

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

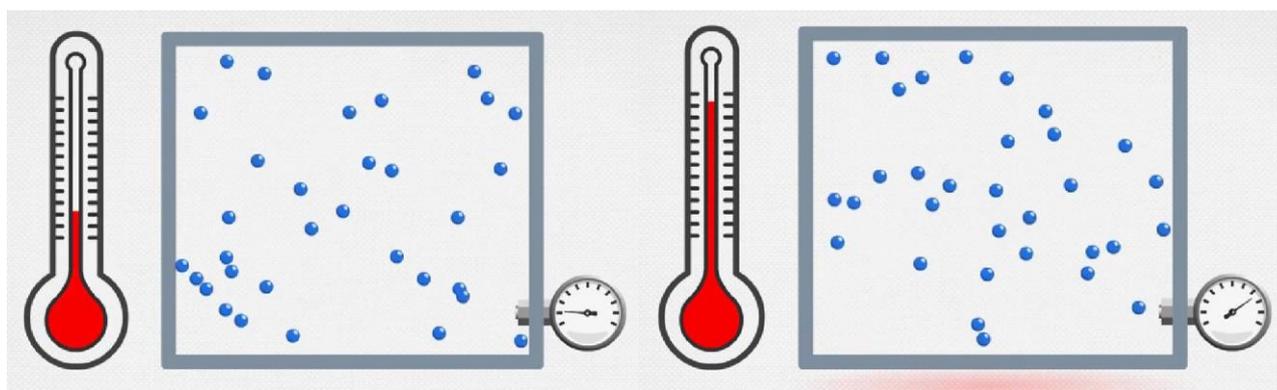
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Брянский государственный аграрный университет»

Чащинов В.И.,
Михайличенко С.М.,
Купреенко А.И.,
Исаев Х.М.,
Шкуратов Г.В.

ТЕПЛОФИЗИКА

Методические указания для выполнения практических работ

Часть I



Брянская область, 2022

УДК 536.24 (07)

ББК 22.317

Т 34

Теплофизика. Практические работы. Ч. I: методические указания для выполнения практических работ по дисциплине «Теплофизика» для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность/В.И. Чащинов, С.М. Михайличенко, А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, Г. В. Шкуратов. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2022. – 27 с.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность.

Рецензент:

А.М. Случевский – к.т.н., доцент кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве.

Рекомендовано к изданию решением учебно-методической комиссии инженерно-технологического института от 28 октября 2022 г., протокол № 2.

© Брянский ГАУ, 2022
© Чащинов В.И.
© Михайличенко С.М., 2022
© Купреенко А.И., 2022
© Исаев Х.М., 2022
© Шкуратов Г.В., 2022

Содержание

Предисловие.....	5
Практическая работа № 1	6
Термодинамический расчет изменения состояния газовой смеси.....	6
Практическая работа № 2	11
Расчет процесса переноса теплоты через многослойную стенку	11
Практическая работа № 3	17
Тепловой расчет кожухотрубного теплообменника.....	17
Список литературы	23
Приложение 1 – Основные характеристики важнейших газов	24
Приложение 2 – Физические свойства воды.....	25
Приложение 3 – Параметры насыщенного водяного пара	26

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля):

ОПК-1: Способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека;

Материалы, изложенные в данных методических указаниях, будут способствовать формированию указанной компетенции в результате освоения дисциплины «Теплофизика».

Предисловие

Данные учебно-методические указания предназначены для проведения практических занятий по дисциплине «Теплофизика» со студентами очной и заочной форм обучения направления подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность. Они включают в себя три практические работы по следующим темам: «Термодинамический расчет изменения состояния газовой смеси», «Расчет процесса переноса теплоты через многослойную стенку», «Тепловой расчет кожухотрубного теплообменника».

Каждая практическая работа сопровождается необходимыми пояснениями для ее выполнения. Целью данных работ является закрепление знаний студентов, полученных на лекционных занятиях по рассматриваемым темам, а также развитие навыков применения расчетных формул и таблиц для решения практических задач.

На выполнение и защиту каждой работы отводится по два практических занятия. Проверка работ осуществляется с помощью алгоритма, реализованного в программе MS Excel.

Практическая работа № 1

Термодинамический расчет изменения состояния газовой смеси

1. Цель работы

Выполнить расчет термодинамической системы, рабочим телом в которой является газовая смесь заданного состава массой m при указанных в индивидуальном задании начальных условиях в результате изменения температуры смеси на величину Δt в *изобарном* или *изохорном* процессе.

Рассчитать объемные доли компонентов, если смесь задана массовым способом или массовые доли, если смесь задана объемным способом. Найти все параметры состояния в начале и в конце процесса, а также изменение функций состояния, работу и количество теплоты в процессе. Представить процесс в p - V и T - S координатах. Расчеты выполнить, считая рабочее тело идеальным газом. Схематично (без расчета) изобразить на этих же графиках остальные основные процессы (изобарный или изохорный, а также изотермический и адиабатный), исходящие из той же начальной точки, что и заданный.

2. Исходные данные для практической работы № 1

Трехзначные шифры (определяются по вариантам)

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Шифр №</i>	398	752	429	641	385	314	825	741	628	307
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>Шифр №</i>	074	296	865	852	630	185	529	418	276	963

Выбор исходных данных на примере шифра 259

Порядковый номер цифры шифра	Параметр	Цифра шифра задания										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Первая 2	m , кг	2	4	6	8	7	5	3	9	10	11	
	Смесь по компонентам	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3				
Вторая 5	Долевой состав, %	1	75	60	55	45	30	75	60	55	45	30
		2	18	26	28	31	38	18	26	28	31	38
		3	7	14	17	24	32	7	14	17	24	32
Третья 9	Вид долей	Массовые					Объемные					
	t_1 , °C	20	40	80	120	100	10	30	50	90	110	
	Δt , °C	110	95	-90	-75	120	115	130	-90	85	-80	
	Процесс	Изохорный					Изобарный					
	p_1 , МПа	-	-	-	-	-	0,15	0,85	0,35	0,6	1,2	

Варианты смеси по компонентам

№ компонента	Компонентный состав смеси		
	Вариант 1	Вариант 1	Вариант 1
1	Кислород (O ₂)	Азот (N ₂)	Оксид углерода (CO)
2	Водород (H ₂)	Гелий (He)	Кислород (O ₂)
3	Двуокись углерода (CO ₂)	Кислород (O ₂)	Метан (CH ₄)

Исходные данные (определяются по номеру шифра)

Порядковый номер цифры шифра	Параметр	Цифра шифра задания										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Первая	m , кг	2	4	6	8	7	5	3	9	10	11	
	Смесь по компонентам	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3				
Вторая	Долевой состав, %	1	75	60	55	45	30	75	60	55	45	30
		2	18	26	28	31	38	18	26	28	31	38
		3	7	14	17	24	32	7	14	17	24	32
	Вид долей	Массовые					Объемные					
Третья	t_1 , °C	20	40	80	120	100	10	30	50	90	110	
	Δt , °C	110	95	-90	-75	120	115	130	-90	85	-80	
	Процесс	Изохорный					Изобарный					
	V_1 , м ³	3,5	2,6	4,2	5,8	6,5	-	-	-	-	-	
	p_1 , МПа	-	-	-	-	-	0,15	0,85	0,35	0,6	1,2	

Варианты смеси по компонентам

№ компонента	Компонентный состав смеси		
	Вариант 1	Вариант 1	Вариант 1
1	Кислород (O ₂)	Азот (N ₂)	Оксид углерода (CO)
2	Водород (H ₂)	Гелий (He)	Кислород (O ₂)
3	Двуокись углерода (CO ₂)	Кислород (O ₂)	Метан (CH ₄)

3. Пример решения практической работы № 1

Выполнить расчет термодинамической системы, рабочим телом в которой является газовая смесь массой $m = 8$ кг следующего состава:

№	Компонент	Доля	Способ задания
1	Азот (N ₂)	$g_1 = 46\% = 0,46$	массовый
2	Кислород (O ₂)	$g_2 = 28\% = 0,28$	
3	Метан (CH ₄)	$g_3 = 26\% = 0,26$	

В изобарном процессе температура смеси изменяется на величину $\Delta t = 80^\circ\text{C}$ при начальных условиях: $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и $p_1 = 0,4$ МПа.

