду, где это только возможно, применения циркуляционных линий.

В табл. 157 приводится максимальная длина трубы от резервуара до самого отдаленного крана, которую можно применять без установки циркуляционной линии.

Изоляция. Для систем с автоматическим нагревом запаса воды рекомендуется изолировать горячие поверхности. Собрано много данных по потерям тепла в трубах и резервуарах. Согласно разнообразным испытаниям потери тепла колеблются от 6 до 10 *Кал/м² час* при разности температуры, равной 1° С. Отсюда с очевидностью вытекает, что изоляция труб для горячей воды так же важна, как и изоляция самого резервуара.

Тепловые потери в трубах определяются их диаметром и длиной, а также условиями их применения. Ввиду периодического слива воды требуется, чтобы

Таблица 157

Размер трубы в дм.	Длина в м	Размер трубы в дм.	Длина в м
1/2	45	1	15
3/4	27	1 1/4	10

труба доводилась до определенной температуры всякий раз, когда открывается кран для горячей воды. Вследствие этого нужно изолировать распределительные трубы, когда вода выливается из них с более или менее частыми интервалами.

Поскольку известно, что неизолированная труба охладится от температуры 38° С до нормальной примерно через 50 мин., а при покрытии ее изоляцией, с к. п. д. 85% потребуется для ее охлаждения до нормальной температуры примерно 5 1/2 час., постольку очевидна необходимость изоляции и с экономической точки зрения.

Для обычного расчета можно надежно брать цифру потери тепла 10 *Кал/м² час* на 1°С разницы температуры.

В табл. 158 указана минимальная толщина покрытия, рекомендуемая для различных температур резервуара.

Таблица 158

Температура резервуара в °С	Толщина изоляции в дм.	Приблизительная экономия газа в месяц на 1 м² поверхности в *Кал*
50	1	126 692
60	1,5	186 312
70	2	238 480
80	3	298 100

Сравнение стоимости эксплоатации газовых и электрических водонагревателей. В бюллетене № 4 Исследовательской лаборатории Американской газовой ассоциации (A. G. A., Lesting Laboratory, Bulletin 4) дается исследование по вопросу об относительной стоимости приготовления пищи и нагрева воды газом и электричеством. В резюме этого бюллетеня, в части, касающейся нагрева воды, говорится следующее: „Основываясь на результатах работ Американской газовой ассоциации, можно сказать, что в среднем эксплоатация электрического водонагревателя обходится примерно на 60% дороже эксплоатации газового водонагревателя в том случае, когда применяется искусственный газ.

В тех же случаях, когда водонагреватель работает на естественном газе, стоимость эксплоатации электрического водонагревателя примерно в 5 раз выше стоимости эксплоатации газового (средняя стоимость искусственного газа принимается равной 4 цента за 1 м³, естественного — 2,5 цента за 1 м³, а электричества — 2 цента за 1 kWh)".

4. ОТОПЛЕНИЕ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ[1] ВОЗДУХА

ОТОПЛЕНИЕ ДОМОВ

Потери тепла. Требования, предъявляемые к отоплению зданий, заключаются в следующем:

а) Нагревать здание так, чтобы уравновесить теплопередачу через стены, потолок, пол и застекленные части здания. Такой нагрев зависит от типа и материала конструкции, а также от разности температуры между воздухом внутри здания и наружным.

б) Нагревать здание так, чтобы подогреть холодный воздух, входящий через застекленные части здания, камины, двери и т. д., а также воздух, специально вводимый для вентиляции.

[1] *Кондиционирование воздуха* — приготовление воздуха определенной температуры и влажности.

Температура и климат. В табл. 159 приведены обычные внутрикомнатные температуры для различных видов зданий.

Таблица 159

Здания	Температура внутри здания в °С
Бани	29
Фабрики	18—20
Литейные	10—15
Больницы	22—23
Больницы, операционные комнаты	29
Оранжереи	15—24
Конторы	21
Общественные здания	20—22
Квартиры	21
Школы	21

При определении расчетной наружной температуры в холодном климате принято брать температуру на 5—6° С выше самой низкой температуры, зарегистрированной за 10 лет в том округе, в котором находится здание. В мягком климате следует брать самую низкую фактическую температуру. Разность между этой наружной и запроектированной температурой внутри здания дает величину повышения температуры, которую должна обеспечить система отопления.

Просачивание. Количество смен воздуха в комнате вследствие просачивания воздуха изменяется в зависимости от ветра, степени защищенности от непогоды и типа конструкции.

В табл. 160 указано среднее количество смен воздуха, изменяющееся в зависимости от степени защищенности помещения от непогоды в постройках обычного типа.

Таблица 160

Число смен воздуха в час, исключая вентиляцию

Комнаты, не защищенные с одной стороны	1
„ „ „ двух сторон	1½
„ „ „ трех „	2
„ „ „ четырех сторон	2
Передние	2—3
Приемные	2
Жилые комнаты	1—2
Столовые	1—2
Ванные комнаты	2
Аптекарские магазины	2—3
Магазины канцелярских принадлежностей	2—3
„ готового платья	1½
Фабрики	0—2
В нижних этажах, где вообще должен происходить больший обмен воздуха	2—3
Верхние этажи (меньше, чем в нижних)	1—2

Для быстрого расчета можно принять, что 1 *Кал* повысит 3,45 $м^3$ воздуха на 1° С или, иначе говоря, потребуется 0,29 *Кал* на 1 $м^3$ воздуха.

В табл. 161 приведены величины потери тепла в Калориях на градус повышения температуры на 1 $м^2$ пространства в час для 1—4 смен воздуха в час.

Коэфициент теплопередачи. Тепло, вырабатываемое системой отопления, рассеивается путем проводимости через стены, конвекции от движения воздуха и радиации в окружающее пространство.

Коэфициенты теплопередачи для зданий различных типов определены Американским обществом инженеров по теплотехнике и вентиляции (American Society

Таблица 161

Размер круглой магистральной трубы в дм.	Сечение подводящей трубы в кв. дм.	Размер плоского стояка в дм.	Размер заслонки в дм.	Площадь заслонки
7	38	$3^1/_2 \times 10$	6×10	42
8	50	$3^1/_2 \times 10$	8×10	57
9	63	$4^1/_2 \times 10$	9×12	76
10	78	$4^1/_2 \times 10$	9×12	76

of Heating and Ventilating Engineers). При хорошей конструкции здания достигается заметная экономия топлива, а изоляция этой конструкции дает в результате экономию топлива от 15 до 30% в зависимости от термической проводимости изоляции и способа ее применения. Всякая изоляция, примененная взамен обшивки, должна обладать структурной прочностью и иметь хорошие перевязки для штукатурки.

Подробные сведения по коэфициентам теплопередачи в постройках обычного типа имеются в ежегодном справочнике American Society of Heating and Ventilating Engineers Guide.

Расчет потери тепла. Отдельные стадии расчета потери тепла следующие:

1. Определить предполагаемую разность температур (см. табл. 159).

2. Измерить в натуре или по плану для каждой комнаты в отдельности площадь наружной стены, площадь стекол, пола и потолка в непосредственной близости к обогреваемому пространству, а также внутренние стены между необогреваемым пространством и пространством, подлежащим обогреву (обычно предполагается, что температура необогреваемых комнат представляет собой среднее между наружной и внутренней температурой).

3. Высчитать потери теплопередачи для каждой поверхности путем умножения коэфициента теплопередачи на площадь поверхности в кв. метрах и разность температур, определенную в п. 1.

4. Высчитать количество тепла, необходимого для подогрева проникающего холодного воздуха, умножив кубатуру помещения на соответствующий коэфициент (табл. 161).

Сумма потери тепла от теплопередачи и количества тепла, нужного для подогрева холодного воздуха, даст общую потерю тепла в здании. Эта цифра общей потери тепла указывает на количество тепла, необходимого для поддержания температуры внутри здания при заданных условиях.

Другие факторы. Для пуска в ход нагревательной установки и дальнейшего повышения температуры воздуха в здании необходима дополнительная производительность нагревательной установки. В том случае, когда комнаты должны обогреваться только днем, следует добавлять примерно 10%, а когда обогрев производится с большими перерывами, добавляется 25%. Если имеет место очень большая скорость ветра (данные коэфициенты рассчитаны на ветер скоростью 24 *км*/час), то для ее компенсации следует добавить от 5 до 30%. Если в комнатах необычно высокие потолки, то обиходная температура будет ниже предположенной температуры. При паровом или водяном отоплении добавление от 10 до 15% поверхности нагрева дает радиацию, достаточную для поддержания предположенной обиходной температуры.

Расчет расхода газа, исходя из градусо-дней. При расчете количества газа, который будет израсходован в отапливаемой газом нагревательной установке, или при проверке расхода его в уже работающей установке одним из основных факторов, который следует принимать во внимание, являются продолжительность и интенсивность отопительного сезона. Этот коэфициент обычно и легче всего выражается в единицах, носящих название градусо-дней. На основании данных, собранных на многих работающих установках, а также путем различных экспериментов доказано, что расход газа для отопления начинается при средней месячной температуре в 18° С. Далее доказано, что расход газа пропорционален падению температуры ниже 18° С; другими словами, при средней температуре 8° С (на 10° ниже 18° С) будет израсходовано газа вдвое больше, чем при температуре 13° С (на 5° ниже 18° С). Таким образом, 18° С берется как отправная точка

для измерения градусо-дней в месяц или в какой-либо другой промежуток времени.

Градусо-днем можно назвать такой день, средняя температура которого на 1° ниже 18° С, т. е. 17° С. Таким образом, если в течение месяца средняя дневная температура равняется 17° С, то считается, что в этом месяце 30 градусо-дней. Следовательно, подводя итог градусо-дням всего отопительного сезона, мы получим общее количество всех градусо-дней за весь отопительный сезон.

Сводки бюро погоды дают ценный материал для установления градусо-дней в различных городах и местностях, причем количество таких дней колеблется в широких пределах.

Изучение градусо-дней из месяца в месяц приводит к интересным выводам. Так например, в Сан-Франциско в течение месяца с максимальной нагрузкой расходуется только 13% годового потребления, и, что еще более необычно, подача тепла требуется в течение всех двенадцати месяцев. Равным образом и в Сиэтле некоторое количество тепла требуется каждый месяц.

По справочнику Американского общества инженеров-теплотехников и специалистов по вентиляции (1931) (A. S. H. & V. E. Guide) приведенные ниже уравнения выведены как средние на основании записей рабочих журналов многих газовых котельных установок с термостатической регулировкой температуры при минимальной ночной температуре.

Для пара:

$$G = \frac{537\,RD}{H},$$

для воды:

$$G = \frac{312\,RD}{H},$$

где G — количество куб. метров газа на отопительный сезон;
R — количество кв. метров прямой радиации чугуна (по расчету);
D — градусо-дни за отопительный сезон;
H — количество *Кал/м*³ газа.

Из уравнения видно, что в нем дается рассчитанное теоретическое количество радиации. Под этим понятием разумеется фактическое количество требуемой радиации, определенное по общепринятым методам тепловых расчетов. Усиленная радиация не отразится особенно сильно на расходе газа, а недостаточная радиация приведет только к невозможности обогрева в очень холодную погоду. Количество газа, израсходованного на отопление жилого помещения в течение данного отопительного сезона, может определенно отклониться от количества, высчитанного на основании вышеуказанного метода, но отклонение это будет почти прямо пропорционально разности между фактическим количеством градусо-дней за данный отопительный сезон и средним количеством градусо-дней.

Расчет расхода газа в печах для нагревания воздуха. Когда известна общая площадь сечения подводящих труб, то расход газа в этих печах можно быстро подсчитать, умножив сечение подводящей трубы в кв. сантиметрах на постоянную величину из фиг. 153. Диаграмма дает удовлетворительно точные результаты, когда в году больше 3000 градусо-дней и расчетная предельная температура не выше —7° С.

Проектирование системы для нагрева воздуха. При проектировании нагревательных систем для получения теплого воздуха необходимы следующие расчеты:

1) потерь тепла в каждой комнате здания;
2) диаметра магистральных или подвальных труб;
3) сечения вертикальных труб (стояков) или вытяжных труб в стене;
4) сечения заслонов;
5) сечения труб, подающих воздух, и решеток;
6) размера печи.

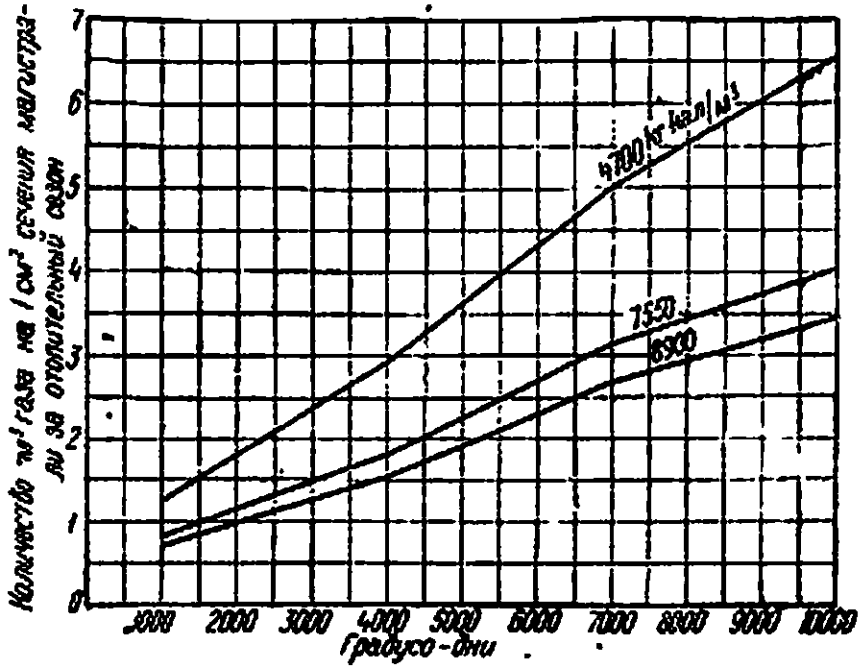
Расчет магистральных труб. Приведенные ниже формулы составлены для расчета магистральных труб в предположении, что температура воздуха у заслонки равна 80° С. Теплоотдача магистральных труб при этой температуре обычно принимается равной 4,32; 6,48 и 7,82 *Кал/см*² сечения трубы для магистральных труб первого, второго и третьего этажей.

Если H — общее количество тепла, подлежащего подаче в какую-либо комнату, то

сечение магистральных труб первого этажа равно $\frac{H}{4{,}32}$ см²;

» » » второго » » $\frac{H}{6{,}48}$ см²;

» » третьего » » $\frac{H}{7{,}82}$ см².



Фиг. 153. Зависимость градусо-дней от количества газа (в $м^3$), требуемого для печей в целях получения теплого воздуха.

Ни одна магистральная труба не должна быть меньше 8″ в диаметре. Для достижения хороших результатов магистральные трубы должны изолироваться асбестом. Если трубы не изолированы, добавляется 30% на тепловые потери. Если не применяется система рециркуляции и снаружи здания проходит холодный воздух, то, прежде чем приступать к расчету сечения магистральной трубы, следует добавить 20% на тепловые потери. Если магистральная труба длиннее 3,6 м и имеет значительные изгибы, следует взять следующий по величине размер.

Расчет размера печи. Рассчитав общую потерю тепла, выбирают печь с пропускной способностью, соответствующей требованиям Американской газовой ассоциации или превышающей эти требования. Пропускная способность печи указывается на заводских паспортах газового оборудования, одобренного Американской газовой ассоциацией.

Переходные фитинги. Переход к вытяжным трубам или крышкам заслонок должен делаться путем правильно сконструированных колен или кожухов с фланцем в месте прохода трубы сквозь крышку.

Все фитинги и соединения первого этажа должны иметь свободное сечение, равное сечению подводящих труб.

Размер стенных вытяжных труб или вертикальных труб (стояков). Для комнат первого этажа их сечение одинаково с сечением магистральных труб; для комнат второго и третьего этажей оно должно быть не меньше 70% сечения магистральных труб.

Вытяжные или вертикальные трубы должны изолироваться асбестом для предохранения деревянных частей стены, причем со всех сторон следует оставлять зазор минимум 8 *мм*. Двойная стенная труба или труба, покрытая асбестом, уменьшает тепловые потери.

Следует избегать перехода вертикальной трубы (стояка) в горизонтальную под вторым этажом; когда же это необходимо, то поперечное сечение горизонтальной трубы должно быть на 40% больше поперечного сечения вертикальной. Следует избегать прямых углов и давать максимально возможный уклон.

Весьма небольшое количество перегородок делает возможным сечение стенного канала свыше $3^1/_2$"; при необходимости большего сечения следует применять два канала и две заслонки, если только стойки в перегородке можно сделать размером 50 × 150 *мм*.

В табл. 161 даются размеры заслонок вытяжной трубы для магистральных труб разных размеров. На практике лучше всего применять более широкие стойки, а вытяжную трубу сделать максимально широкой, насколько это будет возможно в зависимости от стоек перегородки.

В тех случаях, когда требуется больше тепла, обычно нужно брать две магистральных трубы.

Заслонки. Заслонки следует устанавливать во внутренних стенах дома или рядом с ними и как можно ближе к печи.

Заслонки рассчитываются заводами на 60—80% свободного сечения. Под свободным сечением разумеется фактическое сечение прохода через заслонку. Заслонки с выступающим плинтусом в случае их применения для выходов теплого воздуха на первом этаже делают возможным применение коробки заслонки с таким же сечением прохода, как и сечение магистральной трубы. Имеются специально сконструированные заслонки, гармонирующие с общим архитектурным оформлением комнаты.

Каналы для подачи воздуха и его возвращения. Печь должна непрерывно снабжаться соответствующим количеством воздуха независимо от того, применяется ли рециркуляционная или нерециркуляционная система.

Недостаточная подача воздуха значительно уменьшает полезное действие системы нагрева.

Имеются три типа подводов холодного воздуха: внутренние, наружные и комбинированные (внутренние и наружные).

Для жилых помещений в холодном климате рекомендуется внутренняя или рециркуляционная система холодного воздуха. Всеми признано, что приток наружного воздуха не нужен (в рециркуляционной системе), потому что свежий воздух в количестве, достаточном для снабжения лиц, живущих в помещении, входит через дверные и оконные щели, всасывается через стены и попадает в помещение при открывании и закрывании дверей.

Если воздух идет обратно из вестибюля, а не из отдельных комнат, то лучше всего брать для решеток поверхностью свыше 0,25 $м^2$ два канала для возврата воздуха. В табл. 162 показаны два типа деревянных решеток: одна с 55%, а другая с 75% свободного сечения. Относительные размеры выбранной решетки будут зависеть от устройства балок и имеющегося пространства.

Сечение канала для возврата воздуха равняется по меньшей мере сечению всех нагревательных труб, присоединенных к печи.

Следует избегать прямых углов от квадратных сечений к круглым, и наоборот; когда такого соединения избежать нельзя, то потеря полезного действия сечения должна компенсироваться путем увеличения размеров трубы и применения переходного фитинга.

Все сказанное выше применяется к системе самотека с естественной циркуляцией.

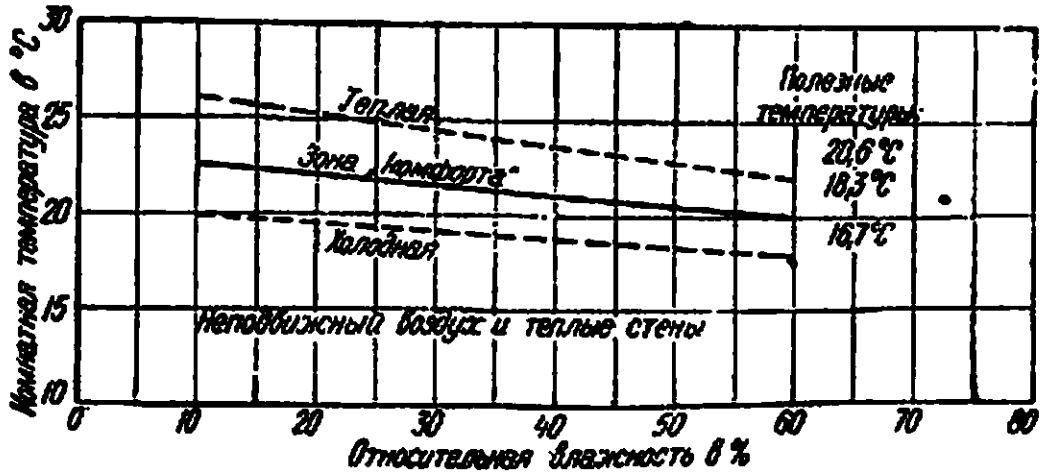
Если в установке представляется необходимым применение длинных каналов или если нужно подавать тепло в комнаты на одинаковом уровне с печью, то в системе возврата воздуха следует установить вентилятор с целью форсировать циркуляцию.

На практике предполагается, что каждый куб. метр нагретого воздуха имеет примерно 9 *Кал*. Следовательно, вентилятор должен иметь производительность, достаточную для того, чтобы передавать такое количество куб. метров воздуха в час, которое будет содержать минимум 75% количества Калорий, подлежащих передаче в час. Вентилятор может работать независимо от печи или же может автоматически контролироваться термостатом, который управляет печью.

Таблица 162

Размер сечения присоединений для холодного воздуха и решеток для возврата воздуха

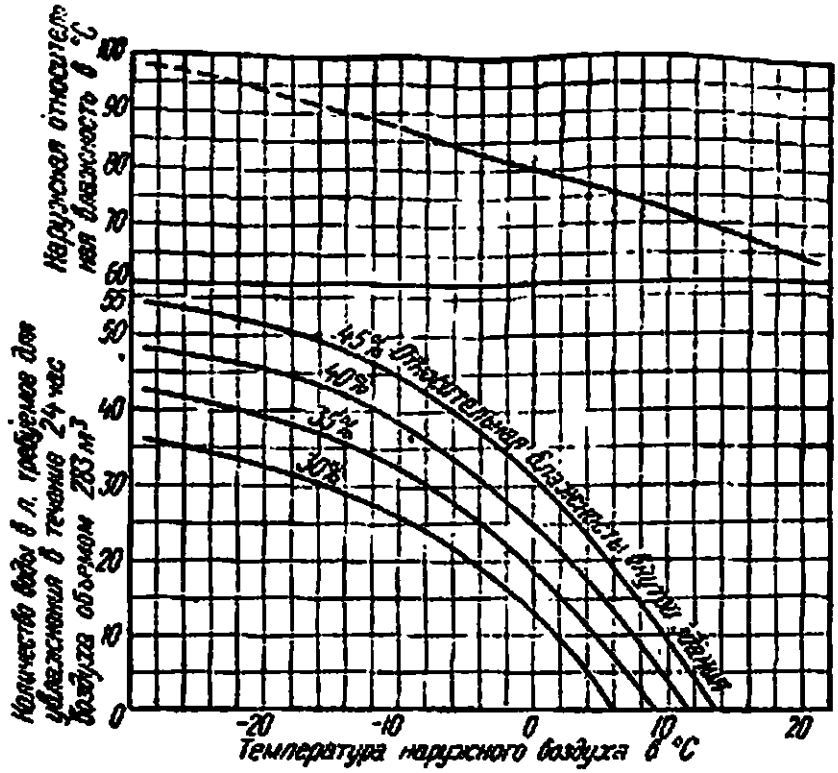
Требуемое свободное сечение в кв. дм.	Размер круглой трубы в дм.	Сечение круглой трубы в кв. дм.	Имеющиеся на рынке деревянные решетки следующих размеров			
			свободное сечение 55%		свободное сечение 75%	
			размеры в дм.	свободное сечение в кв. дм.	размеры в дм.	свободное сечение в кв. дм.
113 или меньше	12	113	10 × 22	116	12 × 24	216
			12 × 18	118		
114—154	14	154	10 × 28	154	12 × 24	216
			12 × 24	158		
			14 × 20	154		
155—201	16	201	12 × 30	201	12 × 24	216
			14 × 26	201		
			16 × 24	210		
			20 × 20	220		
202—254	18	254	16 × 30	265	12 × 30	270
			18 × 26	258	14 × 24	252
			20 × 24	265		
255—314	20	314	14 × 42	324	12 × 36	324
			16 × 36	318	14 × 30	315
			18 × 32	316	18 × 24	324
			20 × 30	330		
315—380	22	380	18 × 40	396	14 × 36	378
			20 × 36	396	16 × 30	360
			24 × 30	396	18 × 30	405
381—452	24	452	20 × 42	462	18 × 36	486
			24 × 36	476	20 × 30	450
			28 × 30	462	24 × 30	540



Фиг. 154. Диаграмма „комфорта".

Окружная скорость вентилятора не должна превышать 600 *м/мин*, для выполнения работы без шума вентилятор должен покоиться на соответствующем фундаменте.

На фиг. 154[1] показано отношение между комнатной температурой и относительной влажностью. Диаграмма эта основана на цифрах, опубликованных „Обществом инженеров-теплотехников и специалистов по вентиляции". На фиг. 155 указано количество литров требуемой воды.



Фиг. 155. Кривые для испарительной способности увлажнителей.

Кривые построены для комнатной температуры при 20,5° С и однократного обмена воздуха в час. Барометрическое давление 750 *мм* ртутного столба. Относительная влажность вне здания.

а — относительная влажность вне здания; *б* — вода, необходимая для увлажнения.

Классификация паровых и водяных систем центрального отопления

Классификация на основе трубопроводов. *Пар.* Меньше всего трубопроводов требуется для однотрубной паровой магистрали, уложенной в подвальном этаже; уложить такую магистраль легче всего. Поэтому для всех небольших инсталляций такая проводка является наиболее желательной.

Пар и конденсат проходят по одной и той же вертикальной трубе, причем конденсат возвращается в паровой котел в том же направлении, в каком пар идет по подвальной магистрали. Диаметр вертикальной трубы в этом случае должен быть больше, чем при употреблении отдельных вертикальных и отдельных обратных труб (фиг. 156).

Горячая вода. Однотрубная магистраль для горячей воды, уложенная в подвальном этаже, представляет собой так называемую параллельную систему: в этом случае требуются две вертикальных трубы (стояка) от магистрали к радиаторам, причем восходящая вертикальная труба имеет ответвления от верхней части, а циркуляционная — от нижней части той же магистрали. Работа этой системы основывается на том, что горячая вода протекает по верхней части магистрали, а более холодная вода, идущая обратно из радиаторов, течет по нижней части той же магистрали, причем эти два потока не смешиваются один

[1] Взято из Bull. 230 of the University of Illinois Engineering Experiment Station.

с другим. Для коротких трубопроводов такую систему нужно признать удовлетворительной.

