

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.Б.47 ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ»**

Направление подготовки (специальность) 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений»

Квалификация (степень) выпускника – «Инженер-строитель»

Специализация 1 «Строительство высотных и большепролетных зданий и сооружений»

Методические материалы разработаны на основе рабочей программы дисциплины, предусмотренной образовательной программой высшего образования (ОП ВО) по направлению подготовки 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

*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

**I. Процесс обучения по дисциплине направлен на формирование следующих компетенций**

Компетенция по ФГОС	Ожидаемые результаты обучения
<p>ОПК-6 - использование основных законов естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применением методов математического анализа и математического (компьютерного) моделирования, теоретического и экспериментального исследования</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 поведения жидкостей при ее покое, движении и взаимодействии с инженерными конструкциями;</li> <li>- условия существования ламинарного и турбулентного режимов движения;</li> <li>- виды гидравлических сопротивлений и их влияние на потери напора;</li> <li>- основные законы термодинамики и теплопередачи</li> <li>- фундаментальные основы физики, включая разделы «молекулярная физика», «теплота»;</li> </ul>
	<p><b>Уметь-</b> - определять величину общего сопротивления гидравлической системы с помощью справочной литературы;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- правильно выбирать расчетные сечения при применении уравнения Бернулли для расчета пропускной способности систем.</li> <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 по гидравлике и теплотехнике</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками работы со справочной литературой по гидравлике и теплотехнике</li> <li>- навыками проведения простых гидравлических экспериментов.</li> <li>- первичными навыками и основными методами решения математических задач;</li> <li>- первичными</li> <li>-навыками постановки и основными методами решения задач молекулярной физики.</li> </ul>
<p>ОПК-7 – способность выявить естественную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь их для решения соответствующий физико-математический аппарат</p>	<p><b>Знать</b> - фундаментальные основы физики, включая разделы «давление жидкости и газов», «молекулярная физика», «теплота»;</p>
	<p><b>Уметь</b> - проводить формализацию поставленной задачи на основе современного математического аппарата;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- выявить естественную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь для их решения соответствующий физико-математический аппарат</li> </ul>
	<p><b>Владеть</b> - методами решения простых задач по гидравлике и теплотехнике</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- первичными навыками и основными методами решения математических задач применительно к</li> </ul>

### **Методические указания обучающимся по выполнению самостоятельной работы**

Самостоятельная работа определяется спецификой дисциплины и методикой ее преподавания, временем, предусмотренным учебным планом, а также степенью обучения, на которой изучается дисциплина.

Для самостоятельной подготовки можно рекомендовать следующие источники: конспекты лекций и/или практических и лабораторных занятий, учебную литературу соответствующего профиля.

Преподаватель в начале чтения курса информирует обучающихся о формах, видах и содержании самостоятельной работы, разъясняет требования, предъявляемые к результатам самостоятельной работы, а также формы и методы контроля и критерии оценки.

### **Методические рекомендации по подготовке к лабораторным занятиям**

Ведущей дидактической целью лабораторных работ является экспериментальное подтверждение и проверка существенных теоретических положений (законов, зависимостей). Содержанием лабораторных работ могут быть экспериментальная проверка формул, методик расчета, установление и подтверждение закономерностей, ознакомление с методиками проведения экспериментов, установление свойств веществ, их качественных и количественных характеристик, наблюдение развития явлений, процессов и др. В ходе выполнения заданий у студентов формируются практические умения и навыки обращения с различными приборами, установками, лабораторным оборудованием, аппаратурой, которые могут составлять часть профессиональной практической подготовки, а также исследовательские умения (наблюдать, сравнивать, анализировать, устанавливать зависимости, делать выводы и обобщения, самостоятельно вести исследование, оформлять результаты).

Лабораторные работы и практические занятия могут носить репродуктивный, частично - поисковый и поисковый характер.

Работы, носящие репродуктивный характер, отличаются тем, что при их проведении студенты пользуются подробными инструкциями, в которых указаны: цель работы, пояснения (теория, основные характеристики), оборудование, аппаратура, материалы и их характеристики, порядок выполнения работы, таблицы, выводы (без формулировки), контрольные вопросы, учебная и специальная литература.

Работы, носящие частично - поисковый характер, отличаются тем, что при их проведении студенты не пользуются подробными инструкциями, им не дан порядок выполнения необходимых действий, и требуют от студентов самостоятельного подбора оборудования, выбора способов выполнения работы в инструктивной и справочной литературы и др.

Работы, носящие поисковый характер, характеризуются тем, что студенты должны решить новую для них проблему, опираясь на имеющиеся у них теоретические знания.

Формы организации студентов на лабораторных работах и практических занятиях: фронтальная, групповая и индивидуальная.

При фронтальной форме организации занятий все студенты выполняют одновременно одну и ту же работу.

При групповой форме организации занятий одна и та же работа выполняется бригадами по 2 - 5 человек.

При индивидуальной форме организации занятий каждый студент выполняет индивидуальное задание.

При подготовке к лабораторным работам студенту следует изучить соответствующие темы по рекомендуемой литературе, а так же описание лабораторной

работы. Перед началом лабораторной работы следует продумать последовательность измерений, обработки данных и заготовить бланк протокола измерений.

Лабораторные стенды включаются преподавателем или лаборантом. Число режимов и измерений согласуется с преподавателем.

Перед началом занятий проводится вводный опрос. Студент должен: знать постановку задачи и цели исследования; устройство лабораторного стенда; правила пользования приборами; меры предосторожности при работе на данном стенде.