Решение

1. Из справочных таблиц (приложение 1) выписываем основные характеристики для каждого компонента газовой смеси: газовую постоянную R , молярную массу μ и показатель адиабаты k :

№	Компонент	Газовая постоянная R	Молярная масса μ	Показатель адиабаты k
1	Азот (N ₂)	$R_1 = 0,2968$ кДж/кг·К	$\mu_1 = 28$ кг/кмоль	$k_1 = 1,4$
2	Кислород (O ₂)	$R_2 = 0,2598$ кДж/кг·К	$\mu_2 = 32$ кг/кмоль	$k_2 = 1,4$
3	Метан (CH ₄)	$R_3 = 0,5188$ кДж/кг·К	$\mu_3 = 16$ кг/кмоль	$k_3 = 1,29$

2. Если смесь задана массовым способом, то необходимо вычислить объемные доли r по формуле (1.1), если смесь задана объемным способом, то необходимо вычислить массовые доли g по формуле (1.2).

$$r_i = \frac{g_i / \mu_i}{\sum_{i=1}^n g_i / \mu_i}, \quad (1.1)$$

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}, \quad (1.2)$$

где

g_i – массовая доля i -го газа, входящего в смесь;

r_i – объемная доля i -го газа, входящего в смесь;

μ_i – молярная масса i -го газа, входящего в смесь;

n – число компонентов, входящих в смесь.

Поскольку в примере даны массовые доли, для вычисления объемных долей воспользуемся формулой (1.1):

$$\text{для азота} - r_1 = \frac{0,46/28}{0,46/28 + 0,28/32 + 0,26/16} = 0,397;$$

$$\text{для кислорода} - r_2 = \frac{0,28/32}{0,46/28 + 0,28/32 + 0,26/16} = 0,211;$$

$$\text{для метана} - r_3 = \frac{0,26/16}{0,46/28 + 0,28/32 + 0,26/16} = 0,392.$$

Правильность расчетов проверяем условием $\sum_{i=1}^n r_i = 1$, которое в нашем случае выполняется: $0,397 + 0,211 + 0,392 = 1$.

3. Определяем основные характеристики газовой смеси.

Кажущаяся молярная масса смеси:

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i = 0,397 \cdot 28 + 0,211 \cdot 32 + 0,392 \cdot 16 = 24,14 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

Газовая постоянная смеси:

$$R_{см} = \sum_{i=1}^n g_i R_i = 0,46 \cdot 0,2968 + 0,28 \cdot 0,2598 + 0,26 \cdot 0,5188 = 0,3442 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

4. Удельные массовые теплоемкости рассчитываются по формулам (1.3)-(1.6) и для удобства заносятся в таблицу:

Компонент смеси	c_{vi} , кДж/кг·К	c_{pi} , кДж/кг·К	$c_{vсм}$, кДж/кг·К	$c_{pсм}$, кДж/кг·К
1. Азот	0,742	1,039	0,988	1,332
2. Кислород	0,6495	0,909		
3. Метан.	1,789	2,308		

$$c_{vi} = \frac{R_i}{k_i - 1}; \quad (1.3)$$

$$c_{pi} = k_i \cdot c_{vi}; \quad (1.4)$$

$$c_{vсм} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot c_{vi}; \quad (1.5)$$

$$c_{pсм} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot c_{pi}; \quad (1.6)$$

5. Определяем параметры p , V и T в начале и в конце процесса. В данном примере для изобарного процесса известны начальная температура и давление:

$$T_1 = t_1 + 273 = 25 + 273 = 298 \text{ К},$$

$$p_1 = 0,4 \text{ МПа}.$$

Для примеров с изохорным процессом известна начальная температура и начальный объем V_1 .

Неизвестный параметр в начале процесса (давление p_1 для изохорного процесса или объем V_1 для изобарного процесса) определим из уравнения состояния:

$$p_1 \cdot V_1 = m \cdot R_{см} \cdot T_1; \quad (1.7)$$

где

p_1 – начальное давление, кПа;

V_1 – начальный объем, м³/кг;

$R_{см}$ – газовая постоянная смеси, кДж/кг К;

T_1 – начальная температура, К.

Поскольку в примере рассматривается изобарный процесс и давление p_1 известно, вычислим начальный объем:

$$V_1 = \frac{m \cdot R_{см} \cdot T_1}{p_1} = \frac{8 \text{ кг} \cdot 0,3442 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 298 \text{ К}}{400 \text{ кПа}} = 2,0512 \text{ м}^3.$$

Заданный в условии задачи изобарный процесс является процессом, протекающим при постоянном давлении. Поэтому давление в конце процесса:

$$p_2 = p_1 = 0,4 \text{ МПа}.$$

Для изохорного процесса справедлива запись:

$$V_2 = V_1.$$

Температуру в конце процесса определим по формуле:

$$T_2 = T_1 + \Delta T = T_1 + \Delta t = 298 + 80 = 378 \text{ К}.$$

Объем в конце изобарного процесса найдем по соотношению начальных и конечных параметров, вытекающего из уравнения данного процесса:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 2,0512 \cdot \frac{378}{298} = 2,6016 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Соответственно в изохорном процессе для вычисления конечного давления следует воспользоваться уравнением изохорного процесса:

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1}.$$

6. Рассчитаем количество теплоты, работу и изменение функций состояния в процессе.

Количество теплоты в изобарном процессе:

$$Q_{1-2} = m \cdot c_{p\text{см}} \cdot \Delta T = 8 \cdot 1,332 \cdot 80 = 852,48 \text{ кДж}.$$

Количество теплоты в изохорном процессе:

$$Q_{1-2} = m \cdot c_{v\text{см}}(T_2 - T_1).$$

Работа в изобарном процессе:

$$L_{1-2} = p \cdot (V_2 - V_1) = 400 \cdot (2,6016 - 2,0512) = 220,16 \text{ кДж}.$$

В изохорном процессе работа равна нулю по определению:

$$L_{1-2} = 0.$$

Изменение внутренней энергии для изобарного и изохорного процессов определяется по общей формуле:

$$\Delta U_{1-2} = m \cdot c_{v\text{см}} \cdot \Delta T = 8 \cdot 0,988 \cdot 80 = 632,32 \text{ кДж}.$$

Изменение энтальпии для изобарного и изохорного процессов также определяется по общей формуле:

$$\Delta I_{1-2} = m \cdot c_{p\text{см}}(T_2 - T_1) = 8 \cdot 1,332 \cdot 80 = 852,48 \text{ кДж}.$$

Изменение энтропии для изобарного процесса рассчитываем по формуле:

$$\Delta S_{1-2} = m \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 8 \cdot 1,332 \cdot \ln \frac{378}{298} = 2,534 \text{ кДж/К}.$$

Для изохорного процесса изменение энтропии определяется по формуле:

$$\Delta S_{1-2} = m \cdot c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

7. Полученные результаты расчёта процесса сведём в таблицу. Поскольку при расчетах нас интересует не конкретное значение энтропии S , а ее изменение ΔS , условно примем значение $S_1 = 0,5$ кДж/К. При отрицательном значении ΔS_{1-2} значение S_1 следует выбирать таким образом, чтобы выполнялось условие: $S_1 + \Delta S_{1-2} > 0$.

