Библиотека СОК

Министерство образования Российской Федерации
Уральский государственный технический университет - УПИ

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ

Методическое руководство к курсовой работе по дисциплинам
«Вторичные энергоресурсы», «Энергосбережение
в энергетике и теплотехнологиях»
для студентов всех форм обучения специальностей:
1007 – Промышленная теплоэнергетика;
1016 – Энергообеспечение предприятий

Екатеринбург 2001

УДК 662.767: 697.3 (031)
Составители В.А. Мунц, Е.Ю Павлюк
Научный редактор проф., д-р техн. наук А.М. Дубинин
ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ: Методическое руководство к курсовой работе по дисциплинам «Вторичные энергоресурсы», «Энергосбережение в энергетике и теплотехнологиях» / В.А. Мунц, Е.Ю. Павлюк. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 30 с.

Изложены основные аспекты поверочного расчета котлов-утилизаторов, приведены основные их характеристики и конструкции. Приведен пример расчета котла-утилизатора.

Библиогр.: 5 назв. Рис. 9. Табл. 8.

Подготовлено кафедрой «Промышленная теплоэнергетика».

© Уральский государственный
технический университет - УПИ, 2001

1. ЗАДАЧИ И ОБЪЕМ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Цель выполнения курсовой работы закрепить и углубить полученные знания при практическом решении конкретной инженерной задачи; научиться пользоваться специальной литературой и другими техническими материалами; расширить круг знаний, изучая стандарты, справочники, документацию по типовым проектам; развивать творческую инициативу при самостоятельном решении инженерных задач.

Расчетно-пояснительная записка должна содержать описание котла-утилизатора и тепловой расчет котла.

Графическая часть проекта содержит 1 лист формата А4, включающий в себя разрез котла-утилизатора.

Оформить пояснительную записку и графическую часть в соответствии со стандартом СТП УПИ 1-85.

2. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Исходными данными для расчета котла-утилизатора являются:

- тип котла-утилизатора;
- расход газов через котел-утилизатор - G_0, $м^3/с$;
- температура газов перед котлом-утилизатором - $t_г$, °С;
- требуемое давление перегретого пара - $P_{пп}$, Па;
- температура перегретого пара - $t_{пп}$, °С;
- температура питательной воды на входе в котел - $t_{пв}$, °С;
- состав газа, %.

Каждому студенту выдаются чертежи (продольные и поперечные разрезы) котла-утилизатора, рекомендуются справочные материалы и техническая литература. Все дополнительные данные, необходимые для выполнения курсовой работы, студент выбирает самостоятельно, пользуясь при этом чертежами, учебной и справочной технической литературой.

Все расчеты выполняются в соответствии и на основе действующих нормативных методов теплового расчета котельных агрегатов [1]. Описание и основные характеристики котлов-утилизаторов даны в литературе [2,3,4].

3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ

Основным производителем котлов-утилизаторов является Белгородский котельный завод, разработавший совместно с НПО ЦКТИ более 200 конструкций различных типов котлов-утилизаторов.

Среди различных типов котлов-утилизаторов в отдельную группу выделены газотрубные котлы. Маркировка газотрубных котлов: Г - горизонтальный, В – вертикальный, Б – с выносным барабаном–сепаратором, И – с предвключенной испарительной поверхностью, П – с пароперегревателем,

Э – с экономайзером. Котлы Г-150, Г-420, Г-950 предназначены для охлаждения технологических газов с целью конденсации паров серы и получения насыщенного пара в процессе обезвреживания сероводородных газов. Котлы Г-250, Г-345, Г-250П, Г-345П, Г550П, Г-145Б, Г-1030Б, Г-330БИ, Г-445БИ, Г-660БИ предназначены для выработки насыщенного пара за счет использования тепла технологических и отходящих газов в химической, нефтехимической, металлургической и других отраслях промышленности. Вертикальные котлы В-90Б и Г-460Б предназначены для охлаждения конвертированных газов и производства насыщенного пара. Котлы Г-400ПЭ и Г-420БПЭ предназначены для получения перегретого пара за счет использования тепла отходящих газов из газовой турбины и тепла нитрозных газов в схеме получения слабой азотной кислоты.

Энерготехнологические котлы КС-200 ВТКУ-М и КС-450 ВТКУ-М устанавливаются за печами обжига серного колчедана в кипящем слое производительностью 200 и 450 т/сут. Ранее для этих целей выпускали котлы марок УККС (водотрубные) и ГТКУ (газотрубные).

Котлы–утилизаторы серии КУ предназначены для выработки перегретого пара на основе использования физического тепла газов, выходящих из мартеновских, нагревательных и других технологических печей. Центральный пароперегреватель ЦП-60-С предназначен для перегрева насыщенного пара, вырабатываемого котлами-утилизаторами. В качестве топлива применяется доменный газ с теплотой сгорания не менее 1000 ккал/м^3. Энерготехнологический котел СЭТА-Ц-100-2М предназначен для установки в технологической линии получения серной кислоты. Сжигание серы осуществляется в циклонном предтопке с коэффициентом избытка воздуха α=2. Котел энерготехнологический ПКС-Ц-10/40 предназначен для сжигания сероводорода и охлаждения продуктов сгорания. Котлы –утилизаторы КСТК-35/40-100 и КСТ-80 предназначены для охлаждения газов, поступающих в них из камеры сухого тушения кокса и выработки перегретого пара. Охладители конверторных газов (ОКГ) предназначены для дожигания и охлаждения газов, выходящих из сталеплавильных конверторов. Характеристики некоторых типов котлов-утилизаторов приведены в табл. 1, 2, 3, 4.

Основными элементами котла-утилизатора являются барабан, испарительная поверхность нагрева, пароперегреватель и водяной экономайзер. В отдельных случаях могут отсутствовать пароперегреватель или водяной экономайзер, или оба вместе. Принципиальная расчетная схема котла-утилизатора дана на рис. 1. При начальной температуре газов ниже 800°С пароперегреватель, как правило, располагается первым по ходу газов. Приведенный ниже порядок теплового расчета котла-утилизатора как раз и рассматривает этот чаще всего встречающийся на практике случай.

Для реальных условий эксплуатации необходимо уметь оценивать производительность имеющегося оборудования при различных расходах и

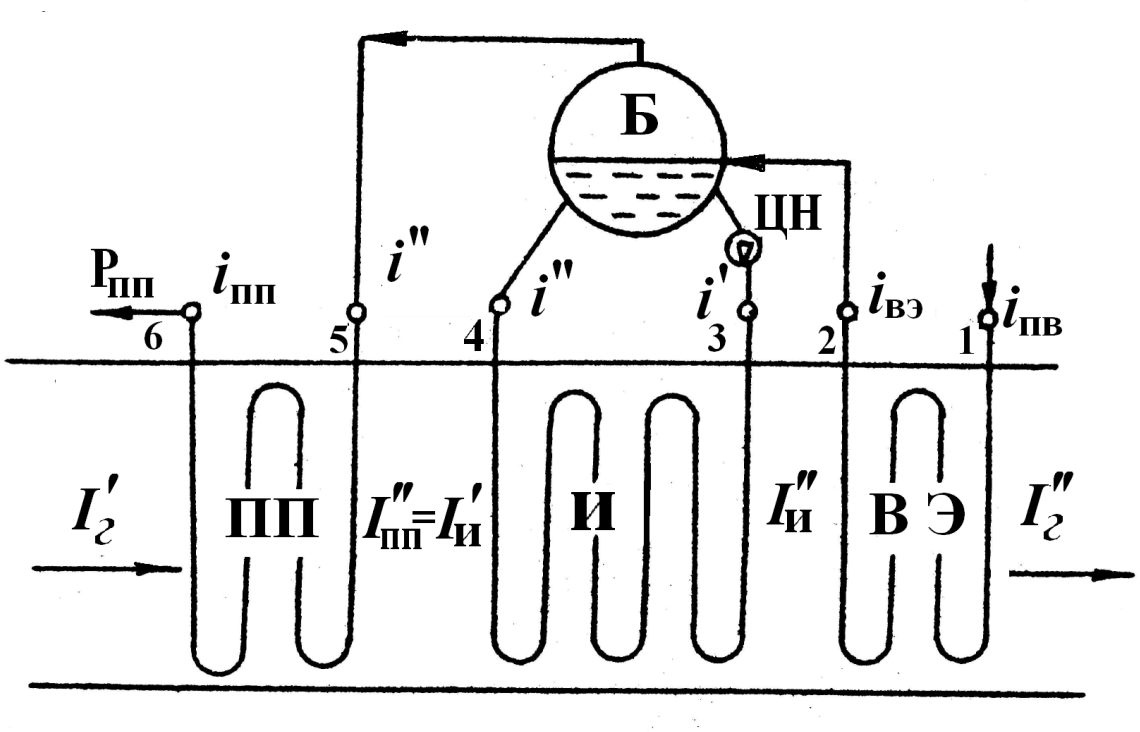


Рис.1. Схема котла-утилизатора:
Б - барабан; ВЭ - водяной экономайзер; И - испаритель; ПП - пароперегреватель; ЦН - циркуляционный насос; 1, 2, 3, 4, 5, 6 - коллекторы экономайзера, испарителя и пароперегревателя соответственно

параметрах отходящих газов. Целью расчета является определение количества теплоты, воспринимаемой имеющимися поверхностями нагрева и паропроизводительности котла-утилизатора при заданных параметрах.

