

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Факультет строительный

Кафедра теплотехники и гидравлики

УТВЕРЖДЕН  
на заседании кафедры  
«29» августа 2017 г.,  
протокол № 1  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.С. Васильев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.В.08 «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОБМЕН»**

Направление подготовки (специальность) 08.03.01 Строительство

Квалификация (степень) выпускника – Бакалавр

Профиль (направленность) Теплогазоснабжение и вентиляция

Академический бакалавриат

Методические материалы разработаны на основе рабочей программы дисциплины, предусмотренной образовательной программой высшего образования (ОП ВО) по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» направленность (профиль) «Теплогазоснабжение и вентиляция».

*СОСТАВИТЕЛЬ:*

Доцент кафедры теплотехники  
и гидравлики, кандидат технических наук \_\_\_\_\_ В.И. Тарасов

*СОГЛАСОВАНО:*

Методическая комиссия строительного факультета «30» августа 2017 г., протокол №1.

Декан факультета \_\_\_\_\_ А.Н. Плотников

**1. Паспорт оценочных материалов по дисциплине  
Б1.В.08 «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОБМЕН»**

1.1 Процесс обучения по дисциплине направлен на формирование следующих компетенций

<b>Компетенция по ФГОС</b>	<b>Ожидаемые результаты обучения</b>
<p><b>ОПК-2</b> - способностью выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь для их решения соответствующий физико-математический аппарат</p>	<p><b>Знать</b> - фундаментальные основы физики, включая разделы «давление жидкости и газов», «молекулярная физика», «теплота»;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- терминологию, основные понятия, относящиеся к теплотехнике;</li> <li>- фундаментальные основы высшей математики, включая линейную алгебру и математический анализ;</li> <li>- основные законы термодинамики и теплопередачи;</li> <li>- основное тепловое оборудование, применяемое в системах ТГВ.</li> </ul> <p><b>Уметь</b> - проводить формализацию поставленной задачи на основе современного математического аппарата;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь для их решения соответствующий физико-математический аппарат</li> <li>- определять тепловые нагрузки, теплотери;</li> <li>- правильно выбирать тепловое оборудование;</li> <li>- проводить формализацию поставленной задачи на основе современного математического аппарата;</li> <li>- пользоваться теплотехническими приборами;</li> <li>- пользоваться справочной научно-технической литературой;</li> </ul> <p><b>Владеть</b> - первичными навыками и основными методами решения математических задач применительно к термодинамике;</p>
<p><b>ПК-14</b>- владением методами и средствами физического и математического (компьютерного) моделирования в том числе с использованием универсальных и специализированных программно-вычислительных комплексов, систем автоматизированных проектирования, стандартных пакетов автоматизации исследований, владение методами испытаний строительных конструкций и изделий, методами постановки и проведения экспериментов по заданным методикам</p>	<p><b>Знать</b>- терминологию, основные понятия, относящиеся к гидравлике и теплотехнике;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- фундаментальные основы высшей математики, включая линейную алгебру и математический анализ;</li> <li>- основные законы термодинамики и теплопередачи</li> <li>- фундаментальные основы физики, включая разделы «молекулярная физика», «теплота»;</li> <li>- методы расчета термодинамических процессов;</li> <li>- методы расчета температурных полей и тепловых потоков</li> </ul> <p><b>Уметь</b>- формулировать и решать теплотехнические задачи в строительстве;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- проводить формализацию поставленной задачи на основе современного математического аппарата;</li> <li>- пользоваться справочной научно-технической литературой</li> </ul> <p><b>Владеть</b> - методами решения простых задач термодинамики и теплообмена;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- владеть методами расчета теплотехнических процессов в строительстве;</li> <li>- первичными навыками и основными методами решения математических задач;</li> </ul>

## 1.2 Формирование компетенций в процессе обучения по дисциплине

№	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Раздел 1. Основные понятия и законы термодинамики	ОПК-2 ПК-14	практические работы, лабораторные работы, расчетно-графическая работа, вопросы к зачету
2	Раздел 2. Термодинамические циклы	ОПК-2 ПК-14	практические работы, лабораторные работы, вопросы к зачету
3	Раздел 3. Основные понятия и законы переноса теплоты и вещества	ОПК-2 ПК-14	лабораторные работы, практические работы, расчетно-графическая работа, вопросы к зачету

**2. Критерии оценки успеваемости обучающихся**

Формы и виды контроля знаний обучающихся, предусмотренные по данной дисциплине:

- текущий контроль (защита лабораторных, практических работ, выполнение аудиторных контрольных работ, расчетно-графическая работа);
- промежуточная аттестация (зачет).

**Процедура оценивания при проведении текущего контроля успеваемости**

Текущий контроль успеваемости проводится с целью проверки знаний обучающихся, приобретения и развития навыков самостоятельной работы, усиления связи между преподавателем и обучающимся, совершенствования работы кафедр по развитию навыков самостоятельной работы, по повышению академической активности обучающихся.

Промежуточная аттестация, как форма контроля успеваемости по дисциплинам (разделам дисциплин) и видам учебной деятельности, проводится для проверки степени усвоения обучающимися программного учебного материала и установления соответствия результатов проверки требованиям государственных образовательных стандартов к обязательному минимуму содержания или формирования компетенций, установленных федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования.

К промежуточной аттестации допускаются обучающиеся, успешно прошедшие текущий контроль знаний, умений и навыков.

**Критерии получения зачета по дисциплине:**

- оценка «зачтено» ставится, если обучающийся защитил все лабораторные и практические работы, ответил на половину вопросов к зачету.
- оценка «не зачтено» ставится, если обучающийся не защитил все лабораторные и практические работы, не ответил на половину вопросов к зачету.