Величина	p , МПа	T , К	V , м ³	Q , кДж	L , кДж	ΔU , кДж	ΔI , кДж	ΔS_{1-2} , кДж/К	S , кДж/К
Начало процесса (точка 1)	0,4	298	2,0512	852,48	220,16	632,32	852,48	2,534	0,5
Конец процесса (точка 2)	0,4	378	2,6016						3,034

На основании полученных значений строится график рассматриваемого процесса в p - V координатах. Для сравнения схематично приводятся остальные основные процессы (изобарный 1-2 или изохорный 1-3, изотермический 1-4, адиабатный 1-5).

Для построения графика рассматриваемого процесса в координатах T - S необходимо определить положение промежуточной точки "а" (значения T_a и S_a). Для этого зададимся значением температуры

$$T_a = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{298 \text{ К} + 378 \text{ К}}{2} \approx 340 \text{ К}.$$

Соответствующее изменение энтропии ΔS_{1-a} для промежуточной точки "a" определим по формуле:

$$\Delta S_{1-a} = m \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_a}{T_1} = 8 \cdot 1,332 \cdot \ln \frac{340}{298} = 1,405 \text{ кДж/К}.$$

Тогда фактическое значение энтропии промежуточной точки "a"

$$S_a = S_1 + \Delta S_{1-a} = 0,5 + 1,405 = 1,905 \text{ кДж/кг}.$$

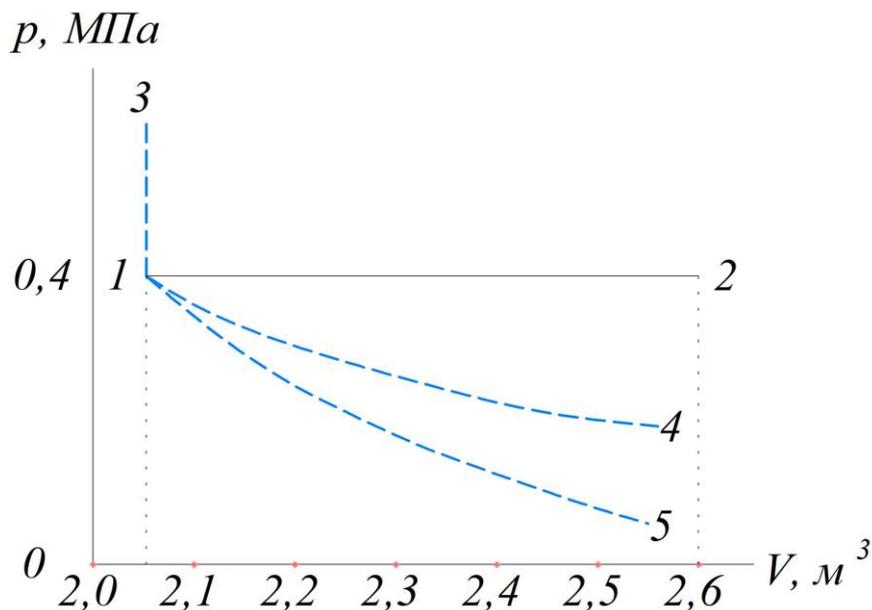


Рисунок 1.1 – Графическое изображение процесса в p - V координатах

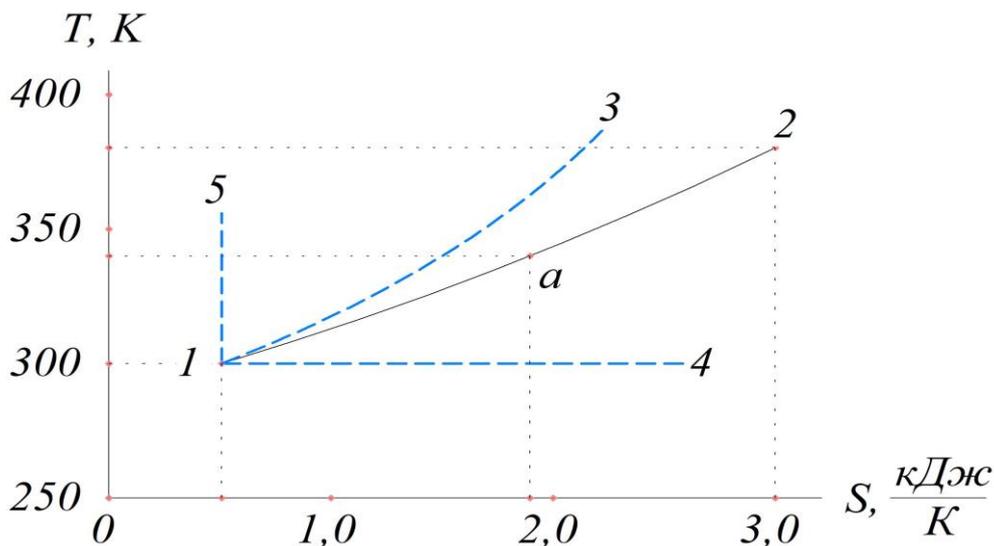


Рисунок 1.2 – Графическое изображение процесса в T - S координатах

Практическая работа № 2

Расчет процесса переноса теплоты через многослойную стенку

1. Цель работы

Выполнить расчет процесса переноса теплоты от газообразных продуктов сгорания к воде через многослойную разделительную стенку. Определить тер-

мическое сопротивление, коэффициент теплопередачи и плотность теплового потока для случаев, указанных в примере решения. Для случая "д" определить аналитически и графически температуру всех слоёв стенки и построить график распределения температур по толщине стенки.

2. Исходные данные для практической работы № 2

Трёхзначные шифры (определяются по номеру варианта)

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Шифр №</i>	852	630	529	418	307	296	185	074	963	865
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>Шифр №</i>	641	752	741	825	628	429	314	398	385	276

Исходные данные (определяются по номеру шифра)

Порядковый номер цифры шифра	Параметр	Цифра шифра задания									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Первая	$t_r, ^\circ\text{C}$	600	650	700	800	850	900	950	1000	750	550
	$t_b, ^\circ\text{C}$	20	80	60	45	90	75	50	120	70	40
Вторая	$\alpha_b, \text{Вт/м}^2\text{К}$	1400	1600	2000	2300	2400	2600	1700	2200	1800	1900
	$\alpha_r, \text{Вт/м}^2\text{К}$	85	90	87	75	80	95	72	83	78	70
Третья	$\delta_1, \text{мм}$	0,8	0,9	0,7	1,1	1,0	1,2	0,8	0,7	1,0	0,9
	$\delta_2, \text{мм}$	5,0	6,0	7,0	8,0	5,5	6,5	7,5	8,5	9,0	10,0
	$\delta_3, \text{мм}$	1,5	4,0	3,0	2,5	2,0	3,0	3,5	2,0	4,0	4,5
	$\delta_4, \text{мм}$	1,0	1,1	0,6	0,8	0,9	1,0	0,5	1,1	0,7	0,8

3. Пример решения практической работы № 2

Определить термическое сопротивление, коэффициент теплопередачи и плотность теплового потока при передаче теплоты от газообразных продуктов сгорания с температурой $t_r = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ воде, имеющей температуру $t_b = 55 \text{ }^\circ\text{C}$, через многослойную плоскую разделяющую стенку при заданных коэффициентах теплоотдачи со стороны газа $\alpha_r = 110 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ и со стороны воды $\alpha_b = 1100 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ для следующих случаев:

- стенка чистая стальная, толщиной $\delta_2 = 13 \text{ мм}$ при $\lambda_2 = 50 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
- стенка чистая медная, толщиной $\delta_2 = 13 \text{ мм}$ при $\lambda_2 = 380 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
- стенка стальная, покрытая со стороны воды слоем накипи толщиной $\delta_3 = 7 \text{ мм}$ при $\lambda_3 = 2 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
- в дополнение к случаю «в» слой накипи покрыт масляной плёнкой толщиной $\delta_4 = 1 \text{ мм}$ при $\lambda_4 = 0,2 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
- в дополнение к случаю «г» со стороны газа имеется слой сажи толщиной $\delta_1 = 1 \text{ мм}$ при $\lambda_1 = 0,23 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Решение

1. Определяем термические сопротивления отдельных слоев стенки R_i и общее термическое сопротивление теплопередаче R_t .