Двухтрубная магистраль, уложенная в подвальном этаже, является стандартной для обеих систем — паровой и водяной; в паровой системе (на небольших установках) она не имеет преимуществ перед однотрубной магистралью, зато в водяных установках она гораздо лучше однотрубной. Как показывает самое название этой системы, в ней имеются отдельный комплект восходящих труб и отдельный комплект труб для обратного потока — и для магистралей и для радиаторов. В двухтрубных системах трубы всегда снабжены обратными клапанами (фиг. 156 и 157).

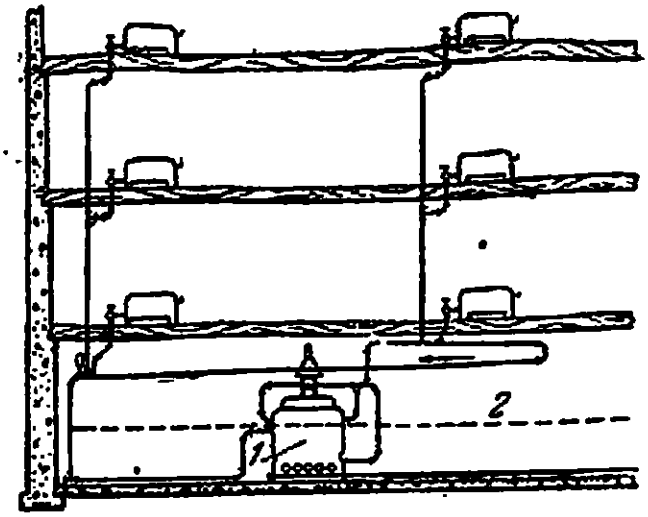
В системе с подачей воды сверху вниз, в которой подаваемая и возвращаемая обратно вода течет вниз из главной магистрали, проложенной над верхним этажом, одна большая вертикальная труба от парового котла питает главную магистраль, которая в свою очередь снабжает различные вертикальные трубы, по которым вода стекает вниз (фиг. 158).

Классификация на основе радиации. Обычным видом радиации является прямая радиация, причем радиаторы или устанавливаются открыто в подлежащих обогреву комнатах, или закрыты тем или иным способом. В этом случае вентиляция отсутствует.

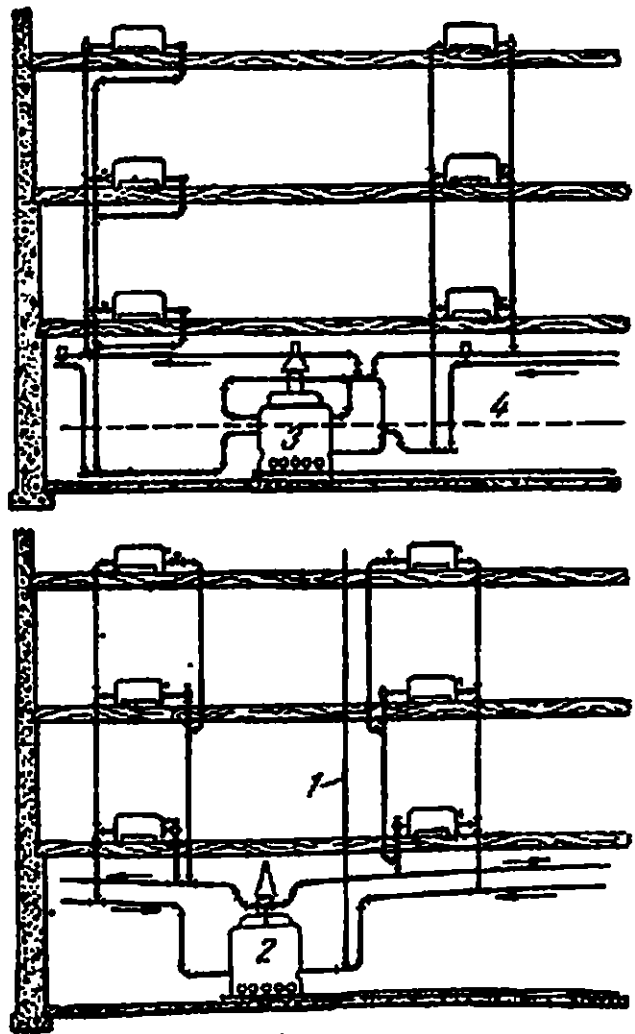
Подогрев входящего вентиляционного воздуха при радиации в соединении с вентиляционными каналами внутри стены происходит во время прохождения этого воздуха по каналу.

Косвенная радиация имеет место в вентиляционных каналах, причем теплый воздух отводится в комнаты либо путем собственной тяги, либо посредством воздуходувок. В нагнетательной системе вся система радиации помещается в одной камере в подвальном этаже, и теплый воздух проталкивается воздуходувками по каналам в различные комнаты

При применении в больших установках система косвенной радиации имеет целый ряд пре-



Фиг. 156. Однотрубная паровая система. Магистрали в подвальном этаже.
1 — паровой котел; *2* — уровень воды.



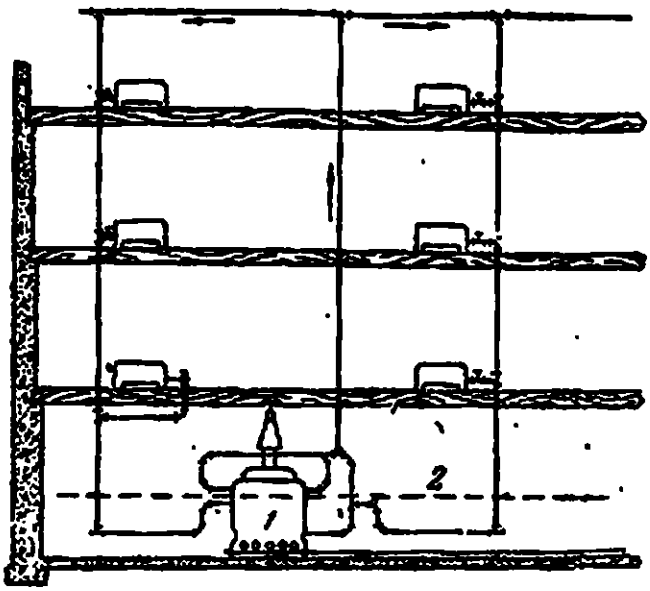
Фиг. 157. Двухтрубная система: *а* — паровая; *б* — водяная. Магистраль в подвальном помещении.
1 — к расширительному резервуару; *2* — паровой котел; *3* — двухтрубная паровая система; *4* — уровень воды.

имуществ. Эти преимущества следующие: хорошая вентиляция, регулированная влажность, небольшая поверхность радиации и меньшее количество труб, легкая регулировка в связи с изменением наружной температуры и легко осуществляемое охлаждение водой или охлаждающим раствором в летнее время.

Расчеты в косвенных системах необходимо основывать непосредственно на количестве тепла, требуемом для обогрева здания, плюс то тепло, которое требуется для подогрева воздуха, подаваемого для вентиляции.

Нагрузка парового котла определяется путем расчета расхода пара и не должна исходить непосредственно из количества кв. метров поверхности радиации.

Классификация на основе циркуляции. *Система самотека* (естественной циркуляции). В системах пара низкого давления (до 1 *ат*) предпочтительнее применять давление 0,35 *ат* или меньше. Система эта оборудована предохранительными и дроссельными клапанами для предохранения котла от избыточного давления и в целях постоянной бесперебойной подачи пара.



Фиг. 158. Первая система Mills. Магистраль на чердаке.

1 — паровой котел; *2* — уровень воды.

В системах циркуляции горячей воды имеется открытый расширительный резервуар, находящийся в наивысшей точке системы и установленный с целью дать возможность свободного расширения воды. Максимальное давление в системе эквивалентно статическому напору воды от расширительного резервуара до котла, т. е. в обыкновенных жилых помещениях равняется 1—1,75 *ат*. Циркуляция создается конвекцией воды, причем возвращаемая холодная вода, будучи тяжелее горячей, вытесняет эту последнюю в подающую магистраль.

Видоизмененные системы самотека. К видоизмененным системам самотека относятся атмосферная, испарительная и вакуумная системы, которые конструируются для продуктивной работы и при полной и при частичной нагрузках. Это последнее условие невыполнимо при применении систем, работающих под давлением, или основных систем самотека. Существенные отличительные особенности видоизмененных систем самотека заключаются в следующем: пар получается при температуре 100° С или ниже; радиаторы оборудованы клапанами без набивки; в этих системах нет воздушных клапанов, и во всей системе повсюду поддерживается однообразная температура. Обычно применяются радиаторы двухтрубного водяного типа.

К системам этого типа относятся также водяные системы с циркуляцией воды под повышенным давлением при температурах выше возможных, при открытых резервуарах и повышенных скоростях.

Испарительная система этого типа позволяет уравновесить комнатную температуру во всем доме до пределов, каких не удается достигнуть в обычной системе пара низкого давления. Система центрального водяного отопления под давлением (ввиду ее большей производительности для данной поверхности радиации) применяется иногда как вспомогательное средство от недостаточной радиации.

Некоторые авторитеты рекомендуют применение систем, работающих под давлением, на всех установках с горячей водой, потому что более быстрая циркуляция, вызываемая повышенной температурой, позволяет устранить многие неполадки.

Комбинированные системы. В таких системах вместо обычных радиаторов применяются обогреваемые газом паровые радиаторы, что, с одной стороны,

обеспечивает возможность вспомогательного обогрева во время больших нагрузок, а с другой — дает возможность применять в теплую погоду такие радиаторы вместо эксплоатации всей установки.

Расчет радиаторов. Следующей стадией расчета после определения в здании (в комнате за комнатой) общей часовой потери тепла является определение потребного количества кв. метров радиаторов для каждой комнаты.

Излучение тепла при стандартной радиации пара в чугунной трубе составляет 650 *Кал/м²*.

Излучение тепла при стандартной радиации пара в чугунной трубе составляет 542 *Кал/м²*.

Излучение тепла при стандартной радиации горячей воды в чугунной трубе составляет 406 *Кал/м²*.

Отсюда получаем:

$$\frac{\text{Общая потеря тепла в комнатах}}{650} = м^2 \text{ прямой радиации пара в чугунной трубе (steam radiation).}$$

$$\frac{\text{Общая потеря тепла в комнатах}}{542} = м^2 \text{ в прямой радиации паров в чугунной трубе (vapor radiation).}$$

$$\frac{\text{Общая потеря тепла в комнатах}}{406} = м^2 \text{ прямой радиации горячей воды.}$$

Для определения точных цифр высоты, числа колонн и числа секций необходимо обращаться к каталогам заводов.

Правило Миллля для расчета радиации пара. Для приблизительного расчета радиаторов можно применить правило Миллля. Для систем пара низкого давления при наружной температуре —18° и внутренней 22° С это правило формулируется так:

$$\text{Паровые радиаторы в кв. метрах} = \frac{G}{2} + \frac{W}{20} + \frac{C}{5{,}7},$$

где G — поверхность застекления в $м^2$;

W — незащищенная поверхность стены нетто в $м^2$;

C — кубатура в $м^3$.

Правило это не годится, если застекленная поверхность превышает одну четвертую поверхности стены или если температуры отличаются от вышеприведенных. При повышении температуры на 20° результат следует умножить на 0,56.

Факторы, влияющие на теплопередачу радиаторов

1. Эксперименты, проведенные в университете в Иллинойсе, показывают, что паровые радиаторы с низкими колоннами нагревают комнаты лучше и экономнее радиаторов с высокими колоннами. Это объясняется более равномерным распределением тепла по всей комнате, от пола до потолка.

2. Если радиаторами пользуются в комнатах, где температура не равна 21° С, то количество переданного тепла будет колебаться примерно пропорционально разности между комнатной температурой и температурой пара. Таким образом, радиатор в комнате с температурой 10° С будет излучать 775 *Кал/м²*.

3. Результат окраски зависит главным образом от последнего слоя и более заметен в радиаторах с большой поверхностью радиации (например таких, как трубчатые змеевики или стенные радиаторы), а не в радиаторах, имеющих сравнительно небольшую поверхность радиации.

Процент полезного действия радиаторов

	%
Чугунные	100
Окрашенные черной матовой краской	100
» алюминиевой бронзой	80
» золотой бронзой	81
» белой эмалевой краской	101
» каштановой японской краской	100
» белой цинковой краской	101
» матовой зеленой эмалевой краской	96

4. Закрывание радиаторов футляром применяется на практике в таких широких размерах, что в настоящее время ощущается большая нужда в установлении определенных данных по нагревательной способности закрытых радиаторов.

Было замечено, что закрытые радиаторы могут иметь при меньшей конденсации более значительную теплоотдачу, чем радиаторы, установленные открыто. В результате этого закрывания действие радиации понижается, а действие конвекции увеличивается.

Для достижения наилучших результатов при конструировании футляров для радиаторов следует точно соблюдать некоторые определенные правила, важнейшие из которых следующие:

1. Футляр для радиаторов следует изолировать 1-дюймовым слоем окиси магния или асбеста и покрыть оловом или неразъедаемым листовым металлом со стороны радиатора.

2. Поверхность радиатора следует окрашивать матовой черной краской, японской каштановой, белой эмалированной или белой цинковой краской. Если радиатор закрыт целиком, его можно не красить.

3. Свободное сечение решетки или отверстия на выходе должно быть не меньше свободного сечения через секции радиатора.

4. Свободное сечение решетки или отверстия на входе должно быть не меньше 80% свободного сечения на выходе.

5. Если выходное отверстие расположено на лицевой стороне футляра так, что поток воздуха идет горизонтально, то свободное сечение выходного отверстия должно составлять минимум 150% свободного сечения около радиатора, а расстояние между верхом радиатора и перекрытием футляра для радиаторов должно быть не меньше его глубины.

6. Наилучшие результаты получаются при таком положении радиатора, при котором свободное пространство около радиатора ограничено. Как общее правило, производительность радиатора обратно пропорциональна глубине футляра.

Случай 1. При правильной конструкции закрытый радиатор на 10% эффективнее открытого.

Случай 2. При правильной конструкции закрытый радиатор эффективнее прямого радиатора на 5%.

Случай 3. Закрытый радиатор при условии правильной конструкции так же эффективен, как и прямой радиатор.

Случай 4. $E = 1/2\ A$; полезное действие менее на 10%.

Случай 4. $E = A$; полезное действие менее на 20%.

Случай 4. $E = 1\,1/2\ A$; полезное действие менее на 35%.

Случай 5. $E = A$; полезное действие менее на 30%.

Случай 6. Полезное действие менее на 5%.

Свободное сечение A должно быть больше свободного сечения около радиатора.

Свободное сечение B должно быть не меньше 80% свободного сечения около радиатора.

Свободное сечение C должно быть не меньше 150% свободного сечения около радиатора.

D должно быть не меньше A.

Производительность уменьшается прямо пропорционально величине расстояния E.

Данные эти относятся к случаям применения чугунных радиаторов (прямая радиация) с футлярами, и не применимы к другим типам закрытых радиаторов.

Выбор размера парового котла. Прежде чем приступить к выбору парового котла, следует определить общую величину радиации. При этом характеристика систем парового или водяного отопления с естественной циркуляцией делается обычно в пересчете на кв. метры радиации.

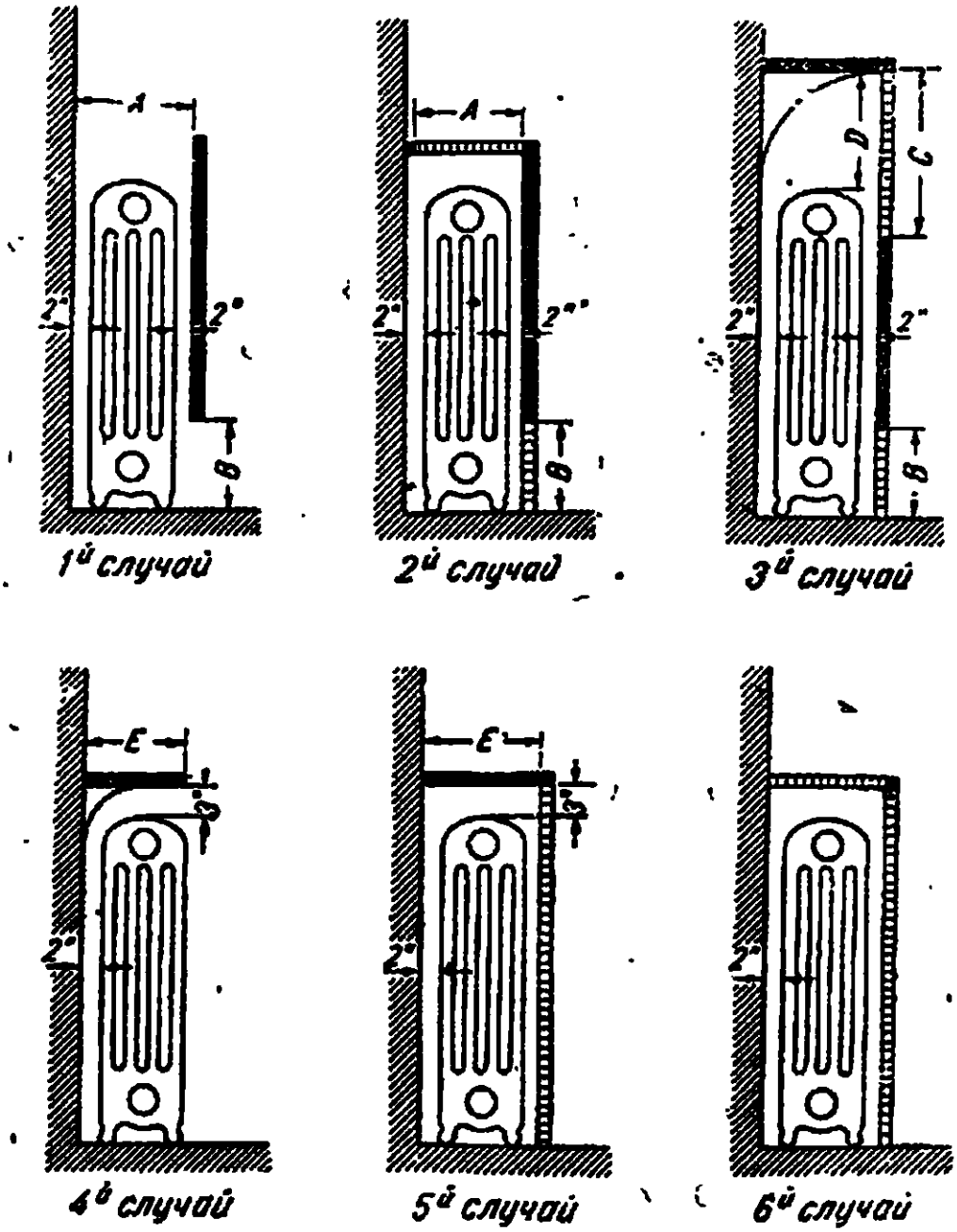
Паровой котел должен давать для каждой данной установки достаточное число Калорий в час с тем, чтобы обеспечить необходимое количество тепла сверх потерь в трубопроводах и тепла, нужного для пуска.

Очевидно, что только газовые паровые котлы можно точно рассчитать на отдачу тепла в Калориях. Эти данные, получаемые из кода Американской газовой ассоциации, устанавливают количество тепла, отдаваемого паровым котлом.

Наивысший рабочий коэфициент полезного действия газового парового котла получается в том случае, когда нормальная производительность котла почти совпадает с тепловыми требованиями здания.

В обычной практике необходимо предусмотреть следующее: при установке центрального отопления в таких больших помещениях, как галереи и школы, для уложенных трубопроводов следует добавлять еще 25% на радиацию стояков; для всех жилых помещений, включая квартирные дома, добавлять 40%.

К этим цифрам следует добавить еще 25% для пуска или для пиковых нагрузок при термостатической регулировке температуры.



Фиг. 159. Различные устройства радиаторов в футлярах.

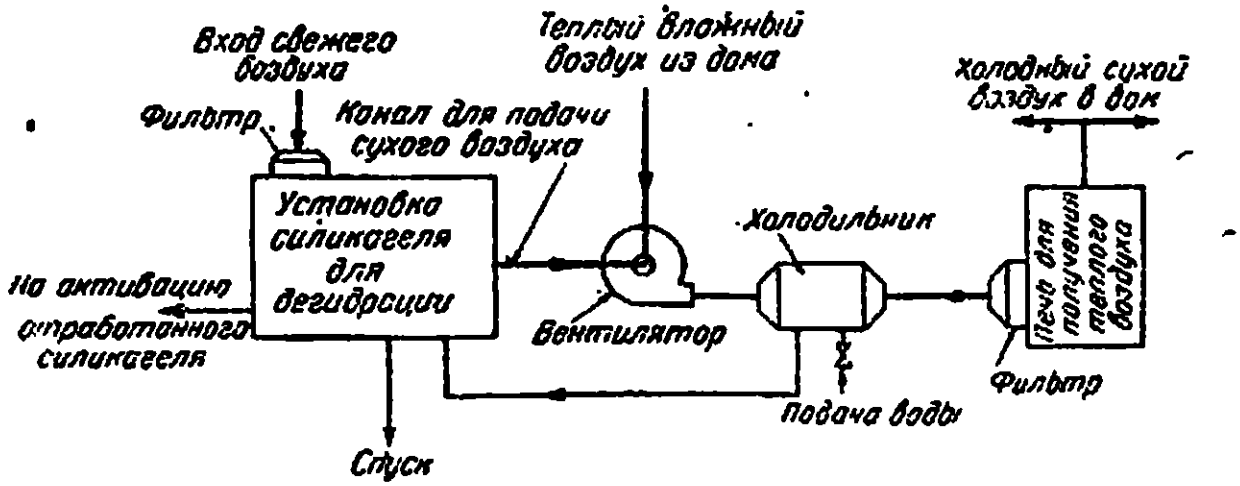
Обогреваемый газом паровой котел настолько чувствителен к регулировке температуры воды или температуры пара, что в большинстве случаев надбавка в 25% для пиковых нагрузок вполне достаточна для среднего непрерывного нагрева жилого помещения. В тех случаях, когда здание нагревается нерегулярно или периодически (при автоматической либо ручной регулировке) эта процентная надбавка увеличивается до 33⅓%.

КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА

Кондиционирование воздуха можно определить как приготовление воздуха, наиболее благоприятного для человека. Кондиционирование воздуха разделяется на два вида: кондиционирование зимнего воздуха и кондиционирование летнего воздуха. Комбинацию этих двух периодов можно назвать годовым кондиционированием. Факторы, составляющие это годовое кондиционирование, следующие: 1) нагрев, 2) увлажнение, 3) охлаждение, 4) осушка, 5) очистка и 6) циркуляция. С факторами 1 и 2 приходится иметь дело только зимой, а с факторами 3 и 4 — только летом; факторы же 5 и 6 относятся одинаково и к зимнему и к летнему кондиционированию.

Кондиционирование зимнего воздуха, характеризующееся автоматической циркуляцией нагретого, очищенного и увлажненного воздуха, получило широкое распространение. Проблема кондиционирования летнего воздуха характеризуется применением таких же циркуляционных каналов для распределения охлажденного и осушенного воздуха, как и при кондиционировании зимнего воздуха.

Исследования по кондиционированию летнего воздуха еще не доведены до конца, но они привели к разработке главным образом двух независимых и порознь регулируемых процессов, а именно: осушки и охлаждения.



Фиг. 160. Схема процесса установки для кондиционирования летнего воздуха силикагелем с печью для получения теплого воздуха.

Оказалось, что при правильной осушке можно добиться оптимальных результатов при весьма незначительном охлаждении. При настоящем положении вещей в этой области осушение достигается путем пропускания воздуха через адсорбционную установку с силикагелем (SiO_2), обладающим способностью поглощать водяные пары в количестве 40% от его веса без изменения объема. Обычно применяются две или больше адсорбционных установки, работающие периодически, т. е. одна из них поглощает водяные пары, а другая активируется путем обогрева газом для извлечения из нее влаги. Нормальный цикл работы — один час. В тех случаях, когда температура у водяного крана ниже 21° С, достаточное охлаждение достигается водой. Когда вода слишком теплая, можно применять охлаждение путем испарения.

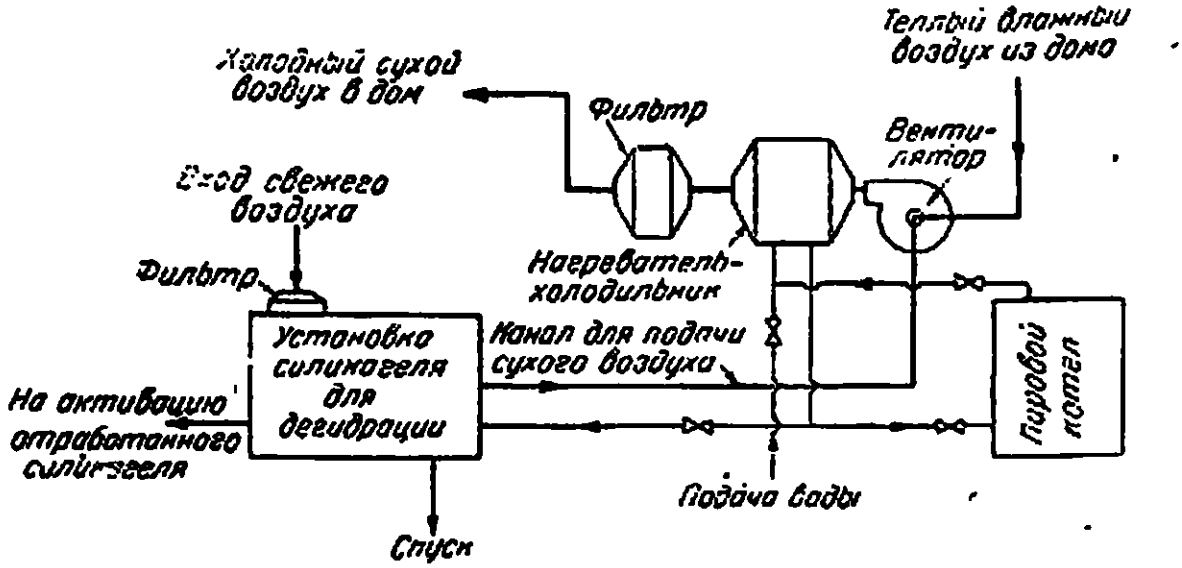
Воздух, проходящий через адсорберы, фактически сухой, и его можно смешивать теплым влажным воздухом, отводимым из дома по каналу для рециркуляции, до требуемой оптимальной температуры. На диаграммах (фиг. 160, 161 и 162) схематически изображены устройства для кондиционирования летнего воздуха трех различных типов.