**Критерии оценки расчетно-графической работы:**

«Зачтено» - работа выполнена в соответствии с утвержденным планом, полностью раскрыто содержание каждого вопроса, студентом сформулированы собственные аргументированные выводы по теме работы. Оформление работы соответствует предъявляемым требованиям. При защите работы обучающийся свободно владел материалом и отвечал на вопросы.

«Не зачтено» - если работа выполнена не в соответствии с утвержденным планом,

не раскрыто содержание каждого вопроса, обучающимся не сделаны выводы по теме работы, имеются грубые недостатки в оформлении работы, при защите работы обучающийся не владел материалом, не отвечал на вопросы, то работа направляется на дальнейшую доработку.

### **Примерная тематика расчетно-графических работ**

*(Контролируемые компетенции ОПК-2, ПК-14)*

Согласно учебному плану студенту, изучающему курс «Техническая термодинамика и тепломассообмен» необходимо выполнить расчетно-графическую работу. Расчетно-графическая работа состоит из 5 задач.

При выполнении расчетно-графической работы следует строго придерживаться своего варианта. Варианты задач определяют по табл. В.1 "Варианты заданий" в зависимости от двух последних цифр шифра студента. Например, при шифре 116 или 166 (две последние цифры соответственно 16 и 66) студент отвечает на вопросы и решает следующие варианты задач: 4, 20, 29, 37, 44. Формулировки условия вариантов задач в контрольной работе нужно переписывать полностью.

Решения задач должны сопровождаться краткими объяснениями и подробными вычислениями. При расчете какой-либо величины нужно словами указать, какая величина определяется. В процессе решения задач необходимо сначала привести формулы, лежащие в основе вычислений, проделать с ними все выкладки (в буквенном выражении) и лишь затем подставлять соответствующие числовые значения и производить вычисления. Нужно указать единицы величин, как заданных в условии задач, так и найденных в результате решения.

При решении задач и в ответах на вопросы следует придерживаться принятой в учебнике [1] системы обозначений, терминов и Международной системы единиц (СИ).

Точность вычислений зависит от точности заданных величин или выбранных исходных данных, но в общем случае не следует стремиться к точности выше, чем 0,5 %.

Расчетно-графическая работа выполняется на формате А4. Для заметок рецензента оставляют поля и в конце работы чистый лист.

Перед выполнением контрольного задания студент должен ознакомиться с методикой решения соответствующих задач.

Таблица 1. Варианты заданий

Две последние цифры шифра студента	Номера вопросов и вариантов задач	Две последние цифры шифра студента	Номера вопросов и вариантов задач
01, 51	2, 12, 23, 34, 41	26, 76	7, 16, 25, 34, 48
02, 52	6, 14, 26, 38, 42	27, 77	6, 15, 24, 33, 44
03, 53	4, 15, 27, 39, 43	28, 78	5, 14, 23, 32, 50
04, 54	5, 14, 24, 34, 44	29, 79	4, 13, 22, 31, 43
05, 55	6, 15, 25, 35, 45	30, 80	3, 12, 21, 40, 48
06, 56	10, 16, 26, 36, 46	31, 81	4, 12, 30, 38, 47
07, 57	9, 17, 27, 37, 47	32, 82	6, 14, 22, 36, 46
08, 58	8, 18, 28, 38, 48	33, 83	8, 16, 24, 34, 45
09, 59	7, 19, 29, 39, 49	34, 84	10, 18, 26, 32, 44
10, 60	6, 20, 30, 40, 50	35, 85	2, 20, 28, 40, 43
11, 61	9, 18, 27, 36, 49	36, 86	1, 15, 25, 35, 42
12, 62	8, 17, 26, 35, 48	37, 87	3, 16, 30, 31, 41
13, 63	7, 18, 22, 40, 47	38, 88	5, 15, 21, 35, 42
14, 64	6, 17, 21, 39, 46	39, 89	7, 17, 28, 38, 43
15, 65	5, 16, 30, 38, 45	40, 90	9, 18, 23, 34, 44
16, 66	4, 20, 29, 37, 44	41, 91	10, 20, 21, 33, 45

17, 67	3, 19, 28, 36, 43	42, 92	9, 13, 30, 33, 46
18, 68	2, 13, 27, 35, 42	43, 93	6, 14, 29, 40, 47
19, 69	1, 11, 26, 34, 41	44, 94	4, 16, 30, 36, 48
20, 70	10, 12, 25, 33, 42	45, 95	2, 20, 27, 35, 49
21, 71	10, 18, 24, 32, 43	46, 96	9, 11, 26, 40, 50
22, 72	9, 16, 23, 31, 44	47, 97	7, 12, 25, 39, 48
23, 73	6, 14, 22, 38, 45	48, 98	6, 15, 22, 31, 47
24, 74	7, 17, 21, 39, 46	49, 99	5, 13, 24, 38, 48
25, 75	8, 18, 22, 40, 47	50, 00	3, 14, 23, 34, 45

**Задача 1.**

Камера сгорания выполнена из шамотного кирпича ( $\lambda_k = 0,9$  Вт/(м·К)) толщиной  $\delta_k = 250$  мм. Снаружи стенки камеры изолированы двойным слоем изоляции. Первый слой изоляции ( $\lambda_{из1} = 0,08$  Вт/(м·К)) толщиной  $\delta_{из1}$ , мм, второй наружный слой изоляции ( $\lambda_{из2} = 0,15$  Вт/(м·К)) толщиной  $\delta_{из2}$ , мм. Температура газов в камере сгорания  $t_{ж1}$ , °С, температура воздуха в помещении  $t_{ж2}$ , °С. Коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к кирпичной стенке  $\alpha_1$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), а от наружной поверхности изоляции к воздуху помещения  $\alpha_2 = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Определить коэффициент теплопередачи, плотность теплового потока (если она не задана), температуры теплоносителей и температуры на границе слоев обмуровки, считая контакт между слоями идеальным.

