

Тишин О.А., Мокрецова И.С.

**ТЕПЛОТЕХНИКА И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ
РАСЧЕТЫ
(СБОРНИК СЕМЕСТРОВЫХ РАБОТ)**

Электронное учебное пособие

Волжский
2018

0

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

О.А. Тишин, И.С. Мокрецова

**ТЕПЛОТЕХНИКА И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ
РАСЧЕТЫ
(СБОРНИК СЕМЕСТРОВЫХ РАБОТ)**

Учебное пособие



Волжский
2018

УДК. 621.1(07)
ББК 31.3я73
Т 472

Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук., профессор, заведующий кафедрой физики «Волжский энергетический институт (филиал) Московского энергетического института (университет)»

Кульков В. Г.

доктор техн.-х. наук, инженер-конструктор, ООО «КОМЕД»

Харитонов В.Н.

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Тишин, О.А.

Теплотехника и теплотехнические расчеты (сборник семестровых работ) [Электронный ресурс] : учебное пособие / О.А. Тишин, И.С. Мокрецова ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ, – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 379 КБ). – Волжский, 2018. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9948-3132-8

В учебном пособии рассматриваются основы теплотехники, приводится технология генерации, трансформации и передачи энергии потребляемой человеческим обществом. Перечисляются проблемы, которыми занимается термодинамика и теплотехника. Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению бакалавриата 08.03.01 «» профиль подготовки «Строительство» подготовлено в полном соответствии с ФГОС 08.03.01.

Пособие рассчитано на студентов всех форм обучения направлений бакалавриата 08.03.01. «Строительство».

Ил. 3, табл. 10, библиограф.: 13 назв.

ISBN 978-5-9948-3132-8

© Волгоградский государственный
технический университет, 2018

© Волжский политехнический
институт, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Список обозначений	4
Общие указания по выполнению семестровой работы	7
Семестровая работа № 1 Топливо, газовые смеси и теплоёмкость	8
Семестровая работа № 2 Термодинамические процессы и циклы с газообразным рабочим телом	15
Семестровая работа № 3 Теплопроводность, теплоотдача, теплопередача	19
Приложения	37
Рекомендуемая литература	42

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

a	– коэффициент температуропроводности, $[m^2/c]$;
b	– скорость звука; $[m/c]$
C_o	– коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;
$c, c_p, c_v, c_n, c_2,$ $c_o, c_{n.c2}$	– соответственно массовая теплоемкость, теплоемкость при постоянном давлении, удельном объеме при произвольных значениях параметров (политропная), теплоемкость горючего; окислителя; продуктов сгорания, $[Дж/кг \cdot ^\circ C]$;
D	– диаметр аппарата, $[m]$;
d	– диаметр трубы, канала, $[m]$;
F	– поверхность теплоотдачи, $[m^2]$;
f	– площадь поперечного сечения канала, $[m^2]$;
g	– ускорение свободного падения, $[m/c^2]$;
H	– энтальпия, $[Дж]$;
h	– удельная энтальпия, $[Дж/кг]$;
j_t	– плотность теплового потока, $[Вт/m^2]$;
K_t	– коэффициент теплопередачи, $[Вт/m^2 \cdot ^\circ C]$;
K_R	– линейный коэффициент теплопередачи, $[Вт/m \cdot град]$;
k	– показатель адиабаты;
L	– работа, $[Дж]$;
l	– удельная работа, $[Дж/кг]$;
M	– молекулярная масса, $[кг/моль]$;
$m, m_2, m_o, m_{n.c2},$ $m_n, m_{ж}, m_b^0$	– соответственно масса, масса горючего, масса окислителя, масса продуктов сгорания, масса пара, масса жидкости, масса воздуха, необходимого для сжигания одного кг топлива, $[кг воздуха/кг топлива]$;
n	– показатель политропы;
p	– давление общее в системе, $[Па]$;

Δp	– перепад давления, [Па];
Q_t	– количество теплоты, [Дж];
q_t	– удельное количество теплоты, [Дж/кг];
q_v, q_m	– соответственно объемный расход, массовый расход;
q_v^p, q_n^p	– количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива с учетом теплоты конденсации водяных паров (высшая теплота сгорания), низшая теплота сгорания горючего, [Дж/кг];
R	– универсальная газовая постоянная, [Дж/моль·°K];
R_μ	– газовая постоянная, [Дж/кг·°K];
r	– теплота конденсации, [Дж/кг];
S	– энтропия, [Дж/°K];
s	– удельная энтропия, [Дж/кг·°C];
T	– температура, [°K];
t, t_z, t_o, t_n, t_z	– соответственно температура, температура горючего при поступлении его в зону реакции, окислителя, начала реакции, температура конца сгорания (адиабатная температура) [°C];
Δt	– температурный напор, [°C];
U	– внутренняя энергия, [Дж];
u	– удельная внутренняя энергия, [Дж/кг];
V	– объем, [м³];
$V_{МП}$	– объем «вредного пространства» (мертвого), [м³];
v	– скорость, [м/с];
$\alpha_k, \alpha_l, \alpha_t$	– соответственно коэффициент конвективной теплоотдачи, коэффициент теплоотдачи за счет лучистого теплообмена, коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°C;
β_T	– коэффициент термического расширения, [1/град];
$\delta_{ст}$	– толщина стенки, [м];
ε	– степень сжатия газа в ступени компрессора;
ε	– степень черноты тела;

λ	– коэффициент теплопроводности, $[Вт/м \cdot ^\circ C]$;
μ	– динамический коэффициент вязкости, $[Па \cdot с]$;
v', v'', v_μ	– соответственно удельный объем
ν	– кинематический коэффициент вязкости, $[м^2/с]$;
ρ	– плотность вещества, $[кг/м^3]$;
τ	– время, $[с]$;
ξ	– коэффициент полноты сгорания горючего;

Числа подобия:

$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$	– число Нуссельта;
$Pe = \frac{v \cdot d}{a}$	– число Пекле;
$Pr = \frac{\nu}{a}$	– число Прандтля;
$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$	– число Рейнольдса;
$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta_T \cdot \Delta t$	– число Грассгофа;

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1. Прежде чем приступить к выполнению расчетов, необходимо:
 - a) ознакомиться с содержанием задания;
 - b) проработать теоретический материал по теме семестровой работы, используя теоретический материал, изложенный в соответствующей главе данного пособия, а также указанную рекомендуемую литературу;
 - c) ответить на все контрольные вопросы, приведенные в конце задания.
 2. Вариант работы определяется порядковым номером, под которым фамилия студента записана в кафедральном журнале.
 3. Расчеты производить, пользуясь системой единиц СИ. В настоящем пособии приводятся методики расчета каждой семестровой работы.
 4. Выполненная и оформленная семестровая работа должна содержать:
 - a) номер варианта и исходные данные для расчета;
 - b) расчетные формулы, используемые при расчете, и подробный ход решения;
 - c) сводную таблицу результатов расчета по форме, указанной в задании;
 - d) рисунки и графики, в соответствии с заданием.
 5. Семестровую работу необходимо оформлять в соответствии с требованиями ГОСТ. Образец оформления работы имеется в лаборатории теплотехники.
 6. Работа, в оформленном виде, должна быть сдана на проверку преподавателю и защищена в сроки, установленные кафедрой.
- При защите студент должен:
- a) уметь изложить весь ход расчета;
 - b) свободно владеть теоретическим материалом по теме семестровой работы.

СЕМЕСТРОВАЯ РАБОТА №1

ТОПЛИВО, ГАЗОВЫЕ СМЕСИ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Вся энергия, которую человек использует в своей практике, производится первоначально в виде тепловой энергии, генерируемой (получаемой) в результате химических (например, горение топлива), ядерных реакций (деление урана). Затем тепловая энергия трансформируется и используется для получения различных видов энергии. На рисунке 1.1 [пособие 2010] представлена схема генерации и трансформации энергии на теплоэлектростанциях (ТЭС) или атомной электростанции.

Топливо сжигается в специальных устройствах – топках. В результате сжигания получают продукты горения, газы, нагретые до высокой температуры. При сжигании топлива ставится задача получить продукты горения с наиболее возможно высокой температурой. При этом весь энергетический потенциал, имеющийся в топливе, передается продуктам горения. Происходит трансформация энергетического потенциала в тепловую энергию продуктов горения. В дальнейшем преобразования в различные виды энергии обеспечиваются за счет трансформации энергии продуктов горения (топочных газов).

В топке сжигается топливо при определенных условиях. В качестве окислителя используется воздух с температурой T_1 . Заданы также коэффициенты избытка воздуха α и коэффициент полноты сгорания ξ (приведена его зависимость от коэффициента избытка воздуха). Определить теоретическое значение максимальной температуры горения T_z . Теплотой, вносимой топливом, пренебречь.

Указания к выполнению семестровой работы

1. Условие А, вид топлива В, T_1 , α и ξ берутся из таблицы 1.1 в соответствии с вариантом работы.
2. Характеристики топлива берутся из приложения (табл. П.1.1).
3. Формулы средних изохорных массовых теплоемкостей приведены в приложении (табл. П.1.2).
4. Результаты расчета сводятся в таблицу 1.2.