Термическое сопротивление теплопередаче R_t складывается из термических сопротивлений теплоотдаче со стороны газа R_Γ и со стороны воды R_B и термических сопротивлений отдельных слоев многослойной стенки R_i . Общее термическое сопротивление теплопередаче является величиной, обратной коэффициенту теплопередачи, и находится по формуле:

$$R_t = R_\Gamma + \sum_{i=1}^n R_i + R_B, \quad (2.1)$$

где

$R_\Gamma = \frac{1}{\alpha_\Gamma}$ – термическое сопротивление теплоотдаче со стороны газа, $m^2 \cdot K/Vm$;

$R_B = \frac{1}{\alpha_B}$ – термическое сопротивление теплоотдаче со стороны воды, $m^2 \cdot K/Vm$;

$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – термическое сопротивление i -го слоя стенки, $m^2 \cdot K/Vm$;

n – количество слоев многослойной стенки;

α_Γ – коэффициент теплоотдачи со стороны газа, $Vm/m^2 \cdot K$;

α_B – коэффициент теплоотдачи со стороны воды, $Vm/m^2 \cdot K$;

δ_i – толщина i -го слоя стенки, m ;

λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя стенки, $Vm/m \cdot K$.

Таким образом, для приведенных в условии задачи исходных данных получаем:

$$R_\Gamma = \frac{1}{110} = 0,00909 \text{ } m^2 \cdot K/Vm; \quad R_B = \frac{1}{1100} = 0,00091 \text{ } m^2 \cdot K/Vm.$$

Выведем формулы для вычисления термического сопротивления теплопередаче, полученные на основании формулы (2.1):

случай а) – газ → сталь → вода:

$$R_{t(a)} = R_\Gamma + R_{2.1} + R_B;$$

случай б) – газ → медь → вода:

$$R_{t(б)} = R_\Gamma + R_{2.2} + R_B;$$

случай в) – газ → сталь → накипь → вода:

$$R_{t(в)} = R_\Gamma + R_{2.1} + R_3 + R_B;$$

случай г) – газ → сталь → накипь → масляная пленка → вода:

$$R_{t(г)} = R_\Gamma + R_{2.1} + R_3 + R_4 + R_B;$$

случай д) – газ → сажа → сталь → накипь → масляная пленка → вода:

$$R_{t(о)} = R_{\Gamma} + R_1 + R_{2.1} + R_3 + R_4 + R_B;$$

$$R_{t(о)} = 0,00909 + 0,00435 + 0,00026 + 0,0035 + 0,005 + 0,0091 = 0,02311 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

Результаты расчета термических сопротивлений отдельных слоев стенки R_i и общего термического сопротивления теплопередаче для оговоренных в условии задачи случаев приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчета термических сопротивлений слоев стенки и термического сопротивления теплопередаче

Слой		$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i},$ $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	$R_t = R_{\Gamma} + \sum R_i + R_B, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$				
№	Вид		а)	б)	в)	г)	д)
1	Сажа ($\lambda_2 = 0,23$)	0,00435	0,01026	0,01003	0,01376	0,01876	0,02311
2.1	Сталь ($\lambda_2 = 50$)	0,00026					
2.2	Медь ($\lambda_2 = 50$)	0,00003					
3	Накипь ($\lambda_3 = 2$)	0,0035					
4	Масл. пленка ($\lambda_4 = 0,2$)	0,005					

2. Определяем коэффициент теплопередачи и плотность теплового потока

Коэффициент теплопередачи является величиной, обратной термическому сопротивлению теплопередаче:

$$K = \frac{1}{R_t}.$$

Плотность теплового потока находится по формуле:

$$q = \frac{\Delta t}{R_t} = K \cdot \Delta t, \quad (2.2)$$

где Δt – температурный напор, °С.

Температурный напор равен разности температур теплоносителей:

$$\Delta t = t_{\Gamma} - t_B = 950 - 55 = 895 \text{ °С}.$$

Результаты расчета коэффициента теплопередачи, плотности теплового потока и их относительной величины по отношению к случаю "а" приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчета коэффициента теплопередачи и плотности теплового потока

Параметр	Значения для случая				
	а)	б)	в)	г)	д)
$K, \text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$	97,47	99,70	72,67	53,30	43,27
$q, \text{Вт}/\text{м}^2$	87236	89232	65040	47704	38727
относительная величина плотности теплового потока, %	100	102,3	74,6	54,7	44,4

3. Аналитическое определение температуры на поверхности слоев стенки

Температуры на поверхности слоев стенки находятся из условия, что для каждого слоя плотность теплового потока имеет одинаковое значение и составляет $q_d = 38727 \text{ Вт/м}^2$ (случай "д").

Температура t_1 на поверхности стенки со стороны газа находится с учетом термического сопротивления теплоотдаче:

$$t_1 = t_r - \frac{q_d}{\alpha_r} = 950 - \frac{38727}{110} = 597,9 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.4)$$

Температуры t_2 , t_3 , t_4 и t_5 (см. рис. 2.1) находятся по формуле:

$$t_i = t_{i-1} - \Delta t_i, \quad (2.5)$$

Перепад температур в каждом i -ом слое стенки находится по формуле

$$\Delta t_i = q_d \cdot R_i, \quad (2.6)$$

где R_i – термическое сопротивление i -го слоя стенки.

Результаты расчетов с применением формул (2.4)-(2.6) представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты расчета температур на поверхности слоев стенки

№ слоя	$\Delta t_i, \text{ } ^\circ\text{C}$	Температура, $^\circ\text{C}$	
		t_i	
1	168,5	t_1	597,9
		t_2	429,4
2	10,1	t_3	419,3
		t_4	283,8
4	193,6	t_5	90,2

Контроль правильности расчета температур можно осуществить, вычислив значение температуры t_5 по температурному напору теплопередачи со стороны воды:

$$t_5 = t_B + \frac{q_d}{\alpha_B} = 55 + \frac{38727}{1100} = 90,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Совпадение данного значения t_5 с полученным в таблице 2.3 свидетельствует о правильности выполненных расчетов. Ниже на рисунке представлен построенный в масштабе график изменения температуры в многослойной стенке.