Определить также термические сопротивления теплоотдачи и теплопроводности для каждого слоя ( $R_i$ ) и соответствующие им перепады температур ( $\Delta t$ ).

Изобразить графически изменение температуры по толщине слоев и в пограничных слоях. Масштаб по толщине слоев и по температуре выбрать самостоятельно.

Таблица 1.1 Варианты к задаче 1

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta_{из1}$ , мм	190	180	150	230	265	240	195	270	220	300
$\delta_{из2}$ , мм	100	70	130	140	135	140	155	165	170	130
$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	100	80	70	130	60	90	80	150	250	150
$t_{ж1}$ , °С				1150		1000			1040	1030

Продолжение табл. 1

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{c1}$ , °С		900					1170	1230		
$t_{c2}$ , °С			890		1170					
$t_{c3}$ , °С					290		390			275
$t_{c4}$ , °С		50	52						50	
$t_{ж2}$ , °С	25			28				30		
$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	310					225				

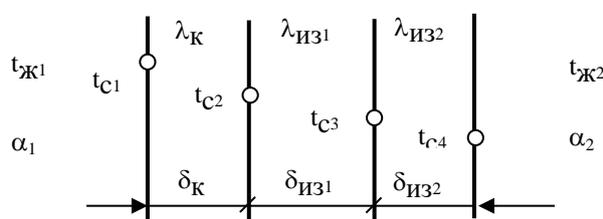


Рис. 1.1

На рис.1.1 схематично показано расположение слоев стенок топочной камеры.

Результаты расчетов необходимо занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Результаты расчетов

Вариант	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$q, \text{Вт}/\text{м}^2$	$t_{\text{ж1}}, \text{°C}$	$t_{\text{с1}}, \text{°C}$	$t_{\text{с2}}, \text{°C}$	$t_{\text{с3}}, \text{°C}$	$t_{\text{с4}}, \text{°C}$	$t_{\text{ж2}}, \text{°C}$

### Методические указания к решению задач № 1

Перед решением задач № 1 рекомендуем изучить материалы учебника [1] на с. 24 ÷ 40.

Под теплопередачей понимают передачу теплоты от движущейся среды (жидкости) с большей температурой к движущейся среде (жидкости) с меньшей температурой через непроницаемую стенку любой формы. Таким образом, теплопередача включает в себя теплоотдачу от нагретой жидкости к стенке, теплопроводность внутри стенки, которая в общем случае может быть многослойной, и теплоотдачу от стенки к нагреваемой жидкости. Под термином "жидкость" понимают любую текучую среду: и капельные жидкости, и газы.

В стационарном режиме теплопередачи тепловой поток через плоскую, цилиндрическую и сферическую стенки есть величина постоянная ( $Q = \text{const}$ ) и температурное поле не изменяется во времени, а зависит только от координаты. В этом случае при условии постоянства теплофизических свойств тела, температура в плоской стенке изменяется линейно, а в цилиндрической — по логарифмическому закону.

#### *Теплопередача через плоскую стенку*

Расчет теплопередачи через плоскую стенку удобно выполнять, используя поверхностную плотность теплового потока

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $F$  – площадь стенки,  $\text{м}^2$ .

В этом случае

$$q = \frac{\Delta t}{R_t}, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – перепад температуры на заданном участке теплообмена, К ( $^{\circ}\text{C}$ ), который может состоять из одного или нескольких смежных элементарных участков теплообмена: теплоотдачи и теплопроводности, а  $R_t$  – термическое сопротивление теплообмена этого участка или совокупности смежных участков,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ .

Термическое сопротивление теплоотдачи рассчитывается по формуле

$$R_{t,\alpha} = \frac{1}{\alpha}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К), а формула для расчета термического сопротивления теплопроводности через  $i$ -й слой плоской стенки имеет вид

$$R_{t,i} = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (4)$$

где  $\delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя, м;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя многослойной стенки, Вт/(м·К).

Термическое сопротивление теплопередачи есть сумма термических сопротивлений всех элементарных участков теплообмена.

Рекомендуемая последовательность решения:

- а) определяют термические сопротивления всех элементарных участков;
- б) по двум заданным температурам в системе теплообмена находят плотность теплового потока по формуле (2);
- в) по найденному значению  $q$  и одной из известных температур рассчитывают остальные неизвестные температуры слоев и жидкостей.

### **Теплопередача через цилиндрическую стенку**

Для расчета теплопередачи через стенку цилиндрической формы используют удельный тепловой поток, который называется линейной плотностью теплового потока

$$q_l = \frac{Q}{l}, \quad (5)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $l$  – длина цилиндрической стенки, м.

Тогда

$$q_l = \frac{\pi \Delta t}{R_l}, \quad (6)$$

где  $\Delta t$  – перепад температуры на заданном участке теплообмена, К (°С), который может состоять из ряда элементарных участков теплообмена: теплоотдачи и теплопроводности, а  $R_l$  – линейное термическое сопротивление теплообмена этого участка, (м·К)/Вт.

Линейное термическое сопротивление теплоотдачи рассчитывается по формуле

$$R_{l,\alpha} = \frac{1}{\alpha \cdot d}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К), а  $d$  – диаметр омываемой поверхности цилиндрической стенки, м.

Линейное термическое сопротивление теплопроводности  $i$ -го слоя цилиндрической стенки определяется по формуле

$$R_{l,i} = \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}, \quad (8)$$

в которой  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя цилиндрической стенки, Вт/(м·К);  $d_i$  и  $d_{i+1}$  – внутренний и наружный диаметры  $i$ -го слоя цилиндрической стенки, м.

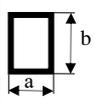
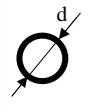
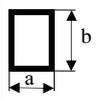
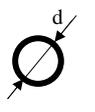
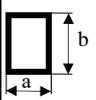
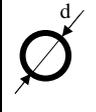
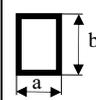
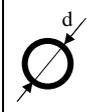
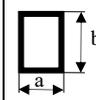
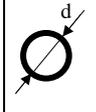
Рекомендуемый порядок решения задачи о теплопередаче через цилиндрическую стенку полностью совпадает с рассмотренным выше для плоской стенки.

При решении задачи 1-2 обратите внимание, что в данном случае тепловой поток направлен от дымовых газов к воде, движущейся внутри трубки.

### **Задача 2.**

Определить тепловой поток, характеризующий конвективную теплоотдачу к струе жидкости, протекающей по каналу длиной 3 м. Обосновать выбор расчетного уравнения, применяемого при решении задачи.

Таблица 2.1 Варианты к задаче 2

Наименование	Варианты задач									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	20
Температура стенки трубы, °С	-5	15	30	120	90	-5	15	60	85	45
Средняя температура жидкости, °С	0	10	20	30	30	20	10	10	90	50
Род жидкости	Воздух	Вода	Вода	Воздух	Воздух	Воздух	Вода	Воздух	Вода	Вода
Средняя скорость потока, м/с	10	3,9	5	6	4	2,25	2,8	1,9	0,55	1,2
Размер канала, мм	 a = 30 b = 40	 d = 35	 a = 35 b = 45	 d = 40	 a = 30 b = 40	 d = 75	 a = 70 b = 80	 d = 80	 a = 75 b = 85	 d = 85

### Методические указания к решению задач № 2

Основные положения учения о конвективном теплообмене изложены в четвертой главе, а расчет теплоотдачи при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах представлен в восьмой главе учебника [1]. Десятая глава того же учебника [1] посвящена расчету теплоотдачи при свободном движении текучей среды.

Тепловой поток  $Q$ , передаваемый от поверхности к омывающей ее текучей среде (жидкости) или, наоборот, от жидкости к стенке рассчитывают по закону Ньютона – Рихмана:

$$Q = \alpha |t_c - t_{ж}| F, \quad (1)$$

$$\text{или } Q = \alpha \Delta t F, \quad (2)$$

$$\text{или } q = \alpha \Delta t, \quad (3)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $q = Q/F$  – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – средний коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t = |t_c - t_{ж}|$  – температурный напор теплоотдачи, °С (К);  $t_c$  – температура поверхности теплообмена, °С (К);  $t_{ж}$  – температура текучей среды (жидкости) вдали от поверхности теплообмена, °С (К).

При заданных геометрических размерах системы теплообмена и температурах поверхности и жидкости задача расчета теплового потока сводится к определению коэффициента теплоотдачи ( $\alpha$ ).

Величину коэффициента теплоотдачи находят из безразмерного (критериального) уравнения, которое получают в результате обработки многочисленных экспериментальных данных. Форма критериального уравнения зависит от вида конвекции (свободная или вынужденная) и режима движения жидкости (ламинарный, переходный или турбулентный):

— при вынужденной конвекции и интенсивном движении жидкости (переходный и турбулентный режимы) критериальное уравнение, как правило, имеет вид

$$Nu = c Re^n Pr^m \varepsilon_t \varepsilon_l; \quad (4)$$

— при вынужденном ламинарном течении жидкости

$$Nu = c Gr^k Re^n Pr^m \varepsilon_t \varepsilon_l; \quad (5)$$

— при свободной конвекции

$$Nu = c Gr^n Pr^m \varepsilon_t. \quad (6)$$

В формулах (4)÷(6):  $c$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $k$  – эмпирические постоянные;  $Nu = \alpha l_0/\lambda$  – определяемый критерий — число Нуссельта;  $Re = w l_0/\nu$  – определяющий критерий Рейнольдса;  $Pr = \nu/a$  – определяющий критерий Прандтля;  $Gr = (g l_0^3/\nu^2) \cdot \beta \cdot \Delta t$  – определяющий критерий Грасгофа;  $\varepsilon_t$  – поправочный коэффициент, учитывающий зависимость теплофизических свойств жидкости от температуры;  $\varepsilon_l$  – поправочный коэффициент, учитывающий особенность теплообмена на начальном участке гидродинамической и тепловой стабилизации течения в трубах и каналах;  $l_0$  – определяющий (характерный) размер системы теплообмена, м;  $w$  – определяющая скорость, м/с;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\Delta t = |t_c - t_{ж}|$  – температурный напор теплоотдачи, °С (К).

Часто для расчета поправочного коэффициента  $\varepsilon_t$  используют формулу

$$\varepsilon_t = \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где  $Pr_{ж}$  – критерий Прандтля жидкости, который находят по таблицам свойств жидкости при температуре жидкости, а  $Pr_c$  – критерий Прандтля жидкости, но его находят по таблицам свойств жидкости при температуре поверхности теплообмена (стенки).

Физические свойства текучей среды ( $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения, 1/К), входящие в критериальные уравнения находят в справочных таблицах [1, 2] при так называемой определяющей (характерной) температуре ( $t_0$ ), которая наиболее точно учитывает влияние температурного поля жидкости на эти свойства.

Для газов коэффициент объемного расширения в таблицах физических свойств не приводится, поскольку он легко рассчитывается по формуле

$$\beta = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{t_0 + 273}, \quad (8)$$

где  $T_0$  – характерная температура, К.

При движении жидкости в каналах некруглого поперечного сечения в качестве определяющего размера используют так называемый эквивалентный или гидравлический диаметр

$$l_0 = \frac{4f}{\Pi}, \quad (9)$$

где  $f$  – площадь поперечного живого сечения канала, м<sup>2</sup>;  $\Pi$  – смоченный периметр канала, м.