Исходные данные

п/п	топливо	температура, °С		коэф. избытка воздуха	коэф. полноты сгорания
		воздуха	топлива		
1	бензин	-20	20	по выбору для каждого из вариантов, в зависимости от желаемой полноты сгорания топлива	$\ln(1 - \zeta) = -b \cdot \alpha$ выражение одинаково для каждого из вариантов
2	бензин	10	25		
3	бензин	20	30		
4	керосин	25	-10		
5	керосин	30	0		
6	керосин	40	10		
7	этанол	30	-30		
8	этанол	20	-25		
9	этанол	0	-20		
10	метанол	5	10		
11	метанол	10	20		
12	метанол	15	25		
13	метан	-30	-35		
14	метан	-20	-30		
15	метан	-10	-25		
16	метан	0	-20		
17	пропан	10	10		
18	пропан	0	0		
19	пропан	15	15		
20	пропан	30	30		
21	бутан	10	15		
22	бутан	0	25		
23	бутан	10	35		
24	бутан	25	40		

Задание. В соответствии с исходными данными предложенного варианта определить температуру получаемых продуктов горения топлива.

1.1 Определение температуры продуктов горения топлива

Процесс сжигания топлива является первым шагом в производстве электрической энергии на тепловых электростанциях. Сжигание топлива позволяет получить продукты горения (топочные газы). В свою очередь топочные газы дают возможность произвести водяной пар в паровых котлах. Затем с помощью пара производится механическая энергия (в паровых турбинах). Механическая энергия паровых турбин трансформируется с помощью электрогенераторов в электрическую энергию. Расчет сжигающего устройства (топки) ведется на основании уравнений материального и теплового балансов.

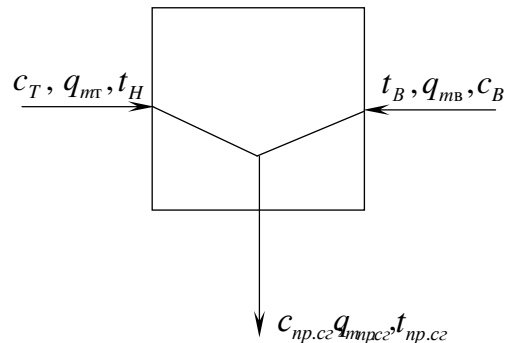


Рис. 1.1 Расчетная схема для процесса сжигания топлива

Материальный баланс сжигающего устройства представляет собой закон сохранения вещества. Количество образующихся продуктов сгорания равно сумме количеств поданных в устройство топлива и воздуха подаваемого на сжигание:

$$q_{m_{np.cz}} = q_{m_T} + q_{m_T} \cdot m_B^0 \cdot \alpha = q_{m_T} \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha) \quad (1.1)$$

Из уравнения материального баланса определяем расход продуктов горения:

$$q_{m_{np.cz}} = q_{m_T} \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha) \quad (1.2)$$

Температура конца сгорания определяется из уравнения теплового баланса сжигающего устройства для стационарного режима его работ:

$$\xi \cdot q_{m_m} \cdot q_H^p + c_2 \cdot q_{m_m} \cdot t_H + c_6 \cdot q_{m_B} \cdot t_H = q_{m_T} \cdot c_{n.cz} \cdot t_{np.cz} \quad (1.3)$$

Тепловой баланс представляет собой математическую запись закона сохранения энергии. В этом уравнении первое слагаемое означает количество теплоты, образующееся в результате сгорания горючего; второе – количество теплоты, вносимое горючим в зону реакции; третье – количество теплоты, вносимое окислителем в зону реакции. В качестве окислителя используется кислород воздуха. Правая часть уравнения означает количество теплоты, содержащейся в продуктах сгорания. Неизбежные потери энергии за счет контакта с окружающей средой не учитываются.

Массовый расход топлива является постоянной величиной и на него можно сократить. Температура продуктов горения будет равна:

$$t_{np} = \frac{c_T}{c_{np} \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \cdot t_T + \frac{m_B^0 \cdot \alpha \cdot c_B}{c_{np} \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \cdot t_H + \frac{\zeta \cdot q_H^P}{c_{np} \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \quad (1.4)$$

Если предположить, что $c_T \approx c_B \approx c_{np} = c$, то будем иметь:

$$t_{np} = \frac{1}{(1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \cdot t_n + \frac{m_B^0 \cdot \alpha}{(1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \cdot t_B + \frac{\zeta \cdot q_H^P}{c \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \quad (1.5)$$

Это уравнение позволяет произвести приближенную оценку температуры. Это значение температуры продуктов горения может использоваться как ориентировочная оценка. Для более точного определения температуры продуктов горения необходимо произвести более точный расчет. В нем учитывается содержание каждого компонента газовой смеси, его теплоемкость и зависимость полноты сгорания топлива от коэффициента избытка воздуха, подаваемого на сжигание топлива.

Теплоту сгорания топлива можно определить по формуле Менделеева:
низшая теплота сгорания

$$q_H^P = 393,3 \cdot m_C + 125,6 \cdot m_H - 109 \cdot (m_O - m_S) - 225,2 \cdot (9 \cdot m_H + m_W), \left[\frac{\text{МДж}}{\text{кг топлива}} \right], (1.6)$$

высшая теплота сгорания

$$q_B^P = q_H^P + 25,2 \cdot (9 \cdot m_H + m_W), \left[\frac{\text{МДж}}{\text{кг топлива}} \right] \quad (1.7).$$

В состав углеводородного топлива чаще всего входят углерод, водород, сера, кислород. Также может содержаться вода (например, в каменном угле). В таблице содержатся значения теплот сгорания различных компонентов топлива, теоретическое значение количества кислорода и воздуха, необходимых для сжигания.

Изобарная массовая теплоемкость смеси газов в интервале температур $(0 \dots T_z)$ К определяется по уравнению:

$$c_p = \sum_1^n m_i \cdot c_{pi} \quad (1.8)$$

Для исходной смеси, состоящей из топлива и воздуха, теплоемкость определяется по уравнению:

$$c_p = \frac{1}{1 + \alpha \cdot m_B^0} \cdot c_{pm} + \frac{m_B^0}{1 + \alpha \cdot m_B^0} \cdot c_{ps} \quad (1.9)$$

Для продуктов горения:

$$c_{p.n.c2} = m_{CO_2} \cdot c_{p.CO_2} + m_{H_2O} \cdot c_{p.H_2O} + m_{O_2} \cdot c_{p.O_2} + m_{N_2} \cdot c_{p.N_2}. \quad (1.10)$$

Массовые доли компонентов продуктов горения. В результате горения топлива в продуктах сгорания содержатся: пары воды, двуокиси углерода, серы, азот воздуха и избыток окислителя.

Количество влаги определяется соотношением:

$$m_{H_2O} = \frac{9 \cdot m_{тН}}{1 + \alpha \cdot m_B^0}, \quad (1.11)$$

Количество диоксида углерода:

$$m_{CO_2} = \frac{3,67 \cdot m_{тC}}{1 + \alpha \cdot m_B^0}, \quad (1.12)$$

Количество диоксида серы:

$$m_{SO_2} = \frac{2 \cdot m_{тS}}{1 + \alpha \cdot m_B^0}, \quad (1.13)$$

Кроме того, надо учесть, что в продукты сгорания переходит практически весь азот поданного для горения воздуха:

$$m_{N_2} = \frac{0,77\alpha \cdot m_{возд}^0}{1 + \alpha \cdot m_B^0}, \quad (1.14)$$

где 0,77 – массовая доля содержания азота в воздухе.

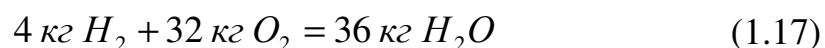
А также кислород, содержащийся в избыточной части поданного воздуха:

$$m_{O_2} = \frac{0,23 \cdot (\alpha - 1)}{1 + \alpha \cdot m_B^0} \cdot \left[\frac{кг_{J_2}}{кг_{монл}} \right] \quad (1.15)$$

Определение теоретически необходимого количества воздуха для сжигания топлива m_B^0 . В состав углеводородного топлива входят водород, углерод, сера. Количество воздуха определяется на основании уравнений материального баланса процесса сжигания отдельных компонентов топлива.

Определение потребного количества окислителя для полного сжигания топлива

Расчет ведут обычно на 1 кг рабочей массы сжигаемого топлива. Основой для расчета служат стехиометрические уравнения реакции горения. Рассмотрим стехиометрические реакции окисления горючих веществ, входящих в состав горючего. Окисление водорода рабочей массы топлива:



Из этого уравнения следует, что каждый килограмм сжигаемого водорода требует 8 кг кислорода, при этом образуется 9 кг воды. Если в рабочей массе сжигаемого топлива содержится H_p % водорода, то для окисления водорода, входящего в 1 кг такого топлива, необходимо иметь массу кислорода (в кг), равную

$$\frac{32}{4} = \frac{H_p}{100} \quad (1.18)$$

Аналогично можно определить требуемое количество кислорода для окисления остальных компонентов топлива. Результаты приведены в таблице 1.2:

Таблица 1.2

Значения расходов окислителя и теплоты сгорания для компонентов топлив

Элемент топлива, топливо	Количество кислорода, необходимого для сжигания компонента $1 \text{ кг } O_2 / m_{\text{возд}}^0$	Количество воздуха, необходимого для сжигания компонента 1 кг компонента	Теплота сгорания МДж/кг
<i>H</i>	8,0	34,8	125,6
<i>S</i>	1,0	4,35	10,9
<i>C</i>	2,67	11,6	39,3

Теплоемкости c_{pi} находятся по формуле Майера с учетом температурной зависимости изохорной теплоемкости c_{vi} (уравнения выбираются из таблицы П 1.2):

$$c_{pi} = c_{vi} + R_{\mu i}$$

В этом уравнении от температуры зависит теплоемкость при постоянном объеме. Ее зависимость от температуры определяется по таблице П.1.2 .