Оформление письменного отчета по выполненной работе в соответствии с требованиями. Письменный отчет о выполненной лабораторной работе должен содержать следующие сведения:

- название работы и сведения об авторе отчета (курс, имя, фамилия);
- цель работы и формулировка используемого метода анализа;
- схему и краткое описание лабораторной установки;
- описание выполнения лабораторных исследований или расчетов;
- графики;
- выводы о работе;
- список используемой литературы.

Защита лабораторной работы проводится при наличии правильно и аккуратно оформленного отчета. На защите студент должен показать знание теоретического материала по теме работы, уметь пользоваться им при решении практических задач, знать опытную установку и методику опытов, ответить на контрольные вопросы.

Оценки за выполнение лабораторных работ учитывается как показатель текущей успеваемости обучающегося.

Методические рекомендации по лабораторным занятиям по каждой теме подробно изложены в лабораторном практикуме.

Методические рекомендации по подготовке к зачету.

Подготовка студентов к сдаче зачета включает в себя:

- просмотр программы учебного курса;
- определение необходимых для подготовки источников (учебников, дополнительной литературы и т. д.) и их изучение;
- использование конспектов лекций, материалов практических занятий;
- консультирование у преподавателя.

Подготовка к зачету начинается с первого занятия по дисциплине, на котором студенты получают общую установку преподавателя и перечень основных требований к текущей и итоговой отчетности. При этом важно с самого начала планомерно осваивать материал, руководствуясь, прежде всего перечнем вопросов к зачету, конспектировать важные для решения учебных задач источники. В течение семестра происходят пополнение, систематизация и корректировка студенческих наработок, освоение нового и закрепление уже изученного материала.

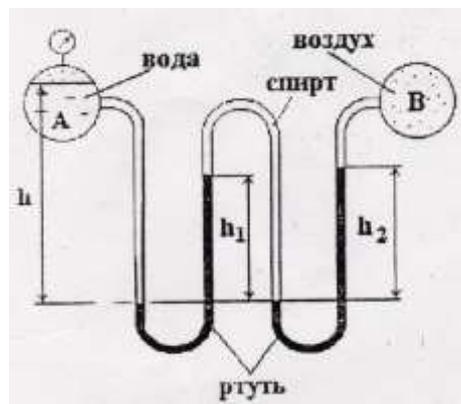
### Пример контрольной работы по гидравлике с примерами решения задач

Контрольная работа содержит 3 задания. Вариант задания принимается по последней цифре зачетной книжки или студенческого билета. Работа выполняется на формате А 4 с оформлением титульного листа и списка использованных источников.

#### Задание 1

Найти абсолютное давление воздуха в сосуде В, если избыточное давление на поверхности воды в сосуде А равно  $P_{изб}$ , а уровни жидкостей в трубках равны  $h$  м;  $h_1$  м;  $h_2$  м. Плотность жидкостей:

вода –  $1000 \text{ кг/м}^3$ ;  
спирт –  $800 \text{ кг/м}^3$ ;  
ртуть –  $13600 \text{ кг/м}^3$



Результат выразить в Па и в кгс/см<sup>2</sup>

№	Р <sub>изб.</sub> , кПа	h, м	h <sub>1</sub> , м	h <sub>2</sub> , м
1	25	0,7	0,2	0,3
2	20	1,4	0,35	0,3
3	30	0,9	0,25	0,2
4	45	1,3	0,35	0,25
5	10	1,0	0,3	0,4
6	50	1,35	0,15	0,45
7	15	0,8	0,4	0,3
8	20	1,1	0,25	0,35
9	14	0,6	0,12	0,26
10	16	1,2	0,18	0,36

**Пример решения.**

Исходные данные:

$$h = 1,5\text{ м};$$

$$h_1 = 0,3\text{ м};$$

$$h_2 = 0,3\text{ м}$$

$$P_{\text{изб}} = 18 \text{ кПа} = 18000 \text{ Па}$$

$$\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{спирт}} = 800 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{рт}} = 13600 \text{ кг/м}^3$$

$$P_{\text{ат}} = 101325 \text{ Па}$$

**Определить:**  $P_{\text{в}}$

**Решение:**

Полное давление в сосуде А определяется по формуле

$$P_{\text{А}} = P_{\text{ат}} + P_{\text{изб}}$$

$$P_{\text{А}} = 101325 + 18000 = 119325 \text{ Па}$$

Определим полное давление в точках на линии раздела жидкостей

$$P_{\text{С}} = P_{\text{А}} + \rho_{\text{в}} g h$$

$$P_{\text{С}} = 119325 + 1000 \cdot 9,8 \cdot 1,5 = 134025 \text{ Па}$$

$$P_{\text{D}} = P_{\text{С}} - \rho_{\text{рт}} g h_1$$

$$P_{\text{D}} = 134025 - 13600 \cdot 9,8 \cdot 0,3 = 94041 \text{ Па}$$

$$P_{\text{F}} = P_{\text{D}} + \rho_{\text{спирта}} g h_1$$

$$P_{\text{F}} = 94041 + 800 \cdot 9,8 \cdot 0,3 = 96393 \text{ Па}$$

$$P_{\text{Е}} = P_{\text{F}} - \rho_{\text{рт}} g h_2$$

$$P_{\text{Е}} = 96393 - 13600 \cdot 9,8 \cdot 0,3 = 56409 \text{ Па}$$

Давление в т. Е равно давлению в сосуде В.