Особо следует обратить внимание на то, что в расчетах по критериальным формулам определяющие размер и температуру следует принимать точно такие же, как их принял автор формулы при ее получении. Принятые автором формулы характерные величины  $l_0$ ,  $t_0$  и  $w_0$  указываются в комментариях к формуле.

Алгоритм расчета коэффициента теплоотдачи заключается в следующем:

1. Определяют вид конвективного теплообмена: свободная или вынужденная конвекция и объект, где она происходит. Затем в литературе, например, в учебнике [1] находят критериальные формулы этого вида конвекции. В задаче № 1-4 исследуют конвективный теплообмен при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах (см. с.

183÷192 учебника [1]), а в задаче № 1-5 рассмотрена свободная конвекция около вертикальной поверхности и поверхности горизонтальной трубы (см. с 206÷208 учебника [1]).

2. Согласно требованиям, изложенным в комментариях к критериальным формулам, находят определяющие параметры:

- определяющий размер;
- определяющую температуру, по которой из таблиц свойств жидкости [1, 2] находят ее физические свойства ( $\nu$ ,  $\lambda$ ,  $Pr$  и т.д.);
- при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах по интегральному уравнению неразрывности рассчитывают определяющую скорость жидкости

$$w_0 = \frac{G}{\rho f}, \quad (10)$$

где  $G$  – массовый расход жидкости, кг/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $f$  – площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>.

3. Определяют режим течения среды:

- при вынужденном движении по критерию Рейнольдса ( $Re$ );
- при свободном движении по критерию Рэлея ( $Ra = Gr \cdot Pr$ )

и окончательно выбирают значения эмпирических коэффициентов в формулах вида (4)÷(6), приведенных в учебнике [1].

4. По критериальному уравнению находят безразмерный коэффициент теплоотдачи — число Нуссельта ( $Nu$ ).

5. Зная число Нуссельта рассчитывают величину коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha$ :

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l_0}. \quad (11)$$

В заключение раздела приведем некоторые наиболее часто встречаемые критериальные уравнения.

1. Теплоотдача при свободной конвекции около горизонтальных труб (формула И.М. Михеевой)

$$Nu = 0,50(Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}, \quad (12)$$

$l_0 = d_n$  – наружный диаметр трубы;  $t_0 = t_{ж}$  – температура жидкости вдали от стенки.

Формула справедлива при условии  $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$ , что соответствует ламинарному режиму течения жидкости. Турбулентный режим при свободной конвекции на горизонтальных трубах, как правило, не наблюдается из-за малого диаметра труб, используемых в теплообменных установках.

2. Теплоотдача при свободной конвекции около вертикальных поверхностей (вертикальные трубы, пластины и т.д.):

а) ламинарный режим ( $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$ ):

$$Nu = 0,75(Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}, \quad (13)$$

б) турбулентный режим ( $Gr \cdot Pr \geq 6 \cdot 10^{10}$ ):

$$Nu = 0,15(Gr \cdot Pr)^{1/3} \cdot (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}, \quad (14)$$

в) переходный режим ( $10^9 < Gr \cdot Pr < 6 \cdot 10^{10}$ ).

Переходный режим отличается неустойчивостью процесса течения и теплоотдачи, и теплоотдача возрастает от  $\alpha_{лам}$  до  $\alpha_{турбул}$  [1].

В формулах (13) и (14) приняты следующие определяющие параметры:  $l_0 = h$  – высота поверхности;  $t_0 = t_{ж}$  – температура жидкости вдали от стенки.

3. Теплоотдача при свободной конвекции около тел различной формы (шаров, горизонтальных и вертикальных труб, вертикальных пластин и т.д.) — формула М.А. Михеева:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n. \quad (15)$$

Ra=Gr·Pr	Режим движения	C	n
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	ламинарный	0,54	0,25
$> 2 \cdot 10^7$	турбулентный	0,135	0,333

В формуле (15):  $t_0 = 0,5 \cdot (t_{ж} + t_c)$  — средняя температура;  $l_0 = h$  — высота для вертикальных пластин и труб (цилиндров);  $l_0 = d_n$  — наружный диаметр для горизонтальных труб (цилиндров) и шаров.

4. Теплоотдача при вынужденном движении в трубе:

а) ламинарный вязкостно-гравитационный режим ( $Re < 2300$  и  $Ra > 8 \cdot 10^5$ ):

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Gr^{0,1} Pr^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} \varepsilon_l. \quad (16)$$

Поправка на начальный участок  $\varepsilon_l = f(l/d)$ , где  $l$  — длина трубы.

$l/d$	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\varepsilon_l$	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00

б) турбулентный режим ( $Re > 10^4$ ):

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} \varepsilon_l. \quad (17)$$

Поправка на начальный участок:

$$\varepsilon_l = 1 + \frac{2}{l/d}, \text{ где } l \text{ — длина трубы.}$$

в) переходный режим течения ( $8300 \leq Re \leq 10^4$ ):