Например, при $T = T_z$ из таблицы П.1.2 имеем

$$c_{v \text{ CO}_2} = 0,775 + 11,7 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{пр.сг.}} ; \quad R_{\mu \text{ CO}_2} = 0,189 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

В соответствии с формулой Майера

$$c_p = c_v + R_{\mu} = 0,775 + 0,189 + 11,7 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{пр.сг.}} = 0,964 + 11,7 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{пр.сг.}}$$

В качестве температуры используется ее абсолютное значение $T_z = t + 273$.

Находим формулу теплоты продуктов сгорания, подставив найденные значения в формулу в п.5.

1. Для определения максимальной теоретической температуры горения используем уравнение теплового баланса (см. п.1), из которого находим T_z .

Коэффициент полноты сгорания топлива зависит от коэффициента избытка воздуха. Для газовых топлив можно принять эту зависимость следующего вида:

$$\ln(1 - \zeta) = -b \cdot \alpha.$$

После потенцирования получаем:

$$\zeta = 1 - e^{-b\alpha}.$$

Коэффициент b можно принять равным 2,496. Зависимость работает в диапазоне изменений коэффициента избытка топлива в пределах: $1,1 \leq \alpha \leq 1,6$.

Контрольные вопросы

1. Запишите материальный баланс рабочей, сухой и горючей массы топлива.
2. Что называется теплотой сгорания топлива? Чем отличаются высшая и низшая теплоты сгорания топлива?
3. Как определяются теоретически необходимое количество воздуха и состав продуктов сгорания?
4. Что называется коэффициентом избытка воздуха, от чего зависит его выбор?
5. Назовите основные стадии горения топлива.
6. Запишите уравнение теплового баланса устройства для сжигания топлива в топке.
7. Что понимается под термином “газовая смесь”, каковы основные способы задания ее состава?
8. Что такое “средняя” (или кажущаяся) молекулярная масса смеси?
9. Что такое парциальное давление компонента в смеси? Определите парциальное давление одного из компонентов.
10. Как определяется газовая постоянная смеси и каков ее физический смысл?
11. Приведите уравнение Клайперона - Менделеева (уравнение состояния) для m кг газа.
12. Как связаны между собой изобарная и изохорная теплоемкости?
13. Как определяется теплоемкость газовой смеси?
14. Как определяется теплота при использовании средних теплоемкостей?
15. Что называется парциальным (приведенным) объемом компонента смеси, как он определяется?

СЕМЕСТРОВАЯ РАБОТА №2

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЦИКЛЫ С ГАЗООБРАЗНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ

Одной из задач теплотехники заключается в проектировании различных тепловых машин. Этот вид техники представлен машинами, предназначенными для преобразования тепловой энергии в различные другие формы энергии. В первую очередь это трансформация теплоты в механическую энергию (эти машины служат для совершения работы). К этой категории машин относятся паровые машины и турбины, двигатели внутреннего сгорания и другие. Вторая категория машин предназначена для превращения механической энергии (механической работы) в различные виды энергии рабочего тела (энергия давления, кинетическая энергия и др.). К этой категории машин относятся компрессоры различной конструкции (поршневые, центробежные и др.).

В качестве примера рассмотрим работу поршневого компрессора. В любой тепловой машине реализуется использование определенного цикла. Поршневой компрессором машина циклического действия. Циклом называется процесс, в котором начальное и конечное состояния системы совпадают. Различают: обратимый и необратимый циклы. Инфинитизимальные и квазистатические процессы обратимы.

Цикл представляет собой последовательное чередование элементарных термодинамических процессов. В тепловых процессах рабочим телом является газ, т.к. это физическое тело обладает способностью изменять свои параметры при изменении давления и температуры. Используя газ в тепловых машинах, человек обрел возможность превращать тепловую энергию в механическую (совершать работу) и заменить ручной труд машинным. Появилась необходимость количественно оценивать преобразование энергии в различных рабочих циклах, используемых в тепловых машинах. Для осуществления количественной оценки используются уравнение состояния идеального газа и закона политропического сжатия. Эти два уравнения позволяют определять параметры состояния рабочего тела (температуру, давление и удельный объем). Знание параметров в начале и конце процесса позволяет определить затраты энергии на осуществление процесса. В таблице приведены уравнения, позволяющие оценивать соотношения между параметрами рабочего тела при переходе из одного состояния в другое и расчета количества энергии потребного для осуществления процесса.

Таблица 2.1

Исходные данные

п/п	газ	температура °С		давление	показатель адиабаты, при 1 ата
		начальная	на солнце	начальное, бар	
1	кислород	20	70	200	1,40
2	кислород	23	65	175	
3	кислород	25	60	150	
4	пропан	30	65	40	1,16
5	пропан	35	70	35	
6	пропан	30	50	30	
7	метан	25	70	25	1,32
8	метан	20	65	20	
9	метан	25	60	36	
10	бутан	20	55	40	1,10
11	бутан	20	50	35	
12	бутан	20	45	20	
13	этан	25	70	30	1,20
14	этан	30	65	25	
15	этан	23	60	20	
16	азот	20	70	15	1,40
17	азот	22	65	20	
18	азот	25	60	60	
19	аргон	20	55	50	1,68
20	аргон	23	60	60	
21	аргон	24	65	70	
22	гелий	2-	60	80	1,66
23	гелий	21	55	70	
24	гелий	22	50	60	

Задание 1. Баллон со сжатым газом оставлен на открытой площадке. Определить насколько возрастет давление газа в баллоне, если температура в дневное летнее время достигает значения.

Определить, как изменится энергия находящегося в баллоне газа (исходные данные в табл. 2.1).

Для всех студентов группы произвести расчеты по предложенным ниже вопросам. Процессы совершаются над газом по варианту первой задачи задания.

Задание 2. Определить затраты энергии на сжатие газа, если теплообмен компрессора с окружающей средой исключен.

Определить затраты энергии на сжатие в компрессоре, если в нем поддерживается постоянная температура

Определить затраты энергии на сжатие газа, если возможен теплообмен с окружающей средой.

Порядок выполнения задания 2

1. Ориентируясь на условия задания необходимо определить к какой категории процессов относится предложенный заданием процесс.

2. По соотношениям, представленным в таблице 2.2 для определения работы сжатия необходимо выбрать выражения (уравнения) необходимые для расчета.

3. Произвести необходимые расчеты.

4. Изобразить процесс в диаграмме $p-v$.

5. Проанализировать результаты.

Варианты заданий в таблице приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.2

Сводная таблица частных случаев политропного процесса

Процесс	n	Соотношения параметров	Δu	Δh	Δs	q_t	l
Изохорный $V = const$	$\pm \infty$	$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}$	$c_v \cdot \Delta T$	$c_p \cdot \Delta T$	$c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$	$c_v \cdot \Delta T$	0
Изобарный $P = const$	0	$\frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1}$	$c_v \cdot \Delta T$	$c_p \cdot \Delta T$	$c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$	$c_p \cdot \Delta T$	$p \cdot (v_2 - v_1)$
Изотермический $T = const$	1	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$	0	0	$R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$	$p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$	$p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$
Адиабатный $dq_t = 0$	k	$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_2}{T_1}$	$c_v \cdot \Delta T$	$c_p \cdot \Delta T$	0	0	$c_v \cdot \Delta T$
Политропный процесс $dq_t \neq 0$	n	$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \frac{T_2}{T_1}$	$c_v \cdot \Delta T$	$c_p \cdot \Delta T$			$l_{1-2} = \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1} \right]$ $c_v \cdot \Delta T$

Таблица 2.3

Исходные данные

п/п	газ	температура, °С		давление, бар		показатель адиабаты при 1 апа
		начальная	конечная	начальное	конечное	
1	кислород	20	20	2,0	6,0	1,40
2	кислород	23	23	1,7	6,4	
3	кислород	25	25	1,5	5,1	
4	пропан	30	30	1,4	4,2	1,16
5	пропан	35	35	1,3	4,0	
6	пропан	30	30	1,3	4,5	
7	метан	25	25	1,2	5,0	1,32
8	метан	20	20	1,2	4,0	
9	метан	25	25	1,3	4,5	
10	бутан	20	20	1,4	6,1	1,10
11	бутан	20	20	1,3	5,5	
12	бутан	20	20	1,2	4,1	
13	этан	25	25	1,3	3,9	1,20
14	этан	30	30	1,2	4,8	
15	этан	23	23	1,2	3,6	
16	азот	20	20	1,5	6,2	1,40
17	азот	22	22	1,2	5,2	
18	азот	25	25	1,6	4,8	
19	аргон	20	20	1,5	4,5	1,68
20	аргон	23	23	1,6	4,4	
21	аргон	24	24	1,7	5,2	
22	гелий	2-	2-	1,8	4,4	1,66
23	гелий	21	21	1,7	6,3	
24	гелий	22	22	1,6	7,2	

Контрольные вопросы

1. Назовите параметры состояния рабочего тела и единицы их измерения
2. Изобразите основные термодинамические процессы в координатах $p-v$ и $T-s$.
3. Как связаны между собой параметры состояния в изохорном, изобарном, адиабатном и политропном процессах?
4. На основе первого закона термодинамики проанализируйте распределение энергии в основных термодинамических процессах.
5. Каковы важнейшие свойства координатных систем Ts - и $p-v$ -?
6. Из чего складывается внутренняя энергия идеального и реального газов? Приведите дифференциальное уравнение изменения внутренней энергии реального газа.
7. Как подсчитать изменение внутренней энергии идеального и реального газов?

СЕМЕСТРОВАЯ РАБОТА № 3

Теплопроводность, теплоотдача, теплопередача

В большинстве задач по теплообмену обязательным условием ее решения является знание температур на границах участка теплопередающего тракта. Это температуры на поверхностях твердой стенки. От значений этих температур зависят значения коэффициентов теплоотдачи на границах твердой стенки. Значения температур (для стационарного состояния) находятся из условия равенства теплового потока (или плотности теплового потока) на различных участках передачи теплоты. Для различных вариантов передачи это условие выглядит следующим образом:

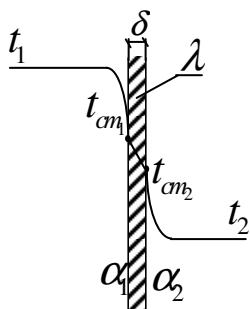


Рис. 3.1 Схема осуществления процесса теплопередачи

Тепловой поток слева:

$$q_t = \alpha_1 \cdot F \cdot (t_1 - t_{cm_1}) \quad (3.1)$$

Тепловой поток, передаваемый через стенку:

$$q_t = \frac{\lambda \cdot F}{\delta} \cdot (t_{cm_1} - t_{cm_2}) \quad (3.2)$$

Тепловой поток справа:

$$q_t = \alpha_2 \cdot F \cdot (t_{cm_2} - t_2) \quad (3.3)$$

В стационарном состоянии эти потоки равны:

$$q_t = \alpha \cdot F \cdot (t_1 - t_{ct_1}) = \frac{\lambda \cdot F}{\delta} \cdot (t_{ct_1} - t_{ct_2}) = \alpha_2 \cdot F \cdot (t_{ct_2} - t_2). \quad (3.4)$$

Проблема усложняется еще и тем, что значения коэффициентов теплоотдачи зависят от значений этих температур. В таблице приведены уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи на поверхностях стенки. В этих уравнениях числа подобия Грассгофа

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu} \cdot \beta_T \cdot \Delta t, \quad \text{где } \Delta t = t_{ст} - t_{cp},$$

Число Прандтля при температуре стенки:

$$Pr_{cm} = \frac{\nu}{a}. \quad \text{тоже зависят от температуры на поверхности}$$

стенки. Значения коэффициентов вязкости ν и температуропроводности a определяются при температуре стенки.

Задание № 3.1 Распространение тепла в твердом теле

Определить глубину промерзания кирпичной стенки в зимних условиях при наружной температуре воздуха в дневное время и ночью. Задание в таблице 3.1.

Методика решения задачи

Заданы температуры воздушной среды в помещении и на улице (окружающей здание среды). Можно выбрать приближенный вариант. Предполагаем, что температура поверхности стены со стороны помещения равна температуре воздуха в помещении. Температура поверхности стены со стороны атмосферного воздуха равна его температуре.

Определяем удельный тепловой поток через стенку:

$$j_t = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{ст_1} - t_{ст_2}).$$

Температура по толщине стенки меняется по линейному закону:

$$t = t_{cm_1} - \frac{t_{cm_1} - t_{cm_2}}{\delta} \cdot x.$$

Промерзание стенки заключается в достижении ею на определенной толщине температуры равной 0°C . Приравниваем значение температуры нулю градусов Цельсия и находим глубину промерзания стенки:

$$x = \delta \cdot \frac{t_{cm_1} - t_{cm_2}}{t_{ст_1}}.$$

Более точное решение связано с уточнением значений температур на внешних границах стенки. Для этого необходимо воспользоваться уравнениями для расчета значений коэффициентов теплоотдачи на обеих поверхностях стенки. Предположим, что с обеих сторон соблюдаются условия свободной конвекции. Для этого варианта можно воспользоваться следующим уравнением для опре-

деления коэффициента теплоотдачи (коэффициенты определяются по одному уравнению):

$$\alpha = 9,74 + 0,07 \cdot (t_{cm} - t_{cp}) \left[\frac{Вт}{м^2 \cdot град} \right].$$

В этом случае плотность теплового потока со стороны помещения и со стороны окружающего здание воздуха будут равны:

$$j_t = [9,74 + 0,07 \cdot (t_1 - t_{cm_1})] \cdot (t_1 - t_{cm_1}) = [9,74 + 0,07 \cdot (t_{ct_2} - t_2)] \cdot (t_{ct_2} - t_2)$$

Это равенство можно обеспечить, если $(t_1 - t_{cm_1}) = (t_{ct_2} - t_2) = \Delta t$. Температуры на поверхности стенки равны:

$$t_{ct_1} = t_1 - \Delta t \quad t_{ct_2} = t_2 + \Delta t$$

Тогда плотность теплового потока через стенку будет равна:

$$j_t = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2 - 2\Delta t).$$

Полученные соотношения позволяют выразить температуры на поверхностях стенки через друг друга:

$$t_{ct_2} = t_1 + t_2 - t_{ct_1}.$$

Используя это равенство и подставив значение в плотность теплового потока через стенку, получим уравнение для определения Δt :

$$(9,74 + 0,07 \cdot \Delta t) \cdot \Delta t = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2 - 2 \cdot \Delta t)$$

Последнее выражение преобразуется в квадратное уравнение для определения Δt :

$$(\Delta t)^2 + b \cdot \Delta t - c = 0, \text{ где}$$

$$b = \frac{9,74 + 2 \cdot \frac{\lambda}{\delta}}{0,07}, \quad c = \frac{\lambda \cdot (t_1 - t_2)}{0,07 \cdot \delta}.$$

После определения Δt определить численные значений температур на поверхностях стенки (по уравнениям), а затем определить глубину промерзания стенки по уравнению.

Результаты сопоставить с ориентировочным расчетом.

Таблица 3.1.

Варианты заданий

п/п	материал стенки	толщина стенки, мм	температуры среды, °С	
			внутри помещения	на улице
			t_1	t_2
1	дерево сосна	100	25	-20
2	дерево сосна	120	20	-18
3	кирпич силикатный	250	22	-15
4	кирпич красный	500	21	-14
5	кирпич красный	250	24	-12
6	керамзитобетон	300	23	-10
7	керамзитобетон	250	22	-9
8	железобетон	150	21	-8
9	железобетон	500	20	-7
10	бетон тяжелый	350	18	-6
11	бетон тяжелый	300	20	-5
12	дерево дуб	150	21	-6
13	дерево дуб	200	22	-7
14	кирпич силикатный	250	23	-8
15	кирпич силикатный	500	24	-10
16	кирпич красный	500	25	-11
17	кирпич красный	250	24	-12
18	керамзитобетон	250	23	-13
19	керамзитобетон	250	22	-14
20	железобетон	200	21	-15
21	железобетон	300	20	-16
22	бетон тяжелый	320	18	-18
23	бетон тяжелый	260	19	-35
24	бетон тяжелый	200	17	-40

Значения коэффициентов теплопроводности различных материалов [$Вт/м·град$]. Бетон (тяжелый) 1,28; железобетон 1,55; керамзитобетон 0,70; кладка из красного кирпича 0,67; кладка из силикатного кирпича 0,76; дуб 0,20; сосна 0,15

Задание 3.2. В теплообменном аппарате вертикальная труба (размеры трубы $d \cdot \delta$), длиной l и высотой h выполнена из стали с коэффициентом теплопроводности λ_c . С одной стороны она омывается продольным вынужденным потоком горячей воды системы отопления, с другой движется воздух (движение

может быть свободным или вынужденным). Скорость потока воды (вдали от стенки) w_0 . Температура воды $t_{ж1}$, воздуха в помещении $t_{ж2}$ (рис. 4.1).

Определить: а) средние коэффициенты теплоотдачи от воды к поверхности стенки (α_1) и от поверхности стенки к воздуху (α_2);

б) частные термические сопротивления $\left(\frac{1}{\alpha_1}, \frac{1}{\alpha_2}, \frac{\delta}{\lambda_c} \right)$ и общее (R) термические сопротивления;

в) коэффициент теплопередачи (K) и плотность теплового потока (q);

Указания к выполнению семестровой работы

1. Исходные данные для расчета выбираются из таблицы 4.1 в соответствии с вариантом работы.
2. При расчете коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 выбирают для соответствующих случаев теплообмена уравнения подобия, которые приводятся в технической литературе. В данной работе можно пользоваться следующими уравнениями.

В выводах необходимо:

- 1) показать, какое из частных термических сопротивлений определяет величину общего термического сопротивления и коэффициента теплопередачи;
- 2) указать, какие из рассмотренных мероприятий практически не увеличивают теплопередачу, а какие являются эффективным средством ее интенсификации, дать этому объяснение;
- 3) сформулировать общее правило интенсификации процесса теплопередачи.

Методика расчета семестровой работы

Решение этого задания усложняется тем, что не заданы значения температур стенки на обеих поверхностях трубы. От значений этих температур зависят величины коэффициентов теплоотдачи. В стационарном состоянии тепловых потоки на отдельных участках теплопроводящего тракта и процесса теплоотдачи равны.

С помощью выбранных критериальных уравнений определяются расчетные значения коэффициентов теплоотдачи.

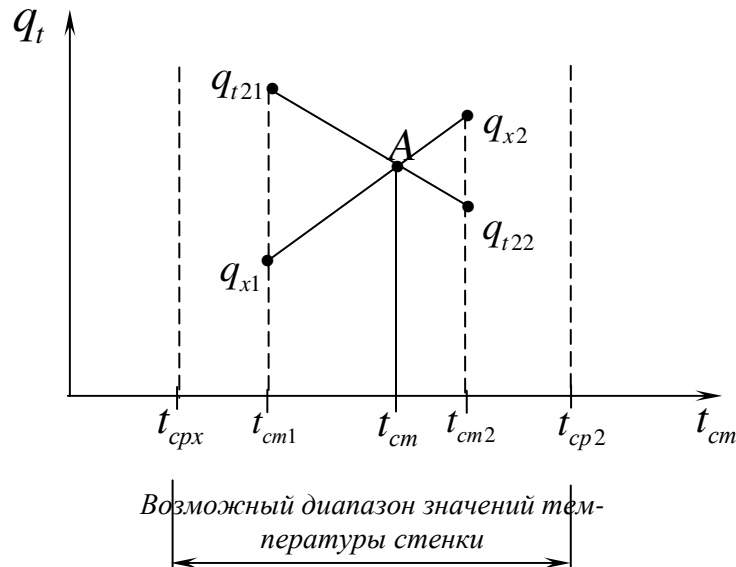


Рис. 3.2 Определение температур стенки построением нагрузочной характеристики

Тепловые потоки со стороны жидкости: $q_{tx} = \alpha_x \cdot (t_{x\ cp} - t_{cm})$, и со стороны воздуха $q_{t2} = \alpha_2 \cdot (t_{r\ cp} - t_{cm})$. Так как термическое сопротивление металлической стенки трубы очень мало по сравнению с термическими сопротивлениями сред, то можно считать, что средняя температура стенки одинакова по ее поперечному сечению. Температура стенки не известна, потому ее можно определить методом последовательных приближений, построением, так называемой нагрузочной характеристики. По своей сути это метод графоаналитического нахождения (решения) системы уравнений. Задаемся первым приближенным значением температуры стенки t_{cm1} (значение выбирается ближе к температуре жидкости) и при этом значении определяем коэффициенты теплоотдачи для холодной и горячей среды и тепловые потоки со стороны холодной q_{tx1} и горячей q_{t21} жидкостей по выбранным предварительно критериальным уравнениям. Затем задаемся новым значением температуры стенки (ближе к температуре горячей жидкости). Снова определяются значения коэффициентов теплоотдачи и величины тепловых потоков со стороны газа и горячей жидкости. Эти значения тоже наносятся на график. Затем точки соответствующие потоков со стороны газа соединяются между собой. Такая же операция осуществляется для теплового потока со стороны жидкости. Эти линии иллюстрируют изменение величин тепловых потоков. Точка пересечения графиков соответствует истинному значению температуры стенки. Из точки пересечения графиков точки А опускаем перпендикуляр на ось температур и находим действительное значение температуры стенки t_{cm} .

12. При этом значении определяем α_x и α_2 расчетное значение коэффициента теплопередачи.

$$K_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_r} + \left(\frac{\delta}{\lambda}\right)_{cm} + \frac{1}{\alpha_x}} \quad (15.)$$

Проанализировать полученные результаты и сформулировать выводы о целесообразных путях интенсификации теплопередачи.

1. Определяем коэффициент теплоотдачи со стороны жидкости текущей в трубе α_1 :

1.1. Вначале определяем число Рейнольдса

$$Re_{ж1} = \frac{v \cdot d}{\nu_{ж1}},$$

где $\nu_{ж1}$ — кинематический коэффициент вязкости воды (берется из таблицы П.4.1 при средней температуре жидкости).

Варианты заданий (воздух – неподвижный – полное безветрие)

п/п	положение трубы	скорость жидкости	диаметр трубы наружный	толщина стенки	длина трубы	температуры	
						жидкости	воздуха
		$v_{ж}, м/с$	$d_n, мм$	$\delta_{ст}, мм$	$l_{тр}, м$	$t_{ж}, ^\circ C$	$t_{газ}, ^\circ C$
1	горизонт	0,1	108	4		60	20
2	вертикаль	0,2	219	9,5	3	65	18
3	горизонт	0,3	76	3		70	22
4	вертикаль	0,4	159	4,5	2	70	24
5	горизонт	0,5	57	3,5		65	25
6	вертикаль	0,6	108	4	4	60	25
7	горизонт	0,7	219	9,5		50	23
8	вертикаль	0,8	76	3	5	55	22
9	горизонт	0,9	175	10		50	21
10	вертикаль	1,0	135	7,5	3,5	55	20
11	горизонт	1,0	89	4,5		60	19
12	вертикаль	0,9	89	4,5	2,5	65	18
13	горизонт	0,8	45	2,5		70	17
14	вертикаль	0,7	45	2,5	3,0	70	16
15	горизонт	0,6	89	3,5		65	15
16	вертикаль	0,5	89	3,5	2,5	60	14
17	горизонт	0,4	46	3		55	13
18	вертикаль	0,3	46	2,5	1,5	50	12
19	горизонт	0,2	133	5		50	11
20	вертикаль	0,1	133	5	1,0	55	10
21	горизонт	0,2	89	3,5		60	11
22	вертикаль	0,3	89	4	1,5	65	12
23	горизонт	0,4	108	5		70	14
24	вертикаль	0,5	108	6	2,5	65	18

Таблица результатов расчета

α_1	α_2	$\frac{1}{\alpha_1}$	$\frac{1}{\alpha_2}$	$\frac{\delta}{\lambda_c}$	R	K	q	$\frac{K_{\alpha 1}}{K}$	$\frac{K_{\alpha 2}}{K}$	$\frac{K_{F1}}{K}$	$\frac{K_{F2}}{K}$	$\frac{K_{\lambda}}{K}$
$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\frac{м^2 \cdot К}{Вт}$	$\frac{м^2 \cdot К}{Вт}$	$\frac{м^2 \cdot К}{Вт}$	$\frac{м^2 \cdot К}{Вт}$	$\frac{м^2 \cdot К}{Вт}$	$\frac{Вт}{м^2}$	—	—	—	—	—

1.2. По значению числа Рейнольдса выбираем по таблице 3,2 уравнение для определения числа Нуссельта.

1.3. Для определения Pr_{c1} и последующих вычислений задаемся температурами поверхностей стенки. Так как коэффициент теплопроводности стенки велик, а $\alpha_1 \gg \alpha_2$ (это следует из анализа условий задачи), то в первом приближении можно принять: $t_{c1} = t_{c2} = t_{ж1}$.

1.4. Учитывая выбранное значение температуры, из таблицы П.4.1 находим:

а) значение числа Прандтля Pr ;

б) отношение чисел Прандтля $\frac{Pr_{ж1}}{Pr_{c1}}$.

1.5. Определяем число Нуссельта $\overline{Nu}_{\ell_{ж1}}$ (см. п.1.2).

1.6. Находим коэффициент теплоотдачи α_1

$$\alpha_1 = \frac{\overline{Nu}_{\ell_{ж1}} \cdot \lambda_{ж1}}{\ell} \frac{Вт}{м^2 \cdot К}.$$

Здесь $\lambda_{ж1}$ – коэффициент теплопроводности воды (берется из таблицы П.4.1).

2. Определяем коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха α_2 . По условиям задания воздух неподвижен.

2.1. Вначале вычисляем число Грасгофа

$$Gr_{hж2} = \frac{g \cdot \beta \cdot h^3 \cdot \Delta t}{\nu_{ж2}^2},$$

где $g = 9,81 \frac{м}{с^2}$; $\beta = \frac{1}{T_{ж2}} \frac{1}{К}$; $\Delta t = t_{c2} - t_{ж2}$ К; $\nu_{ж2} \frac{м^2}{с^2}$ (берется из таблицы

П.4.2).

2.2. Для выбора уравнения подобия вычисляем произведение чисел подобия

$$Gr_{hж2} \cdot Pr_{ж2},$$

где $Pr_{ж2}$ – находится в таблице П.4.2.

