

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Соловьев Дмитрий Александрович
Должность: ректор ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ
Дата подписания: 26.04.2021 13:15:53
Уникальный программный ключ:
5b8335c1f3d6e7bd91a51b28834cdf2b81866538

Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И.Вавилова

Тепловой расчет котельного агрегата

Методические указания к курсовому проекту

для студентов направления подготовки 13.03.01 – Теплоэнергетика и
теплотехника

Саратов 2019

Содержание

Введение

Требования к оформлению пояснительной записки

Определение объемов воздуха и продуктов сгорания

Расчет энтальпий воздуха и продуктов сгорания

Тепловой баланс котлоагрегата

Определение геометрических характеристик топки

Тепловой расчет топки

Расчет пароперегревателя

Расчет водяного экономайзера

Расчет воздухоподогревателя

Приложения

Введение

Курсовой проект выполняется по заданию, выдаваемому преподавателем. В проекте производится проектно-конструкторский расчет котла применительно к заданному виду топлива, расчёт материального баланса процесса горения и теплового баланса котла, осуществляется тепловой расчёт топочного устройства. Выбирается тип низкотемпературной поверхности нагрева и производится ее конструктивный тепловой расчёт.

Требования к оформлению пояснительной записки

Пояснительная записка оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-2001. Она содержит: титульный лист, задание, содержание, текст, заключение, список использованной литературы и при необходимости приложения. Список использованной литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003.

Все расчеты выполняются в международной системе измерения физических величин (система СИ). Если используются справочные данные в другой системе измерения, то их необходимо перевести в систему СИ.

Расчеты приводятся в развернутом виде: записывается расчетная формула, численные значения всех переменных и результаты расчета. Для величин, имеющих размерность, необходимо ее указывать.

Текстовые документы выполняются на формах, установленных соответствующими стандартами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и Системы проектной документации для строительства (СПДС).

Расстояние от рамки формы до границ текста в начале и в конце строк - не менее 3 мм.

Расстояние от верхней или нижней строки текста до верхней или нижней рамки должно быть не менее 10 мм.

Абзацы в тексте начинают отступом 10 - 17 мм.

Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всего документа (части, книги), обозначенные арабскими цифрами без точки в конце. Заголовки должны четко и кратко отражать содержание разделов, подразделов.

Каждый раздел текстового документа рекомендуется начинать с нового листа.

Заголовки следует печатать прописными буквами без точки в конце, не подчеркивая. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Расстояние между заголовком и текстом при выполнении документа машинописным способом должно быть равно 3 или 4 интервалам, при выполнении рукописным способом - 15 мм. Расстояние между заголовками раздела и подраздела - 2 интервала, при выполнении рукописным способом - 8 мм.

В формулах в качестве символов следует применять обозначения, установленные соответствующими государственными стандартами. Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснены ранее в тексте, должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснения каждого символа следует давать с новой строки в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Первая строка пояснения должна начинаться со слова "где" без двоеточия после него.

Пример - Плотность каждого образца ρ , кг/м³, вычисляют по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

где m - масса образца, кг;

V - объем образца, м³.

Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, разделяют запятой.

Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке умножения применяют знак "х".

Формулы, за исключением формул, помещаемых в приложении, должны нумероваться сквозной нумерацией арабскими цифрами, которые записывают на уровне формулы справа в круглых скобках. Одну формулу обозначают - (1).

Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в круглых скобках.

Иллюстрации могут быть расположены как по тексту документа (возможно ближе к соответствующим частям текста), так и в конце его. Иллюстрации, за исключением иллюстраций приложений, следует нумеровать арабскими цифрами

сквозной нумерацией. Обозначение иллюстрации располагается после самой иллюстрации по центру страницы и содержит слово «Рисунок», порядковый номер иллюстрации без точки в конце номера и название иллюстрации без точки в конце названия, выполненное с прописной буквы.

Например: «Рисунок 1 - Схема воздухопроводов»

Таблицы применяют для лучшей наглядности и удобства сравнения показателей. Название следует помещать над таблицей. Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией.

Таблицы каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения. Если в документе одна таблица, она должна быть обозначена "Таблица 1" или "Таблица В.1", если она приведена в приложении В.

Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой.

На все таблицы документа должны быть приведены ссылки в тексте документа, при ссылке следует писать слово "таблица" с указанием ее номера.

Заголовки граф и строк таблицы следует писать с прописной буквы, а подзаголовки граф - со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголовков таблиц точки не ставят. Заголовки и подзаголовки граф указывают в единственном числе. Высота строк таблицы должна быть не менее 8 мм.

Слово "Таблица" указывают один раз слева над первой частью таблицы и через тире указывают наименование таблицы без точки в конце. Над другими частями пишут слова "Продолжение таблицы" с указанием номера (обозначения) таблицы.

Определение объемов воздуха и продуктов сгорания

Прежде чем приступить к выполнению данного раздела необходимо определить элементарный состав топлива (П.1.)

Теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для полного сгорания твердого или жидкого топлива, м³/кг:

$$V_{CVX}^0 = 0,089(C^P + 0,375S_{\text{Л}}^P) + 0,265H^P - 0,033O^P. \quad (1.1)$$

Количество воздуха, необходимого для полного сгорания газообразного топлива, м³/м³:

$$V_{CVX}^0 = 0,0476 \cdot \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \Sigma \left(\left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n \right) - O_2 \right]. \quad (1.2)$$

Теоретические объёмы продуктов сгорания, необходимые для полного сгорания топлива определяются по следующим формулам:

Объем трехатомных газов при сжигании твердого или жидкого топлива, м³/кг:

$$V_{RO2} = 0,0186 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S_{\text{Л}}^P). \quad (2.1)$$

Объем трехатомных газов при сжигании газообразного топлива, м³/м³:

$$V_{RO2} = 0,01 \cdot (CO_2 + CO + H_2S + \Sigma(mC_m H_n)) \quad (2.2)$$

Объем двухатомных газов при сжигании твердого или жидкого топлива, м³/кг:

$$V_{R2}^O = 0,79 \cdot V_{CVX}^0 + 0,008 \cdot N^P \quad (3.1)$$

Объем двухатомных газов при сжигании газообразного воздуха, м³/м³:

$$V_{R2}^O = 0,79V_{CVX}^0 + \frac{N_2}{100}. \quad (3.2)$$

Объем водяных паров при сжигании твердого или жидкого топлива, м³/кг:

$$V_{H2O}^0 = 0,0124(9H^P + W^P) + 0,0161 \cdot V_{CVX}^0 \quad (4.1)$$

Теоретический объем водяных паров при сжигании газообразного воздуха, м³/м³:

$$V_{H_2O}^O = 0,01 \cdot \left(H_2S + H_2 + \Sigma \left(\frac{n}{2} C_m H_n \right) + 0,124 d_{Г.Т} \right) + 0,0161 V_{CVX}^0, \quad (4.2)$$

где $d_{Г.Т}$ – влагосодержание газообразного топлива, принимается равным 0,01 кг/м³.

Коэффициент избытка воздуха в конвективном испарительном пучке (пароперегревателе или фестоне), $\alpha_{КП}$:

$$\alpha_{КП} = \alpha_T + \Delta\alpha', \quad (5)$$

где $\Delta\alpha'$ – коэффициент присоса воздуха в конвективном испарительном пучке (П.2).

Коэффициент избытка воздуха в экономайзере:

$$\alpha_{ЭК} = \alpha_{КП} + \Delta\alpha'', \quad (6)$$

где $\Delta\alpha''$ – коэффициент присоса воздуха в экономайзере (П.2).

Коэффициент избытка воздуха в воздухоподогревателе:

$$\alpha_{ВП} = \alpha_{ЭК} + \Delta\alpha''', \quad (7)$$

где $\Delta\alpha'''$ – коэффициент присоса воздуха в воздухоподогревателе (П.2).

Действительное содержание водяных паров в дымовых газах, м³/кг:

$$\text{в топке: } V_{H_2O}^{OT} = V_{H_2O}^O + 0,0161(\alpha_T - 1) \cdot V_{CVX}^0; \quad (8)$$

$$\text{в пароперегревателе или фестоне: } V_{H_2O}^{OP} = V_{H_2O}^O + 0,0161(\alpha_{КП} - 1) \cdot V_{CVX}^0; \quad (9)$$

$$\text{в экономайзере: } V_{H_2O}^{OEK} = V_{H_2O}^O + 0,0161(\alpha_{ЭК} - 1) \cdot V_{CVX}^0; \quad (10)$$

$$\text{в воздухоподогревателе: } V_{H_2O}^{OBП} = V_{H_2O}^O + 0,0161(\alpha_{ВП} - 1) \cdot V_{CVX}^0. \quad (11)$$

Действительный объем продуктов сгорания (при нормальных условиях), м³/кг:

В топке, м³/кг:

$$V_{ГТ} = V_{RO_2} + V_{R_2}^0 + V_{H_2O}^{OT} + (\alpha_T - 1) \cdot V_{CVX}^0. \quad (12)$$

В пароперегревателе, м³/кг:

$$V_{ГП} = V_{RO_2} + V_{R_2}^0 + V_{H_2O}^{OP} + (\alpha_{КП} - 1) \cdot V_{CVX}^0. \quad (13)$$

В экономайзере, м³/кг:

$$V_{ЭК} = V_{RO_2} + V_{R_2}^0 + V_{H_2O}^{0ЭК} + (\alpha_{ЭК} - 1) \cdot V_{СУХ}^0. \quad (14)$$

Действительный объем продуктов сгорания в воздухоподогревателе, м³/кг:

$$V_{БП} = V_{RO_2} + V_{R_2}^0 + V_{H_2O}^{0БП} + (\alpha_{БП} - 1) \cdot V_{СУХ}^0. \quad (15)$$

Расчет энтальпий воздуха и продуктов сгорания

Расчет энтальпий воздуха и продуктов сгорания проводят для всего диапазона температур, наблюдаемых в газовом тракте котла. Так как заранее этот диапазон температур не определен, то задаются граничными значениями от 100 до 2000 °С. В случае, если выбранный диапазон не достаточен, производят расчет по дополнительным температурам.

Энтальпия теоретического объема воздуха, кДж/м³:

$$I_B^0 = V_{СУХ}^0 H_B, \quad (16)$$

где H_B – энтальпия воздуха, кДж/м³ (П.3).

Энтальпия золы, кДж/м³:

$$I_{ЗЛ} = \frac{A_P}{10^4} \alpha_{УН} I_З, \quad (17)$$

где $\alpha_{УН}$ – доля золы топлива в уносе, П.4;

$I_З$ – энтальпия золы, кДж/кг, П.3.

Энтальпия теоретического объема продуктов сгорания, кДж/кг:

$$I_{Г}^0 = V_{RO_2} H_{RO_2} + V_{R_2}^0 H_{R_2} + V_{H_2O}^0 H_{H_2O}, \quad (18)$$

где H_{RO_2} – энтальпия трехатомных газов, кДж/м³;

H_{R_2} – энтальпия азота, кДж/м³;

H_{H_2O} – энтальпия водяных паров, кДж/м³.

Энтальпия действительного количества продуктов сгорания, кДж/м³:

$$\text{в топке: } I_{Д}^T = I_{Г}^0 + (\alpha_T - 1) I_B^0 + I_{ЗЛ}; \quad (19)$$

$$\text{в пароперегревателе: } I_{Д}^{КП} = I_{Г}^0 + (\alpha_{КП} - 1) I_B^0 + I_{ЗЛ}; \quad (20)$$

$$\text{в экономайзере: } I_D^{\text{ЭК}} = I_G^O + (\alpha_{\text{ЭК}} - 1)I_B^O + I_{3Л} ; \quad (21)$$

$$\text{в воздухоподогревателе: } I_D^{\text{ВП}} = I_G^O + (\alpha_{\text{ВП}} - 1)I_B^O + I_{3Л} . \quad (22)$$

Результаты расчета для всего необходимого диапазона температур сводим в таблицу 1:

Таблица 1 - Энтальпии воздуха и продуктов сгорания

Температура	I_B^O , кДж/м ³	I_G^O , кДж/м ³	Действительная энтальпия продуктов сгорания, кДж/м ³				Изл, кДж/кг
			Топка, I_D^T	пароперегреватель, $I_D^{\text{КП}}$	экономайзер, $I_D^{\text{ЭК}}$	воздухоподогреватель, $I_D^{\text{ВП}}$	
100							
200							
300							
400							
...							
2000							

Тепловой баланс котлоагрегата

Температура уходящих газов (минимальная), °С:

$$t_{\min}^{\text{УХ}} = 130 \cdot (S_L^P)^{0,2} + 120 . \quad (23)$$

Энтальпия уходящих газов $I_{\min}^{\text{УХ}}$ на 1 кг топлива, кДж/м³ определяется по таблице 1 и температуре $t_{\min}^{\text{УХ}}$ и энтальпии продуктов сгорания в воздухоподогревателе $I_D^{\text{ВП}}$ или экономайзере, если именно он является последней по ходу дымовых газов поверхностью нагрева.

Энтальпия питательной воды парового котла, кДж/кг:

$$i_{\text{ПВ}} = ct_{\text{ПВ}} . \quad (24.1)$$

Энтальпия воды на входе в котел, кДж/кг:

$$i_{\text{ПВ}} = ct_{\text{ВХ}} \quad (24.2)$$

Энтальпия воды на входе из водогрейного котла, кДж/кг:

$$i_{\text{ВЫХ}} = ct_{\text{ПВЫХ}}. \quad (25)$$

где c – теплоемкость питательной воды при ее температуре $t_{\text{ПВ}}$, допускается принять 4,19 кДж/(кг °С).

Энтальпия холодного воздуха $J_{\text{ХВ}}^0$, кДж/м³:

$$J_{\text{ХВ}}^0 = c_{\text{ХВ}} t_{\text{ХВ}} V_{\text{СУХ}}^0, \quad (26)$$

где $c_{\text{ХВ}}$ – теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С, $c_{\text{ХВ}}=1,314$ кДж/кг °С;

$t_{\text{ХВ}}$ – температура холодного воздуха, при отсутствии данных принимается равной 30 °С.

Потери тепла с уходящими газами %:

$$q_2^{\text{MIN}} = \frac{(I_{\text{УХ}}^{\text{min}} - J_{\text{ХВ}}^0 \alpha_{\text{ВП}}) 100}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}, \quad (27)$$

где Q_{H}^{P} – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг (П.1).

Потеря тепла от химической неполноты сгорания q_3 при сжигании твердых топлив находится по приложению П.4;

Потеря от механической неполноты сгорания q_4 при сжигании твердых топлив находится по приложению П.4.

Потери тепла во внешнюю среду q_5 определяются по рисунку 1.

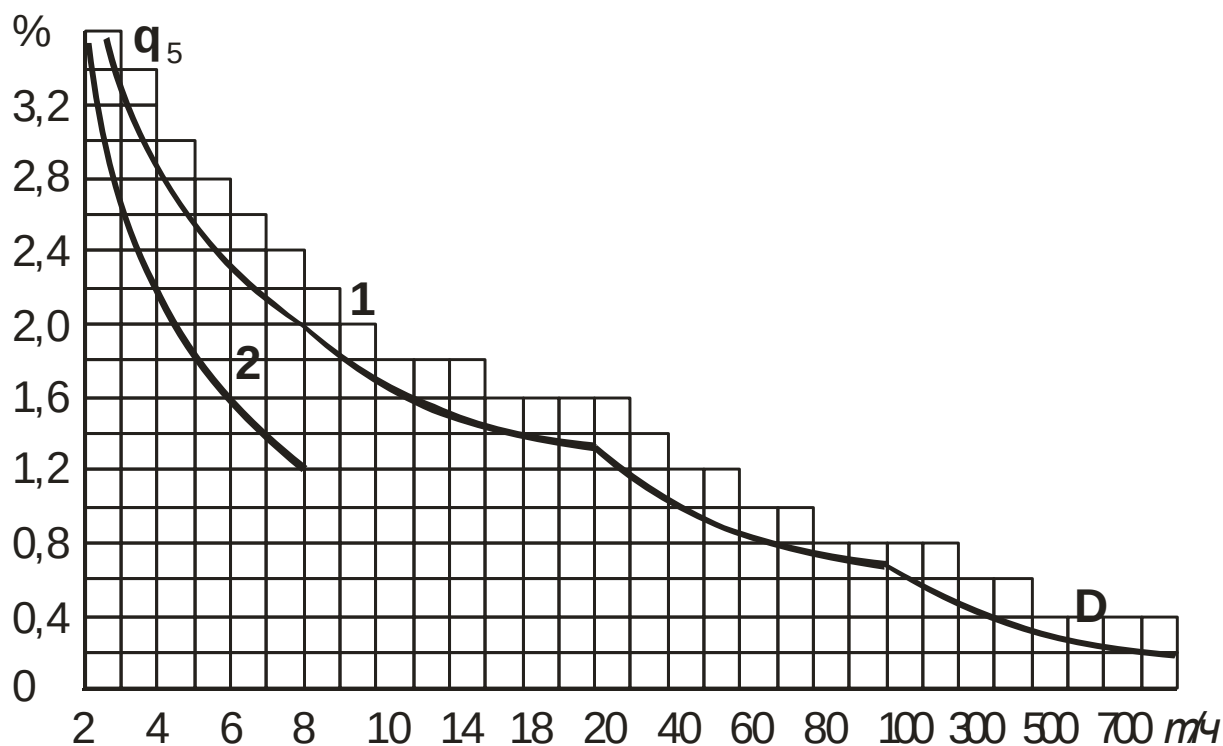


Рисунок 1 - Зависимость потерь тепла в окружающую среду от производительности котла; 1 – без хвостовых поверхностей нагрева; 2 – с хвостовыми поверхностями нагрева

Обычно для котлов низкого давления при сжигании твердого топлива принимают располагаемое тепло $Q_P^P = Q_H^P$, Дж/кг.