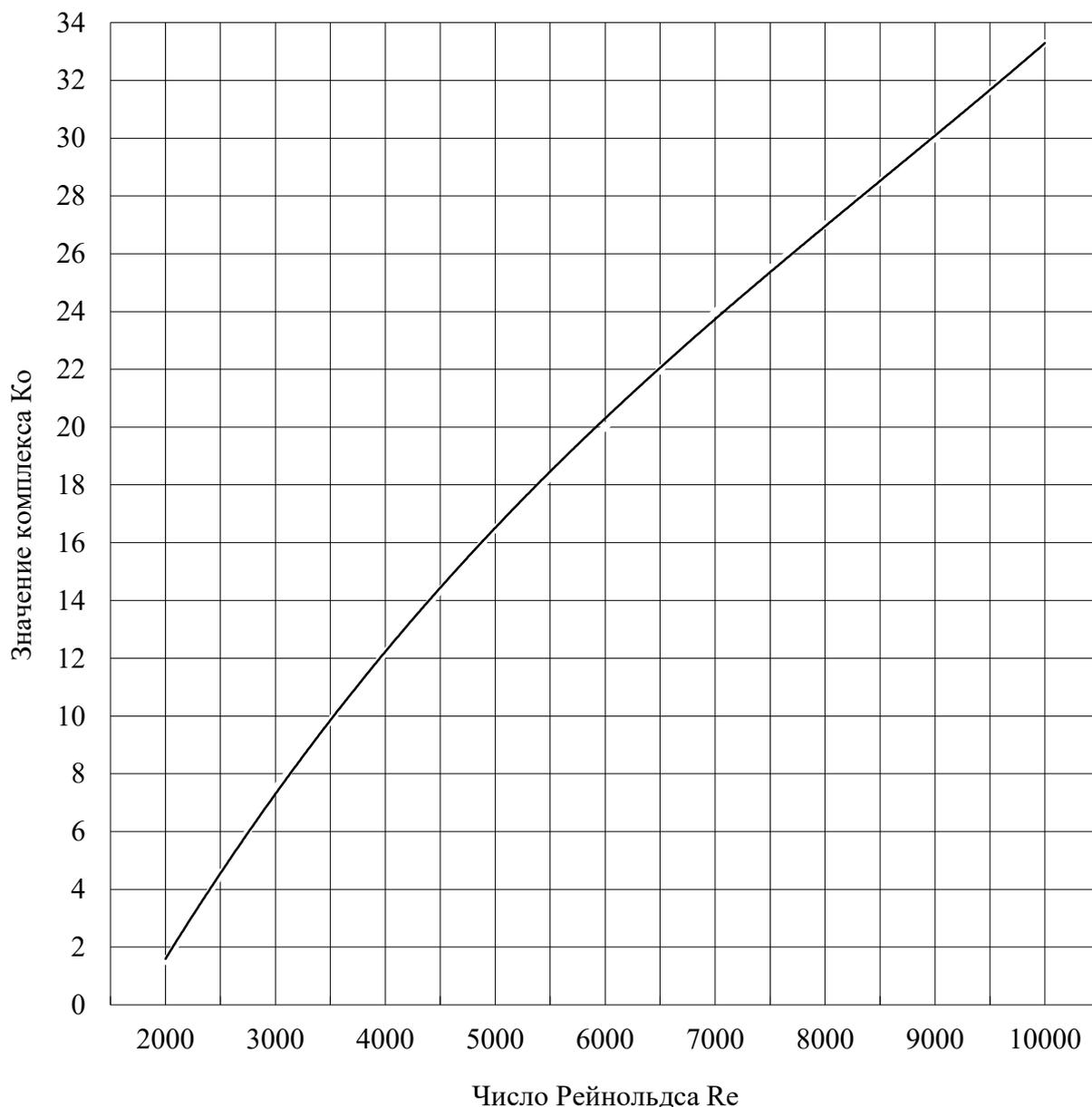
$$Nu = Ko \cdot Pr^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}, \quad (18)$$

где значение комплекса  $Ko$  зависит от числа Рейнольдса (см. рис. 1.3).

В формулах (16), (17) и (18) в качестве определяющей температуры принята средняя температура жидкости в трубе

$$t_0 = 0,5 \cdot (t_{вх} + t_{вых}),$$

а характерный размер равен внутреннему диаметру трубы  $l_0 = d_{вн}$ .



### Задача 3.

При заданных условиях конденсации определить: а) средний коэффициент теплоотдачи; б) тепловой поток, отводимый через стенку трубы при конденсации пара; в) расход конденсата, стекающего с трубы (режим конденсации рассматривать как пленочную конденсацию неподвижного пара).

Данные, необходимые для решения своего варианта задачи, выбрать из табл. 2.1 согласно таблице вариантов (см. табл. В.1, раздел "Общие методические указания").

Таблица 3.1. Варианты к задаче 3

Исходные данные	Варианты									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	30
Давление сухого насыщенного пара $p$ , кПа	2,33	4,24	4,24	4,24	7,37	2,33	4,24	4,24	4,24	7,37

Пар конденсируется на внешней стенке трубы	Труба расположена вертикально					Труба расположена горизонтально				
	2	2,5	3	3,5	4	2	2,5	3	3,5	4
Длина трубы, м	2	2,5	3	3,5	4	2	2,5	3	3,5	4
Диаметр трубы, м	0,02	0,024	0,02	0,024	0,04	0,024	0,02	0,024	0,02	0,024
Средняя температура стенки, °С	15	25	20	27	35	15	25	20	27	35

### Методические указания к задаче № 3

При пленочной конденсации сухого насыщенного пара на вертикальной трубе средний по высоте коэффициент теплоотдачи определяется по формуле [1]:

а) ламинарный режим течения пленки конденсата ( $Z \ll 2300$ ):

$$Re = 0,95 Z^{0,78}; \quad (1)$$

б) смешанный режим течения пленки конденсата — ламинарный режим на верхнем участке вертикальной трубы и турбулентный режим на нижнем участке:

$$Re = \left[ 89 + 0,024 Pr^{0,5} (Z - 2300) \cdot \varepsilon_t \right]^{4/3}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_t = (Pr_n/Pr_c)^{0,25}$  — поправочный коэффициент, учитывающий зависимость физических свойств пленки конденсата от температуры; критерии Прандтля  $Pr_n$  и  $Pr_c$  определяются для конденсата при температурах насыщения и средней температуре стенки.