Другой метод применения тепловой энергии для кондиционирования летнего воздуха осуществляется путем применения абсорбционного охлаждения газом. Применение этого метода на практике зависит от разработки газовых рефрижераторов такого размера, чтобы они могли обслужить большие установки кондиционирования воздуха.

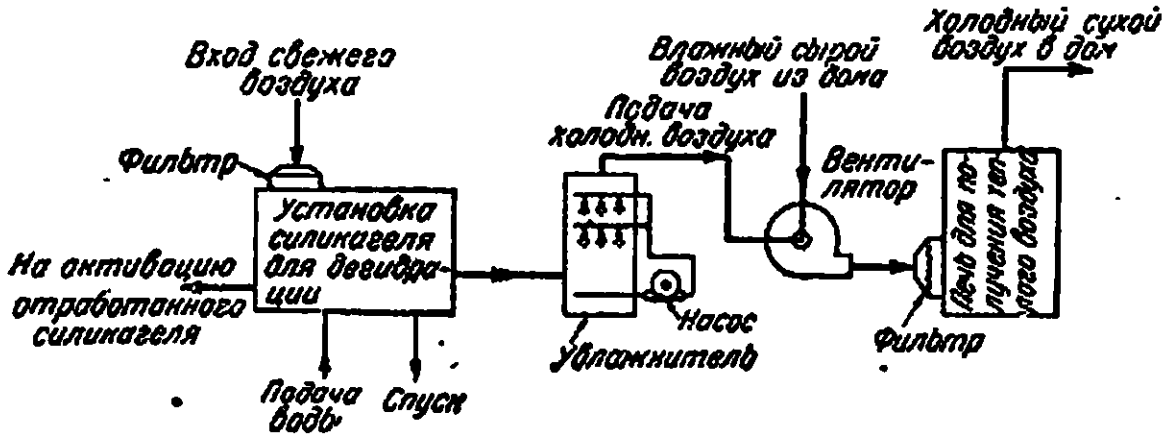
В настоящее время с этой целью проводится исследовательская работа по разработке нескольких типов газовых рефрижераторов, но эта работа не дошла

еще до такой стадии, когда можно было бы уже пытаться применять такие рефрижераторы на практике. По этому методу кондиционирования воздуха газовый рефрижератор понижает температуру воздуха по сухому и мокрому термометру так же, как это делается электрическими рефрижераторами систем, принятых в театрах и ресторанах.

Третий метод применения тепловой энергии газа для кондиционирования летнего воздуха заключается в использовании газа для получения пара в паровом котле; этот пар в свою очередь создает глубокий вакуум в закрытой цепи, содержащей воду. При таком вакууме вода кипит при весьма низкой темпера-



Фиг. 161. Схема процесса установки для кондиционирования летнего воздуха силикагелем с паровым котлом и нагревателем-холодильником для зимнего обогрева..



Фиг. 162. Схема процесса установки для кондиционирования летнего воздуха силикагелем, применяемая там, где имеется высокая температура воды.

туре. Холодную воду заставляют циркулировать посредством насоса по змеевикам. В пространство над этими змеевиками вдувается воздух, подлежащий кондиционированию.

Этот метод кондиционирования воздуха, возможно, увенчается успехом в складах и других промышленных помещениях, но сомнительно, сумеют ли разработать его в недалеком будущем настолько, чтобы он соответствовал требованиям, предъявляемым жилыми помещениями.

Вследствие быстрого прогресса в области кондиционирования воздуха здесь не дается подробного описания соответствующего оборудования. Интересующимся этим вопросом рекомендуется ознакомиться с последними докладами Американской газовой ассоциации.

Индивидуальные комнатные нагреватели

Комнатные нагреватели различных типов можно подразделить на радиаторы, камины, циркуляционные и рефлекторные нагреватели.

Поверхность нагрева парового радиатора излучает 650 *Кал/м² час*. В радиаторе без отвода продуктов сгорания добавочное тепло дается последними.

Нагреватель без отвода продуктов сгорания при правильной установке дает примерно 445 *Кал/час* на один источник тепла или примерно 910 *Кал/час* при двойном источнике тепла. Примерно 30% этой теплопередачи будет в виде лучистой энергии.

Если переносный радиатор установить в камине или дать ему какой-либо другой выход, то каждые 138 *Кал* прихода тепла в час будут равняться примерно 0,2 *м²* радиации чугуна.

Радиантные газовые нагреватели конструируются для работы с выходом и без выхода. При необходимости сделать выход из оборудования диаметр вытяжной трубы должен соответствовать количеству тепла нагревателя (указанному заводом), но ни в коем случае не быть меньше 3″.

Таблица 163

Количество тепла, отдаваемого нагревателем в час в *Кал* (заводские данные)	Минимальное внутреннее поперечное сечение выхода дымохода в кв. дм.	Минимальный диаметр трубы дымохода в дм.
10 000—17 600	7,2	4
17 600—27 700	11,5	5
27 700—40 000	16,9	6
40 000—63 000	23,2	7

Размеры труб для газа следует определять на основании отдаваемого тепла в Калориях по указанию завода.

5. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ЧЕРЕЗ СОПЛА И РАСЧЕТ ГОРЕЛКИ

ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ЧЕРЕЗ СОПЛА

Для определения пропускной способности сопла применяется следующая формула:

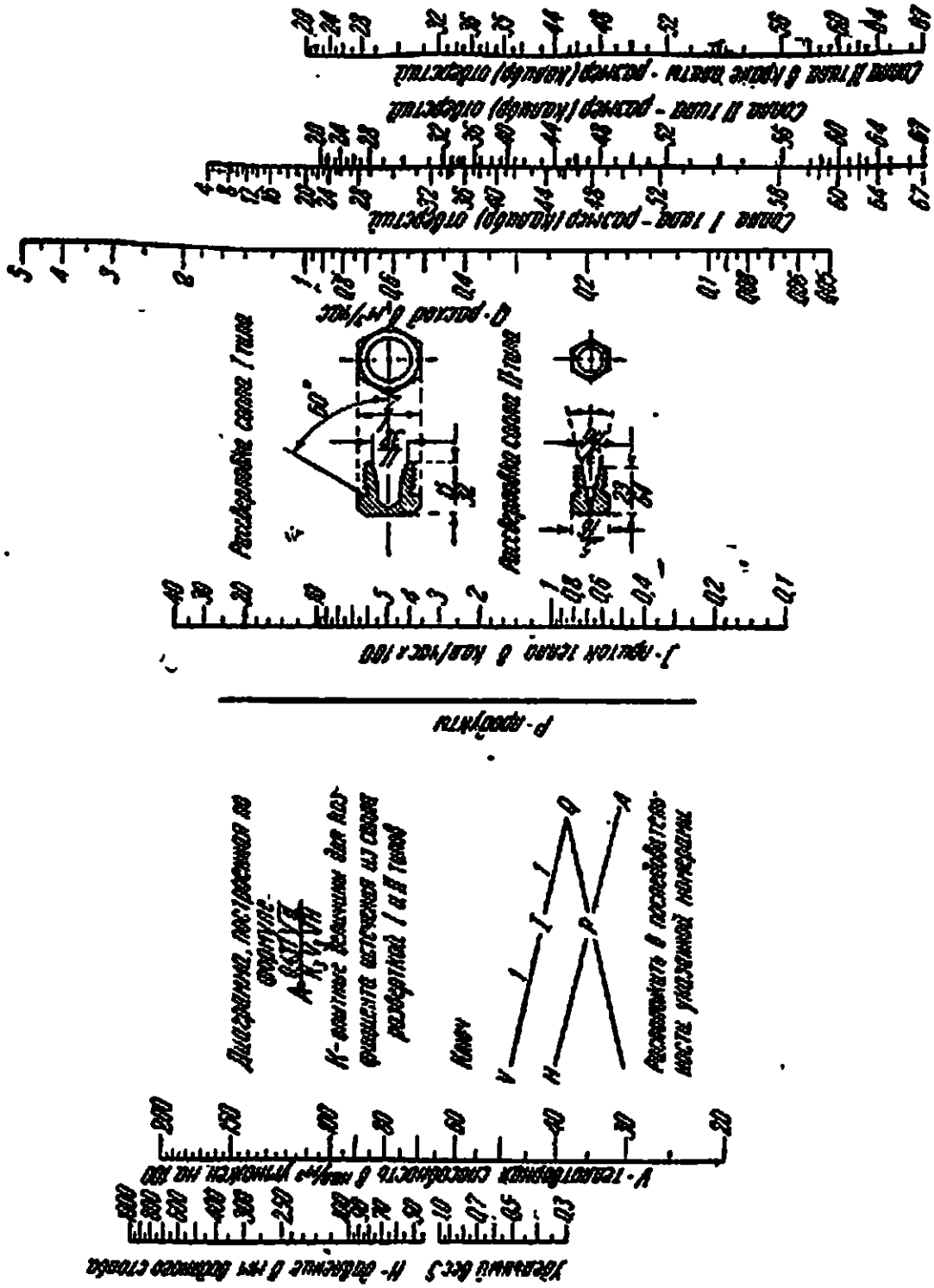
$$Q = 1{,}41\,AK\sqrt{\frac{H}{S}},$$

где Q — количество расходуемого газа в *м³/час*;
A — сечение сопла в *см²*;
K — коэфициент истечения сопла;
H — давление газа у сопла в *мм* водяного столба;
S — удельный вес газа (воздух равен единице).

Следует заметить, что скорость течения изменяется прямо пропорционально квадратному корню из давления и обратно пропорционально квадратному корню из удельного веса. Величина коэфициента истечения изменяется в зависимости от конструкции сопла и в весьма незначительной степени от удельного веса. Факторами конструкции сопла, влияющими на коэфициент, являются: угол конусности, форма конусности и длина канала. Сопла можно разделить на два типа: с острыми краями и цилиндрические. В соплах с острыми краями коэфициент истечения колеблется от 0,6 для угла конусности в 90° и до 0,87 для угла конусности в 8°. Для угла конусности в 45° величина K равняется примерно 0,7.

Различные видоизменения цилиндрических сопел широко применяются для газовых устройств. Сопла этого типа могут иметь канал различной длины и различные линии конусности. В сопле № 2 размера D. M. S. (диаметр 0,56 *см*) с углом конусности в 45° величина K быстро увеличивается от 0,7 для сопла с острыми краями примерно до 0,9, когда длина канала равняется 0,204—

0,28 *см*, в зависимости от давления. Увеличение длины канала до 25,4 *мм* постепенно уменьшает K примерно до 0,83. При длине канала в 25,4 *мм* величина K для сопла этого типа и размера не зависит от давления. Постоянная (неподвижная) диафрагма, применяемая в газовых плитах, подогревательных плитках или печах прачечных, с углом конусности 15°, имеет среднюю величину



Фиг. 163. Диаграмма для определения размера сопла (испытательная лаборатория Американской газовой ассоциации).

$K = 0{,}82$. Когда давление газа измеряется до краника газовой плиты, к которому приложено сопло, то среднюю величину K можно брать равной 0,80. Ввиду того что цилиндрические сопла отличаются одно от другого, трудно установить величину K, которую можно считать средней, но для практических целей можно брать величину 0,78. Эта величина будет приблизительно правильной для угла конусности в 60° (такому же, как конец спирального сверла) и длины канала.

равной диаметру сопла или несколько больше его. Если эту величину подставить в формулу, то пропускная способность будет примерно такая:

$$Q = 1{,}11 A \sqrt{\frac{H}{S}}.$$

Для определения размера сопла можно применять диаграмму на фиг. 163.

РАСЧЕТ ГОРЕЛКИ

Вопрос о конструкции атмосферной горелки имеет большое значение [1]. Соотношение ее основных частей показано на фиг. 165. Ниже вкратце изложены стадии проектирования горелки, приблизительно в том порядке, в каком следует ее проектировать, и приведены основные формулы, которые могут понадобиться конструктору.

При проектировании горелки следует:

1. Определить общую форму и размер горелки, основываясь на величине топочного пространства и способе нагрева.

2. Определить устройство отверстия и обеспечить выход продуктов сгорания при условии однообразного притока воздуха к каждому отверстию и от каждого отверстия с минимально возможным избытком.

3. Определить число и размер отверстий, причем это число должно быть максимально большим, и выбрать размер, допускающий приток максимального количества первичного воздуха без опасности обратного воспламенения либо отрыва пламени. Как общее правило, неполадки с обратным воспламенением или отрывом пламени исключаются, если размер отверстия берется от № 34 до № 38 спиральных сверл для искусственного и естественного газа, причем число отверстий выбирается с таким расчетом, чтобы на каждые 4536—5040 *Кал* часовой производительности горелки приходилось 6,45 *см*^{2} сечения отверстия. В случае применения щелевидных отверстий ширина этих отверстий может колебаться в пределах от 0,88 до 0,20 *см*. Для нефтяных газов при такой же производительности горелки требуются несколько большие отверстия (примерно № 32), а также и большее сечение отверстия. Эти цифры меняются в зависимости от условий применения горелки. Если газ подается всегда с неизменной скоростью, если большое количество первичного воздуха не дает никаких преимуществ и если горелка нагревается лишь слегка, то размер отверстий выгодно увеличить. Те горелки, которые требуют много первичного воздуха, очень нагреваются и вызывают необходимость в понижении температуры, должны иметь меньшие отверстия.

4. Сконструировать головку горелки вполне достаточного размера [2] из металла соответствующей толщины. В головке горелки отверстия обрабатываются машинным способом.

5. Сконструировать каналы [3] горелки так, чтобы они не имели резких изменений в размере и направлении и чтобы поток газа и воздуха мог расширяться постепенно и подходить к отверстиям с небольшой и одинаковой скоростью. Сделать сечение штуцера горелки равным примерно 40% сечения отверстия, а остальные размеры смесителя приблизительно такими, как это показано на фиг. 165.

6. Выбрать по методу приближения сопло с сечением A, каждый раз принимая во внимание всю сумму разнообразных условий эксплоатации данного устройства. При этом выборе пользоваться следующей формулой:

$$q = 1{,}11 A \sqrt{\frac{h}{S}},$$

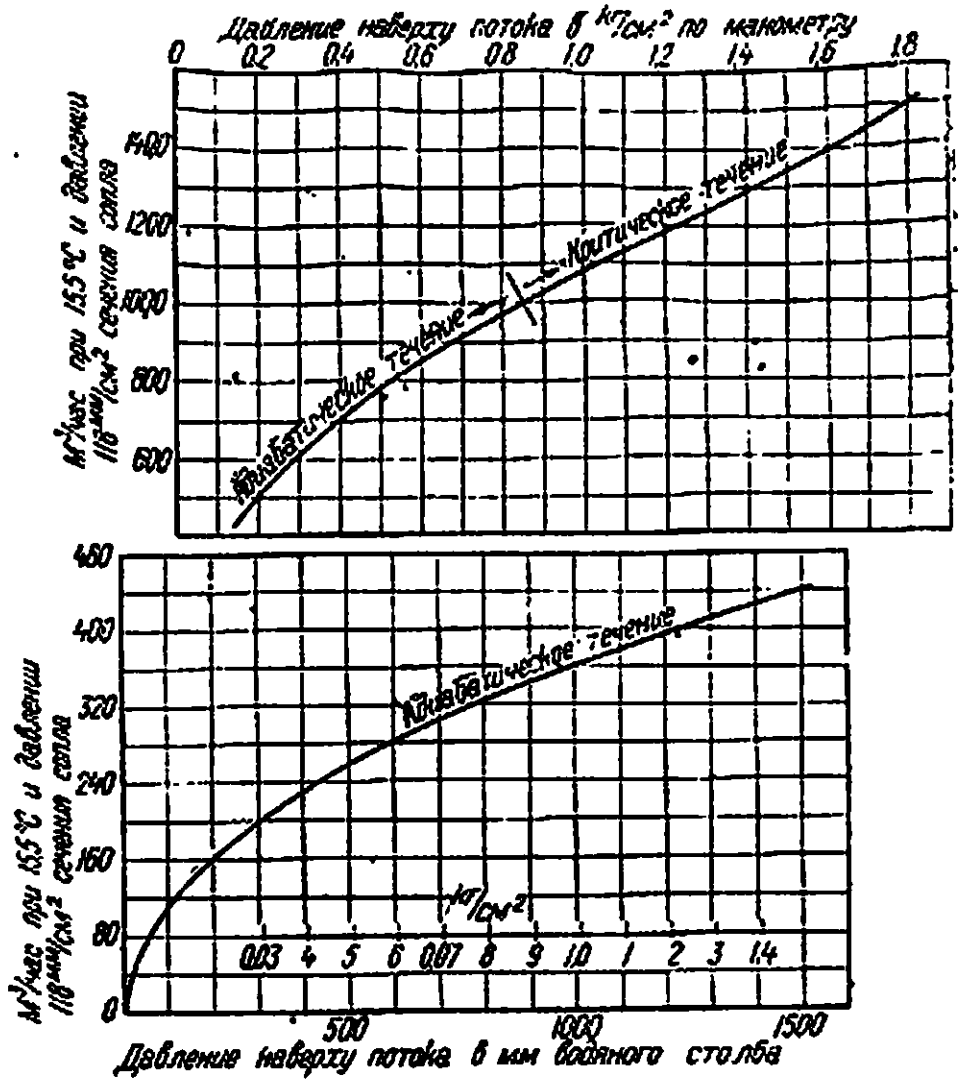
где q — максимально требуемый объем газа в *м*^{3}/*час*;
h — максимальное давление газа в *мм* водяного столба;
S — удельный вес газа (воздух равен единице).

---

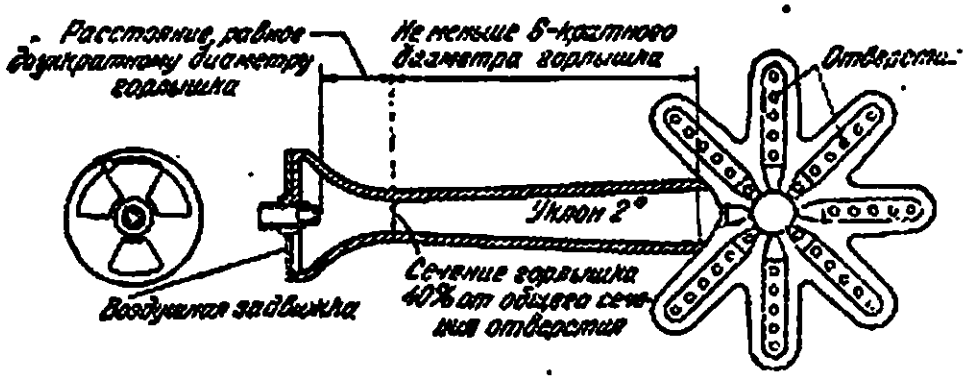
[1] „Конструкция атмосферной горелки", Технический доклад Бюро стандартов, 183; Brumbaugh and Shawn, Как можно улучшить горелки для естественного газа; O. L. Kowalke and N. H. Coggiske, Аэрация газовых горелок (доложено на съезде Американской газовой ассоциации (A. G. A.) в 1929 г.).

[2] Следует заметить, что при избыточном объеме головки горелка, возможно, будет работать с шумом.

[3] Как общее правило, сечение всех каналов горелки должно быть по крайней мере на 20—25% больше сечения отверстия головки.



Фиг. 164. Течение естественного газа через сопло 6,45 *см*² с коэфициентом истечения, равным единице; газ — из Кетлемен-Хиллс с теплотворной способностью 10 502 *Кал/м*³, удельным весом 0,655, отношением удельных теплот 1,28, при атмосферном давлении в 1,033 *ат*. Указанный расход следует умножить на фактическое сечение сопла (в *см*³) и соответствующий коэфициент истечения



Фиг. 165. Относительные размеры различных частей горелки для максимального количества воздуха на данное сечение отверстия. Диаметр отверстия воздушной задвижки должен быть равен минимум 1,25-кратному сечению отверстия.

7. Задаться желательным отношением первичного воздуха ко всему воздуху, нужному для полного сгорания, основываясь на опыте или руководствуясь сказанным здесь.

8. Задаться величиной k — константы горелки — на основе опытов с горелкой такого же типа или же на основе приведенных здесь данных в случае, если величина k раньше была не известна, этой величиной можно задаться как приблизительной, равной $0{,}315\sqrt{P}$ (где $\sqrt{P}$ — общее сечение отверстий), и рассчитать захватит ли запроектированная по методу приближения горелка требуемое количество первичного воздуха при каждом из предположенных комплексов условий. Пользоваться формулой:

$$\frac{Q}{q} = k\sqrt{\frac{S}{AG}}$$

(или одним из видоизменений этой формулы),

где Q — объем первичной смеси (воздух и газ), протекающей в единицу времени;

q — объем газа, протекающего в единицу времени;

G — удельный вес (по отношению к воздуху) первичной смеси;

A и S имеют значения, указанные в п. 6.

Константа k получается обычно путем решения указанной выше формулы, в которой вместо буквенных обозначений подставляются величины, известные из опыта с горелкой аналогичного типа.

9. Закончив конструкцию модели горелки, определить по методу приближения, будет ли эта горелка удовлетворительно работать в отношении: а) полноты сгорания, предъявляющего максимальные требования к „воздуху для полного сгорания" при максимальной скорости подачи тепла газа; б) обратного воспламенения для газа, быстрее всего сгорающего при минимальной скорости, и в) отрыва пламени для газа, медленно сгорающего при максимальной скорости.

10. Определить по методу приближения максимальное количество первичного воздуха, дающее полную безопасность при нестабильном „колеблющемся" пламени. При применении этого максимального первичного воздуха расположить горелку или же регулировать вторичный воздух так, чтобы дать максимально возможную производительность, сохраняя в то же время полную безопасность при неполном сгорании.

11. Выбрать сопло, подлежащее применению для данной подачи газа, при помощи формулы, приведенной в п. 6. Затем, взяв формулу, приведенную в п. 8, и величину константы горелки k (определенную путем наблюдений над моделью горелки в условиях работы, максимально близких к условиям фактической эксплоатации этой горелки) определить, будет ли достаточным увлечение первичного воздуха в пределах регулирования устройства воздушной задвижки. Если количество воздуха, нужного для полного сгорания подаваемого газа, не известно, допустить, что на 252 *Кал* требуется 0,264 $м^3$ воздуха. Следует заметить, что данные выше сведения относятся исключительно к горелкам, применяемым в быту. Это объясняется тем, что константа k до известной степени зависит от давления газа, удельного веса и размера сопла. Кроме того, нагрев горелки уменьшает величину k. Если принять эти факторы во внимание, то аналогичные указанным выше общие принципы должны оказаться полезными при конструировании горелок для промышленных целей (см. ниже указания по более общему и более точному методу).

Уравнения для течения без трения

$$Q = 1{,}4\,A\sqrt{\frac{H}{S}}, \qquad (1)$$

где Q — количество $м^3/час$ при 15,5° С и давлении 760 *мм*;

A — сечение в $см^2$;

H — падение давления в *мм* водяного столба;

S — удельный вес (воздух равен единице).

В уравнении (1) ускорение силы тяжести принято равным 9.81 *м/сек.*

Коэфициенты истечения (табл. 164). Влияние сопротивления можно выявить посредством одного из трех коэфициентов в зависимости от их положения в формуле истечения, к которой они применяются. Пусть:

f — коэфициент трения; сопротивление в пересчете на скоростной напор $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$;

e — коэфициент полезного действия (часть падения давления, полезного для течения);

c — коэфициент истечения (отношение фактического истечения к истечению без сопротивления);

n — общие скоростные напоры, нужные для того, чтобы вызвать течение, равное $f+1$ в единицах $\frac{v^2}{2g}$.

Тогда уравнение для течения, нужного для противостояния сопротивлению, можно выразить так:

$$Q = 1{,}4A\sqrt{\frac{H}{fS}}; \tag{2}$$

$$Q = 1{,}4A\sqrt{\frac{eH}{S}}; \tag{2а}$$

$$Q = 1{,}4Ac\sqrt{\frac{H}{S}}; \tag{2б}$$

$$Q = 1{,}4A\sqrt{\frac{H}{nS}}. \tag{2в}$$

Разница между уравнениями (2) и (2в) заключается в том, что уравнение (2) представляет движение в трубопроводе, когда H — падение давления между двумя точками на трубопроводе, а в уравнении (2с) H представляет собой разницу между давлением у источника и некоторой точкой, лежащей по длине трубопровода.

Из этих уравнений следует, что:

когда H — падение давления:	когда H — только сопротивление:	
$n=\frac{1}{e}=\frac{1}{c^2}=f+1;$		(3)
$e=c^2=\frac{1}{n}=\frac{1}{f+1};$	$e=c^2=\frac{1}{f};$	(3а)
$c=\sqrt{e}=\sqrt{\frac{1}{n}}=\sqrt{\frac{1}{f+1}};$	$c=\sqrt{e}=\sqrt{\frac{1}{f}};$	(3б)
$f=n-1=\frac{1}{c^2}-1=\frac{1}{e}-1.$	$f=\frac{1}{c^2}=\frac{1}{c}.$	(3в)

Площадь поперечного сечения A должна относиться к тому же участку, на котором взят скоростной напор $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$, сопротивление коего измерено.

На фиг. 166 показаны отрезы горелки, к которым относятся коэфициенты с различными индексами.

При расчете течения для нескольких моделей коэфициент n одной из них можно сложить с суммой коэфициентов f остальных, что даст общий коэфициент n для всех моделей. Для каждой величины f следует сделать поправку к площади для поперечного сечения, к которому относится n. Так например, если n взято для поперечного сечения 4, то следует сделать поправки для f_1, f_2 и f_3.

Общая величина

$$n = n_4 + \left(\frac{A_4}{A_1}\right)^2 f_1 + \left(\frac{A_4}{A_2}\right)^2 f_2 + \left(\frac{A_4}{A_3}\right)^2 f_3. \tag{4}$$

Номенклатура символов, примененных в общем и упрощенном уравнении

A_1, A_2, A_3 и A_4 — соответственно площади в $см^2$ газового сопла горловины горелки смесителя и отверстий горелки.

c_1 и c_4 — соответственно коэфициенты истечения для газового сопла и отверстий горелки.