4. РАСЧЕТ ЭНТАЛЬПИИ ГАЗОВ И ПАРАМЕТРОВ ПАРА И ВОДЫ

Примерный состав газов за различными технологическими агрегатами приведен в табл. 5. Объемная теплоемкость газов при входе в котел-утилизатор подсчитывается как теплоемкость смеси газов по формуле

$$c_p = \sum c_{p_i} r_i , \qquad (1)$$

где $c_{p,i}$ - объемные теплоемкости компонентов смеси при постоянном давлении при $t'_г$, кДж/(м^3·К); r_i - объемные доли компонентов смеси. Объемная теплоемкость газов на выходе из котла рассчитывается по формуле (1) по принятой температуре $t''_г$. Теплоемкость газов при $t'_г$ и $t''_г$ берут из табл. 6.

Таблица 1.

Основные технические характеристики котлов-утилизаторов

Тип котла	Назначение	Паропроизводительность, т/ч	Давление, МПа	Температура, °С	Объем дымовых газов, $м^3/ч$	Температура газов перед котлом, °С	Температура уходящих газов, °С
Г-150	Охлаждение технологических газов в процессе обезвреживания сероводородных газов	0,53	0,5	151	2293	360	159
Г-420		1,0	0,5	151	7257	280	155
Г-950		5,0	0,5	151	21870	287	161
Г-250	Охлаждение технологических газов	3,2	1,4	194	16000	600	270
Г-345		8,1	1,4	194	40000	600	260
Г-250П		3,1	1,4	240	16000	600	260
Г-345П		7,9	1,4	260	40000	600	250
Г-550П		11,6	1,4	280	55000	600	240
Г-145Б		4,7	1,4	194	8000	1200	280
Г-1030Б		31	1,4	194	50000	1200	240
Г-330БИ		9,5	1,4	194	15000	1200	310
Г-445БИ		15,7	1,4	194	25000	1200	250
Г-660БИ		23,3	1,4	194	35000	1200	235
В-90Б		5,0	0,8	170	25000	850	560
В-460Б		6,6	1,4	194	60000	400	225
Г-400ПЭ	В производстве азотной кислоты	7,5	1,6	230	66500	405	185
Г-420 БПЭ		25	15	250	56200	900	-

Окончание табл. 1

Тип котла	Назначение	Паропроизводительность, т/ч	Давление, МПа	Температура, °С	Объем дымовых газов, $м^3/ч$	Температура газов перед котлом, °С	Температура уходящих газов, °С
КС-200 ВТКУ-М	За обжиговыми печами кипящего слоя	11	4	440	20000	900	450
КС-450 ВТКУ-М		25	4	440	44000	900	450
УККС 8/40		8	4,0	450	20740	825	350
УККС 4/40		4	4,4	255	10370	900	350
КС-100 ГТКУ		7,1	4,3	255	10370	900	350
КС-200 ГТКУ		II	4,0	450	20740	900	430
КУ-40-1	Использование теплоты отходящих газов на предприятиях черной металлургии	12,9	4,5	385	40000	850	248
КУ-40-1		13,45	1,8	385	40000	850	227
КУ-60-2		19	4,5	392	60000	850	252
КУ-60-2		19,9	1,8	366	60000	850	229
КУ-80-3		25,8	4,5	385	80000	850	248
КУ-80-3		26,9	1,8	358	80000	850	227
КУ-100-1		32,6	4,5	382	100000	850	242
КУ-100-1		33,9	1,8	360	100000	850	242
КУ-125		40,8	4,5	385	125000	850	-
КУ-125		42,4	1,8	365	125000	850	-
КУ-100Б		32,5	1,8	395	100000	850	232
КУ-150		50,5	4,5	393	150000	850	213
КСТК-35/40-100	Котел–утилизатор установки сухого тушения кокса	32,4	4	440	100000	800	170
КСТ-80		20	3,9	440	73944	800	180

Таблица 2

Основные технические характеристики котлов-утилизаторов с сжиганием топлив

Тип котла	Назначение	Паропроизводительность, т/ч	Давление, МПа	Температура, °С	Вид топлива	Расход топлива, т/сут	Температура уходящих газов, °С
СЭТА-Ц-100-2М	Энерготехнологический агрегат	13,1	4	440	Сера	100	490
ПКСЦ-10/40		9,5	4	354	Серово-дород	1600 $м^3$/ч	589
ЦП-60-С	Центральный пароперегреватель	40	1,9	216-380	Доменный газ	4605 $м^3$/ч	204

Таблица 3

Основные конструктивные размеры элементов газотрубных котлов-утилизаторов

Типоразмер котла	Дымогарные трубы				
	Диаметр и толщина, d x δ, мм	Количество, n, шт.	Суммарное наружное сечение, $\sum f_н$, $м^2$	Суммарное внутреннее сечение, $\sum f_{вн}$, $м^2$	Длина, мм
1	2	3	4	5	6
Г-150	32х3	356	0,286	0,08	4960
Г-420	32х3	1044	0,839	0,236	4960
Г-950	32х3	1600	1,286	0,362	8100
Г-250, Г-250П	50х3	500	0,981	0,76	3610
Г-345, Г-345П	50х3	500	0,981	0,76	4960
Г-550П	50х3	700	1,373	1,064	4960
Г-145Б	50х3	212	6,416	0,322	4960
Г-1030Б	50х3	1032	2,025	1,569	7300

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6
Г-330БИ	50х3	648	1,271	0,985	3400
Г-445БИ	50х3	648	1,271	0,985	4960
Г-660БИ	50х3	648	1,271	0,985	7300
В-90Б	80х3,5	99	0,497	0,414	-
В-460Б	50х3	648	1,271	0,985	4960
Г-400ПЭ	50х3	790	1,550	1,208	3610
Г-420БПЭ	50х3	480	0,942	0,729	6300

Таблица 4

Расчетно-конструктивная характеристика конвективных, змеевиковых унифицированных КУ

Характеристика	Типоразмер котла	Испарительные пакеты, $м^2$				Пароперегреватель	Экономайзер
		1-й	2-й	3-й	4-й		
Расчетная площадь поверхности нагрева, F, $м^2$	КУ40-1	30	109,5	122	110,5	43,5	185
	КУ-60-2	46	173	92	175	70	247
	КУ-80-3	60	219	244	221	87	370
	КУ-100-1	85	285	315	295	110	4*60
	КУ-125	110	370	410	380	144	615
	КУ-150	133,2	415	475	436	166	725,1
Число параллельно включенных змеевиков, z	КУ40-1	18	38	38	-	19	12
	КУ-60-2	28	60	60	-	30* 60**	16
	КУ-80-3	36	76	76	-	38* 76**	24
	КУ-100-1	40	80	80	-	40* 80*	24
	КУ-125	52	104	104	-	52* 104	32
	КУ-150	64	120	120	-	60	32
Площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания, $F_{п.с.}$, $м^2$	КУ40-1	4,315	3,17	3,17	2,885	3,17	3,18
	КУ-60-2	7,0	5,06	5,06	4,63	5,06	4,55
	КУ-80-3	8,63	6,34	6,34	5,77	6,34	6,36
	КУ-100-1	10,8	8,04	8,04	7,35	8,04	7,67
	КУ-125	13,2	10,3	10,3	9,4	10,3	9,8
	КУ-150	16,6	12,5	12,5	11,5	12,5	9,65