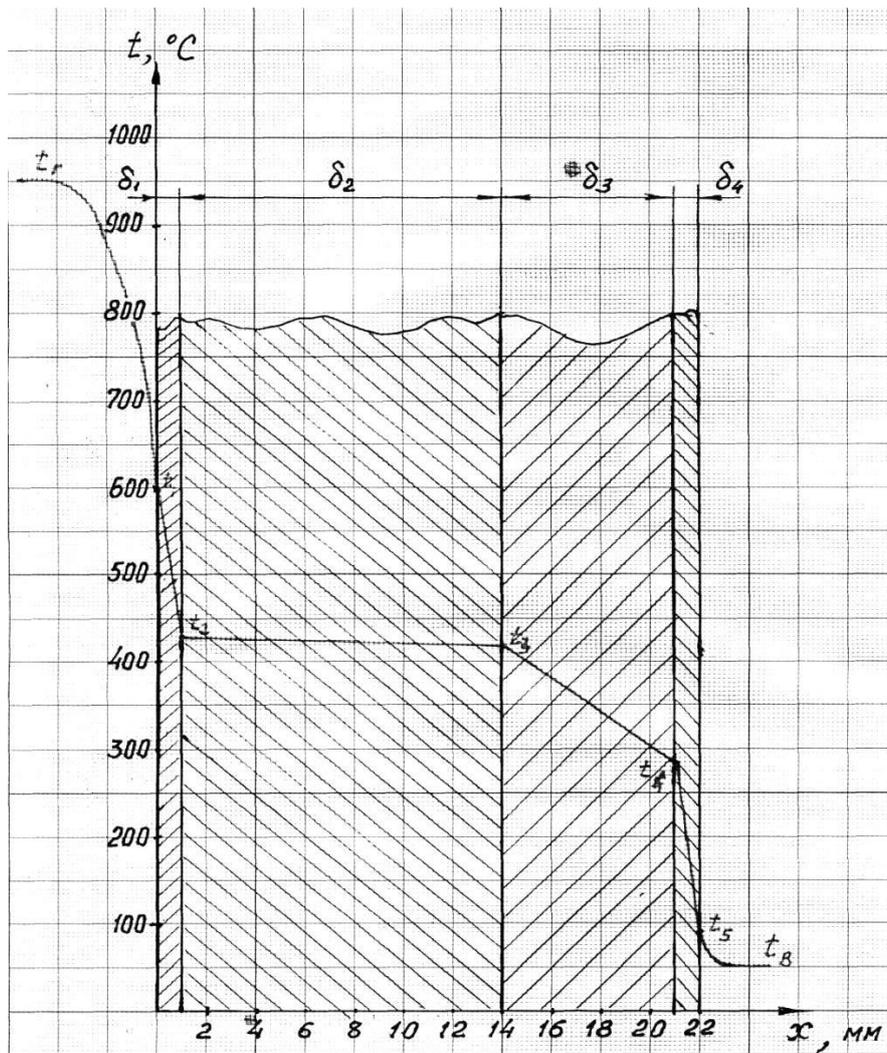


Рисунок 2.1 – График изменения температуры по толщине многослойной стенки (аналитический метод определения)

4. Графическое определение температуры слоев стенки

Для графического определения температуры слоев стенки по оси абсцисс в масштабе откладываем приведенные в таблице 2.1 значения термических сопротивлений слоев стенки R_i , а также термические сопротивления теплоотдаче с обеих сторон стенки R_{Γ} и R_B (рис. 2.2), и восстанавливаем перпендикуляры из полученных точек на абсцисс.

Важно отметить, что на графике для удобства указываются единицы измерения $10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$, поэтому соответствующие значения R необходимо умножить на 10^3 , например: $R_{\Gamma} = 0,00909 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ при построении графика примет значение $R_{\Gamma} \approx 9$ ($10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$). При этом сумма всех термических сопротивлений дает значение $R_{t(д)} = 0,02311 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \approx 23 \left(10^{-3} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \right)$.

По оси ординат в масштабе откладываем температуры газа $t_{\Gamma} = 950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и воды $t_B = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Далее отмечаем две точки и соединяем их прямой:

1. Точка с координатами $R = 0$ и $t_{\Gamma} = 950 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Точка с координатами $R_{t(д)} = 0,02311 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \approx 23 \left(10^{-3} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \right)$.

Из полученных точек пересечения этой прямой с перпендикулярами, восстановленными от оси абсцисс (ось R , $10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$), строим линии, перпендикулярные оси ординат (ось t , $^{\circ}\text{C}$).

По результатам графического определения температур имеем:

$$t_1 \approx 600^{\circ}\text{C}; \quad t_2 \approx 430^{\circ}\text{C}; \quad t_3 \approx 420^{\circ}\text{C}; \quad t_4 \approx 285^{\circ}\text{C}; \quad t_5 \approx 90^{\circ}\text{C}.$$

Сравнение этих значений со значениями, полученными аналитическим методом, говорит о высоком схождении результатов графического определения температуры слоев стенки с результатами аналитического расчета (отклонение составляет менее 1 %).

Выполненные расчеты показывают, что наличие накипи на стенке, а также слоя сажи и масляной пленки существенно увеличивают сопротивление теплопередаче и уменьшают плотность теплового потока. Для рассматриваемого случая "д" снижение плотности теплового потока по сравнению с чистой стальной стенкой составило 55,6 %.

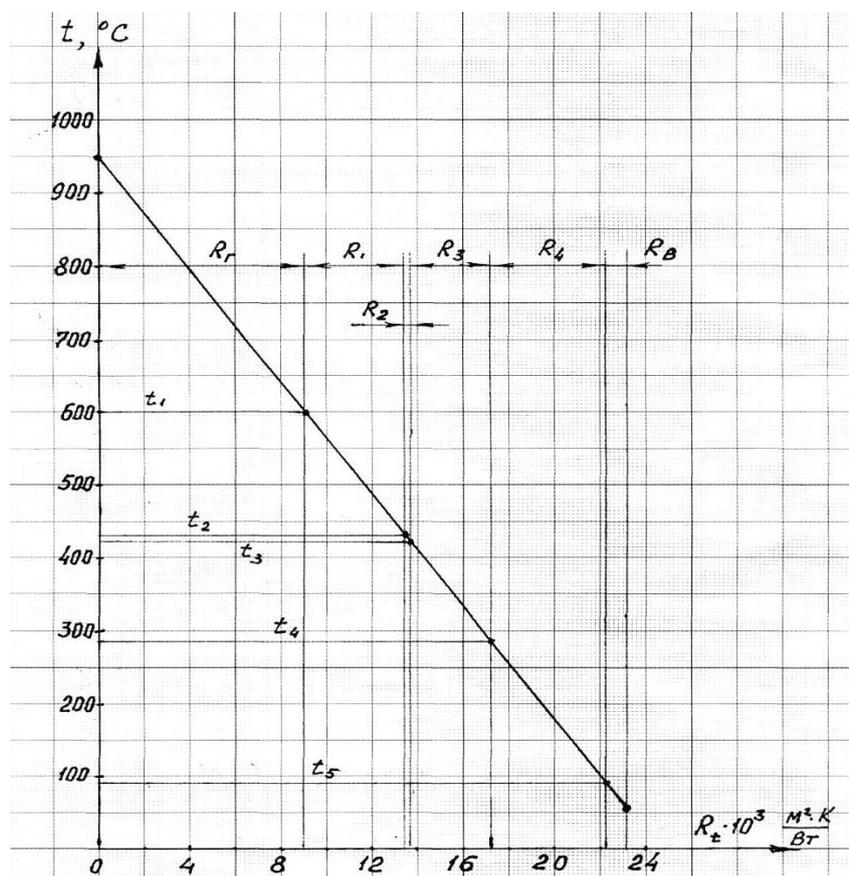


Рисунок 2.2 – График изменения температуры по толщине многослойной стенки (графический метод определения)

Практическая работа № 3

Тепловой расчет кожухотрубного теплообменника

1. Цель работы

Выполнить тепловой расчёт кожухотрубного теплообменника, предназначенного для нагрева воды насыщенным водяным паром. Определить часовой

расход греющего пара и конструктивные показатели теплообменника (площадь поверхности теплопередачи, количество трубок в пучке и количество ходов трубной части теплообменника), при которых обеспечивается достижение заданных в условии задачи температур.