В вышеприведенных формулах:

$$Re = \frac{\alpha \Delta t h}{r \nu \rho} = \frac{\alpha \Delta t h B}{4} \quad (3)$$

– критерий Рейнольдса при конденсации:  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t = t_n - t_c$  – температурный напор, °С;  $t_n$  – температура насыщения, °С;  $t_c$  – температура стенки трубы, °С;  $h$  – высота трубы, м;  $r$  – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости пленки конденсата, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>;  $B = 4/(r \rho \nu)$  – комплекс, который находят по табл. 8-1 задачника [2, стр. 159].

$$Z = \left( \frac{gh^3}{\nu^2} \right)^{1/3} \frac{\lambda \Delta t}{r \nu \rho} = h \Delta t A \quad (4)$$

– приведенная высота трубы:  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности конденсата, Вт/(м·К);

$$A = \left( \frac{g}{\nu} \right)^{1/3} \frac{\lambda}{r \nu \rho} \quad (5)$$

– комплекс, приведенный в табл. 8-1 на стр. 159 задачника [2] в зависимости от температуры насыщения.

Физические свойства конденсата находят по справочным таблицам, например, задачника [2] по температуре насыщения конденсата.

Значение удельной теплоты фазового перехода  $r$  также находят по температуре насыщения или по заданному давлению сухого насыщенного пара по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара [12] или воспользоваться данными табл. 2.2 настоящих методических указаний.

Таблица 2.2. Зависимость температуры и теплоты парообразования от давления

$p$ , МПа	$t_n$ , °С	$r$ , кДж/кг	$p$ , МПа	$t_n$ , °С	$r$ , кДж/кг
0,00123	10	2477,4	0,00737	40	2406,5
0,00234	20	2453,8	0,01234	50	2382,5
0,00424	30	2430,2	0,1000	99,63	2258,2

Заметим, что в расчетные формулы теплотдачи при конденсации  $r$  следует подставлять в Дж/кг!

Рассчитав критерий Рейнольдса по одной из формул  $Re = f(Z)$  легко можно найти и значение коэффициента теплоотдачи при конденсации:

$$\alpha = Re \frac{r \nu \rho}{\Delta t h} = Re \frac{4}{\Delta t h B}. \quad (6)$$

Алгоритм расчета теплоотдачи при конденсации на горизонтальной трубе незначительно отличается от изложенного выше. Поэтому перед началом расчета рекомендуем ознакомиться с примером решения аналогичной задачи, изложенном на с.157–159 за

#### Задача 4.

Пользуясь формулой Кутателадзе и формулой Михеева, определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , температурный напор  $\Delta t$  и температуру  $t_c$  поверхности нагрева при пузырьковом кипении воды в неограниченном объеме, если даны плотность теплового потока  $q$ , подводимого к поверхности нагрева, и давление  $p$ , при котором происходит кипение. Сопоставить результаты расчета по обеим формулам, вычислив процент несовпадения.

Построить схематично график зависимости  $q$  и  $\Delta t$  при кипении воды, указав на ней область пузырькового кипения и ориентировочно положение точки, соответствующей заданному режиму.

Таблица 4.1 Варианты к задаче 4

Исходные данные	Варианты									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	40
Интенсивность теплового потока $q$ , МВт/м <sup>2</sup>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Давление насыщения $p$ , МПа	1,0	1,56	2,32	3,35	4,7	1,0	1,56	2,32	3,35	4,7

#### Методические указания к задаче № 4

Изучите режимы процессов кипения, а для пузырькового и пленочного режимов — методику определения коэффициентов теплоотдачи.

Заинтересованность в высокой интенсивности теплообмена заставляет обратить внимание, особенно на пузырьковый режим кипения. Однако именно для этой области кипения пока не существует строгой теории. Поэтому, а также вследствие опечаток в ряде изданий, формулы для расчета теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении различных жидкостей, в том числе и воды, иногда отличаются друг от друга, так что результаты вычислений по ним существенно не совпадают. Поэтому рекомендуется пользоваться следующими формулами для пузырькового кипения в неограниченном объеме (все величины, входящие в них, выражены в единицах СИ). Для произвольных жидкостей — формула Кутателадзе:

$$\alpha = 7,0 \cdot 10^{-4} \lambda_{\text{ж}} \left[ \frac{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}{\sigma_{\text{ж}}} \right]^{0,5} \left[ \frac{q p_{\text{н}}}{r \rho_{\text{п}} a_{\text{ж}} g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})} \right]^{0,7} \text{Pr}_{\text{ж}}^{-0,35},$$

где значение в первых скобках выражается в м<sup>-2</sup>, во вторых скобках — безразмерно,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\rho$  — плотность кипящей жидкости и сухого насыщенного пара, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности кипящей жидкости, Вт/(м·К);  $\sigma$  — ее поверхностное натяжение, Н/м;  $a$  — ее коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $p_{\text{н}}$  — ее давление насыщения, Па;  $r$  — удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $q$  — плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\text{Pr}$  — число Прандтля жидкости. Контроль за единицами величин, подставляемых в формулу, должен быть особенно тщательным.

Более простая и точная ( $\pm 35\%$ ) формула расчета теплоотдачи при пузырьковом кипении, но применяемая только для воды, рекомендована Михеевым. С учетом последующего уточнения (см.: Рассохин Н.Г., Шведов Р.С., Кузьмин А.В. Расчет теплоотдачи при кипении. Теплоэнергетика, 1970, № 9, с. 58–59) она имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{При } 0,1 \text{ МПа} \leq p \leq 3 \text{ МПа} & \quad \alpha = 6,0 p^{1/5} q^{2/3}; \\ \text{при } 3 \text{ МПа} \leq p \leq 20 \text{ МПа} & \quad \alpha = 3,33 p^{3/4} q^{2/3}, \end{aligned}$$

где  $\alpha$  — Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $p$  — МПа,  $q$  — Вт/м<sup>2</sup>.

