

Министерство образования и науки РФ  
ФГБОУ ВПО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

А. А. Орлов

# ТЕПЛОТЕХНИКА

## ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ И КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Методические указания к выполнению контрольных заданий  
для направления подготовки 250400.62 «Технология лесозаготовительных  
и деревоперерабатывающих производств» 220700.62 «Автоматизация  
технологических процессов и производств»  
220400.62 «Управление в технических системах»

Квалификация выпускника – бакалавр.  
Форма обучения – очная, очная сокращенная,  
заочная, заочная сокращенная

Красноярск,

2013

УДК: 621.1.016

ТЕПЛОТЕХНИКА. Теплопередача. Теплоснабжение и котельные установки: методические указания к выполнению контрольных заданий для направления подготовки 250400.62 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» 220700.62 «Автоматизация технологических процессов и производств» 220400.62 «Управление в технических системах» очной, очной сокращенной, заочной, заочной сокращенной форм обучения – Красноярск: СибГТУ, 2013. – 44 с.

Составители: А.А. Орлов

Рецензент доцент Н.А Романова (научно-методический совет СибГТУ)

## Введение

Методические указания включают основные положения теории, контрольные задания и примеры решения задач по Модулям 2 и 3 дисциплины «Теплотехника».

Целью решения задач и контрольных заданий является практическое усвоение разделов курса «Теплотехника», а также формирование профессиональных компетенции (ПК) обучающегося, таких как **ПК-1**: способность использовать технические средства для измерения основных параметров технологического процесса, свойств сырья и изделий из древесины и древесных материалов; **ПК-4**: готовность обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов и изделий; выбирать технические средства и технологии с учетом экологических последствий их применения; **ПК-6**: способность анализировать технологический процесс как объект управления; **ПК-7**: способность определять стоимостную оценку основных производственных ресурсов; **ПК-9**: готовность систематизировать и обобщать информацию по использованию ресурсов предприятия и формированию ресурсов предприятия.

Студенты выполняют задания и контрольные работы в соответствии с учебным планом. Выбор данных своего варианта производится по последней и предпоследней цифрам номера зачетной книжки. Номера выполняемых контрольных заданий определяются кафедрой в соответствии с требованиями курса. Работы, выполненные не по своим данным, к рецензированию не принимаются.

К выполнению контрольных заданий следует приступать после изучения теоретического материала. Решение задач без изучения теории будет носить чисто механический характер и не приведет к желаемому результату.

При выполнении контрольных заданий необходимо:

- внимательно выписать исходные данные задачи;
- при решении использовать дополнительные указания и приложения;
- решение производить только в системе СИ;
- физические величины должны быть приведены со своими размерностями.

- оформить решенные задачи в тетради с обязательным указанием номеров специальности и зачетной книжки или на листах форматом А4 с учетом требований к оформлению текстовых документов (СТП 3.4.204-01). Пример оформления титульного листа приведен в Приложении Ж.

Результаты решения задач желательно выделить, либо если это предусмотрено условием свести их в таблицы, дать пояснения при помощи графиков. Необходимо учитывать, что достаточную точность расчетов обеспечивает наличие 4-х значащих цифр. Привести полные и ясные ответы на вопросы к задачам.

Задачи и контрольные задания защищаются на практических занятиях и являются допуском к итоговой аттестации.

## Модуль 2 Теплопередача

### 2.1 Теплопроводность

Теплопроводность – это процесс передачи теплоты в результате непосредственного контакта тел, имеющих различную температуру.

Теплопроводность в основном наблюдается в твердых телах.

Количество теплоты  $Q$ , переносимое через единицу площади поверхности  $F$  в единицу времени, называется поверхностной плотностью теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup> и определяется по выражению

$$q = \frac{Q}{F}. \quad (2.1)$$

Количество теплоты  $Q$ , проходящее через единицу длины поверхности  $l$  в единицу времени, называется линейной плотностью теплового потока  $q_l$ , Вт/м и определяется по формуле

$$q_l = \frac{Q}{l}. \quad (2.2)$$

Распределение температур в разных точках тела определяется с помощью температурного поля. Плоскости, проведенные через точки с одинаковыми температурами на поверхности тела, образуют изотермы - линии постоянных температур.



$t_1, t_2, t_3, t_4$  – температуры различных изотерм.

Поверхность, во всех точках которой температура одинакова, называется изометрической.

В установившемся (стационарном) тепловом потоке распределение температуры в теле зависит только от координат:  $t = f(x, y, z)$ , то есть положение изотерм не меняется с течением времени.

Вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры и численно равный производной от температуры по этому направлению, называется градиентом температуры:  $grad\ t$ .

Если изотермические поверхности представляют собой плоскости, перпендикулярные направлению  $x$  движения теплового потока, то  $grad\ t = \frac{dt}{dx}$ ,

а если концентрические окружности радиусом  $r_1, r_2, \dots, r_n$  то  $grad\ t = \frac{dt}{dr}$ .

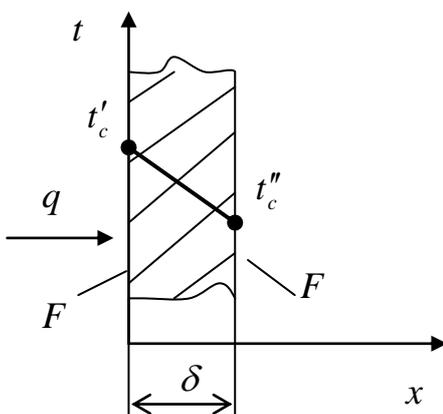
Основной закон теплопроводности (закон Фурье) гласит: вектор плоскости теплового потока пропорционален градиенту температуры:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot grad\ t,$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности (характеризует способность вещества проводить теплоту и находится для каждого тела опытным путем), Вт/м·К.

Знак “-“ указывает, что вектор направлен в сторону, противоположную  $grad\ t$ , то есть в сторону наибольшего уменьшения температуры.

Рассмотрим процесс стационарной теплопроводности через однослойную плоскую стенку толщиной  $\delta$  (рисунок 2.1).



Пусть длина и ширина стенки бесконечно большие, поэтому передача теплоты через стенку производится только в направлении оси  $x$ .

На поверхностях стенки поддерживаются постоянные температуры  $t'_c$  и  $t''_c$ .

Рисунок 2.1 – Теплопроводность через однослойную плоскую стенку

Для рассматриваемого случая:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t = -\lambda \frac{dt}{dx}.$$

Интегрируем это выражение после разделения переменных:

$$\int_{t'_c}^{t''_c} dt = -\frac{q}{\lambda} \int_0^x dx.$$

Отсюда

$$(t''_c - t'_c) = -\frac{q\delta}{\lambda} \text{ или } q = \frac{\lambda}{\delta}(t''_c - t'_c); \quad (2.3)$$

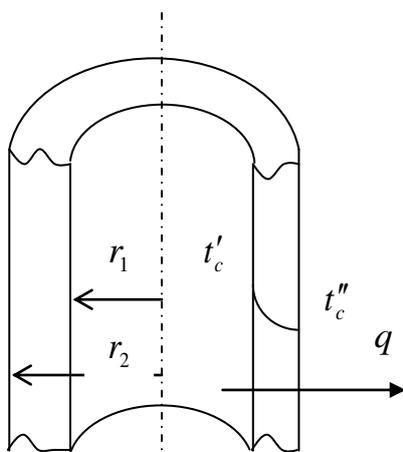
$$Q = qF = \frac{\lambda F}{\delta}(t''_c - t'_c) = \frac{t''_c - t'_c}{R_\lambda}, \quad (2.4)$$

где  $R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda F}$  – термическое сопротивление плоской стенки, К/Вт;

$F$  – площадь поверхности стенки, м<sup>2</sup>.

Из уравнения (2.3) следует, что температура в стенке изменяется по линейному закону.

Рассмотрим процесс стационарной теплопроводности через однослойную цилиндрическую стенку (рисунок 2.2) внутренним диаметром  $d_1$  (радиусом  $r_1$ ) и внешним –  $d_2$  (радиусом  $r_2$ ).



Для цилиндрической стенки имеем:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dr} \text{ или } Q = qF = -2\pi r l \lambda \frac{dt}{dr}, \quad (2.5)$$

где  $r$  – произвольный радиус в стенке, м;

$l$  – длина стенки, м;

$F$  – площадь поверхности стенки радиусом  $r$ , м<sup>2</sup>.

Рисунок 2.2 – Теплопроводность через однослойную цилиндрическую стенку

Интегрируем уравнение (2.5) после разделения переменных:

$$\int_{t'_c}^{t''_c} dt = -\frac{Q}{2\pi\lambda l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}.$$

Отсюда

$$Q = \frac{t'_c - t''_c}{\frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{t'_c - t''_c}{R_u}, \quad (2.6)$$

где  $R_u = \frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{d_2}{d_1}$  – термическое сопротивление

цилиндрической стенки, К/Вт.

## 2.2 Конвективный теплообмен

Процесс передачи теплоты в результате перемещения частиц неравномерно нагретых жидкостей или газов называется конвекцией. Конвекция наблюдается только в жидкостях и газах.

Процесс переноса теплоты конвекцией в жидкостях и газах всегда сопровождается теплопроводностью, так как при этом осуществляется непосредственный контакт частиц с различной температурой.

Одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью называется конвективным теплообменом. Он может быть свободным или вынужденным.

Свободная конвекция (естественная) – это когда движение жидкости или газа происходит за счет разности плотностей отдельных ее частей ввиду различия температур этих частей. Например, движения воздуха у нагревательных приборов, установленных под окнами.

Вынужденная конвекция – это когда движение жидкости или газа вызвано искусственным путем (вентилятором, насосом, компрессором и т.п.).

Процесс теплообмена между жидкостью и поверхностью твердого тела называется теплоотдачей.

Основной закон теплоотдачи (закон Ньютона-Рихмана) гласит: тепловой поток в процессе теплоотдачи пропорционален площади поверхности теплообмена  $F$  и разности температур поверхности  $t_c$  и жидкости  $t_{жс}$

$$Q = \alpha F (t_c - t_{жс}), \quad (2.7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К, характеризующий интенсивность процесса теплоотдачи.

Закономерности теплоотдачи исследуют с помощью безразмерных комплексов, имеющих конкретный физический смысл.

Основными из этих комплексов (или критериев) являются следующие:

$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$  – критерий Нуссельта – характеризует конвективный теплообмен между жидкостью и поверхностью твердого тела;

$Re = \frac{\omega d}{\gamma}$  – критерий Рейнольдса – показывает характер движения жидкости;

$Pr = \frac{\gamma}{a}$  – критерий Прандтля – характеризует теплофизические свойства вещества;

$Gr = \frac{g\beta\Delta t d^3}{\gamma^2}$  – критерий Грасгофа – характеризует интенсивность подъемной силы, вызывающей свободно-конвективное движение среды.

Условные обозначения:

$d$  – диаметр трубы, м (если исследуется теплоотдача не в трубе, а относительно другого тела, то в формулы подставляется  $l$  – определяющий размер теплообмена);

$\omega$  – скорость движения среды, м/с;

$\gamma$  – кинематическая вязкость среды, м<sup>2</sup>/с;

$a$  – температуропроводимость среды, м<sup>2</sup>/с;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения среды, К<sup>-1</sup> (для газов  $\beta = 1/T$ );

$\Delta t$  – температурный напор, К (разность между температурами теплообменивающихся сред).

При вынужденной конвекции:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr) \text{ или } Nu = f(Re, Gr).$$

Если  $Re < 2000$ , то режим течения жидкости в трубе – ламинарный (все частицы жидкости движутся по параллельным траекториям). При  $Re > 10000$  наблюдается турбулентный режим движения жидкости (частицы жидкости движутся с интенсивным перемешиванием). А если  $2000 \leq Re \leq 10000$ , то режим течения жидкости будет переходным. В случае свободной конвекции:  $Nu = f(Gr, Pr)$ .

В зависимости от характера режима течения и формы обтекаемого твердого тела существуют различные формулы для определения значения  $Nu$ , которые приведены в литературе [1,2,3]. После определения критерия Нуссельта находится коэффициент теплоотдачи ( $\alpha$ ) и с помощью выражения (2.7) подсчитывается количество передаваемой теплоты.

### 2.3 Теплопередача

Процесс теплообмена между теплообменивающимися средами через разделяющую их твердую стенку называется теплопередачей.

Рассмотрим стационарную теплопередачу через однослойную стенку (рисунок 2.3).

Тепловой поток передается от первой жидкости к стенке в результате теплоотдачи

$$Q = \alpha_1 F_1 (t_{ж1} - t'_c). \quad (2.8)$$

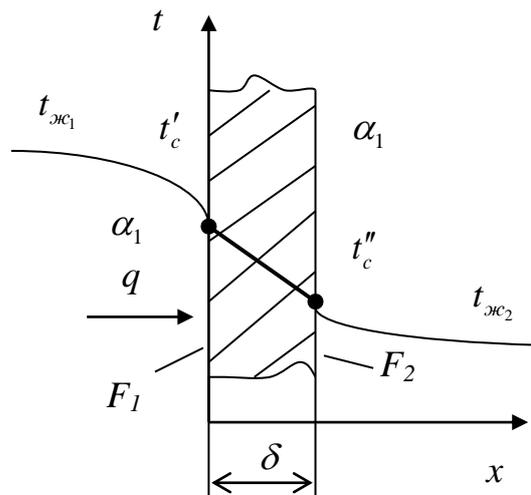


Рисунок 2.3 – Теплопередача через однослойную стенку

Этот же тепловой поток передается через стенку теплопроводностью

$$Q = \frac{t'_c - t''_c}{R_\lambda}, \quad (2.9)$$

а затем – от стенки с поверхностью  $F_2$  ко второй жидкости

$$Q = \alpha_2 F_2 (t''_c - t_{жс2}). \quad (2.10)$$

Выразим из уравнений (2.8-2.10) разности температур:

$$t_{жс1} - t'_c = \frac{Q}{\alpha_1 F_1}; \quad t'_c - t''_c = \frac{Q}{1/R_\lambda}; \quad t''_c - t_{жс2} = \frac{Q}{\alpha_2 F_2};$$

Сложим три эти формулы и найдем количество передаваемой теплоты:

$$Q = \frac{t_{жс1} - t_{жс2}}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + R_\lambda + \frac{1}{\alpha_2 F_2}} = \frac{t_{жс1} - t_{жс2}}{R_k}. \quad (2.11)$$

Соотношение (2.12) пригодно для расчета теплопередачи через любую стенку. В нем  $R_k = \frac{1}{\alpha_1 F_1} + R_\lambda + \frac{1}{\alpha_2 F_2}$  – термическое сопротивление теплопередачи,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

Для плоской стенки:  $F_1 = F_2 = F$ , следовательно:

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = k(t_{ж1} - t_{ж2});$$

$$Q = kF(t_{ж1} - t_{ж2}),$$

где  $k = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2}$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·К.

Для цилиндрической стенки:  $F_1 = \pi d_1 l$  и  $F_2 = \pi d_2 l$ . Поэтому

$$Q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1 l} + \frac{1}{2\pi \lambda l} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d_2 \alpha_2 l}} = \frac{(t_{ж1} - t_{ж2}) \pi l}{\frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2 \alpha_2}}.$$

Тогда линейную плотность теплового потока  $q_l$ , Вт/м можно найти по выражению

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2 \alpha_2}} = k_l \pi (t_{ж1} - t_{ж2}), \quad (2.12)$$

где  $k_l = \frac{1}{\frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2 \alpha_2}}$  – линейный коэффициент теплопередачи

(на 1 м трубы), Вт/м·К.

## 2.4 Теплообменные аппараты

Теплообменные аппараты (теплообменники) – это устройства, предназначенные для передачи теплоты от одного теплоносителя к другому.

По принципу действия они делятся на:

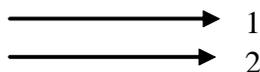
- а) рекуперативные – в которых теплота одного теплоносителя к другому передается через разделяющую их стенку;
- б) регенеративные – в которых одна и та же поверхность омывается то

горячим, то холодным теплоносителем (холодный – нагревается, а горячий – охлаждается);

в) смесительные – в которых процесс теплопередачи происходит путем непосредственного смешивания горячего и холодного теплоносителей.

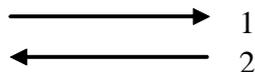
По направлению движения потоков теплообменники делятся на:

а) прямопоточные



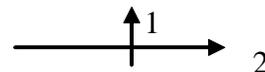
(теплоносители движутся параллельно в одном направлении)

б) противопоточные



(теплоносители движутся параллельно в противоположных направлениях)

в) перекресточные



(теплоносители движутся в перекрестном направлении)

Общими уравнениями, используемыми при расчете теплообменников, являются:

а) уравнения теплового баланса

$$Q = C'_1 V_{n1} (t'_1 - t''_1) = C'_2 V_{n2} (t'_2 - t''_2), \quad (2.13)$$

где  $C'_1, C'_2$  – средние по длине теплообменника объемные теплоемкости теплоносителей, Дж/(м<sup>3</sup>·К);

$V_{n1}, V_{n2}$  – объемы теплообменивающих сред при нормальных условиях, м<sup>3</sup>;

$t'_1, t'_2$  – температуры горячего и холодного теплоносителей на входе в аппарат, °С;

$t''_1, t''_2$  – температуры горячего и холодного теплоносителей на выходе в аппарат, °С;

б) уравнение теплопередачи

$$Q = kF\Delta\bar{t}, \quad (2.14)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F$  – общая поверхность теплообмена аппарата,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta\bar{t}$  – среднелогарифмический температурный напор,  $^{\circ}\text{C}$ .

Значение  $\Delta\bar{t}$  определяется следующим образом:

$$\Delta\bar{t} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (2.15)$$

где  $\Delta t_{\delta}$  – большая разность температур теплоносителей,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta t_{\text{м}}$  – меньшая разность температур потоков,  $^{\circ}\text{C}$ ;

Изменение температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при прямотоке и противотоке приведено на рисунке 2.4. Следует отметить, что при прямотоке всегда  $t_2'' < t_1''$ , а при противотоке может быть  $t_2'' > t_1''$ .

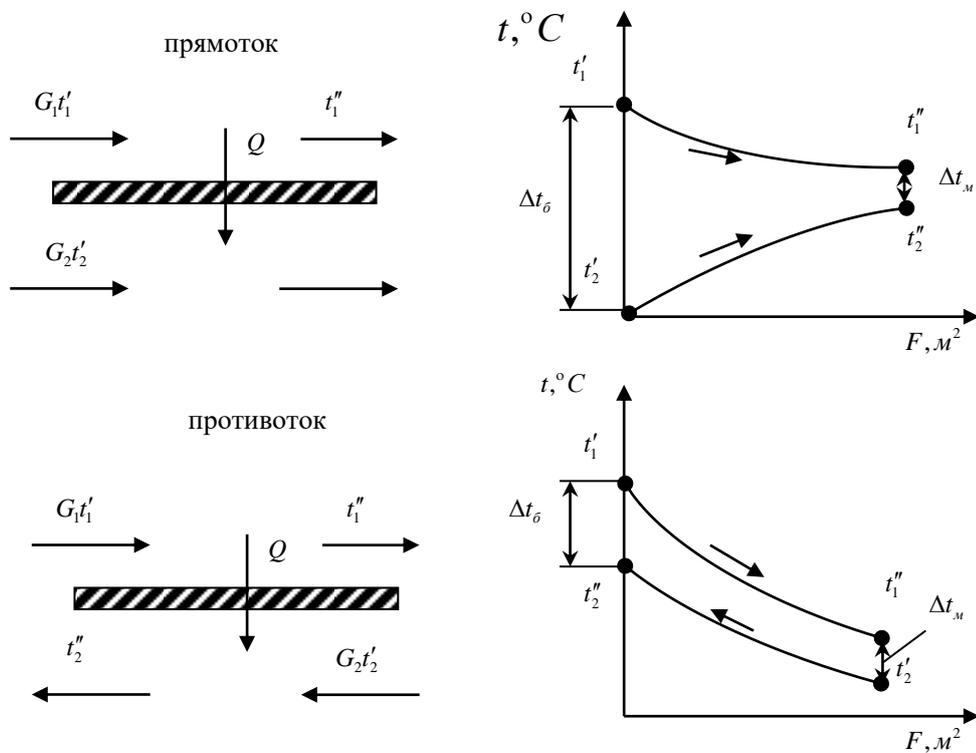


Рисунок 2.4 – Изменение разности температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена

## Примеры решения задач по модулю 2 «Теплопередача»

### Задача 6

Исходные данные:

$\lambda = 20 \text{ Вт/(м·К)}$  – для стенки трубы;  $\omega_1 = 4,2 \text{ м/с}$ ;  $t_{\text{вод}} = 160 \text{ °С}$ ;  $t_{\text{воз}} = 12 \text{ °С}$ ;

$P_{\text{воз}} = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $d_1 = 110 \text{ мм}$ ;  $d_2 = 130 \text{ мм}$ ;

Определить:  $\alpha, k_l, q_l$ .

Решение: по таблице 2.1 находим:

$$\gamma_{\text{вод}}(160 \text{ °С}) = 0,191 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$\lambda_{\text{вод}}(160 \text{ °С}) = 0,683 \text{ Вт/м·К}$$

$$\text{Pr}_{\text{жс}}(160 \text{ °С}) = 1,10.$$

Определяем режим движения воды (по числу Рейнольдса):

$$\text{Re} = \frac{\omega_1 d_1}{\gamma_{\text{вод}}} = \frac{4,2 \cdot 0,11}{0,191 \cdot 10^{-6}} = 2,416 \cdot 10^6.$$

Для турбулентного режима течения ( $\text{Re} > 10^4$ ) применяем критериальное уравнение (табл. 3-2 [3]):

$$\text{Nu}_{\text{вод}} = 0,021 \cdot \text{Re}_{\text{вод}}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{вод}}^{0,43} (\text{Pr}_{\text{вод}} / \text{Pr}_{\text{см}})^{0,25}.$$

Таблица 1 - Теплофизические свойства воды

$t_{\text{вод}}, \text{°С}$	$\lambda_{\text{вод}}, \text{Вт/м·К}$	$\gamma_{\text{вод}} \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$\text{Pr}_{\text{жс}}$
120	0,686	0,252	1,47
130	0,686	0,233	1,36
140	0,685	0,217	1,26
150	0,684	0,203	1,17
160	0,683	0,191	1,10
170	0,679	0,181	1,05
180	0,674	0,173	1,02
190	0,663	0,165	0,97
200	0,655	0,158	0,93
210	0,645	0,153	0,91
220	0,636	0,148	0,90

Считая  $t_{cm} \approx t_{год}$  и  $t_{cm}$  – температура стенки трубы, получим, что

$$Pr_{cm} \approx Pr_{год} \text{ и } (Pr_{год}/Pr_{cm})^{0,25} = 1.$$

Подсчитаем критерий Нуссельта:

$$Nu_{год} = 0,021 \cdot (2,416 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot (1,1)^{0,43} = 2796.$$

Определяем коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_{год} \cdot \lambda_{год}}{d_1} = \frac{2796 \cdot 0,683}{0,11} = 17360 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}.$$

Находим линейный коэффициент теплопередачи:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} = \frac{1}{\frac{1}{17360 \cdot 0,11} + \frac{1}{2 \cdot 20} \cdot \ln \frac{0,13}{0,11} + \frac{1}{10 \cdot 0,13}} = 1,292 \frac{Вт}{м \cdot К}.$$

Определяем линейную плотность теплового потока:

$$q_l = \pi k_l (t_{год} - t_{воз}) = 3,14 \cdot 1,292 \cdot (160 - 12) = 600,4 \frac{Вт}{м}.$$

### Задача 7

Исходные данные:

$$v_2 = 5 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}; k_1 = 26 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}; t_1' = 650 \text{ }^\circ\text{С}; t_1'' = 525 \text{ }^\circ\text{С}; t_2' = 18 \text{ }^\circ\text{С};$$

$$t_2'' = 500 \text{ }^\circ\text{С}; C'_{p1} = 1,5 \text{ кДж}/\text{м}^3 \cdot \text{К}.$$

Определить:  $F_{прям}$ ,  $F_{прот}$ ,  $V_1$ ;

Решение: По приложению А находим среднюю удельную теплоемкость воздуха при постоянном давлении:  $C_{p2} = 1,038 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  при средней температуре воздуха в теплообменнике  $t_{cp2}$ .

Определяем среднюю объемную теплоемкость воздуха:

$$t_{cp2} = 0,5 \cdot (t_2' + t_2'') = 259 \text{ }^\circ\text{С};$$

$$C'_{p2} = C_{p2} \rho_0 = 1,038 \cdot 1,293 = 1,342 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

где  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха при нормальных условиях.

( $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $P = 0,101 \text{ МПа}$ ).

Определяем тепловой поток:

$$Q = V_n C'_{p2} (t''_2 - t'_2) = \frac{5 \cdot 10^3}{3600} \cdot 1,342 \cdot (500 - 18) = 898,4 \text{ кВт.}$$

Вычисляем среднелогарифмические температурные напоры по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_\delta - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_\delta}{\Delta t_m}}.$$

В результате имеем:

а) прямоток

$$\Delta t_\delta = t'_1 - t'_2 = 650 - 18 = 632^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_m = t''_1 - t''_2 = 525 - 500 = 25^\circ\text{C};$$

$$\Delta \bar{t}_{\text{прям}} = \frac{632 - 25}{\ln \frac{632}{25}} = 187,9^\circ\text{C}.$$

б) противоток

$$\Delta t_\delta = t''_1 - t'_2 = 525 - 18 = 507^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_m = t'_1 - t''_2 = 650 - 500 = 150^\circ\text{C};$$

$$\Delta \bar{t}_{\text{прот}} = \frac{507 - 150}{\ln \frac{507}{150}} = 293,1^\circ\text{C}.$$

Поверхность нагрева при прямотоке:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{прям}}} = \frac{898,4 \cdot 10^3}{26 \cdot 187,9} = 183,9 \text{ м}^2;$$

при противотоке

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{прот}}} = \frac{898,4 \cdot 10^3}{26 \cdot 293,1} = 117,9 \text{ м}^2.$$

Объемный расход продуктов сгорания вычисляем следующим образом:

$$V_1 = \frac{Q}{C'_{p1}(t'_1 - t''_1)} = \frac{898,4}{1,5 \cdot (650 - 525)} = 4,791 \text{ м}^3/\text{с} = 17250 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Графики изменения температур теплоносителей для прямотока и противотока изобразить в соответствии с теоретическими материалами, изложенными в п. 2.4, и с учетом результатов решения задачи.

## Модуль 3 КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

### 3.1 Топливо

Топливом называется горючее вещество, используемое в качестве источника получения теплоты в энергетических, промышленных и отопительных установках.

По агрегатному состоянию топливо делится на твердое, жидкое и газообразное.

В зависимости от способа получения все виды топлива делятся на естественные (природные) и искусственные (продукты переработки природных топлив).