Представить схему теплообменника. На схеме указать направления движения теплоносителей, их температуру и энтальпию.

2. Исходные данные для практической работы № 3

Трехзначные шифры (определяются по номеру варианта)

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Шифр №</i>	852	630	529	418	307	296	185	074	963	865
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>Шифр №</i>	641	752	741	825	628	429	314	398	385	276

Исходные данные (определяются по номеру шифра)

Порядковый номер цифры шифра	Параметр	Цифра шифра задания									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Первая	$m_v, \text{т/ч}$	15,0	15,2	15,5	15,7	16,0	16,2	16,5	17,0	17,5	18,0
	$t_2', \text{°C}$	20	18	13	15	22	16	17	14	19	21
	$t_2'', \text{°C}$	95	100	110	97	112	125	98	117	105	115
	$l, \text{м}$	2,2	2,4	2,6	2,1	2,3	2,5	2,4	2,3	2,6	2,8
Вторая	$d_n, \text{мм}$	32	30	28	27	25	26	24	26	28	30
	$\delta, \text{мм}$	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	3,0	2,0	2,5	2,0	2,5
Третья	$\omega, \text{м/с}$	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25
	$\alpha_1, \text{Вт/м}^2\text{К}$	6000	6300	6700	6200	6400	6600	5800	7000	6700	6500
	$p_r, \text{МПа}$	0,25	0,30	0,35	0,27	0,32	0,37	0,28	0,33	0,38	0,29

3. Пример решения практической работы № 3

Выполнить тепловой расчёт кожухотрубного теплообменника для нагрева воды от $t_2' = 20 \text{ °C}$ до $t_2'' = 98 \text{ °C}$ с расчетным расходом воды $m_v = 15500 \text{ кг/ч}$. Греющим теплоносителем является насыщенный пар под давлением $p_r = 0,34 \text{ МПа}$. Греющие трубки наружным диаметром $d_n = 32 \text{ мм}$ и толщиной стенки $\delta = 2,0 \text{ мм}$ выполнены из нержавеющей стали с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 45 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Рассчитать коэффициент теплоотдачи со стороны воды и определить площадь поверхности теплопередачи, количество трубок в пучке и количество ходов трубной части теплообменника при расчетной скорости воды $\omega = 1,3 \text{ м/с}$, расчетной длине трубной части теплообменника $l = 2,4 \text{ м}$ и коэффициенте теплоотдачи со стороны пара $\alpha_1 = 6100 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$.

Решение

1. Из справочных таблиц (прил. 2) выписываем основные теплофизические характеристики теплоносителей. Предварительно рассчитываем среднюю температуру воды:

$$t_2 = \frac{t'_2 + t''_2}{2} = \frac{20 + 98}{2} = 59 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При этой температуре для воды имеем следующие значения параметров:

- плотность $\rho_2 = 983,7 \text{ кг/м}^3$;
- кинематическая вязкость $\nu_2 = 0,486 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- коэффициент теплопроводности $\lambda_2 = 0,658 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
- теплоемкость $c_2 = 4,187 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$.

Сухой насыщенный пар при заданном давлении $p_r = 0,34 \text{ МПа}$ имеет температуру насыщения $t_1 \approx 138 \text{ }^\circ\text{C}$ и энтальпию $i_1 = 2731 \text{ кДж/кг}$ (прил. 3).

Тепловой поток, передаваемый воде, определяем по формуле:

$$Q = m_2 \cdot c_2 (t'_2 - t''_2), \text{ кДж}, \quad (3.1)$$

где

m_2 – расход воды через теплообменник, кг/с;

c_2 – теплоемкость воды, кДж/кг·К;

t'_2 и t''_2 – температура воды на входе, $^\circ\text{C}$.

Расход воды определим следующим образом:

$$m_2 = \frac{m_{\text{в}}}{3600} = 15500 / 3600 = 4,31 \text{ кг/с}.$$

Подставляя исходные данные в формулу (3.1), получим:

$$Q = 4,31 \cdot 4,187 \cdot (98 - 20) = 1407,6 \text{ кДж}.$$

Вычислим часовой расход греющего пара:

$$m_1 = 3600 \frac{Q}{i_1 - i_{\text{к}}}, \quad (3.2)$$

где

i_1 – удельная энтальпия греющего пара, кДж/кг;

$i_{\text{к}}$ – удельная энтальпия конденсата, кДж/кг.

Приняв температуру конденсата $t_{\text{к}} = 135 \text{ }^\circ\text{C}$ (на $3 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже температуры греющего пара), рассчитаем энтальпию конденсата:

$$i_{\text{к}} = 4,19 \cdot t_{\text{к}} = 4,19 \cdot 135 = 565,6 \text{ кДж/кг}.$$

Расход пара, рассчитанный по формуле (3.2), составляет:

$$m_1 = 3600 \frac{1407,6}{2731 - 565,6} = 2340 \text{ кг/ч}.$$

Определяем количество трубок в пучке и режим движения воды при заданной скорости течения.

Количество трубок определяется по формуле:

$$n = \frac{4 \cdot m_2}{\omega \cdot \rho_2 \cdot \pi \cdot d_{\text{вн}}^2} = \frac{4 \cdot 4,31}{1,3 \cdot 983,7 \cdot 3,14 \cdot 0,028^2} = 5,48.$$

где

m_2 – расход воды через теплообменник, кг/с;

ω – скорость движения воды, м/с;

ρ_2 – плотность воды, кг/м³;

$d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубок, м. При этом $d_{\text{вн}} = d_{\text{н}} - 2\delta$.

Принимаем значение количества трубок, равное 5, и уточняем значение скорости движения воды:

$$\omega = \frac{4 \cdot m_2}{n \cdot \rho_2 \cdot \pi \cdot d_{\text{вн}}^2} = \frac{4 \cdot 4,31}{5 \cdot 983,7 \cdot 3,14 \cdot 0,028^2} = 1,42 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса, определяющее режим движения, находится по формуле:

$$Re = \frac{\omega \cdot d_{\text{вн}}}{\nu},$$

где

ω – скорость движения теплоносителя, м/с;

$d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубок, м;

ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Подставляя соответствующие параметры для воды, получаем

$$Re = \frac{1,42 \cdot 0,028}{0,486 \cdot 10^{-6}} = 81811.$$

Полученное значение числа Рейнольдса свидетельствует о том, что режим движения воды является турбулентным.

Рассчитываем коэффициент теплопередачи по формуле, соответствующей плоской разделяющей стенке:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3.3)$$

где

α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи с одной и с другой стороны разделяющей стенки, Вт/м²·К;

δ – толщина стенки, м;

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/м·К.

Для определения коэффициентов теплоотдачи используем теорию подобия и критериальные зависимости, конкретный вид которых зависит от условий теплообмена, в том числе от режима движения теплоносителей.

Режим движения определяется по значению числа Рейнольдса. В зависимости от режима движения воды выбираем соответствующий вид критериального уравнения.

При вынужденном движении жидкости в трубах критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность теплообмена между стенкой и жидкостью для турбулентного режима (при $Re > 10000$) можно определить по формуле:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_2}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25}. \quad (3.4)$$

где Pr_2 и $Pr_{\text{ст}}$ – критерий Прандтля для воды соответственно при средней температуре воды и при температуре стенки.