Окончание табл. 4

Характеристика	Типоразмер котла	Испарительные пакеты, $м^2$				Пароперегреватель	Экономайзер
		1-й	2-й	3-й	4-й		
Площадь живого сечения для пара и воды, f, $м^2$	КУ40-1	0,0096	0,0202	0,0202	-	0,0101 -	0,0063
	КУ-60-2	0,0148	0,0318	0,0318	-	0,0159 0,0318	0,0085
	КУ-80-3	0,0192	0,0404	0,0404	-	0,0202 0,0404	0,0127
	КУ-100-1	0,0212	0,0425	0,0425	-	0,0212 0,0425	0,0127
	КУ-125	0,0276	0,0552	0,0552	-	0,0276 0,0552	0,0170
	КУ-150	0,0340	0,0636	0,0636	-	0,0318 -	0,0170
Диаметр труб	32/26						
Количество рядов по ходу газов	Для всех котлов КУ	12	20	22		8	3·16
Шаги по ширине		172	86			90	-
Шаги по глубине		70				-	-
Эффективная толщина излучающего слоя, м		0,161					-

* при давлении 4,5 МПа, ** при давлении 1,8 МПа

Таблица 5

Состав газов за различными технологическими агрегатами

Тип котла	Состав газов, %						
	CO_2	N_2	SO_2	CO	O_2	H_2	H_2O
Продукты сгорания среднего состава	13	78,5	-	-	1,5	-	7
Котлы за печами обжига серного колчедана		78,5	5,5	-	10		6
Котлы для охлаждения конвертированных газов в производстве аммиака	16,8	14,0	-	3,4	-	41,8	24
Котлы установок сухого тушения кокса	5	66,6	0,04	18	-	10	-

Таблица 6

Теплоемкость газов, $c_{p,i}$ кДж/($м^3$К)

t, ^{0}C	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	H_2
1	2	3	4	5	6	7	8
0	1,3046	1,2992	1,29922	1,5914	1,4943	1,7333	1,278
100	1,3167	1,304	1,3013	1,7132	1,5056	1,813	1,2905
200	1,3356	1,3042	1,3075	1,7961	1,5219	1,888	1,299
300	1,3565	1,3113	1,3172	1,8711	1,5424	1,957	1,3
400	1,3766	1,3205	1,3289	1,9377	1,5654	2,018	1,303
500	1,3967	1,3327	1,3431	1,9967	1,5893	2,072	1,307
600	1,416	1,3456	1,3578	2,0494	1,6144	2,1114	1,309
700	1,4344	1,359	1,3716	2,0967	1,6412	2,152	1,311
800	1,4503	1,3720	1,3854	2,1395	1,6684	2,186	1,316
900	1,4645	1,385	1,3984	2,1788	1,6957	2,215	1,324
1000	1,4775	1,3971	1,4114	2,214	1,7229	2,24	1,328

Энтальпия газов на входе в котел-утилизатор, кДж/$м^3$:

$$I'_г=c_p t'_г. \quad (2)$$

Энтальпия газов на выходе из котла-утилизатора, кДж/$м^3$:

$$I''_г=c_p t''_г. \quad (3)$$

По вычисленным значениям $I'_г$ и $I''_г$ строят график зависимости изменения энтальпии газов в газоходах котла. Зависимость $I_г$ от изменения $t_г$ – практически линейная. При дальнейшем расчете, определив из уравнения теплового баланса энтальпию газов в том или ином газоходе, по I-t диаграмме определяют температуру газов.

Энтальпию перегретого пара $i_{пп}$ при заданных значениях температуры $t_{пп}$ и давления $P_{пп}$ перегретого пара, температуру пара в барабане t_s и его энтальпию i'' (при условии, что степень сухости пара, выходящего из барабана, x=I) определяют по i-S диаграмме (рис. 6) или по таблицам сухого насыщенного и перегретого пара [1]. При этом давление пара в барабане определяют как сумму давления перегретого пара и гидравлического сопротивления пароперегревателя $\Delta P \approx 0,1 P_{пп}$:

$$P_б=P_{пп}+\Delta P. \quad (4)$$

Энтальпия кипящей воды i' определяется по табл. 7 для сухого насыщенного пара и воды на линии насыщения, а также в [1]. Энтальпия питательной воды с достаточной для практических расчетов точностью может быть рассчитана (при давлениях до 15 МПа) по выражению, кДж/кг:

$$i_{пв} = 4,19 t_{пв}. \quad (5)$$

Таблица 7

Удельные объемы и энтальпии сухого насыщенного пара и воды на кривой насыщения

P, кг/см^2	5	10	15	20	25	30	35	40	45
T, ^{0}C	151,1	179,0	197,4	211,4	222,9	232,8	241,4	249,2	256,2
v, м^3/кг	0,382	9,198	0,134	0,101	0,081	0,068	0,058	0,051	0,045
i', кДж/кг	637,3	759,2	839,7	904,6	957,8	1004	1045	1083	1117
i'', кДж/кг	2749	2778	2792	2799	2803	2804	2804	2810	2800

5. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС И ПАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

Основными уравнениями для проведения теплового расчета котла-утилизатора являются уравнения теплового баланса и уравнение теплопередачи [1]:

$$Q_г = \varphi G_0 (I'_г - I''_г), \quad (6)$$

$$Q_г = D_{пп}(i_{пп} - i_{пв}) + D_{пр}(i' - i_{пв}), \quad (7)$$

$$Q_т = kF\Delta t, \quad (8)$$

где $Q_г$ - теплота, отданная дымовыми газами, кВт; $Q_т$ - теплота, воспринятая рассчитываемой поверхностью нагрева, или тепловосприятие котла-утилизатора, кВт; φ- коэффициент сохранения тепла, учитывающий его потери в окружающую среду (принимается φ=0,98); $D_{пп}$ - паропроизводительность котла-утилизатора, кг/с; $i_{пп}$ - энтальпия перегретого или насыщенного пара на выходе из котла, кДж/кг ; $i_{пв}$ - энтальпия питательной воды, кДж/кг; G_o - объемный расход газов при нормальных условиях, м^3/ч; k- коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·К); $D_{пр}$ - расход воды на продувку котла; кг/с: $D_{пр} = D_{пп}\Psi_1$, где Ψ_1- величина непрерывной продувки котла, % (принимаемая не более 5%); F - расчетная поверхность нагрева, м^2; Δt - температурный напор, °С.

Расчет ведется методом последовательных приближений [1]. Задавшись в первом приближении температурой газов на выходе из котла, из уравнения теплового баланса определяют количество теплоты, отданное дымовыми газами $Q_г$. Приравнивая правые части уравнений теплового баланса (6), (7) находят паропроизводительность котла-утилизатора $D_{пп}$.

6. РАСЧЕТ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ

Расчет котла-утилизатора, имеющего пароперегреватель, начинается с расчета последнего, затем следует расчет испарительной поверхности. Теплота, идущая на перегрев пара, кВт,

$$Q_{пп} = D_{пп}(i_{пп} - i''). \quad (9)$$

С учетом затрат теплоты на подогрев пара в пароперегревателе рассчитывают энтальпию газов за ним

$$I''_{пп} = I'_г - Q_{пп} / G_о \cdot \varphi \quad (10)$$

и по i-S диаграмме определяют температуру газов за пароперегревателем.

Температурный напор определяется как среднелогарифмическая разность температур по формуле

$$\Delta t = (\Delta t_б - \Delta t_м) / \ln(\Delta t_б / \Delta t_м), \quad (11)$$

где $\Delta t_б$ - разность температур сред в том конце поверхности нагрева, где она больше, °С; $\Delta t_м$ - разность температур в другом конце поверхности, °С.

Когда $\Delta t_б / \Delta t_м \le 1{,}7$, температурный напор можно с достаточной степенью точности определять как среднеарифметическую разность температур, °С:

$$\Delta t = (\Delta t_б + \Delta t_м) / 2. \quad (12)$$

Средняя температура потока дымовых газов определяется как полусумма температур газов на входе в поверхность нагрева $t'_г$ и выходе из нее:

$$t_г = (t'_г + t''_{пп}) / 2. \quad (13)$$

Скорость движения дымовых газов определяется по формуле

$$w_г = G_о(t_г + 273)/(3600 f_г \cdot 273), \quad (14)$$

где G_0 - объем дымовых газов при нормальных условиях на входе в котел, $м^3/ч$; $f_г$ - живое сечение для прохода дымовых газов, $м^2$ (принимается по конструктивной характеристике). При течении в круглой трубе ее эквивалентный диаметр $d_э$ равен внутреннему. При течении в трубе некруглого сечения, в кольцевом канале и при продольном омывании пучков

$$d_э = 4f_г / U, \quad (15)$$

где U - полный омываемый периметр, м. Для газохода прямоугольного сечения, заполненного трубами конвективных пучков,

$$d_э = \frac{4\left(ab - z\frac{\pi d^2}{4}\right)}{2(a+b) + z\pi d}, \quad (16)$$

где a и b - поперечные размеры газохода в свету, м; z - количество труб в газоходе; d - наружный диаметр труб, м. Средняя температура пара определяется как полусумма температур насыщенного и перегретого пара:

$$t_{ср} = (t_s + t_{пп}) / 2. \quad (17)$$

Средняя скорость перегретого пара находится по формуле

$$w_{пер} = v_{пп} D_{пп} /(3600 f_{п}), \qquad (18)$$

где $v_{пп}$ - удельный объем перегретого пара при средней его температуре $t_{ср}$, $м^3/кг$ (определяется по табл. 7 либо по i-S диаграмме (рис. 6)); $f_{п}$ - живое сечение для прохода пара, $м^2$ (определяется по конструктивным характеристикам).

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле

$$k = \Psi \alpha_1 /(1 + \alpha_1 / \alpha_2), \qquad (19)$$

где α_1 и α_2 - коэффициенты теплоотдачи от греющей среды к стенке и от стенки к обогреваемой среде соответственно, $Вт/(м^2 \cdot К)$; ψ -коэффициент тепловой эффективности. Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_1 определяется по номограммам 12, 13 или 14 из [1] или по рис. 2,3,4 в зависимости от типа пучка (коридорный или шахматный) и характера омывания его газами (продольное или поперечное). Для газотрубных котлов-утилизаторов характерны высокие скорости движения газов и, как правило, диапазона диаграммы (рис.4) по скоростям недостаточно для определения коэффициента теплоотдачи. В этом случае коэффициент теплоотдачи от газа к стенке необходимо рассчитывать по формуле

$$\alpha_1 = 0{,}023 \frac{\lambda}{d_э} \left(\frac{w d_э}{\nu} \right)^{0{,}8} Pr^{0{,}4} C_t C_d C_l, \qquad (20)$$

где λ - теплопроводность газов, $Вт/(м \cdot К)$; ν- вязкость газов, $м^2/с$; Pr – критерий Прандтля; C_t – поправка, учитывающая влияние температуры; C_d – поправка на форму канала; C_l – поправка на относительную длину. Данные поправки могут быть приняты по рис.4а. Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к обогреваемой среде α_2 определяется по номограмме 15 [1] либо по рис.5 по средним значениям давления, температуры, скорости пара и внутреннему диаметру труб. Теплоотдачу излучением $\alpha_л$ не учитывают ввиду обычно невысокой температуры газов на входе в котел и небольшой толщины излучающего слоя. Коэффициент тепловой эффективности принимают равным $\psi = 0{,}6 \div 1$.

Тепловосприятие пароперегревателя определяется из уравнения теплопередачи (8). Если полученное из уравнения теплообмена значение тепловосприятия $Q_т$ отличается от определенного по уравнению теплового баланса $Q_{пп}$ не более чем на 2%, расчет поверхности не уточняется. Окончательными считаются температура и тепловосприятие, вошедшие в уравнение теплового баланса. При расхождении более чем на 2% принимают новое значение конечной температуры и расчет повторяют. Для второго приближения целесообразно принимать температуру, отличающуюся от принятой при первом приближении не более чем на 50°С. В этом случае следует пересчитать толь-

ко температурный напор и заново решить уравнение теплового баланса и теплопередачи.

7. РАСЧЕТ ИСПАРИТЕЛЯ И ЭКОНОМАЙЗЕРА

Расчет испарителя. Из расчета пароперегревателя известны температура $t'_п$ и энтальпия $I'_п$ дымовых газов на входе в испаритель. Температура газов на выходе из испарителя $t''_{пп}$ принимается и последующим расчетом уточняется. Количество теплоты, отданное газами пароводяной смеси в испарительной части, кВт,

$$Q_и = \varphi G_о \left(I'_и - I''_и\right), \qquad (21)$$

где $Q_и$ - количество теплоты, отданное газами пароводяной смеси. Средний температурный напор, средняя температура и скорости газов в газоходе определяются с использованием формул (11)-(16). Коэффициент теплопередачи от газов к стенке, Вт/(м^2·К):

$$k = \zeta\alpha_1, \qquad (22)$$

где α_1 определяется по тем же номограммам, что и для пароперегревателя. Коэффициент использования ζ берут в пределах 0,65÷0,8. Тепловосприятие испарительной части рассчитывают по формуле (8). В случае несовпадения тепловосприятия с рассчитанным значением $Q_п$ более чем на 2% принимают новое значение температуры на выходе из поверхностей и повторяют расчет.

Расчет экономайзера. Количество теплоты, переданное воде в водяном экономайзере, кВт:

$$Q_{в.э} = D\left(i''_{в.э} - i_{п.в}\right). \qquad (23)$$

Температура воды $t''_{в.э}$, выходящей из экономайзера, зависит от конструкции последнего. В экономайзере кипящего типа она равна температуре кипения при давлении в барабане, в экономайзере некипящего типа вода на выходе из экономайзера должна иметь температуру на 25-30°С ниже температуры кипения. Исходя из выбранной температуры $t''_{в.э}$, определяют энтальпию $i''_{в.э}$. Энтальпия газов на входе в экономайзер равна энтальпии газов на выходе из испарительной части.

Средний температурный напор, средняя температура газов в газоходе, скорость газов в поперечном сечении газохода водяного экономайзера определяются по формулам (11)-(16), коэффициент теплопередачи определяются по формуле (22), а тепловосприятие - по формуле (8).

8. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Тепловой расчет газотрубных котлов, не имеющих ни пароперегревателя, ни экономайзерных поверхностей, сводится только к расчету испарительной части.

Несколько сложнее расчет котлов ВТКУ, УККС и ГТКУ. Часть поверхностей этих котлов (чаще всего испарительная или пароперегреватель) размещены в объеме кипящего слоя, а теплоту дымовых газов утилизируют поверхности, расположенные в самом котле. Расчет этих котлов начинают с составления теплового баланса, в котором учитывают дополнительное количество теплоты, подведенное к рабочему телу в кипящем слое:

$$Q_{к.с} + Q_г = D_{пп}(i_{пп} - i_{пв}) + D_{пр}(i' - i_{пв}), \qquad (24)$$

где $Q_{к.с}$ - теплота, подведенная к рабочему телу в объеме кипящего слоя, рассчитывается по формуле (8), в которой коэффициент теплопередачи в кипящем слое для современных котлов может быть принят равным $k_{к.с}$=200 Вт/(м^2·К). Температурный напор при этом определяется по формуле (11), где при известной температуре кипящего слоя

$$\Delta t_б = t_{к.с} - t'; \quad \Delta t_м = t_{к.с} - t'',$$

где t' и t'' - температура теплоносителя на входе и выходе из поверхности, размещенной в кипящем слое. Например, часть испарительной поверхности котла УККС 8/40 расположена в объеме кипящего слоя, а экономайзер у этого котла отсутствует. В этом случае t' - это температура питательной воды, а t'' - это температура кипения t_s при давлении в барабане.

Из уравнения (24) определяется расход вырабатываемого пара $D_{пп}$, а в дальнейшем расчет ведется по обычной схеме. При расчетах котлов установок сухого тушения кокса, имеющих пароперегреватель, испарительную и экономайзерные поверхности, последовательно рассчитывается тепловосприятие пароперегревателя, испарителя и экономайзера.

9. ПРИМЕР РАСЧЕТА КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

Задание на проектирование

Провести тепловой и конструктивный расчет котла-утилизатора КСТ-80 при следующих исходных данных: расход газов через котел-утилизатор G_0=6500 м^3/ч; давление пара $P_{пп}$=4 МПа; температура пара $t_{пп}$=430°С; температура газов перед котлом t' - 750°С; температура питательной воды $t_{пв}$=100°С. Газы имеют следующий состав: CO_2=7%, CO=16%, N_2=60%, H_2=12%, SO_2=1%, H_2O=4%.

Тепловой расчет котла-утилизатора

Расчет приведен ниже в табл. 8, где в колонке "Параметр" указывается величина, подлежащая определению, в колонке "Формула или рекомендация" - сквозные номера пунктов, таблиц, рисунков, формул из методических указаний к курсовой работе.

Таблица 8

Пример расчета котла-утилизатора

№ п/п	Параметр	Формула или рекомендация	Расчет
1	2	3	4
1	Теплоемкость газов на входе в котел	$c_p = \sum c_{p,i} \cdot r_i$	2,14·0,07+1,3854·0,16+1,372× ×0,6+1,316·0,12+2,186·0,01+ +1,686·0,04=1,442 кДж/(м^3·К)
2	Задаемся температурой газов на выходе из котла	Табл. 1	190ºС
3	Теплоемкость газов на выходе из котла	$c_p = \sum c_{p,i} \cdot r_i$	1,871·0,07+1,317·0,16+1,311× ×0,6+1,3·0,12+1,959·0,01+ +1,542·0,04=1,366 кДж/(м^3·К)
4	Энтальпия газов при входе в котел	$I'_г = c_p t'_г$	1,442·750=1081,5 кДж/м^3
5	Энтальпия газов на выходе из котла	$I''_г = c_p t''_г$	1,366·155=259,5 кДж/м^3
6	Производится построение графика	I=f(t)	-
7	Энтальпия перегретого пара	По i-S диаграмме (рис. 6)	3290 кДж/кг
8	Давление пара в барабане	$P_б=P_{пп}+\Delta P$	4+0,4=4,4 Мпа
9	Температура пара в барабане	t_s по i-S диаграмме	255 ºС
10	Энтальпия пара в барабане	i'' по i-S диаграмме	2840 кДж/кг
11	Энтальпия кипящей воды в барабане	i' по i-S диаграмме	1117 кДж/кг
12	Энтальпия питательной воды	$i_{пв} = 4,19t_{пв}$	4,19·100=419 кДж/кг
13	Расход дымовых газов	G_0	65000/3600=18,05 м^3/с

Продолжение табл.8

1	2	3	4
ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС И ПАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ КОТЛА			
14	Коэффициент сохранения тепла	φ, принимаем значение	0,98
15	Теплота, отданная дымовыми газами	$Q_г = \varphi G_0 (I'_г - I''_г)$	0,98·18,05·(1081,5-259,5)= =14540,4 кВт
16	Расход продувочной воды из барабана	$D_{пр} = D_{пп} \Psi_1$	$D_{пр} = D_{пп} \cdot 0,05$
17	Паропроизводительность	$D_{пп} = Q_г / /[(i_{пп} - i_{пв}) + + 0,05(i' - i_{пв})]$	14540,5/[(3290-419)=0,05× ×(1117-419)]=5 кг/с
РАСЧЕТ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ			
18	Теплота, идущая на перегрев пара	$Q_{пп} = D_{пп}(i_{пп} - i'')$	5,0·(3290-2840)=2250 кВт
19	Энтальпия газов за пароперегревателем	$I''_{пп} = I'_г - Q_{пп} / G_o \cdot \varphi$	1081,5-[2250/(0,98·18,050]= =954 кДж/м^3
20	Температура газов за пароперегревателем	$t''_{пп}$, по i-s диаграмме	680 ºС
21	Большая разность температур	$\Delta t_б = (t_г' - t_s)$	750-255=495ºС
22	Меньшая разность температур	$\Delta t_м = (t''_{пп} - t_{пп})$	680-430=250ºС
23	Температурный напор	$\Delta t = \frac{(\Delta t_б - \Delta t_м)}{\ln(\Delta t_б / \Delta t_м)}$	(495-250)/ln(495/250)=358,7ºС
24	Средняя температура дымовых газов	$t_г = (t'_г + t''_{пп})/2$	(750+680)/2=715ºС
25	Живое сечение для прохода газов	По конструктивным характеристикам, $f_г$	9,13 м^2
26	Скорость движения дымовых газов	$w_г = \frac{G_o(t_г + 273)}{3600 f_г \cdot 273}$	18,05·(715+273)/(9,13·273)= =7,15 м/с
27	Средняя температура пара	$t_{ср} = (t_s + t_{пп})/2$	(255+430)/2=342,5 °С
28	Живое сечение для прохода пара	По конструктивным характеристикам	3,14·(0,026)^2·50/4=0,0265 м^2

Продолжение табл.8

1	2	3	4
30	Средняя скорость перегретого пара	$w_{пер} = \frac{v_{пп} D_{пп}}{(3600 f_п)}$	0,06·5,3/0,0265=12 м/с
31	Коэффициент теплоотдачи от греющей среды к стенке	α_1 – по номограмме 13 [1] (рис.3)	0,9·1·1·76=68,9 Вт/(м^2·К)
32	Коэффициент теплоотдачи	α_2 – по номограмме 15 [1] (рис.5)	936 Вт/ (м^2·К)
33	Коэффициент тепловой эффективности	Принимаем значение	0,61
34	Коэффициент теплопередачи	$k = \frac{\Psi \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$	0,61·68,9/(1+68,9/936)= =39,13 Вт/ (м^2·К)
35	Площадь поверхности пароперегревателя	$F_{пп}$	159 м^2
36	Тепловосприятие пароперегревателя	$Q_т = k F_{пп} \Delta t$	159·39,13·358,7-10^{-3}= =2231,7 кВт
37	Невязка тепловосприятия	$\frac{Q_{пп} - Q_т}{Q_{пп}} \cdot 100$	(2250-2231,7)/2250·100=0,81 %
РАСЧЕТ ИСПАРИТЕЛЯ			
38	Температура газов за испарителем	Принимаем значение	330°С
39	Энтальпия газов за испарителем	По $I_г$-$t_г$ диаграмме	450 кДж/м^3
40	Количество теплоты, отданное газами пароводяной смеси	$Q_и = G_о (I''_{пп} - I''_и) J$	18,05·0,98(954-450)= =89153 кВт
41	Средний температурный напор	$\Delta t = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{\ln \frac{\Delta t_б}{\Delta t_м}}$	[(680-255)-(330-255)]/ln[(680-255)/(330--255)]=201,8 ºС
42	Средняя температура газов	$t_г = \frac{t''_и + t'_и}{2}$	(330+680)/2=505 ºС
43	Живое сечение для прохода газов	По конструктивным характеристикам $f_г = ab - zld$	3,25·3,73-60·3,25·0,025= =7,2475 м^2

Продолжение табл. 8

1	2	3	4
45	Коэффициент теплоотдачи	α_1 – по номограмме 13 [1] (рис.3)	0,9·1·1·85,8=77,3 Вт/ (м^2·К)
46	Коэффициент использования	Принимаем $k = \zeta\alpha_1$	0,6·77,3=46,38 Вт/ (м^2·К)
47	Тепловосприятие испарителя	$Q_т = kF\Delta t$	46,38·950·201,8·10^{-3}=8891,5 кВт
48	Невязка тепловосприятий	$\Delta Q = \frac{Q_и - Q_т}{Q_и} \cdot 100$	(9036,7-891,5)/9036,7× ×100=1,6%
РАСЧЕТ ЭКОНОМАЙЗЕРА			
49	Количество теплоты, отданное водяному экономайзеру	$Q_{ВЭ} = \varphi G_0 (I''_и - I''_г)$	0,98·18,05(450-259,5)= =3369,7 кВт
50	Энтальпия воды на выходе из экономайзера	$i''_в = \frac{Q_{ВЭ}}{D_{пп}} + i_{пв}$	419+3369,7/5=1092 кДж/кг
51	Температура пароводяной смеси на выходе из экономайзера	Табл.5	252 ºС
52	Живое сечение для прохода газов	$f_г = ab - zld$	3,25·3,69-56·3,25·0,025= =7,4425 м^2
53	Средняя температура	$t_г^{ср} = \frac{t''_и + t'''_{ВЭ}}{2}$	(330+190)/2=260 ºС
54	Скорость движения дымовых газов	$w_г = \frac{G_o (t_г^{ср} + 273)}{f_г \cdot 273}$	[18.05(260+273)]/ /(7,4425·273)==4,73 м/с
55	Средний температурный напор	$\Delta t = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{\ln \frac{\Delta t_б}{\Delta t_м}}$	[(190-100)(330- 252)]/[ln(190-110)/(330- -252)]=84º С
56	Коэффициент теплоотдачи	α_1 – по номограмме 14 [1]	63.8 Вт/ (м^2·К)
57	Коэффициент использования	$k = \zeta\alpha_1$	0,72·63,8=45,94 Вт/ (м^2·К)

Продолжение табл. 8

1	2	3	4
58	Тепловосприятие водяного экономайзера	$Q_т = kF\Delta t$	$870 \cdot 45{,}94 \cdot 84 \cdot 10^{-3} = 3357$ кВт
59	Невязка тепловосприятий	$\Delta Q = \frac{Q_{ВЭ} - Q_{ВЭ}}{Q_{ВЭ}} \cdot 100$	(3369,7-357)/3369,7·100= =0,4 %
РАСЧЕТ ЗАКОНЧЕН			

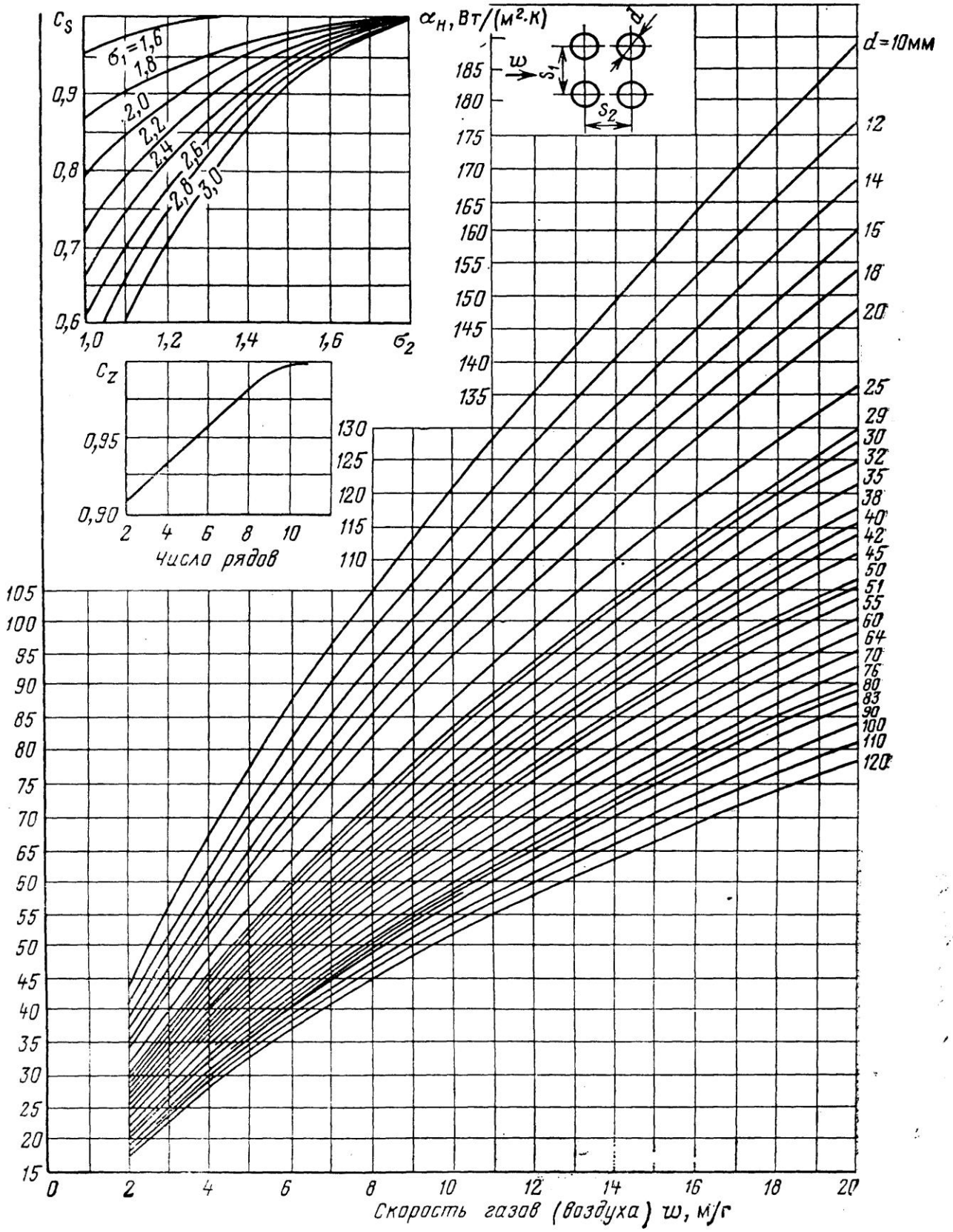


Рис.2. Коэффициент теплоотдачи конвекцией для ширм и коридорных гладкотрубных пучков при поперечном омывании $\alpha_k = \alpha_н C_z C_s C_ф$

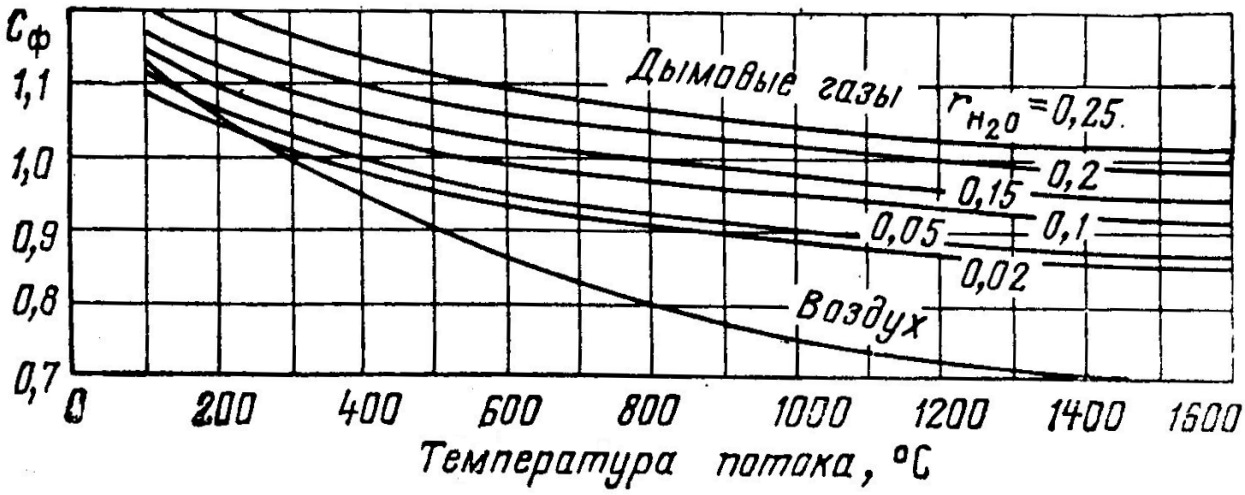


Рис.2а. Поправочный коэффициент для расчета коэффициента теплоотдачи к рис. 2

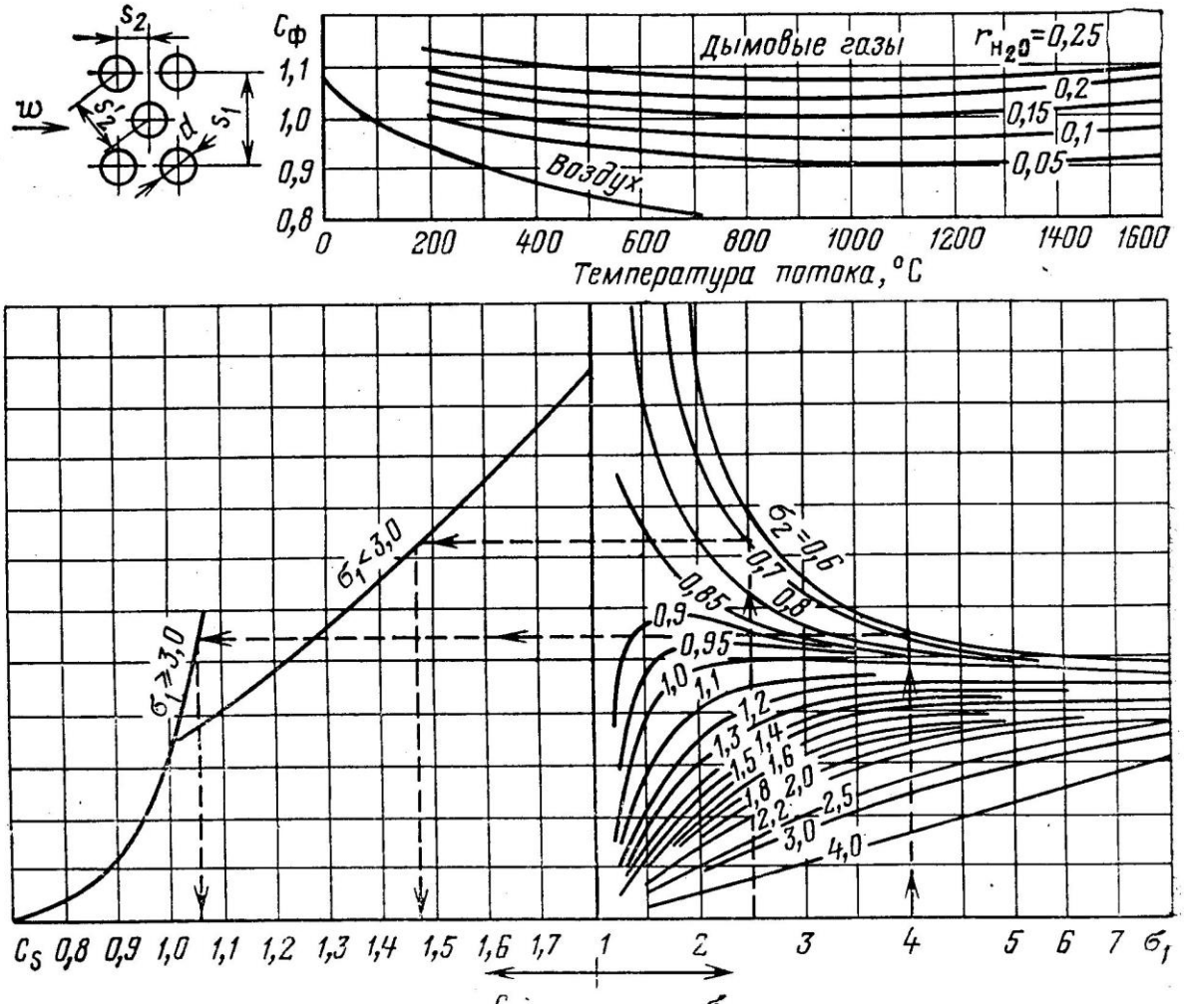


Рис. 3а. Поправочный коэффициент для расчета коэффициента теплоотдачи к рис. 3

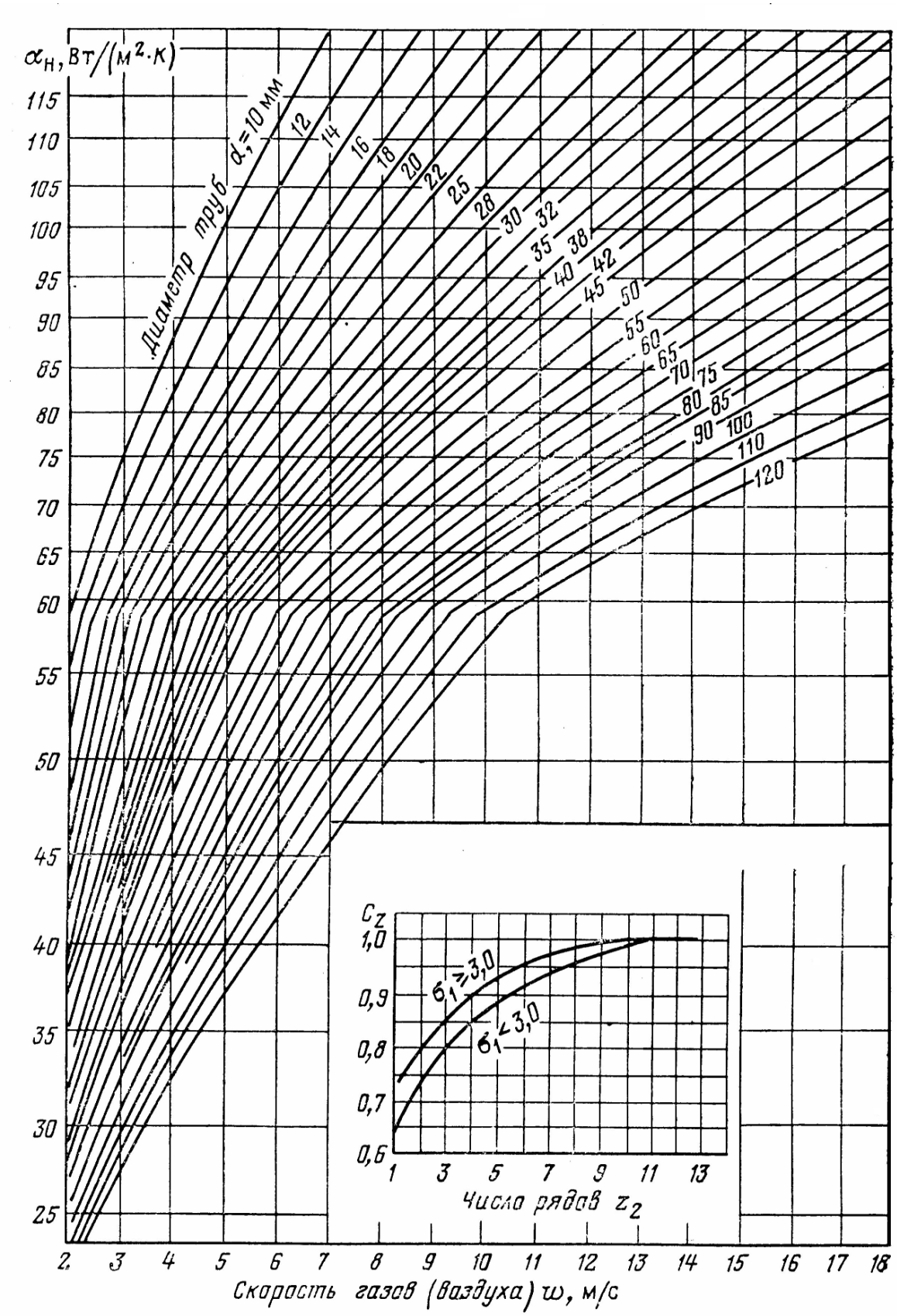


Рис. 3. Коэффициент теплоотдачи конвекцией для шахматных гладкотрубных пучков при поперечном омывании $\alpha_к = \alpha_н C_z C_s C_ф$

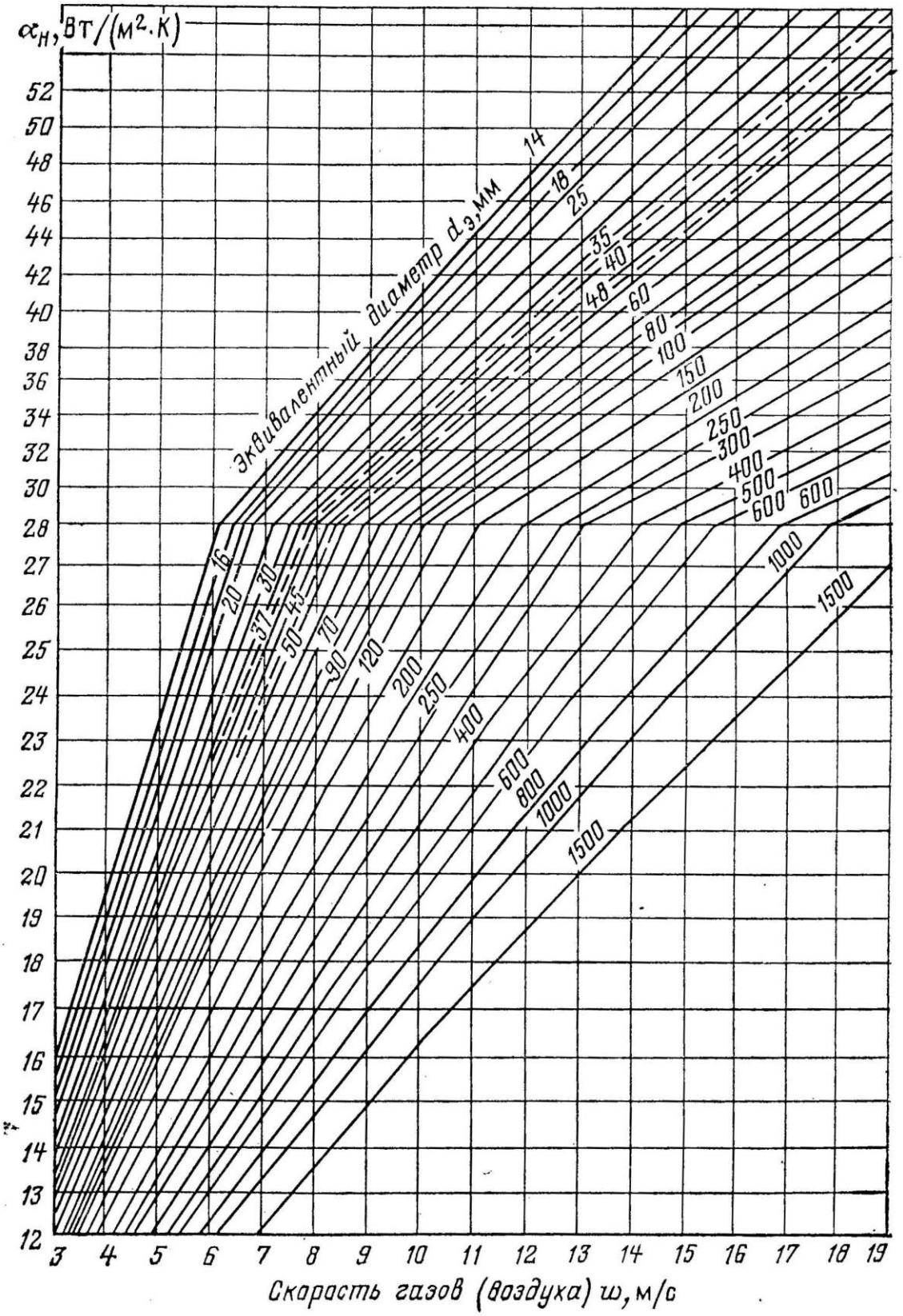


Рис. 4. Коэффициент теплоотдачи конвекцией при продольном омывании дымовых газов $\alpha_к = \alpha_н C_l C_ф$

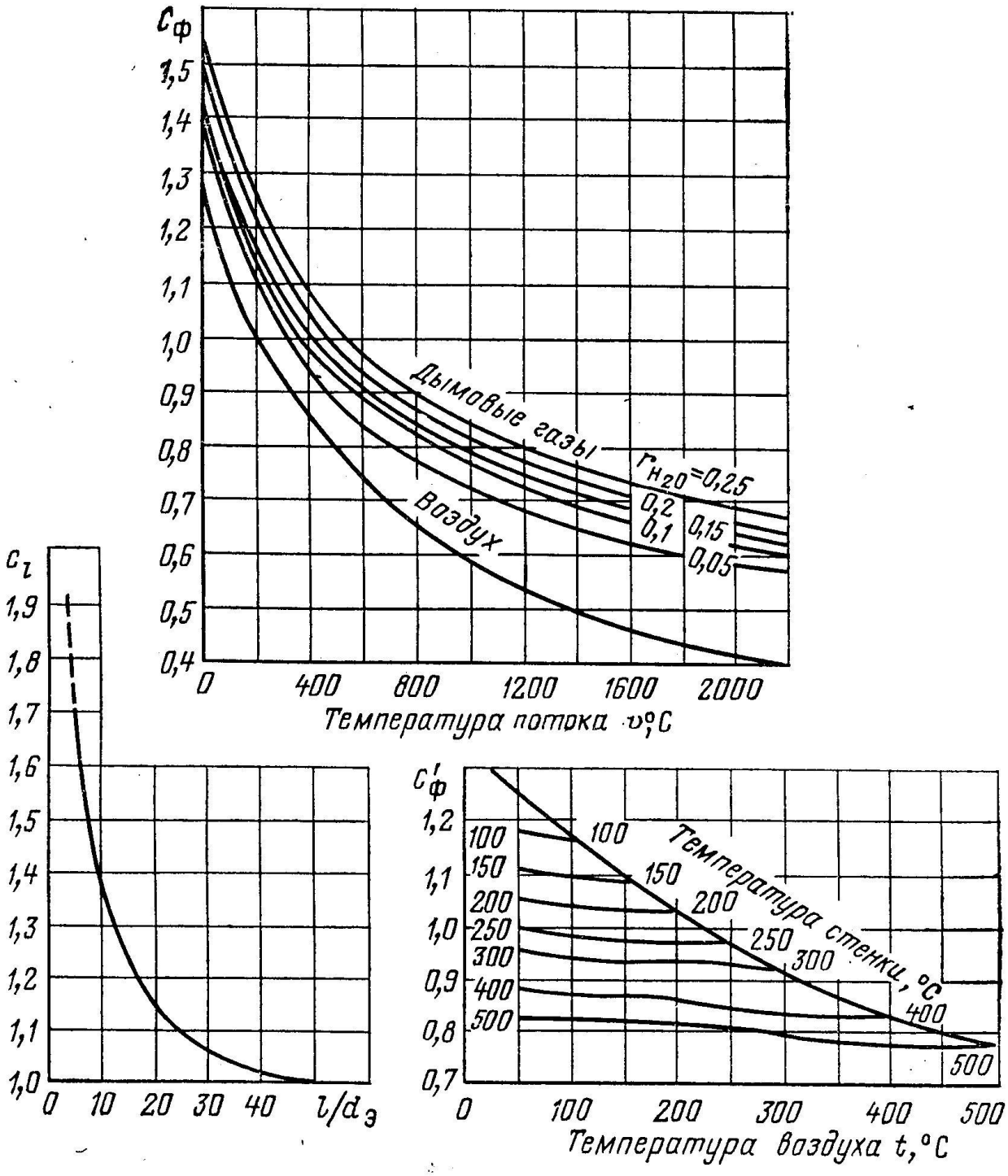


Рис.4а. Поправочные коэффициенты для расчета коэффициента теплоотдачи к рис. 4

Список литературы.

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / Под общ. ред. Н.В. Кузнецова М. : Энергия, 1973. 296 с.
2. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / А.П. Воинов, В.А. Зайцев, Л.И. Куперман, Л.Н. Сидельковский . М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
3. Воинов А.П., Куперман Л.И., Сушон С.П. Паровые котлы на отходящих газах. Киев: Вища школа, 1983. 176 с.
4. Котлы-утилизаторы и котлы энерготехнологические (отраслевой каталог) / НИИИНФОРМЭНЕРГОМАШ. М., 1985. 84 с.
5. Газотрубные котлы-утилизаторы и энерготехнологические котлы / НИИЭкономики. М., 1986. 41 с.

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ

Составители Мунц Владимир Александрович
Павлюк Елена Юрьевна

Редактор И.В. Коршунова

Подписано в печать 26.03.2001 Формат 60×84 1/16
Бумага типографская Офсетная печать Усл.печ. л. 1,86
Уч.-изд. л 1,33 Тираж 50 Заказ Цена «С»

Редакционно-издательский отдел УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
620002, Екатеринбург