**Ответ:**  $P_{\text{в}} = 56409 \text{ Па} = 0,56 \text{ кгс/см}^2$

**Задание 2.**

Вода при температуре 20<sup>0</sup>С ( $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ) вытекает из верхнего бака в нижний (рис. 2) с расходом  $Q$  через трубопровод длиной  $L$  и диаметром  $d$ . Труба имеет  $n$  резких поворотов ( $\xi_{\text{пов}} = 1,2$ ) и один вентиль. Найти разность уровней в баках  $h$ .

№	L, м	d, мм	Q, л/с	k <sub>з</sub> , мм	n	ξ <sub>в</sub>
1	100	100	10	0,06	4	4,0
2	150	75	5	0,07	1	4,3
3	120	50	3	0,12	3	4,5
4	400	95	7,5	0,075	4	4,2
5	200	85	2	0,75	10	4,3
6	50	70	4,5	0,03	7	4,4
7	80	40	6	0,60	6	5,5
8	75	60	5,5	0,06	5	4,5

9	250	120	8	0,07	4	3,8
10	130	70	7	0,12	6	4,1

Принять коэффициенты местного сопротивления выхода из бака  $\xi_{\text{ВЫХ}}=1,0$ , входа из трубы в бак  $\xi_{\text{ВХ}}=0,5$ .

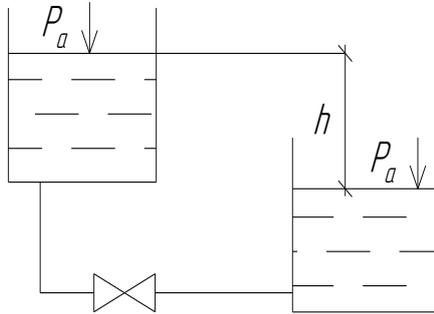


Рис 2

Пример решения задания 2.

**Исходные данные:**

$$\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$L = 150 \text{ м}$$

$$d = 75 \text{ мм} = 0,075 \text{ м}$$

$$Q = 5,0 \text{ л/с} = 0,005 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\xi_{\text{ВЫХ}} = 1,0$$

$$\xi_{\text{ВХ}} = 0,5$$

$$\xi_{\text{ПОВ}} = 1,2$$

$$\xi_{\text{В}} = 4,3$$

$$n = 1$$

$$K_s = 0,07 \text{ мм}$$

**Определить:**

Разность уровней в баках  $h$

**Решение:**

1. Составляем уравнение Бернулли для реальной жидкости

$$Z_1 + P_1/\rho g + v_1^2/2g = Z_2 + P_2/\rho g + v_2^2/2g + h_{\text{пот}}$$

$$Z_1 = h$$

$$v_1^2/2g = 0$$

$$Z_2 = 0$$

$$h = v_2^2/2g + h_{\text{пот}}$$

$$v = 4Q / \pi d^2$$

$$v = 4 * 0,005 / 3,14 * 0,075^2 = 1,132 \text{ м/с}$$

$$2. \quad R_e = \frac{vd}{\nu}$$

$R_e$  - число Рейнольдса;

$\nu$  - кинематическая вязкость;

Число  $R_e$ , при котором происходит смена режимов, называется *критическим*.

$R_{e \text{ кр.}} = 2320$  - для напорного движения в трубопроводах.

При  $R_{e \text{ кр.}} < 2320$  - ламинарный режим

При  $R_{e \text{ кр.}} > 2320$  - турбулентный режим

$R_{e \text{ кр.}} = 580$  - безнапорное движение.

$$R_e = 1,132 \cdot 0,075 / 10^{-6} = 0,0849 \cdot 10^6$$

3. Зона переходная, формула Альтшуля

$$10 \frac{d}{\Delta_j} < R_e < 560 \frac{d}{\Delta_j}$$

$$10714 < R_e < 600000$$

$$\delta = K, \quad \lambda = 0,11 \left( \frac{68}{R_e} + \frac{K\epsilon}{d} \right)^{0,25}$$

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{84900} + \frac{0,07}{0,075} \right)^{0,25} = 0,108$$

4. Потери напора по длине определяются по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{Lv^2}{d2g}$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления трения, коэффициент Дарси;

$L$  - длина трубопровода;

$d$  - внутренний диаметр;

$v$  - скорость потока.

$h_{\text{дл}}$  - потери по длине трубопровода;

$$h_{\text{дл}} = 0,108 \frac{150 \cdot 1,132^2}{0,075 \cdot 2 \cdot 9,8} = 14,12$$

5.

$$\sum \xi = \xi_{\text{в}} + \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} + n \cdot \xi_{\text{пов}}$$

$$\sum \xi = 4,3 + 0,5 + 1,0 + 1 \cdot 1,2 = 8$$

6. Местные потери напора определяются по формуле Вейсбаха:

$$h_{\text{мест.}} = \sum \xi v^2 / 2g$$

$$h_{\text{мест.}} = 8 \cdot 1,132^2 / 2 \cdot 9,8 = 0,523$$

$\xi$  - коэффициент местных сопротивлений.

$h_{\text{мест.}}$  - местные потери (возникают при изменении конфигураций потока);

7.

$$h = v^2 / 2g + h_{\text{дл}} + h_{\text{мест.}}$$

$$h = 1,132^2 / 2 \cdot 9,8 + 14,12 + 0,523 = 14,708 \text{ м}$$

### Задание 3.

Из магистрального трубопровода большого диаметра, в котором поддерживается постоянный напор, по стальному трубопроводу, состоящему из нескольких участков труб разного диаметра  $d$  и разной длины  $l$ , вытекает вода. Расход воды  $Q$ , эквивалентная шероховатость стенок  $\Delta$ , температура воды  $t$ .