Температурой стенки предварительно задаются и при необходимости это значение уточняют методом последовательных приближений.

В первом приближении температуру стенки примем равной среднему значению между температурами теплоносителей:

$$t_{\text{ст}} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{138 + 59}{2} = 98 \text{ }^\circ\text{C}.$$

По справочным таблицам (прил. 2) определяем критерий Прандтля:

при температуре $t_2 = 59 \text{ }^\circ\text{C}$: $Pr_2 = 3,04$;

при температуре $t_{\text{ст}} = 98 \text{ }^\circ\text{C}$: $Pr_{\text{ст}} = 1,79$.

Подставляя значения в формулу (3.4), получаем:

$$Nu = 0,021 \cdot 81811^{0,8} \cdot 3,04^{0,43} \left(\frac{3,04}{1,79} \right)^{0,25} = 329,3.$$

Учитывая, что $Nu_2 = \frac{\alpha_2 d_{\text{вн}}}{\lambda_2}$, находим значение коэффициента теплоотдачи со стороны воды:

$$\alpha_2 = \frac{329,3 \cdot 0,658}{0,028} = 7739 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Согласно условию значение коэффициента теплоотдачи со стороны пара составляет $\alpha_1 = 6100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Подставляем значения коэффициентов теплоотдачи в формулу (3.3) для вычисления коэффициента теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{6100} + \frac{0,002}{45} + \frac{1}{7739}} = 2962 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Площадь поверхности теплопередачи рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{Q \cdot 10^3}{K \cdot \Delta t_{\text{ср}}}, \quad (3.5)$$

где $\Delta t_{\text{ср}}$ – расчетный температурный напор, который определяется как среднелогарифмический:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{t_{\text{б}}}{t_{\text{м}}}} = \frac{118 - 40}{\ln \frac{118}{40}} = 62,6 \text{ }^\circ\text{C},$$

где $\Delta t_{\text{б}}$ и $\Delta t_{\text{м}}$ – соответственно большее и меньшее значение температурного напора на входе и выходе из теплообменника (см. рис. 3.1).

Подставляя соответствующие значения в формулу (3.5), получаем:

$$F = \frac{1407,6 \cdot 10^3}{2962 \cdot 62,6} = 7,59 \text{ м}^2.$$

Определяем число ходов трубной части теплообменника

$$z = \frac{F}{n \cdot l \cdot \pi \cdot d_{\text{ср}}},$$

где

n – количество труб в пучке;

z – число ходов трубной части теплообменника;

l – расчетная длина трубной части;

$d_{\text{ср}}$ – средний диаметр трубок, м.

$$z = \frac{7,59}{5 \cdot 2,4 \cdot 3,14 \cdot 0,030} = 6,71 .$$

Принимаем количество ходов, равное 7, и уточняем длину трубной части из условия обеспечения требуемой площади теплопередачи

$$l = \frac{F}{n \cdot z \cdot \pi \cdot d_{\text{ср}}} = \frac{7,59}{5 \cdot 7 \cdot 3,14 \cdot 0,030} = 2,302 \text{ м} .$$

Полученное значение округляем до величины, кратной 0,1 м и принимаем $l = 2,3$ м.

Рассчитываем внутренний диаметр кожуха по приближенной формуле:

$$D = \sqrt{\frac{\pi \cdot b^2 \cdot n \cdot z}{4 \cdot \varphi}} + 0,012 = \sqrt{\frac{3,14 \cdot 0,038^2 \cdot 5 \cdot 7}{4 \cdot 0,7}} + 0,012 = 0,238 \text{ м},$$

где

b – шаг разбивки трубной доски, м ($b = d_{\text{н}} + 0,006$ м);

φ – коэффициент использования площади трубной доски ($\varphi = 0,7 \dots 0,9$).

Принимаем $D = 0,24$ м. Схема теплообменника представлена на рисунке 3.1.

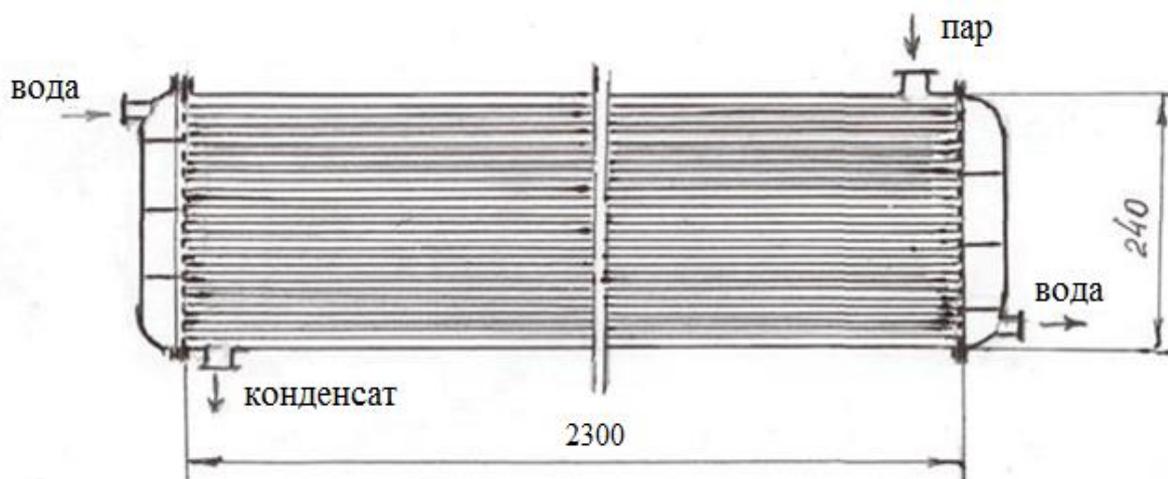


Рисунок 3.1 – Схема кожухотрубного теплообменника

Список литературы

1. Амерханов Р.А., Драганов Б.Х. Теплотехника: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2006. 432 с.: ил.
2. Кузнецов Ю.В., Никифоров А.Г. Теплотехника: учебник для вузов. Смоленск: ФГБОУ ВО Смоленская ГСХА, 2021. 278 с.: ил.
3. Михайличенко С.М., Купреенко А.И., Исаев Х.М. Теплотехника. Курс лекций. Ч. I. Техническая термодинамика: учебно-методическое пособие по дисциплине «Теплотехника» для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2022. 58 с.
4. Михайличенко С.М., Купреенко А.И., Исаев Х.М. Теплотехника. Примеры решения задач: методическое пособие по выполнению практических и самостоятельных работ по дисциплине «Теплотехника и теплоснабжение предприятий пищевых производств». Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2022. 132 с.
5. Никифоров А.Г., Попова Д.Ю. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания: учебно-методическое пособие по теплотехнике. Смоленск: Изд-во Смоленской ГСХА, 2017. 75 с.
6. Рудобашта С.П. Теплотехника. М.: КолосС, 2010. 599 с.: ил.
7. Чащинов В.И. Практикум по теплотехнике: учебное пособие для студентов агроинженерных специальностей. Брянск: Изд-во БГСХА, 2009. 86 с.
8. Чащинов В.И. Теплотехника: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлениям подготовки для предприятий переработки сельскохозяйственной продукции, пищевых производств и предприятий общественного питания. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2015. 220 с.