Наиболее вероятный источник ошибок при вычислении  $\alpha$  — недостаточный контроль за единицами величин, подставляемых в формулы. После вычисления по указанным формулам коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  определяют по формуле Ньютона — Рихмана температурный напор  $\Delta t$  при кипении. Зная давление кипящей воды, определяют по таблицам термодинамических свойств насыщенного водяного пара и воды (или по табл. 5 приложения [1]) температуру насыщения  $t_{\text{н}}$ , а по  $t_{\text{н}}$  и  $\Delta t$  находят температуру поверхности нагрева. График зависимости  $q$  и  $\Delta t$  схематично приведен на рис. 13.6 и 13.7 учебника [1]. Правильность решения задачи можно проконтролировать, сопоставив результат с диапазоном значений коэффициента теплоотдачи при пузырьковом (пузырчатом) кипении воды. Нижняя граница этого диапазона  $\alpha \approx 20 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , верхняя представлена в зависимости от давления на рис. 13.26 [1].

### Задача 5.

Через газоход проходят продукты сгорания, содержащие водяной пар и двуокись углерода. Общее давление смеси 0,1 МПа. Определить плотность результирующего теплового потока от продуктов сгорания к стенкам газохода.

Таблица 5.1 Варианты к задаче 5

Наименование условия	Вариант				
	51	52	53	54	55
Температура продуктов сгорания, °С	500	600	700	800	900

Температура стенок газохода, °С	100	150	200	250	300
Степень черноты стенок газохода	0,75	0,8	0,85	0,9	0,75
Объемное содержание водяного пара, %	4	4	5	5	7
Объемное содержание двуокиси углерода, %	10	15	10	12	10
Размеры газохода	 a = 0,3 м b = 0,4 м	 d = 0,4 м	 a = 0,4 м b = 0,5 м	 d = 0,5 м	 a = 0,5 м b = 0,6 м

Продолжение табл. 2.5

Наименование условия	Вариант				
	56	57	58	59	50
Температура продуктов сгорания, °С	1000	1100	1200	1300	1400
Температура стенок газохода, °С	350	400	100	200	300
Степень черноты стенок газохода	0,8	0,85	0,9	0,75	0,8
Объемное содержание водяного пара, %	7	7,5	7,5	10	10
Объемное содержание двуокиси углерода, %	12	12	15	15	15
Размеры газохода	 d = 0,6 м	 a = 0,6 м b = 0,8 м	 d = 0,8 м	 a = 0,8 м b = 1,0 м	 d = 1,0 м

### Методические указания к задаче № 5

Теория расчета радиационного теплообмена в излучающих и поглощающих средах, к которым можно отнести продукты сгорания органических топлив, подробно изложены в восемнадцатой главе учебника [1].

Результирующий поток излучением на поверхности оболочки (температура  $T_c$ , степень черноты  $\varepsilon_c$ ), ограничивающей газообразную среду с температурой  $T_r$  рассчитывается по формуле:

а) формула Нусельта (при допущении  $\varepsilon_r = A_r$ )

$$Q_c = \varepsilon_{пр} \sigma_o (T_r^4 - T_c^4) F_c, \quad (1)$$

в которой приведенная степень черноты равна

$$\varepsilon_{пр} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right]^{-1}, \quad (2)$$

б) формула Поляка (с учетом, что в действительности  $\varepsilon_r \neq A_r$ )

$$Q_c = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 \left( \frac{\varepsilon_{\Gamma}}{A_{\Gamma}} T_{\Gamma}^4 - T_c^4 \right) F_c, \quad (3)$$

в которой приведенная степень черноты равна

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left[ \frac{1}{A_{\Gamma}} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right]^{-1}. \quad (4)$$

В формулах (1) ÷ (4):  $T$  – абсолютная температура, К;  $F$  – площадь поверхности теплообмена;  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_{\Gamma}$  и  $A_{\Gamma}$  – степень черноты и поглощательная способность газа, которые зависят от состава газа, его температуры и геометрии системы теплообмена:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (5)$$

$$A_{\Gamma} = A_{\text{CO}_2} + \beta A_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ ,  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  – степени черноты углекислого газа и водяного пара находят по номограммам, приведенным на с. 211–212 задачника [2] по температуре газа  $T_{\Gamma}$ ;  $A_{\text{CO}_2}$  и  $A_{\text{H}_2\text{O}}$  – поглощательные способности углекислого газа и водяного пара находят по номограммам [2] на с. 211–212 по температуре стенки  $T_c$ ;  $\beta$  – поправочный коэффициент также находят по номограммам, приведенным в задачнике [2] на с. 213.

Для расчетов по вышеуказанным номограммам предварительно необходимо найти эффективная длина пути луча по формуле

$$l_{\text{эф}} = 3,6 \frac{V_{\Gamma}}{F_{\Gamma}}, \quad (7)$$

где  $V_{\Gamma}$  – объем, занимаемый газовой средой;  $F_{\Gamma}$  – площадь ограничивающей газ поверхности.

### **Критерии оценки расчетно-графической работы:**

«Зачтено» - работа выполнена в соответствии с утвержденным планом, полностью раскрыто содержание каждого вопроса, студентом сформулированы собственные аргументированные выводы по теме работы. Оформление работы соответствует предъявляемым требованиям. При защите работы обучающийся свободно владел материалом и отвечал на вопросы.

«Не зачтено» - если работа выполнена не в соответствии с утвержденным планом, не раскрыто содержание каждого вопроса, обучающимся не сделаны выводы по теме работы, имеются грубые недостатки в оформлении работы, при защите работы обучающийся не владел материалом, не отвечал на вопросы, то работа направляется на дальнейшую доработку.