Таблица 2 - Классификация органических топлив

Топливо	Агрегатное состояние		
	Твердое	Жидкое	Газообразное
Природное	Дрова, торф, бурые и каменные угли, антрацит, горючие сланцы	Нефть	Природный газ
Искусственные	Древесный уголь, кокс и полукокс, угольные и торфяные брикеты	Мазут, бензин, керосин, соляровое масло, газойль, печное топливо	Нефтяной, коксовый, генераторный, доменный газ

Твердое и жидкое органическое топливо состоит из следующих элементов:  $C$  (углерод),  $O$  (кислород),  $H$  (водород),  $S_l$  (сера летучая),  $S_{орг}$  (сера, входящая в состав органических соединений),  $N$  (азот),  $W$  (влаги),  $A$  (минеральные осадки в виде золы).

При изучении свойств твердого и жидкого топлива различают его рабочий, горючий, сухой состав.

Рабочим составом (рабочей массой) топлива называют состав, в котором оно поступает в топку:

$$C^p + H^p + S_n^p + O^p + N^p + W^p + A^p = 100\% \quad - \quad \text{элементарный состав}$$

рабочей массы топлива.

Сухой состав топлива в отличие от рабочего не содержит влаги, а горючий состав не содержит влаги и золы.

Газообразное топливо представляет собой смесь горючих и негорючих газов. В общем виде состав газообразного топлива можно записать следующим образом:

$$\sum_{i=1}^m C_n H_{2n+2} + \sum_{i=1}^m C_n H_{2n} + H_2 + CO_2 + CO + H_2S + N_2 + O_2 = 100\% .$$

Природный газ характеризуется высоким содержанием углеводородов  $C_n H_{2n+2}$  (метан –  $CH_4$ , этан –  $C_2H_6$ , пропан –  $C_3H_8$ , бутан –  $C_4H_{10}$ ) и  $C_n H_{2n}$  (этилен –  $C_2H_4$ , пропилен –  $C_3H_6$ ).

В искусственных газах преобладают  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ .

Основной характеристикой топлива является теплота, выделяемая при его сгорании (теплотворная способность), она может быть высшей и низшей.

Высшей теплотой сгорания ( $Q_B^p$ ) называется количество теплоты, которое выделяется в результате полного сгорания топлива, (кДж/кг – для твердого и жидкого топлива; кДж/м<sup>3</sup> – для газообразного топлива).

Низшей теплотой сгорания ( $Q_H^P$ ) называется количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива, без учета теплоты, расходуемой на испарение влаги из топлива (кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>).

Для сравнения различных видов топлива по их тепловому эффекту и облегчения экономических расчетов введено понятие условного топлива.

За условное топливо принимается топливо, низшая теплота сгорания которого:  $Q_{y.m.} = 29300$  кДж/кг.

Перерасчет расхода натурального топлива ( $B$ ) в условное топливо ( $B_{y.m.}$ ) производится по формуле

$$B_{y.m.} = B \frac{Q_H^P}{Q_{y.m.}} = B \frac{Q_H^P}{29300}, \quad (3.1)$$

где  $Q_H^P$  – низшая теплота сгорания натурального (местного) топлива, кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>.

### 3.2 Горение топлива

При тепловом расчете котлоагрегатов необходимо определить:

а) теоретический и действительный расходы воздуха, необходимые для сгорания 1 кг твердого, жидкого или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива.

б) состав и объем продуктов сгорания (дымовых газов) и их энтальпию при требуемых коэффициентах избытка воздуха.

Все эти величины можно найти, зная элементарный состав топлива и материальный баланс реакций горения горючих составляющих топлива.

Объем теоретически необходимого воздуха  $V_T$ , м<sup>3</sup>/кг для сжигания 1 кг твердого или жидкого топлива определяется с помощью выражения

$$V_T = 0,0889C^P + 0,265H^P + 0,033(S_{\text{л}}^P - O^P). \quad (3.2)$$

Теоретическое количество воздуха  $V_T$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, необходимое для сжигания 1 м<sup>3</sup> сухого газообразного топлива вычисляется по формуле

$$V_T = 0,0476 \cdot [0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S + \sum_{i=1}^K (m + \frac{n}{4}) C_m H_n - O_2]. \quad (3.3)$$

При расчете по приведенным уравнениям компоненты топлива подставляются в %.

Процесс горения топлива осуществляется в топке котлоагрегата. В результате горения химическая энергия топлива преобразуется в тепловую энергию продуктов сгорания, которая затем передается кипящей жидкости в котле.

Поскольку равномерно перемешивать топливо и воздух, необходимый для поддержания процесса горения, трудно, то в топку приходится подавать больше воздуха, чем требуется теоретически.

Отношение  $\alpha_T = V_o^T / V_T$  ( $V_o^T$  – действительно поданное в топку количество воздуха, м<sup>3</sup>/кг или м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), называется коэффициентом избытка воздуха в топке ( $\alpha_T > 1$ ).

Очень часто для удаления продуктов сгорания из котлоагрегата их отсасывают тяговым устройством – дымососом. То есть продукты сгорания движутся в агрегате под разрежением. Через неплотности к ним подсасывается атмосферный воздух. При этом коэффициент избытка воздуха на выходе из котлоагрегата  $\alpha_{yx}$  будет равен

$$\alpha_{yx} = \alpha_T + \Delta\alpha, \quad (3.4)$$

где  $\Delta\alpha$  – величина присоса воздуха по газовому тракту.

Тогда действительное количество воздуха  $V_o$ , м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), проходящее через котлоагрегат, можно найти по формуле

$$V_o = \alpha_{yx} V_T. \quad (3.5)$$

Объем продуктов сгорания  $V_T$ , м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) включает объемы следующих компонентов (на 1 кг твердого или на 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива):

$$V_{\Gamma} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{\text{воз}}, \quad (3.6)$$

где  $V_{\text{воз}}$  – объем избыточного количества воздуха, проходящего через котлоагрегат, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>).

При проведении анализа обычно содержание CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> в дымовых газах определяется совместно и обозначается RO<sub>2</sub>:

$$RO_2 = CO_2 + SO_2.$$

Таким образом:

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{\text{воз}}. \quad (3.7)$$

Объемы компонентов могут быть найдены по формулам:

а) для твердого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{RO_2} = 0,0186 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S_n^P);$$

$$V_{H_2O} = \frac{9 \cdot H^P + W^P}{100 \cdot 0,805};$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_T + \frac{0,8 \cdot N_2}{100};$$

б) для газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot (CO_2 + CO + H_2S + \sum_{i=1}^K m C_m H_n);$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (H_2 + H_2S + \sum_{i=1}^K \frac{n}{2} C_m H_n) + 0,0161 \cdot V_{\text{д}};$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_T + \frac{0,8 \cdot N^P}{100}.$$

Компоненты топлива подставляются во все формулы в %.

Действительный объем дымовых газов включает помимо теоретических объемов компонентов еще и объем избыточного количества воздуха, который можно найти по формуле

$$V_{\text{воз}} = (\alpha_{yx} - 1) \cdot V_T. \quad (3.8)$$

Энтальпию уходящих газов  $h_{yx}$ , кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>) можно определить как сумму энтальпий их компонентов по выражению

$$h_{yx} = \left( \sum_{i=1}^4 V_i \cdot C'_{pi} \right) \cdot t_{yx} = (V_{RO_2} C'_{pRO_2} + V_{H_2O} C'_{pH_2O} + V_{N_2} C'_{pN_2} + V_{воз} C'_{pвоз}) \cdot t_{yx}, \quad (3.9)$$

где  $t_{yx}$  – температура уходящих дымовых газов, °С.

Важнейшей характеристикой интенсивности процесса горения в топочном устройстве является тепловое напряжение объема топки –  $q_V$ , кВт/м<sup>3</sup>, вычисляемое по формуле

$$q_V = \frac{Q}{V_{мон}} = \frac{B \cdot Q_H^P}{V_{мон}}, \quad (3.10)$$

где  $Q$  – количество получаемой теплоты, кВт;

$V_{мон}$  – объем топочного пространства, м<sup>3</sup>;

$B$  – расход топлива, кг/с (м<sup>3</sup>/с).

Значение  $q_V$  зависит от сорта топлива и способа сжигания.

### 3.3 Тепловой баланс котельных агрегатов

Тепловой баланс котельного агрегата при сжигании твердого топлива можно представить в следующем виде:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 100\%, \quad (3.11)$$

где  $q_1$  – удельное количество теплоты, полезно использованное в котельном агрегате, в % от  $Q_H^P$ ;

$q_2$  – удельная потеря теплоты с уходящими тепловыми газами, в % от  $Q_H^P$ ;

$q_3$  – удельная потеря теплоты от химической неполноты сгорания топлива, в % от  $Q_H^P$ ;

где  $q_4$  – удельная потеря теплоты от механической неполноты сгорания, в % от  $Q_H^P$ ;

$q_5$  – удельная потеря теплоты в результате наружного охлаждения агрегата водой, в % от  $Q_H^P$ .

При сжигании жидкого или газообразного топлива  $q_4 = 0$ .

Таким образом, уравнение (3.11) представляет собой процентное распределение располагаемой теплоты на 1 кг или 1 м<sup>3</sup> топлива по расходным статьям теплового баланса.