Потеря с физическим теплом шлака, %:

$$q_6 = \frac{(\alpha_{шл.} A^P c_{шл.} t_{шл.})}{Q_P^P}, \quad (28)$$

где $t_{шл.}$ - температура шлака, при отсутствии данных принимается равной 600 °С;

$$\alpha_{шл.} = 1 - 0,01 \alpha_{уН.},$$

$c_{шл.}$ – теплоемкость шлака, при температуре 600 принимается 0,935 кДж/кг,

Коэффициент полезного действия котлоагрегата (по обратному балансу) %:

$$\eta_K^{\max} = 100 - q_2^{\min} - q_3 - q_4 - q_5 - q_6. \quad (29)$$

Коэффициент сохранения тепла.

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta_K^{\max} + q_5}. \quad (30)$$

Продувка парового котлоагрегата, кг/с:

$$D_{\text{ПР}} = D_K \cdot \frac{P}{100}, \quad (31)$$

где P – величина продувки котла, %.

Полезная тепловая мощность парового котла, кВт:

$$Q_K = D_K (i_{\text{ПЕ}} - i_{\text{ПВ}}) + D_{\text{ПР}} (i' - i_{\text{ПВ}}), \quad (32)$$

где D_K - количество выработанного перегретого пара, кг/с;

$i_{\text{ПЕ}}$ - энтальпия перегретого пара, кДж/кг, определяемая по давлению в

барабане котла $P_{\text{ПП}}$ и температуре перегретого пара $t_{\text{ПП}}$ согласно заданию, если котел вырабатывает насыщенный пар, то энтальпия насыщенного пара;

$i_{\text{ПВ}}$ - энтальпия питательной воды, кДж/кг, определяемая по температуре питательной воды $t_{\text{ПВ}}$;

$D_{\text{ПР}}$ - расход воды на продувку котла, кг/с, с энтальпией при ее кипении i' , кДж/кг, определяемой по давлению в барабане котла (П.5).

Для водогрейного котла определяют расход воды через котел, кг/с:

$$D_K = Q_K / (i_{\text{ВЫХ}} - i_{\text{ПВ}}), \quad (33)$$

где $i_{\text{ВХ}}$ и $i_{\text{ВЫХ}}$ – энтальпия воды на входе и выходе из котла соответственно, кДж/кг.

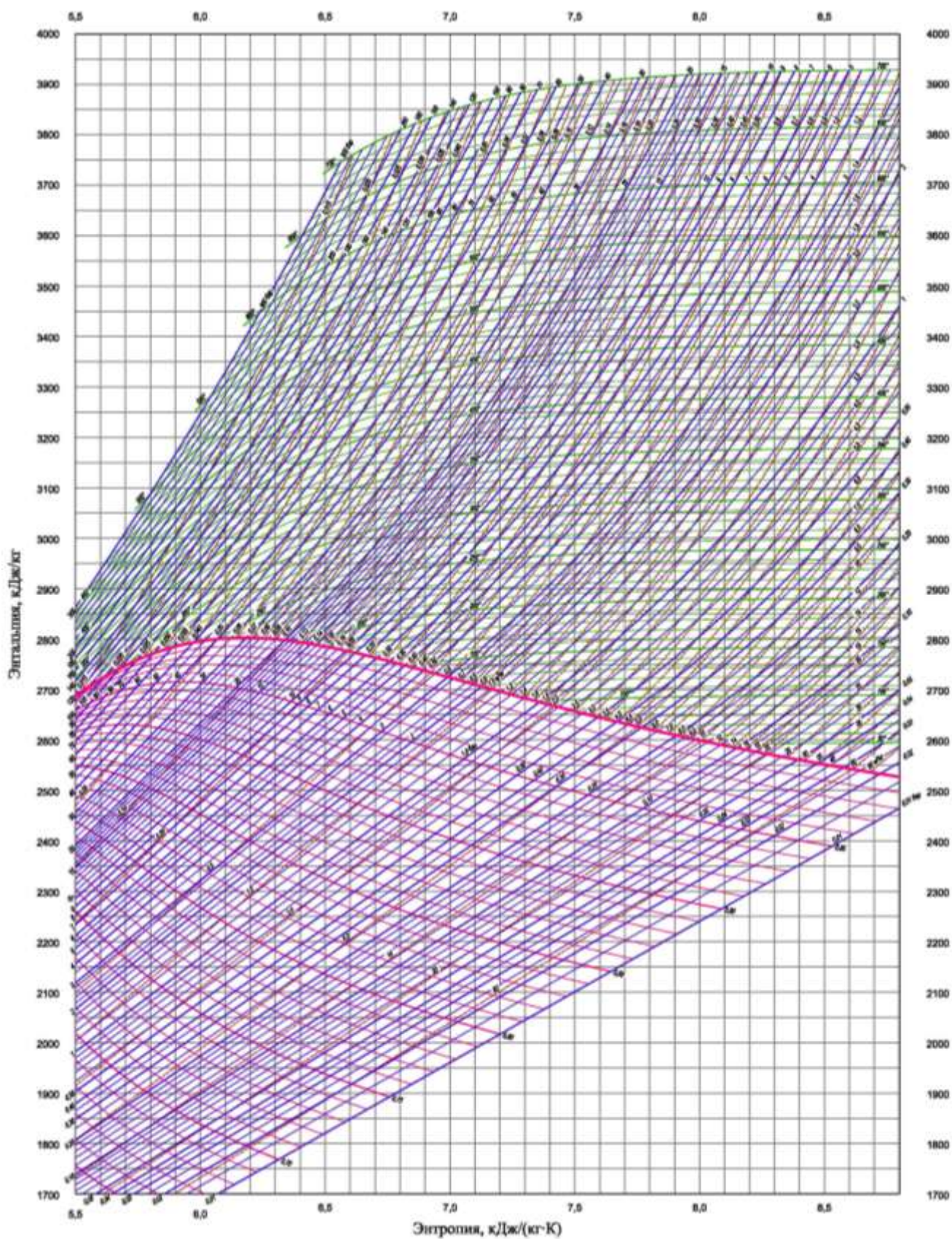


Рисунок 2 - h-s диаграмма пара

Расход топлива, подаваемого в топку, кг/с:

$$B_T = \frac{Q_K \cdot 100}{Q_H^P \cdot \eta_K^{MAX}} . \quad (32)$$

Для подсчета суммарных объемов продуктов сгорания, воздуха и теплоты, отданной газами в поверхностях нагрева, вводится расчетный расход топлива, вычисляемый с учетом механической неполноты сгорания, кг/с:

$$B_P = B_T \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) . \quad (33)$$

Определение геометрических характеристик топки

Объем топки, м³:

$$V_T = \frac{B_P \cdot Q_P^P}{q_V} , \quad (34)$$

где q_V - тепловая нагрузка топочного объема, П.4.

Сечение топки (для слоевых топок - площадь колосниковой решетки), м²:

$$R = \frac{B_P \cdot Q_P^P}{0,7 \cdot q_R} , \quad (35)$$

где q_R – тепловая нагрузка площади топки (для слоевых топок колосниковой решетки), кВт/м², П.4.

Длина топки, м:

$$l_T = \sqrt[3]{V_T} . \quad (36)$$

Высота топки, м:

$$h_T = V_T / R . \quad (37)$$

Ширина топки, м:

$$b_T = \frac{V_T}{h_T \cdot l_T} . \quad (38)$$

Для дальнейшего расчета топки задаются диаметром труб экранов d_t , м (внутренним) (П.5).

Определяют количество параллельных ходов труб экрана топки:

$$n_T = \frac{\sqrt{\frac{4(D_K + D_{ПР})v_B}{\pi\omega_K}}}{d_T}, \quad (39)$$

где ω_K – скорость движения воды внутри труб экрана, м/с, рекомендуется принимать 0,6-1,0 м/с;

v_B – удельный объем питательной воды, м³/кг (П.6).

Полученное число ходов округляют до ближайшего большего целого числа n_T^Φ .

Задаются расстоянием от оси трубы экрана до стенки топки и шагом s труб (Рисунок 3).

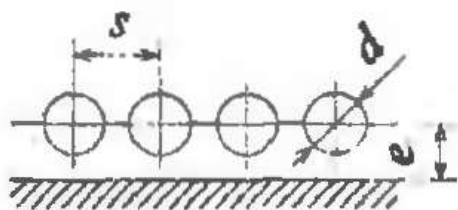


Рисунок 3 Шаг s , диаметр d и расстояние e от оси трубы экрана до стенки топки

Определяют число ходов труб по каждой стенке экрана топки:

– по потолку, переднему и заднему фронту топки: $z_{Ti} = \frac{b_T}{sn_T^\Phi}; \quad (40.1)$

– по боковым стенкам: $z_{Ti} = \frac{l_T}{sn_T^\Phi}. \quad (40.2)$

Задаются диаметром труб пароперегревателя (фестона): наружным диаметром $d^{НП}$ и внутренним $d^{ВП}$, продольным s_1 и поперечным s_2 шагом.

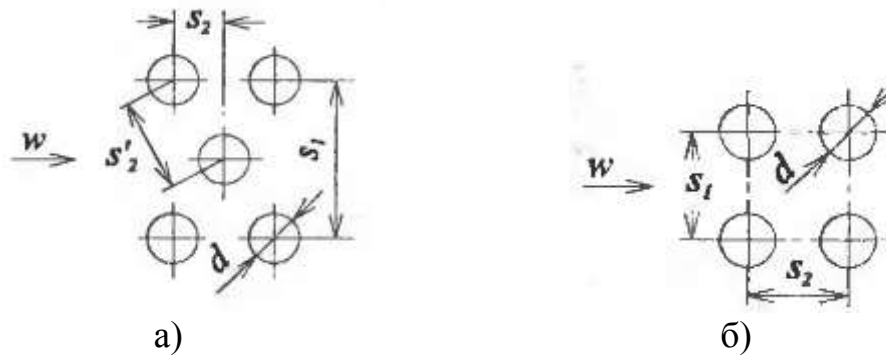


Рисунок 4 Поперечное омывание шахматного а) и коридорного б) пучка труб

Определяют необходимую площадь живого сечения пароперегревателя (фестона) со стороны пара (воды):

$$F_{пп} = \frac{D_K v_{п}}{\omega'_{п}}, \quad (41)$$

где $v_{п}$ – удельный объем пара (воды), $\text{м}^3/\text{кг}$, ориентировочно можно принять по П.7;

$\omega'_{п}$ – скорость движения теплоносителя, для пароперегревателя рекомендуется принимать 8-15 м/с, для фестона 0,9-1,1 м/с.

Если пароперегреватель (фестон) отсутствует, то переходят сразу к формуле (45), которая представляет собой площадь газохода для перехода дымовых газов из топки в экономайзер.

Определяют число параллельно включенных труб:

$$z_{1п} = \frac{4F_{пп}}{\pi(d_{пп}^B)^2}. \quad (42)$$

Определяют относительный поперечный шаг труб:

$$\sigma_1 = s_1 / d_{пп}^H. \quad (43)$$

Определяют относительный продольный шаг труб:

$$\sigma_2 = s_2 / d_{пп}^H. \quad (44)$$

Определяют необходимое живое сечение для прохода продуктов сгорания в пароперегревателе (фестоне):

Определяют живое сечение пароперегревателя (фестона) для прохода продуктов сгорания, м²:

$$F_{\Pi\Gamma} = B_P \cdot V_{\Pi\Gamma} \cdot \frac{t'_{3T} + 273}{\omega_T 273}, \quad (45)$$

где ω_T – скорость движения продуктов сгорания в пароперегревателе (фестоне), м/с, рекомендуется принимать 8-12 м/с при наличии пароперегревателя (фестона) и 6-8 м/с при его отсутствии (в этом случае после расчета формулы (45) сразу переходя к формуле (48) принимая $F_{\text{ВЫХ}}=F_{\Pi\Gamma}$).

t'_{3T} – температура продуктов сгорания за топкой °С, этой температурой необходимо задаться.

Для шахматного пучка при $\frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2 - 1} \succ 1,7$ максимальная скорость газов будет

в диагональном сечении (только для шахматного расположения труб), м/с:

$$F_{\Pi\Gamma}^r = 2F_{\Pi\Gamma} \frac{\sigma'_2 - 1}{\sigma_1 - 1}, \quad (46)$$

где $\sigma'_2 = \sqrt{(0,5\sigma_1)^2 + \sigma_2^2}$ – относительный диагональный шаг труб, м.

Определяют теоретическое число последовательных ходов труб в одном ряду пароперегревателя:

$$n_T = \frac{F_{\Pi\Gamma}}{z_{1\Pi} l d_{\Pi\Gamma}^H (\sigma_1 - 1)}. \quad (47)$$

l – длина труб пароперегревателя поперек газохода, рекомендуется принимать равной ширине газохода, м.

Получившееся значение n_T округляют до ближайшего целого числа и полученное значение n используют для дальнейших расчетов.

Определяют размеры газохода пароперегревателя (фестона), м²:

$$F_{\text{ВЫХ}} = ab = \sigma_1 n z_{1\Pi} l d_{\Pi\Gamma}^H, \quad (48)$$

где b – ширина газохода, рекомендуется принимать не более ширины топки,

м.

Тепловой расчет топки

Площадь стен переднего фронта, м²:

$$F_{\Pi\Phi} = b_T \cdot h_T, \quad (48)$$

Площадь стен заднего фронта, м²:

$$F_{3\Phi} = b_T \cdot h_T. \quad (49)$$

Площадь одной боковой стены, м²:

$$F_{BC} = l_T \cdot h_T. \quad (50)$$

Площадь потолка топки, м²:

$$F_{\dot{I}} = l_T \cdot b_T. \quad (51)$$

Полная площадь стен (конструктивная), м²:

$$F_{CT} = F_{3\Phi} + F_{\Pi\Phi} + 2F_{BC} + F_{\dot{I}}. \quad (52)$$

Относительное положение максимума температур по высоте топки (Рис.5):

$$x_T = (h_T / H_T). \quad (53)$$

где h_T - высота оси горелок от пода топки, м, для топок с подовым расположением горелок и слоевых топок, $h_T=0$;

H_T – высота от пода топки до середины выходного окна из топки, м.

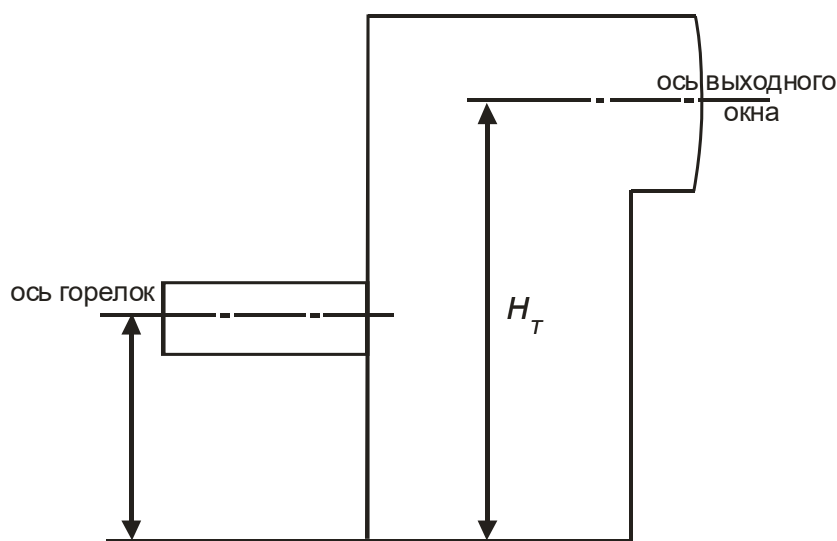


Рис. 3.1. Схема определения x_T

Рисунок 5 - Схема определения H_T

Параметр забалластированности топочных газов:

$$r_V = \frac{V_{IT}(1+r)}{V_{R2}^O + V_{RO2}}, \quad (54)$$

где r - коэффициент рециркуляции, для котлов без рециркуляции принимается равным 0.