Приложение 1 – Основные характеристики важнейших газов

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса μ , кг/кмоль	Показатель адиабаты k	Газовая постоянная R , Дж / (кг · К)
Воздух	–	28,96	1,4	287,0
Кислород	O ₂	32,00	1,4	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,4	296,8
Гелий	He	4,003	1,67	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,67	208,2
Водород	H ₂	2,016	1,4	4124,0
Оксид углерода	CO	28,01	1,4	296,8
Двуокись углерода	CO ₂	44,01	1,29	188,9
Сернистый газ	SO ₂	64,06	1,29	129,8
Метан	CH ₄	16,032	1,29	518,8
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,29	296,6
Аммиак	NH ₃	17,032	1,29	488,3

Приложение 2 – Физические свойства воды

t , °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	λ , 10 ² ·Вт/(м·К)	ν , 10 ⁶ ·м ² /с	β , 10 ⁴ /К	σ , 10 ⁻⁴ ·Н/м	Pr
0	999,9	4,212	55,1	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	999,7	4,191	57,4	1,306	0,70	741,6	9,52
20	998,2	4,183	59,9	1,006	1,82	726,9	7,02
30	995,7	4,174	61,8	0,805	3,21	712,2	5,42
40	992,2	4,174	63,5	0,659	3,87	696,5	4,31
50	998,1	4,174	64,8	0,556	4,49	676,9	3,54
60	983,2	4,179	65,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	977,8	4,187	66,8	0,415	5,70	643,5	2,55
80	971,8	4,195	67,4	0,365	6,32	625,9	2,21
90	965,3	4,208	68,0	0,326	6,95	607,2	1,95
100	958,4	4,220	68,3	0,295	7,52	588,6	1,75
110	951,0	4,233	68,5	0,272	8,08	569,0	1,60
120	943,1	4,250	68,6	0,252	8,64	548,4	1,47
130	934,8	4,266	68,6	0,233	9,19	528,8	1,36
140	926,1	4,287	68,5	0,217	9,72	507,2	1,26
150	917,0	4,313	68,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	907,4	4,346	68,3	0,191	10,7	466,0	1,10
170	897,3	4,380	67,9	0,181	11,3	443,4	1,05
180	886,9	4,417	67,4	0,173	11,9	422,8	1,00
190	876,0	4,459	67,0	0,165	12,6	400,2	0,96
200	863,0	4,505	66,3	0,158	13,3	376,7	0,93
210	852,8	4,555	65,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	840,3	4,614	64,5	0,149	14,8	331,6	0,89
230	827,3	4,681	63,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	813,6	4,756	62,8	0,141	16,8	285,5	0,87
250	799,0	4,844	61,8	0,137	18,1	261,9	0,86
260	784,0	4,949	60,5	0,135	19,7	237,4	0,87
270	767,9	5,070	59,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	750,7	5,230	57,4	0,131	23,7	191,3	0,90
290	732,3	5,485	55,8	0,129	26,2	168,7	0,93
300	712,5	5,736	54,0	0,128	29,2	144,2	0,97
310	691,1	6,071	52,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	667,1	6,574	50,6	0,128	38,2	98,10	1,11
330	640,2	7,244	48,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	610,1	8,165	45,7	0,127	53,4	56,70	1,39
350	574,4	9,504	43,0	0,126	66,8	38,16	1,60
360	528,0	13,984	39,5	0,126	109	20,21	2,35
370	450,5	40,321	33,7	0,126	264	4,71	6,79

Приложение 3 – Параметры насыщенного водяного пара

Давление p , МПа	Температура насыщения t , °С	Удельный объем v'' , м ³ /кг	Энтальпия i'' , кДж/кг	Теплота парообразования r , кДж/кг
0,001	6,92	129,9	2513	2484
0,002	17,51	66,97	2533	2459
0,004	28,98	34,81	2554	2433
0,006	36,18	23,74	2567	2415
0,008	41,54	18,10	2576	2402
0,010	45,84	14,68	2584	2392
0,012	49,45	12,35	2591	23,84
0,014	52,08	10,69	2596	2376
0,016	55,34	9,44	2601	2370
0,018	57,82	8,45	2605	2363
0,020	60,08	7,647	2609	2358
0,025	64,99	6,202	2618	2346
0,030	69,12	5,232	2625	2236
0,040	75,88	3,997	2636	2318
0,050	81,35	3,243	2645	2204
0,060	85,95	2,732	2653	2293
0,070	89,97	2,364	2660	2283
0,080	93,52	2,087	2665	2273
0,090	96,72	1,869	2670	2265
0,100	99,64	1,694	2675	2258
0,120	104,81	1,429	2883	2244
0,140	109,33	1,236	2690	2232
0,160	113,32	1,091	2696	2221
0,180	116,94	0,9772	2702	2211
0,200	120,23	0,8854	2707	2202
0,220	123,27	0,8098	2711	2193
0,240	126,09	0,7465	2715	2185
0,260	128,73	0,6925	2719	2178
0,280	131,20	0,6461	2722	2171
0,300	133,54	0,6057	2725	2164
0,320	135,75	0,5701	2728	2157
0,340	137,86	0,5386	2731	2151
0,360	139,87	0,5104	2734	2145
0,380	141,79	0,4852	2736	2139
0,400	143,62	0,4624	2738	2133
0,450	147,92	0,4139	2744	2121
0,500	151,84	0,3747	2749	2109
0,600	158,84	0,3156	2757	2086
0,700	164,96	0,2728	2764	2067
0,800	170,42	0,2403	2769	2048
1,000	179,88	0,1946	2778	2015
1,200	187,95	0,1633	2785	1987
1,400	195,04	0,1408	2790	1960
1,600	201,36	0,1238	2793	1935
1,800	207,10	0,1104	2796	1912
2,000	212,37	0,0996	2799	1891

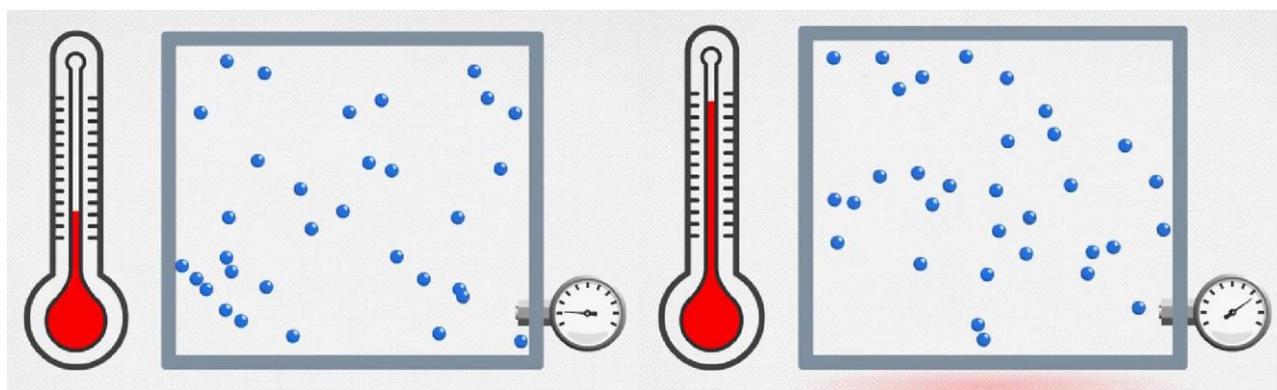
Учебное издание

Чащинов В.И.,
Михайличенко С.М.,
Купреенко А.И.,
Исаев Х.М.,
Шкуратов Г.В.

Т Е П Л О Ф И З И К А

Методические указания для выполнения практических работ

Часть I



Редактор Адылина Е.С.

Подписано к печати 27.10.2022 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.

Бумага офсетная. Усл. п. л. 1,56 Тираж 25 экз. Изд. №.7393

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский