

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания для выполнения контрольной работы
для студентов направления подготовки

19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания
профиль 19.03.04.30 Технология продукции и организация общественного
питания заочной формы обучения

Красноярск 2022

Теплотехника: методические указания для выполнения контрольной работы для студентов направления 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания, всех форм обучения / сост.: С.Г. Марченкова / ИТиСУ СФУ; – Красноярск, 2022 – 31 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ	5
РАЗДЕЛ «ТЕРМОДИНАМИКА»	5
РАЗДЕЛ «ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА»	6
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ	8
ПРИЛОЖЕНИЯ	17

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение контрольной работы (расчётного задания) преследует следующие цели: глубже усвоить лекционный материал, дополнить лекционный материал информацией из учебника, научиться применять общие законы, формулы, соотношения к конкретным частным случаям, приобрести навыки проведения теплотехнических расчётов.

Контрольная работа состоит из пяти задач. Две задачи по разделу «ТЕРМОДИНАМИКА» и три по разделу «ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА». В разделе «ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ» сформулированы условия задач, и приведены таблицы с исходными данными. Выбор исходных данных производится из таблиц по номеру зачётной книжки (по последней и предпоследней цифре номера).

Расчётные формулы для решения задач выбираются из соответствующих разделов курса «теплотехника» (учебника или конспекта лекций). Перед решением задач необходимо внимательно изучить раздел «МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ».

Существенную помощь в решении задач может оказать раздел «ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ». Следует заметить, что алгоритмы решения задач, использованные в примерах, являются не единственно возможными – могут быть и другие алгоритмы решений.

При решении задач необходимо использовать численные значения физических свойств материалов и сред, указанных в условиях задач. Для облегчения работы студентов по выполнению контрольной работы в разделе «ПРИЛОЖЕНИЯ» приведён разнообразный справочный материал по физическим свойствам различных материалов и сред. Следует помнить, что физические свойства должны соответствовать параметрам, указанным в условиях задач (температуре, давлению, др.).

По ходу решения задач необходимо давать соответствующие пояснения. Величины, участвующие в расчётах, должны быть расшифрованы (названы). Необходимо указывать размерность (единицы измерения) всех величин, встречающихся по ходу расчёта. В конце решения каждой задачи следует свести воедино результаты расчёта, наподобие того, как это сделано в примере решения задач. Работа должна быть аккуратной и удобной для проверки (см. пример решения).

1. ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

РАЗДЕЛ «ТЕРМОДИНАМИКА»

Задача 1. Смесь, состоящая из M_1 киломолей углекислого газа и M_2 киломолей окиси углерода с начальными параметрами $p_1 = 5$ МПа и $T_1 = 2000$ К, расширяется до конечного объёма $V_2 = \varepsilon V_1$. Расширение может осуществляться по изотерме, по адиабате, по политропе с показателем n . Определить газовую постоянную смеси, её массу и начальный объём, конечные параметры смеси, работу расширения, теплоту процесса, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Дать сводную таблицу результатов и анализ её. Показать процессы на p - v и T - s диаграммах.

Данные, необходимые для решения задачи, взять из таблицы 1 по номеру зачётной книжки.

Таблица 1

Последняя цифра	M_1	M_2	Предпоследняя цифра	$\varepsilon = V_2/V_1$	n
	кмоль				
0	0,1	0,9	0	20	1,12
1	0,2	0,8	1	18	1,16
2	0,3	0,7	2	16	1,27
3	0,4	0,6	3	14	1,25
4	0,5	0,5	4	12	1,22
5	0,6	0,4	5	10	1,55
6	0,7	0,3	6	8	1,45
7	0,8	0,2	7	6	1,52
8	0,9	0,1	8	14	1,28
9	0,5	0,5	9	16	1,25

Указания. Показатель адиабаты, а следовательно, изохорную и изобарную теплоёмкости принять независимыми от температуры.

Ответить на вопросы.

1. Как зависит работа от показателя политропы и почему?
2. Как изменятся (численно) результаты расчётов адиабатного процесса, если учесть, что показатель адиабаты зависит от температуры?

Задача 2. Расход газа в поршневом одноступенчатом компрессоре составляет V_1 при давлении $p_1 = 0,1$ МПа и температуре t_1 . При сжатии температура газа повышается на 200°C . Сжатие происходит по политропе с показателем n . Определить конечное давление, работу сжатия и работу привода

компрессора, количество отведённой теплоты, а также теоретическую мощность привода компрессора.

Исходные данные для решения задачи выбрать из таблицы 2.

Таблица 2

Последняя цифра	V_1 , м ³ /мин.	t_1 , °С	Предпоследняя цифра	Газ	n
0	20	0	0	Воздух	1,35
1	25	7	1	He	1,45
2	30	10	2	O ₂	1,32
3	35	12	3	N ₂	1,33
4	40	15	4	CO	1,35
5	45	17	5	N ₂	1,34
6	50	20	6	O ₂	1,29
7	55	22	7	He	1,5
8	60	25	8	CO ₂	1,28
9	65	30	9	Воздух	1,32

Указания. Показатель адиабаты принять постоянной величиной.

Ответить на вопросы.

1. Как влияет показатель политропы на конечное давление при фиксированных значениях p_1 , t_2 и t_1 ?
2. Чем ограничивается p_2 в реальном компрессоре кроме ограничения по максимально допустимой конечной температуре?

РАЗДЕЛ «ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА»

Задача 3. По стальной трубе, внутренний и внешний диаметр которой соответственно d_1 и d_2 , а коэффициент теплопроводности $\lambda = 40$ Вт/(м·К), течёт газ со средней температурой t_1 . Коэффициент теплоотдачи от газа к стенке α_1 . Снаружи труба охлаждается водой с температурой t_2 . Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде α_2 . Определить коэффициент теплопередачи K от газа к воде, тепловой поток на один метр длины трубы q_l и температуры поверхностей трубы.

Данные для решения задачи выбрать из таблицы 3.

Таблица 3

Последняя цифра	d_1	d_2	$t_1, ^\circ\text{C}$	Предпоследняя цифра	$t_2, ^\circ\text{C}$	α_1	α_2
	мм					Вт/(м ² ·К)	
0	100	108	700	0	80	60	4000
1	110	118	800	1	90	54	4200
2	120	130	900	2	100	52	4400
3	130	140	1000	3	110	50	4600
4	140	150	1100	4	120	44	5000
5	150	162	1200	5	130	42	5200
6	160	172	1300	6	140	40	5400
7	170	182	1200	7	150	36	5600
8	180	194	1100	8	160	32	5800
9	190	204	1000	9	170	30	6000

Указания. Ответить на вопрос.

При каких значениях d_2/d_1 (близких к единице или гораздо больше единицы) цилиндрическую стенку для расчётов без больших погрешностей можно заменить плоской?

Задача 4. Определить потери теплоты в единицу времени с одного метра горизонтально расположенной трубы, охлаждаемой свободным потоком воздуха, если температура стенки трубы t_c , температура воздуха в помещении t_b , а диаметр трубы d .

Данные для решения задачи взять из таблицы 4.

Таблица 4

Последняя цифра	d , мм	Предпоследняя цифра	t_c	t_b
			⁰ С	
1	230	1	240	20
2	210	2	230	25
3	240	3	220	35
4	250	4	210	25
5	270	5	200	20
6	300	6	190	15
7	320	7	180	10
8	340	8	170	5
9	360	9	160	0

Указания. Лучистым теплообменом пренебречь.

Ответить на вопросы.

1. Какой из трёх режимов (ламинарный, переходный, турбулентный) осуществляется в вашем варианте задачи?
2. Как влияет диаметр трубы на коэффициент теплоотдачи при различных режимах течения?

Задача 5. Определить удельный лучистый тепловой поток q (Вт/м²) между двумя параллельно расположенными плоскими стенками, имеющими температуры t_1 и t_2 и степени черноты ε_1 и ε_2 , если между ними нет экрана. Определить q при наличии экрана со степенью черноты ε_3 (с обеих сторон).

Данные для решения задачи выбрать из таблицы 5.

Таблица 5

Последняя цифра	ε_1	ε_2	ε_3	Предпоследняя цифра	t_1, t_2	
					°С	
0	0,5	0,6	0,04	0	200	30
1	0,55	0,52	0,045	1	250	35
2	0,6	0,7	0,05	2	300	25
3	0,52	0,72	0,02	3	350	20
4	0,58	0,74	0,03	4	400	40
5	0,62	0,54	0,025	5	450	45
6	0,7	0,58	0,032	6	500	50
7	0,65	0,62	0,055	7	550	55
8	0,75	0,73	0,06	8	600	60
9	0,8	0,77	0,023	9	650	65

Указания. *Ответить на вопросы.*

1. Во сколько раз уменьшится тепловой поток, если принять в вашем варианте задачи $\varepsilon_3 = \varepsilon_1$ по сравнению с потоком без экрана?
2. Для случая $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ определите, какой экран из таблицы 5 даст наилучший эффект, а какой – наилучший?

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 1. Для расчёта необходимо знать молекулярную массу и газовую постоянную смеси газов. Молекулярная масса смеси газов вычисляется

как отношение массы смеси (сумма масс компонентов) к числу молей смеси (сумме числа молей компонентов). Необходимые величины для этого расчёта имеются в исходных данных к задаче. Газовая постоянная смеси газов вычисляется как отношение универсальной газовой постоянной к молекулярной массе газовой смеси. При определении теплоёмкостей воспользоваться формулой для теплоёмкости газовой смеси. Показатель адиабаты определить как отношение изобарной и изохорной теплоёмкостей газовой смеси. Расчёт начального объёма, конечных параметров смеси, работы расширения, теплоты процесса, изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии осуществляется с использованием уравнения состояния идеального газа, уравнения первого закона термодинамики, уравнений соответствующих термодинамических процессов (изотермического, адиабатного, политропного). Основные расчётные формулы имеются в соответствующих разделах учебника.

Задача 2. Расчёты следует вести по формулам для политропного процесса. При расчёте работы привода компрессора следует иметь в виду то, что компрессор работает циклично, периодически всасывая и выталкивая рабочее вещество (открытая термодинамическая система). Таким образом при определении работы привода должны быть учтены затраты на смену рабочего вещества в компрессоре. То есть работе привода соответствует располагаемая работа. Теоретическая мощность привода должна соответствовать расходу газа через компрессор.

Задача 3. Передача теплоты от газа к жидкости через стенку трубы представляет процесс **теплопередачи**. Все расчётные формулы при этом соответствуют теплопередачи через цилиндрическую стенку.

Задача 4. В данном случае речь идёт о процессе теплоотдачи при свободной конвекции от горизонтальной цилиндрической поверхности при поперечном обтекании её жидкостью (газом). Расчётные формулы соответствуют именно этому случаю.

Задача 5. В этом случае необходимо пользоваться расчётными соотношениями для лучистого теплообмена между двумя параллельными пластинами при отсутствии и наличии экранов.

Все необходимые расчётные формулы имеются в соответствующих разделах учебников по теплотехнике. Например, **учебник «Теплотехника» под редакцией Баскакова**.

Численные значения свойств веществ (теплоёмкость, плотность, коэффициенты теплопроводности, температуропроводности, динамический и кинематический коэффициенты вязкости, температурный коэффициент

объемного расширения) выбрать из справочной литературы или из приведенных ниже приложений при соответствующих параметрах.

3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 1

Исходные данные

Количества молей компонентов смеси (кмоль).	$M1 := 0.1$	$M2 := 0.9$
Температура газовой смеси (К).	$T1 := 2000$	
Давление газовой смеси (Па).	$p1 := 5 \cdot 10^6$	
Степень сжатия.	$\varepsilon := 20$	
Показатель политропы.	$n := 1.12$	
Молекулярные массы компонентов (кг/кмоль).	$\mu1 := 44$	$\mu2 := 28$

Расчёт

- Расчёт молекулярной массы смеси, кг/кмоль. $\mu_{см} := \frac{M1 \cdot \mu1 + M2 \cdot \mu2}{M1 + M2}$
 $\mu_{см} = 29.6$
- Расчёт массы смеси (кг). $m_{см} := M1 \cdot \mu1 + M2 \cdot \mu2$
 $m_{см} = 29.6$
- Расчёт газовой постоянной смеси, Дж/(кг К). $R := \frac{8134}{\mu_{см}}$ $R = 274.797$
- Первоначальный объём смеси (м³) $V1 := m_{см} \cdot R \cdot \frac{T1}{p1}$ $V1 = 3.254$
- Расчёт изотермического процесса
 - Работа процесса (Дж): $Lt := m_{см} \cdot (R \cdot T1 \cdot \ln(\varepsilon))$
 $Lt = 4.873 \times 10^7$
 - Теплота процесса равна работе процесса (Дж): $qt := Lt$
 - Изменение внутренней энергии (Дж): $\Delta ut := 0$
 - Изменение энтальпии (Дж): $\Delta it := 0$
 - Изменение энтропии (Дж/К): $\Delta st := \frac{qt}{T1}$ $\Delta st = 2.437 \times 10^4$

6. Расчёт адиабатного процесса

6.1. Определение показателя адиабаты.

6.1.1. Изобарные и изохорные теплоёмкости компонентов, кДж/(кмоль К) - справочн.

$$c_{p1} := 37.4 \quad c_{p2} := 29.1 \quad c_{v1} := 29.1 \quad c_{v2} := 20.8$$

6.1.2. Показатель адиабаты

$$k := \frac{\left(M1 + M2 \cdot \frac{c_{p2}}{c_{p1}} \right) \cdot \frac{c_{p1}}{c_{v1}}}{\left(M1 + M2 \cdot \frac{c_{v2}}{c_{v1}} \right)} \quad k = 1.384$$

6.2. Работа адиабатного процесса, Дж.

$$L_s := m_{см} \cdot R \cdot T_1 \cdot \frac{\left[1 - \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{k-1} \right]}{k - 1}$$

$$L_s = 2.896 \times 10^7$$

6.3. Теплота адиабатного процесса равно нулю, Дж.

$$q_s := 0$$

6.4. Изменение внутренней энергии адиабатного процесса равно работе процесса с обратным знаком, Дж.

$$\Delta u_s := -L_s \quad \Delta u_s = -2.896 \times 10^7$$

6.5. Изменение энтальпии адиабатного процесса, Дж.

$$\Delta i_s := \frac{k \cdot p_1 \cdot V_1 \cdot \left(\varepsilon^{1-k} - 1 \right)}{(k - 1)} \quad \Delta i_s = -4.008 \times 10^7$$

6.6. Изменение энтропии в адиабатном процессе равно нулю.

$$\Delta s := 0$$

7. Политропный процесс

7.1. Работа политропного процесса (Дж):

$$L_p := m_{см} \cdot R \cdot T_1 \cdot \frac{\left(1 - \varepsilon^{1-n} \right)}{n - 1}$$

$$L_p = 4.094 \times 10^7$$

7.2. Теплота политропного процесса (Дж):

$$q_p := m_{см} \cdot \left[L_p + R \cdot \frac{\left(\varepsilon^{1-n} \cdot p_1 \cdot \frac{V_1}{m_{см} \cdot R} - T_1 \right)}{k - 1} \right] \quad q_p = 1.199 \times 10^9$$

7.3. Изменение внутренней энергии политропного процесса (Дж):

$$\Delta u_p := m_{см} \cdot R \cdot \frac{\left(\varepsilon^{1-n} \cdot p_1 \cdot \frac{V_1}{m_{см} \cdot R} - T_1 \right)}{k - 1} \quad \Delta u_p = -1.28 \times 10^7$$

7.4. Изменение энтальпии политропного процесса:

7.4.1. Изобарная теплоёмкость c_p (Дж/(кг К)) и конечная температура T_2 (К) политропного процесса:

$$c_p := R \cdot \frac{k}{k - 1} \quad T_2 := \varepsilon^{1-n} \cdot p_1 \cdot \frac{V_1}{m_{см} \cdot R}$$

7.4.2. Изменение энтальпии (Дж): $\Delta ip := m_{cm} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$ $\Delta ip = -1.771 \times 10^7$

7.5. Изменение энтропии политропного процесса:

7.5.1. Теплоёмкость политропного процесса c_n (Дж/(кг К)): $c_n := \left(\frac{R}{n-1} \right) - \left(\frac{R}{k-1} \right)$

7.5.2. Изменение энтропии (Дж/К): $\Delta sp := m_{cm} \cdot c_n \cdot \left(\ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right)$ $\Delta sp = -1.675 \times 10^4$

Результаты расчётов

Работа процесса (Дж) $L_t = 4.873 \times 10^7$ $L_s = 2.896 \times 10^7$

$$L_p = 4.094 \times 10^7$$

Теплота процесса (Дж) $q_t = 4.873 \times 10^7$ $q_s = 0$

$$q_p = 1.199 \times 10^9$$

Изменение внутренней энергии (Дж) $\Delta ut = 0$ $\Delta us = -2.896 \times 10^7$

$$\Delta up = -1.28 \times 10^7$$

Изменение энтальпии (Дж) $\Delta it = 0$ $\Delta is = -4.008 \times 10^7$

$$\Delta ip = -1.771 \times 10^7$$

Изменение энтропии (Дж/К) $\Delta st = 2.437 \times 10^4$ $\Delta s = 0$

$$\Delta sp = -1.675 \times 10^4$$

Задача 2

Исходные данные

Расход газа через компрессор (м³/мин) - $V_{21} := 20$

Начальная температура газа (К) - $T_{21} := 273$

Молекулярная масса газа (кг/кмоль) - $\mu_{21} := 29$

Показатель политропы - $n_2 := 1.35$

Конечная температура политропного сжатия (К) - $T_{22} := 473$

Начальное давление газа (Па) - $p_{21} := 10^5$

Показатель адиабаты газа (справочн.) - $k_2 := 1.4$

Расчёт

1. Конечное давление при политропном сжатии (Па).

$$p_{22} := p_{21} \cdot \left(\frac{T_{22}}{T_{21}} \right)^{\frac{n_2}{n_2-1}} \quad p_{22} = 8.331 \times 10^5$$

2. Работа сжатия компрессора

2.1. Газовая постоянная воздуха (кДж/кг К).

$$R2 := \frac{8.314}{\mu21}$$

$$R2 = 0.287$$

2.2. Массовый расход газа (кг/с).

$$m2 := p21 \cdot \frac{V21}{R2 \cdot T21 \cdot 60 \cdot 1000}$$

$$m2 = 0.426$$

2.2. Работа сжатия (кВт).

$$L2 := R2 \cdot \frac{(T21 - T22) \cdot m2}{(n2 - 1)}$$

$$L2 = -69.771$$

3. Работа привода компрессора равна располагаемой работе (кВт).

$$L2p := n2 \cdot L2$$

$$L2p = -94.192$$

4. Количество отводимой теплоты - теплота процесса (кВт).

4.1. Изохорная теплоёмкость газа (кДж/(кг К))

$$c2v := \frac{R2}{k2 - 1}$$

$$c2v = 0.717$$

4.2. Теплоёмкость воздуха в политропном процессе (кДж/(кг К))

$$c2n := c2v \cdot \frac{(n2 - k2)}{n2 - 1} \quad c2n = -0.102$$

4.3. Теплота процесса (кВт)

$$q2 := c2n \cdot (T22 - T21) \cdot m2$$

$$q2 = -8.721$$

5. Теоретическая мощность привода компрессора равна располагаемой работе выраженной в кВт.

$$N2 := L2p$$

$$N2 = -94.192$$

Результаты расчёта

Конечное давление (Па) -

$$p22 = 8.331 \times 10^5$$

Работа сжатия (кВт) -

$$L2 = -69.771$$

Работа привода компрессора (кВт) -

$$L2p = -94.192$$

Количество отведённой теплоты (кВт) -

$$q2 = -8.721$$

Теоретическая мощность привода (кВт) -

$$N2 = -94.192$$

Задача 3

Исходные данные

Внутренний и наружный диаметры трубы (м) -

$$d1 := 0.1$$

$$d2 := 0.108$$

Коэффициент теплопроводности трубы (Вт/(м К)) -

$$\lambda := 40$$

Температура газа в трубе ($^{\circ}\text{C}$) -

$$t1 := 700$$

Коэффициент теплоотдачи от газа к стенке (Вт/(м ² 0С)) -	$\alpha_1 := 60$
Температура охлаждающей воды снаружи (0С) -	$t_2 := 80$
Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде (Вт/(м ² 0С))-	$\alpha_2 := 4000$

Расчёт

1. Определение коэффициента теплопередачи через цилиндрическую стенку (Вт/(м 0С)).

$$k_l := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1} + \left(\frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\pi\lambda} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2}} \quad k_l = 18.486$$

2. Определение линейной плотности теплового потока (Вт/м) $q_l := k_l \cdot (t_1 - t_2)$

$$q_l = 1.146 \times 10^4$$

3. Температура наружной поверхности трубы (0С)

$$t_{H1} := t_2 + \frac{q_l}{\pi \cdot d_2 \cdot \alpha_2}$$

$$t_{H1} = 88.445$$

4. Температура внутренней поверхности трубы (0С)

$$t_{B1} := t_1 - \frac{q_l}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_1}$$

$$t_{B1} = 91.955$$

5. Коэффициент теплопередачи при наличии слоя накипи толщиной 2мм с коэффициентом теплопроводности 0.8 Вт/(м 0С)

$$k_{H1} := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1} + \left(\frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\pi\lambda} \right) + \left(\frac{\ln\left(\frac{d_2 + 0.004}{d_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0.8} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot (d_2 + 0.004)}} \quad k_{H1} = 16.312$$

6. Линейная плотность теплового потока с накипью (Вт/м) $q_{H1} := k_{H1} \cdot (t_1 - t_2)$

$$q_{H1} = 1.011 \times 10^4$$

7. Температура наружной поверхности трубы при наличии накипи (0С)

$$t_{H1H} := t_2 + q_{H1} \cdot \left[\left(\frac{\ln\left(\frac{d_2 + 0.004}{d_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0.8} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot (d_2 + 0.004)} \right] \quad t_{H1H} = 160.359$$

Результаты расчёта

Коэффициент теплопередачи (Вт/(м 0С)).

$$k_l = 18.486$$

Линейная плотность теплового потока (Вт/м).

$$q_l = 1.146 \times 10^4$$

Температура наружной поверхности трубы (0С).

$$t_{H1} = 88.445$$

Температура внутренней поверхности трубы ($^{\circ}\text{C}$).

$$t_{вн} = 91.955$$

Коэффициент теплопередачи при наличии накипи ($\text{Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$).

$$k_{н} = 16.312$$

Линейная плотность теплового потока при наличии накипи ($\text{Вт}/\text{м}$).

$$q_{лн} = 1.011 \times 10^4$$

Температура наружной поверхности трубы при наличии накипи ($^{\circ}\text{C}$).

$$t_{нн} = 160.359$$

Задача 4

Исходные данные

Горизонтальная труба охлаждается свободным потоком воздуха.

Температура стенки трубы ($^{\circ}\text{C}$) -

$$t_c := 250$$

Температура воздуха в помещении ($^{\circ}\text{C}$) -

$$t_b := 15$$

Наружный диаметр трубы (м) -

$$d := 0.2$$

Лучистым теплообменом пренебречь

Физические свойства воздуха при $t = (t_c + t_b)/2$:

- критерий Прандтля -

$$\text{Pr} := 0.688$$

- кинематический коэффициент вязкости ($\text{м}^2/\text{с}$) -

$$\nu := 25 \cdot 10^{-6}$$

- температурный коэффициент объёмного расширения ($1/^{\circ}\text{C}$) -

$$\beta := \frac{1}{(t_c + t_b) \cdot 0.5 + 273}$$

- коэффициент теплопроводности ($\text{Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$) -

$$\lambda_b := 3.5 \cdot 10^{-2}$$

Расчёты

1. Определение критерия Грасгофа $\text{Gr} := 9.81 \cdot \beta \cdot (t_c - t_b) \cdot \frac{d^3}{\nu^2}$ $\text{Gr} = 7.277 \times 10^7$

2. Определение режима движения воздуха и коэффициентов в критериальном уравнении

по произведению Грасгофа на Прандтль

$$\text{Pi} := \text{Gr} \cdot \text{Pr} \quad \text{Pi} = 5.007 \times 10^7 \quad c := 0.76 \quad n_4 := 0.25$$

3. Определение критерия Нуссельта $\text{Nu} := c \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{n_4}$ $\text{Nu} = 63.929$

4. Определение коэффициента теплоотдачи от трубы к воздуху ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C})$)

$$\alpha := \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_B}{d} \quad \alpha = 11.188$$

5. Определение линейной плотности теплового потока (Вт/м)

$$q_{l4} := \pi \cdot d \cdot \alpha \cdot (t_c - t_b) \quad q_{l4} = 1.652 \times 10^3$$

Результаты расчёта

Критерий Грасгофа	$\text{Gr} = 7.277 \times 10^7$
Коэффициенты критериального уравнения (справочн.)	$c = 0.76 \quad n_4 = 0.25$
Критерий Нуссельта	$\text{Nu} = 63.929$
Коэффициент теплоотдачи (Вт/(м ² 0С))	$\alpha = 11.188$
Линейная плотность теплового потока (Вт/м)	$q_{l4} = 1.652 \times 10^3$

Задача 5

Исходные данные

Лучистый теплообмен между двумя параллельными пластинами при отсутствии и наличии экрана.

Температура поверхности 1-ой пластины (К) -	$T_{51} := 473$
Температура поверхности 2-й пластины (К) -	$T_{52} := 303$
Степень черноты поверхности 1-й пластины -	$\varepsilon_1 := 0.5$
Степень черноты поверхности 2-й пластины -	$\varepsilon_2 := 0.6$
Степень черноты поверхности экрана (с обеих сторон)	$\varepsilon_э := 0.04$
Коэффициент излучения абсолютно черного тела (Вт/(м ² К ⁴)) -	$c_0 := 5.67$

Расчёт

1. Приведённая степень черноты поверхностей пластин

$$\varepsilon_{пр} := \left[(\varepsilon_2)^{-1} + (\varepsilon_1)^{-1} - 1 \right]^{-1} \quad \varepsilon_{пр} = 0.375$$

2. Плотность лучистого потока между пластинами (Вт/м²)

$$q_{л} := \infty \cdot \varepsilon_{пр} \cdot \left[\left(\frac{T_{51}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{52}}{100} \right)^4 \right] \quad q_{л} = 885.068$$

3. Приведённая степень черноты системы с экраном

$$\varepsilon_{прэ} := \left[(\varepsilon_1)^{-1} + (\varepsilon_2)^{-1} - 2 + \frac{2}{\varepsilon_3} \right]^{-1} \quad \varepsilon_{прэ} = 0.019$$

4. Плотность лучистого потока в системе с экраном (Вт/м²)

$$q_{лэ} := \infty \cdot \varepsilon_{прэ} \cdot \left[\left(\frac{T_{51}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{52}}{100} \right)^4 \right] \quad q_{лэ} = 45.681$$

Результаты расчёта

Плотность лучистого потока без экрана (Вт/м²) - $q_{л} = 885.068$

Плотность лучистого потока с экраном (Вт/м²) - $q_{лэ} = 45.681$

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Соотношение между единицами физических величин (работы, энергии и количества тепла) подлежащими изъятию, и единицами СИ

Величина	Дж	кДж	эрг	кг·м	Вт·ч	кал	ккал
1 Дж	1	10 ⁻³	10 ⁷	0,102	2,78·10 ⁻⁴	0,239	2,39·10 ⁻⁴
1 кДж	10 ³	1	10 ¹⁰	102	0,278	239	0,239
1 эрг	10 ⁻⁷	10 ⁻¹⁰	1	1,02·10 ⁻⁸	2,78·10 ⁻¹¹	2,39·10 ⁻⁸	2,39·10 ⁻¹¹
1 кг·м	9,81	9,81·10 ⁻³	9,81·10 ⁷	1	2,73·10 ⁻³	2,34	2,34·10 ⁻³
1 Вт·ч	3,6·10 ³	3,6	3,6·10 ¹⁰	367	1	859	0,859
1 кал	4,1868	4,1868·10 ⁻³	4,1868·10 ⁷	0,427	1,16·10 ⁻³	1	10 ⁻³
1 ккал	4,1868·10 ³	4,1868	4,1868·10 ¹⁰	427	1,16	10 ³	1

Приложение 2. Соотношение между единицами давления

Величина	Н/м ²	бар	Тех. атм.	Физ. атм.	Мм рт. ст.	Мм вод. ст.
1 Н/м ² =Па	1	10 ⁻⁵	1,02·10 ⁻⁵	9,87·10 ⁻⁶	7,5·10 ⁻³	0,102
1 бар	10 ⁵	1	1,02	0,987	750	1,02·10 ⁻⁴
1 тех. атм	9,81·10 ⁴	0,981	1	0,968	735,6	10 ⁴
1 физ. атм	1,013·10 ⁵	1,013	1,0332	1	760	1,0332·10 ⁴
1 мм рт. ст.	133,3	133,3·10 ⁻⁵	1,36·10 ⁻³	1,31·10 ⁻³	1	13,6
1 мм вод. ст.	9,81	9,81·10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	0,968·10 ⁻⁴	7,356·10 ⁻²	1

Приложение 3.. Средняя объемная теплоемкость двух- и трехатомных газов, водяных паров и влажного воздуха ($d = 10$ г/кг при $p = const$), кДж/м³

T, °C	C' N ₂	C' CO ₂	C' H ₂ O	C' ВОЗД
0	1,29	1,591	1,492	1,318
100	1,295	1,712	1,507	1,322
200	1,301	1,795	1,522	1,33
300	1,308	1,865	1,545	1,34
400	1,316	1,925	1,565	1,355
500	1,326	1,995	1,584	1,368
600	1,338	2,045	1,614	1,38
700	1,353	2,094	1,642	1,397
800	1,361	2,139	1,672	1,413
900	1,38	2,178	1,693	1,423
1000	1,39	2,212	1,721	1,435
1100	1,405	2,241	1,75	1,449
1200	1,415	2,272	1,771	1,461
1300	1,422	2,3	1,8	1,47
1400	1,435	2,318	1,828	1,481
1500	1,433	2,357	1,845	1,494
1600	1,453	2,362	1,872	1,508
1700	1,46	2,381	1,895	1,515
1800	1,465	2,396	1,921	1,521
1900	1,474	2,42	1,945	1,528
2000	1,482	2,426	1,956	1,535
2200	1,507	2,445	1,984	1,548
2400	1,516	2,47	2,005	1,56

Приложение 4.. Теплофизические свойства некоторых газов

Газы	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/мК}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/кг}\cdot\text{К}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^5, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
Азот	0	0,0243	1,250	1,030	18,87	1,363	0,722
Водород	0	0,1721	0,0899	14,192	134,9	9,571	0,71
Кислород	0	0,0247	1,429	0,915	18,89	1,354	0,717
Оксид углерода	0	0,0233	1,250	1,039	17,9	1,33	0,741
Углекислый газ	0	0,0146	1,977	0,815	9,1	0,71	0,782
Гелий	0	0,141	0,2	5,20	$1,356 \cdot 10^4$	19,52	0,702

Примечание. λ - коэффициент теплопроводности, ρ - плотность, ν - кинематический коэффициент вязкости, c_p - изобарная теплоемкость, a - коэффициент температуропроводности, Pr - критерий Прандтля.

Приложение 5. Параметры насыщенного водяного пара в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа} \cdot 10^2$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$\Gamma, \text{кДж/кг}$	$s', \text{кДж/кг}\cdot\text{К}$	$s'', \text{кДж/кг}\cdot\text{К}$
0,01	0,006108	0,0010002	206,175	0,00061	2500,64	2500,64	0	9,1544
5	0,008719	0,00100008	147,15	21,0496	2509,98	2488,93	0,0764	9,0242
10	0,012271	0,00100035	106,42	42,0364	2519,24	2477,2	0,1511	8,8996
15	0,017041	0,00100095	77,973	62,9826	2528,44	2465,45	0,2245	8,7803
20	0,023368	0,00100184	57,836	83,9034	2537,58	2453,68	0,2964	8,6662
25	0,031663	0,00100301	43,401	104,809	2546,68	2441,87	0,3671	8,5569
30	0,042418	0,00100442	32,929	125,706	2555,73	2430,02	0,4266	8,4523
35	0,056218	0,00100605	25,245	146,6	2564,74	2418,14	0,505	8,352
40	0,07375	0,00100789	19,546	167,495	2573,7	2406,21	0,5722	8,2559
45	0,095818	0,00100993	15,276	188,393	2582,62	2394,23	0,6384	8,1637
50	0,12335	0,0010121	12,045	209,296	2591,48	2382,18	0,7036	8,0752
55	0,1574	0,0010145	9,5779	230,208	2600,28	2370,08	0,7678	7,9902
60	0,19919	0,0010171	7,6776	251,129	2609,03	2357,9	0,8311	7,9085
65	0,25008	0,0010199	6,2012	272,062	2617,7	2345,63	0,8934	7,8299
70	0,3116	0,0010228	5,0453	293,009	2626,29	2333,28	0,9549	7,7543
75	0,38547	0,0010258	4,1332	313,971	2634,8	2320,83	1,0155	7,6815
80	0,47359	0,001029	3,4083	334,952	2643,22	2308,27	1,0753	7,6114
85	0,57803	0,0010324	2,8282	355,953	2651,55	2295,59	1,1344	7,5438
90	0,70109	0,0010359	2,3609	376,977	2659,76	2282,79	1,1926	7,4785
95	0,84527	0,0010396	1,982	398,027	2667,86	2269,84	1,2501	7,4155
100	1,01325	0,0010434	1,673	419,105	2675,84	2256,73	1,307	7,3546
105	1,208	0,0010474	1,4193	440,21	2683,68	2243,47	1,3631	7,2957
110	1,4326	0,0010515	1,2101	461,36	2691,38	2230,02	1,4186	7,2387
115	1,6905	0,0010558	1,0364	482,54	2698,93	2216,39	1,4734	7,1834
120	1,9854	0,0010603	0,89167	503,76	2707,31	2202,54	1,5277	7,1298
125	2,3208	0,0010649	0,77041	525,03	2713,52	2188,49	1,5814	7,0779
130	2,7011	0,0010697	0,66837	546,35	2720,54	2174,19	1,6345	7,0273
135	3,1305	0,0010747	0,58201	567,72	2727,37	2159,65	1,687	6,9782
140	3,6136	0,0010798	0,50865	589,15	2733,99	2144,85	1,7391	6,9304

145	4,1549	0,0010851	0,44611	610,64	2740,4	2129,76	1,7906	6,8838
150	4,7597	0,0010906	0,39259	632,19	2746,57	2114,38	1,8417	6,8384
155	5,433	0,0010962	0,34654	653,82	2752,5	2098,69	1,8923	6,794
160	6,1804	0,0011021	0,30685	675,51	2758,18	2982,66	1,9425	6,7506
165	7,0075	0,0011081	0,27247	697,29	2763,59	2066,3	1,9923	6,7082
170	7,9203	0,0011144	0,24262	719,15	2768,72	2049,56	2,0417	6,6666
175	8,9247	0,0011208	0,21659	741,11	2773,55	2032,45	2,0907	6,6258
180	10,027	0,0011275	0,19385	763,15	2778,09	2014,93	2,1394	6,5858
185	11,234	0,0011344	0,1739	785,3	2782,3	1997	2,1877	6,5464
190	12,552	0,0011415	0,15635	807,55	2786,18	1978,63	2,2356	6,5077
195	13,989	0,0011489	0,14088	829,92	2789,72	1959,8	2,2833	6,4695
200	15,55	0,0011565	0,12719	852,41	2792,85	1940,44	2,3307	6,4318
205	17,246	0,0011644	0,11505	875,02	2795,61	1920,59	2,3779	6,3945
210	19,079	0,0011726	0,10427	897,78	2797,98	1900,2	2,4247	6,3576
215	21,062	0,0011812	0,09465	920,67	2799,94	1879,27	2,4714	6,3211
220	23,201	0,00119	0,08606	943,72	2801,48	1857,76	2,5179	6,3649

Продолжение

t, °C	p, кПа·10 ²	v, м ³ /кг	v", м ³ /кг	i, кДж/кг	i", кДж/кг	г, кДж/кг	s кДж/ кг·К	s" кДж/ кг·К
225	25,504	0,0011992	0,07837	966,93	2802,59	1835,66	2,6541	6,249
230	27,979	0,0012087	0,07147	990,32	2803,25	1812,93	2,6103	6,2133
235	30,635	0,0012187	0,06527	1013,89	2803,43	1789,54	2,6562	6,1778
240	33,48	0,0012291	0,05967	1037,66	2803,13	1765,46	2,7021	6,1425
245	36,525	0,0012399	0,05463	1061,63	2802,3	1740,66	2,7479	6,1072
250	39,776	0,0012512	0,05006	1085,84	2800,93	1715,1	2,7936	6,0719
255	43,244	0,0012631	0,04592	1110,28	2799,01	1688,72	2,8392	6,0366
260	46,94	0,0012755	0,04215	1134,99	2796,48	1661,49	2,8849	6,0012
265	50,872	0,0012866	0,03872	1159,98	2793,32	1633,34	2,9306	5,9657
270	55,051	0,0013023	0,0356	1185,26	2789,48	1604,22	2,9764	5,9299
275	59,448	0,0013168	0,03275	1210,87	2784,92	1574,05	3,0223	5,8938
280	64,191	0,0013321	0,03013	1236,83	2779,6	1542,77	3,0683	5,8573
285	69,175	0,0013483	0,02774	1263,18	2773,44	1510,27	3,1145	5,8203
290	74,449	0,0013655	0,02584	1289,94	2766,39	1476,45	3,161	5,7827
295	80,025	0,0013839	0,02351	1317,17	2758,36	1441,19	3,2078	5,7444
300	85,917	0,0014036	0,02164	1344,91	2749,26	1404,36	3,2549	5,7051
305	92,136	0,0014247	0,01992	1373,2	2738,96	1365,76	3,3026	5,6648
310	98,697	0,0014475	0,01832	1402,13	2727,3	1325,17	3,3508	5,6232
315	105,61	0,0014722	0,01683	1431,76	2714,19	1282,43	3,3996	5,58
320	112,9	0,0014992	0,01545	1462,21	2699,69	1237,48	3,4493	5,5356
325	120,57	0,0015289	0,01417	1493,57	2683,55	1189,98	3,5001	5,4895
330	128,64	0,001562	0,01297	1526,01	2665,51	1139,5	3,552	5,4412
335	137,14	0,001599	0,01184	1559,73	2645,22	1085,49	3,6054	5,3903
340	146,08	0,001639	0,01078	1594,88	2622,08	1027,2	3,6606	5,3359
345	155,48	0,001686	0,009771	1631,86	2595,42	963,56	3,7181	5,2769
350	165,37	0,001741	0,008805	1671,23	2564,26	893,02	3,7788	5,2119
355	175,76	0,001807	0,007869	1713,92	2527,05	813,13	3,8441	5,1386
360	186,74	0,001894	0,006943	1761,54	2481,11	719,56	3,9164	5,0529

365	198,29	0,002016	0,005995	1817,58	2420,94	603,56	4,001	4,9465
370	210,52	0,002225	0,004932	1892,4	2330,73	438,38	4,1137	4,7953
374	220,87	0,00283	0,00348	2039	2151	112	4,3258	4,5029

Примечание.

Параметры критического состояния: температура - 237,116 °С; давление - 22,1145 МПа; объем - 0,003145 м³/кг; энтальпия - 2094,8 кДж/кг; энтропия - 4,43 кДж/кг·К.

p – давление, v' , v'' – удельные объемы жидкости и пара соответственно, r – теплота парообразования, i' , i'' – удельная энтальпия жидкости и пара соответственно, s' , s'' – удельная энтропия жидкости и пара соответственно.

Приложение 6. Параметры насыщенного водяного пара в зависимости от давления

P , кПа·10 ²	t_n , °С	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	r , кДж/кг	S' , кДж/кг·К	S'' , кДж/кг·К
0,01	6,936	0,0010001	130,04	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,015	13,001	0,0010007	88,38	54,61	2524,7	2470,1	0,1952	8,8268
0,02	17,486	0,0010014	67,24	73,4	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,025	21,071	0,0010021	54,42	88,36	2539,5	2451,1	0,3119	8,6424
0,03	24,078	0,0010028	45,77	100,93	2545,3	2444,4	0,3547	8,5784
0,035	26,674	0,0010035	39,56	11,81	2549,9	2438,1	0,3912	8,5222
0,04	28,95	0,0010042	43,93	121,33	2553,7	2432,3	0,2425	8,4737
0,05	32,89	0,0010054	28,23	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,06	36,17	0,0010065	23,77	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,07	39,02	0,0010075	20,56	163,39	2571,8	2408,4	0,5588	8,2734
0,08	41,53	0,0010085	18,13	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2263
0,09	43,73	0,0010094	16,22	183,31	2580,5	2397,2	0,6222	8,1854
0,1	45,82	0,0010102	14,7	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,12	49,44	0,0010118	12,37	206,96	2590,6	2383,7	0,9666	8,085
0,14	52,57	0,0010132	10,69	220,05	2596,1	2376	0,7368	8,0305
0,16	55,34	0,0010146	9,437	231,63	2601,1	2369,5	0,7722	7,9852
0,18	57,82	0,0010159	8,448	242,03	2605,4	2363,3	0,804	7,9445
0,2	60,08	0,0010171	7,652	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,25	64,99	0,0010198	6,201	272,03	2617,6	2345,5	0,8934	7,83
0,3	69,12	0,0010223	5,232	289,3	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,4	70,87	0,0010264	3,999	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,671
0,5	81,33	0,0010299	3,243	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,6	85,94	0,001033	2,734	359,9	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,7	89,95	0,0010359	2,367	376,79	2659,8	2283,1	1,192	7,4799
0,8	93,5	0,0010385	2,089	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,9	96,71	0,0010409	1,871	405,19	2670,2	2265,1	1,2699	7,3936
1	99,62	0,0010432	1,696	417,47	2674,9	2257,7	1,3026	7,3579
1,2	104,8	0,0010472	1,43	439,34	2683	2243,6	1,361	7,2972
1,4	109,31	0,0010509	1,237	458,42	2690,1	2231,7	1,4109	7,246
1,6	113,31	0,0010543	1,092	475,41	2696,3	2220,8	1,455	7,2017
1,8	116,93	0,0010575	0,9782	490,68	2701,8	2211,1	1,4945	7,1628

2	120,23	0,0010606	0,886	504,74	2706,8	2202	1,5306	7,1279
2,2	123,27	0,0010633	0,8103	517,7	2711	2193,3	1,5632	7,0953
2,4	126,09	0,0010659	0,7469	529,9	2714,9	2185	1,5931	7,0658
2,6	128,73	0,0010684	0,6929	541,2	2718,9	2177,7	1,6213	7,0399
2,8	131,2	0,0010709	0,6463	551,7	2722,3	2170,7	1,6471	7,0152
3	133,54	0,0010733	0,6055	561,7	2725,5	2163,9	1,6716	6,9922
3,5	138,87	0,0010787	0,5241	584,4	2732,3	2147,9	1,7276	6,9404
4	143,62	0,0010836	0,4623	604,6	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	623	2743,9	2120,9	1,8204	6,8572
5	151,84	0,0010927	0,3749	640,1	2748,8	2108,7	1,8605	6,8221

Продолжение

P , кПа·10 ²	t_n , С	v , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	q , кДж/кг	q'' , кДж/кг	q_0 , кДж/кг	S' , кДж/кг·К	S'' , кДж/кг·К
6	158,84	0,0011009	0,3156	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
7	164,96	0,0011081	0,2728	697,2	2763,7	2066,5	1,9923	6,709
8	170,41	0,0011149	0,2403	720,9	2769	2048,1	2,0461	6,663
9	175,36	0,0011213	0,2149	742,7	2773,7	2031	2,0945	6,6223
10	179,88	0,0011273	0,1945	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
11	184,05	0,001133	0,1775	781,3	2781,2	1999,9	2,1786	6,5523
12	187,95	0,0011385	0,1633	798,4	2784,6	1986,2	2,2156	6,5224
13	191,6	0,0011433	0,1512	814,6	2787,4	1972,7	2,251	6,4954
14	195,04	0,0011488	0,1408	830	2789,7	1969,7	2,2841	6,4699
15	198,28	0,0011538	0,1317	844,5	2791,8	1947,3	2,3148	6,4458
16	201,36	0,0011587	0,1238	858,3	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
17	204,3	0,0011633	0,1167	871,7	2795,3	1923,5	2,3712	6,4
18	207,1	0,0011678	0,1104	884,2	2796,5	1912,3	2,3975	6,3794
19	209,78	0,0011723	0,1048	896,6	2797,9	1901,3	2,4224	6,3597
20	212,37	0,0011768	0,09961	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,4311
22	217,24	0,0011851	0,09069	930,9	2800,6	1869,7	2,4923	6,3056
24	221,77	0,0011932	0,08324	951,8	2801,8	1850	2,5346	6,2727
26	226,04	0,0012011	0,07687	971,9	2802,6	1830,8	2,5734	6,2407
28	230,04	0,0012088	0,07142	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
30	233,83	0,0012164	0,06663	1008,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
35	242,54	0,0012344	0,05706	1049,8	2802,8	1753	2,7251	6,1242
40	250,33	0,001252	0,04977	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
50	263,91	0,0012853	0,03943	1154,2	2793,9	1639,6	2,921	5,9739
60	275,56	0,0013185	0,03243	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
70	285,8	0,001351	0,02738	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
80	294,98	0,0013838	0,02352	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
90	303,31	0,0014174	0,02049	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
100	310,96	0,0014522	0,01803	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
110	318,04	0,0014886	0,01597	1450,2	2705,2	1255	3,4297	5,5528
120	324,64	0,001527	0,01426	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,493
130	330,81	0,001568	0,01278	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
140	336,63	0,001611	0,01149	1570,8	2637,9	1067	3,6233	5,3731
160	347,32	0,00171	0,009319	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478

180	356,96	0,001839	0,007505	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
200	365,72	0,00203	0,00586	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,928
220	373,71	0,00269	0,00378	2009,7	2195,6	185,9	4,2943	4,5815

Приложение 7. Физические параметры для сухого воздуха ($P_{\text{баром}} = 0,1 \text{ МПа}$)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$c_p, \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$	$\lambda, \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	$a \cdot 10^5, \text{ м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Pr
-30	1,453	1,0132	0,0219	1,49	10,8	0,723
-20	1,395	1,009	0,0228	1,62	11,79	0,716
-10	1,342	1,009	0,0237	1,74	12,43	0,712
0	1,293	1,0048	0,0245	1,88	13,28	0,707
10	1,247	1,0048	0,0252	2,01	14,16	0,705
20	1,205	1,0048	0,026	2,15	15,06	0,703
30	1,165	1,0048	0,0268	2,29	16	0,701
40	1,128	1,0048	0,0276	2,43	16,96	0,699
50	1,093	1,0048	0,0284	2,56	17,95	0,698
60	1,06	1,0048	0,0291	2,71	18,97	0,696
70	1,029	1,009	0,0297	2,86	20,02	0,694
80	1	1,009	0,0306	3,01	21,09	0,692
90	0,972	1,009	0,031	3,2	22,1	0,69
100	0,946	1,009	0,0321	3,36	23,13	0,688
120	0,898	1,009	0,0335	3,7	25,45	0,686
140	0,854	1,0132	0,0349	4,04	27,8	0,684
160	0,815	1,0174	0,0364	4,4	30,09	0,682
180	0,799	1,0216	0,0378	4,76	32,49	0,681
200	0,746	1,0258	0,0393	5,11	34,85	0,68
250	0,674	1,0383	0,0427	6,1	40,61	0,677
300	0,615	1,0467	0,046	7,16	48,33	0,674
350	0,566	1,0593	0,0491	8,18	55,46	0,676
400	0,524	1,0676	0,0521	9,3	63,09	0,678
500	0,456	1,0927	0,0574	11,5	79,38	0,687
600	0,404	1,1137	0,0622	13,8	96,89	0,699
700	0,362	1,1316	0,0671	16,35	115,4	0,706
800	0,329	1,1555	0,0717	18,8	134,8	0,713
900	0,301	1,1723	0,0763	21,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,1849	0,0807	24,5	177,1	0,719
1100	0,257	1,1974	0,085	27,7	199,3	0,722
1200	0,239	1,21	0,0915	31,6	233,7	0,724

Приложение 8. Физические свойства сухого воздуха ($p = 0,101$ МПа)

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	11,61	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	33,6	63,609	0,678
500	0,456	1,093	5,74	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	53,5	233,7	0,724

Примечание.

μ - динамический коэффициент вязкости

Приложение 9. Физические параметры для продуктов сгорания топлива
 ($P_{баром} = 0,1 \text{ МПа}$; $P_{CO_2} = 0,13$; $P_{H_2O} = 0,11$; $P_{N_2} = 0,76$)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/кг}\cdot\text{К}$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\alpha \cdot 10^5, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,295	1,0423	0,0228	1,69	12,2	0,72
100	0,95	1,0684	0,0313	3,08	21,54	0,69
200	0,748	1,097	0,0401	4,89	32,8	0,67
300	0,617	1,122	0,0484	7	45,81	0,65
400	0,525	1,151	0,057	9,43	60,38	0,64
500	0,457	1,1858	0,0656	12,1	76,3	0,63
600	0,405	1,214	0,0742	15,09	93,61	0,62
700	0,363	1,2402	0,0827	18,38	112,1	0,61
800	0,329	1,2654	0,0915	22,05	131,8	0,6
900	0,301	1,2905	0,101	25,8	152,5	0,59
1000	0,275	1,3073	0,109	30,38	174,3	0,58
1100	0,257	1,324	0,1175	34,52	197,1	0,57
1200	0,24	1,3408	0,1262	39,24	221	0,56

Приложение 10. Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^2, \text{кПа}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$a \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{1/К}$	Pr
0	1,0132	999,9	0,56	1,32	1,789	-0,63	13,6
10	1,0132	999,7	0,58	1,38	1,306	0,7	9,52
20	1,0132	998,2	0,597	1,43	1,006	1,82	7,02
30	1,0132	995,7	0,612	1,47	0,805	3,21	5,45
40	1,0132	992,2	0,627	1,51	0,659	3,87	4,36
50	1,0132	988,1	0,64	1,55	0,556	4,49	3,59
60	1,0132	983,2	0,65	1,58	0,478	5,11	3,03
70	1,0132	977,8	0,662	1,61	0,415	5,7	2,58
80	1,0132	971,8	0,669	1,63	0,365	6,32	2,23
90	1,0132	965,3	0,676	1,65	0,326	6,95	1,95
100	1,0132	958,4	0,684	1,68	0,295	7,52	1,75
110	1,4326	951	0,685	1,7	0,272	8,08	1,6
120	1,9854	943,1	0,686	1,71	0,252	8,64	1,47
130	2,7011	934,8	0,686	1,73	0,233	9,16	1,35
140	3,6136	926,1	0,685	1,72	0,217	9,72	1,26
150	4,5797	917	0,684	1,73	0,203	10,3	1,17
160	6,1804	907,4	0,681	1,725	0,191	10,7	1,1
170	7,9203	897,3	0,676	1,723	0,181	11,3	1,05
180	10,027	886	0,672	1,718	0,173	11,9	1,03
190	12,552	876	0,664	1,712	0,165	12,6	0,965
200	15,55	863	0,658	1,703	0,158	13,3	0,932
210	19,079	852,8	0,649	1,678	0,153	14,1	0,915
220	23,201	840,3	0,64	1,66	0,148	14,8	0,898
230	27,979	827,3	0,629	1,64	0,145	15,9	0,888
240	33,48	813,6	0,617	1,62	0,141	16,8	0,883
250	39,776	799	0,605	1,59	0,137	18,1	0,884
260	46,94	784	0,593	1,56	0,135	19,7	0,892
270	55,051	767,9	0,578	1,51	0,133	21,6	0,905
280	64,191	750,7	0,564	1,46	0,131	23,7	0,917
290	74,449	732,3	0,548	1,39	0,129	26,2	0,944
300	85,917	712,5	0,532	1,3	0,128	29,2	0,986
310	98,697	691,1	0,513	1,22	0,128	32,9	1,05
320	112,9	667,1	0,494	1,15	0,128	38,2	1,14
330	128,64	640,2	0,471	1,07	0,127	43,3	1,27
340	146,08	610,1	0,447	1,9	0,127	53,4	1,42
350	165,37	574,4	0,43	1,786	0,126	66,8	1,7
360	186,74	528	0,367	1,42	0,126	109	2,66
370	210,52	450,5	0,338	1,186	0,126	264	6,8

Примечание.

β - температурный коэффициент объемного расширения.

Приложение 11. Плотность ρ , теплопроводность λ , теплоемкость c_p металлов и сплавов ($p = 0,1 \text{ МПа}$, $t = 20 ^\circ\text{C}$)

Наименование элемента	ρ , кг/м ³	λ , Вт/ (м·К)	c_p , кДж/(кг·К)
Алюминий	2700	209	0,896
Бронза (75% Cu, 25% Sn)	8660	25,9	0,344
Вольфрам	19340	169	0,134
Дюралюминий	2800	164	0,884
Железо	7880	74	0,44
Золото	19310	313	0,130
Калий	870	100	0,737
Кремний	2300	33,7	---
Латунь (70% Cu, 30% Zn)	8520	110,7	0,385
Литий	534	68,6	3,31
Магний	1760	158	0,975
Медь	8930	390	0,388
Молибден	10214	136,9	0,251
Натрий	975	109	1,20
Никель	8900	67,5	0,427
Олово	7300	66,3	0,222
Платина	21460	69,8	0,132
Свинец	11350	35,1	0,127
Серебро	10500	419	0,234
Сталь 45	7794	32	0,560
Сталь углеродистая (C=0.5 %)	7830	53,6	0,465
Сталь нержавеющая IX18H9T	7900	16	0,502
Титан	4540	15,1	0,531
Углерод, графит	1700-2300	174	0,67
Уран	19100	19,2	0,117
Цинк	7150	113	0,384
Чугун (C=4%)	7270	51,9	0,419

Приложение 12. Плотность ρ , теплопроводность λ , теплоемкость c_p некоторых неметаллических материалов

Наименование материала	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
Асбошифер	20	1800	0,64	---
Асфальт	30	2120	0,74	1,67
Бетон со щебнем	0	2000	1,28	0,84
Бетон сухой	0	1600	0,84	---
Бумага обыкновенная	20	---	0,14	1,51
Вата хлопчатобумажная	30	80	0,042	---
Гипс сухой	20	1250	0,43	0,85
Глина	20	2000	0,90	0,84
Губка резиновая красная	20	224	0,0547	---
Глина огнеупорная	450	1845	1,04	1,09
Дерево:				
Дуб поперек волокон	0	825	0,20	2,39
Дуб вдоль волокон	10	825	0,35	2,39
Сосна поперек волокон	0	546	0,14	2,72
Сосна вдоль волокон	20	546	0,35	2,72
Карболит черный	50	1150	0,231	---
Каучук твердый	20-50	1190	0,159	---
Каучук вулканизированный твердый серый	50	1190	0,230	---
Каучук вулканизированный мягкий серый	49	1190	0,184	---
Картон	20	---	0,14	1,51
Кожа	20	---	0,15	---
Котельная накипь:				
богатая гипсом	100	2000	0,7	---
>> известью	100	1000	0,15	---
>> силикатом	100	300	0,08	---
Кварц кристаллический:				
поперек оси	0	---	0,72	---
вдоль оси	0	---	1,94	---
Ламповая сажа	40	165	0,10	---
Лед	0	917	2,2	2,26
Льняная ткань	---	---	0,088	---
Мел	50	2000	0,9	0,88
Мрамор	0	2800	3,5	0,92
Песок речной (сухой)	0	1520	0,30	0,80

Продолжение

	$t,$	$\rho,$	$\lambda,$	c_p
--	------	---------	------------	-------

Наименование материала	$^{\circ}\text{C}$	$\text{кг}/\text{м}^3$	$\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
Песок речной (влажный)	20	1650	1,13	2,09
Плексиглас	20	---	06184	---
Пробковые плиты	80	150	06044	1,76
Резина:				
твердая обыкновенная	0	1200	06157	1,38
мягкая	20	---	0,13	1,38
Сахарный песок	0	1600	0658	1,26
Сланец	94	---	1,49	---
Светлый целлулоид	30	1400	0,209	---
Стеклотекстолит	20	1800	0,372	
Снег:				
свежевыпавший	---	200	0610	2,09
уплотненный	---	400	0,46	2,09
Стекло:				
обыкновенное	20	2500	0647	0,67
термометрическое	20	2590	0,96	---
кварцевое	800	---	2,40	---
Текстолит	20	1300	0,23	1,46
Фанера клееная	0	600	0,15	2,51
Фарфор	95	2400	1,04	1,09
Фибра красная	---	1290	0,469-0,498	---
Фибра белая	---	1220	0,278-0,291	---
Фибролит магнизиальный	0	300	0,099	
	0	350	0,128	
	0	450	0,151	
Эбонит	20	1200	0,16	---
Шлак котельный	0	1000	0,29	0,75
Штукатурка:				
известковая	0	1600	0,72	0,84
цементно-песчаная	0	1800	1,2	0,84

Приложение 13. Плотность ρ , теплопроводность λ и предельная температура t применения теплоизоляционных и огнеупорных материалов и изделий.

Наименование материала или изделия	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	t, °С
Материалы			
Асбест	500	0,107+0,00019 t	700
	800	0,140+0,00019 t	700
Асбозонолит	520	0,143+0,00019	700
Асбозурит	700	0,162+0,000169	300
Асбослюда	600	0,120+0,000148	600
Асботермит	560	0,109+0,000145	550
Диатомит молотый	450	0,091+0,00028	800
Зонолит (вермикулит)	200	0,072+0,000262	1100
Минеральная стеклянная вата	200	0,047+0,87	500
Новоасбозурит	600	0,144+0,00014	250
Ньювель	450	0,87+0,00064	350
Совелит	500	0,090+0,00087	450
Ферригипс (паста феррон)	500	0,101+0,00015	600
Шлаковая вата (сорт 0)	200	0,06+0,000145	750
Изделия			
Альфоль гофрированный, Сегментный	200	0,0535+0,000221	500
Асбоцемент сегментный	400	0,0919+0,000128	450
Вермикулитовые плиты	380	0,081+0,00015	700
Вулканитовые плиты	400	0,080+0,00021	600
Войлок строительный	300	0,05 при 0 · с	190
Кирпич:			
Диатомитовый	550	0,113+0,00023	850
Динасовый	1500	0,9+0,0007	1700
Керамический (красный)	1800	0,77 при 0 · с	---
Магнезитовый	2700	4,65-0,0017	1700
Пеношамотный	600	0,10+0,000145	1300
Пенодиатомитовый	230	0,07 при 70 · с	700
Хромитовый	3050	1,3+0,00041	1700
Шамотный	1850	0,84+0,0006	1400
Минеральный войлок	250	0,058 при 50 · с	---
Пенобетонные блоки	500	0,122 при 50 · с	300
Торфяные сегменты	425	0,0686+0,000116	60
Шлаковая минеральная пробка	270	0,064 при 50 · с	150

1 Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература

- 1 Замалеев, З.Х.. Основы гидравлика и теплотехники [текст] учебное пособие / З.Х. Замалеев, В.Н.Посохин, В.М. Чефанов. -Изд-во "Лань, 2014 -352с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/39146#authors>
- 2 Основы гидравлики и теплотехники [Электронный ресурс] : Учебное издание / Под общей ред. проф. В.Н. Посохина. - М. : Издательство АСВ, 2014. – 424с. Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300218.html>
- 3 Техническая термодинамика. Тепломассообмен [Электронный ресурс] : Учебное издание / Мирам А.О., Павленко В.А. - М. : Издательство АСВ, 2016. – 352с. Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930938418.html>

Дополнительная литература

- 1 Замалеев, З.Х.. Основы гидравлика и теплотехники [текст] учебное пособие / З.Х. Замалеев, В.Н.Посохин, В.М. Чефанов. -Изд-во "Лань, 2014 -352с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/39146#authors>
- 2 Основы гидравлики и теплотехники [Электронный ресурс] : Учебное издание / Под общей ред. проф. В.Н. Посохина. - М. : Издательство АСВ, 2014. – 424с. Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785432300218.html>
- 3 Техническая термодинамика. Тепломассообмен [Электронный ресурс] : Учебное издание / Мирам А.О., Павленко В.А. - М. : Издательство АСВ, 2016. – 352с. Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930938418.html>