Площадь зеркала горения, m^2 :

$$R = \frac{B_T Q_P^H}{q_V}. \quad (55)$$

Параметр M , учитывающий влияние на интенсивность теплообмена в топке относительного уровня расположения горелок и степени забалластированности топочных газов:

$$- \text{ для камерных топок: } M = M_0(1 - 0,4x_T)\sqrt[3]{r_V}; \quad (56.1)$$

$$- \text{ для слоевых топок: } M = M_0 \left(1 + \frac{R}{F_{CT}} \right) \sqrt[3]{r_V}, \quad (56.2)$$

где M_0 – коэффициент, принимаемый согласно П.8.

Объемная доля трехатомных газов:

$$r_{RO2} = \frac{V_{RO2}}{V_{IT}}. \quad (57)$$

Объемная доля водяных паров в топке:

$$r_{H2O}^T = \frac{V_{H2O}^{0T}}{V_{IT}}. \quad (58)$$

Суммарная объемная доля трехатомных газов:

$$r_{II}^T = r_{RO2} + r_{H2O}^T. \quad (59)$$

Парциальное давление трехатомных газов, МПа:

$$P_{II}^T = p \cdot r_{II}^T, \quad (60)$$

где p – давление в топочной камере, МПа, принимается равным для безнаддувных котлов 0,1 МПа.

Эффективная толщина излучающего слоя в топке, м:

$$S = 3,6 \cdot \frac{V_T}{F_{CT}}. \quad (61)$$

Масса дымовых газов в топке, кг/кг:

$$G_{ГТ} = 1 - \frac{A^P}{100} + 1,306V_{ГТ}. \quad (62)$$

Концентрация золы в газах топки, кг/кг:

$$\mu_{зл} = \frac{A^P \cdot a_{yH}}{10^4 \cdot G_{ГТ}}. \quad (63)$$

Коэффициент поглощения лучей частицами золы (только для твердых топлив) $\frac{1}{МПа * м}$:

$$k_3 = \frac{10^4 A_{зл}}{\sqrt[3]{(t'_{3T} + 273)^2}} \cdot \frac{\mu_{зл}}{1 + 1,2\mu_{зл}S}, \quad (64.1)$$

где $A_{зл}$ – коэффициент, принимается согласно П.9.

Коэффициент поглощения лучей сажевыми частицами (только для жидких и газообразных топлив), $\frac{1}{МПа * м}$:

$$k_C = \frac{1,2}{1 + \alpha_T^2} \left(\frac{C}{H} \right)^{0,4} (1,6 \cdot 10^{-3}(t'_{3T} + 273) - 0,5), \quad (64.2)$$

где C/H – соотношение углерода и водорода в топливе, для газообразных

$$\text{топлив } \frac{C}{H} = 0,12 \sum_n \frac{m}{n} C_m H_n.$$

Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания (преимущественно поглощение лучей происходит водяными парами и трехатомными газами), $\frac{1}{МПа * м}$:

$$k_{Г} = \left(\frac{7,68 + 16r_{H_2O}^T}{\sqrt{10pr_{H}^T S}} - 1 \right) (1 - 0,37 \cdot 10^{-3}(t'_{3T} + 273)), \quad (65)$$

Эффективный коэффициент ослабления лучей коксовыми частицами определяется по выражению (только для твердых топлив):

$$K_{\text{КОКС}} = \chi_1 \chi_2, \quad (66)$$

где χ_1 - коэффициент, учитывающий влияние концентрации коксовых частиц в факеле, зависит от рода топлива χ_1 , для антрацитов и полуантрацитов $\chi_1 = 1$, для каменных углей, бурых углей, торфа, сланцев и древесины $\chi_1 = 0,5$;

χ_2 - коэффициент, учитывающий влияние способа сжигания χ_2 , при камерном сжигании топлив $\chi_2 = 0,1$, при слоевом $\chi_2 = 0$.

Коэффициент ослабления лучей топочной средой (для твердого топлива), $\frac{1}{\text{МПа} \cdot \text{м}}$:

$$K_T = K_{\Gamma} \cdot r_{\Pi}^T + K_3 + K_{\text{КОКС}}. \quad (67.1)$$

Коэффициент ослабления лучей топочной средой (для газообразного и жидкого топлива), $\frac{1}{\text{МПа} \cdot \text{м}}$:

$$K_T = K_{\Gamma} \cdot r_{\Pi}^T + m k_C, \quad (67.2)$$

где m - коэффициент, учитывающий относительное заполнение топочной камеры светящимися частицами (сажей), при сжигании мазута в газоплотных топках $m = 0,3$, при сжигании мазута в не газоплотных топках $m = 0,6$, при сжигании газообразного топлива $m = 0,1$.

Критерий поглощательной способности (критерий Бугера):

$$Bu = k_T p S. \quad (68)$$

Площадь стен переднего фронта, занятого экранами, м^2 :

$$F_{\Pi\Phi}^{\ominus} = b_T \cdot (h_T - z_T) - F_{BX}, \quad (69)$$

где z_T - слой топлива и шлака, м , для каменных углей принимается 150-200 мм, для бурых 300 мм, для торфа, сланцев и древесины 500 мм, для газа и мазута 0 мм;

$F_{вх}$ – площадь окна горелок, m^2 , для камерных топок с боковым расположением горелок и слоевых топок ориентировочно можно принять равным $F_{вых}$, для камерных с подовым расположением горелок $F_{вх}=0$.

Площадь стен заднего фронта, занятого экранами, m^2 :

$$F_{зф}^{\vartheta} = b_T \cdot (h_T - z_T) - F_{вых} . \quad (70)$$

Площадь одной боковой стены, m^2 :

$$F_{бс}^{\vartheta} = l_T \cdot (h_T - z_T) . \quad (71)$$

Площадь потолка топки, m^2 :

$$F_{п}^{\vartheta} = l_T \cdot b_T . \quad (72)$$

Средний коэффициент тепловой эффективности экранов топки $\Psi_{ср}$:

$$\psi_{ср} = \frac{\sum (\psi_i F_i^{\vartheta})}{F_{ст}} , \quad (73)$$

где $\Psi_i = X_i \zeta_i$, в котором X_i угловой коэффициент, принимаемый по П.10.

Для неэкранированных участков стен топочной камеры (например лазов для чистки экранов, обычно располагающихся на боковых стенках топки и если имеется и камеры догорания) принимается $\Psi = 0$.

Коэффициент ξ_i , учитывающий снижение тепловосприятия вследствие загрязнения или закрытия изоляцией поверхности, для твердых топлив принимается по П.11.

Тепло, вносимое в топку воздухом, кДж/кг:

$$Q_B = (\alpha_T - \Delta \alpha''') I_{вп} + \Delta \alpha''' J_{хв}^O , \quad (74)$$

где $I_{вп}$ – энтальпия воздуха, поступающего в топку после воздухоподогревателя. Необходимо задаться температурой газов после воздухоподогревателя $t_{вп}^{\Gamma}$ и по этой температуре определить его энтальпию. Температуру воздуха после воздухоподогревателя $t_{вп}^{\Gamma}$ рекомендуется принимать на 20-30 °С ниже температуры уходящих дымовых газов t_{min}^{yx} .

Полезное тепловыделение в топке, кДж/кг:

$$Q_T = Q_P^P \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_B. \quad (75)$$

По значению полезного тепловыделения в топке Q_T , равной энтальпии продуктов сгорания в топке, и таблице 1 определяются температура адиабатического горения T_A .

Средняя суммарная теплоёмкость продуктов сгорания 1 кг твердого и жидкого или 1 м³ газообразного топлива, кДж/ (кг °С):

$$V_{C_{CP}} = \frac{Q_T - I_T''}{T_A - t'_{3T}}, \quad (76)$$

I_T'' – энтальпия продуктов сгорания при температуре t'_{3T} (определяется по таблице 1).

Критерий, характеризующий соотношение, между конвективным переносом теплоты и излучением абсолютно черного тела при температуре в топке (критерий Больцмана):

$$Bo = \frac{\varphi B_P (V_{C_{CP}})}{\sigma_0 \psi_{CP} F_{CT} T_A^3}, \quad (77)$$

σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м² К⁴).

Эффективное значение критерия Бугера определяется по формуле:

$$B\tilde{u} = 1,6 \cdot \ln \left(\frac{1,4 B u^2 + B u + 2}{1,4 B u^2 - B u + 2} \right). \quad (78)$$

Действительная температура газов на выходе из топки определяется по формуле, °С:

$$t_{3T} = \frac{T_a}{M \cdot B\tilde{u}^{0,3} \cdot Bo^{0,6} + 1} - 273. \quad (79)$$

Если расхождение между предварительно принятой температурой газов за топкой t'_{3T} и действительной t_{3T} составляет менее 50 °С, то расчет температур считается законченным, в противном случае необходимо задаться другой

температурой газов за топкой $t'_{зт}$ и повторить расчет (начиная с формулы коэффициента поглощения лучей частицами золы).

По найденной температуре продуктов сгорания за топкой $t_{зт}$, определяют их действительную энтальпию $I_{зт}$ (по таблице 1).

Количество тепла, воспринятое в топке, кДж/кг:

$$Q_{ПР} = \varphi \cdot (Q_P^P - I_{зт}). \quad (80)$$

Определяют количество пара, образовавшегося в топке, кг/с:

$$D'_K = \frac{Q_{ПР} B_P}{i_{исп}}, \quad (81)$$

где $i_{исп}$ – теплота парообразования кДж/кг (П.6).

Определяют степень соответствия топки требуемой паропроизводительности:

$$X_{пп} = \frac{D'_K}{D_K}.$$

При $X_{пп} > 1$ определяют энтальпию воды на входе в топку:

$$i_{BX} = i' - \frac{(Q_{ПР} - D_K i_{исп}) B_P}{D_K}$$

Расчет пароперегревателя (фестона)

В случае, если котел вырабатывает насыщенный пар или фестон отсутствует, то данный раздел пропускают, принимая $I_{зт} = I_{зпп}$ и $t_{зт} = t_{зпп}$.

Количество тепла, поглощенного паром в пароперегревателе, кДж/кг:

$$Q_{П} = \frac{D_K}{B_P} \cdot (i_{ПЕ} - i'_{П}), \quad ()$$

где $i'_{П}$ – энтальпия пара при температуре кипения воды t' , определяемой по давлению в барабане котла, (П.6.)

По фактическим размерам газохода пароперегревателя (фестона) и реальной температуре продуктов сгорания за топкой t_{3T} уточняют скорость движения продуктов сгорания в пароперегревателе (фестоне), м/с:

$$\omega_T = B_P \cdot V_{\Pi\Pi} \cdot \frac{t_{3T} + 273}{(nz_{\Pi\Pi} l d_{\Pi\Pi}^H (\sigma_1 - 1)) 273}, \quad (77)$$

Определяют коэффициент тепловой эффективности пароперегревателя:

$$\psi_{\Pi\Pi} = \zeta \beta, \quad (78)$$

где β – коэффициент, учитывающий взаимный теплообмен между топкой и пароперегревателем, принимается равным 0,5;

ζ – коэффициент, учитывающий снижение тепловосприятия из-за загрязнения поверхности, определяется по П.11.

Определяют количество тепла, переданное излучением из топки пароперегревателю, кВт/м²:

$$q_{ЛВ} = y_B \frac{B_P Q_{\Pi} \psi_{\Pi\Pi}}{F_{ВЫХ}}, \quad (79)$$

где y_B – коэффициент распределения тепловосприятия от топки по высоте пароперегревателя, для каменных углей и антрацитов принимается равным 0,7, для торфа, сланцев и бурых углей 1,0, для экибастузских углей 0,8.

Толщина излучающего слоя пароперегревателя, м:

$$s_{\Pi\Pi} = 0,9 d_{\Pi\Pi}^B (0,25 \pi \sigma_1 \sigma_2 - 1). \quad (80)$$

Объемная доля водяных паров в топке:

$$r_{H_2O}^{\Pi\Pi} = V_{H_2O}^{0\Pi} / V_{\Pi\Pi}. \quad (81)$$

Суммарная объемная доля трехатомных газов:

$$r_{\Pi}^{\Pi\Pi} = r_{RO_2} + r_{H_2O}^{\Pi\Pi}. \quad (82)$$

Парциальное давление трехатомных газов, МПа:

$$P_{\Pi}^{\Pi\Pi} = p \cdot r_{\Pi}^{\Pi\Pi}. \quad (83)$$

Масса дымовых газов в пароперегревателе, кг/кг:

$$G_{гп} = 1 - \frac{A^P}{100} + 1,306V_{гп} . \quad (84)$$

Концентрация золы в газах, кг/кг:

$$\mu_{зл}^{\Pi} = \frac{A^P \cdot a_{yH}}{10^4 \cdot G_{гп}} . \quad (85)$$

Для дальнейших расчетов задаются температурой дымовых газов за пароперегревателем, $t'_{зпп}$, которая должна быть меньше реальной температуры продуктов сгорания за топкой $t_{зт}$.

Коэффициент поглощения лучей газовой фазой в пароперегревателе определяется по формуле, $\frac{1}{МПа * м}$:

$$k_{гпп} = \left(\frac{7,68 + 16r_{H_2O}^{пп}}{\sqrt{10pr_{п}^{пп}s_{пп}}} - 1 \right) \left(1 - 0,37 \cdot 10^{-3} (t'_{зпп} + 273) \right) . \quad (86)$$

Коэффициент поглощения лучей частицами золы в пароперегревателе (только для твердых топлив) $\frac{1}{МПа * м}$:

$$k_{зпп} = \frac{10^4 A_{зл}}{\sqrt[3]{(t'_{зпп} + 273)^2}} \cdot \frac{\mu_{зл}^{\Pi}}{1 + 1,2 \mu_{зл}^{\Pi} s_{пп}} . \quad (87.1)$$

Коэффициент поглощения лучей сажевыми частицами в пароперегревателе (только для жидких и газообразных топлив), $\frac{1}{МПа * м}$:

$$k_{спп} = \frac{1,2}{1 + \alpha_{кп}^2} \left(\frac{C}{H} \right)^{0,4} \left(1,6 \cdot 10^{-3} (t'_{зпп} + 273) - 0,5 \right) , \quad (87.2)$$

Коэффициент ослабления лучей средой в пароперегревателе (для твердого топлива), $\frac{1}{\ddot{H} \ddot{a} * i}$:

$$K_{пп} = K_{гпп} \cdot r_{п}^{пп} + K_{зпп} + K_{кокс} . \quad (88.1)$$

Коэффициент ослабления лучей средой (для газообразного и жидкого топлива), $\frac{1}{\beta_{\lambda}^* i}$:

$$K_{\text{ПП}} = K_{\text{ГПП}} \cdot r_{\text{ПП}}^{\text{ПП}} + m k_{\text{СПП}}, \quad (88.2)$$

где m – коэффициент, учитывающий относительное заполнение среды светящимися частицами (сажей), при сжигании мазута в газоплотных газоходах $m=0,3$, при сжигании мазута в не газоплотных газоходах $m=0,6$, при сжигании газообразного топлива $m=0,1$.

Степень черноты потока газов в пароперегревателе:

$$\alpha_{\text{ГПП}} = 1 - e^{-K_{\text{ПП}} \cdot P \cdot S_{\text{ПП}}} \quad (89)$$

Для дальнейшего расчета необходимо задаться количеством рядов труб в пароперегревателе $z_{\text{П}}$.

Тепло, полученное пароперегревателем излучением из топки, кДж/кг:

$$Q_{\text{ПП}} = \frac{q_{\text{ЛВ}} F_{\text{ВЫХ}} \sum x_p (1 - \alpha_{\text{ГПП}})}{B_p}, \quad (90)$$

где Σx_p – суммарный угловой коэффициент части пароперегревателя, воспринимающей излучение из топки П.12, зависящий от числа рядов труб. При плотной компоновке задние ряды не будут получать излучение из топки, так как будут затенены передними трубами и в этом случае значение имеют только облучаемые ряды.

Количество тепла, отданное газами в пароперегревателе, кДж/кг:

$$Q_{\text{ПП}} = Q_{\text{П}} - Q_{\text{ПП}}. \quad (91)$$

Энтальпия дымовых газов за пароперегревателем, кДж/кг:

$$I_{\text{ЗПП}} = I_{\text{ЗТ}} + \Delta \alpha' J_{\text{ХВ}}^0 - \frac{Q_{\text{ПП}}}{\varphi}. \quad (92)$$

Температура газов за пароперегревателем $t_{\text{ЗПП}}$ находится по таблице 1 по значению $I_{\text{ЗПП}}$. Если она не совпадает с ранее принятой более, чем на 30 °С, расчет необходимо повторить, задавшись другой температурой.

Средняя температура газового потока, °С:

$$t_{ПСП} = 0,5 \cdot (t_{ЗТ} + t_{ЗПП}). \quad (93)$$

Разность температур отдающих в пароперегревателе дымовых газов и температурой перегретого пара, °С:

$$\Delta t_B = t_{ЗТ} - t_{ПП}. \quad (94)$$

Разность температур отдавших тепло дымовых газов и насыщенного пара при его температуре на выходе из топки t' (температура вскипания воды при давлении Рпп, П.6), °С:

$$\Delta t_M = t_{ЗПП} - t'. \quad (95)$$

Среднелогарифмический температурный напор:

$$\Delta t_{ПП} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}}. \quad (96)$$

Определяют геометрическую поправку пучка труб в зависимости от относительных шагов труб:

– Для коридорного пучка труб:

$$C_S^{ПП} = \left[1 + (2\sigma_1 - 3) \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2};$$

$$C_S^{ПП} = 1 \text{ при } \sigma_2 \geq 2;$$

$$C_S^{ПП} = 1 \text{ при } \sigma_1 \leq 1,5;$$

При $\sigma_2 < 2$ и $\sigma_1 > 3$ в расчетах $\sigma_1 = 3$.

– Для шахматного пучка труб:

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4} + \sigma_2^2};$$

$$\varphi_{III} = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1};$$

$$C_S^{III} = 0.95\varphi_{III}^{0,1} \quad \text{при } 0,1 \leq \varphi_{III} \leq 1,7 \text{ и любых значениях } \sigma_1;$$

$$C_S^{III} = 0.5\varphi_{III}^{0,5} \quad \text{при } 1,7 < \varphi_{III} \leq 4,5 \text{ и значениях } \sigma_1 < 3;$$

$$C_S^{III} = 0.95\varphi_{III}^{0,1} \quad \text{при } 1,7 < \varphi_{III} \leq 4,5 \text{ и значениях } \sigma_1 \geq 3;$$
(97.2)

Определяется поправка на число рядов труб по ходу дымовых газов.

– Для коридорного пучка труб:

$$C_Z^{III} = 0,91 + 0,0125(z_{2II} - 2), \quad \text{при } z_{2II} < 10;$$

$$C_Z^{III} = 1, \quad \text{при } z_{2II} \geq 10.$$
(98.1)

– Для шахматного пучка труб:

$$C_Z^{III} = 3,12z_{2II}^{0,05} - 2,5, \quad \text{при } \sigma_1 \leq 3 \text{ и } z_{2II} < 10;$$

$$C_Z^{III} = 4,0z_{2II}^{0,02} - 3,2, \quad \text{при } \sigma_1 > 3 \text{ и } z_{2II} < 10;$$

$$C_Z^{III} = 1 \quad \text{при } z_{2II} \geq 10.$$
(98.2)

Коэффициент теплоотдачи конвекцией при поперечном омывании пучков труб, Вт/(м² К):

– коридорного пучка:

$$\alpha_K = 0,2C_S^{III}C_Z^{III}C_\Phi^{III} \frac{\lambda}{d_{III}^H} \left(\frac{\omega_\Gamma d_{III}^H}{\nu} \right)^{0,65} \text{Pr}^{0,33};$$
(99.1)

– шахматного пучка:

$$\alpha_K = 0,36C_S^{III}C_Z^{III}C_\Phi^{III} \frac{\lambda}{d_{III}^H} \left(\frac{\omega_\Gamma d_{III}^H}{\nu} \right)^{0,6} \text{Pr}^{0,33},$$
(99.2)

где λ – коэффициент теплопроводности среды (дымовых газов) при температуре $t_{ПСР}$, П.13;

ν – коэффициент кинематической вязкости среды (дымовых газов) при температуре $t_{ПСР}$, П.13;

Pr – критерий Прандтля среды (дымовых газов) при температуре $t_{ПСР}$, П.13;

C_{Φ}^{III} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние изменения физических характеристик дымовых газов на коэффициент теплопередачи в зависимости от температуры и состава газа, определяется по приложению П.14.

Определяется средняя температура пара в пароперегревателе, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{II} = \frac{t' + t_{III}}{2}. \quad (0)$$

Определяется температура стенки труб пароперегревателя, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_C^{III} = \frac{t_{II} + t_{ПСР}}{2}.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$:

– при использовании твердых топлив:

$$\alpha_{Л}^{III} = 5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{a_3 + 1}{2} \right) a_{ГПП} (t_{ПСР} + 273)^3 \frac{1 - \left(\frac{t_C^{III} + 273}{t_{ПСР} + 273} \right)^4}{1 - \frac{t_C^{III} + 273}{t_{ПСР} + 273}}; \quad (100.1)$$

– при использовании газообразных и жидких топлив:

$$\alpha_{Л}^{III} = 5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{a_3 + 1}{2} \right) a_{ГПП} (t_{ПСР} + 273)^3 \frac{1 - \left(\frac{t_C^{III} + 273}{t_{ПСР} + 273} \right)^{3,6}}{1 - \frac{t_C^{III} + 273}{t_{ПСР} + 273}}; \quad (100.2)$$

где a_3 – степень черноты загрязненных стенок труб поверхностей нагрева, для котлов принимается равным 0,8.

Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке трубы, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$:

$$\alpha_{1III} = \xi (\alpha_K^{III} + \alpha_{Л}^{III}), \quad (101)$$

где ξ – коэффициент использования, для поперечно омываемых труб принимается равным 1.

Определяют поправочный коэффициент, учитывающий соотношение температуры пара в пароперегревателе и температуры стенки:

$$C_t = \left(\frac{T_{ПСП}}{T_C^{ПП}} \right)^{0,5} . \quad (103)$$

По принятому числу ходов пара $z_{1П}$ и реальному диаметру труб пароперегревателя $d_{ПП}^B$ уточняют реальную скорость движения пара в трубах, м/с:

$$\omega_{П} = \frac{4}{\pi (d_{ПП}^B)^2} \frac{D_K \nu_{П}}{z_{1П}} . \quad (104)$$

Коэффициент теплоотдачи от материала труб к пару Вт/(м² К):

$$\alpha_{2ПП} = 0,023 C_t C_l C_k \frac{\lambda_{П}}{d_{ПП}^B} \left(\frac{\omega_{П} d_{ПП}^B}{\nu_{П}} \right)^{0,8} \text{Pr}_{П}^{0,4} , \quad (104)$$

где C_l – поправочный коэффициент на относительную длину, определяется по П.15.

C_k – поправочный коэффициент, учитывающий одностороннее омывание труб греющей средой, определяется по приложению П.16.;

$\nu_{П}$ – коэффициент кинематической вязкости среды (пара) температуре $t_{П}$, $\nu_{П} = \mu_{П} \nu_{П}$, где $\nu_{П}$ – удельный объем пара, П.7., $\mu_{П}$ – динамическая вязкость пара, П.17;

$\lambda_{П}$ – коэффициент теплопроводности среды Вт/(м К) (пара) при температуре $t_{П}$, П.18;

$\text{Pr}_{П}$ – критерий Прандтля среды (пара) при температуре $t_{П}$, П.19.

Коэффициент теплопередачи для труб пароперегревателя Вт/(м² К):

$$k_{ПП} = \frac{\psi_{ПП} \alpha_{1ПП}}{1 + \left(1 + \frac{Q_{ПП}}{Q_{ПП}} \right) \frac{\alpha_{1ПП}}{\alpha_{2ПП}}} , \quad (105)$$

где α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенке материала пароперегревателя к нагреваемой среде, Вт/(м² К);

Поверхность нагрева пароперегревателя, м²:

$$H_{ПП} = \frac{Q_{ПП} B_P}{K_{ПП} \cdot \Delta t_{ПП}} 10^3. \quad (106)$$

Фактическое число рядов труб, шт:

$$z_{2П}^{\Phi} = \frac{H_{ПП}}{\pi \cdot d_{ПП}^H \cdot l \cdot n z_{1П}}. \quad (107)$$

Если фактическое число рядов труб не совпало с ранее принятым $z_{2П}$ более, чем на 1 ряд, то необходимо повторить расчет, задавшись другим числом рядов.

Определяют глубину пароперегревателя, м:

$$l_{ПП} = s_2 (1 + z_{2П}^{\Phi}). \quad ()$$

Расчет водяного экономайзера

Задаются наружным диаметром труб экономайзера $d_{ЭК}$, внутренним диаметром труб экономайзера $d_{ВЭК}$, относительным продольным $s_{1ЭК}$ и поперечным $s_{2ЭК}$ шагом, диаметром ребер $D_{РБ}$ (должен быть меньше половины продольного и поперечного шага труб), шагом ребер $s_{РБ}$, средней толщиной ребра $\delta_{РБ}$, м.

Для водогрейного котла без фестона определяют энтальпию воды на выходе из экономайзера, кДж/кг:

$$i' = i_{ВЫХ} - Q_{ПП} \frac{B_P}{D_K}. \quad ()$$

Количество тепла, отданное газами в экономайзере, кДж/кг:

$$Q_{ЭК} = \frac{D_K + D_{ПП}}{B_P} \cdot (i' - i_{ПВ}) + \frac{D_K (1 - X_{ПП})}{B_P} i_{ИСП}. \quad (108)$$

Энтальпия дымовых газов за экономайзером, кДж/кг:

$$I_{\text{ЭК}} = I_{\text{ПП}} + \Delta\alpha'' J_{\text{XB}}^0 - \frac{Q_{\text{ЭК}}}{\varphi} . \quad (109)$$

Температура газов за экономайзером, °C $t_{\text{ЭК}}$ определяется по таблице 1 по энтальпии газов за экономайзером $I_{\text{ЭК}}$.

Средняя температура газового потока в экономайзере, °C:

$$t_{\text{ЭКCP}} = 0,5 \cdot (t_{\text{ЭК}} + t_{\text{ПП}}) . \quad (110)$$

Определяют необходимую площадь живого сечения экономайзера со стороны воды, м²:

$$F_{\text{ЭК}} = \frac{(D_{\text{К}} + D_{\text{ПР}}) \nu_{\text{В}}}{\omega'_{\text{В}}} , \quad (111)$$

где $\nu_{\text{В}}$ – удельный объем воды при ее давлении в барабане котла, м³/кг, П.6;

$\omega'_{\text{В}}$ – скорость движения воды в экономайзере, м/с, рекомендуется принимать 0,9-1,1 м/с.

Определяют число параллельно включенных труб:

$$z_{1\text{ЭК}} = \frac{4F_{\text{ЭК}}}{\pi(d_{\text{ЭК}}^{\text{В}})^2} . \quad (112)$$

$z_{1\text{ЭК}}$ – округляют до ближайшего целого значения.

Уточняют скорость движения воды в трубах экономайзера, м/с:

$$\omega_{\text{В}} = \frac{4}{\pi(d_{\text{ЭК}}^{\text{В}})^2} \cdot \frac{(D_{\text{К}} + D_{\text{ПР}}) \nu_{\text{В}}}{z_{1\text{ЭК}}} . \quad ()$$

Определяют относительный поперечный шаг труб:

$$\sigma_{1\text{ЭК}} = s_{1\text{ЭК}} / d_{\text{ЭК}} . \quad (113)$$

Определяют относительный продольный шаг труб:

$$\sigma_{2\text{ЭК}} = s_{2\text{ЭК}} / d_{\text{ЭК}} . \quad (114)$$

Определяют живое сечение экономайзера для прохода продуктов сгорания, м²:

$$F_{ЭКГ} = B_P \cdot V_{ЭК} \cdot \frac{t_{ЭКСП} + 273}{\omega'_{ГЭК} 273}, \quad (117)$$

где $\omega'_{ГЭК}$ скорость движения продуктов сгорания в экономайзере, м/с, рекомендуется принимать 8-12 м/с;

Для шахматного пучка при $\frac{\sigma_{1ЭК} - 1}{\sigma_{2ЭК} - 1} \succ 1,7$ максимальная скорость газов будет в диагональном сечении (только для шахматного расположения труб), м/с:

$$F_{ЭК}^Г = 2F_{ЭКГ} \frac{\sigma'_2 - 1}{\sigma_1 - 1}, \quad (118)$$

где $\sigma'_{2ЭК} = \sqrt{(0,5\sigma_{1ЭК})^2 + \sigma_{2ЭК}^2}$ - относительный диагональный шаг труб, м.

Определяют высоту ребер, м:

$$h_{PB} = \frac{D_{PB} - d_{ЭК}}{2}. \quad ()$$

Определяют размеры газохода экономайзера, м:

$$a_{ЭК} b_{ЭК} = \frac{F_{ЭКГ}}{\left(1 - \frac{1}{\sigma_{1ЭК}} \left(1 + 2 \frac{h_{PB}}{s_{PB}} \frac{\delta_{PB}}{d_{ЭК}}\right)\right)}, \quad (119)$$

где $b_{ЭК}$ – ширина газохода экономайзера, рекомендуется принимать равной ширине топки b_T , м;

$a_{ЭК}$ – длина газохода экономайзера, м.

Разность температур отдающих в экономайзере дымовых газов и температурой питательной воды, °С:

$$\Delta t_{БЭК} = t_{ЗПП} - t_{ПВ}. \quad (119)$$

Разность температур отдавших тепло дымовых газов и воды при ее температуре и давлении в барабане t' , °С:

$$\Delta t_{МЭК} = t_{ЭК} - t'. \quad (120)$$

Среднелогарифмический температурный напор:

$$\Delta t_{ЭК} = \frac{\Delta t_{БЭК} - \Delta t_{МЭК}}{\ln \frac{\Delta t_{БЭК}}{\Delta t_{МЭК}}} . \quad (121)$$

Коэффициент оребрения, равный отношению полной поверхности пучка к поверхности несущих труб на участке оребрения:

$$\psi_{CPБ} = \frac{1}{2d_{ЭК}s_{PB}} \left(D_{PB}^2 - d_{ЭК}^2 + 2D_{PB}\delta_{PB} \right) + 1 - \frac{\delta_{PB}}{s_{PB}} , \quad (122)$$

где D_{PB} – диаметр ребра, м;

δ_{PB} – средняя толщина ребра, м;

s_{PB} – шаг ребер, м;

$d_{ЭК}$ – наружный диаметр труб экономайзера, м.

Определяют параметр x :

$$- \text{ для шахматного пучка: } x = \frac{\sigma_{1ЭК}}{\sigma_{2ЭК}} - \frac{1,26}{\psi_{CPБ}} - 2 ; \quad (123.1)$$

$$- \text{ для коридорного пучка: } x = 4 \left(\frac{\psi_{CPБ}}{7} + 2 - \sigma_{2ЭК} \right) . \quad (123.2)$$

Определяют гиперболический тангенс параметра x :

$$th(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} . \quad (124)$$

Определяют поправочный коэффициент, учитывающий продольный и поперечный шаг, а так же тип пучка:

$$C_s^{ЭК} = (1,36 - th(x)) \left(\frac{11}{\psi_{CPБ} + 8} - 0,14 \right) . \quad (125)$$

Для дальнейшего расчета необходимо задаться количеством рядов труб экономайзера $z_{ЭК}$.

Определяют поправочный коэффициент, учитывающий число рядов труб экономайзера:

$$\begin{aligned}
C_Z^{\text{ЭК}} &= 3,15z_{2\text{ЭК}}^{0,05} - 2,5, \quad \text{при } \sigma_{1\text{ЭК}} / \sigma_{2\text{ЭК}} < 2 \quad \text{и} \quad z_2 \leq 8; \\
C_Z^{\text{ЭК}} &= 3,5z_{2\text{ЭК}}^{0,03} - 2,72, \quad \text{при } \sigma_{1\text{ЭК}} / \sigma_{2\text{ЭК}} \geq 2 \quad \text{и} \quad z_2 \leq 8; \\
C_Z^{\text{ЭК}} &= 1 \quad \text{при } z_2 \geq 8.
\end{aligned} \tag{126}$$

Объемная доля водяных паров в экономайзере:

$$r_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ЭК}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{0\text{ЭК}} / V_{\text{ЭК}}. \tag{127}$$

Определяют показатель степени n :

$$n = 0,7 + 0,08th(x) + 0,005\psi_{\text{СРБ}}. \tag{128}$$

Коэффициент теплоотдачи при поперечном омывании коридорных и шахматных пучков с круглыми ребрами, Вт/(м² К):

$$\alpha_K^{\text{ЭК}} = 0,113C_Z^{\text{ЭК}}C_S^{\text{ЭК}}C_\Phi^{\text{ЭК}} \frac{\lambda}{d_{\text{ЭК}}} \left(\frac{\omega_{\text{ГЭК}}d_{\text{ЭК}}}{\nu} \right)^n \text{Pr}^{0,33}, \tag{129}$$

где $C_\Phi^{\text{ЭК}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние изменения физических характеристик дымовых газов на коэффициент теплопередачи в зависимости от температуры и состава газа, определяется по приложению П.14.