**Определить:**

- скорости движения воды по трубопроводу и потери напора;
- величину полного напора в магистральном трубопроводе;

**Исходные данные:**

Принять:  $l_1 = l_2 = l_3$ ,  $v = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $k_3 = 0,1 \text{ мм}$ .

Вариант	$Q$ , л/с	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$d_3$ , мм	$l$ , м
1	0,5	20	15	20	0,5
2	0,9	32	50	32	0,6
3	1,5	75	50	25	1,2

4	2,0	32	50	25	1,4
5	2,5	25	50	75	1,5
6	3,0	75	100	50	2,0
7	3,5	100	75	50	1,5
8	4,0	50	100	50	2,0
9	4,5	100	50	100	2,5
10	5,0	50	75	100	3,0

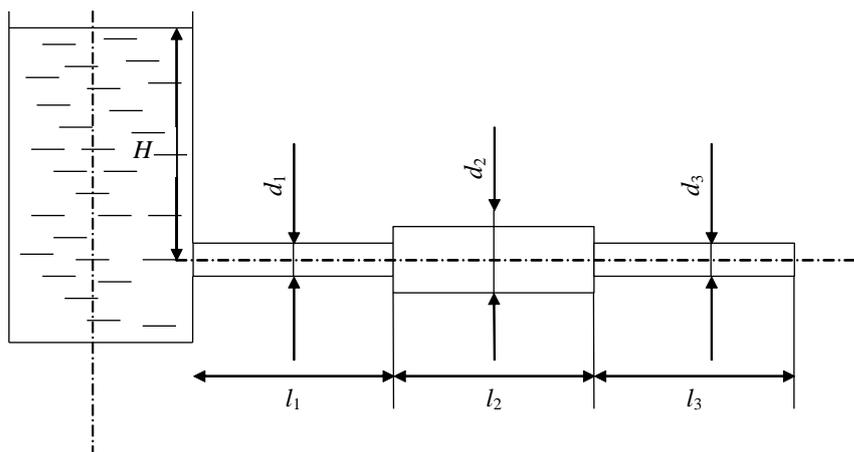


Рис 3

Указания к решению задания 3

Задача решается на основе применения уравнения Бернулли. Для плавно изменяющегося потока вязкой жидкости, движущейся от сечения 1 к сечению 2, уравнение Бернулли в форме баланса напоров имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_{1-2},$$

где  $z_1$  и  $z_2$  – нивелирные напоры в центрах тяжести живых сечений 1 и 2;  $p_1$  и  $p_2$  – пьезометрические давления в центрах тяжести живых сечений 1 и 2;  $v_1$  и  $v_2$  – скорости движения жидкости в сечениях 1 и 2;  $g$  – ускорение свободного падения ( $9,81 \text{ м/с}^2$ );  $\gamma$  – удельный вес жидкости ( $\gamma = \rho g$ );  $\rho$  – плотность жидкости (для воды равна  $1000 \text{ кг/м}^3$ );  $\Delta h$  – путевые потери напора на участке между сечениями.

Решение задачи выполняется в следующем порядке.

1. Полный напор на входе в магистрали определяется:

$$H = \Delta h + \frac{v_3^2}{2g}.$$

2. Определение скорости движения воды  $v$  (м/с) по сечениям:

$$v_i = \frac{Q}{\omega_i},$$

где  $Q$  – объемный расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\omega_i$  – площадь  $i$ -го сечения,  $\text{м}^2$ .

3. Определение путевых потерь  $\Delta h_{i-j}$  на каждом из участков:

$$\Delta h_{i-j} = \lambda_i \frac{l_i v_i^2}{d_i 2g},$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения.

Для определения коэффициента  $\lambda$  следует пользоваться следующим алгоритмом.

Определение числа Рейнольдса:

$$Re_i = \frac{v_i d_i}{\nu}$$

**Внимание!** Число Рейнольдса должно получиться безразмерным!

Режим движения		Число Рейнольдса	Определение $\lambda$
Ламинарный		$Re < 2300$	$\lambda = \frac{64}{Re}$ или $\lambda = \frac{75}{Re}$
Переходный		$2300 < Re < 4000$	<i>Проектирование трубопроводов не рекомендуется</i>
Турбулентный	1-я область	$4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta_s}$	$\lambda_r = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ (ф-ла Блазиуса) $\lambda_r = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}$ (ф-ла Конакова)
	2-я область	$10 \frac{d}{\Delta_s} < Re < 560 \frac{d}{\Delta_s}$	$\lambda_r = 0,11 \left( \frac{\Delta_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$ (ф-ла Альтшуля)
	3-я область	$Re > 560 \frac{d}{\Delta_s}$	$\lambda_r = 0,11 \left( \frac{\Delta_s}{d} \right)^{0,25}$ (ф-ла Альтшуля) $\frac{1}{\sqrt{\lambda_r}} = -2 \lg \left( \frac{\Delta_s}{3,71d} \right)$ (ф-ла Никурадзе)

В случае ламинарного режима течения ( $Re < 2300$ ) коэффициент  $\lambda$  определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{64}{Re}.$$

При турбулентном режиме течения необходимо вычислить соотношение диаметра  $d$  и коэффициента шероховатости  $k_s$ . В зависимости от этого соотношения определяют границы каждой из турбулентных областей. После определения области выбирают соответствующую формулу для определения коэффициента  $\lambda$ . Если формулы для области две, выбирают упрощенный вариант.

4. Определение местных потерь напора.

$$\Delta h_i = \xi_i \frac{v_i^2}{2g},$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления;  $v_i$  – скорость течения жидкости за данным сечением.

Для каждого вида местного сопротивления коэффициент местного сопротивления определяется по справочнику. Для случая входа в магистраль рекомендуется принять  $\xi_0 = 0,5$ .

Значение коэффициента местного сопротивления при внезапном сужении трубопровода:

$$\xi = 0,5 \left( 1 - \frac{\omega_A}{\omega_B} \right),$$

где  $\omega_A$  и  $\omega_B$  – площади проходного сечения соответственно узкой и широкой магистрали.

Потерю напора при внезапном расширении трубопровода можно определить по формуле Борда:

$$\Delta h_{\text{БП}} = \frac{(v_A - v_B)^2}{2g},$$

где  $v_A$  и  $v_B$  – скорости до и после расширения.

Коэффициент местного сопротивления для колена при развороте потока на  $90^\circ$  принимается равным 0,2.

5. Определение величины полного напора на входе в магистраль.

Суммарные потери напора складываются из суммы всех местных и путевых сопротивлений. В данном случае:

$$\Delta h_{\Sigma} = \Delta h_{l1} + \Delta h_{l2} + \Delta h_{l3} + \Delta h_{\text{ex}} + \Delta h_{\text{расш}} + \Delta h_{\text{суж}}.$$

6. Полный напор на входе в магистраль определяется:

$$H = \Delta h + \frac{v_3^2}{2g}.$$

Решение задачи выполняется в следующем порядке.

1. Полный напор на входе в магистраль определяется:

$$H = \Delta h + \frac{v_3^2}{2g}.$$

2. Определение скорости движения воды  $v$  (м/с) по сечениям:

$$v_i = \frac{Q_i}{\omega_i},$$

$$v_1 = \frac{Q_1}{\omega_1} = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 * 0,001}{3,14 * 0,032^2} = 1,244 \text{ м/с},$$

$$v_2 = \frac{Q_2}{\omega_2} = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \frac{4 * 0,001}{3,14 * 0,05^2} = 0,051 \text{ м/с},$$

$$v_3 = \frac{Q_3}{\omega_3} = \frac{4Q}{\pi d_3^2} = \frac{4 * 0,001}{3,14 * 0,032^2} = 1,244 \text{ м/с},$$

$$\Sigma v = v_1 + v_2 + v_3 = 2,539 \text{ м/с}$$

где  $Q$  – объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $\omega_i$  – площадь  $i$ -го сечения, м<sup>2</sup>.

3. Определение путевых потерь  $\Delta h_{i-j}$  на каждом из участков:

$$\Delta h_{i-j} = \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{v_i^2}{2g},$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения.

$$\Delta h_{l1} = 0,028 \frac{0,8}{0,032} * \frac{1,244^2}{2 * 9,8} = 0,055$$

$$\Delta h_{l2} = 0,038 \frac{0,8}{0,032} * \frac{0,051^2}{2 * 9,8} = 0,00008$$

$$\Delta h_{l3} = 0,028 \frac{0,8}{0,032} * \frac{1,244^2}{2 * 9,8} = 0,055$$

Для определения коэффициента  $\lambda$  следует пользоваться следующим алгоритмом.

Определение числа Рейнольдса:

$$\text{Re}_i = \frac{v_i d_i}{\nu}$$

$$\text{Re}_1 = \frac{v_1 d_1}{\nu} = \frac{1,244 * 0,032}{0,55} * 10^6 = 72378$$

$$\text{Re}_2 = \frac{v_2 d_2}{\nu} = \frac{0,051 * 0,05}{0,55} * 10^6 = 4636$$

$$\text{Re}_3 = \frac{v_3 d_3}{\nu} = \frac{1,244 * 0,032}{0,55} * 10^6 = 72378$$

*Внимание!* Число Рейнольдса должно получиться безразмерным!

В случае ламинарного режима течения ( $\text{Re} < 2300$ ) коэффициент  $\lambda$  определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

$$\lambda_1 = 0,11 \left( \frac{\Delta_{\text{ш}}}{d_1} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}$$

$$\lambda_1 = 0,11 \left( \frac{0,1}{32} + \frac{68}{72378} \right)^{0,25} = 0,028$$

$$\lambda_2 = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}$$

$$\lambda_2 = \frac{0,316}{4636^{0,25}} = 0,038$$

$$\lambda_3 = 0,11 \left( \frac{\Delta_{\text{ш}}}{d_1} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}$$

$$\lambda_3 = 0,11 \left( \frac{0,1}{32} + \frac{68}{72378} \right)^{0,25} = 0,028$$

При турбулентном режиме течения необходимо вычислить соотношение диаметра  $d$  и коэффициента шероховатости  $k_s$ . В зависимости от этого соотношения определяют границы каждой из турбулентных областей. После определения области выбирают соответствующую формулу для определения коэффициента  $\lambda$ . Если формулы для области две, выбирают упрощенный вариант.

4. Определение местных потерь напора.

$$\Delta h_i = \xi_i \frac{v_i^2}{2g},$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления;  $v_i$  – скорость течения жидкости за данным сечением.

$$\Delta h_{\text{ао}} = \xi_0 \frac{v_1^2}{2g}$$

$$\Delta h_{\text{ао}} = 0,5 \frac{1,244^2}{2 * 9,8} = 0,039$$

$$\Delta h_{\text{нóа}} = \zeta_2 \frac{v_3^2}{2g}$$

$$\Delta h_{\text{нóа}} = 0,295 \frac{1,244^2}{2 * 9,8} = 0,023$$

Для каждого вида местного сопротивления коэффициент местного сопротивления определяется по справочнику. Для случая входа в магистраль рекомендуется принять  $\xi_0 = 0,5$ .

Значение коэффициента местного сопротивления при внезапном расширении трубопровода:

$$h = \xi \frac{v^2}{2g} [\text{м}]$$

$$\xi_{1\hat{a}i.\hat{o}.} = \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2$$

$$\xi_{1\hat{a}i.\hat{o}.} = \left( \frac{\frac{\pi d_2^2}{4}}{\frac{\pi d_1^2}{4}} - 1 \right)^2$$

$$\xi_{1\hat{a}i.\hat{o}.} = \left( \frac{\frac{3,14 * 0,05^2}{4}}{\frac{3,14 * 0,032^2}{4}} - 1 \right)^2 = 2,078$$

Значение коэффициента местного сопротивления при внезапном сужении трубопровода:

$$\xi = 0,5 \left( 1 - \frac{\omega_A}{\omega_B} \right),$$

$$\xi_{2\hat{a}i.\hat{n}.} = 0,5 \left( 1 - \frac{d_3^2}{d_2^2} \right)$$

$$\xi_{2\hat{a}i.\hat{n}.} = 0,5 \left( 1 - \frac{0,032^2}{0,05^2} \right) = 0,295$$

$n$  - соотношение площадей в узком и широком сечениях трубы

где  $\omega_A$  и  $\omega_B$  – площади проходного сечения соответственно узкой и широкой магистрали. Потерю напора при внезапном расширении трубопровода можно определить по формуле Борда:

$$\Delta h_{\text{BP}} = \frac{(v_A - v_B)^2}{2g},$$

$$\Delta h_{\hat{o}\hat{a}i.\hat{n}.} = \frac{(1,244 - 0,051)^2}{2 * 9,8} = 0,073$$

где  $v_A$  и  $v_B$  – скорости до и после расширения.

Коэффициент местного сопротивления для колена при развороте потока на  $90^\circ$  принимается равным 0,2.

5. Определение величины полного напора на входе в магистраль.

Суммарные потери напора складываются из суммы всех местных и путевых сопротивлений. В данном случае:

$$\Delta h_{\Sigma} = \Delta h_{l1} + \Delta h_{l2} + \Delta h_{l3} + \Delta h_{ex} + \Delta h_{расш} + \Delta h_{суж}.$$

$$\Delta h_{\Sigma} = 0,055 + 0,00008 + 0,055 + 0,039 + 0,073 + 0,023 = 0,245$$

2. Полный напор на входе в магистрали определяется:

$$H = \Delta h + \frac{v_3^2}{2g}.$$

$$H = 0,245 + \frac{1,244^2}{2 * 9,8} = 0,324$$

### **Методические рекомендации по выполнению контрольной работы по теплотехнике**

При определении уровня достижений студентов при защите расчетно-графической работы необходимо обращать особое внимание на:

- усвоение программного материала;
- умение излагать программный материал доступным научным языком;
- умение связывать теорию с практикой;
- умение выполнять чертежи тепловой сети в соответствии с требованиями ГОСТ и ЕСКД;
- владение навыками поиска, систематизации необходимых источников литературы по изучаемой проблеме;
- умение обосновывать принятые решения.

#### ***Примерная тематика контрольных работ***

При выполнении контрольной 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 ( $R_t$ ) 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
$t_{c1}, ^\circ\text{C}$		900					1170	1230		
$t_{c2}, ^\circ\text{C}$			890		1170					
$t_{c3}, ^\circ\text{C}$					290		390			275
$t_{c4}, ^\circ\text{C}$		50	52						50	
$t_{ж2}, ^\circ\text{C}$	25			28				30		
$q, \text{Вт/м}^2$	310					225				

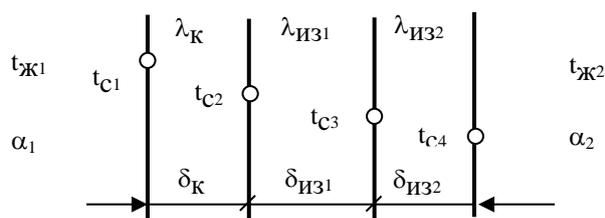


Рис. 1.1

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	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$q, \text{Вт}/\text{м}^2$	$t_{ж1}, ^\circ\text{C}$	$t_{c1}, ^\circ\text{C}$	$t_{c2}, ^\circ\text{C}$	$t_{c3}, ^\circ\text{C}$	$t_{c4}, ^\circ\text{C}$	$t_{ж2}, ^\circ\text{C}$

### 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,  $m^2$ .

В этом случае

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

где  $\Delta t$  – перепад температуры на заданном участке теплообмена, К ( $^{\circ}C$ ), 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,  $(m^2 \cdot K)/Вт$ .

Термическое сопротивление теплоотдачи рассчитывается по формуле

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

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ , 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,  $Вт/(m \cdot K)$ .

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 ( $^{\circ}C$ ), который может состоять из ряда элементарных участков теплообмена: теплоотдачи и теплопроводности, а  $R_l$  – линейное термическое сопротивление теплообмена этого участка,  $(m \cdot K)/Вт$ .

Линейное термическое сопротивление теплоотдачи рассчитывается по формуле

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

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ , 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.

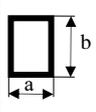
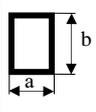
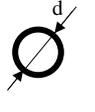
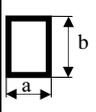
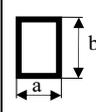
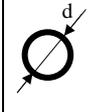
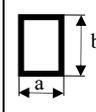
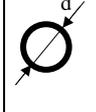
Рекомендуемый порядок решения задачи о теплопередаче через цилиндрическую стенку полностью совпадает с рассмотренным выше для плоской стенки.

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,  $\text{м}^2$ ;  $\Pi$  – смоченный периметр канала,  $\text{м}$ .

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 ( $\nu$ ,  $\lambda$ ,  $\text{Pr}$  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,  $\text{кг/с}$ ;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $f$  – площадь поперечного сечения канала,  $\text{м}^2$ .

3. Определяют режим течения среды:

— при вынужденном движении по критерию Рейнольдса ( $\text{Re}$ );

— при свободном движении по критерию Рэлея ( $\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr}$ )

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 ( $\text{Nu}$ ).

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

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

В заключение раздела приведем некоторые наиболее часто встречаемые критериальные уравнения.

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

$$\text{Nu} = 0,50(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \cdot (\text{Pr}_ж / \text{Pr}_с)^{0,25}, \quad (12)$$

$l_0 = d_n$  – наружный диаметр трубы;  $t_0 = t_ж$  – температура жидкости вдали от стенки.

Формула справедлива при условии  $10^3 < \text{Gr} \cdot \text{Pr} < 10^9$ , 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 ( $10^3 < \text{Gr} \cdot \text{Pr} < 10^9$ ):

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

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 ( $8300 \leq Re \leq 10^4$ ):

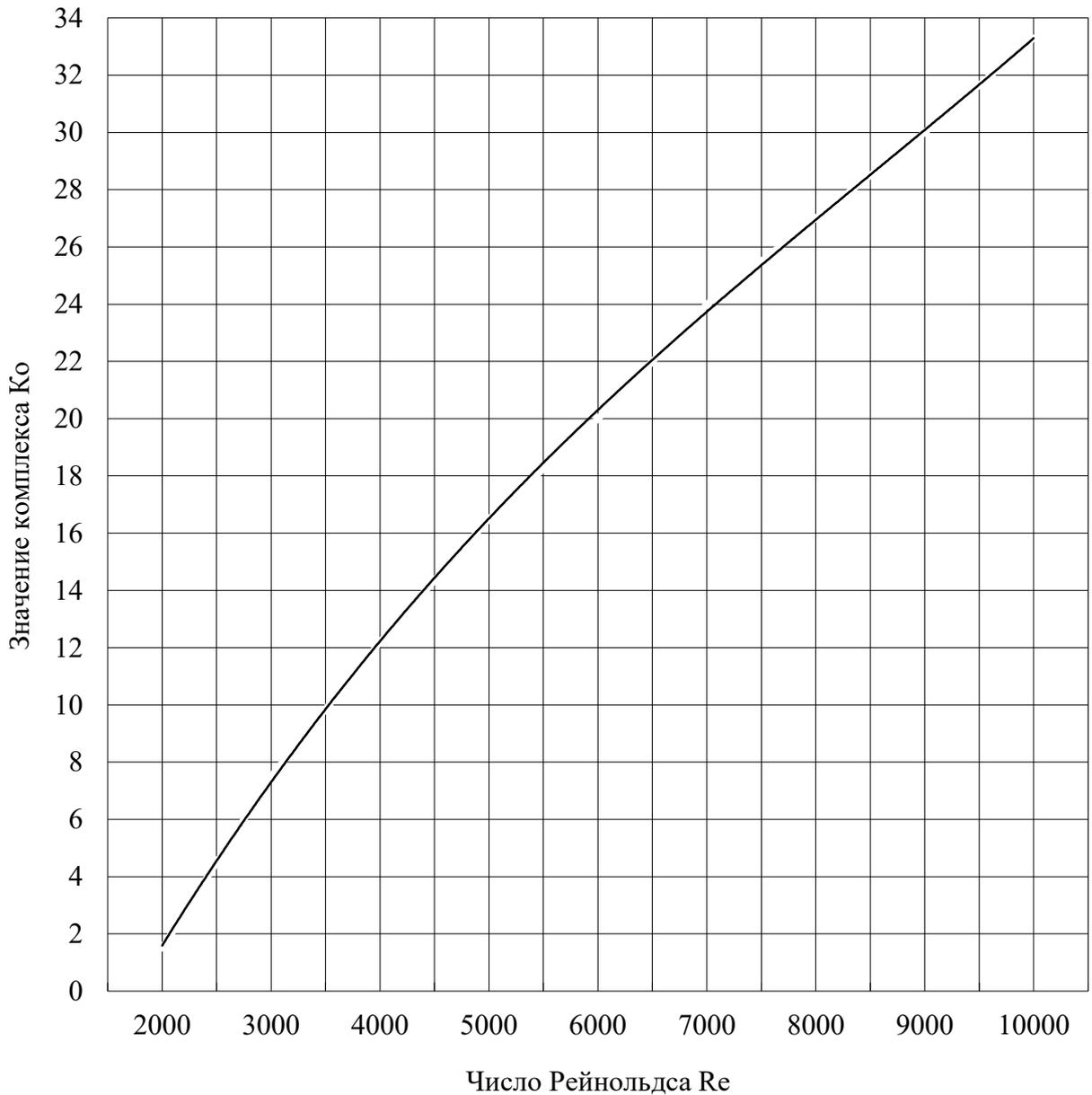
$$Nu = Ko \cdot Pr^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}, \quad (18)$$

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	0,02	0,024	0,02	0,024	0,04	0,024	0,02	0,024	0,02	0,024
Диаметр трубы, м	15	25	20	27	35	15	25	20	27	35
Средняя температура стенки, °С										

### 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

р, МПа	t <sub>н</sub> , °С	г, кДж/кг	р, МПа	t <sub>н</sub> , °С	г, 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  $g$  следует подставлять в Дж/кг!