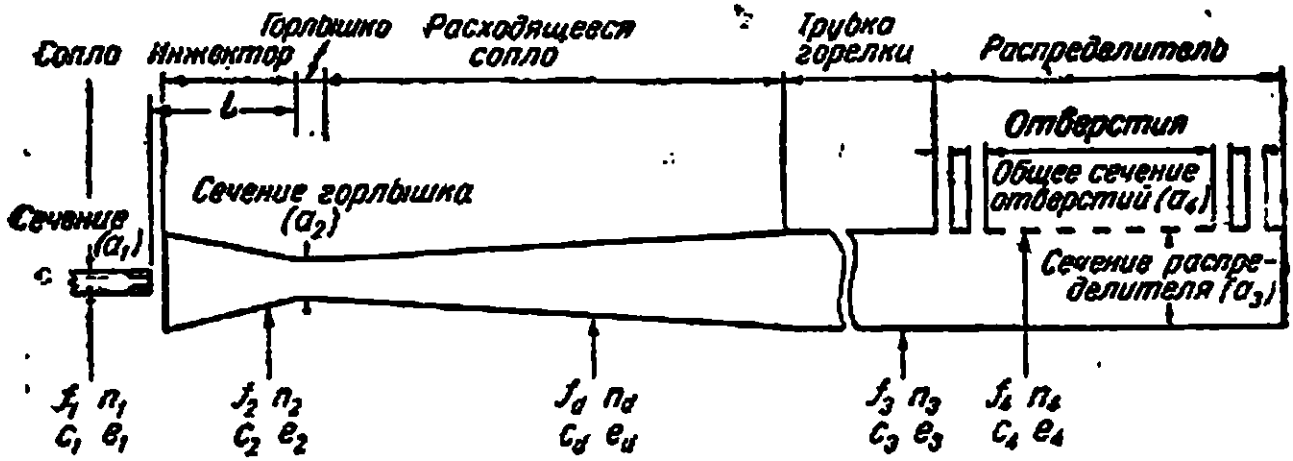
D_1 и D_2 — диаметры сопла и горловины в *мм*.

E_2 — общий коэфициент давления для комбинированных сходящихся и расходящихся патрубков в пересчете на дробную долю скоростного напора у горловины при лишенном трения течении газа за расходящимся патрубком. Это — дробная часть скоростного напора у горловины, которую можно превратить в статическое давление в трубке горелки и выразить так:

$$\frac{1}{2+f_2+f_d}.$$

E_{b_2} — общий коэфициент давления для горелки в целом, включая сходящиеся и расходящиеся патрубки, трубку горелки, смеситель и отверстия, в пересчете на дробную часть скоростного напора у горловины при лишенном трения течении через горелку в целом. Она равняется:

$$\frac{1}{2+f_2+f_d+f_3\left(\frac{A_2}{A_3}\right)^2+f_4\left(\frac{A_2}{A_4}\right)^2}.$$



Фиг. 166. Наиболее важные части газовой горелки с указанием частей, к которым относятся упоминаемые в тексте сечения и коэфициенты истечения.

f_2 и f_d — коэфициенты трения для сходящихся и расходящихся патрубков в пересчете на скоростной напор у горловины. Они представляют собой количество потерь от трения скоростных напоров у горловины для соответствующих частей.

f_3 и f_4 — коэфициенты трения для трубки и выходов горелки; они представляют собой количество скоростных напоров (основанных на соответствующих скоростях), потерянных при трении.

f_s — коэфициент трения для отрезка коллектора трубопровода, находящегося между ответвлениями.

F_L — коэфициент трения для ответвлений, представляющий собой общее фрикционное сопротивление ответвления и его соединений, включая окончательный выпуск в атмосферу, в пересчете на скоростной напор у боковых соединений.

F — скорость пламени в 1-дюймовых трубках в *м/сек*.

H — высота напора, соответствующая давлению, или падение давления в *мм* водяного столба.

H_v — допускаемое падение давления в любой горелке во время предельных изменений нагрузки в *мм* водяного столба.

L — расстояние от сопла до горлышка в *мм* в уравнении (11).

L — длина линии в *м* — в других уравнениях.

$\frac{l}{d}$ — отношение длины к диаметру канала в сопле.

Коэфициент истечения

Сходящееся сопло [1]



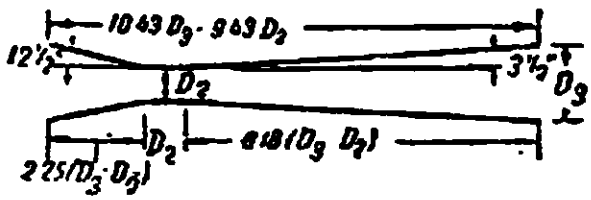
α_1	2°	4°	6°	8°	10°	12°	13°	14°	15°	16°	20°	22°	24°
c_1	0,88	0,90	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91
c_2	0,77	0,82	0,85	0,87	0,88	0,89	0,89	0,89	0,88	0,87	0,85	0,85	0,84
n_1	1,23	1,22	1,18	1,15	1,14	1,13	1,13	1,13	1,14	1,15	1,16	1,18	1,20
f_1	0,23	0,22	0,18	0,15	0,14	0,13	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16	0,18	0,20

Расходящееся сопло [1]



α_d	1°	2°	3°	3½°	4°	5°	6°	7°	7½°	8°	9°	10°
c_d	0,95	0,92	0,89	0,88	0,87	0,85	0,83	0,81	0,80	0,79	0,77	0,75
e_d	0,90	0,85	0,80	0,78	0,76	0,72	0,69	0,65	0,64	0,62	0,59	0,56
n_d	1,11	1,18	1,25	1,28	1,32	1,38	1,45	1,54	1,56	1,61	1,69	1,79
f_d	0,11	0,18	0,25	0,28	0,32	0,39	0,45	0,54	0,56	0,61	0,69	0,79

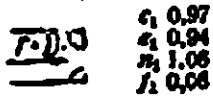
Трубка Вентури



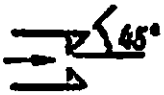
Струя газа



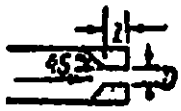
Газовая диафрагма [2]



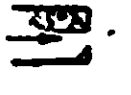
c_1 0,97
e_1 0,94
n_1 1,06
f_1 0,06



c_2 0,61
e_1 0,37
n_1 2,70
f_1 1,70



Коэфициент, употребляемый для расходящегося сопла, угол 7°.



c_1 0,70
e_1 0,49
n_1 2,04
f_1 1,04

Просверленные отверстия

c_2 0,616
e_1 0,38
n_1 2,64
f_1 1,64

$\frac{l}{D}$	0,10	0,25	0,50	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0
c_1	0,73	0,78	0,90	0,89	0,88	0,87	0,85	0,84
e_1	0,53	0,61	0,81	0,79	0,77	0,75	0,72	0,70
n_1	1,88	1,64	1,23	1,26	1,29	1,32	1,38	1,42
f_1	0,88	0,64	0,23	0,26	0,29	0,32	0,38	0,42

Приближенные сопротивления трубки газовой горелки

Отверстия трубки в дм.	⅛	¼	⅜	1	1½	2	2½	3	4	6	Выше 6
Длина в диаметрах для $f = \frac{1}{2}\frac{v^2}{g}$ . . .	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	50
Коэфициент трения f на 0,305 *м* длины	2,50	2,20	1,00	0,62	0,31	0,19	0,13	0,10	0,07	0,01	—
Внутренний диаметр стандартной трубки в дм.	0,364	0,622	0,824	1,05	1,61	2,07	2,47	3,07	4,03	6,07	—
Коэфициент трения f на 0,305 *м* длины	3,60	1,70	0,87	0,57	0,27	0,19	0,14	0,096	0,067	0,039	—

Для входа в трубу

$$f = \frac{\frac{1}{2}\,v^2}{2g}$$

90° колено

$$f = \frac{1\,v^2}{2g}$$

Шаровой клапан

$$f = \frac{1\frac{1}{2}\,v^2}{2g}$$

Для скоростного напора:

$$H = S\left(\frac{v}{66{,}079}\right)^2 = S\left(\frac{Q}{1652\,A}\right)^2 = S\left(\frac{V}{3965}\right)^2.$$

[1] Взято из „Fan Engineering", Buffalo Forge Co.
[2] Взято из „Bur. of Standards Tech. Paper" 193.

n_4 — общее количество скоростных напоров, нужных для течения через отверстия горелки, равное $1 + f_4$ в пересчете на скорость в отверстиях.
Q — объем газа в *м³/час*.
R — отношение воздуха к газу в смеси горелки.
R_t — отношение воздуха к газу, когда смесь составлена теоретически правильно для полного сгорания.
S — удельный вес газа (воздух равен единице).
T — абсолютная температура в °С абс.
V — скорость в *м/мин*.
v — скорость в *м/сек*.
X — отношение разности давлений у первого и последнего отверстия к среднему давлению в распределителе горелки (применяется также к первому и последнему соединению ответвления распределителя трубопровода).

Инструкции для применения общих формул

Уравнения расположены в последовательном порядке, наиболее удобном для практического их применения. Указанные здесь стадии расчета дают лишь общее направление теоретической работы, необходимой для определения пропорций горелки.

1. (c_4). Выбрать коэфициент истечения для того типа отверстия, которое будет применяться на практике (см. табл. 164).

2. (X). Определить допускаемую разность давлений между средним давлением распределителя и средним давлением у первого и последнего отверстий.

3. $\left(\frac{T}{288}\right)$. Определить температурную поправку для того случая, когда смесь воздух — газ в горелке будет нагреваться до ненормально высокой температуры.

4. $\left(\frac{A_3}{A_4}\right)$. Взять уравнение (1) для расчета отношения сечения распределителя горелки к сечению отверстия.

5. (R). Зная количество куб. метров воздуха, нужное для теоретического сгорания 1 $м^3$ газа R_t, взять такое отношение воздух — газ, которое больше всего подходит для данной цели. В большинстве случаев на практике имеется от 50 до 75% теоретического воздуха в качестве первичного.

6. (F). Получить величину максимальной скорости распространения пламени в 1-дюймовой трубке для применяемого газа.

7. (A_4). Если имеются сведения лишь по среднему расходу газа и скорость в горелке колеблется в широких пределах, то для расчета сечения отверстия следует брать уравнение (2). Если максимальная предполагаемая производительность горелки известна, то брать уравнения (3), (4) и (5) согласно рассчитанному раньше отношению $\frac{A_3}{A_4}$. Следует иметь в виду, что всякое значительное повышение температуры газов в горелке увеличивает ее производительность. Специальные горелки с запальником имеют максимальную производительность отверстия, примерно в 10 раз больше производительности обыкновенной горелки.

8. (f_2 и f_d). Определить по табл. 164 коэфициенты трения для сходящихся и расходящихся конусов. Правильному выбору последних должен помочь список коэфициентов для различных уклонов этих конусов. Следует заметить, что сходящийся конус, дающий наименьшее сопротивление, имеет уклон около 12,5—13°; для расходящихся конусов лучше взять меньший угол.

9. (A_3 и f_3). Рассчитать размер распределителей, исходя из вычисленного сечения отверстия и отношения распределителя горелки к сечению отверстия. Обычно трубка горелки бывает такого же размера, как и распределитель (A_3). После этого рассчитать длину трубки горелки и из табл. 164 взять соответствующий коэфициент трения (f_3), включая допуск на изгибы.

10. (A_2). Пользуясь уравнением (6) и полученной раньше величиной сечения отверстия (A_4), рассчитать сечение горлышка. Обычно применяют размер несколько меньше рассчитанного, если только не был сделан допуск на неожиданное сопротивление при выборе величин для f_3 и n_4. Если температура горелки будет необычно высокой, сделать поправку на температуру.

11. (A_1). Из табл. 164 взять коэфициент истечения для газового сопла, подлежащего применению. Пользуясь уравнением (8) и зная заранее определенный размер горлышка, рассчитать сечение сопла. Сечение, полученное путем решения уравнения (8), является максимальным, которое можно применять, и обеспечивающим заданное отношение воздух — газ. Можно взять меньший размер, применив воздушную задвижку.

12. (Давление газа). Взяв уравнение (10), проверить размер сопла сравнительно с имеющимся давлением. Обычно имеющееся давление превышает давление, нужное для сопла рассчитанного размера. В этом случае сопло можно уменьшить так, чтобы оно подходило к заданному давлению и воздушной задвижке.

13. (L). Величина расстояния от горлышка, на котором следует установить сопло с целью достижения максимального увлечения воздуха, получается из уравнения (11). Если с целью соответствия давлению сопло уменьшено и максимальная подача не обязательна, расстояние можно уменьшить против расчета.

Общие формулы для газовых горелок. 1. Температурная поправка для того случая, когда смесь воздух — газ в горелке подвергается действию высокой температуры.

Для того чтобы поддержать требуемое отношение воздух — газ, применить в уравнениях (6) и (8) поправку $\frac{T}{288}$ к общим скоростным напорам, нужным у отверстий, а также коэфициент истечения (c_4) в уравнении (1).

При расчете сечения отверстия и производительности горелки сделать допуск на большую „скорость пламени" в уравнении (2).

2. Отношение сечения смесителя горелки к сечению отверстия:

$$\frac{A_2}{A_4} \Rightarrow \frac{c_4}{\sqrt{\frac{1}{2X}}}. \qquad (1)$$

3. Сечение отверстия (нормальная производительность для всех отношений $\frac{A_3}{A_4}$):

$$A_4 = \frac{2{,}778\,Q(R+1)}{F\left[1+1{,}75\left(1-\frac{R}{R_t}\right)\right]}. \qquad (2)$$

3а. Сечение отверстия (на основе максимальной производительности):

Для $\frac{A_3}{A_4} = 1{,}1$:

$$A_4 = \frac{2{,}042\,Q(R+1)}{F\left[1+2{,}7\left(0{,}8-\frac{R}{R_t}\right)\right]}. \qquad (3)$$

Для $\frac{A_3}{A_4} = 2{,}0$:

$$A_4 = \frac{2{,}24\,Q(R+1)}{F\left[1+3{,}5\left(0{,}87-\frac{R}{R_t}\right)\right]}. \qquad (4)$$

Для $\frac{A_3}{A_4} \geq 3{,}0$:

$$A_4 = \frac{2{,}778\,Q(R+1)}{F\left[1+5{,}2\left(1-\frac{R}{R_t}\right)\right]}. \qquad (5)$$

4. Сечение горлышка:

$$\frac{A_2}{A_4} \Rightarrow \sqrt{\frac{E_t}{f_3\left(\frac{A_4}{A_3}\right)^2 + n_4}}; \qquad (6)$$

$$E_t = \frac{1}{2+f_2+f_d}. \qquad (7)$$

5. Сечение сопла:

$$\frac{A_1}{A_2} \geq \frac{0{,}65}{E_{t_2} c_1} \cdot \frac{S}{S+R} \cdot \frac{1}{R+1}; \tag{8}$$

$$N_{b_2} = \frac{1}{E_{b_2}} = 2 + f_2 + f_d + f_3\left(\frac{A_2}{A_3}\right)^2 + f_4\left(\frac{A_2}{A_4}\right)^2. \tag{9}$$

Давление газа:

$$Q = 1{,}406\, A c_1 \sqrt{\frac{H}{S}}. \tag{10}$$

7. Расстояние сопла от горлышка:

$$L = 3{,}4\,(D_2 - D_1). \tag{11}$$

Упрощенные формулы для практического применения

Приняв некоторые стандарты, можно избавиться от многих сложных вычислений, связанных с применением общих формул. В практической работе представляется необходимым принять некоторые стандарты с конструктивной точки зрения, а также в целях упрощения обычных математических вычислений. В обычной работе, при строго определенных условиях, нет надобности в бесполезных общих членах. Применение инжекторной трубы стандартного типа делает величины f_2 и f_d постоянными. Определенно выбранный метод изготовления газовых сопел и отверстий ходов горелки делает постоянными величины c_1, c_4 и n_4. Эти стандарты зависят от местных условий, свойств газа, оборудования мастерской и личных вкусов. Для данного газа величины S, F и R_t и даже R могут приниматься как постоянные, вследствие чего уравнения для сечения прохода и отношение газового сопла к горлышку делаются весьма простыми.

Пример практичных стандартов. *Для инжектора.* Стандартная трубка Вентури, т. е. сходящийся патрубок с углом 12,5°, горлышко, длина коего равняется его диаметру, и расходящийся конус 3,5°. Тогда

$$f_2 = 0{,}13 \text{ и } f_d = 0{,}28, \quad ed = 0{,}78.$$

Входное отверстие раструбом с радиусом кривизны, равным диаметру горлышка, более эффективно, но его труднее изготовить.

Газовое сопло. Канал с конусностью 45° и $\frac{l}{d} = 1{,}0$. Тогда

$$c_1 = 0{,}88.$$

Отверстия горелки. Просверленные, нескошенные ходы. Тогда

$$c_4 = 0{,}61, \quad n_4 = 2{,}69, \quad f_4 = 1{,}69.$$

Отношение воздух — газ. Конструировать так, чтобы минимум 70% теоретического воздуха, нужного для сгорания, увлекалось в качестве первичного воздуха. Тогда

$$R = 0{,}7\, R_t.$$

Отношение сечения распределителя горелки к сечению отверстия. Для обычного применения могут оказаться удовлетворительными величины $X = 0{,}05$ и $\frac{A_3}{A_4} \approx 2{,}0$; однако производительность такой горелки примерно на 20% меньше производительности горелки с очень хорошим смешением. Если возьмем

$$X = 0{,}02, \quad c_4 = 0{,}61,$$

то $\frac{A_3}{A_4} = 3{,}0$ даст такие хорошие условия работы, какие желательны везде. Это приводит к необходимости иметь инжекторную трубку значительной длины даже при применении уклона в 3,5°. Во многих случаях ввиду фактических ограничений длины трубки необходимо брать для этого отношения величину значительно меньше 3, хотя может оказаться, что с эксплоатационной точки зрения это нежелательно.

Упрощенные формулы для газовых горелок (подлежащие применению только для упомянутых выше моделей и условий).

1. Поправка на температуру в расчет не принимается за исключением некоторых случаев.

2. Сечение отверстия из уравнения (5):

при максимальной производительности

$$A_4 = \frac{1{,}085\,Q(R+1)}{F};$$

при нормальной производительности

$$A_4 = \frac{1{,}827\,Q(R+1)}{F}. \qquad (12)$$

Скорость сгорания не является признаком наилучшей конструкции, в особенности в смысле максимальной производительности. Лучше всего применять нормальную производительность, когда конструкция допускает увлечение 70% воздуха, нужного в качестве первичного.

Производительность горелок с запальниками примерно в 10 раз больше производительности горелок, сконструированных по уравнению (12).

3. Сечение смесителя горелки из уравнения (1):

$$A_2 = 3A_4 \text{ (для идеальных условий)}.$$

4. Сечение из уравнения (6):

$$A_3 = A_4\sqrt{\frac{0{,}415}{\frac{1}{9}f_3 + 2{,}69}} \leqslant A_4\sqrt{\frac{3{,}74}{f_3 + 24{,}21}}. \qquad (13)$$

f_3 не превысит единицы, если только не будет необычного сопротивления в трубке горелки, например вследствие изгибов; таким образом, на практике A_3 можно принять равным $0{,}39A_4$.

4. Сечение сопла из уравнения (8):

$$A_1 \leqslant A_2\frac{0{,}74}{\sqrt{2{,}41 + f_3\left(\frac{A_2}{3A_4}\right)^2 + 1{,}69\left(\frac{A_2}{A_4}\right)^2}}\cdot\frac{S}{S+R}\cdot\frac{1}{R+1}. \qquad (14)$$

Так же, как и выше, в том случае, если f_3 не превышает единицы:

$$A_1 \leqslant 1{,}98A_2\frac{S}{S+R}\cdot\frac{1}{R+1}. \qquad (15)$$

Если предусмотрена воздушная задвижка, то в соответствии с имеющимся давлением газа можно применять меньшие размеры.

6. Расстояние сопла от горлышка: никаких изменений; см. уравнение (11).

Указания по размерам и производительности многих промышленных горелок и соответствующего оборудования, а также библиографические данные по конструкции горелки, можно найти в книге „Combustion", изд. 3, выпущенной Американской газовой ассоциацией (A. G. A.), Нью-Йорк.

Глубина и сечение отдельных отверстий. От глубины и размера отдельных отверстий многоходовой горелки зависят возможность возникновения обратной вспышки и стабильность пламени. Приводим ниже положения, заимствованные из книги „Combustion": глубина отверстия влияет на сопротивление обратному удару; следовательно, глубокое отверстие позволяет высверливать больший диаметр. Эта глубина уменьшает также турбулентность течения воздуха — газа, которое, как оказывается, является важнейшей причиной обратной вспышки. Глубокие отверстия предохраняют также от обратной вспышки вследствие создаваемого ими охлаждающего действия. Такие отверстия от 20 до 50 диаметров имеют тенденцию давать покойное пламя даже в том случае, когда применяются высокие отношения воздух — газ. Глубина замедляет скорость смеси воздух — газ, что компенсирует отрыв пламени естественного газа. Требуется увязка между общим сечением отверстия и конструкцией отдельного сопла отверстия или щели.

Таблица 165

Размеры газовой горелки для газов различной плотности и теплотворной способности

Рассчитаны по упрощенным формулам только для некоторых стандартных форм и коэфициентов; для получения более точных величин взять общие уравнения

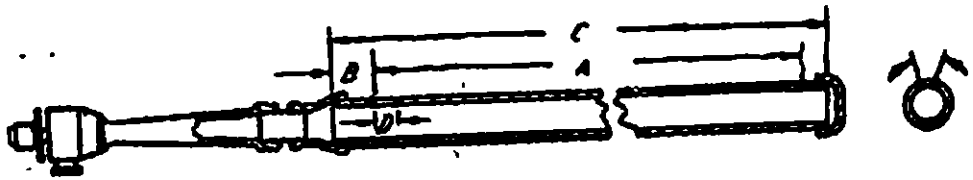
	Символ или формула	Естественный газ	Каменноугольный и нефтяной газ	Карбюрированный водяной газ	Пропан	Бутан
Вспомогательные данные:						
1. Калорийность газа		10 500	4 820	4 820	22 400	29 100
2. Удельный вес	S	0,65	0,45	0,60	1,50	2,00
3. Скорость пламени (макс. в 1" трубке) в *м/сек* [1]	F	0,70	1,67	1,82	0,82	0,82
4. Требуемое теоретическое количество воздуха	R_t	11,00	4,75	4,75	23,90	31,10
5. Отношение воздух — газ в горелке	$R = 0{,}7\ R_t$	7,7	3,3	3,3	17,0	22,0
6. Отношение смесь — газ	$R + 1$	8,7	4,3	4,3	18,0	23,0
7. Коэфициент нормальной мощности	$\frac{1{,}827\ (R+1)}{F}$	22,707	4,704	4,316	40,100	51,240
8. Количество *м³/час* на 1 *см²* отверстия (нормальная работа)	$\frac{F}{1{,}827\ (R+1)}$	0,044	0,210	0,240	0,025	0,020
9. Коэфициент увлечения	$\frac{S}{S+R}\ \frac{1}{R+1}$	0,0090	0,0280	0,0360	0,0045	0,0036
Уравнения:						
1. Сечение отверстия в *см²* (нормальное)	A_1	$0{,}1000\ Q$	$0{,}0210\ Q$	$0{,}0185\ Q$	$0{,}1750\ Q$	$0{,}2240\ Q$
2. Отношение распределителя к отверстиям	$\frac{A_2}{A_1}$	Независимо от применяемого газа: выбранный стандарт — 3,0			(Идеальные условия)	
3. Сечение горлышка в *см²*	A_2	Независимо от применяемого газа; если f_2 не больше 1 (см. уравнение 13)			Взять $A_2 = 0{,}39\ A_1$	
4. Газовая диафрагма в *см²* если f_2 не превышает единицы	$\frac{A_1}{A_2}$	0,0178	0,0554	0,0713	0,0089	0,0071
5. Расстояние диафрагмы от горлышка		Для соответствия давлению газа может быть меньше (при наличии задвижки) Вероятно, независимо от применяемого газа (см. уравнение 11)				
6. Количество *Кал/час* на 1 *см²* сечения отверстия при нормальной мощности [2]		473	1050	1170	563	568

[1] Скорость распространения пламени взята вследствие отсутствия достаточных данных по „скорости сгорания", которая должна дать более точные параметры.

[2] Минимальное количество калорий на горелку зависит от отношения $\frac{A_2}{A_1}$. Для отношения 1,1 максимальная мощность будет примерно на 13% больше нормальных величин, данных выше. Для отношений 2,0 и 3,0 соответственно максимальные мощности можно взять примерно на 31 и 64% выше нормальных (см. уравнения 2, 3, 4 и 5).

Таблица 166

Размеры атмосферных трубчатых горелок [1]



1-дюймовый коллектор														
Длина ходов в *м*	A	0,61	0,92	1,22	1,53	1,83	2,14	2,44	2,75	3,05	3,36	3,66	3,97	4,27	4,58
Расстояние до первого хода в *см*	B	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	—	—	—	—	—
Длина всей горелки в *м*	C	0,71	1,02	1,32	1,63	1,98	2,24	2,54	2,84	3,16	—	—	—	—	—
Число отверстий		78	116	156	196	231	270	305	433	481	—	—	—	—	—
Расстояние между отверстиями в *мм*	D	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	6,35	6,35	6,35	—	—	—	—	—
Размер отверстий в M. T. D.		47	49	50	50	50	51	52	52	52	—	—	—	—	—
Число рядов отверстий		1	1	1	1	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—
1¼-дюймовый коллектор														
Длина ходов в *м*	A	0,61	0,92	1,22	1,53	1,83	2,14	2,44	2,75	3,05	3,36	3,66	3,97	4,27	4,58
Расстояние до первого хода в *см*	B	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53
Длина всей горелки в *м*	C	0,74	1,04	1,35	1,65	1,96	2,26	2,57	2,87	3,18	3,48	3,78	4,09	4,39	4,70
Число отверстий		97	145	193	241	193	225	305	345	385	422	577	685	673	72
Расстояние между отверстиями в *мм*	D	12,70	12,70	12,70	12,70	9,53	9,53	7,92	7,92	7,92	7,92	6,35	6,35	6,35	6,35
Размер отверстий M. T. D.		43	44	46	47	42	43	48	49	49	50	53	53	53	54
Число рядов отверстий		2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1½-дюймовый коллектор														
Длина ходов в *м*	A	0,61	0,92	1,22	1,53	1,83	2,14	2,44	2,75	3,05	3,36	3,66	3,97	4,27	4,58
Расстояние до первого хода в *см*	B	11,43	11,43	11,43	11,43	11,43	11,43	11,43	11,43	11,43	11,43	11,43	11,43	11,43	11,43
Длина всей горелки в *м*	C	0,76	1,07	1,37	1,68	1,98	2,29	2,59	2,90	3,20	3,51	3,81	4,11	4,42	4,72
Число отверстий		129	231	308	385	462	538	613	239	321	424	462	600	638	577
Расстояние между отверстиями в *мм*	D	9,53	7,58	7,92	7,92	7,92	7,58	9,53	9,53	9,53	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92
Размер отверстий M. T. D.		41	45	48	49	50	51	51	42	48	48	47	48	48	49
Число рядов отверстий		2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
2-дюймовый коллектор														
Длина ходов в *м*	A	0,61	0,92	1,22	1,53	1,83	2,14	2,44	2,75	3,05	3,36	3,66	3,97	4,27	4,58
Расстояние до первого хода в *см*	B	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24
Длина всей горелки в *м*	C	0,81	1,12	1,42	1,73	2,03	2,34	2,64	2,96	3,25	3,56	3,86	4,17	4,47	4,78
Число отверстий		129	193	257	321	385	449	513	577	481	529	831	417	449	481
Расстояние между отверстиями в *мм*	D	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	12,70	12,70	11,11	9,53	9,53	9,53
Размер отверстий M. T. D.		30	31	34	37	40	42	43	44	42	43	52	36	37	38
Число рядов отверстий		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1

[1] Мощность в *м³/час* дана в табл. 167.

Мощность атмосферных трубчатых горелок[1] в *м³/час*

Таблица 167

	Длина горелки в *м*													
	0,61	0,92	1,22	1,53	1,83	2,14	2,44	2,75	3,05	3,35	3,66	3,97	4,27	4,58
1-дюймовый смеситель														
Максимальная мощность при соотношении воздух — газ:														
3:1	0,792	1,019	1,274	1,472	1,726	1,924	2,151	2,462	2,547	—	—	—	—	—
5:1	0,340	0,509	0,623	0,736	0,821	0,906	1,019	1,160	1,274	—	—	—	—	—
7:1	0,170	0,226	0,283	0,368	0,425	0,481	0,538	0,594	0,651	—	—	—	—	—
Минимальная мощность	0,170	0,255	0,311	0,396	0,453	0,509	0,566	0,623	0,679	—	—	—	—	—
Размер инжектора в дм.	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	1	1	—	—	—	—	—
1 1/4-дюймовый смеситель														
Максимальная мощность при соотношении воздух — газ:														
3:1	1,330	1,811	2,207	2,547	2,745	2,887	3,056	3,113	3,198	3,226	3,283	3,339	3,368	3,396
5:1	0,623	0,792	0,962	1,132	1,217	1,274	1,302	1,330	1,358	1,358	1,387	1,415	1,415	1,443
7:1	0,311	0,396	0,481	0,566	0,651	0,679	0,708	0,708	0,708	0,736	0,736	0,764	0,764	0,764
Минимальная мощность	0,198	0,198	0,226	0,255	0,255	0,283	0,311	0,368	0,396	0,453	0,453	0,481	0,509	0,509
Размер инжектора в дм.	3/4	3/4	3/4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1 1/2-дюймовый смеситель														
Максимальная мощность при соотношении воздух — газ:														
3:1	1,698	2,292	2,717	3,000	3,311	3,453	3,594	3,736	3,764	3,764	3,792	3,821	3,849	3,905
5:1	0,821	1,160	1,358	1,500	1,670	1,726	1,783	1,811	1,811	1,811	1,840	1,868	1,896	1,924
7:1	0,538	0,708	0,849	0,934	1,019	1,075	1,104	1,132	1,132	1,132	1,160	1,160	1,189	1,189
Минимальная мощность	0,226	0,226	0,255	0,283	0,311	0,368	0,396	0,425	0,453	0,481	0,509	0,538	0,566	0,566
Размер инжектора в дм.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2-дюймовый смеситель														
Максимальная мощность при соотношении воздух — газ:														
3:1	2,462	3,141	3,651	3,990	4,245	4,415	4,613	4,783	4,839	4,868	4,896	4,924	4,953	5,037
5:1	1,245	1,613	1,868	2,028	2,179	2,264	2,349	2,434	2,462	2,462	2,462	2,490	2,490	2,490
7:1	0,764	1,019	1,189	1,274	1,358	1,415	1,500	1,528	1,528	1,557	1,557	1,585	1,585	1,585
Минимальная мощность	0,255	0,283	0,311	0,340	0,368	0,396	0,453	0,509	0,566	0,623	0,679	0,708	0,736	0,764
Размер инжектора в дм.	1	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4

[1] Размеры инжектора даны для атмосферных смесителей типа Вентури; мощности даны в *м³/час* для газа с теплотворной способностью 10 200 *Кал* и удельным весом 0,65. Исследование произведено Отделом испытаний и осмотра фирмы Pacific Gas and Electric Co.

Обратная вспышка происходит легче всего тогда, когда слабая турбулентность дает возможность пламени пойти вниз по одной стороне отверстия. Это может иметь место даже в том случае, когда средняя скорость смеси воздух — газ превышает скорость распространения пламени. Если пламя пойдет вниз по одной стороне отверстия, то смесь частично отклонится по направлению к другой стороне, замедляя движение пламени до такой степени, что скорость движения смеси будет недостаточна для предотвращения общей обратной вспышки.

Температура горелки также влияет на сопротивление обратной вспышки, что очевидно из вышесказанного; кроме того, от повышения температуры увеличивается скорость сгорания. Чем холоднее будет горелка, тем меньше возможность обратной вспышки. Следовательно, глубокие отверстия имеют то достоинство, что они менее подвергаются нагреванию.

Отверстия рекомендуется делать такого размера, чтобы они соответствовали работе вручную, особенно если учесть, что малые отверстия легко забиваются пылью и продуктами сгорания и что просверливание малых отверстий значительно труднее, чем крупных.

С другой стороны, если сделать отверстия слишком большими, осложняется вопрос с обратной вспышкой.

Для горелок, применяемых в бытовых газовых устройствах, предлагаются следующие максимальные цифры:

а) 975 *Кал/см²* сечения отверстия для искусственного газа и не больше № 40 M. T. D. отверстий (сечение 0,048 *м²*). Не допускаются щели, большие 1—2 *мм*.

б) 390—586 *Кал/см²* сечения отверстия для естественного газа и не больше № 30 M. T. D. (сечение 0,083 *см²*). Не допускаются щели, большие 1—2 *мм*.

в) 469 *Кал/см²* сечения отверстия для пропана или бутана и не больше № 32 M. T. D. (сечение 0,068 *см²*).

г) Универсальные горелки для всех видов газа требуют небольших отверстий с общим сечением, приближающимся к сечению, рекомендованному для естественного газа.

6. ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗА

Высшие цифры при отоплении каменным углем относятся к печам со стенками, охлаждаемыми воздухом и водой, и лишь к коротким промежуткам времени.

ПЛАВКА МЕТАЛЛА

Металлы с точки зрения их плавки можно подразделить (весьма приблизительно) на две группы:

1) мягкие металлы, включая свинец, олово и цинк, для плавки которых требуются стальные или чугунные горшки или чаны;

2) алюминий, латунь, медь и никель, для плавки которых требуются тигли или отражательные печи.

Устройство для обогрева. Обычно применяется наружный обогрев горшка или тигля соответствующими горелками или же обогрев ведется в камерах сгорания. В настоящее время работа по обогреву проводится на установках, непосредственно вводимых в газовое пламя. Производительность таких установок гораздо выше, чем при обогреве по „наружному" способу, но с механической точки зрения погружаемые установки годятся не для всех случаев.

Рабочие процессы. Рабочие процессы отличаются один от другого, начиная от индивидуальных нагревов и кончая непрерывным процессом добавления металла и его извлечения.

Приведенные ниже примеры охватывают характерные случаи рабочих процессов по расплавлению металла:

1. Изготовление оловянной трубы	8 час. работы
Максимальный расход газа (теплотворной способностью 4900 *Кал*)	3,96 *м³*
Всего израсходовано газа	15 *м³*
Всего расплавлено металла	480 *кг*
2. Изготовление брусков для припоя	8 час. работы
Всего израсходовано газа (теплотворной способностью 4900 *Кал*)	36 *м³*

Таблица 168

Температурные пределы различных применяемых в промышленности[1] рабочих процессов по нагреву

Характеристика работы	Каление цвета	Максимальная температура °F	Максимальная температура °C	Температурные пределы °C
Теоретическая температура пламени, городской газ	—	3 550	1 955	—
Максимальная температура при испытании огнеупорного кирпича	—	3 400	1 871	—
Трубки пирометра	—	3 300	1 815	—
Плавка платины	—	3 200	1 760	—
Штампование вольфрама	—	3 100	1 704	—
Плавка и облагораживание стали	—	3 000	1 649	1 420—1 650
Сварка стали и железа	—	2 800	1 538	1 150—1 540
Плавка монель-металла	—	2 800	1 538	—
Прокаливание огнеупорного кирпича	—	2 786	1 530	1 330—1 530
Плавка жароупорного стекла	—	2 700	1 482	1 370—1 480
Плавка боро-силикатного стекла	—	2 700	1 482	1 370—1 480
Плавка никеля	—	2 642	1 450	—
Прокаливание фарфора (запальные свечи)	—	2 600	1 427	—
Очистка меди	—	2 550	1 399	1 090—1 400
Осаживание болтовых головок	—	2 400	1 315	1 260—1 320
Плавка меди, латуни и бронзы	—	2 400	1 315	1 150—1 320
Плавка флинтгласса	—	2 400	1 315	1 200—1 320
Плавка известкового и опалового стекла	—	2 400	1 315	1 200—1 320
Ковка молотом	—	2 400	1 315	1 260—1 320
Нагрев плашек, болванок и криц	Белый	2 300	1 260	1 200—1 260
Нагрев заклепок	»	2 300	1 260	1 200—1 260
Плавка латуни	»	2 250	1 232	900—1 230
Закалка быстрорежущей стали	»	2 200	1 205	980—1 200
Прокаливание графита для карандашей	»	2 050	1 121	—
Отжиг полос до цвета побежалости	»	2 000	1 093	820—1 090
Пайка твердым припоем рукояток для гольфа	»	2 000	1 093	1 070—1 090
Плавка золота	Светло-желтый	1 945	1 063	—
Закалка углеродистой и легированной стали	То же	1 900	1 038	760—1 040
Наведение глазури на фарфоровую посуду	»	1 900	1 038	820—1 040
Отжиг платины и константана	»	1 900	1 038	—
Глазурование канализационной трубы и пустотелой черепицы для зданий	»	1 900	1 038	980—1 040
Глазурование-эмалирование труб в ванной	Лимонный	1 800	982	760— 980
Глазурование-эмалировка стальных и кухонных изделий	»	1 800	982	870— 980
Свинцовая и цианистая закалка	»	1 800	982	760— 980
Плавка серебра	»	1 760	960	—
Карбонизация	»	1 750	954	760— 950
Отжиг стального литья	»	1 700	927	820— 930
Покрывание железа или стали алюминием	»	1 700	927	—
Отжиг прокатанной и кованой углеродистой стали	»	1 700	927	650— 930
Отжиг рессор	Желтовато-розовый	1 650	899	840— 900
Отжиг ковкого чугуна	—	1 600	871	700— 870

[1] Из "Industrial Heating Processes", Surface Combustion Co.

Продолжение табл. 168

Характеристика работы	Калильные цвета	Максимальная температура °F	Максимальная температура °C	Температурные пределы °C
Эмалирование рафовки и стали для каминов	—	1 600	871	760—870
Отжиг красок и специальный отжиг оловянных плит	—	1 600	871	760—870
Прокаливание грунтовых красок	—	1 600	871	—
Отжиг стекла	Ярко-красный	1 500	816	370—820
Восстановление железной руды	То же	1 500	816	260—820
Отжиг стеклянных линз	»	1 500	816	370—820
Отжиг высокоуглеродистой стали	»	1 500	816	760—820
Отжиг листов никеля и монель-металла	»	1 472	800	600—805
Отжиг никелевой проволоки и проволоки из специальных сплавов	»	1 472	800	600—800
Отжиг стали для изготовления проволоки и полос	Красный	1 400	760	650—760
Прокаливание металлических щеток	Вишневый	1 250	677	—
Плавка алюминия	»	1 217	658	—
Отжиг заготовок никелевых и серебряных изделий	—	1 200	650	350—650
Отжиг меди	Кроваво-красный	932	500	250—500
Отжиг латунных заготовок	То же	932	500	250—500
Цинкование	Тускло-красный	900	482	430—480
Плавка баббита	То же	824	440	335—440
Отжиг алюминия	»	752	400	200—400
Плавка электротипа	—	700	371	—
Плавка стереотипа	—	700	371	340—370
Поджаривание кофе	—	700	371	340—370
Луженые стальных листов	—	650	343	315—340
Закаливание быстрорежущей стали	—	630	330	205—330
Плавка свинца	—	621	327	—
Варка лаков	—	600	316	270—315
Прокаливание сердечников	—	600	316	205—315
Деодоризация касторового масла и рыбьего жира	—	550	288	260—290
Хлебопечение	—	500	260	170—260
Печение пирогов	—	500	260	245—260
Закалка в масле	—	500	260	—
Расплавливание асфальта для пропитывания проволоки	—	450	232	175—230
Варка льняного масла	—	400	204	—
Плавка припоя	—	400	204	—
Поджаривание картофеля	—	400	204	—
Поджаривание картофеля по-французски	—	350	177	—
Луженые оловом	—	300	149	—
Производство леденцов	—	300	149	—
Лакирование в печи	—	300	149	—
Валы для каландров	—	300	149	—
Высушивание или прокаливание проволоки	—	300	149	—
Чистка резервуаров	—	200	93	—
Высушивание замерзшего стекла	—	100	38	50—55
Копчение мяса	—	100	38	—

Таблица 169

Выбор приборов для автоматического регулирования температуры [1]

Рабочий процесс	Пределы температур в °С	Обычно применяемые системы сгорания	Рекомендуемая система контроля температуры	Возможная система регулирования температуры
Отжиг:				
Углеродистая сталь	732— 815	Пропорциональный смеситель низкого давления	Термоэлектрическая (дроссельный соленоид или моторный клапан)	Термоэлектрическая (специальный электрический клапан)
Проволока	650— 760			
Латунные штамповки	260— 510			
Медь	260— 537			
Латунь	595— 760	Пропорциональный смеситель высокого давления	Термоэлектрическая (специальный клапан)	—
Стальные плашки	773— 843			
Ковкое железо	730— 955			
Стальные листы	787—1 093	Газ высокого давления	Термоэлектрическая (моторный или прямой соленоидный клапан)	Термоэлектрическая (специальный электрический клапан)
Карбонизация	787— 954	Двухтрубная продувка	Контроль одним клапаном	Термоэлектрическая (мотор или соленоидный сдвоенный клапан)
Закалка углеродистой и легированной стали	760—1 065	Частичная предварительная смесь	Термоэлектрическая (мотор или прямой соленоидный клапан)	—
Закалка быстрорежущей стали	1 010—1 287	Полная предварительная смесь	Термоэлектрическая (мотор или соленоидный клапан)	—
Закалка в свинце и цианистом растворе	760— 954	—		
		См. ниже „прокаливание сердечника"	См. ниже „прокаливание сердечника"	—
Закалка в масле	176— 260	Атмосферные форсунки	Термостатический регулятор с запальником	Термостаты прямого действия (для небольших работ)

Печение:		Пропорциональный смеситель низкого давления	Дроссельный соленоид или моторный клапан	Термостатический регулятор с запальником
		Газ высокого давления	Дроссельный соленоид или прямой соленоидный клапан	—
Хлеба	165— 260	Двухтрубная продувка	Контроль одним клапаном	Термостатический регулятор (сдвоен. с запальником)
Пирожков	232— 287	Атмосферные форсунки	Термостатический регулятор с запальником	—
		Пропорциональный смеситель низкого давления	Термостатический регулятор (дроссельный диафрагменный клапан) с запальником	Дроссельный диафрагменный клапан
		Газ высокого давления	Термостат прямого действия (типа высокого давления)	Моторный или прямой соленоидный клапан
Плавка баббита	340— 450	Двухтрубная продувка	Контроль одним клапаном	Термостатический регулятор (сдвоенные клапаны) с запальником
		Атмосферные горелки	Термостатический регулятор с запальником	—
		Газ высокого давления	Термостат прямого действия (типа высокого давления)	Моторный или прямой соленоидный клапан
		Пропорциональный смеситель низкого давления	Термостатический регулятор (дроссельный диафрагменный клапан) с запальником	Дроссельный соленоидный или моторный клапан
Прокаливание сердечника:				
Непрерывное Небольшие печи	190— 260	Пропорциональный смеситель высокого давления	Термостат прямого действия (типа высокого давления)	Специальный клапан
		Двухтрубная продувка	Регулировка одним клапаном	Термостатический регулятор (сдвоенные клапаны) с запальником
		Атмосферные горелки	Термостатический регулятор с запальником	Термостат прямого действия (для небольших работ)

[1] O. M. Olsen, Eclipse, Fuel Engineering Company, Rockford, Ill.

Продолжение табл. 169

Рабочий процесс	Пределы температур в °С	Обычно применяемые системы сгорания	Рекомендуемая система контроля температуры	Возможная система регулирования температуры
Плавка электротипа . . .	343—400	Пропорциональный смеситель низкого давления	Термостатический регулятор (дроссельный диафрагменный клапан) с запальником	Термостатический регулятор (стандартный диафрагменный клапан) с запальником
		Газ высокого давления	Термостат прямого действия (высокого давления)	Моторный или прямой соленоидный клапан
		Двухтрубная продувка	Регулировка одним клапаном	Термостатический регулятор (сдвоенные клапаны) с запальником
•		Пропорциональный смеситель низкого давления	Термоэлектрическая (дроссельный, соленоидный или моторный клапан)	Термостатический регулятор (дроссельный диафрагменный клапан) с запальником
Цинкование	420—495	Газ высокого давления	Термоэлектрическая (дроссельный, соленоидный или моторный клапан)	Термостат прямого действия
		Двухтрубная продувка	Контроль одним клапаном	Термостатический регулятор (сдвоенные клапаны) с запальником
Разогрев клея	60— 65	Атмосферные форсунки	Термостат прямого действия (для небольших работ)	Термостатический регулятор (для больших работ) с запальником
Варка ветчины	68— 74	Атмосферные форсунки	Термостатический регулятор с запальником	Термостат прямого действия (для небольших работ)
Горячая лакировка	135—204	См. „прокаливание сердечника"	См. „прокаливание сердечника"	—
Высушивание краски . . .	65— 93	См. „прокаливание сердечника"	См. „прокаливание сердечника"	—

		ситель низкого давления	лятор (дроссельный диафрагменный клапан) с запальником	—
Жарение каштанов	162—176	Двухтрубная продувка	Регулировка одним клапаном	Термостатический регулятор (сдвоенные клапаны) с запальником
		Атмосферные горелки	Термостатический регулятор с запальником	Термостат прямого действия (для небольших работ)
Поджаривание картофеля .	176—182	См. „жарение каштанов"	См. „жарение каштанов"	—
Приготовление колбасы .	76— 93	См. „варка ветчины"	См. „варка ветчины"	—
Копчение:				
Свиной грудинки . . .	43— 50	Пропорциональный смеситель низкого давления	Термостатический регулятор (дроссельный диафрагменный клапан)	—
		Пропорциональный смеситель высокого давления	Термостатический регулятор (специальный клапан) с запальником	Термостат прямого действия
Ветчины	43— 50	Газ высокого давления	Термостат прямого действия (типа высокого давления)	Моторный или прямой соленоидный клапан
Колбасы сухой	21— 38	Двухтрубная продувка	Регулировка одним клапаном	Термостатический регулятор (сдвоенные клапаны)
Колбасы свежей	63— 85	Атмосферные горелки	Термостатический регулятор с запальником	Термостат прямого действия
Плавка стереотипа	326—357	См. „плавка электротипа"	См. „плавка электротипа"	—
Нагрев раствора	50—100	См. „жарение каштанов"	См. „жарение каштанов"	—
Лужение	315—357	См. „плавка электротипа"	—	—
Литографирование на олове	135—205	Атмосферные горелки	Термостатический регулятор с запальником	Термостат прямого действия
		Пропорциональный смеситель низкого давления	Термостатический регулятор (дроссельный диафрагменный клапан)	Термостатический регулятор (стандартный клапан) с запальником
		Газ высокого давления	Термостат прямого действия	—
Варка лака	300—330	Пропорциональный смеситель высокого давления	То же	Специальный клапан
		Двухтрубная продувка	Контроль одним клапаном	Термостатический регулятор (сдвоенные клапаны) с запальником

Таблица 170

Температура плавления конусов Зегера

Номер конуса	Температуры плавления				Номер конуса	Температуры плавления			
	первоначальная шкала		пересмотренная[1] шкала			первоначальная шкала		пересмотренная[1] шкала	
	°F	°C	°F	°C		°F	°C	°F	°C
0,022	1 094	590	—	—	10	2 426	1 330	—	—
0,021	1 148	620	—	—	11	2 462	1 350	—	—
0,020	1 202	650	—	—	12	2 498	1 370	—	—
0,019	1 256	680	—	—	13	2 534	1 390	—	—
0,018	1 310	710	—	—	14	2 570	1 410	—	—
0,017	1 364	740	—	—	15	2 606	1 430	—	—
0,016	1 418	770	—	—	16	2 642	1 450	—	—
0,015	1 472	800	—	—	17	2 678	1 470	—	—
0,014	1 526	830	—	—	18	2 714	1 490	2 714	1 490
0,013	1 580	860	—	—	19	2 750	1 510	2 750	1 510
0,012	1 634	890	—	—	20	2 786	1 530	2 786	1 530
0,011	1 688	920	—	—	21[2]	2 822	1 550	—	—
0,010	1 742	950	—	—	22[2]	2 858	1 570	—	—
0,09	1 778	970	—	—	23[2]	2 894	1 590	—	—
0,08	1 814	990	—	—	24[2]	2 930	1 610	—	—
0,07	1 850	1 010	—	—	25[2]	2 966	1 630	—	—
0,06	1 886	1 030	—	—	26	3 002	1 650	2 912	1 600
0,05	1 922	1 050	—	—	27	3 038	1 670	2 948	1 620
0,04	1 958	1 070	—	—	28	3 074	1 690	2 975	1 635
0,03	1 994	1 090	—	—	29	3 110	1 710	3 002	1 650
0,02	2 030	1 110	—	—	30	3 146	1 730	3 038	1 670
0,01	2 066	1 130	—	—	31	3 182	1 750	3 065	1 685
1	2 102	1 150	—	—	32	3 218	1 770	3 101	1 705
2	2 138	1 170	—	—	33	3 254	1 790	3 128	1 720
3	2 174	1 190	—	—	34	3 290	1 810	3 164	1 740
4	2 210	1 210	—	—	35	3 326	1 830	3 191	1 755
5	2 246	1 230	—	—	36	3 362	1 850	—	—
6	2 282	1 250	—	—	37	3 398	1 870	—	—
7	2 318	1 270	—	—	38	3 434	1 890	—	—
8	2 354	1 290	—	—	39	3 470	1 910	—	—
9	2 390	1 310	—	—					

Таблица 171

Пределы теплового напряжения в печах общепринятых типов

Печь	*Кал*, выделяемые на 1 м³ топочного пространства в час
Каменный уголь, шуровка вручную	53 400— 89 000
„ „ механическая шуровка	133 500—267 000
„ „ пылевидный	89 000—400 500
Мазут	44 500—311 500
Естественный газ	267 000—534 000
Искусственный газ	356 000—712 000

[1] Бюро Стандартов, Вашингтон.

[2] Конусы от 21 до 25 (включительно) все расплавляются фактически при одинаковой температуре.

Всего получено припоя	975 *кг* (50% олова и 50% свинца)
Производительность горелки	максимум — 10 $м^3$/*час*, минимум — 1,7 $м^3$/*час*
3. Литье стереотипа	одна неделя работы, включая подогрев металла, пока литье не происходит
Всего израсходовано газа (теплотворной способностью 4900 *Кал*)	662,3 $м^3$
Всего отлито металла	69 387 *кг*
4. Цинкование. Продолжительность работы	3 мес.
Всего оцинковано	466,2 *т*
Всего израсходовано цинка	41,1 *т*
Получено огарков	6,4 *т*
Израсходовано газа (теплотворной способностью 10 600 *Кал*)	27 220 $м^3$
Данные получены во время работы с неполной нагрузкой.	
5. Плавка алюминия. Поддерживание металла расплавленным для слива в формы	8 час. в сутки
Применялась тигельная печь с расходом газа	59 $м^3$/*сутки*
Получено продукции	136 *кг*/*сутки*
Алюминий с содержанием 7% меди	
6. Плавление латуни (красная латунь). Продолжительность работы	один сутки
Применялись тигли № 60	

Таблица 172

Нагрев	1	2	3	4	5	6	7
Загрузка в *кг*	81,5	81,5	82,86	82,86	83,3	83,3	81,9
Время для нагрева в мин.	72	61	46	47	51	50	40
Потеря времени между нагревами в мин.	—	12	17	64	10	11	9
Количество $м^3$ газа	40,2	34,2	25,2	28,7	26	25,6	20,4
Температура нагрева в °С	1 200	1 232	1 177	1 204	1 193	1 220	1 143

Всего 7 нагревов

Получено металла	577,6 *кг*
Расход газа (теплотворной способностью 4900 *Кал*)	203 $м^3$
Количество $м^3$ газа на 1 *кг*	0,35

В прошлом большая часть печей для плавки металла изготовлялась полностью из кирпича. Однако в современной практике наблюдается тенденция к применению легких огнеупорных футеровок, довольно толстой изоляции и помещению печей в стальные кожухи. Коэфициент полезного действия значительно повышается при сокращении или исключении огнеупора всюду, где это возможно, особенно в печах, применяемых для периодической работы. Чем выше температура работы печи, тем более основательной должна быть огнеупорная футеровка.

В табл. 175 приведены сводные данные, взятые из данных заводских журналов Американской газовой ассоциации. Материал этой таблицы можно считать типичным и показательным, но его нельзя брать для сравнения одной печи с другой.

ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА

Тепловая обработка черных и цветных металлов охватывает почти целиком всю шкалу температур и происходит в любой среде: масле, воде, солях, воздухе и инертных газах. Обратившись к „Selected Bibliography of Articles and Reports

Термические свойства и веса простых металлов-элементов[1]

Таблица 173

	Средняя[2] уд. теплота от 15,56°C до т-ры плавления в *Кал/кг* на 1°C	Температура плавления в °C	Теплосодержание в твердом металле при температуре плавления в *Кал/кг*	Скрытая теплота плавления в *Кал/кг*	Всего тепла в жидком металле при т-ре плавления в *Кал/кг*	Средняя уд. теплота жидкого металла[3] в *Кал/кг* на 1°C	Средняя т-ра литья в °C	Тепло, добавляемое от т-ры плавления к т-ре литья в *Кал/кг*	Всего тепла в жидком металле при т-ре слива в *Кал/кг*	Удельный вес
Алюминий	0,248	657	159,12	93,95	253,08	0,252	749	23,11	276,19	2,67
Сурьма	0,054	630	33,17	38,89	72,06	0,054	716	4,61	76,67	6,76
Висмут	0,033	270	8,39	10,28	18,67	0,035	327	2,00	20,67	9,82
Кадмий	0,058	321	20,78	10,83	31,61	0,074	399	5,78	37,39	8,65
Хром	0,157	1 611	266,19	—	266,19	—	—	—	—	7,00
Медь	0,104	1 084	111,06	50,45	161,51	0,111	1 205	13,45	174,96	8,89
Золото	0,033	1 063	34,56	15,83	50,39	0,034	1 177	3,89	54,28	19,30
Железо: 15,56—1 530°C	0,164	1 531	248,41	49,39	297,80	0,150	1 601	10,50	308,30	7,87
Железо: 15,56— 725°C	0,147	725—785[4]	104,29[5]	6,56[6]	110,84	Тепло в твердом металле после первого преобразования				—
Железо: 15,56— 920°C	0,158	921[4]	142,90[5]	6,67[6]	149,57	Тепло в твердом металле после второго преобразования				—
Железо: 15,56—1 405°C	0,158	1 406[4]	219,57[5]	1,94[6]	221,52	Тепло в твердом металле после третьего преобразования				—
Свинец	0,032	327,5	10,00	5,50	15,50	0,032	382	1,78	17,28	11,4
Магний	0,272	651	172,90	46,50	219,41	0,266	749	26,00	245,41	1,74
Марганец: 15,56—1 220°C	0,171	1 231	207,68	36,61	244,30	0,192	1 316	16,45	260,74	8,0
Марганец: 15,56—1 070°C	0,148	1 071—1 131[4]	156,07[5]	24,17[6]	180,24	Тепло в твердом металле после преобразования				—
Никель: 15,56—1 451°C	0,134	1 452	192,35	73,01	265,35	0,133	1 566	15,22	280,58	8,85
Никель: 15,56— 320°C	0,127	320—330[4]	38,67[5]	2,00[6]	40,67	Тепло в твердом металле после преобразования				—
Серебро	0,063	961	59,56	26,00	85,56	0,070	1 066	7,33	92,90	10,5
Олово	0,069	232	14,95	13,83	28,78	0,060	343	6,67	35,45	7,38
Цинк	0,107	419,2	43,17	26,61	69,78	0,146	482	9,22	79,01	7,10

[1] Из „Combustion", изд. 3, Американская газовая ассоциация (А. С. А.).
[2] В среднюю удельную теплоту включено тепло, абсорбируемое при аллотропических изменениях, происходящих в пределах этого температурного промежутка.
[3] Средняя удельная теплота от температуры плавления до температуры слива.
[4] Точка трансформации.
[5] Тепло в твердом металле вплоть до точки трансформации.
[6] Аллотропическое тепло при температуре, отмеченной в третьей колонке.

Таблица 174

Термические данные по металлическим сплавам [1]

Сплав	Состав в процентах по весу	Средняя уд. теплота от 15,66° С до т-ры плавления в *Кал/кг* на 1°С	Температура плавления в °С	Тепло в твердом металле при т-ре плавления в *Кал/кг*	Скрытая теплота плавления в *Кал/кг*	Всего тепла в жидком металле при т-ре плавления в *Кал/кг*	Средняя уд. теплота жидкости в *Кал/кг* на 1° С	Средняя т-ра литья в °С	Всего тепла в жидкости при т-ре литья в *Кал/кг*
Баббит [2]									
Основание — свинец	75 Pb, 15 Sb, 10 Sn	0,039	229	8,78	14,56	23,34	0,033	330	26,78
Основание — олово	83,3 Sn, 8,48 Sb, 8,3 Cu	0,071	240	15,89	18,95	34,84	0,063	491	50,67
Латунь:									
Муиц-металл [3]	60 Cu, 40 Zn	0,105	898	91,07	38,34	120,01	0,125	1 011	145,29
Желтая [3]	67 Cu, 33 Zn	0,105	921	96,01	30,45	134,46	0,123	1 066	152,25
	70 Cu, 30 Zn	0,105	955	98,62	42,23	140,84	0,121	1 094	157,68
Красная [3]	85 Cu, 15 Zn	0,104	1 026	106,01	46,89	151,90	0,116	1 177	169,46
	90 Cu, 10 Zn	0,104	1 067	109,45	65,06	157,51	0,115	1 233	176,57
Бронза:									
Алюминий [3]	90 Cu, 10 Al	0,126	1 051	130,45	54,78	185,24	0,125	1 205	204,57
Колокольный металл [3]	78 Cu, 22 Sn	0,100	891	87,45	42,29	129,84	0,119	1 038	147,46
Пушечный металл [3]	90 Cu, 10 Sn	0,107	1 011	106,40	46,78	153,18	0,106	1 150	167,90
Металл Тобина [3]	60 Cu, 39,2 Zn, 0,8 Sn	0,107	886	93,06	40,84	133,90	0,124	1 011	149,40
Подшипники [3]	80 Cu, 10 Zn, 10 Sn	0,095	1 000	93,51	44,39	137,90	0,109	1 122	151,12
Отливки матриц [4]									
Основание — цинк	87,3 Zn, 8,1 Sn, 4,1 Cu, 0,5 Al	0,103	416	41,23	26,84	68,06	0,138	527	83,40
Основание — олово	90 Sn, 4,5 Cu, 5,5 Sb	0,070	232	15,33	16,83	32,17	0,062	344	30,06
Основание — свинец	80 Pb, 10 Sn, 10 Sb	0,038	316	11,39	9,57	21,06	0,037	426	25,56
Алюминий	92 Al, 8 Cu	0,233	621	142,98	90,62	233,57	0,241	761	257,13
Немецкое серебро [3]	60 Cu, 25 Zn, 15 Ni	0,109	1 011	107,79	47,80	155,68	0,123	1 150	172,79
Линотип	86 Pb, 11 Sb, 3 Sn	0,036	252	8,50	11,95	20,45	0,036	327	23,11
Металлы с низкой т-рой плавления [5]									
Линомина	26 Pb, 13 Sn, 10 Cd, 51 Bi	0,041	60	1,83	9,56	11,39	0,041	88	12,56
Вуда	26 Pb, 13 Sn, 12 Cd, 49 Bi	0,041	70	2,22	9,56	11,78	0,042	99	13,00
Роза	28 Pb, 25 Sn, 10 Bi	0,043	110	4,06	10,17	14,22	0,041	166	16,50
Монель-металл [4]	67 Ni, 28 Cu, 5 Fe + Mn	0,129	1 325	168,90	65,23	234,13	0,139	1 511	260,02
Припой:									
Для паяльников [3]	50 Pb, 50 Sn	0,051	212	10,05	12,78	22,84	0,045	260	25,05
	63 Pb, 37 Sn	0,044	242	10,00	8,22	21,95	0,041	293	24,08
Висмут [3]	40 Pb, 20 Sn, 40 Bi	0,040	111	5,17	9,11	14,28	0,039	166	16,39
Стереотип [3]	82 Pb, 15 Sb, 3 Sn	0,036	279	8,61	14,56	23,17	0,036	327	25,76

[1] Из „Combustion", изд. 3, Американская газовая ассоциация (A. G. A.).
[2] Величины взяты приблизительно по методу смесей.
[3] Удост верены „Copper and Brass Research Association" как показательные величины в свете современного знания.
[4] Получены от „International Nickel Co".
[5] Частные сведения от „National Lead Co".

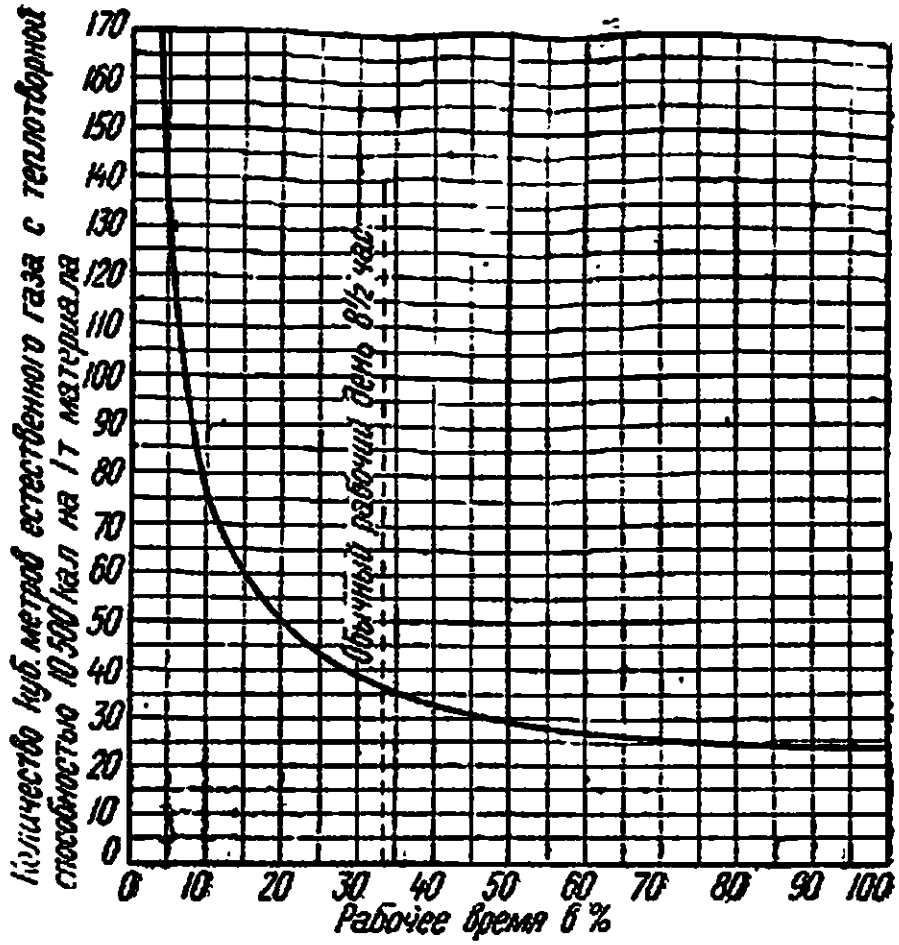
Типичные результаты фактического

	Плавка медного лома	Плавка латуни	Плавка латуни
Вид печи	Тигельная	Хаусфельда	Тигельная № 80 S. C. рекуператор
Размер внутреннего диаметра в *см*	36,7—39,3	—	—
Высота в *см*	50,2	—	—
Система сжигания	Низкое давление	Предварительное	Труба 2″
Давление газа	Низкого давления	152 × 203 *мм*	152 *мм*
Выход	—	Наверху	15 *см* основание рекуператора
Огнеупор в дм.	$4^1/_2$	$4^1/_2$	$4^1/_2$
Вид огнеупора	Карбо-песок	—	Огнеупорный кирпич
Изоляция в дм.	$2^1/_2$	—	—
Рабочая температура в °С	—	1 093	1 037—1 480
Загрузка	67,9 *кг* (80% Cu)	226,8 *кг*	—
Время работы	327 мин.	30 мин.	20 мин.
Время для доведения температуры до точки плавления (в мин.)	—	60	57,5
Количество *Кал/м*³ газа	4 761	9 345	4 761
Количество *м*³/*кг* газа	0,25 после пуска	0,19	0,31
Поверхность рекуперации в *м*²	—	—	2,97

применения газа для плавки металла

Плавка бронзы	Плавка алюминия	Плавка сплавов белого металла	Плавка стереотипа	Плавка свинца	Плавка серебра
Тигельная с голубой футеровкой S. C.	Тигельная с голубой футеровкой S. C.	Алюминиевая № С-29 S. C.	№ 339 Мак-Ки	Металлический горшок C. V.	№ 35 Диксона тигельная
Тигель № 60	Тигель № 60	Горшок № С-29 на 226,8 *кг*	—	—	48,3
Поверхностное сгорание	Поверхностное сгорание	Поверхностное сгорание	Атмосферное	—	2 тангенсальных горелки
152 *мм*	152 *мм*	101 *мм* газа, 0,453 *кг/см²* воздуха	85 *г*	127 *мм*	Низкого давления
—	—	—	Дымоход	Колпак над горшками	—
4	4	—	4½	Небольшая футеровка	4½
Огнеупорный кирпич	Огнеупорный кирпич	—	Огнеупорный кирпич	Цемент С-22	Огнеупорный кирпич
2	2	—	1½	—	2½
980—1 090	650—760	870	270	313—360	1 037
Около 79,3 *кг*	Около 31 *кг*	—	—	—	Примерно 1—2 *кг* или немного больше
2 ч. 34 м.	50 мин.	—	—	40 мин.	—
—	4	—	Непрерывная	Непрерывная	—
4 890	4 890	4 717	5 340	4 890	4 717
0,59	0,87 первый нагрев	0,24	0,007	0,048	0,5
—	—	—	—	—	—

on the Industrial Uses of Gases", изданной Американской газовой ассоциацией, мы найдем там около 125 статей первостепенной важности по этому вопросу. Специфические типичные данные по рабочему процессу, приведенные в табл. 176, взяты из данных Американской газовой ассоциации.



Фиг. 167. Результаты нагрева газом оцинкованного чана (теоретическая кривая, основанная на средних цифрах за 10 недель работы).

Чан 6,1 *м* длины, 1,2 *м* глубины и 0,9 *м* ширины обогревается 30 горелками ударного типа фирмы Surface Combustion Company через огнеупорный под. Нормальная производительность примерно 2 *м/час*. Максимальная производительность горелок 62,2 *м*³/*час*. При ночной работе с закрытым чаном производительность 4,95 *м*³/*час* (естественный газ с теплотворной способностью 10 500 *Кал*).

Определения

Отжиг. Нагрев выше критической температуры, после чего следует сравнительно медленное охлаждение. Отжиг размягчает сталь и уменьшает внутреннее напряжение.

Закаливание. Нагрев выше критической температуры, после чего следует сравнительно быстрое охлаждение водой, маслом или воздухом.

Отпуск. Вторичный нагрев после закалки ниже критической температуры и охлаждение с соответствующей скоростью. Отпуск повышает прочность.

Карбонизация (цементация). Нагрев до некоторой температуры ниже точки плавления в контакте с содержащим углерод материалом, что повышает содержание углерода в стали.

Закалка погружением. Карбонизация поверхности куска (железа или стали) с последующей закалкой путем соответствующей тепловой обработки и быстрого охлаждения.

Таблица 176

Типичные результаты применения газа к различным рабочим процессам тепловой обработки [1]

	Отпуск	Отпуск после закалки	Двойная полуда секцион	Карбонизация	Поверхностная закалка KCN	Ковка	Тепловая обработка матриц
Тип печи	Непрерывного действия	Высокое давление. Поверхностное сгорание	Высокое давление. Поверхностное сгорание	Печь с двойной камерой	Открытый верх с двумя резервуарами, покрытый KCN	—	Джемса Кизлпа
Размер	1 193—в ширину × × 7 000 × 610 *мм* до верхушки	1 950—в ширину × × 3 650 × 1 270 *мм* от задней части вагонетки до свода	—	780 в ширину × × 1 030 × 467 *мм* до верхушки	Две секции 660 × 510 × 410 *мм* с четырьмя горизонтальными горелками на каждой стороне внизу	735 × 635 × 360 и 1 120 × 810 × 635 *мм*	510 × 256 × 200 *мм*
Огнеупорный материал	9" огнеупорный кирпич	4½" огнеупорный кирпич	4½" огнеупорный кирпич	9" огнеупорный кирпич	6" огнеупорный кирпич	—	4½" огнеупорный кирпич
Изоляция	2½"	2½ и 9" красный кирпич	4½"	2½"	6" огнеупорный кирпич	—	Карборундовая топочная коробка и 4½" Sil-O-Cel
Производительность	14 часов, 963 *кг*, каратные, на 24 час., 25,85 *кг* на час	—	—	—	—	—	1—4 матрицы
Рабочая температура в °С	1-я: от 760 до 770 2-я 605	427	882	954	788—815	1 038	700—982
Давление газа	—	0,73 *кг/см²*	0,07—0,73 *кг/см²*	—	152,4 *мм* водяного столба возд. 0,1 *кг/см²*	—	127 *мм* водяного столба
Калорийность газа в *Кал/м³*	4 900	4 630	4 760	5 210	5 340	4 630	4 900
Испытание или гарантия поставщика: время для нагрева	от 260 до 650°С 40 мин.	30 мин.	—	3 часа	—	40 мин.	30 мин.
Расход газа на нагрев	62,8 *м³*	—	—	—	—	—	—
Проделанная работа	886 *кг/час* при 649°С, 566 *м³* нагреют 1 247 *кг/час* при 720°С, 41,46 *м³* после 7 час.	Через 1½ часа 1028 *м³* газа на 1 *кг*	Через 2½ мин. 1096 *м³* газа на 1 *кг*	Работа в трубах с обмазанными глиной концами и под температурой в течение от 5 до 36 час.	Через ¾ часа 0,206 *м³* газа на 1 *кг* изделия нагреваются до красного каления и остаются связанные на 45 мин.	Нагрев 190 *кг* заготовки до 1 093°С в 33 мин.; от 0,125 до 0,145 *м³* газа на 1 *кг*	Матрица 6½"—2,25—11,33 *кг*; 0,43 *м³* газа на 1 *кг*

[1] По данным Американской газовой ассоциации (A. G. A.).

Температурные пределы, приведенные в табл. 177 и 178, для обыкновенных углеродистых сталей являются лишь приблизительными. В практику тепловой обработки сталей входят отжиг, нормализация, закалка, отпуск, карбонизация и азотирование, а также много специальных тепловых обработок, применяемых к некоторым изделиям, например к проволоке, полосам металла и т. д. Добавление никеля, хрома, ураниума, молибдена и других элементов для сплава значительно изменяет температуры тепловой обработки, и таковые во многих случаях весьма значительно разнятся от температурных пределов, указанных для обыкновенных углеродистых сталей.

Таблица 177

Температуры отжига для углеродистых сталей [1]

Пределы содержания углерода в %	Температура отжига в °С
Меньше 0,12	925—870
0,12—0,25	870—840
0,30—0,49	840—815
0,50—1,00	815—790

Таблица 178

Температура закалки для углеродистых сталей

Содержание углерода в %	Охлаждение	Температура закалки в °С
До 0,20	Водой	900—870
0,20—0,35	»	870—840
0,35—0,50	»	840—815
0,50—0,70	Водой или маслом	815—790
0,70—0,90	» » »	790—760
0,90 и выше	Рассолом, водой или маслом	760—730

По мере повышения содержания углерода в данном пределе нужно брать более низкую температуру. После закалки — применять отпуск для увеличения твердости путем вторичного подогрева.

Карбонизация газом [2]

Приведенные ниже сведения из области карбонизации городским газом получены фирмой The Peoples Gas Light and Coke Co. в лице Wozasek под наблюдением R. G. Guthrie. В этом исследовании был взят каменноугольный газ с теплотворной способностью 4800 *Кал* и с удельным весом 0,515. Метан и окись углерода не участвуют в процессе карбонизации, но иллюминанты каменноугольного газа являются активными компонентами. Для хорошей работы содержание осветительных компонентов должно быть приблизительно вдвое больше двуокиси углерода. Соотношение водорода к иллюминантам может повлиять на активность газа. Влажность газа заметно понижает скорость проникновения. Для устранения этого газ следует высушивать путем пропускания через дегидратор с продажным хлористым кальцием. Материал для дегидрации может регенерироваться путем

[1] Более подробно об этих сталях см. Bullens, Steel and Its Heat Treatment, Wiley; Sauveur, The Metallography and Heat Treatment of Steel, McGraw-Hill; Becket, High Speed Steel, McGraw-Hill; Marks, Mechanical Engineering Handbook, McGraw-Hill; „National Metals Handbook", Am. Soc. for Steel Treating; „S. A. E. Handbook", Soc. of Automotive Engineers.

[2] „Peoples Gas Light and Coke Co".

нагрева. Для полного высушивания этот материал перед его помещением в дегидратор следует нагреть до температуры от 300 до 500° С.

Фирма Saffer Ball Bearing Co. применила одну загрузку непрерывно в течение 3 мес. с удовлетворительными результатами. Оказалось, что малейшая окись действовала как катализатор и помогала проникновению углерода. Избыточная окись останавливала проникновение. Если вводить воду в реторту в течение 3 мин. со скоростью 10 капель в минуту, то карбонизируемая поверхность будет надлежащим образом подготовлена к приему углерода. Вода вводится в реторту путем применения обычного капельного лубрикатора. Важна скорость потока газа: малое количество газа не даст достаточной плотности углерода, а избыток газа приведет к отложению сажи, замедляющей процесс. Для работы достаточен расход газа 0,7—2,12 *м*³/*час*. Эти скорости годятся для газа с давлением 0,7 *ат*, причем поправочный коэфициент не применяется.

Если демаркационная линия между наружным слоем и сердечником будет слишком резкой, следует дать изделию возможность поглощать углерод при температуре реторты под давлением газа, но без добавления последнего. Это обусловит надлежащую диффузию без декарбонизации поверхности. Утверждают, что при хорошей карбонизации пламя будет иметь некоторый определенный цвет. Если за пламенем поставить руку, то будет казаться, что пламя на вид такое же, как при свете ртутной дуги, т. е. красный спектр будет казаться черным.

Три часа карбонизации при температуре 925° С должны дать наружный слой 1,082 *мм*.

Данные по расходу газа для различных операций тепловой обработки

Газ с теплотворной способностью 4800 *Кал* и удельным весом 0,515.

Нормы:

Электрическая — 175 kWh на тонну.
Газовая — 0,125 *м*³/*кг*; 590 *кг*/*час*.

Ванна для карбонизации:

0,25 *м*³/*кг* брутто или 1,0 *м* нетто . . . } Загрузка 381 *кг*;
Слой 0,889—1,016 *мм* . . . . . } 2 загрузки в сутки.

Карбонизация газом:

0,343 *м*³ нетто для нагрева газовой среды: 0,02 *м*³/*кг* или 20 *м*³/*т*.
Загрузка — 270—680 *кг*.
Производительность процесса — 590 *кг*/*час*, 0,125 *м*³/*кг*.

Противоточная карбонизация:

82 *т*/*сутки* (24 часа).
0,04 *м*³/*кг* брутто.
Без противотока — 0,07 *м*³/*кг* брутто.

Периодическое закаливание:

0,075 *м*³/*кг*.

Соляная ванна:

0,07—0,125 *м*³/*кг*.

ХЛЕБОПЕЧЕНИЕ

Применение тепла в хлебопечении[1]

Обзор результатов исследования. 1. Хлеб пекли в двух промышленных конвейерных печах в одной и той же пекарне из теста одного и того же замеса, причем одна печь обогревалась главным образом радиацией, а другая — по преимуществу конвекцией. Не было отмечено заметной разницы ни в наружном виде, ни в качестве выпеченного хлеба.

[1] Исследование, проведенное American Institute of Baking and Surface Combustion Co.

2. Хлеб выпекался в атмосфере несгоревшего городского газа. Что касается вкуса хлеба, то не было обнаружено никаких нежелательных последствий от применения этого топлива.

3. Хлеб выпекался одновременно в трех экспериментальных печах из теста одного замеса. Контроль в то время не был доведен до совершенства. Выпеченный хлеб получился одинакового качества за исключением хлеба из печи № 1. Хлеб из печи № 1 во всех случаях неизменно имел более толстую корку. При повторных испытаниях в условиях точного контроля, разработанного на протяжении исследования, были получены точно такие же результаты.

4. Результаты, полученные в ранних испытаниях, показали, что в печах с конвекционным теплом потери в весе при выпечке были больше, чем в низкотемпературных печах с радиацией. Было найдено, что разница эта объясняется недопеканием боков караваев средних форм в печи с радиацией. Увеличение форм в этой печи дало в результате потерю при выпечке, равную такой же потере в печи, работающей конвекцией.

5. При производстве этого исследования был разработан прибор для быстрого определения степени выпечки хлеба. При помощи этого прибора, названного „пенетрометром", оказалось возможным делать удобные стандартные определения степени выпечки хлеба, необходимые для успешного производства испытаний.

Возможно, что этот прибор окажется пригодным для контроля и при промышленном хлебопечении.

Выводы. 1. Лучшим способом применения тепла для хлебопечения является либо низкотемпературная радиация, либо конвекция, либо их комбинация.

2. Газ можно применять с одинаковым успехом и для конвекции, и для низкотемпературной радиации, и для их комбинации.

3. Выбор способа нагрева зависит главным образом от соображений экономических, а также от конструкции печи в связи со свойствами имеющегося топлива

Хлебопекарные печи

Типы печей. Конвейерные ленточные печи.
Конвейерные люлечные печи.
Печи с вращающимся подом.
Полочные печи.

Способы нагрева печей. а) Газовые горелки с предварительным смешиванием газа с воздухом; сжигание топлива — в пекарной камере или в трубке из сплава в этой камере.

б) Атмосферные горелки; подачи тепла в камеру сгорания. Горячие газы проходят через печь или по каналам, нагревающим кирпичную кладку печи.

с) Воздуходувные горелки; сжигание топлива непосредственно в пекарной камере.

Фактически все печи за редкими исключениями топятся во время печения в них непрерывно.

Необходимое количество тепла. Расход тепла брутто на единицу продукта значительно видоизменяется в зависимости от нескольких важных факторов; сюда относятся:

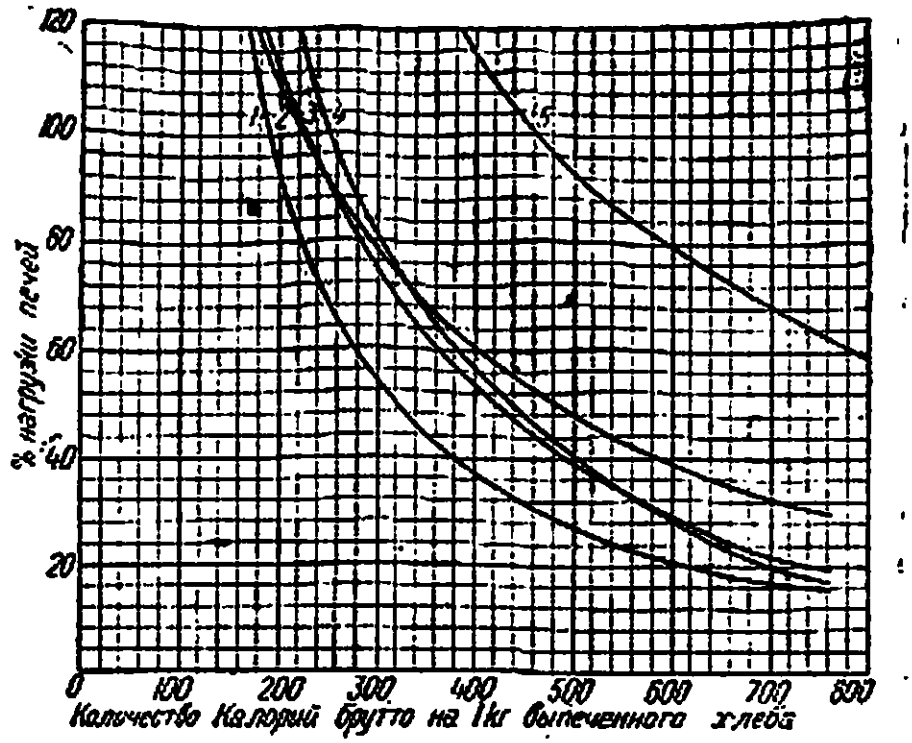
1. Тип конструкции печи: а) кирпичная, б) металлическая с изоляцией, в) комбинация предыдущих.