Отношение полезно использованной в котельном агрегате теплоты к располагаемой теплоте топлива называется КПД котлоагрегата ( $\eta$ ) и находится по формуле (в долях единицы)

$$\eta_{\text{кот}} = \frac{q_1}{100} = \frac{100 - \sum_{i=2}^5 q_i}{100}. \quad (3.12)$$

Величина  $q_2$  определяется по формуле

$$q_2 = \frac{h_{yx} - h_{\text{воз}}}{Q_H^P} \cdot (100 - q_4), \quad (3.13)$$

где  $h_{\text{воз}} = V_d \cdot C'_{\text{рво}} \cdot t_{\text{воз}}$ , кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>) – энтальпия воздуха, поступающая в котлоагрегат при температуре  $t_{\text{воз}}$ .

Остальные слагаемые в выражении (3.11) принимаются в зависимости от вида топлива, типа топочного устройства и теплопроизводительности котлоагрегата.

Пользуясь понятием КПД, уравнение теплового баланса котельного агрегата при производстве в нем пара можно записать в виде

$$B \cdot Q_H^P \cdot \eta_{\text{кот}} = D \cdot Q_{KA}, \quad (3.14)$$

где  $D$  – паропроизводительность котлоагрегата, кг/с;

$Q_{КА}$  – количество теплоты, полученное в котлоагрегате водой при превращении ее в пар, вырабатываемый в котле, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>).

При производстве перегретого пара величина  $Q_{КА}$  находится по формуле

$$Q_{КА} = (h_{ПП} - h_{ПВ}) + \frac{P_e}{100} (h' - h_{ПВ}), \quad (3.15)$$

где  $h_{ПП}$  – удельная энтальпия перегретого пара (определяется по известному давлению пара в котле и температуре перегрева по таблице перегретого пара), кДж/кг;

$h_{ПВ}, h'$  – соответственно удельная энтальпия питательной воды (определяется в зависимости от температуры питательной воды по таблице насыщенного водяного пара) и удельная энтальпия котловой воды (принимается равной энтальпии воды при давлении пара в котле по таблице насыщенного пара), кДж/кг;

$P_e$  – количество воды, удаляемое из котлоагрегата с целью сохранения допустимого содержания солей в котловой воде (так называемая «непрерывная продувка котла»), % – обычно принимается 2-5% от  $D$ .

Для котельного агрегата, в котором производится не перегретый, а насыщенный пар, энтальпия  $h_{ПП}$  в уравнении (3.15) заменяется удельной энтальпией насыщенного пара –  $h''$ .

Из соотношений (3.14) и (3.15) можно выразить расход натурального топлива  $B$ , кг/с (м<sup>3</sup>/с)

$$B = \frac{D Q_{КА}}{Q_H^P \eta_{кот}} = \frac{D \cdot [(h_{ПП} - h_{ПВ}) + \frac{P_e \%}{100} (h' - h_{ПВ})]}{Q_H^P \eta_{кот}}. \quad (3.16)$$

Количество вырабатываемого пара, приходящееся на единицу расхода топлива, называется испарительностью топлива и находится по выражениям для:

натурального топлива

$$И = \frac{Д}{В}; \frac{\text{кг\_пара}}{\text{кг\_топл}} \left( \frac{\text{кг\_пара}}{\text{м}^3\_топл} \right);$$

условного топлива

$$И_{ум} = \frac{Д}{В_{ум}}; \frac{\text{кг.пара}}{\text{кг.усл.топл}} .$$

## Примеры решения задач по Модулю 3 “Котельные установки”

### Задача 8

Исходные данные:

$$Д = 90 \text{ т/ч};$$

$$\Delta\alpha = 0,22;$$

$$t_{yx} = 140 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Определить:

- 1) состав топлива
- 2)  $Q_H^P$
- 3) способ сжигания
- 4) тип топки
- 5)  $\alpha_T, \alpha_{yx}$
- 6)  $V_T, V_d, V_{пр.сгор.}$
- 7)  $h_{yx}$

Топливо принять в двух вариантах:

- а) твердое;
- б) газообразное (расчет производится только для своего вида топлива);
- а) газ из газопровода «Даваша-Киев»;
- б) Челябинский уголь БЗ (бурый);

Способ сжигания топлива и тип топки:

- а) Камерная топка (смесительная горелка);

б) пылеугольная топка.

Решение: Находим коэффициент избытка воздуха по приложениям А - Е

В ТОПКЕ

а)  $\alpha_T = 1,1$ ;

б)  $\alpha_T = 1,2$ ;

за КОТЛОМ

а)  $\alpha_{yx} = \alpha_T + \Delta\alpha = 1,1 + 0,22 = 1,32$ ;

б)  $\alpha_{yx} = \alpha_T + \Delta\alpha = 1,2 + 0,22 = 1,42$ .

Определяем состав и низшую теплоту сгорания топлива по приложению В:

а)  $CH_4 = 98,9 \%$

$C_2H_6 = 0,3 \%$

$C_3H_8 = 0,1 \%$

$C_4H_{10} = 0,1 \%$

$N_2 = 0,4 \%$

$CO_2 = 0,2 \%$

$Q_H^P = 35,9 \text{ МДж/м}^3$

б)  $W^P = 18,0 \%$

$A^P = 29,5 \%$

$S_{II}^P = 1,0 \%$

$C^P = 37,3 \%$

$H^P = 2,8 \%$

$N^P = 0,9 \%$

$O^P = 10,5 \%$

$Q_H^P = 13,9 \text{ МДж/кг}$ .

Подсчитываем теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания топлива:

а)

$$V_T = 0,0478 \cdot [0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S + \sum_{i=1}^K (m + \frac{n}{4}) C_m H_n - O_2] =$$
$$= 0,0478 \cdot [1 + \frac{4}{4} \cdot 98,9 + (2 + \frac{6}{4}) \cdot 0,3 + (3 + \frac{8}{4}) \cdot 0,1 + (4 + \frac{10}{4}) \cdot 0,1] = 9,56 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

б)

$$V_T = 0,0889C^P + 0,265H^P + 0,033(S_{II}^P - O^P) =$$
$$= 0,0889 \cdot 37,3 + 0,265 \cdot 2,8 + 0,033 \cdot (1,0 - 10,5) = 3,744 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

и действительное количество воздуха с учетом присоса воздуха по газовому тракту:

$$а) V_{\delta} = V_T \cdot \alpha_{yx} = 9,56 \cdot 1,32 = 12,619 \frac{M^3}{M^3};$$

$$б) V_{\delta} = V_T \cdot \alpha_{yx} = 3,744 \cdot 1,42 = 5,317 \frac{M^3}{кг}$$

Находим объемы компонентов, содержащихся в дымовых газах:

объем азота

$$а) V_{N_2} = 0,79V_T + \frac{0,8N_2}{100} = 0,79 \cdot 9,56 + \frac{0,8 \cdot 0,4}{100} = 7,555 \frac{M^3}{M^3};$$

$$б) V_{N_2} = 0,79V_T + \frac{0,8N_2}{100} = 0,79 \cdot 3,744 + \frac{0,8 \cdot 0,9}{100} = 2,965 \frac{M^3}{кг}$$

объемы водяных паров

а)

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (H_2 + H_2S + \sum_{i=1}^K \frac{n}{2} C_m H_n) + 0,0161 \cdot V_{\delta} =$$

$$= 0,01 \cdot (\frac{4}{2} \cdot 98,9 + \frac{6}{2} \cdot 0,3 + \frac{8}{2} \cdot 0,1 + \frac{10}{2} \cdot 0,1) + 0,0161 \cdot 12,619 = 2,199 \frac{M^3}{M^3}$$

$$б) V_{H_2O} = \frac{9H^P + W^P}{100 \cdot 0,805} = \frac{9 \cdot 2,8 + 18,0}{80,5} = 0,537 \frac{M^3}{кг}$$

объем RO<sub>2</sub> (сумма объемов CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub>)

а)

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot (CO_2 + CO + H_2S + \sum_{i=1}^K m C_m H_n) =$$

$$= 0,01 \cdot (0,2 + 1 \cdot 98,9 + 2 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1) = 1,004 \frac{M^3}{M^3}$$

б)

$$V_{RO_2} = 0,0186 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S^P) = 0,0186 \cdot (37,3 + 0,375 \cdot 1,0) = 0,701 \frac{M^3}{кг}$$

Определяем избыточное количество воздуха:

$$а) V_{\delta_{03}} = (\alpha_{yx} - 1) \cdot V_T = (1,32 - 1) \cdot 9,56 = 3,059 \frac{M^3}{M^3};$$

$$\text{б) } V_{\text{воз}} = (\alpha_{yx} - 1) \cdot V_T = (1,42 - 1) \cdot 3,744 = 1,572 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Находим объемные изобарные теплоемкости продуктов сгорания при  $t_{yx} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$  по формуле

$$C'_p = \frac{C_{mp} \cdot \rho_0}{\mu} = \frac{C_{mp} \cdot \mu}{\mu \cdot V_\mu} = \frac{C_{mp}}{V_\mu},$$

где  $V_\mu = 22,4 \text{ м}^3/\text{моль}$  – объем моля при нормальных условиях.