2.3. Если $Gr_{hж2} \cdot Pr_{ж2} > 10^9$, то выбирается следующее уравнение подобия

$$\overline{Nu}_{hж2} = 0,15 \cdot (Gr_{hж2} \cdot Pr_{ж2})^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_{ж2}}{Pr_{c2}} \right)^{0,25},$$

которое для газа упрощается

$$\bar{Nu}_{\text{жж}2} = 0,15 \cdot (Gr_{\text{жж}2} \cdot Pr_{\text{ж}2})^{0,33}.$$

Если $10^3 < Gr_{\text{жж}} \cdot Pr \leq 10^9$, то выбирается уравнение

$$\bar{Nu}_{\text{жж}} = 0,76 \cdot (Gr_{\text{жж}} \cdot Pr_{\text{ж}})^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25}.$$

2.4. Вычисляем число Нуссельта $\bar{Nu}_{\text{жж}2}$ (см. п. 2.3).

2.5. Определяем коэффициент теплоотдачи α_2

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{\text{ж}2} \cdot \bar{Nu}_{\text{жж}2}}{h} \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

где $\lambda_{\text{ж}2}$ – коэффициент теплопроводности воздуха (берется из таблицы П. 4.2).

3. Определяем термические сопротивления

3.1. Находим частные термические сопротивления:

а) термическое сопротивление теплоотдачи от воды к поверхности стенки

$$\frac{1}{\alpha_1}, \quad \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

б) термическое сопротивление теплоотдачи от поверхности стенки к воздуху

$$\frac{1}{\alpha_2}, \quad \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

в) термическое сопротивление стенки

$$\frac{\delta}{\lambda_{\text{с}}}, \quad \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

3.2. Вычисляем общее термическое сопротивление

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{1}{\alpha_2} \quad \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

4. Определяем коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{R} \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

5. Вычисляем плотность теплового потока

$$q = K(t_{\text{ж}1} - t_{\text{ж}2}) \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Проверяем правильность принятых в расчете температур поверхностей стенки

Для этого:

6.1. Вычисляем величины температур $t'_{\text{с}1}$ и $t'_{\text{с}2}$

$$t'_{\text{с}1} = t_{\text{ж}1} - \frac{q}{\alpha_1} \quad ^\circ\text{С};$$

$$t'_{c2} = t_{ж2} + \frac{q}{\alpha_2} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

6.2. Определяем расхождения величин t'_{c1} и t'_{c2} , полученных расчетом, с их значениями t_{c1} и t_{c2} , принятыми в пункте 1.3

$$\sigma_1 = \frac{t_{c1} - t'_{c1}}{t_{c1}} \cdot 100 \text{ } \%;$$

$$\sigma_2 = \frac{t_{c2} - t'_{c2}}{t_{c2}} \cdot 100 \text{ } \%.$$

Если $\sigma_1 < 10 \text{ } \%$ и $\sigma_2 < 10 \text{ } \%$, то нет необходимости пересматривать выбранные значения t_{c1} и t_{c2} .

Задание 3.3 Конвективный теплообмен

Задание 3.3 Определить потери тепловой энергии с поверхности битумоварочного котла. Температура плавления битума. Варочный котел круглого сечения. Температуру внешней поверхности металлической стенки котла принять равной температуре плавления битума. Рассмотреть варианты работы котла с неизолированными стенками и с использованием тепловой изоляции из материала (по варианту задания). Потери оценить для различных значений толщины стенки изоляции. При изолировании наружной стенки котла увеличивается поверхность теплоотдачи. Построить график по результатам расчета. Сделать выводы.

Порядок выполнения работы.

Для снижения тепловых потерь в окружающее пространство поверхность котла покрывается теплоизоляцией. При нанесении теплоизоляции возрастает термическое сопротивление, что приводит к снижению потерь. Одновременно увеличивается наружный радиус корпуса котла. Увеличение радиуса приводит к увеличению внешней поверхности котла и, как следствие, способствует увеличению потерь. Поэтому увеличение толщины слоя изоляции не позволяет избавиться от тепловых потерь в окружающее пространство.

Для решения задачи нужно воспользоваться уравнением теплопередачи для оценки величины тепловых потерь в окружающее пространство:

$$q_{t_{nom}} = K \cdot F \cdot (t_1 - t_2)$$

Коэффициент теплопередачи равен:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \left[\frac{Вт}{м^2 \cdot К} \right].$$

По условию задачи предлагается принять температуру стенки котла равной температуре среды внутри котла. Это возможно в том случае, когда коэффициент теплоотдачи α_1 велик. Термическое сопротивление $\frac{1}{\alpha_1}$ равно нулю.

Коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности котла можно определить по уравнению (при условии неподвижности внешней среды):

$$\alpha = 9,74 + 0,07 \cdot (t_{cm2} - t_2), \left[\frac{Вт}{м^2 \cdot град} \right].$$

В качестве упрощения можно принять коэффициент теплоотдачи со стороны внешней поверхности постоянным и равным $\alpha = 9,74$. Такое упрощение не скажется сильно на конечном результате, но позволит упростить процедуру расчета.

Поверхность теплопередачи (внешняя поверхность) равна:

$$F = 2\pi \cdot (D + 2\delta_{из}) \cdot l$$

После подстановки в уравнение теплопередачи, получаем:

$$q_t = 2\pi \cdot (D + 2\delta_{из}) \cdot l \cdot \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}}} \cdot (t_1 - t_2).$$

Определить потери как функцию от толщины слоя изоляции. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Таблица 3.4

Варианты заданий (исходные данные)

Битумоварочный котел (снаружи котел обдувается потоком воздуха)

Погода ветреная. Котел горизонтальный

п/п	наружный диаметр котла	толщина стенки	длина котла	температура окружающего воздуха	скорость ветра
	d_n мм	$\delta_{ст}$ мм	$l_{пр}$ м	$t_{газ}$ °C	$v_{газ}$ м/с
1	1000	10	1,5	20	0,5
2	1200	12	3,0	28	0,1
3	1100	12	2,0	32	0,2
4	1400	14	2,0	24	1,5
5	1600	12	3,0	25	2,0
6	1100	10	2,5	25	3,0
7	1800	16	2,0	23	2,5
8	2000	16	3,0	22	2,2
9	1800	12	2,5	21	4,0
10	1600	12	3,2	20	4,5
11	1400	12	2,8	19	4,2
12	1200	12	2,5	18	3,8
13	1000	10	2,0	17	3,5
14	900	10	3,0	16	3,2
15	800	8	1,6	15	3,0
16	900	8	2,5	14	2,8
17	1000	10	2,2	13	2,6
18	1100	12	1,5	12	2,5

19	1200	12	1,0	11	2,2
20	1300	14	1,0	10	2,0
21	1400	12	1,5	11	1,8
22	1000	10	1,5	12	1,6
23	1100	10	2,2	14	1,6
24	1800	16	2,5	18	2,8

Семестровая работа №. 3.5
Теплотехнический расчет ограждающей конструкции здания
(многослойная стенка).

Многослойные конструкции используются для утепления ограждающих конструкций зданий. Силовая часть конструкции стены выполняется из кирпича или железобетонных конструкций. Оба этих материала обладают довольно высокими значениями коэффициентов теплопроводности. Поэтому как теплоизоляционный материал они не пригодны. Для устранения этого недостатка ограждающие конструкции зданий покрываются слоем теплоизоляции. В качестве теплоизолирующих материалов используются маты, выполненные из минеральной ваты или стекловаты. Эти материалы используются как утеплители и не могут рассматриваться как силовые элементы ограждающей конструкции здания.

Задание 3.5. Определить требуемую величину толщины слоя теплоизолирующего материала. Заданы: Район строительства, толщины силовых стенок задания.

Методика решения задачи 3.5. Ограждающая конструкция здания предназначена для изоляции внутренних помещений здания от негативного воздействия окружающей среды и поддержания требуемых, с точки зрения обеспечения комфортных условий во внутренних помещениях здания. Это обеспечивается за счет конструкции стены. Она выполняется из несущих материалов (бетон, кирпич) и теплоизоляционного материала. Теплоизоляционный материал силовой нагрузки не несет. Слои несущих элементов и теплоизоляционного материала выполняют и теплозащитную функцию. Тепловой процесс передачи теплоты через разделяющую стенку относится к процессу теплопередачи. Поддержание требуемой температуры во внутренних помещениях зависит от термического сопротивления ограждающей конструкции здания.