2. Продолжительность работы печи (непрерывная или периодическая).

3. Вид выпекаемого товара: один требует форм или пара; другой, большого размера (например французский хлеб), дает большую нагрузку на единицу площади пода; некоторые же товары, легкие по своему весу (например печенье и пирожные), мало нагружают своим весом под печи.

4. Коэфициент полезного действия газовой горелки. С этой точки зрения идеальным является такое устройство, когда температура дымовой трубы близка к температуре выпечки, а содержание двуокиси углерода в газах дымовой трубы является предельным. На фиг. 168 кривые указывают необходимое количество топлива для печей различных типов и для различных нагрузок.

При тщательном регулировании горелок и заслонок вполне возможно достичь коэфициента полезного действия сгорания, равного 80%. Однако вследствие неопытности обслуживающего персонала этот коэфициент легко может понизиться на 10—20%, главным образом из-за избытка воздуха.



Фиг. 168. Результаты испытаний хлебопекарных печей различного типа.

Кривые основаны на выпечке в течение 8 час. и подогреве от 1 до 1½ час. Сведения взяты из ежедневных записей рабочих журналов хлебопекарен во время исследования. Суточная продукция определяется из средней часовой, умноженной на 8. Суточный расход газа составляется путем умножения на 8 среднего часового расхода во время печения хлеба плюс газ, нужный для подогрева печей; газ с теплотворной способностью 4 900 *Кал.*

№№ кривой	Максимальная часовая производительность
1	2180 фун. люльки
2	1350 „ люлечные печи
3	1830 „ „ „
4	3744 „ печи с ленточным подом—формовой хлеб,
5	1400 „ то же „ „ —подовой хлеб.

Таблица 179

Типичные коэфициенты полезного действия, взятые из испытаний, фактически проведенных на печах

Вид печи	Калорийность газа	Температура в дымовой трубе в °С	Проценты			К. п. д. сгорания в %
			CO_2	O_2	CO	
Tray	4 900	232	8,0	—	—	79,0
Rotary	10 500	260	8,3	6,7	0	78,[illegible]
Brick	10 500	315	9,4	4,5	0	77,4
Dutch	10 100	400	9,7	4,0	0	68,7
„	10 550	233	8,0	7,1	0	79,4

Библиография

„The Application of Heat to Bread Baking", A. G. A., June 1930.
„Bibliography of Articles and Reports on Industrial Uses of Gas", опубликованная Американской газовой ассоциацией (A. G. A.).

Другие ценные пособия

1. „Bakeries, Hotels and Restaurants", A. G. A.
2. „Industrial Data Sheets", издание 1926—1930 гг., A. G. A.

ПОЛУЧЕНИЕ ПАРА

Газ можно применять с целью получения энергии для отопления паровых котлов любого размера.

В табл. 180 приведены типичные сравнительные данные для газа и мазута.

Таблица 180

Результаты испытаний парового котла [1]

Анализ топлива	Газ из Кетта-мил-Хилле	Типичный мазут
Удельный вес	0,67 (воздух = 1)	0,959
Количество *Кал/кг*	13 100	10 400
Углерод в весовых %	76,7	84,5
Водород в весовых %	23,3	12,0
Азот	0,0	0,7
Сера	0,0	1,5
Кислород	0,0	1,3
Количество воды в *кг*, образующейся на 1 *кг* горючего	2.08	1,06
Потеря скрытой теплоты при конденсации воды в %	8,60	5,52

Продолжение

Результаты испытаний	Котел № 1, обогреваемый газом	Котел № 2, обогреваемый мазутом
Продолжительность испытаний в час.	272	260
Расход топлива в час	833 *м*³	790 *кг*
Давление пара в *кг/см*²	10,5	10,5
Влажность пара в %	2,0	2,0
Фактическое количество испаряемой воды в *кг/час*	11 839	11 492
Эквивалентное испарение в час при 100° С и выше в *кг*	11 693	11 329
Число лошадиных сил котла	727	724
Расход топлива на котельную лошадиную силу	1,1 *м*³	1,09 *кг*
Общий термический к. п. д. в %	75,6	73,7
Топливо, нужное для испарения 1000 *кг* воды при 100° С	32,31 *м*³	31,57 *м*³

РЕГЕНЕРАЦИЯ ОТРАБОТАННОГО ТЕПЛА В ПЕЧАХ, ОБОГРЕВАЕМЫХ ТВЕРДЫМ И ЖИДКИМ ТОПЛИВОМ

Как общее правило, установка для утилизации тепла того или иного типа оправдывает затраты на нее при печах, дающих отработанные газы при температуре 540 °С и выше.

В том случае, когда тепло отработанных газов используется для подогрева воздуха, необходимого для сгорания, полученная в результате экономия топлива

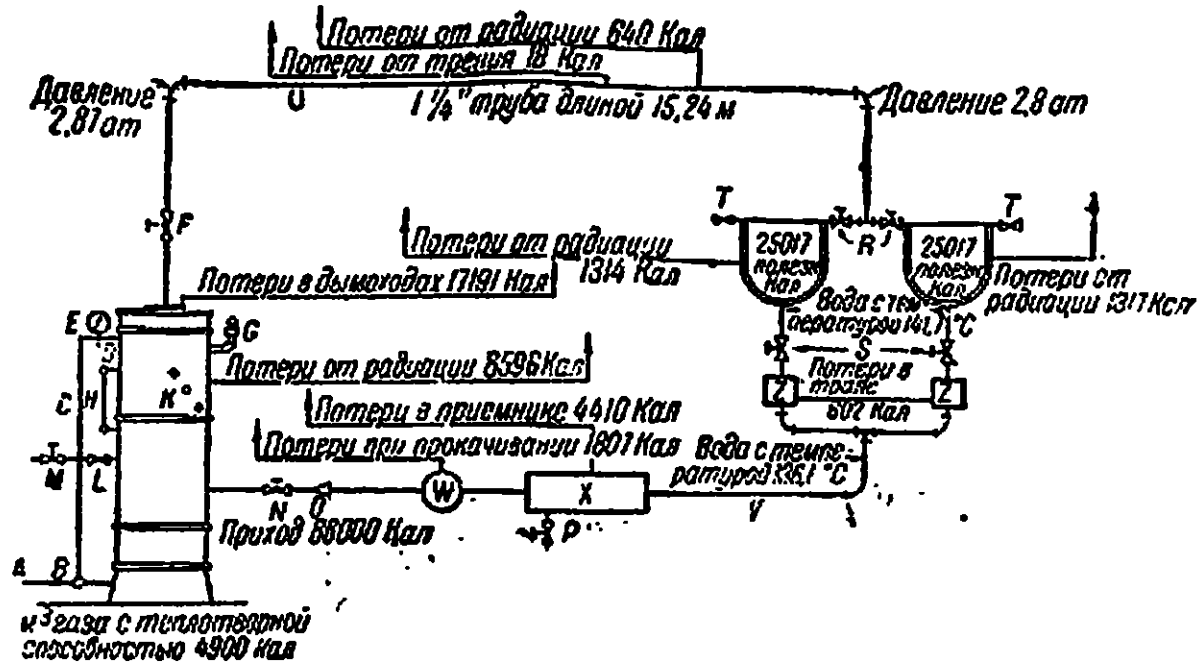
[1] L. P. Stoker, „Western Gas", июнь 1930.

слагается из утилизации физической теплоты и экономии вследствие улучшения сгорания.

Экономия топлива, достигаемая исключительно лишь утилизацией физической теплоты, может быть рассчитана из следующего отношения:

$$\text{Экономия в процентах к основному топливу} = \frac{100a}{H - h + a}, \qquad (1)$$

где H — низшая теплотворная способность на единицу топлива;
h — тепло в отработанных газах на единицу топлива;
a — количество тепла, получаемого воздухом, необходимым для горения, на единицу топлива.



Фиг. 169. Тепловой баланс парового котла.

A — линия подачи газа в котел; *B* — регулятор газа; *C* — линия давления к регулятору (без змеевика); *D* — сифон; *E* — манометр; *F* — главный паровой клапан; *G* — предохранительный клапан; *H* — водомерное стекло; *K* — пробные краны; *L* — кран для продувки; *M* — клапан для продувки; *N* — запорный клапан в обратной линии; *O* — обратный клапан; *P* — запорный клапан в линии для подачи воды; *Q* — обратный клапан в линии для подачи воды; *R* — распределительный клапан к чану; *S* — спускной клапан из чана; *T* — воздушные клапаны; *U* — главная линия для пара; *V* — общая обратная линия; *W* — насос; *X* — приемник; *Z* — паровые трапы.

Регенераторы

Основной принцип любого регенератора заключается в том, что газовые каналы должны быть вертикальные, причем холодные газы опускаются вниз, а нагреваемые — поднимаются вверх. Вертикальные регенераторы обычно работают ровно, но при плохой конструкции они будут работать весьма нерегулярно. Существенно важно, чтобы между кладкой регенеративной камеры и верхом и низом регенератора было оставлено достаточное пространство для газа: слишком малое пространство вызовет сжатие газов и приведет в результате к невозможности равномерного разделения газа в дымоходах регенеративной камеры. Период времени между переменами направления непосредственно влияет на конструкцию кладки регенеративной камеры, хотя условия работы и лежат вне пределов контроля.

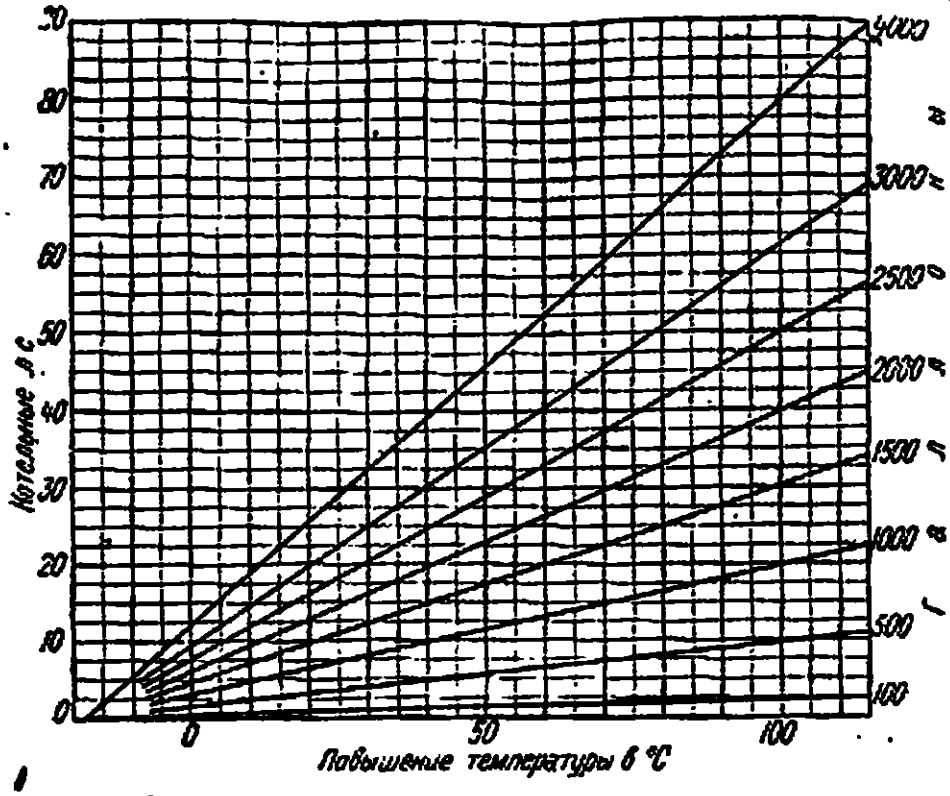
При обычных условиях должны иметь место от 2 до 8 смен направлений в час; кладку регенеративной камеры необходимо соразмерить таким образом, чтобы она соответствовала самому длительному периоду.

Периоды времени между нагревом и охлаждением определяют вес и толщину кирпича кладки регенеративной камеры. Лучший предел нагрева достигается в том случае, когда газы, выходящие из регенеративной камеры, настолько

нагреты, что в период отдачи тепла кладкой температура ее не падает ниже начальной температуры входящих газов плюс разность температур, необходимая для теплопередачи.

Обычно регенераторы применяются при больших печах для плавки стали и стекла, где температура отработанных газов, выходящих из печи, доходит до 1500 °С или выше вследствие сгорания части топлива в дымоходах для отработанных газов.

Наиболее важные переменные, входящие в конструкцию регенераторов, следующие: размер печи и регенератора, частота перемен направления, толщина кирпичной кладки регенеративной камеры, вес кирпичной кладки, подвергаемая



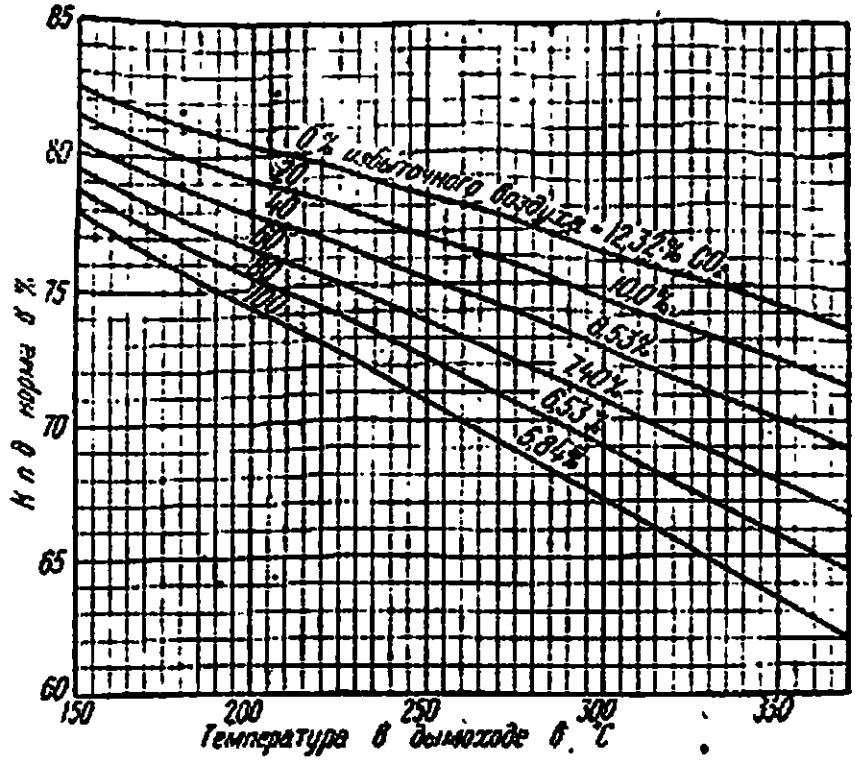
Фиг. 170. Количество котельных лошадиных сил, нужное для нагрева данных количеств воды или раствора при различных повышениях температуры в 1 час. Для 2-часового нагрева — разделить на 2; для 3-часового нагрева — разделить на 3.

Эта удобная для применения на практике диаграмма охватывает тепловые потери и потери от радиации. При применении для нагревания змеевиков весь конденсат должен возвращаться в котел. Котел расположен на расстоянии не более 6 *м* от установки. Все паровые линии надежно изолированы.

действию тепла поверхность кирпичной кладки, борова для отходящих газов и, наконец, утечка в задвижках (см. раздел по теплопередаче).

К кладке регенеративной камеры предъявляется ряд требований и даются различные методы для определения ее производительности. Составлено очень много правил, основанных на опытных данных, для расчета количества нужной кирпичной кладки регенеративной камеры. Эти правила весьма легко применять на практике, и они сберегают время, так как требуется всего лишь несколько минут для определения нужного объема регенератора. К сожалению, эти правила не разрешают полностью задачи конструирования регенератора.

A. Consett принимает объем всего регенератора равным 2,21 $м^3$ на 1 *т* стали и делает воздушную камеру на 10% больше газовой в печах, сконструированных на 4 плавки в 24 часа. В „Заметках и формулах" утверждается, что для загруженных печей эмпирическое отношение между объемом регенератора и загрузкой печи составляет 0,874 к 1,436 $м^3$, а для быстро работающих печей — 1,652 к 1,997 $м^3/т$.

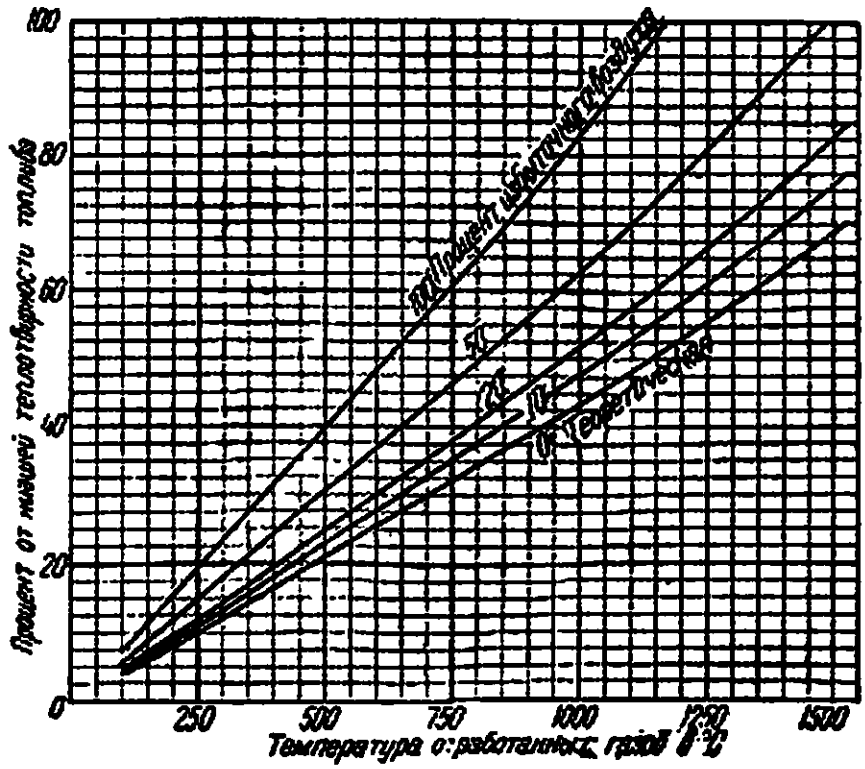


Фиг. 171. Зависимость коэфициента полезного действия котла от содержания в дымовых газах двуокиси углерода для естественного газа с теплотворной способностью 10 400 *Кал.*

Принято, что 3% внесенного тепла теряется от радиации.

Кривые построены для естественного газа.

CO_2 — 0,9%; C_NH_{2N} — 1,4%; O_2 — 0,1%; CH_4 — 73,3%; C_2H_6 — 23,1%; N_2 — 1,2%. Теплотворная способность 10 400 *Кал/м³*. Удельный вес 0,705.



Фиг. 172. Тепло в дымовых газах при сжигании естественного газа с теплотворной способностью 10 250 *Кал.*

H. H. Campbell указывает 1,56 до 3,12 $м^3/т$. Gruner рекомендует от 50 до 70 $кг$ кирпичной кладки на 1 $кг$ сожженного угля на одну перемену направления. Told принимает 5,96 $м^3$ или 2848,4 $кг$ кирпичной кладки на 1 $м^3$ воздуха в секунду на повышение температуры на 82°С. Другие предлагают предусмотреть 46,27 $м^3$ поверхности кладки регенеративной камеры на 1 $т$ угля в 24 часа.

Для тепла воздушной камеры F. H. Loftus предлагает брать 1 $кг$ кирпичной кладки на 1 $кг$ стали. Подвергаемая действию нагрева поверхность должна быть не больше 0,01 $м^2$ на 1 $кг$ кирпичной кладки. Для обеих камер — и воздушной и газовой — поверхность должна равняться 9,19 $м^2/т$. Отношение воздушной камеры к газовой должно составлять 2 : 1. Борова для воздуха должны равняться 0,153 $м^2/т$, а для газа 0,076 $м^2/т$. Печи на 75—150 $т$ требуют 1,81 $м^3$ воздуха в минуту на 1 $т$ пропускной способности.

Комитет по мартеновским печам фирмы Карнеджи (Carnegie Steel Company Open Hearth Committee) вынес решение предъявлять следующие минимальные требования, касающиеся размера регенераторов для 100-тонных печей генераторного газа.

Воздушная камера

9,14×7,61×6,09 $м$; 1,63 $м^3$ поверхности нагрева на 1 $т$ стали; 13,93 $м^3$ поверхности нагрева на 1 $т$ стали; только 1 регенератор.

Газовая камера

9,14×2,4×6,09 $м$; 1,29 $м^3$ на 1 $т$ стали; 9,29 $м^3$ поверхности нагрева на 1 $т$ стали; только 1 регенератор.

Для регенераторов, применяемых на печах для плавки стекла, можно пользоваться следующими правилами: при 0,92 $м^2$ площади на 1 $т$ стекла объем камеры на 1 $т$ расплавленного стекла для естественного газа должен равняться 0,59 $м^3$, а для генераторного газа — 2,2 $м^3$. Общая свободная поверхность при скоростях газа в 1 $м/сек$ для естественного газа должна равняться 0,118 $м^2$, а для генераторного газа — 0,443 $м^2$ на 1 $т$ стекла.

A. D. Williams[1] предлагает метод расчета, где приняты во внимание почти все переменные. Его расчет — весьма полный и в результате весьма длительный. Trinks[2] перечисляет основные переменные и дает несколько способов расчета. George B. Slottman[3] дает формулу для приближенного расчета регенераторов.

Для удовлетворительного расчета среднюю удельную теплоту кирпича можно принять равной 0,25, а его средний вес — примерно 1800 $кг/м^3$. Размер применяемого кирпича зависит от процесса или же периодов смены направления. Trinks говорит, что для 15-минутной смены наилучшим является кирпич толщиной 2″. Williams утверждает, что для 30-минутных смен толщина кирпича для наиболее продуктивной работы равняется $2^1/_2$″. Американские заводчики огнеупорного кирпича изготовляют специальный кирпич для регенераторов размером $10^1/_2$× ×$4^1/_2$×$4^1/_2$″.

Многие кладки регенеративных камер работающих в настоящее время регенераторов изготовлены из кирпича 9×4,5×2,5 дм. На многочисленных установках применяются кирпичи различных размеров и специальная черепица толщиной от 32 $мм$ и больше.

При обычных условиях в печи, работающей на регенераторном газе, скорость газа или воздуха в каналах или дымоходах составляет около 120 $м$ и не больше 180 $м$ в минуту. Для достижения этой последней скорости сечение дымоходов должно равняться 0,1 $м^2$ на 1 $т$ для воздуха и 0,05 $м^2$ — для газа.

Ниже кратко рассматривается простой метод расчета регенератора.

Метод этот логичнее эмпирических правил. Вес нагреваемого газа (на каждую перемену направления движения), умноженный на удельную теплоту газа, умноженную на повышение температуры, равняется весу кладки регенеративной камеры, умноженному на удельную теплоту кирпичной кладки, умноженную на падение температуры. Можно допустить, что кладка регенеративной камеры состоит на 60% из кирпича и на 40% из дымоходов.

Вес уходящих газов, умноженный на удельную теплоту газа, умноженную на падение температуры, равен весу кирпичной кладки, умноженному на удельную

---

[1] Groume-Grjimailo, Flow of Gas in Furnaces.
[2] „Industrial Furnaces", т. I.
[3] „Blast Furnace and Steel Plant", т. 18, стр. 449—452, 624—626.

теплоту кирпича, умноженную на повышение температуры. Максимальный вес продуктов сгорания равняется троекратному весу входящего газа. Выход в дымовую трубу осуществляется через воздушный и газовый регенераторы. Допустив, что распределение двух потоков выходящего газа пропорционально соответствующим сечениям каналов для воздуха и для газа, а именно 5,1 : 7,2, получим, что примерно $^5/_{12}$ отработанных газов пройдут через газовый регенератор.

Высчитав по указанному выше способу приблизительный вес кирпичной кладки, остается только удостовериться, что подвергаемая действию тепла поверхность нагрева достаточна, чтобы накопить и отдать необходимое количество тепла на интервалах регенерации.

При применении любого из общепринятых методов расчета кладки, когда берется кирпич объемом $2^1/_2 \times 4^1/_2 \times 9''$, поверхность составляет примерно 14,74 $м^2/м^3$ объема регенератора, откуда можно легко высчитать общую поверхность нагрева. Ввиду того что поддерживающие своды, футеровка стенок и т. д. не принимаются во внимание, создается некоторый запас объема кладки.

Скорость теплопередачи зависит от скорости газов, средней разности температур, времени, количества кирпича и свойства поверхности. При наличии такого большого числа переменных факторов нельзя дать общего соотношения поверхности к термического накопления, но можно без особого риска сказать, что следует предусмотреть примерно 0,185 $м^2$ на 1000 *Кал/час* в продуктах сгорания.

Можно проделать аналогичный расчет для воздушной кладки, приняв отношение воздушной камеры к газовой равным 2 : 1.

Срок службы кладки регенеративной камеры в значительной степени определяется отложением собирающейся на ней пыли, и требует специального рассмотрения при проектировании [1].

Рекуператоры

При постройке рекуператоров можно использовать различные материалы. Однако, вообще говоря, все эти материалы можно разделить на две группы: огнеупорные материалы и металлы, причем металлы часто представляют собой жароупорные сплавы.

Наиболее часто применяемым типом огнеупорного рекуператора является рекуператор, сделанный из специального пустотелого кирпича, который после сборки образует совершенно отдельные каналы для прохода воздуха и отработанных газов. Если подлежащий подогреву воздух подается не под давлением (при помощи, например, вентилятора), то необходимо его вводить у дна рекуператора, давая ему возможность подниматься вверх благодаря повышению его температуры при прохождении через аппарат. При таком устройстве отработанные газы идут либо вниз в вертикальном направлении, либо под прямым углом к направлению течения воздуха благодаря специально установленным перегородкам.

Если воздух подается в рекуператор под давлением, обычно устанавливают обратный порядок: впускают воздух вверху рекуператора и направляют его к выходу внизу. При таком устройстве отработанные газы вводятся у дна и проходят по вертикали вверх.

Применение воздуха под давлением в рекуператоре из огнеупорного кирпича по необходимости ограничивается сравнительно низким давлением, при котором рекуператор остается еще герметичным. Давление воздуха выше 38 *мм* водяного столба не поднимается. Давления выше этого успешно осуществляются путем применения высокотемпературного высасывающего вентилятора для протягивания воздуха через рекуператор в условиях принудительной тяги.

При таком устройстве давление на выходе вентилятора может быть доведено до 127 *мм* водяного столба. В то же время рекуператор дают возможность работать с вакуумом по обеим сторонам передающей тепло стены. Тщательное уравнивание этих давлений уменьшает утечку до минимума.

В металлических рекуператорах ограничение в части давлений воздуха исключается, если только такие давления не превышают 0,07 — 0,14 *кг/см²*. Присущее металлическим рекуператорам преимущество, заключающееся в более тонких стенках, разделяющих горячие и холодные потоки, реализуется в виде значительного увеличения скорости теплопередачи от более теплого потока к более холодному.

---

[1] C. D. King, Basic Open Hearth Yields, „Tech. Pub.", 186-C-30, A. I. M. M. E.

Первое требование, предъявляемое к металлическому рекуператору при его выборе, заключается в том, чтобы металл, из которого изготовлен рекуператор, выдерживал температуру газов сгорания.

В этом отношении применение металлических рекуператоров более ограничено, чем рекуператоров из огнеупора.

Важной особенностью конструкции является метод прохождения через рекуператор воздуха с целью ограничения температуры, при которой придется работать металлу, и в то же время достижения желательной теплопередачи. Применяется три основных метода.

Во-первых, воздух направляется противотоком в направлении движения обогревающих газов. При применении этого метода представляется возможным достижение максимального коэфициента полезного действия теплопередачи, недостаток его заключается в том, что температура металла на горячем конце сравнительно высокая.

Во-вторых, воздух можно направлять параллельно движению нагревающих газов. Такое движение воздуха дает гарантию сравнительно низкой температуры металла на горячем конце рекуператора, но отличается тем недостатком, что коэфициент полезного действия теплопередачи низок.

В-третьих, воздух можно направлять под прямыми углами к движению нагревающих газов. Движение воздуха по этому способу имеет те же достоинства и недостатки, как и два других предыдущих метода. Отсюда вытекает, что нельзя обеспечить однообразного охлаждения горячего конца рекуператора, если конструкция его не будет спроектирована с надлежащей тщательностью.

Вероятно, наиболее подходящим из этих трех способов будет комбинация противотока и параллельного потока путем применения сравнительно короткого параллельного потока на горячем конце рекуператора и противотока в верхней, более длинной части рекуператора.

Общая формула для поверхности нагрева такова:

$$\text{Поверхность (в } м^2) = \frac{NH}{TC}, \qquad (2)$$

где N — число единиц топлива в час (1000 $м^3$ газа, 1 $л$ нефти или 1 $кг$ угля);

H — тепло, поступающее в воздух, на единицу топлива (вопрос о правильном выборе температуры, до которой следует подогреть воздух, будет рассмотрен ниже. Зная топливо, легко рассчитать потребное количество тепла для подогрева воздуха, необходимого для сгорания на единицу топлива);

T — средняя разность температур (средняя арифметическая температура продуктов сгорания, проходящих через рекуператор, представляет собой сумму температуры на входе и температуры на выходе, деленную на два. Для большинства применений рекуператора среднее арифметическое будет достаточно точным, причем ошибка будет меньше 5%. Средняя разность температур между нагревающими газами и воздухом представляет собой среднюю температуру продуктов сгорания минус температура воздуха, обычно принимаемая равной 15,56° С);

C — коэфициент теплопередачи в $Кал/м^2$ *час* на градус разности температур нагревающего газа и воздуха (коэфициент этот зависит от конструкции и свойств материала, из которого она изготовлена. Для пустотелого кирпича C может изменяться от 1 до 1¼. В металлическом рекуператоре C в хорошо спроектированных конструкциях может достигать величины 3½).

Установку следует выбирать таким образом, чтобы экономия при ее применении окупила в течение определенного периода времени (обычно от 3 до 5 лет) стоимость рекуператора, проценты на вложенный капитал и расходы по текущему ремонту.

Для расчета экономии, которую можно получить путем подогрева воздуха, необходимого для сгорания, следует пользоваться уравнением (1). При расчете годовых постоянных расходов на установку принимается произвольная цифра в 30% стоимости подогревателя. В эти 30% входят 20% амортизации, 8% — на затраченный капитал и 2% — на расходы по текущему ремонту. Такой метод расчета постоянных расходов применяется очень часто, хотя и является произвольным. Изучение применения рекуператора на указанных выше основаниях часто показывает, что затраты на его установку вполне оправдываются.

Паровые котлы, обогреваемые теплом отходящих газов

Обогревание котлов теплом отходящих газов производится при эксплоатации почти всякой промышленной печью, но самое широкое применение оно находит при медеплавильных отражательных и мартеновских печах и печах для обжига цемента. В табл. 181 дается список типов печей (с указанием температурных пределов), при которых применяются паровые котлы, обогреваемые теплом отходящих газов.

Таблица 181

	t в °C
Печи для облагораживания никеля	1 350—1 700
Коксовая печь без утилизации побочных продуктов	1 060—1 260
Медеплавильные отражательные печи	900—1 100
Печи для облагораживания цинка	920—1 100
Нагревательные и пудлинговые печи	920—1 100
Печи для облагораживания меди	260—1 200
Печи для обжига цемента (сухой процесс)	620— 810
» » » » (влажный процесс)	420— 650
Мартеновские печи (генераторный газ)	650— 730
Мартеновские печи (нефтяной или естественный газ)	420— 600
Газовые батареи	560— 670
Нефтегазовые генераторы	760—1 100
Нефтяные кубы	480— 540
Стеклянные резервуары	420— 540

До 1913 г., когда был разработан котел, обогреваемый теплом отходящих газов, обладающих большой скоростью, было мало котлов, связанных с печами, в которых уходящие газы имели температуры ниже 950 — 1100 °С. Котлы нового типа сконструированы с настолько низким сопротивлением потоку газов, что потеря в тяге обычно не мешает работе печи.

При применении вентиляторов с принудительной тягой и котла для газа большой скорости с такой низкой температурой, как 420° С, котел, обогреваемый теплом отходящих газов, вполне оправдывает сделанные на него затраты. В обычных условиях работы, если температура газа равна 540° С и выше, расходы по установке оборудования для использования отработанного тепла вполне окупаются.

Для газовой промышленности котлы, обогреваемые теплом отходящих газов, изготовляются различных типов, а именно: горизонтальные или вертикальные жаротрубные и горизонтальные или вертикальные водотрубные. Типом котла, наиболее подходящим для газовой промышленности, оказался на практике вертикальный котел из листовой стали.

Обычный вертикальный жаротрубный котел конструируется на основании механических и экономических соображений для давлений пара максимум 20 *кг/см*², водотрубные же котлы можно изготовлять и для более высоких давлений. Среднее давление пара на установках водяного газа лежит в пределах от 7 до 10 *кг/см*² по манометру.

Количество лошадиных сил, которое могут развить паровые котлы, обогреваемые теплом отходящих газов, зависит от количества и температуры имеющегося газа, температуры, до которой охладятся газы, и их удельной теплоты. Теоретическое количество котельных лошадиных сил котла, которые можно от него ожидать, выражается следующей формулой:

$$\text{Котельные лошадиные силы} = 2{,}205\ W \cdot 1{,}8\,(T_1 - T_2)\ \frac{C}{33{,}479} =$$

$$= 0{,}1136 \cdot w\ (T_1 - T_2)C_1,$$

где W — вес газов в *кг/час*;
T_1 — температура входящего газа в °С;
T_2 — температура выходящего газа в °С;
C — средняя удельная теплота газа сверх предела $T_1 - T_2$.

При применении вышеприведенной формулы к продувочным газам установки для получения водяного газа можно принять для приблизительных расчетов следующие константы:

C — 0,11 *Кал/кг* газа;

W — 3413 *кг* продувочного газа на 1000 $м^3$ газа, получаемого в час;

T_1 — 700 °C;

T_2 — 280 °C.

В других случаях, когда требуется применить вышеуказанную формулу, необходимо прежде всего определить константу газа и иные данные применительно к существующим условиям.

В связи с паровыми котлами, обогреваемыми теплом отходящих газов, применяются иногда пароперегреватели, в которых за исключением случаев весьма низких начальных температур газа можно получить почти любую степень перегрева. Обычно перегреватели устанавливаются в обмуровке котла, но их можно устанавливать и в газовом дымоходе, ведущем в котел.

Экономайзеры применяются в установках для обжига цемента и извести и в печах для облагораживания металла, когда тяга для правильной работы печи для обжига или печи для облагораживания металла слабая и когда подача отработанных газов достаточно однообразна. В мартеновских печах, где требуется сильная тяга и где количество отработанных газов из данной печи часто меняется, экономайзеры применяются редко или вовсе не применяются. Целесообразность применения экономайзеров при мартеновских печах, обогреваемых генераторным газом, также сомнительна, так как при каждой смене направления течения газа в печи возможен более или менее разрушительный взрыв газа, могущий повредить кирпичную кладку.

Таблица 182

	Испытание № 1	Испытание № 2
Анализ газа:		
CO_2	8,08	10,49
O_2	11,46	8,29
N_2	80,46	81,22
Температура входящего газа в °C	457	623
Пар, образуемый котлом, в *кг/час*	1 919	2 902
К. п. д. котла в %	53,8	69,4
Мощность вентилятора в *л. с.*	35,7	28,1

Воздушные экономайзеры при котлах, обогреваемых теплом дымовых газов обычно не применяются, потому что пар, вообще говоря, с экономической точки зрения ценнее подогретого воздуха. При образовании максимального количества пара температура выходящих из котла отработанных газов настолько низка, что воздушный нагреватель для заметного повышения температуры воздуха потребует большой поверхности и, следовательно, обойдется дорого.

Засасывание воздуха в системах с утилизацией отработанного тепла имеет весьма важное значение. Войдя в котел, засосанный воздух понижает температуру проходящего через котел газа и увеличивает его вес, повышает сопротивление трения в котле и, очевидно, увеличивает энергию, необходимую для работы принудительной тяги.

Эти положения подтверждаются испытаниями, результаты которых приведены в табл. 182. Испытание № 1 проводилось до, а № 2 — после устранения засасывания воздуха на одном из сталеделательных заводов.

Интересно сравнить результаты испытаний установки по обжигу цемента с утилизацией отработанного тепла, проведенных в 1903 г., с аналогичными испытаниями, проведенными 20 лет спустя.

На одном из больших сталелитейных заводов, где котлы, обогреваемые теплом отходящих газов, применялись при мартеновских печах, были получены следующие результаты: за одиннадцать месяцев работы было изготовлено 340 408 *т*

Таблица 183

	1903	1923
Количество *Кал* для обжига на баррель	314 485	282 717
Температура газов, выходящих из печи для обжига, в °С	993	673
Количество *кг* газа на 1 *кг* угля	20,0	17,7
Всего газа в час	1 069	2 865
Количество *Кал* на 1 *кг* газа, при температуре выше 93,3° С	270	163
Всего тепла, абсорбированного котлом и экономайзером, в *Кал*	2 514 286	5 091 945
Регенерировано имеющегося тепла в %	54,6	67,9

болванок, причем за это время котлы дали пара нетто 182 780 *т*. Эта цифра соответствует 5021 *кг* пара на 1 *т* выработанных болванок.

Ниже дается тепловой баланс по расходу тепла в калориях на 1 *т* болванок. Этот баланс получен с другого сталелитейного завода.

Таблица 184

	Кал на 1 *т* болванок	%
Израсходовано в печи	1 056 384	55,5
Использовано в котле	521 136	27,3
Потери газа в дымовой трубе	428 400	17,2

Котлы Бабкок и Вилькокс, установленные в связи с нефтегазовыми генераторами для фирмы Portland Gas and Coke Company of Portland, были испытаны инж.-консультантом S. H. Graf. Испытания эти показали следующее:

Поверхность нагрева котла в $м^2$	519
» пароперегревателя в $м^2$	47
Давление пара в $кг/см^2$	12
Перегрев в °С	38

Таблица 185

	Испытание № 1	Испытание № 2
Средний вес газов, проходящих через котел, в *кг/час*	24 449	24 132
Максимальный вес газов в *кг/час*	46 752	44 765
Получено минимум *л. с.* (котельные *л. с.*)	256	313
» максимум *л. с.* » »	1 046	1 172
1. Тепло, абсорбированное котлом, в %	77,6	75,6
2. Потеря тепла вследствие влажности в %	1,1	1,1
3. Потеря тепла от пульверизации пара в %	2,0	2,2
4. Потеря тепла в дымовых газах в %	16,8	16,3
5. Потеря тепла от радиации (разность) в %	2,5	4,3

Один котел соединен с двумя шахтами нефтяного газогенератора, которые работали попеременно с 12-минутным тепловым и 24-минутным рабочим циклом. Отсюда вытекает, что котел фактически получал отработанное тепло в течение 22 мин. из цикла в 36 мин. или в течение 40 мин. из каждого часа, что давало одну минуту на очистку каждого газогенератора.

Эксплоатационные расходы газового двигателя слагаются из следующих данных:

1. *Топливо.* Расход топлива в газовых двигателях различных типов примерно таков

Таблица 186

Нагрузка	Расход топлива в газовом двигателе в *Кал* на эффективную *л. с.*	
	четырехтактный двигатель	двухтактный двигатель
5/4	2 772	3 780
4/4	2 520	3 276
3/4	2 772	4 032
2/4	3 150	4 284
1/4	4 284	5 796

Двухтактные двигатели с применением вбрызгивания топлива, т. е. с подачей в цилиндр газа под давлением, после того как вбрызнут воздух и закрыты впускные отверстия, расходуют топлива на 10% больше четырехтактного двигателя. Такое соотношение имеет место при 10-дюймовом (и больше) внутреннем диаметре цилиндра. При цилиндрах меньшего диаметра расход топлива будет больше на 5—15%.

2. *Смазочное масло.* Количество расходуемого газовым двигателем смазочного масла зависит от типа применяемого масла, от того, улучшается ли это масло посредством фильтрования или нет, а также от надзора и типа двигателя; однако можно взять надежную цифру в 1,9 *л* смазочного масла на каждые 1 000 *л. с./час* работы двигателя. Для больших установок заводы, изготовляющие двигатели, дают нормы расхода смазочного масла.

3. *Текущий ремонт.* Если при эксплоатации газовых двигателей ежегодно отчислять в фонд текущего ремонта указанные ниже суммы, то этих последних будет более чем достаточно для поддержания двигателя в порядке.

1. Малая скорость: 2% от стоимости двигателя.
2. Средняя скорость: 3% от стоимости двигателя.
3. Большая скорость: 5% от стоимости двигателя.

4. *Рабочая сила.* Работа современного газового двигателя является фактически автоматической, так что для эксплоатации газового двигателя не требуется ни квалифицированных рабочих, ни специального наблюдения. При эксплоатации газового двигателя нужно только следить, чтобы в него правильно подавалось смазочное масло. Ввиду того что для небольших установок на это требуется очень мало времени, расход на рабочую силу в смету не вносится. На больших же установках дело обстоит иначе: количество и расположение двигателей может по необходимости вызвать некоторый дополнительный расход на рабочую силу, который, конечно, вносится в смету расходов по эксплоатации.

Влияние высоты. Нахождение газового двигателя выше уровня моря отражается на его мощности при эксплоатации, что иллюстрируется следующими цифрами:

Высота в *м* над уровнем моря	Мощность в *л. с.*, если взять за отправную точку уровень моря, в %
Уровень моря	100
304	97
609	92
914	88
1 219	88
1 524	82
1 828	78
2 133	75
2 438	72
2 743	69
3 040	66

Потери мощности вследствие высоты можно компенсировать путем применения суперчаржеров[1]. Их применение практично лишь на больших высотах и в больших установках.

Вода для охлаждения. Газовый двигатель следует обеспечить достаточным количеством хорошей воды для охлаждения. Когда имеющаяся вода жесткая и дает в водяных рубашках отложения извести, следует применять замкнутую систему водяного охлаждения. При применении замкнутой системы 0,91 *м* 2-дюймовой трубы дают достаточную охлаждающую поверхность на эффективную лошадиную силу.

Для определения нужного на эффективную лошадиную силу в час количества охлаждающей воды применяется следующее правило.

Взять разность температур охлаждающей воды на выходе и на входе и разделить 1000 на эту разность. Это даст количество литров охлаждающей воды, которое следует иметь на эффективную лошадиную силу в час.

Пример:

Температура на выходе в °С	43
„ „ входе „ °С	22
Разность	21

1000 : 21 = 47,7 — количество литров воды, нужной на эффективную лошадиную силу в час.

Рекомендуется применять охлаждающую воду с температурой на выходе не выше 43° С.

Примерно каждые 100% тепла, сообщаемого газовому двигателю в виде газа, распределяются так: одна треть дает полезную работу, другая — переходит в охлаждающую воду, и наконец, третья — теряется с уходящими газами. Часто представляется возможность утилизации этого отработанного тепла.

Эквиваленты газа и других видов топлива. Следует заметить, что поскольку разница в оборудовании и производительности может быть очень большой, табл. 187—191 можно рассматривать лишь как приблизительные. Таблицы эти дают лишь эквивалентность полезного действия тепла и не охватывают капиталовложений, излишней рабочей силы при применении различных видов топлива и т. д. Правильное и полное сравнение конкурирующих видов топлива и оборудования, конечно, должно полностью охватить также и эти факторы.

А) Современные большие котлы, снабженные водяными экранами, экономайзерами и воздухоподогревателями и имеющие такую низкую температуру отходящих газов, как 150° С. В топках этих котлов обычно сжигают пылевидный уголь, нефть или естественный газ, причем фактически конструкция их не изменяется при применении любого из указанных видов топлива.

Б) Современные большие котлы, снабженные только водяными экранами, но без экономайзеров или без воздухонагревателей; в таких устройствах следует ожидать нормальных температур отходящих газов, и при любом виде топлива возможны небольшие количества избыточного воздуха.

В) Большие котлы с такими футерованными огнеупорным кирпичом топками, которые обычно применяются для механической подачи топлива, для нефтяного топлива и иногда для пылевидного; в этом случае необходимо применять значительные количества избыточного воздуха.

Г) Котлы обычного размера с такими же топками, как указано выше.

Д) Топки с шуровкой вручную.

Е) Небольшие топки с шуровкой вручную для обычной работы.

---

[1] Суперчаржер — прибор, поддерживающий нормальное атмосферное давление в карбюраторе на большой высоте.

Таблица 187

Эквиваленты газа и электричества[1]

При пользовании таблицей принять во внимание указание, данное в тексте

Работа	Источник получения данных	Количество м³ газа, эквивалентное 1 kWh	
		газ с теплотворной способностью 4700 *Kal./m³*	газ с теплотворной способностью 8900 *Kal./m³*
Отношение к п. д. электричества и газа:			
1 : 1	—	0,18	0,10
1,5 : 1	—	0,27	0,15
2 : 1	—	0,36	0,20
Плавка алюминия	A. G. A. Rate Struc. Com., 1930	0,36	0,20
Отжиг:			
Отливка из сплавов	A. G. A., Rate Struc. Com., 1930	0,39	0,21
Инструментальная сталь	A. G. A., Rate Struc. Com., 1930	0,52	0,28
Отливка	„Iron Age", 27/II 1930, стр. 637	0,43	0,23
Плавка латуни	—	0,68	0,36
Промышленное приготовление пищи:			
В среднем	—	0,35	0,19
Кухня наилучшей конструкции	—	0,24	0,13
Домашнее приготовление пищи	Лаборатория A. G. A., 1931	0,40	0,21
	Large Eastern Power Co. 1930	0,44	0,24
Газовые двигатели:			
Среднего размера	—	0,75	0,40
Большие	—	0,64	0,34
Расплавливание стереотипа	Данные A. G. A., № 314	0,44	0,23
Расплавливание стереотипа	„ A. G. A., № 205	0,55	0,29
Домашний нагрев воды	Лаборатория A. G. A., 1931	0,31	0,17
	Large Eastern Power Co, 1930	0,26	0,14
Лужение проволоки	Данные A. G. A., № 320	0,22	0,12
Покрытие стекловидной эмалью		0,23	0,13
Покрытие стекловидной эмалью (круглые ванны)	„Amer. Cer. Sos. J.", декабрь 1926	0,40	0,21

Примечание. Результаты по одному газу приведены к другому газу на основе теплотворной способности.

[1] Из книги „Combustion", изд. 3. Американская газовая ассоциация (A. G. A.).

Таблица 188

Эквиваленты газа и нефти[1]

Работа	Источник полученных данных	Количество м³ газа, эквивалентное 1 л нефти[2]	
		газ с теплотворной способностью 4 100 *Кал/м³*	газ с теплотворной способностью 8 900 *Кал/м³*
Отношение коэфициентов полезного действия газа и нефти:			
1 : 1	—	2,00	1,06
1,5 : 1	—	1,32	0,70
2 : 1	—	1,00	0,53
3 : 1	—	0,67	0,35
Отжиг автомобильных частей	A. G. A. Data Sheet, 114	1,75	0,93
Хлебопечение:			
18 час. печения в сутки — печи непрямого действия	—	1,57	0,85
Газовая печь прямого действия сравнительно с нефтяной печью	—	0,83	0,46
Прокаливание кирпича и черепицы	A. G. A. Data Sheet, 146	1,83	0,96
Плавление бронзы (лома)	Частное сообщение Ray Mann	1,84	0,96
„ „	A. G. A. Data Sheet, 204	1,78	0,95
Карбонизация небольших частей мотора	„ „ 126	1,62	0,86
Высушивание сердечника	„ „ 223	0,97	0,52
„ „	Частное сообщение — Ray Mann	1,12	0,60
Отливка матриц (цинк)	То же	1,18	0,63
Ковка:			
Непрерывная	Proc. A. G. A., 1927	1,41	0,75
Вращающиеся печи	Trans, A. S. S. T. август 1930	1,92	1,02
Плавка стеклянной смеси	A. G. A. Data Sheet, 242	1,38	0,74
„ „	„ „ 298	1,74	0,69
	A. G. A. Rate Struct. Co, 1931	1,31	0,92
Отопление домов	—	1,55	0,81
Высушивание больших форм	Частное сообщение — Ray Mann	1,12	0,60
Нормализация:			
Части грузовика	A. G. A. Data Sheet, 201	1,15	0,61
Листы	Heat Treating & Forging, апрель 1928, стр. 431	1,65	0,88
Вторичный подогрев тормозных башмаков	Частное сообщение — Ray Mann	1,12	0,60
Прокаливание санитарных изделий	Proc. A. G. A., 1930	1,85	1,00
Покрытие стеклянной эмалью — непрерывное	A. G. A. Data Sheet, 295	1,12	0,60
Кузнечная сварка	A. G. A. Data Sheet, 265	0,97	0,52

Примечание. Результаты по одному газу приведены к другому газу на основе теплотворной способности.

[1] Из книги „Combustion", изд. 3., Американская газовая ассоциация (A. G. A.).
[2] Теплотворная способность нефти принимается равной 9 360 *Кал/л*.

Таблица 189

Эквиваленты газа и угля или кокса[1]

Работа	Источники получения данных	Количество м³ газа[2], эквивалентное 1 т	
		газа с теплотворной способностью 4 200 *Калл*	газа с теплотворной способностью 8 900 *Калл*
Отжиг, медь	Собрание данных A. G. A., № 302	1 047	554
Отжиг, проволока		490	260
Печение, хлеб (кокс)		986	521
» » (антрацит)	Фирма Iroquois Gas Corp.	1 168	619
» лирожное (кокс)		826	437
» пирожки »		689	364
Хлебопечение, карусельные печи (кокс)		932	493
Облицовочный кирпич	Собрание данных A. G. A., № 342	1 652	868
Высушивание сердечника	» » » » № 289	350	188
Цинкование, гвозди и т. д.	» » » » № 315	546	288
Цинкование, кухонные котлы	» » » » № 208	739	389
Высушивание песком	» » » » № 177	1 232	658
Покрытие стекловидной эмалью	„Amer. Cer. Soc. J.", октябрь 1926	930	493

Результаты по одному газу приведены к другому газу на основе теплотворной способности.

[1] Взято из книги „Combustion", изд. 3, Американская газовая ассоциация (A.G.A.).
[2] Теплотворная способность угля принимается равной 6 550 *Калл*.

Таблица 190

Эквиваленты для естественного газа, нефти и каменного угля в паровых котлах[1]

Тип котла	Количество м³ на 1 т мазута	Количество м³ на 1 т алабамского угля	
		пылевидного	с механической и ручной шуровкой
А	1 222	855,3—847,2	813,4—780,1
Б	1 223	847,7—837,6	790,4—635,1
В	1 175	815,6—792,3	780,3—662,6
Г	1 150	797,8—761,6	748,9—682,2
Д	1 130	—	668,4—620,3
Е	1 128	—	606,4—499,3

[1] Из „Combustion", изд. 3, Американская газовая ассоциация (A. G. A.); George E. Rhodes, Natural Gas for steam power.

К ЧИТАТЕЛЯМ КНИГИ

Редакция просит дать отзывы на настоящую книгу с оценкой как содержания книги, так и соответствия ее со знаниями читателей, на которых книга рассчитана. Одновременно в отзыве желательно получить и освещение редакционных недостатков книги.

Наиболее удачные отзывы будут напечатаны в журналах и оплачены.

Отзывы и все замечания по книге просим направлять по адресу: МОСКВА, проезд Владимирова, 4. Редакция горно-топливной и геолого-разведочной литературы.

Редактор *В. А. Соколов* Технич. редактор *А. С. Полесина*

Индекс ГГР-60-5-5. ТКК № 4.
Сдано в набор 9/IX 1938 г. Подписано к печати 13/III 1939 г.
Тираж 3000 экз. Бумага Ижурской ф-ки 62×94¼/16.
Объем { 43,7 уч. авт. л. / 28¼ печ. л. Изд. № 133.
Заказ № 800. Учетный № 1737.
Уполномоченный Главлита № А-144.

Набрано и отматрицировано во 2-й тип. ГОНТИ имени Евгении Соколовой, Ленинград, пр. Красных Командиров, 29.

Отпечатано с готовых матриц в типографии «Красный Печатник», Ленинград, Международный пр., 75-а. Заказ № 482.