По таблице А.2 [3] и приведенной выше формулы определяем, что при  $t_{yx} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$

$$C'_{pCO_2} = 1,736 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}; \quad C'_{pN_2} = 1,303 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$C'_{pH_2O} = 1,514 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}; \quad C'_{p\text{вво}} = 1,304 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

Вычисляем энтальпию уходящих дымовых газов:

а)

$$h_{yx} = \left( \sum_{i=1}^4 V_i \cdot C'_{pi} \right) \cdot t_{yx} = (V_{RO_2} C'_{pRO_2} + V_{H_2O} C'_{pH_2O} + V_{N_2} C'_{pN_2} + V_{\text{воз}} C'_{p\text{вво}}) \cdot t_{yx} =$$

$$= (1,004 \cdot 1,736 + 2,199 \cdot 1,514 + 7,555 \cdot 1,303 + 3,059 \cdot 1,304) \cdot 140 = 2647 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3};$$

б)

$$h_{yx} = \left( \sum_{i=1}^4 V_i \cdot C'_{pi} \right) \cdot t_{yx} = (V_{RO_2} C'_{pRO_2} + V_{H_2O} C'_{pH_2O} + V_{N_2} C'_{pN_2} + V_{\text{воз}} C'_{p\text{вво}}) \cdot t_{yx} =$$

$$= (0,701 \cdot 1,736 + 0,537 \cdot 1,514 + 2,965 \cdot 1,303 + 1,572 \cdot 1,304) \cdot 140 = 1112 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Ответ на вопрос дать из анализа решения задачи.

### Задача 9

Исходные данные:

$$p_B = 0 \text{ } \%;$$

$$p_{III} = 10 \text{ МПа};$$

$$t_{III} = 360 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{ПВ} = 100 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{воз}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Определить:

- 1) тепловой баланс;
- 2) КПД;
- 3) В, И.

Решение: Исходя из принятого типа топки (для варианта “а” предыдущей задачи) по таблицам приложений А – Ж находим:

$$q_3 = 0,5 \text{ } \%; \quad q_4 = 0 \text{ } \%; \quad q_5 = 0,7 \text{ } \%.$$

Потери теплоты в котлоагрегате с охлаждающей водой

$D$ , т/ч	$q_5$ , %	$D$ , т/ч	$q_5$ , %	$D$ , т/ч	$q_5$ , %
6,5	2,20	25	1,20	75	0,75
10	1,80	35	1,10	90	0,70
16	1,45	50	0,90	100	0,65

Находим потерю теплоты с уходящими дымовыми газами по формуле (3.13)

$$q_2 = \frac{h_{yx} - h_{\text{воз}}}{Q_n^P} \cdot (100 - q_4),$$

где  $h_{yx} = 2647 \text{ кДж/м}^3$  (см. предыдущую задачу);

$h_{\text{воз}}$  – энтальпия воздуха,  $\text{кДж/м}^3$  поступающего в котлоагрегат при  $t_{\text{воз}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Значение  $h_{\text{воз}}$  определяется по формуле

$$h_{\text{воз}} = V_{\text{д}} \cdot C'_{\text{рвоз}} \cdot t_{\text{воз}} = 12,619 \cdot 1,30 \cdot 30 = 492,1 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3},$$

где  $C'_{\text{рвоз}} = 1,300 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{К)}$  – объемная изобарная теплоемкость воздуха при  $t_{\text{воз}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  (вычисляется также, как и в предыдущей задаче).

Подставляя найденные и известные величины в уравнение (3.13), получим

$$q_2 = \frac{2647 - 492,1}{35,9 \cdot 10^3} \cdot (100 - 0) = 6\% .$$

Вычисляем КПД котлоагрегата по выражению

$$\eta_{\text{кот}} = q_1 = 100 - \sum_{i=2}^5 q_i = 100 - 6 - 0,5 - 0 - 0,7 = 92,8\% .$$

Определяем удельные энтальпии перегретого пара, питательной и котловой воды:

$h_{\text{III}} = 2964$  кДж/кг (по таблице перегретого пара [3] при  $p_{\text{III}} = 10$  МПа и  $t_{\text{III}} = 360$  °С);

$h_{\text{IIВ}} = 419$  кДж/кг (по таблице А.4 [1] при  $t_{\text{IIВ}} = 100$  °С);

$h' = 1408$  кДж/кг (по таблице перегретого пара [3] при  $p_{\text{III}} = 10$  МПа).

Вычисляем расход натурального топлива:

$$B = \frac{D \cdot [(i_{\text{III}} - i_{\text{IIВ}}) + (i' - i_{\text{IIВ}}) \frac{P_g \%}{100}]}{Q_H^P \eta_{\text{кот}}} =$$

$$= \frac{90 \cdot 10^3 \cdot [(2964 - 419) + (1408 - 419) \cdot \frac{0}{100}]}{35,9 \cdot 10^3 \cdot 0,928} = 6875 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

и расход условного топлива:

$$B_{\text{у.м.}} = B \frac{Q_H^P}{29,3} = 6875 \cdot \frac{35,9}{29,3} = 8424 \frac{\text{кг.усл.топл}}{\text{ч}} .$$

Находим испарительность натурального и условного топлива:

$$I = \frac{D}{B} = \frac{90 \cdot 10^3}{6875} = 13,09 \frac{\text{кг}_- \text{пара}}{\text{м}^3_- \text{газа}} ;$$

$$I_{\text{ум}} = \frac{D}{B_{\text{ум}}} = \frac{90 \cdot 10^3}{8424} = 10,68 \frac{\text{кг}_- \text{пара}}{\text{кг.усл.топл}} .$$

Определяем объем топочного пространства:

$$V_{\text{мон}} = \frac{B Q_H^P}{q_V} = \frac{6875 \cdot 35,9 \cdot 10^3}{3600 \cdot 350} = 195,9 \text{ м}^3 ,$$

где  $q_V = 350$  кВт/м<sup>3</sup> – тепловое напряжение объема топки (приложение Е).

Ответ на вопрос:

при  $p_B = 3\%$  расход натурального топлива будет:

$$B = \frac{D \cdot [(i_{III} - i_{IV}) + (i' - i_{IV}) \frac{P_6}{100}]}{Q_H^P \eta_{ком}} =$$
$$= \frac{90 \cdot 10^3 \cdot [(2964 - 419) + (1408 - 419) \cdot \frac{3}{100}]}{35,9 \cdot 10^3 \cdot 0,928} = 6907 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

а расход условного топлива:

$$B_{y.m.} = B \frac{Q_H^P}{29,3} = 6907 \cdot \frac{35,9}{29,3} = 8463 \frac{\text{кг. усл. топл}}{\text{ч}},$$

то есть расход топлива увеличивается.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как передается теплота в процессе теплопроводности?
2. Сформулируйте основной закон теплопроводности?
3. Каков закон распределения температуры по толщине плоской и цилиндрической стенок?
4. При каком условии расчет цилиндрической стенки можно заменить расчетом плоской стенки?
5. Всегда ли с увеличением толщины изоляции цилиндрической трубы тепловой поток через нее уменьшается?
6. Сформулируйте основной закон теплоотдачи конвекцией?
7. Какой критерий характеризует вынужденную конвекцию?
8. Какой критерий характеризует свободную конвекцию?
9. Что характеризует критерий Нуссельта?
10. Что такое определяющая температура и определяющий размер?
11. Чем отличается теплопередача от теплоотдачи?
12. Какие виды теплообменных аппаратов вы знаете?
13. Где применяют рекуперативные теплообменники?
14. На основе, каких исходных уравнений построено определение поверхности рекуперативных теплообменников?
15. Каков элементарный состав твердого и жидкого топлива?
16. В чем разница между высшей и низшей теплотой сгорания?
17. Что такое условное топливо?
18. Что такое коэффициент избытка воздуха?
19. Что определяется с помощью газового анализа продуктов сгорания?
20. По каким признакам классифицируются поршневые ДВС?
21. Опишите рабочие процессы карбюраторных и дизельных двигателей?
22. Что такое среднее индикаторное давление?
23. Как определяется мощность двигателя по его размерам, среднему индикаторному давлению и числу оборотов?
24. Что такое индикаторный, механический и эффективный КПД?
25. Напишите и объясните тепловой баланс ДВС.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

Задача 6. По горизонтально расположенной трубе ( $\lambda = 20$  Вт/мК) со скоростью  $\omega$  течет вода, имеющая температуру  $t_g$ . Снаружи труба охлаждается окружающим воздухом, температура которого  $t_{воз}$ , давление 0,1 МПа. Определить коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  соответственно от воды к стенке трубы и от стенки трубы к воздуху; коэффициент теплоотдачи и тепловой поток  $q_\lambda$ , отнесенный к 1 м длины трубы, если внутренний диаметр трубы равен  $d_1$ , а внешний –  $d_2$ . Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 3.

*Указание.* Для определения  $\alpha_2$  принять в первом приближении температуру наружной поверхности трубы  $t_2$ , равной температуре воды.

Таблица 3 – Исходные данные к задаче 6

Последняя цифра шифра	$t_g$ , °С	$10 \cdot \omega$ , м/с	Последняя цифра шифра	$t_{воз}$ , °С	$d_1$	$d_2$
					мм	
0	120	2,5	0	18	190	210
1	130	3,6	1	16	180	200
2	140	2,7	2	14	170	190
3	150	3,8	3	12	160	180
4	160	1,9	4	10	150	170
5	170	2,1	5	8	140	160
6	180	2,3	6	6	130	150
7	200	4,2	7	4	120	140
8	210	4,3	8	2	110	130
9	220	4,4	9	0	100	120

Ответить на вопросы. Какой режим течения внутри трубы в вашем варианте задачи? Какой режим движения окружающего трубу воздуха? Почему можно при расчете принять равенство температур  $t_B \cong t_2$ ?

Указание. При определении коэффициента теплоотдачи использовать приложение А.

Задача 7. Определить поверхность нагрева рекуперативного газовоздушного теплообменника при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей, если объемный расход нагреваемого воздуха при нормальных условиях  $V_H$ , если средний коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к воздуху  $k$ , начальные и конечные температуры продуктов сгорания и воздуха соответственно  $t'_1, t''_1, t'_2$  и  $t''_2$ . Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 4.

Изобразить графики изменения температур теплоносителей для обоих случаев.

Таблица 4 – Исходные данные к задаче 7

Последняя цифра шифра	$10^{-3} \cdot V_H$ , м <sup>3</sup> /ч	$k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Последняя цифра шифра	$t'_1$ , °С	$t''_1$ , °С	$t'_2$ , °С	$t''_2$ , °С
0	1	18	0	600	400	20	300
1	2	19	1	625	425	15	325
2	3	20	2	650	450	25	350
3	4	21	3	675	475	30	375
4	5	22	4	700	500	10	400
5	6	23	5	725	525	12	425
6	7	24	6	750	550	18	450
7	8	25	7	775	575	28	475
8	9	26	8	800	600	32	500
9	10	27	9	575	375	8	275

Задача 8. Задано топливо и паропроизводитель котельного агрегата  $D$ . Определить состав рабочей массы топлива и его низшую теплоту сгорания, способ сжигания топлива, тип топки, значение коэффициента избытка топлива в топке  $\alpha_T$  и на выходе из котлоагрегата  $\alpha_{yx}$  по величине присоса воздуха по газовому тракту ( $\Delta\alpha$ ). Найти теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг (1 м<sup>3</sup>) топлива и объемы продуктов сгорания при  $\alpha_{yx}$ , а также энтальпию уходящих газов при заданной

температуре уходящих газов  $t_{yx}$  и  $\alpha_{yx}$ . Исходные данные, необходимые для решения задачи, принять из таблице 5.

Таблица 5 - Исходные данные к задаче 8

Последняя цифра шифра	Вид топлива	Последняя цифра шифра	$D$ , т/ч	$\Delta\alpha$	$t_{yx}$ , °С
0	Челябинский уголь Б3 (бурый)	0	160	0,15	130
1	Райчихинский уголь Б2 (бурый)	1	120	0,16	130
2	Нижне-Аргалинский уголь Д (длиннопламенный)	2	90	0,18	140
3	Донецкий уголь Д (длиннопламенный)	3	75	0,20	140
4	Кузнецкий уголь Г (газовый)	4	50	0,22	150
5	Ткибульский уголь Г (газовый)	5	35	0,24	160
6	Мазут сернистый	6	25	0,26	170
7	Газ из газопровода "Саратов-Москва"	7	16	0,30	170
8	Газ из газопровода "Шебелинка-Москва"	8	10	0,32	180
9	Газ из газопровода "Газли-Ташкент"	9	6,5	0,35	180

*Указание.* Элементарный состав и низшая теплота сгорания топлива, а также рекомендации по выбору типа топки и коэффициента избытка воздуха в топке  $\alpha_T$  приведены в приложениях А - Е.

Ответить на вопрос. Как зависит энтальпия уходящих газов от коэффициента воздуха  $\alpha_{yx}$  и температуры  $t_{yx}$ ?

Задача 9. Для условий предыдущей задачи определить потерю теплоты с уходящими газами  $q_2$ , составить тепловой баланс котельного агрегата и определить его КПД. Определить часовой расход натурального и условного топлив, испарительность натурального топлива (непрерывной продувкой пренебречь). Давление пара в котле  $P_{III}$ , температуру перегретого пара  $t_{III}$  и питательной воды  $t_{IV}$  выбрать из таблице 6.

Таблица 6 - Исходные данные к задаче 9

Предпоследняя цифра шифра	$P_{III}$ , МПа	$t_{III}$	$t_{IV}$	Предпоследняя цифра шифра	$P_{III}$ , МПа	$t_{III}$	$t_{IV}$
		°C				°C	
0	14	545	225	5	4,0	440	150
1	10	540	215	6	4,0	370	145
2	10	540	220	7	4,0	360	145
3	4	440	215	8	1,4	240	100
4	4	400	145	9	1,4	225	100

Указание. Потерю теплоты с уходящими газами  $q_2$ , % определить по формуле (3.13) приняв энтальпию воздуха поступающего в котлоагрегат ( $h_{воз}$ ) при температуре 30 °C.

Потери от химической и механической неполноты сгорания  $q_3$  и  $q_4$  принять согласно приложению Д в соответствии с видом топлива и типом топки. Потерю теплоты на наружное охлаждение принять согласно приложению Е в соответствии с паропроизводительностью котлоагрегата.

Ответить на вопрос. Как изменяется часовой расход натурального и условного топлив, если в расчетах учесть непрерывную продувку, приняв ее  $p = 3\%$ ?

Задача 10. Определить диаметр цилиндра  $D$  и ход поршня  $S$  четырехтактного ДВС по известным значениям эффективной мощности  $N_e$ , среднего индикаторного давления  $p_i$ , механического КПД  $\eta_M$ , числа оборотов двигателя  $n$  и отношения  $S/D$ . Рассчитать часовой и эффективный удельный расходы топлива, если индикаторный КПД двигателя  $\eta_i$ , а низшая теплота сгорания  $Q_H^P = 43$  МДж/кг,  $z$  – число цилиндров двигателя. Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 7.

Кроме того, приведите характерные значения эффективных КПД для карбюраторных и дизельных двигателей и объясните, почему КПД дизеля выше, чем карбюраторного двигателя.

Таблица 7 - Исходные данные к задаче 10

Последняя цифра шифра	$N_e$ , кВт	$n$ , об/мин	$p_i$ , кПа	$z$	Последняя цифра шифра	$\eta_i$	$\eta_M$	$S/D$
0	100	2100	600	4	0	0,38	0,81	0,95
1	90	2300	650	6	1	0,42	0,82	0,98
2	80	2500	620	8	2	0,29	0,79	1,05
3	270	2700	740	12	3	0,33	0,80	1,12
4	60	2800	860	4	4	0,40	0,83	1,07
5	50	3000	880	6	5	0,31	0,78	1,15
6	140	2000	800	8	6	0,44	0,81	0,92
7	160	2200	720	12	7	0,43	0,82	1,02
8	75	2400	680	4	8	0,35	0,85	1,08
9	85	2500	630	6	9	0,30	0,84	1,16

### Библиографический список

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / В. В. Нащокин. – М., 2008. – 469 с.
2. Семенов, Ю.П. Теплоснабжение предприятий лесного комплекса: учеб. пособие [Текст] / Ю. П. Семенов, А.Б. Левин, В.Г. Малинин. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2010. – 186 с.
3. ТЕПЛОТЕХНИКА. Техническая термодинамика: методические указания к выполнению контрольных заданий для студентов специальностей 250401, 250403, 220301, 150405 заочной формы обучения – Красноярск: СибГТУ, 2008. – 40 с.
4. Ривкин, С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара [Текст]/ С.Л. Ривкин, А.А. Александров. - М.: Энергия, 1980. - 423с.
5. Теплотехника [Текст]/ под. ред. Л.В. Луканина. – М.: Высш. шк., 2005. – 453 с.
6. Дмитроц, В.А. Теплотехнический справочник инженера лесного и деревообрабатывающего предприятия [Текст]/ В.А. Дмитроц, А.Б. Левин, Ю.П. Семенов; под. ред. А.Б. Левина. 2 – изд., испр. – М: МГУЛ, 2002. – 333 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
(справочное)  
Теплофизические свойства веществ

Таблица А.1 - Физические параметры сухого воздуха при P=101,3 кПа

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^{-3}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\nu \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	2,44	13,28	0,707
100	3,21	23,13	0,688
200	3,94	34,85	0,680
300	4,60	48,33	0,674
400	5,21	63,09	0,678
500	5,75	79,38	0,687
600	6,23	96,89	0,699
700	6,71	115,4	0,706
800	7,19	134,8	0,713
900	7,64	155,1	0,717
1000	8,08	177,1	0,719

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
(справочное)  
Характеристики топлива

Таблица Б.1 - Расчетные характеристики некоторых природных газов

Название газопровода	Состав газа по объему, %							Низшая теплота сгорания сухого газа, МДж/м <sup>3</sup>
	СН <sub>4</sub>	С <sub>2</sub> Н <sub>4</sub>	С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub>	С <sub>5</sub> Н <sub>12</sub>	N <sub>2</sub>	СО <sub>2</sub>	
Саратов-Москва	84,5	3,8	1,9	0,9	0,3	7,8	0,8	35,8
Ставрополь-Москва	93,8	2,0	0,8	0,3	0,1	2,6	0,4	36,1
Дашава-Киев	98,9	0,3	0,1	0,1	–	0,4	0,2	35,9
Шебелинка-Москва	94,1	3,1	0,6	0,2	0,8	1,2	–	37,9
Газли-Ташкент	94,0	2,8	0,4	0,3	0,1	2,0	0,4	36,3
Карабулак-Грозный	68,5	14,5	7,6	3,5	1,0	3,5	1,4	45,8
Ставрополь-Грозный	98,2	0,4	0,1	0,1	–	1,0	0,2	35,6
Бухара-Урал	94,9	3,2	0,4	0,1	0,1	0,9	0,4	36,7
Средняя Азия-Центр	93,8	3,6	0,7	0,2	0,4	0,7	0,6	37,6

ПРИЛОЖЕНИЕ В  
(справочное)  
Состав рабочей массы топлива

Таблица В.1 - Элементарный состав рабочей массы некоторых твердых и жидких топлив

Район месторождения	Бассейн месторождения	Марка	Состав, %								$Q_n^p$ , МДж/кг	Выход летучих веществ на горючую массу $V^G$ , %
			W <sup>p</sup>	A <sup>p</sup>	S <sub>K</sub> <sup>p</sup>	S <sub>op</sub> <sup>p</sup>	C <sup>p</sup>	H <sup>p</sup>	N <sup>p</sup>	O <sup>p</sup>		
Донецкий бассейн	–	Г	8,0	23,0	2,0	1,2	55,2	3,8	1,0	5,8	22,0	40
То же	–	Д	13,0	21,8	1,5	1,5	49,3	3,6	1,0	8,3	19,6	44
Кузнецкий бассейн	–	Д	12,0	13,2	0,3	0,3	58,7	4,2	1,9	9,7	22,8	42
То же	–	Г	8,5	11,0	0,5	0,5	66,0	4,7	1,8	7,5	26,1	40
Казахстан	Карагандинский	К	8,0	27,6	0,8	0,8	54,7	3,3	0,8	4,8	21,3	28
То же	Экибастузский	СС	7,0	38,1	0,4	0,4	43,4	2,9	0,8	7,0	16,7	30
Тульская область	Подмосковный	Б2	32,0	25,2	1,5	1,2	28,7	2,2	0,6	8,6	10,4	50
Республика Коми	Печорский	Ж	5,5	23,6	0,8	0,8	59,6	3,8	1,3	5,4	23,7	33
Пермская область	Кизеловский	Г	6,0	31,0	6,1	6,1	48,5	3,6	0,8	4,0	19,7	42
Челябинская область	Челябинский	Б3	18,0	29,5	1,0	1,0	37,3	2,8	0,9	10,5	13,9	45
Грузинская	Ткибульский	Г	13,0	27,0	0,7	0,6	45,4	3,5	0,9	8,9	17,9	45
Красноярский край	Канско-Ачинский	Б2	33,0	6,0	0,2	0,2	43,7	3,0	0,6	13,5	15,7	48
Иркутская область	Черемховский	Д	13,0	27,0	0,1	0,1	45,9	3,4	0,7	8,9	17,9	47
Хабаровский край	Райчихинское	Б2	37,5	9,4	0,3	0,3	37,7	2,3	0,6	12,2	12,7	43
Республика Саха	Чульмаканское	Ж	7,5	23,1	0,3	0,3	59,0	4,1	1,0	5,0	23,2	38
Магаданская область	Нижне-Аркагалинское	Д	16,5	9,2	0,3	0,3	59,1	4,1	1,0	9,8	22,9	40
Малосернистый	Мазуты	–	3,0	0,05	0,3	0,3	84,7	11,7	–	0,3	40,3	–
Сернистый		–	3,0	0,1	1,4	1,4	83,8	11,2	–	0,5	39,7	–
Высоко-сернистый		–	3,0	0,1	2,8	2,8	83,0	10,4	–	0,7	38,8	–

ПРИЛОЖЕНИЕ Г  
(справочное)  
Типы топочных устройств

Таблица Г - Типы топок, рекомендуемые для котельных агрегатов

Вид топлива	Паропроизводительность, т/ч	Топка
Каменный уголь	$\leq 10$	С забрасывателем и неподвижным слоем
	15...35	С забрасывателем и цепной решеткой
	$\geq 25$	Шахтно-мельничная – для углей с $V^r > 30\%$
	$\geq 35$	Пылеугольная
Бурый уголь ( $W^H \leq 4,5$ , то есть кроме сильновлажных)	$\leq 10$	С забрасывателем и неподвижным слоем
	15...35	С забрасывателем и цепной решеткой
	35...75	Шахтно-мельничная
	$\geq 75$	Пылеугольная
Мазут и газ	При всех значениях	Камерная

Примечание. В этой и следующих таблицах:

приведенная влажность топлива

$$W^H = \frac{W^P}{Q_H^P}, \frac{\%}{\text{МДж / кг}};$$

приведенная зольность топлива

$$A^H = \frac{A^P}{Q_H^P}, \frac{\%}{\text{МДж / кг}}.$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(справочное)

### Расчетные характеристики топочных устройств

Таблица Д1 - Основные расчетные характеристики камерных топок с твердым шлакоудалением

Тип топки	Наименование топлива	Коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha_t$	Потери теплоты				Тепловое напряжение объема топки кВт/м <sup>3</sup>	
			от химической неполноты сгорания $q_3$ , %		от химической неполноты сгорания $q_4$ , %			
			Котлы $D < 75$ т/ч	Котлы $D \geq 75$ т/ч	Котлы $D < 75$ т/ч	Котлы $D \geq 75$ т/ч	Котлы $D < 75$ т/ч	Котлы $D \geq 75$ т/ч
Пылеугольные	Каменные угли	1,2	0,5	0	3	1	210	175
	Бурые угли	1,2	0,5	0	1,5	0,5	240	185
Шахто-мельничные	Каменные угли с $V^g > 30\%$	1,25		0,5	6	4	150	
	Бурые угли	1,25		0,5	2	1	175	
Камерные для сжигания жидких и газообразных топлив, экранированные	Мазут	1,1		0,5		–	290	
	Газ (смесительные горелки)	1,1		0,5		–	350	
	Газ (безфакельные горелки при $D \leq 20$ т/ч)	1,1		0,5			До 870	

Таблица Д.2 - Основные расчетные характеристики слоевых топок

Наименование величины и ее обозначение	Топки с забрасывателями и неподвижным слоем			Топки с забрасывателями и цепной решеткой		
	Бурые угли		Каменные угли $A^p= 1,0$	Бурые угли		Каменные угли $A^p= 1,0$
	мало-зольные $A^p= 1,5$	повышенной зольности $A^p= 2,4$		мало-зольные $A^p= 1,5$	повышенной зольности $A^p= 2,4$	
Коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha_T$	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3
Потеря от химической неполноты сгорания $q_3, \%$	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
Потеря от химической неполноты сгорания $q_4, \%$	7	9	6	6	7	5
Тепловое напряжение объема топки, кВт/м <sup>3</sup>	230-350			300-470		
Тепловое напряжение зеркала горения, кВт/м <sup>2</sup>	930-1150	800-1050	930-1150	1600	1300	1500

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(справочное)

### Потери теплоты котлоагрегатом

Таблица Е - Потери теплоты на наружное охлаждение котлоагрегата в зависимости от паропроизводительности

Паропроизводительность котлоагрегата $D, \text{ т/ч}$	Потери теплоты на наружное охлаждение $q_5, \%$	Паропроизводительность котлоагрегата $D, \text{ т/ч}$	Потери теплоты на наружное охлаждение $q_5, \%$
6,5	2,2	50	0,9
10	1,8	65	0,8
12	1,6	90	0,7
20	1,3	150	0,6
25	1,2	200	0,5

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж  
(обязательное)  
Образец оформления титульного листа контрольных задач

Министерство образования и науки РФ  
ФГБОУ ВПО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет ЗЛТФ  
Кафедра теплотехники

**Контрольные задачи**  
по Модулям: «Теплопередача»  
«Теплоснабжение и котельные установки»

Выполнил:  
студент А.А. Иванов  
напр.250403.62  
шифр 04156  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 г.

\_\_\_\_\_

(подпись)

Проверил:  
доцент, к.т.н. А.А.Орлов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 г.

\_\_\_\_\_

(подпись)

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Введение	3
<b>Модуль 2 Теплопередача</b>	
2.1. Теплопроводность	4
2.2. Конвективный теплообмен	6
2.3. Теплопередача	8
2.4 Теплообменные аппараты	10
<b>Модуль 3 Теплоснабжение и котельные установки</b>	14
3.1 Топливо	14
3.2 Горение топлива	16
3.3 Тепловой баланс котельных агрегатов	18
Вопросы для самопроверки	32
Контрольные задачи	33
Приложение А (справочное) Теплофизические свойства веществ	38
Приложение Б (справочное) Характеристики топлива	38
ПРИЛОЖЕНИЕ В (справочное) Состав рабочей массы топлива	39
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (справочное) Типы топочных устройств	40
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (справочное) Расчетные характеристики топочных устройств	41
ПРИЛОЖЕНИЕ Е (справочное) Потери теплоты котлоагрегатом	42
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (обязательное) Образец оформления титульного листа контрольных задач	43