Расчет требуемого значения сопротивления теплопередаче определяется по максимальной тепловой нагрузке на ограждающую конструкцию здания. Величина максимальной тепловой нагрузки на ограждающие конструкции определяется по самому холодному месяцу года в отопительном сезоне. Для

большинства климатических зон России самым холодным месяцем году является январь. Для климатической зоны Волгоградская область (гг. Волгоград и Волжский) среднесуточная температура окружающего воздуха составляет -10°C . Требуемая из условий отопления температура воздуха в помещении составляет 18°C . Тогда максимальная плотность тепловой нагрузки на ограждающие конструкции здания равна:

$$l_t = \frac{q_t}{F} = \frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot (t_{\text{пом}} - t_{\text{нв}}), \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Общее термическое сопротивление ограждающей конструкции здания равно:

$$R_{\Sigma} = \sum_i R_i = R_1 + R_2 + R_3$$

Отдельные составляющие общего сопротивления теплопередаче равны:

сопротивление со стороны помещения $R_1 = \frac{1}{\alpha_{\text{пом}}}$

сопротивление со стороны наружного воздуха $R_3 = \frac{1}{\alpha_{\text{нв}}}$

сопротивление многослойной стенки

$$R_2 = \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}.$$

Отсутствие данных о значениях температур стенок на границах отдельных участков теплопередающего тракта затрудняет решение задачи. Разрешить проблему можно, если определить значения температур стенок на участках теплоотдачи. Определить коэффициенты теплоотдачи со стороны поверхности помещения и коэффициент теплоотдачи со стороны наружного воздуха. Для определения коэффициента теплоотдачи со стороны помещения можно по уравнению:

$$\alpha_1 = 9,74 + 0,07 \cdot (t_{\text{см}2} - t_2), \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} \right].$$

Величина плотности теплового потока со стороны помещения равна:

$$j_t = [9,74 + 0,07(t_{\text{пом}} - t_{\text{ст}})] \cdot (t_{\text{пом}} - t_{\text{ст}}) = 9,74 \cdot \delta_1 + 0,07 \cdot \delta_1^2, \quad \text{где } \delta_1 = t_{\text{пом}} - t_{\text{см}1}$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны наружного воздуха можно определить по критериальному уравнению теплоотдачи. В случае свободной конвекции (безветрие) уравнение теплоотдачи имеет вид:

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны внешней стенки:

$$\alpha_2 = 0,15 \cdot \lambda \cdot \left(0,7 \cdot \frac{g}{\nu^2} \cdot \beta \right)^{0,33} \cdot (\delta t)^{0,33}.$$

Плотность теплового потока со стороны наружного воздуха:

$$j_{i2} = b_2 \cdot (\delta t_2)^{1,33}.$$

В этом выражении: $b_2 = 0,15 \cdot \lambda \cdot \left(0,7 \cdot \frac{g}{\nu^2} \cdot \beta \right)^{0,33}$, $\delta t_2 = t_{ст2} - t_b$.

Число Прандтля для воздуха $Pr = 0,7$ и практически не зависит от температуры. Таким образом, получили два выражения для оценки величины плотности тепловых потоков на внешних границах ограждающей конструкции здания. В установившемся режиме оба этих потока равны друг другу, т.е.:

$$9,74 \cdot \delta t_1 + 0,07 \cdot (\delta t_1)^2 = b_2 \cdot (\delta t_2)^{1,33}$$

Теперь необходимо установить при каких значениях переменных δt_1 и δt_2 это уравнение превратится в тождество. Эти значения зафиксировать и используя их определить температуры на внешних поверхностях ограждающих конструкций здания. Температура поверхности стенки со стороны помещения равна:

$$t_{ст.пом} = t_{пом} - \delta t_1.$$

Температура со стороны наружного воздуха:

$$t_{ст2} = t_b + \delta t_2.$$

Теперь переходим к определению толщины слоя теплоизолирующего материала. Плотность теплового потока через стенки количественно определена при поиске перепада температур на участках теплоотдачи:

$$j_i = 9,74 \cdot \delta t_1 + 0,07 \cdot \delta t_1^2, \quad j_{i2} = b_2 \cdot (\delta t_2)^{1,33}.$$

Тепловой поток через ограждающую стенку конструкции (участок теплопроводности стенки) равен:

$$j_t = \frac{j_{t1}}{R_\Sigma} = \frac{j_{t2}}{R_\Sigma}$$

Общее термическое сопротивление стенки равно:

$$R_\Sigma = \frac{j_t}{t_{ст1} - t_{ст2}}$$

Сопротивления слоя изоляционного материала равно:

$$R_{из} = R_\Sigma - \frac{\delta_{бет}}{\lambda_{бет}} - \frac{\delta_{кир}}{\lambda_{кир}}$$

Требуемая толщина слоя изоляционного материала:

$$\delta_{из} = \frac{R_{из}}{\lambda_{из}}$$

Таблица 3.5

Варианты заданий по многослойной стенке

п/п	место строительства	толщина стенки, см		утеплитель	температура в помещении, °С
		внешний материал	внутренний материал		
1	Мурманск	бетон (35)	с.кирпич (25)	шлаковата	18
2	Петрозаводск	бетон (30)	с.кирпич 0,12)	стекловата	19
3	Архангельск	к.бетон (25)	к. кирпич (25)	шлаковата	20
4	Вологда	бетон (30)	к. кирпич (25)	стекловата	21
5	Новгород	сосна (20)	-	шлаковата	22
6	Санкт-Петербург	к.бетон (20)	с.кирпич (25)	стекловата	21
7	Тверь	бетон (30)	к. кирпич (25)	шлаковата	20
8	Сыктывкар	сосна (15)	к. кирпич (25)	стекловата	19
9	Пермь	сосна (25)	-	шлаковата	18
10	Челябинск	к.бетон (20)	с.кирпич (25)	стекловата	19
11	Уфа	бетон (30)	к. кирпич (25)	шлаковата	20
12	Казань	сосна (15)	-	стекловата	21
13	Самара	к.бетон (25)	к. кирпич (25)	шлаковата	22
14	Ижевск	бетон (30)	с.кирпич (25)	стекловата	23
15	Пенза	к.бетон (30)	к. кирпич (25)	шлаковата	22
16	Тамбов	к.бетон (30)	с.кирпич (25)	стекловата	21
17	Белгород	бетон (30)	к. кирпич (25)	шлаковата	20

18	Саратов	сосна (20)	-	стекловата	19
19	Волгоград	к.бетон (20)	с.кирпич (25)	шлаковата	18
20	Астрахань	бетон (30)	к. кирпич (25)	стекловата	19
21	Элиста	к.бетон (30)		шлаковата	20
22	Ярославль	к.бетон (35)	к. кирпич (25)	стекловата	21
23	Ростов на Дону	бетон (30)	с. кирпич (25)	шлаковата	22

Контрольные вопросы

1. Что называется теплоотдачей, и каким уравнением определяется передаваемая в этом случае теплота?
2. Каковы особенности передачи теплоты при ламинарном и турбулентном движении жидкости?
3. Физический смысл и единицы измерения коэффициента теплоотдачи?
4. Функцией каких величин является коэффициент теплоотдачи и какими путями его можно увеличить?
5. Почему для определения коэффициента теплоотдачи применяют теорию подобия?
6. Запишите в общем виде уравнение подобия для конвективного теплообмена и укажите, почему при вынужденной конвекции из него может быть исключено число Грасгофа, а при естественной – число Рейнольдса?
7. Влияет ли направление теплового потока на величину коэффициента теплоотдачи? Если да, то как это учитывается в уравнениях подобия?
8. Какие температуры и линейные размеры могут быть приняты в качестве определяющих в различных задачах теплоотдачи, включая и данную работу?
9. Что понимается под граничными условиями. Сформулируйте и приведите аналитическую запись граничных условий первого, второго и третьего рода.
10. Что называется теплопередачей? Приведите формулы теплового потока через плоскую и цилиндрическую стенку при граничных условиях третьего рода.
11. Как определяются температуры поверхностей плоской стенки при граничных условиях третьего рода?
12. Что такое коэффициент теплоотдачи, каковы его физический смысл и аналитическое выражение для плоской стенки?
13. Что представляет собой общее термическое сопротивление, как оно определяется? Запишите выражение для общего термического сопротивления в случае плоской стенки.
14. За счет увеличения каких коэффициентов теплоотдачи можно интенсифицировать теплоотдачу при: а) $\alpha_1 \gg \alpha_2$; б) $\alpha_1 \ll \alpha_2$; в) $\alpha_1 \approx \alpha_2$. Какое существует общее правило для интенсификации теплопередачи? Ответ поясните анализом уравнения коэффициента теплопередачи для плоской стенки.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П. 1.1

Свойства горючих веществ (топлив)

	содержание компонентов, массовые доли			теплота сгорания
	C ^p	H ^p	O ^p	Q, кДж/кг
Горючее				
Бензин	0,85	0,15	-----	45000
Керосин	0,86	0,14	-----	43150
Соляровое масло	0,865	0,135	-----	42300
Мазут	0,87	0,13	-----	40650
Этанол	0,52	0,13	0,35	27100
Метанол	0,375	0,125	0,5	20060
Пропан	0,818	0,182	-----	46400
Бутан	0,827	0,173	-----	45800
Метан	0,75	0,25	-----	55644
Этан	0,800	0,200	-----	53003

Таблица П. 1.2

Уравнения для определения средних изохорных массовых теплоемкостей (с_v), (в интервале 0...Т, К)

Газ	Формула теплоемкости, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$R_{\text{ци}}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	показатель адиабаты
Воздух	$0,691 + 7,1 \cdot 10^{-5} T$	0,293	1,40
СО ₂	$0,775 + 11,7 \cdot 10^{-5} T$	0,189	1,31
Н ₂ O (пар)	$1,328 + 28,07 \cdot 10^{-5} T$	0,462	
Азот	$0,716 + 7,54 \cdot 10^{-5} T$	0,267	1,40
О ₂	$0,628 + 6,75 \cdot 10^{-5} T$	0,260	1,40
Метан	$1,09 + 3,779 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,519	1,32
Этан	$0,149 + 6,077 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,277	1,20
Пропан	$-0,101 + 6,984 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,189	1,16
Бутан	$0,008 + 5,790 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,143	1,10

Таблица П.3.2

**Термодинамические свойства пара и воды в состоянии насыщения
(по давлению)**

р, бар	t_n , °С	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ , кг/м ³	h , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	S' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	S'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
0,010	6,936	0,0010001	130,04	0,007690	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,020	17,486	0,0010014	67,24	0,01487	73,40	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,025	21,071	0,0010021	54,42	0,01838	88,36	2539,5	2451,1	0,3119	8,6424
0,030	24,071	0,0010028	45,77	0,02185	100,93	2545,3	2444,3	0,3547	8,5784
0,040	29,95	0,0010042	34,93	0,02863	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,05	32,89	0,0010054	28,34	0,03541	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,06	36,17	0,0010065	23,77	0,04208	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,08	41,53	0,0010085	18,13	0,05516	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2273
0,10	45,82	0,0010102	14,70	0,06805	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,14	52,57	0,0010132	10,69	0,09353	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,18	57,82	0,0010159	8,448	0,1184	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,20	60,08	0,0010171	7,652	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,25	64,99	0,0010198	6,20	0,1613	272,03	2617,6	2345,5	0,8934	7,8300
0,30	69,12	0,0010223	5,232	0,1911	289,30	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,4	75,87	0,0010264	3,99	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,5	81,33	0,0010299	3,24	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,6	85,94	0,0010330	2,734	0,3658	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,8	93,50	0,0010385	2,089	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
1,0	99,62	0,0010432	1,696	0,5896	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
1,2	104,80	0,0010472	1,430	0,6992	439,34	2683,0	2243,6	1,3610	7,2972
1,6	113,31	0,0010543	1,092	0,9160	475,41	2696,3	2220,8	1,4550	7,2017
2,0	120,23	0,0010606	0,8860	1,129	504,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
2,6	128,73	0,0010684	0,929	1,443	541,2	2718,9	2177,7	1,6213	7,0399
3,0	133,54	0,0010733	0,6055	1,652	561,7	2725,5	2163,8	1,6716	6,9922
4,0	143,62	0,0010836	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
5	151,84	0,0010927	0,3749	2,667	640,1	2748,9	2108,7	1,8605	6,8221
6	158,84	0,001109	0,3156	3,169	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
8	170,41	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769,0	2048,1	2,0461	6,6630
10	179,88	0,0011273	0,1945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867

Таблица П.3.2 (продолжение)
Термодинамические свойства пара и воды в состоянии насыщения
(по давлению)

р, бар	t_n , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ , кг/м ³	h , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	g , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	S , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	S'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
12	187,95	0,0011385	0,1633	6,125	798,4	2784,6	1986,2	2,2156	6,5224
14	195,04	0,0011488	0,1408	7,102	830,0	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
16	201,36	0,0011587	0,1238	8,080	858,3	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
18	207,10	0,0011678	0,1104	9,055	884,2	2796,5	1212,3	2,3975	6,3794
20	212,36	0,0011768	0,09961	10,04	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
24	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2801,8	1850,0	2,5346	6,2727
28	230,04	0,0012088	0,01742	14,00	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
30	233,83	0,0012164	0,06663	15,01	1009,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
35	242,54	0,0012344	0,05706	17,53	1048,8	2802,8	1753,0	2,7251	6,1249
40	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
50	264,91	0,0012858	0,03943	25,36	1154,2	2793,9	1639,6	2,9210	5,9739
60	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2784,4	1570,5	2,0276	5,8894
70	285,80	0,0013510	0,02738	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
80	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
90	303,31	0,0014174	0,02049	48,80	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,5783
100	310,96	0,0014522	0,01803	55,47	1407,9	2724,8	1316,9	3,6101	5,6147
110	318,04	0,0014886	0,01597	62,62	1450,2	2705,2	1255,0	3,4297	5,5528
120	324,64	0,001527	0,01426	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,4930
130	330,81	0,001568	0,01278	78,22	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
140	330,63	0,001611	0,01149	87,04	1570,8	2637,9	1067,9	3,6233	5,3731
160	347,32	0,001710	0,009319	107,3	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
180	356,96	0,001839	0,007505	133,2	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
200	365,71	0,00203	0,00586	170,5	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,9280
220	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016,0	2168,0	152,0	4,3030	4,5910

**Физические параметры воды на линии насыщения
при давлении 101325 Па (760 мм.рт.ст.)**

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	999,9	4,212	55,1	13,08	1788,4	1,789	13,67
10	999,7	4,191	57,4	13,72	1305,7	1,306	9,52
20	998,2	4,183	59,9	14,33	1004,5	1,006	7,02
30	995,7	4,174	61,8	14,86	801,5	0,805	5,42
40	992,2	4,174	63,5	15,31	653,3	0,659	4,31
50	988,1	4,174	64,8	15,70	549,4	0,556	3,54
60	983,1	4,179	65,9	16,06	469,4	0,478	2,98
70	977,8	4,187	66,8	16,31	406,1	0,415	2,55
80	971,8	4,195	67,4	16,56	355,1	0,365	2,21
90	965,3	4,208	68,0	16,75	314,9	0,326	1,95
100	958,4	4,220	68,4	16,89	282,5	0,295	1,75

**Физические параметры сухого воздуха при давлении
101325 Па (760 мм.рт.ст.)**

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^8, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,01	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688

Таблица 4.3.

Критериальные уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи

	Уравнение	Пределы применения
Течение в трубах	$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$	$Re \geq 10^4$
	$Nu = 0,008 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,43}$	$2300 < Re < 10^4$
	$Nu = 1,4 \cdot \left(Re \cdot \frac{d}{L}\right)^{0,4} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$	$Gr \leq 4 \cdot Re \cdot Nu$, $Re > 10, \frac{L}{d} > 10$
Обтекание труб	$Nu = 0,56 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_\varphi$	$Re < 10^3$ для коридорных и шахматных пучков
	$Nu = 0,22 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_\varphi$	$Re > 10^3$ для коридорных пучков
	$Nu = 0,4 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_\varphi$	$Re > 10^3$ для шахматных пучков
одиночная вертикальная труба или вертикальная поверхность	$Nu = 0,76 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$	$10^3 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 10^9$
	$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$	$(Gr \cdot Pr) \geq 10^9$
одиночная горизонтальная труба	$Nu = 0,50 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$	$10^3 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 10^9$
одиночная горизонтальная труба, обдуваемая потоком среды	$\overline{Nu} = 0,5 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$	$5 \leq Re \leq 1 \cdot 10^3$
	$\overline{Nu} = 0,25 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$	$1 \cdot 10^3 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$

Список рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Тишин О.А., Синьков А.В., Мокрецова И.С. Тепловые процессы: учеб. пособие /О.А. Тишин, А.В. Синьков, И.С. Мокрецова; ВПИ (филиал) ВолгГТУ.- Волгоград, 2010.-110 с.
2. Лапшина С.В. Техническая термодинамика и теплотехника Сборник «Учебные пособия» Выпуск 7 [Электронный ресурс]/ С.В. Лапшина, Н.Ю. Бердникова Волгоград, ВолгГТУ 2014 Свидетельство о регистрации № 20689
3. Луканин В.Н. Теплотехника Учебник для вузов 6-ое изд. Стер. Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер / под ред Луканина В.Н. Москва Высш. школа 2008.- 671 с. 2-ое изд. 2000.- 671 с.
4. Прибытков И.А. Теоретические основы теплотехники Учебное пособие / И.А. Прибытков, И.А. Левицкий / Под ред. Прибыткова И.А. .- М. Академия, 2004-464 с.
5. О.А. Тишин, А.В. Синьков, И.С. Мокрецова, Н.Ю. Бердникова Тепловые процессы при резании металлов: учеб. Пособие / О.А. Тишин, А.А. Синьков, И.С. Мокрецова, Н.Ю. Бердникова ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. 106 с.
6. Чечеткин А.В., Занемонец Н.А. Теплотехника. Учебник для хим.-техн. вузов/ А.В. Чечеткин, Н.А. Занемонец/ М.: Высшая школа, 1986, 344 с.
7. Тишин О.А., Мокрецова И.С. Теплотехника (лабораторный практикум) : учеб. пособие [Электронный ресурс]/О.А. Тишин, И.С. Мокрецова; ВПИ (филиал) ВолгГТУ.- Волгоград, 2016.-110 с.

Дополнительная литература

1. Теплотехника/Под. ред. Луканина В.Н. М.: Высшая школа, 2000 г.
2. Рабинович Г.П., Рябых П.М., Хохряков П.А. и др. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки. Под редакцией Судакова Е.Н., 3–е изд. М.: Химия, 1979 г. – 508 с.
3. Кирилин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1974 г. – 448 с.
4. Теплотехника / Под ред. Матвеева Г.А. М.,1981 г.
5. Синьков А.В., Грига А.Д., Дьяков М.В., Потапова Г.Б. Сборник семестровых работ по теплотехнике: учеб. пособие / ВолгГТУ. Волгоград, 2005 г.
6. Термодинамика и теплопередача. Лабораторный курс / Под ред. Злотина Г.Н. и др., Волгоград,1971 г. – 212 с.

Электронное учебное издание

Олег Александрович **Тишин**
Ирина Сергеевна **Мокрецова**

**ТЕПЛОТЕХНИКА И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ
РАСЧЕТЫ
(СБОРНИК СЕМЕСТРОВЫХ РАБОТ)**

Учебное пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2018 г. Поз. № 44.

Подписано к использованию 15.10.2018. Формат 60x84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 2,69.

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.
404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.