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

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

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	 $a = 0,3 \text{ м}$ $b = 0,4 \text{ м}$	 $d = 0,4 \text{ м}$	 $a = 0,4 \text{ м}$ $b = 0,5 \text{ м}$	 $d = 0,5 \text{ м}$	 $a = 0,5 \text{ м}$ $b = 0,6 \text{ м}$

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	 $d = 0,6 \text{ м}$	 $a = 0,6 \text{ м}$ $b = 0,8 \text{ м}$	 $d = 0,8 \text{ м}$	 $a = 0,8 \text{ м}$ $b = 1,0 \text{ м}$	 $d = 1,0 \text{ м}$

### 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  $\varepsilon_r = A_r$ )

$$Q_c = \varepsilon_{пр} \sigma_0 (T_r^4 - T_c^4) F_c, \quad (1)$$

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  $\varepsilon_r \neq A_r$ )

$$Q_c = \varepsilon_{пр} \sigma_0 \left( \frac{\varepsilon_r}{A_r} T_r^4 - T_c^4 \right) F_c, \quad (3)$$

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 контрольной 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.

#### ***Контрольные вопросы к защите лабораторных работ***

**Лабораторное занятие 1.** Измерение давления в сосуде жидкостными и механическими приборами. Поверка класса манометра.

1. Принципы измерения давления в жидкости. Формулы связи между показаниями приборов и абсолютным давлением.
2. Как определить силу давления столба жидкости на плоскую поверхность твердого тела (модуль, направление, точку приложения)?
3. Как определить силу давления газа на плоскую поверхность твердого тела (модуль, направление, точку приложения)?
4. Теорема Вариньона. Как определить суммарную силу давления на плоскую поверхность твердого тела (модуль, направление, точку приложения)?
5. Поверка класса манометра.

**Лабораторное занятие 2.** Исследование относительного покоя жидкости во вращающемся цилиндрическом сосуде.

1. Объясните физический смысл понятий: абсолютное гидростатическое давление в жидкости, давление столба жидкости (весовое давление), манометрическое и

вакуумметрическое давление, давление насыщенного пара жид-кости, давление жидкости в точке поверхности твердого тела, сила давления жидкости, центр тяжести плоской фигуры, центр весового давления жидкости, сила внешнего давления на поверхность твердого тела, плотность жидкости, модуль объемной упругости.

2. Основные законы гидростатики: закон Гука, закон Паскаля, закон сохранения энергии (основное уравнение гидростатики), закон Архимеда.

3. Сформулируйте условия равновесия жидкости.

4. Сформулируйте условия равновесия твердого тела, находящегося под действием силы давления со стороны жидкости и других сил (силы тяжести, силы упругости пружины, силы трения покоя, силы атмосферного давления).

**Лабораторное занятие 3.** Режимы движения жидкости и проверка критерия Рейнольдса.

1. Объясните физический смысл понятий: вязкость жидкости, местная и средняя скорость, расход (объемный, массовый и весовой), смоченный периметр, гидравлический диаметр.
2. Что такое энергия - полная, удельная, кинетическая, потенциальная энергия положения, потенциальная энергия давления, работа, разница между энергией и работой.
3. Сформулируйте закон сохранения массы при движении жидкости и газа. В каком случае закон сохранения массы эквивалентен закону сохранения объёмного расхода?
4. Как определить режим движения ньютоновской жидкости? Вязкопластичной жидкости?
5. Какой физический смысл числа  $Re$ ?
6. Почему критическое число  $Re_{кр}$  в вязкопластичной жидкости меньше, чем в ньютоновской?

**Лабораторное занятие 4.** Построение диаграммы уравнения Бернулли.

1. Напишите уравнение Бернулли для идеальной и реальной жидкости в виде:
  - баланса полных энергий;
  - баланса энергий на единицу веса (напоров);
  - баланса энергий на единицу объема.
2. Какие типы гидравлических сопротивлений вы знаете? По какой причине появляются сопротивления по длине потока? На что затрачивается энергия при прохождении жидкости через местные гидравлические сопротивления?
3. Методика применения уравнения Бернулли для решения практических задач. Принцип выбора сечений и плоскости сравнения. Что означает каждое слагаемое в уравнении Бернулли? В каких случаях можно пренебрегать скоростью движения жидкости в сечениях потока?
4. Три основные задачи расчета трубопроводов и пути их решения. Методы решения трансцендентных уравнений (графические и численные).

*Критерии оценивания:*

– «зачтено» - работа выполнена в соответствии с требованиями, грамотно выполнены измерения, студент умеет снимать показания приборов, студент умеет строить графики в соответствии с проведенными опытами и измерениями с использованием автоматизированных программ, студент отвечает на вопросы по актуализации знаний по данной теме, грамотно, четко излагает суть проблем, отвечает на поставленные вопросы, правильно аргументирует основные положения и выводы.

– «незачтено» - работа выполнена в не соответствии с требованиями, не выполнены измерения, студент не умеет снимать показания приборов, студент не умеет строить графики в соответствии с проведенными опытами и измерениями с использованием автоматизированных программ, студент отвечает не на все вопросы по данной теме, не правильно аргументирует основные положения и выводы.