λ – коэффициент теплопроводности среды Вт/(м К) (дымовых газов) при температуре $t_{\text{ЭКСР}}$, П.13;

ν – коэффициент кинематической вязкости среды (дымовых газов) при температуре $t_{\text{ЭКСР}}$, П.13;

Pr – критерий Прандтля среды (дымовых газов) при температуре $t_{\text{ЭКСР}}$, П.13;

$\omega_{\text{ГЭК}}$ – действительная скорость движения дымовых газов в экономайзере, м/с.

Определяют параметр m :

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_K^{\text{ЭК}}}{\delta_{\text{РБ}}\lambda_{\text{РБ}}}}. \tag{131}$$

Коэффициент, учитывающий неравномерность теплоотдачи по поверхности ребра:

$$\varphi_E = 1 - 0,058h_{\text{РБ}}m, \tag{132}$$

где λ_{PB} – коэффициент теплопроводности материала труб экономайзера Вт/(м К), для стальных экономайзеров принимается равным 55 Вт/(м К), для чугунных 50 Вт/(м К).

Определяют коэффициент эффективности ребра:

$$E = \frac{th(h_{PB}m)}{h_{PB}m}, \quad (133)$$

где $th(h_{PB}m)$ – гиперболический тангенс произведения $h_{PB}m$.

Приведенный коэффициент теплоотдачи от пучков труб с поперечными круглыми ребрами, Вт/(м² К):

$$\alpha_{1PP} = \left(\frac{1}{\psi_{CPB}} \left(1 - \frac{\delta_{PB}}{s_{PB}} \right) + \left(1 - \frac{1}{\psi_{CPB}} \left(1 - \frac{\delta_{PB}}{s_{PB}} \right) \right) E \mu_P \varphi_E \right) \alpha_K^{\text{ЭК}}. \quad (134)$$

где μ_P – коэффициент, учитывающий уширение ребер к их основанию, определяется по номограмме П.20.

Определяют площадь внутренней поверхности труб, м²:

$$H_{BH} = \pi d_{\text{ЭК}}^B l_{\text{ЭК}}. \quad ()$$

где $l_{\text{ЭК}}$ – длина трубопровода поперек газохода экономайзера, рекомендуется принимать равной ширине газохода экономайзера.

Определяют площадь несущей поверхности труб, м²:

$$H_{TP} = \pi l_{PB} d_{\text{ЭК}}, \quad ()$$

где l_{PB} – длина оребренной части трубы, м, рекомендуется принимать равной $l_{\text{ЭК}}$.

Определяется средняя температура воды в экономайзере, °С:

$$t_{\text{ЭК}}^B = \frac{t' + t_{PB}}{2}. \quad (137)$$

Определяют температуру стенки труб экономайзера $t_{\text{СТЭК}}$, °С:

$$t_{\text{СТЭК}} = t_{\text{ЭК}}^B + 30. \quad (138)$$

Определяют поправочный коэффициент, учитывающий соотношение температуры воды в экономайзере и температуры стенки:

$$C_t^{\text{ЭК}} = \left(\frac{\mu_B}{\mu_{CT}} \right)^{0,5}, \quad (139)$$

где μ_B – динамическая вязкость воды при средней ее температуре в экономайзере, П.17;

μ_{CT} – динамическая вязкость воды при ее температуре, равной температуре стенки экономайзера, П.17.

Коэффициент теплоотдачи от материала труб к воде Вт/(м² К):

$$\alpha_{2\text{ЭК}} = 0,023 C_t^{\text{ЭК}} C_l^{\text{ЭК}} C_k^{\text{ЭК}} \frac{\lambda_B}{d_{\text{ЭК}}^B} \left(\frac{\omega_B d_{\text{ЭК}}^B}{\nu_B} \right)^{0,8} \text{Pr}_B^{0,4}, \quad (140)$$

где $C_l^{\text{ЭК}}$ – поправочный коэффициент на относительную длину, определяется по П.15.

$C_k^{\text{ЭК}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий одностороннее омывание труб греющей средой, определяется по приложению П.16.;

ν_B – коэффициент кинематической вязкости среды (воды) при температуре $t_{\text{ЭК}}^B$, $\nu_B = \mu_B \nu_B$, где ν_B – удельный объем воды, П.6.;

λ_B – коэффициент теплопроводности среды (воды) при температуре $t_{\text{ЭК}}^B$, П.18;

Pr_B – критерий Прандтля среды (воды) при температуре $t_{\text{ЭК}}^B$, П.19.

Коэффициент теплопередачи для труб экономайзера Вт/(м² К):

$$k_{\text{ЭК}} = \frac{\psi_{\text{ЭК}} \alpha_{1\text{ПП}}}{1 + \frac{\alpha_{1\text{ПП}}}{\alpha_{2\text{ЭК}}} \cdot \frac{(\psi_{\text{СРБ}} H_{\text{ТР}})}{H_{\text{ВН}}}}, \quad (141)$$

где $\psi_{\text{ЭК}}$ – коэффициент, учитывающий загрязнение поверхности экономайзера, при работе котла на твердом и жидком топливе принимается равным 0,65, при работе на газообразном 0,85.

После этого определяют расчетную поверхность нагрева экономайзера, м²:

$$H_{ЭК} = \frac{Q_{ЭК} B_P}{k_{ЭК} \Delta t_{ЭК}} 10^3. \quad (142)$$

Определяется число горизонтальных рядов:

$$z_{2ЭК}^{\Phi} = \frac{H_{ЭК}}{\psi_{СРБ} H_{ТР} n_{ЭК} z_{1ЭК}}. \quad (143)$$

где $n_{ЭК}$ – число **последовательных** по ходу воды труб экономайзера, принимается таким образом, чтобы $n_{ЭК} * z_{1ЭК}$ было не мене 8.

Если фактическое число рядов труб $z_{2ЭК}^{\Phi}$ не совпало с ранее принятым $z_{2ЭК}$ более, чем на 1 ряд, то необходимо повторить расчет, задавшись другим числом рядов.

Определяют глубину экономайзера, м:

$$l_{ЭКГЛ} = s_{2ЭК} (1 + z_{2ЭК}^{\Phi}). \quad ()$$

Расчет воздухоподогревателя

Задаются наружным диаметром труб воздухоподогревателя $d_{ВП}$, внутренним диаметром труб экономайзера $d_{ВП}^B$, относительным продольным $s_{1ВП}$ и поперечным $s_{2ВП}$ шагом труб.

Определяют необходимую площадь живого сечения воздухоподогревателя со стороны воздуха, m^2 :

$$F_{ВП} = \frac{V_{СУХ}^0 (\alpha_T - 0,5 \Delta \alpha''') B_P (t_{XB} + 273)}{273 \omega_{ВП}}, \quad (144)$$

где $\omega_{ВП}$ – скорость движения воздуха в воздухоподогревателе, м/с, рекомендуется принимать 7-10 м/с.

Определяют число параллельно включенных труб:

$$z_{1ВП} = \frac{4 F_{ВП}}{\pi (d_{ВП}^B)^2}. \quad (145)$$

Определяют относительный поперечный шаг труб:

$$\sigma_{1B\Pi} = s_{1B\Pi} / d_{B\Pi}. \quad (146)$$

Определяют относительный продольный шаг труб:

$$\sigma_{B\Pi 2} = s_{B\Pi 2} / d_{B\Pi}. \quad (147)$$

Определяют живое сечение воздухоподогревателя для прохода продуктов сгорания, м²:

$$F_{B\Pi} = B_P \cdot V_{B\Pi} \cdot \frac{t_{3ЭК} + 273}{\omega_{ГВ\Pi} 273}, \quad (148)$$

где $\omega_{ГВ\Pi}$ скорость движения продуктов сгорания в воздухоподогревателе, м/с, рекомендуется принимать 8-14 м/с;

$t_{3ЭК}$ – температура продуктов сгорания за экономайзером, °С.

Для шахматного пучка при $\frac{\sigma_{1B\Pi} - 1}{\sigma_{2B\Pi} - 1} > 1,7$ максимальная скорость газов

будет в диагональном сечении (только для шахматного расположения труб), м/с:

$$F_{B\Pi}^{\Gamma} = 2F_{B\Pi} \frac{\sigma'_{2B\Pi} - 1}{\sigma_{1B\Pi} - 1}, \quad (149)$$

где $\sigma'_{2B\Pi} = \sqrt{(0,5\sigma_{1B\Pi})^2 + \sigma_{2B\Pi}^2}$ - относительный диагональный шаг труб, м.

Число труб воздухоподогревателя в одном ряду:

$$nz_{1B\Pi} = \frac{a_{ЭК} b_{ЭК} - F_{B\Pi}}{l_{B\Pi} d_{B\Pi}}, \quad (150)$$

$l_{B\Pi}$ – длина труб воздухоподогревателя поперек газотока, рекомендуется принимать равной ширине газотока, м;

n - число последовательных по ходу воздуха труб воздухоподогревателя.

Количество тепла, отданное газами в воздухоподогревателе, кДж/кг:

$$Q_{B\Pi} = (\alpha_T - \Delta\alpha''') \cdot (I_{B\Pi} - J_{XB}^0). \quad (151)$$

Средняя температура газового потока, °С:

$$t_{B\Pi CP} = 0,5 \cdot (t_{УХ} + t_{3ЭК}). \quad (152)$$

Разность температур отдающих в воздухоподогревателе дымовых газов и температурой подогретого воздуха, °С:

$$\Delta t_{БВ\Pi} = t_{ЗЭК} - t_{В\Pi}^{\Gamma}. \quad (153)$$

Разность температур отдавших тепло дымовых газов и холодного, °С:

$$\Delta t_{МВ\Pi} = t_{\min}^{YX} - t_{XB}. \quad (154)$$

Среднелогарифмический температурный напор:

$$\Delta t_{В\Pi} = \frac{\Delta t_{БВ\Pi} - \Delta t_{МВ\Pi}}{\ln \frac{\Delta t_{БВ\Pi}}{\Delta t_{МВ\Pi}}}. \quad (155)$$

Определяют геометрическую поправку пучка труб в зависимости от относительных шагов труб:

– Для коридорного пучка труб:

$$C_S^{Б\Pi} = \left[1 + (2\sigma_{1В\Pi} - 3) \left(1 - \frac{\sigma_{2В\Pi}}{2} \right)^3 \right]^{-2};$$

$$C_S^{Б\Pi} = 1 \text{ при } \sigma_{2В\Pi} \geq 2;$$

$$C_S^{Б\Pi} = 1 \text{ при } \sigma_{1В\Pi} \leq 1,5;$$

При $\sigma_{2В\Pi} < 2$ и $\sigma_{1В\Pi} > 3$ в расчетах $\sigma_{1В\Pi} = 3$.

(156.1)

– Для шахматного пучка труб:

$$\sigma'_{2В\Pi} = \sqrt{\frac{\sigma_{1В\Pi}^2}{4} + \sigma_{2В\Pi}^2};$$

$$\varphi_{В\Pi} = \frac{\sigma_{1В\Pi} - 1}{\sigma'_{2В\Pi} - 1};$$

$$C_S^{Б\Pi} = 0.95\varphi_{В\Pi}^{0,1} \text{ при } 0,1 \leq \varphi_{В\Pi} \leq 1,7 \text{ и любых значениях } \sigma_{1В\Pi};$$

$$C_S^{Б\Pi} = 0.5\varphi_{В\Pi}^{0,5} \text{ при } 1,7 < \varphi_{В\Pi} \leq 4,5 \text{ и значениях } \sigma_{1В\Pi} < 3;$$

$$C_S^{Б\Pi} = 0.95\varphi_{В\Pi}^{0,1} \text{ при } 1,7 < \varphi_{В\Pi} \leq 4,5 \text{ и значениях } \sigma_{1В\Pi} \geq 3;$$

(156.2)

Для дальнейшего расчета необходимо задаться количеством рядов труб в воздухоподогревателе $Z_{2В\Pi}$.

Определяется поправка на число рядов труб по ходу дымовых газов.

– Для коридорного пучка труб:

$$\begin{aligned} C_Z^{BP} &= 0,91 + 0,0125(z_{2BP} - 2), \quad \text{при } z_{2BP} < 10; \\ C_Z^{BP} &= 1, \quad \text{при } z_{2BP} \geq 10. \end{aligned} \quad (157.1)$$

– Для шахматного пучка труб:

$$\begin{aligned} C_Z^{BP} &= 3,12z_{2BP}^{0,05} - 2,5, \quad \text{при } \sigma_{1BP} \leq 3 \text{ и } z_{2BP} < 10; \\ C_Z^{BP} &= 4,0z_{2BP}^{0,02} - 3,2, \quad \text{при } \sigma_{1BP} > 3 \text{ и } z_{2BP} < 10; \\ C_Z^{BP} &= 1 \quad \text{при } z_{2BP} \geq 10. \end{aligned} \quad (157.2)$$

Объемная доля водяных паров в воздухоподогревателе:

$$r_{H_2O}^{BP} = \frac{V_{H_2O}^{0BP}}{V_{BP}}. \quad (158)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией при поперечном омывании пучков труб, Вт/(м² К):

– коридорного пучка:

$$\alpha_{KBП} = 0,2 C_S^{BP} C_Z^{BP} C_\Phi^{BP} \frac{\lambda}{d_{BP}} \left(\frac{\omega_{ГВП} d_{BP}}{\nu} \right)^{0,65} \text{Pr}^{0,33}; \quad (159.1)$$

– шахматного пучка:

$$\alpha_{KBП} = 0,36 C_S^{BP} C_Z^{BP} C_\Phi^{BP} \frac{\lambda}{d_{BP}} \left(\frac{\omega_{ГВП} d_{BP}}{\nu} \right)^{0,6} \text{Pr}^{0,33}, \quad (159.2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды (дымовых газов) при температуре $t_{ВПСР}$, П.13;

ν – коэффициент кинематической вязкости среды (дымовых газов) при температуре $t_{ВПСР}$, П.13;

Pr – критерий Прандтля среды (дымовых газов) при температуре $t_{ВПСР}$, П.13;

C_Φ^{BP} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние изменения физических характеристик дымовых газов на коэффициент теплопередачи в зависимости от температуры и состава газа, определяется по приложению П.14.

Определяется средняя температура воздуха в воздухоподогревателе, °С:

$$t_{BCP} = \frac{t_{BP}^I + t_{XB}}{2} . \quad (160)$$

Определяют температуру стенки труб воздухоподогревателя, °С:

$$t_C^{BP} = \frac{t_{BCP} + t_{BCP}}{2} . \quad ()$$

Определяют поправочный коэффициент, учитывающий соотношение температуры воздуха в воздухоподогревателе и температуры стенки:

$$C_t^{BP} = \left(\frac{t_C^{BP} + 273}{t_{BCP} + 273} \right)^{0,5} . \quad (161)$$

Коэффициент теплоотдачи от материала труб к воздуху, Вт/(м² К):

$$\alpha_{2BP} = 0,023 C_t^{BP} C_l^{BP} C_k^{BP} \frac{\lambda_{BP}}{d_{BP}^B} \left(\frac{\omega_{BP} d_{BP}^B}{\nu_{BP}} \right)^{0,8} Pr_{BP}^{0,4} , \quad (162)$$

где C_l^{BP} – поправочный коэффициент на относительную длину, определяется по П.15.

C_k^{BP} – поправочный коэффициент, учитывающий одностороннее омывание труб греющей средой, определяется по приложению П.16.;

ν_{BP} – коэффициент кинематической вязкости среды (воздуха) при температуре t_{BCP} , П.21;

λ_{BP} – коэффициент теплопроводности среды Вт/(м К) (воздуха) при температуре t_{BCP} , П.21;

Pr_{BP} – критерий Прандтля среды (воздуха) при температуре t_{BCP} , П.21.

Коэффициент теплопередачи для труб пароперегревателя Вт/(м² К):

$$k_{BP} = \frac{\psi_{BP} \alpha_{1BP}}{1 + \frac{\alpha_{1BP}}{\alpha_{2BP}}} , \quad (163)$$

где ψ_{BP} – коэффициент, учитывающий загрязнений поверхности воздухоподогревателя, для твердых и жидких топлив и шахматным

расположением труб принимается 0,6, для твердых и жидких топлив и коридорным расположением труб принимается 0,65, для и газообразных топлив 0,75 вне зависимости от типа пучка труб.

Поверхность нагрева воздухоподогревателя, м²:

$$H_{BP} = \frac{Q_{BP} B_P}{K_{BP} \cdot \Delta t_{BP}} 10^3. \quad (164)$$

Фактическое число рядов труб, шт:

$$z_{2BP}^{\Phi} = \frac{H_{BP}}{\pi \cdot d_{BP}^H \cdot l_{BP} \cdot n z_{1BP}}. \quad (165)$$

Если фактическое число рядов труб не совпало с ранее принятым z_{2BP}^{Φ} более, чем на 1 ряд, то необходимо повторить расчет, задавшись другим числом рядов.

Определяют глубину воздухоподогревателя, м:

$$l_{BПГЛ} = s_{2BP} (1 + z_{2BP}^{\Phi}). \quad ()$$

Приложение 1 Элементарный состав топлива

Твердое и жидкое топливо

№ по НМ	Вид Топлива	Состав, %							Низшая теплота сгорания $Q_{н}^p$, кДж/кг
		W ^p	A ^p	S ^p _л	C ^p	H ^p	N ^p	O ^p	
1	Донецкий Д	13,0	27,8	2,9	44,1	3,3	0,9	8,0	17250
28	Кузнецкий Д	11,5	15,9	0,4	56,4	4,0	1,9	9,9	21900
32	Кузнецкий СС	9,0	18,2	0,4	60,8	3,6	1,5	6,5	23400
47	Талдинский Г	24,0	20,5	0,2	40,5	2,5	1,3	11,0	14400
61	Подмосковный 2Б	32,1	30,6	2,5	24,3	1,9	0,4	8,2	8670
64	Воркутинский Ж	8,0	29,4	1,0	52,6	3,3	1,5	4,2	20770
63	Интинский Д	11,5	28,8	2,5	44,2	2,9	1,5	8,6	16870
68	Кизеловский Ж	6,0	32,0	5,3	48,6	3,5	0,6	4,0	19680
71	Челябинский 3Б	17,0	35,7	0,8	33,6	2,5	0,9	9,5	12560
73	Бабаевский 1Б	56,0	10,1	0,9	23,2	2,1	0,2	7,5	8100
87	Ирша- Бородинский 2Б	33,0	7,4	0,2	42,6	3,0	0,6	13,2	15280
88	Назаровский 2Б	39,0	7,9	0,4	37,2	2,5	0,5	12,5	12850
95	Черногорский Д	14,0	21,5	0,5	47,9	3,3	1,3	9,7	18840
97	Азейский 3Б	25,0	16,5	0,5	42,7	3,1	0,9	11,3	15990
99	Каахемский Г	5,0	14,3	0,4	65,0	4,8	1,0	9,5	25410
103	Букачачинский Г	9,0	13,7	0,5	63,4	4,3	0,8	8,3	24570
104	Татауровский 2Б	33,0	11,7	0,2	41,1	2,8	0,7	11,5	14690
105	Харайорский 1Б	40,0	13,2	0,3	33,5	2,2	0,5	10,3	11390
109	Артемовский 3Б	23,0	33,1	0,3	29,4	3,5	0,6	11,1	11140
110	Партизанский Г	5,5	34,0	0,4	49,8	3,2	0,8	6,3	19470
114	Партизанский Ж	8,0	37,3	0,4	45,4	2,7	0,7	5,5	17080
121	Павловский 1Б	41,5	19,6	0,4	25,7	2,3	0,3	10,2	9130
132	Харанга Т	12,0	13,2	0,4	67,5	3,4	1,0	2,5	25620
133	Галимовский А	10,0	20,7	0,6	63,7	1,6	0,8	2,6	22480
139	Южный Сахалин Д	11,0	24,0	0,3	49,4	3,8	1,1	10,4	19550
143	Ленинград сланец	11,0	65,6	1,3	17,3	2,2	0,1	2,5	7660
147	Росторф фрезер	50,0	6,3	0,1	24,7	2,6	1,1	15,2	8120
2	Мазут малосернистый	0,2	0,03	0,85	86,58	12,04	0	0,3	40530
3	Мазут сернистый	0,49	0,05	1,8	85,71	11,45	0	0,5	39570
4	Мазут высокосернистый	1,0	0,06	2,55	85,04	10,64	0	0,71	39060

Газообразное топливо

Вид топлива	Состав газа в % по объёму							Низшая теплота сгорания $Q_{н}^p$, кДж/м ³
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	
Уренгой-Надым-Пунга-Ухта	98.72	0.12	0.01	0.01	0	0,14	1.00	35500
Уренгой-Ужгород	98.9	0.12	0.01	0.01	0	0.06	0.90	35590
Уренгой-Новопсков	98.9	0.13	0.01	0.01	0	0.08	0.87	35590
Уренгой-Сургут-Челябинск	98.24	0.29	0.20	0.09	0,04	0.14	1.00	35800
Надым-Пунга-Н.Тура-Свердловск-Челябинск	98.67	0.16	0.08	0.01	0	0.08	1.00	35590
Н. Новгород-Иваново-Череповец	98.99	0.25	0.04	0.02	0	0.10	0.60	35750
Бухара-Урал	94.24	3.00	0.89	0.39	0,3	0.28	0.90	37560
Средняя Азия-Центр	94.08	2.80	0.73	0.30	0,09	1.00	1.00	36760
Саратов-Москва	90.29	2.80	1.10	0.75	0,54	0.32	4.20	37010
Мострансгаз (кольцо)	96.57	1.40	0 40	0.18	0,1	0.15	1.20	36300
Оренбург-Александров Гай	86.43	3.90	1.72	0.87	0,37	0.01	6.70	36800

Приложение 2 Расчетные значения присосов воздуха в топку и в газоходы паровых и водогрейных котлов при номинальной нагрузке

Элементы газового тракта котла		Величина $\Delta\alpha$
Топочные камеры пылеугольных и газомазутных котлов	Газоплотные	0.02
	С металлической обшивкой труб экрана	0.05
	С обмуровкой и металлической обшивкой	0.07
	С обмуровкой и без обшивки	0.10
Топочные камеры слоевых топок	Механические и полу механические	0.10
	Ручные	0.30
Газоходы конвективных поверхностей нагрева	Газоплотный газоход от топки до воздухоподогревателя (величина присоса распределяется равномерно по расположенным в газоходе поверхностям нагрева)	0.02
	Негазоплотные газоходы:	
	Фестон, ширмовый перегреватель	0.00
	Первый котельный пучок котлов производительностью < 50 кг/с	0.05
	Второй котельный пучок котлов производительностью > 50 кг/с	0.10
	Первичный перегреватель	0.03
	Промежуточный перегреватель	0.03
	Переходная зона прямоточного котла	0.03
	Экономайзер котлов производительностью > 50 кг/с (каждая ступень)	0.02
	Экономайзер котлов производительностью < 50 кг/с	
	стальной	0.08
	чугунный с обшивкой	0.10
	чугунный без обшивки	0.20
	Трубчатые воздухоподогреватели котлов производительностью > 50 кг/с (каждая ступень)	0.03
	котлов производительностью < 50 кг/с (каждая ступень)	0.06
	Регенеративные воздухоподогреватели	
	котлов производительностью > 50 кг/с	0.15
	котлов производительностью < 50 кг/с	0.20
	Пластинчатые воздухоподогреватели (каждая ступень)	0.10

Золоуловители	Электрофилтры	
	котлов производительностью > 50 кг/с	0.10
	котлов производительностью < 50 кг/с	0.15
	Циклонные и батарейные	0.05
	Скрубберы	0.05
Газоходы за котлом	Стальные (каждые 10 п.м)	0.01
	Кирпичные боровы (каждые 10 п.м)	0.05

Приложение 3 Энтальпия воздуха и продуктов сгорания топлив при $\alpha = 1$,
кДж/м³ и золы кДж/кг

температура, °C	RO ₂ H _{RO2}	R ₂ H _{R2}	O ₂	H ₂ O H _{H2O}	воздух H _B	Зола I ₃
100	170	130	132	151	133	81
200	359	261	268	305	267	170
300	561	393	408	464	404	264
400	774	528	553	628	543	361
500	999	666	701	797	686	460
600	1226	806	852	970	832	562
700	1466	949	1008	1151	982	664
800	1709	1096	1163	1340	1134	769
900	1957	1247	1323	1529	1285	878
1000	2209	1398	1482	1730	1440	987
1100	2465	1550	1642	1932	1600	1100
1200	2726	1701	1806	2138	1760	1209
1300	2986	1856	1970	2352	1919	1365
1400	3251	2016	2133	2566	2083	1587
1500	3515	2171	2301	2789	2247	1764
1600	3780	2331	2469	3011	2411	1881
1700	4049	2490	2637	3238	2574	2070
1800	4317	2650	2805	3469	2738	2192
1900	4586	2814	2978	3700	2906	2334
2000	4859	2973	3150	3939	3074	2520
2100	5132	3137	3318	4175	3242	2718
2200	5405	3301	3494	4414	3410	2927
2300	5658	3452	-	4643	3571	-
2400	5930	3615	-	4888	3740	-
2500	6203	3778	-	5132	3910	-

Приложение 4 Расчетные характеристики топок

Топливо	нагрузка		Потеря теплоты от неполноты сгорания, %		Доля золы топлива в уносе $\alpha_{ун}$, %
	зеркала горения q_R , кВт/м ²	топочного объема q_v , кВт/м ³	хими- ческой q_3	механиче- ской q_4	
слоевые топки с механическим забрасывателем					
Антрацит АС, АО и АМ	1390-1750	290-470	0,1	11	15
Каменные угли: типа кузнецких Г и Д типа донецких Г и Д типа кузнецких СС прочие				7	15
				7	15
				15	35
				8	15
Бурые угли:	1250-1520	1	5	50	
Прочие топлива	900-1200		5,5	15	
Камерные топки					
Антрацит	3000-4000	400-650	0,5-1	5	90
Каменные угли				0,5	75
Бурые угли				0,3	70
Газ	3000-4000	800-1000	0,1-0,15	0	0
Мазут	3000-4000	750-900	0,25-0,3	0,05-0,1	0

Приложение 5 Диаметры и толщины стенок труб (с учетом требований РД 10-249-98)

Электросварные трубы (ГОСТ 10704-91)												
Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм											
18	1,8											
19	1,8	2,0										
20	1,8	2,0										
22	1,8	2,0										
24	1,8	2,0	2,2	2,5								
25	1,8	2,0	2,2	2,5								
26	1,8	2,0	2,2	2,5								
27	1,8	2,0	2,2	2,5								
28	1,8	2,0	2,2	2,5								
30	1,8	2,0	2,2	2,5								
32	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0						
33	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0						

Электросварные трубы (ГОСТ 10704-91)												
Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм											
35	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,0					
36	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,0					
38	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,0					
40	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,0					
42	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,0					
45	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,0					
48	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5				
51		2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5				
53		2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5				
54		2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5				
57		2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5				
60		2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8			
63,5		2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8			
70				2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0		
73				2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0		
76				2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0	4,5	5,0
88				2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0	4,5	5,0
89				2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0	4,5	5,0
95							3,2					5,0
102						3,0	3,2	3,5	3,8	4,0	4,5	5,0
108						3,0	3,2	3,5	3,8	4,0	4,5	5,0

Приложение 6 Удельные объемы и энтальпии сухого насыщенного пара и воды на линии насыщения

давление, МПа	температура вскипания, °С	удельный объем воды $v_{\text{в}}$, м³/кг	Энтальпия воды, кДж/кг	Энтальпия пара, кДж/кг	Теплота парообразования, кДж/кг	Удельный объем пара $v_{\text{п}}$, м³/кг
0,100	99,63	0,0010434	417,51	2675,7	2258,2	1,6946
0,150	111,37	0,0010530	467,13	2693,9	2226,8	1,1597
0,200	120,23	0,0010608	504,7	2706,9	2202,2	0,88592
0,250	127,43	0,0010675	535,4	2717,2	2181,8	0,71881
0,300	133,54	0,0010735	561,4	2725,5	2164,1	0,60586
0,350	138,88	0,0010789	584,3	2732,5	2148,2	0,52425
0,400	143,62	0,0010839	604,7	2738,5	2133,8	0,46242
0,450	147,92	0,0010885	623,2	2743,8	2120,6	0,41392
0,500	151,85	0,0010928	640,1	2748,5	2108,4	0,37481
0,600	158,84	0,0011009	670,4	2756,4	2086,0	0,31556

давление, МПа	температура вскипания, °C	удельный объем воды v_v , м ³ /кг	Энтальпия воды, кДж/кг	Энтальпия пара, кДж/кг	Теплота парообразования, кДж/кг	Удельный объем пара v_p , м ³ /кг
0,700	164,96	0,0011082	697,1	2762,9	2065,8	0,27274
0,800	170,42	0,0011150	720,9	2768,4	2047,5	0,24030
0,900	175,36	0,0011213	742,6	2773,0	2030,4	0,21484
1,000	179,88	0,0011274	762,6	2777,0	2014,4	0,19430
1,10	184,06	0,0011331	781,1	2780,4	1999,3	0,17739
1,20	187,96	0,0011386	798,4	2783,4	1985,0	0,16320
1,30	191,60	0,0011438	814,7	2786,0	1971,3	0,15112
1,40	195,04	0,0011489	830,1	2788,4	1958,3	0,14072
1,50	198,28	0,0011538	844,7	2790,4	1945,7	0,13165
1,60	201,37	0,0011586	858,6	2792,2	1933,6	0,12368
1,70	204,30	0,0011633	871,8	2793,8	1922,0	0,11661
1,80	207,10	0,0011678	884,6	2795,1	1910,5	0,11031
1,90	209,79	0,0011722	896,8	2796,4	1899,6	0,10464
2,00	212,37	0,0011766	908,6	2797,4	1888,8	0,09955
2,10	214,85	0,0011808	919,9	2798,3	1878,4	0,09488
2,20	217,24	0,0011850	930,9	2799,1	1868,2	0,09064
2,30	219,54	0,0011891	941,6	2799,8	1858,2	0,08676
2,40	221,78	0,0011932	951,9	2800,4	1848,5	0,08319
2,50	223,94	0,0011972	962,0	2800,8	1838,8	0,07990
2,60	226,03	0,0012011	971,7	2801,2	1829,5	0,07685
2,70	228,06	0,0012050	981,2	2801,5	1820,3	0,07402
2,80	230,04	0,0012088	990,5	2801,7	1811,2	0,07138
2,90	231,96	0,0012126	999,5	2801,8	1802,3	0,06892
3,00	233,84	0,0012163	1008,4	2801,9	1793,5	0,06662
3,10	235,66	0,0012200	1017,0	2801,9	1784,9	0,06446
3,20	237,44	0,0012237	1025,5	2801,8	1776,3	0,06243
3,30	239,18	0,0012273	1033,7	2801,7	1768,0	0,06052
3,40	240,88	0,0012310	1041,8	2801,5	1759,7	0,05872
3,50	242,54	0,0012345	1049,8	2801,3	1751,5	0,05702
3,60	244,16	0,0012381	1057,6	2801,0	1734,4	0,05540
3,70	245,75	0,0012416	1065,3	2800,7	1735,4	0,05388
3,80	247,31	0,0012451	1072,8	2800,3	1727,5	0,05243
3,90	248,84	0,0012486	1080,2	2799,9	1719,7	0,05105
4,00	250,33	0,0012521	1087,5	2799,4	1711,9	0,04974
4,10	251,80	0,0012555	1094,6	2798,9	1704,3	0,04849
4,20	253,24	0,0012589	1101,7	2798,4	1696,7	0,04729
4,30	254,66	0,0012623	1108,6	2797,8	1689,2	0,04615
4,40	256,05	0,0012657	1115,5	2797,2	1681,7	0,04506
4,50	257,41	0,0012691	1122,2	2796,5	1674,3	0,04402

давление р, МПа	температура вскипания t, °C	удельный объем воды v_v , м ³ /кг	Энтальпия воды, кДж/кг	Энтальпия пара, кДж/кг	Теплота парообразования, кДж/кг	Удельный объем пара v_p , м ³ /кг
4,60	258,76	0,0012725	1128,9	2795,9	1667,0	0,04302
4,70	260,08	0,0012758	1135,4	2795,2	1659,8	0,04206
4,80	261,38	0,0012792	1141,9	2794,4	1652,5	0,04114
4,90	262,66	0,012825	1148,3	2793,6	1645,3	0,04026
5,00	263,92	0,0012858	1154,6	2792,8	1638,2	0,03941

Приложение 7 Удельный объем v_p и энтальпия перегретого пара при различной температуре и давлении

t, °C	p=0,8 МПа		p=0,9 МПа		p=1,0 МПа	
	v_p , м³/кг	i, кДж/кг	v_p , м³/кг	i, кДж/кг	v_p , м³/кг	i, кДж/кг
180	0,2471	2792,0	0,2178	2784,8	0,1944	2777,3
190	0 2540	2815,9	0,2242	2809,5	0,2002	2802,9
200	0,2608	2839,2	0,2304	2833,5	0,2059	2827 5
210	0,2675	2862,0	0,2364	2856,9	0,2115	2851,5
220	0,2740	2884,5	0,2423	2879,8	0,2169	2874,9
230	0,2805	2906,6	0,2481	2902,3	0,2223	2897,9
240	0,2869	2928,4	0,2539	2924,5	0,2275	2920,5
250	0 2932	2950,1	0,2596	2946,5	0,2327	2942,8
260	0 2995	2971,6	0 2652	2968,2	0,2378	2964,8
270	0,3057	2993,0	0,2708	2989,8	0,2429	2986,7
280	0,3119	3014,2	0 2764	3011,3	0,2480	3008,3
290	0,3180	3035,4	0,2819	3032,7	0,2530	3029,9
300	0,3241	3056,5	0,2874	3054,0	0,2580	3051,3
	p=1,1 МПа		p=1,2 МПа		p = 1,3 МПа	
190	0,1806	2796,0	0,1642	2788,9	-	-
200	0,1859	2821,5	0,1692	2815,2	0,1551	2808,8
210	0,1911	2846,1	0,1741	2840,5	0,1597	2834,8
220	0,1962	2870,0	0,1788	2865,0	0,1641	2859,9
230	0,2011	2893,4	0,1834	2888,9	0,1684	2884,2
240	0,2059	2916,4	0,1879	2912,2	0,1727	2908,0
250	0,2107	2939,0	0,1924	2935,2	0,1768	2931,3
260	0,2154	2961,3	0,1968	2957,8	0,1809	2954,2
270	0,2201	2983,4	0,2011	2980,2	0,1850	2976,8
280	0,2247	3005,3	0,2054	3002,3	0,1890	2999,2
290	0,2293	3027,1	0,2096	3024,2	0,1929	3021,4
300	0,2339	3048,7	0,2138	3046,0	0,1968	3043,4
	p=1,4 МПа		p=1,5 МПа		p=1,6 МПа	
200	0,1429	2802,1	0 1324	2795,3	-	-
210	0,1473	2828,9	0,1366	2822,9	0 1271	2816,7
220	0,1515	2854,5	0,1406	2849,2	0,1310	2843,7
230	0,1556	2879,5	0,1445	2874,7	0,1347	2869,8
240	0,1596	2903,7	0,1483	2899,3	0,1383	2894,9
250	0,1635	2927,4	0,1520	2923,4	0,1419	2919,4
260	0,1674	2950,6	0,1556	2947,0	0,1453	2943,3
270	0,1712	2973,5	0,1592	2970,2	0,1487	2966,7
280	0,1749	2996,1	0,1627	2993,0	0,1521	2989,8
290	0 1786	3018,5	0 1662	3015,6	0,1554	3012,7
300	0 1823	3040,7	0,1697	3037,9	0,1586	3035,2

	p=1,7 МПа		p=1,8 МПа		p=1,9 МПа	
210	0,1188	2810,3	0,1114	2803,7	0,1047	2797,0
220	0,1225	2838,1	0,1150	2832,3	0,1082	2826,4
230	0,1261	2864,7	0,1184	2859,6	0,1115	2854,3
240	0,1296	2890,4	0,1218	2885,8	0,1148	2881,1
250	0,1329	2915,2	0,1250	2911,1	0,1179	2906,8
260	0,1362	2939,5	0,1281	2935,7	0,1209	2931,8
270	0,1395	2963,3	0,1312	2959,8	0,1239	2956,3
280	0,1427	2986,7	0,1343	2983,4	0,1268	2980,2
290	0,1458	3009,7	0,1373	3006,7	0,1296	3003,7
300	0,1489	3032,4	0,1402	3029,6	0,1325	3026,8
	p = 2,0 МПа		p = 2,1 МПа		p = 2,2 МПа	
220	0,1021	2820,4	0,09657	2814,2	0,09152	2807,8
230	0,1053	2849,0	0,09972	2843,5	0,09460	2837,9
240	0,1084	2876,3	0,10274	2871,4	0,09754	2866,4
250	0,1115	2902,5	0,1057	2898,2	0,10037	2893,7
260	0,1144	2927,9	0,1085	2924,0	0,10310	2919,9
270	0,1172	2952,7	0,1112	2949,0	0,1058	2945,4
280	0,1200	2976,9	0,1139	2973,5	0,1084	2970,2
290	0,1228	3000,6	0,1166	2997,5	0,1109	2994,4
300	0,1255	3024,0	0,1192	3021,1	0,1134	3018,2
	p=2,3 МПа		p=2,4 МПа		p=2,5 МПа	
220	0,08690	2801,2	-	-	-	-
230	0,08992	2832,2	0,08561	2826,4	0,08164	2820,4
240	0,09279	2861,4	0,08842	2856,2	0,08439	2851,0
250	0,09554	2889,2	0,09110	2884,6	0,08701	2879,9
260	0,09819	2915,8	0,09368	2911,7	0,08953	2907,5
270	0,10077	2941,6	0,09619	2937,9	0,09197	2934,1
280	0,10328	2966,7	0,09863	2963,3	0,09434	2959,8
290	0,1057	2991,2	0,10101	2988,1	0,09665	2984,9
300	0,1081	3015,3	0,1033	3012,4	0,09822	3009,4
	p = 2,6 МПа		p = 2,7 МПа		p = 2,8 МПа	
230	0,07796	2814,2	0,07455	2808,0	—	,
240	0,08066	2845,6	0,07721	2840,1	0,07399	2834,5
250	0,08323	2875,1	0,07973	2870,3	0,07647	2865,3
260	0,08570	2903,2	0,08214	2898,9	0,07883	2894,5
270	0,08807	2930,2	0,08445	2926,3	0,08110	2922,3
280	0,09037	2956,3	0,08670	2952,7	0,08329	2949,1
290	0,09262	2981,6	0,08889	2978,4	0,08542	2975,1
300	0,09482	3006,4	0,09103	3003,4	0,08751	3000,4
	p= 2,9 МПа		p = 3,0 МПа		p = 3,1 МПа	
240	0,07099	2828,8	0,06818	2823,0	0,06554	2817,0
250	0,07343	2860,3	0,07058	2855,2	0,06791	2850,0

260	0,07574	2890,0	0,07286	2885,5	0,07016	2880,8
270	0,07796	2918,3	0,07504	2914,2	0,07230	2910,0
280	0,08011	2945,4	0,07714	2941,8	0,07436	2938,0
290	0,08219	2971,7	0,07918	2968,4	0,07635	2964,9
300	0,08422	2997,3	0,08116	2994,2	0,07829	2991,0
	p=3,2 МПа		p = 3,3 МПа		p= 3,4 МПа	
240	0,06306	2810,9	0,06072	2804,7	-	-
250	0,06540	2844,7	0,06305	2839,3	0,06082	2833,8
260	0,06762	2876,2	0,06523	2871,4	0,06298	2866,5
270	0,06973	2905,9	0,06730	2901,6	0,06502	2897,3
280	0,07175	2934,2	0,06929	2930,4	0,06698	2926,5
290	0,07370	2961,5	0,07121	2958,0	0,06886	2954,5
300	0,07560	2987,9	0,07307	2984,7	0,07068	2981,5
	p = 3,5 МПа		p = 3,6 МПа		p = 3,7 МПа	
250	0,05871	2828,1	0,05671	2822,4	0,05482	2816,5
260	0,06085	2861,6	0,05883	2856,6	0,05692	2851,5
270	0,06287	2892,9	0,06083	2888,5	0,05890	2884,0
280	0,06479	2922,6	0,06273	2918,6	0,06077	2914,6
290	0,06664	2950,9	0,06455	2947,3	0,06256	2943,7
300	0,06843	2978,2	0,06631	2974,9	0,06429	2971,6
	p = 3,8 МПа		p= 3,9 МПа		p = 4,0 МПа	
250	0,05302	2810,5	0,05130	2804,4		
260	0,05511	2846,3	0,05338	2841,0	0,05174	2835,6
270	0,05706	2879,4	0,05532	2874,8	0,05366	2870,1
280	0,05891	2910,5	0,05715	2906,4	0,05547	2902,2
290	0,06068	2940,0	0,05889	2936,3	0,05719	2932,5
300	0,06238	2968,3	0,06057	2964,9	0,05885	2961,5
	p = 4,1 МПа		p = 4,2 МПа		p = 4,3 МПа	
260	0,05017	2830,2	0,04867	2824,6	0,04723	2818,9
270	0,05208	2865,3	0,05056	2860,4	0,04912	2855,5
280	0,05387	2898,0	0,05234	2893,7	0,05089	2889,3
290	0,05558	2928,7	0,05403	2924,9	0,05256	2921,0
300	0 05721	2958,0	0,05564	2954,6	0,05415	2951,0
	p = 4,4 МПа		p = 4,5 МПа		p = 4,6 МПа	
260	0,04585	2813,0	0,04454	2807,1	0,04327	2801,0
270	0,04774	2850,4	0,04641	2845,3	0,04514	2840,1
280	0,04949	2884,9	0,04816	2880,4	0,04688	2875,8
290	0,05115	2917,1	0,04980	2913,1	0,04850	2909,0
300	0,05272	2947,5	0,05136	2943,9	0,05005	2940,3
	p= 4,7 МПа		p = 4,8 МПа		p= 4,9 МПа	
270	0,04392	2834,8	0,04274	2829,4	0,04162	2824,0
280	0,04565	2871,2	0,04447	2866,6	0,04333	2861,8
290	0,04726	2904,9	0,04607	2900,8	0,04493	2896,6

300	0,04879	2936,6	0,04759	2932,9	0,04644	2929,2
	p = 5,0 МПа		p = 5,2 МПа		p = 5,4 МПа	
270	0,04053	2818,4	0,03847	2806,8	0,03654	2794,8
280	0,04224	2857,0	0,04018	2847,1	0,03825	2836,8
290	0,04383	2892,4	0,04175	2883,7	0,03981	2874,8
300	0,04532	2925,4	0,04322	2917,7	0,04127	2909,8

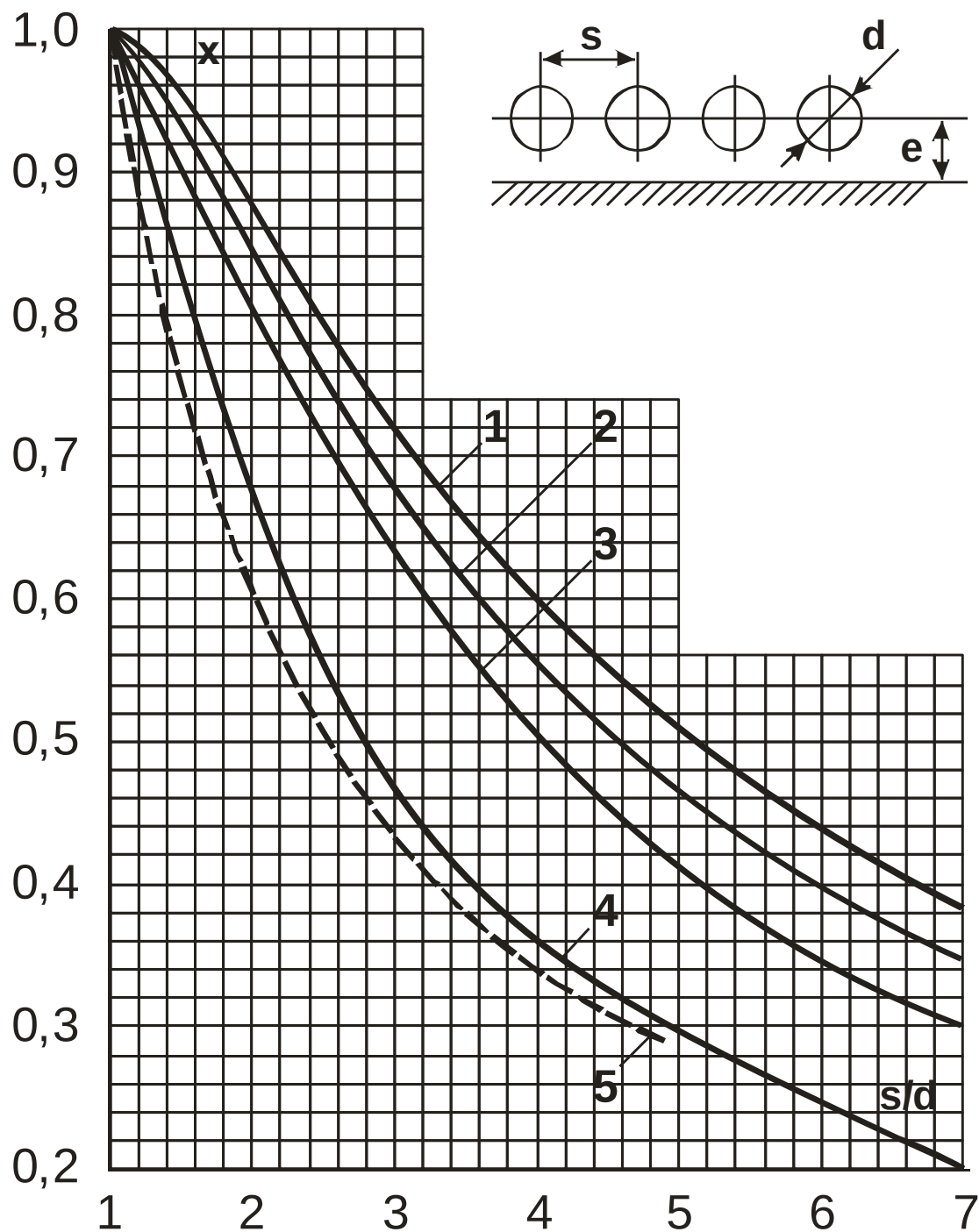
Приложение 8 Значение параметра M_0 для различных топок

Тип топки	M_0
для пылеугольных топок с твердым шлакоудалением: при тангенциальном и встречном расположении горелок при однофронтном расположении горелок	0,46 0,42
для пылеугольных топок с жидким шлакоудалением	0,44
для слоевых топок	0,46
для газомазутных топок при настенном расположении горелок	0,4
для газомазутных топок при подовом расположении горелок ($x_r=0$)	0,36
Для топок, оборудованных поворотными горелками, коэффициент M_0 соответственно увеличивается или уменьшается на 0,01 на каждые 10° угла поворота горелок вниз или вверх.	

Приложение 9 Значение параметра $A_{зл}$

Топливо	Коэффициент $A_{зл}$	
	для топок с твердым шлакоудалением	для топок с жидким шлакоудалением
Антрацит, полуантрацит и экибастузский каменный уголь	1	1,1
Каменные угли (корме экибастузского)	0,8	0,9
Бурые угли и сланцы	0,75	0,85
Торф и древесина	0,6	0,7

Приложение 10 Угловые коэффициенты однорядного гладкотрубного экрана



1 – с учетом излучения обмуровки при $e \geq 1,4d$;

2 – то же при $e = 0,8d$;

3 – то же при $e = 0,5d$;

4 – то же при $e = 0$;

5 – без учета излучения обмуровки при $e \geq 0,5d$.

Приложение 11 Коэффициент, учитывающий снижение тепловосприимчивости

Тип экрана	Топливо	Коэффициент ζ
Камерные топки		
Гладкотрубные и мембранные	Газообразное	0,65
Гладкотрубные и мембранные	Мазут	0,55
Гладкотрубные и мембранные	Торф	0,45
	Сланец	0,25
	Антрацит, тощий каменный	0,45
	угли назаровского и канско-ачинского месторождения	0,45
	Прочие	0,35-0,4
Слоевые топки		
Гладкотрубные и плавниковые	все виды	0,6
Покрытые огнеупорной массой	все виды	0,2

Приложение 12 Угловые коэффициенты x_p и их суммы Σx_p для z-го ряда конвективной поверхности

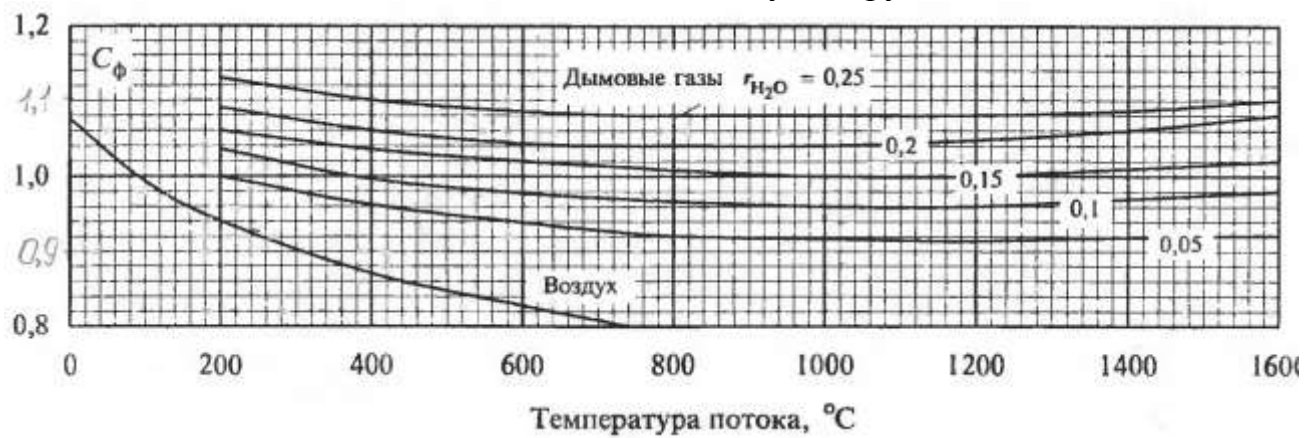
Номер ряда, z	Значение x_p и Σx_p	Значение σ_1											
		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
1	x_p	1,000	0,920	0,810	0,730	0,670	0,630	0,520	0,450	0,390	0,350	0,315	0,290
	Σx_p	1,000	0,920	0,810	0,730	0,670	0,630	0,520	0,450	0,390	0,350	0,315	0,290
2	x_p			0,154	0,197	0,221	0,233	0,250	0,248	0,238	0,228	0,216	0,206
	Σx_p			0,964	0,927	0,891	0,863	0,770	0,697	0,628	0,577	0,531	0,496
3	x_p						0,086	0,120	0,136	0,145	0,148	0,148	0,146
	Σx_p						0,949	0,889	0,834	0,773	0,725	0,679	0,642
4	x_p							0,058	0,075	0,089	0,096	0,101	0,104
	Σx_p							0,947	0,908	0,862	0,821	0,780	0,746
5	x_p										0,062	0,069	0,074
	Σx_p										0,884	0,849	0,820

Приложение 13 Коэффициент теплопроводности, кинематической вязкости и критерий Прандтля для дымовых газов среднего состава при различной температуре

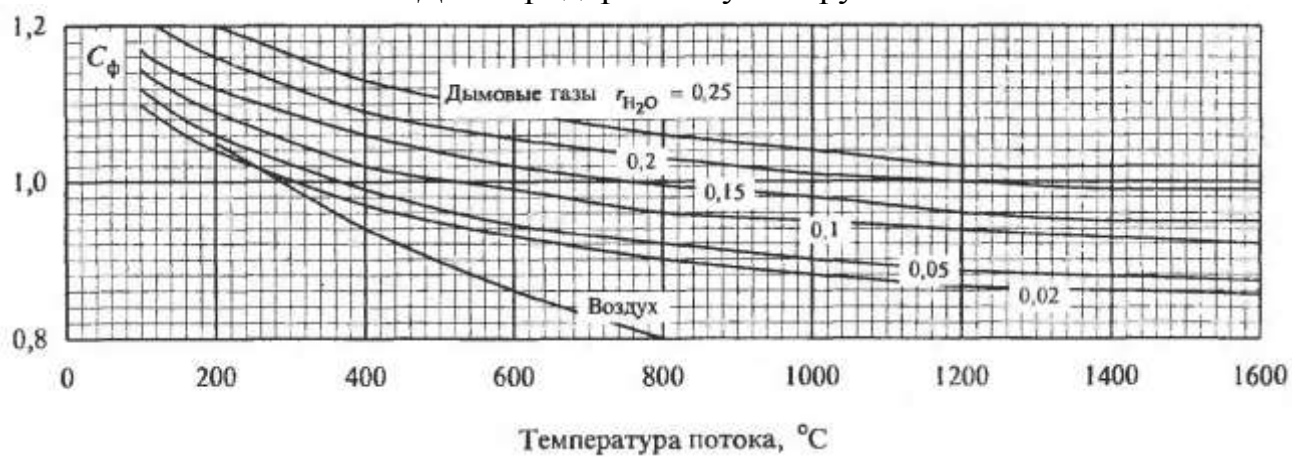
Температура, °C	Дымовые газы среднего состава		
	кинематическая вязкость, $\nu \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	теплопроводность, $\lambda \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м К})$	Pr
0	11,9	2,27	0,74
100	20,8	3,12	0,70
200	31,6	4,00	0,67
300	43,9	4,82	0,65
400	57,8	5,68	0,64
500	73,0	6,54	0,62
600	89,4	7,40	0,61
700	107,0	8,25	0,60
800	126,0	9,13	0,59
900	146,0	9,99	0,58
1000	167,0	10,87	0,58
1100	188,0	11,72	0,57
1200	211,0	12,53	0,56
1300	234,0	13,46	0,55
1400	258,0	14,38	0,54
1500	282,0	15,31	0,53
1600	307,0	16,24	0,52
1700	333,0	17,28	0,51
1800	361,0	18,10	0,50
1900	389,0	18,91	0,49
2000	419,0	19,84	0,49
2100	450,0	20,65	0,48
2200	482,0	21,58	0,47

Приложение 14 Поправочный коэффициент C_ϕ

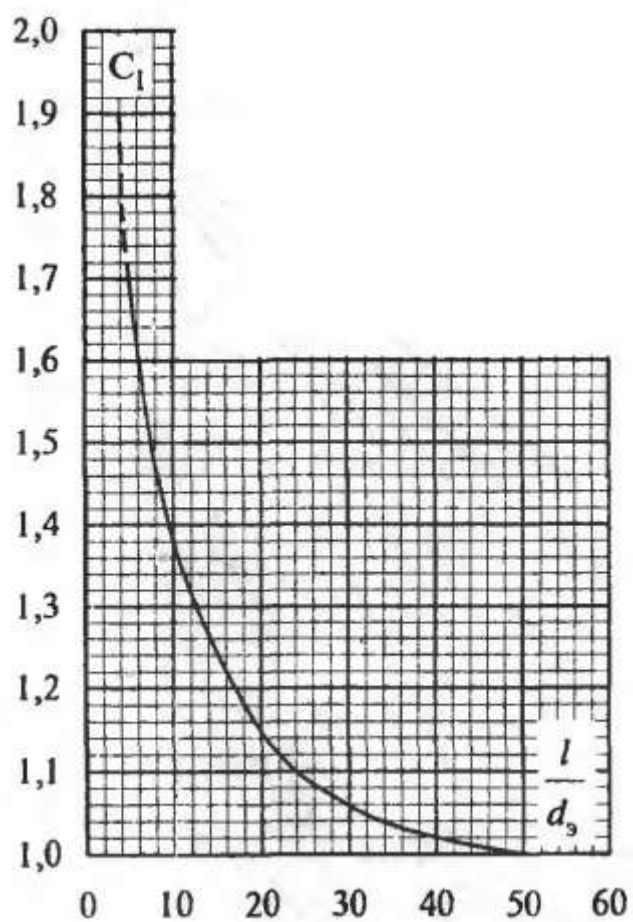
Для шахматного пучка труб



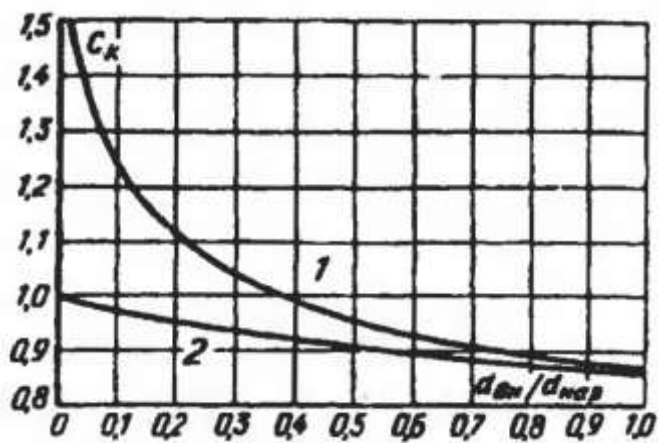
Для коридорного пучка труб



Приложение 15 Поправочный коэффициент C_l на относительную длину труб при нагреве газов



Приложение 16 Поправочный коэффициент C_k , учитывающий одностороннее омывание греющей средой труб



Приложение 17 Динамическая вязкость воды и водяного пара при различной температуре и давлении $\mu \cdot 10^{-6}$ *

t, °C	Давление p, МПа						
	0,1	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	15,0
0	1792	1788	1783	1779	1774	1770	1759
10	1308	1306	1304	1302	1300	1298	1294
20	1003	1002	1001	1001	999,9	993,3	997,7
30	797,8	797,7	797,5	797,4	797,3	797,1	796,9
40	653,2	653,4	653,5	653,7	653,8	654,0	654,5
50	547,2	547,5	547,8	548,1	548,5	548,8	549,6
60	466,9	467,3	467,7	468,1	468,6	469,0	470,1
70	404,5	405,0	405,5	405,9	406,4	406,9	408,1
80	355,0	355,5	356,0	356,5	357,1	357,6	358,9
90	315,0	315,5	316,1	316,6	317,1	317,7	319,0
100	12,27	282,7	283,3	283,8	284,3	284,9	286,2
110	12,65	255,5	256,0	256,6	257,1	257,8	259,0
120	13,02	232,6	233,1	233,7	234,2	234,7	236,1
130	13,41	213,2	213,7	214,2	214,8	215,3	216,6
140	13,79	196,6	197,1	197,6	198,2	198,7	200,0
150	14,18	182,3	182,8	183,4	183,9	184,4	185,7
160	14,58	169,9	170,4	171,0	171,5	172,0	173,3
170	14,97	159,1	159,6	160,1	160,7	161,2	162,4
180	15,37	149,6	150,1	150,3	151,1	151,6	152,9
190	15,77	141,2	141,7	142,2	142,7	143,2	144,5
200	16,18	133,7	134,2	134,7	135,2	135,7	137,0
210	16,58	127,0	127,5	128,0	128,5	129,0	130,3
220	16,99	16,56	121,4	121,9	122,4	122,9	124,2
230	17,40	17,01	115,8	116,4	116,9	117,4	118,7
240	17,81	17,46	110,7	111,2	111,8	112,3	113,6
250	18,22	17,90	105,9	106,4	107,0	107,5	108,9
260	18,63	18,34	18,06	101,9	102,5	103,1	104,5
270	19,04	18,79	18,54	97,5	98,2	98,8	100,3
280	19,46	19,22	19,01	18,83	94,0	94,6	96,2
290	19,87	19,66	19,47	19,32	89,8	90,5	92,2
300	20,29	20,10	19,93	19,80	19,73	86,4	88,3

* жирной линией обозначена граница фазового перехода

Приложение 18 Коэффициент теплопроводности воды и водяного пара при различной температуре и давлении $\lambda \cdot 10^{-3}$ *

t, °C	Давление p, МПа						
	0,1	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	15,0
0	560,9	562,1	563,2	564,2	565,3	566,4	569,2
10	580,1	581,0	582,0	583,0	583,9	584,9	587,3
20	598,5	599,4	600,3	601,2	602,1	603,1	605,4
30	615,6	616,4	617,3	618,2	619,1	620,0	622,3
40	630,7	631,5	632,5	633,4	634,3	635,2	637,5
50	643,6	644,5	645,4	646,4	647,3	648,2	650,6
60	654,3	655,3	656,2	657,2	658,1	659,1	661,5
70	663,0	664,0	665,0	666,0	667,0	668,0	670,4
80	669,8	670,8	671,9	672,9	673,9	675,1	677,5
90	675,0	676,1	677,1	678,2	679,3	680,4	683,0
100	25,1	679,9	681,0	682,0	683,2	684,3	687,1
110	25,8	682,5	683,6	684,8	686,0	687,1	690,0
120	26,5	683,9	685,2	686,4	687,6	688,8	691,8
130	27,3	684,5	685,7	687,0	688,3	689,5	692,7
140	28,0	684,1	685,4	686,7	688,0	689,3	692,6
150	28,9	682,8	684,2	685,6	687,0	688,3	691,7
160	29,7	680,7	682,2	683,6	685,0	686,5	690,0
170	30,4	677,8	679,3	680,8	682,3	683,8	687,5
180	31,5	674,0	675,6	677,2	678,8	680,3	684,2
190	32,4	669,3	671,0	672,7	674,3	676,0	680,1
200	33,3	663,7	665,5	667,3	669,0	670,8	675,1
210	34,2	657,1	659,0	660,9	662,8	664,6	669,2
220	35,2	42,6	651,5	653,5	655,5	657,5	662,3
230	36,2	42,8	642,8	645,0	647,1	649,2	654,4
240	37,2	43,1	632,9	635,2	637,6	639,8	645,4
250	38,2	43,5	621,5	624,1	626,6	629,1	635,2
260	39,2	44,0	50,9	611,4	614,3	617,0	623,7
270	40,2	44,6	50,7	597,0	600,2	603,3	610,7
280	41,3	45,3	50,7	58,4	584,3	587,8	596,1
290	42,3	46,0	50,9	57,5	566,3	570,3	579,8
300	43,4	46,8	51,2	57,0	65,8	550,8	561,6

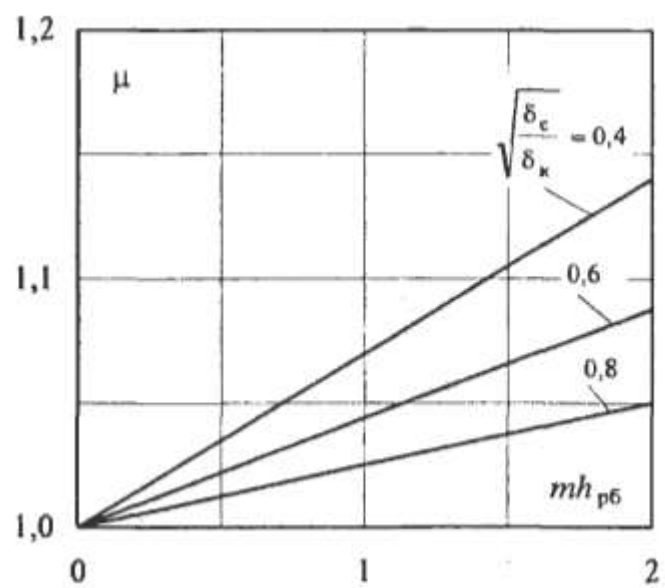
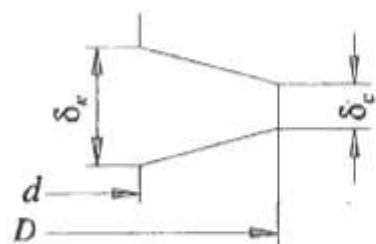
* жирной линией обозначена граница фазового перехода

Приложение 19 Критерий Прандтля воды и водяного пара при различной температуре и давлении*

t, °C	Давление p, МПа						
	0,1	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	15,0
0	13,47	13,38	13,28	13,20	13,10	13,02	12,80
10	9,45	9,40	9,36	9,31	9,27	9,22	9,11
20	7,01	6,98	6,95	6,93	6,90	6,88	6,82
30	5,42	5,40	5,38	5,37	5,35	5,34	5,30
40	4,33	4,32	4,31	4,30	4,29	4,28	4,25
50	3,55	3,55	3,54	3,53	3,53	3,52	3,50
60	2,99	2,98	2,98	2,97	2,97	2,96	2,95
70	2,56	2,55	2,55	2,55	2,54	2,54	2,53
80	2,22	2,22	2,22	2,22	2,21	2,21	2,21
90	1,96	1,96	1,96	1,96	1,95	1,95	1,95
100	0,994	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,74
110	0,989	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,57
120	0,984	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44
130	0,980	1,33	1,33	1,32	1,32	1,32	1,32
140	0,977	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
150	0,973	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
160	0,970	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
170	0,967	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
180	0,965	0,977	0,977	0,976	0,975	0,974	0,972
190	0,962	0,938	0,937	0,936	0,935	0,934	0,931
200	0,960	0,905	0,904	0,903	0,902	0,901	0,898
220	0,955	1,14	0,857	0,855	0,854	0,852	0,848
240	0,951	1,08	0,832	0,830	0,827	0,825	0,819
260	0,947	1,04	1,27	0,827	0,823	0,819	0,809
270	0,945	1,03	1,21	0,836	0,830	0,824	0,812
280	0,943	1,02	1,17	1,46	0,845	0,837	0,821
290	0,941	1,01	1,13	1,35	0,870	0,860	0,838
300	0,940	0,997	1,10	1,28	1,59	0,895	0,864

* жирной линией обозначена граница фазового перехода

Приложение 20 Коэффициент, учитывающий уширение ребер к их основанию μ



Приложение 21 Физические характеристики воздуха

t, °C	кинематическая вязкость, $\nu \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	теплопроводность, $\lambda \cdot 10^2 \text{ Вт}/(\text{м К})$	Pr
0	13,6	2,42	0,70
100	23,5	3,18	0,69
200	35,3	3,89	0,69
300	48,9	4,47	0,69
400	63,8	5,03	0,70
500	73,2	5,60	0,70
600	98,0	6,14	0,71
700	116,0	6,65	0,71
800	136,0	7,12	0,72
900	157,0	7,59	0,72
1000	179,0	8,03	0,72
1100	202,0	8,44	0,72
1200	226,0	8,85	0,73
1300	247,0	9,24	0,73
1400	277,0	9,63	0,73
1500	300,0	10,00	0,73
1600	331,0	10,36	0,74
1700	355,0	10,72	0,74
1800	390,0	11,08	0,74
1900	415,0	11,43	0,74
2000	445,0	11,83	0,74
2100	478,0	12,06	0,75
2200	511,0	12,41	0,75