

**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.19 ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ»**

Направление подготовки (специальность) 08.03.01 Строительство

Квалификация (степень) выпускника – Бакалавр

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.Б.19 ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ»**

1.1 Процесс обучения по дисциплине направлен на формирование следующих компетенций

<b>Компетенция по ФГОС</b>	<b>Ожидаемые результаты обучения</b>
<p>ОПК-1 - способностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы 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-2 – способностью 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 естественнонаучную 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 гидравлике и теплотехнике;</li> </ul>

## 1.2 Формирование компетенций в процессе обучения по дисциплине

№	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Раздел 1. Гидростатика	ОПК-1, ОПК-2	практические работы, лабораторные работы, вопросы к зачету
2	Раздел 2. Гидродинамика	ОПК-1, ОПК-2	практические работы, лабораторные работы, вопросы к зачету
3	Раздел 3. Основные понятия и законы термодинамики и теплотехники	ОПК-1, ОПК-2	лабораторные работы, практические работы, контрольная работа, вопросы к зачету

**2. Критерии оценки успеваемости обучающихся**

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

- текущий контроль (защита лабораторных и практических работ, выполнение аудиторных контрольных работ, выполнение домашних заданий);
- 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 работы, ответил на половину вопросов к зачету.
- оценка «не зачтено» ставится, если обучающийся не защитил лабораторные работы, не ответил на половину вопросов к зачету.

**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.

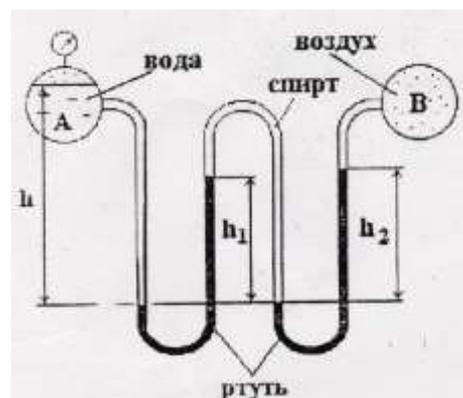
**Задание 1**

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 кг/м<sup>3</sup>;ртуть - 13600 кг/м<sup>3</sup>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<sub>B</sub>**Решение:**

Полное давление в сосуде А определяется по формуле

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

$$P_A = 101325 + 18000 = 119325 \text{ Па}$$

Определим полное давление в точках на линии раздела жидкостей

$$P_C = P_A + \rho_{\text{в}} g h$$

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

$$P_D = P_C - \rho_{\text{рт}} g h_1$$

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

$$P_F = P_D + \rho_{\text{спирта}} g h_1$$

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

$$P_E = P_F - \rho_{\text{рт}} g h_2$$

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

Давление в т. Е равно давлению в сосуде В.

**Ответ:** P<sub>B</sub> = 56409 Па = 0,56 кгс/см<sup>2</sup>**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  $\xi_{\text{вх}}=0,5$ .

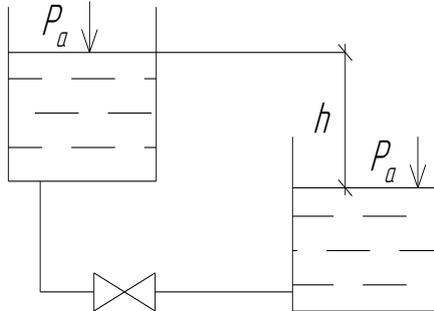


Рис 2

Пример решения задания 2.

**Исходные данные:**

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

$$L = 150 \text{ м}$$

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

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

$$\xi_{\text{вых}} = 1,0$$

$$\xi_{\text{вх}} = 0,5$$

$$\xi_{\text{пов}} = 1,2$$

$$\xi_{\text{в}} = 4,3$$

$$n = 1$$

$$k_3 = 0,07 \text{ мм}$$

**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.

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

3. Зона переходная, формула Альтшуля

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

$$10714 < R_e < 600000$$

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

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

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;

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

5.

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

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

6. Местные потери напора определяются по формуле Вейсбаха:

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

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

$\xi$  - коэффициент местных сопротивлений.

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

7.

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

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

### 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

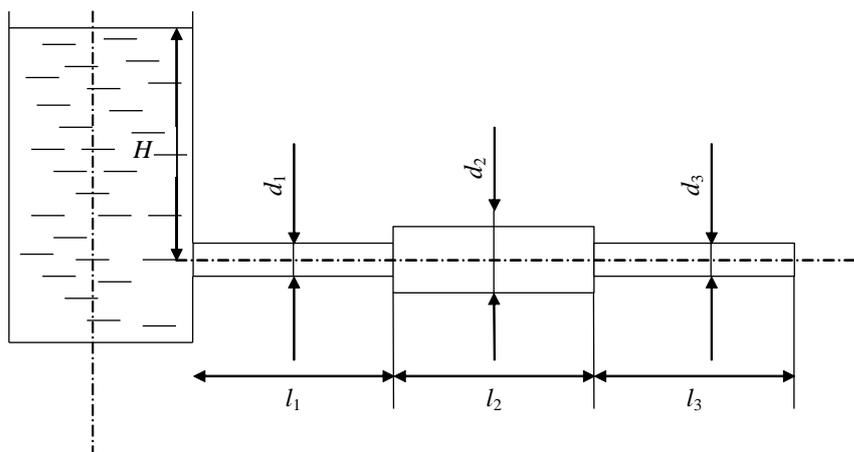


Рис 3

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:

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

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:

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

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:

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

$$g_1 = \frac{Q_1}{\omega_1} = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 * 0,001}{3,14 * 0,032^2} = 1,244 \text{ м/с},$$

$$g_2 = \frac{Q_2}{\omega_2} = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \frac{4 * 0,001}{3,14 * 0,05^2} = 0,051 \text{ м/с},$$

$$g_3 = \frac{Q_3}{\omega_3} = \frac{4Q}{\pi d_3^2} = \frac{4 * 0,001}{3,14 * 0,032^2} = 1,244 \text{ м/с},$$

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

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

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

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:

$$h = \xi \frac{v^2}{2g} [\text{м}]$$

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

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

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

Значение коэффициента местного сопротивления при внезапном сужении трубопровода:

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

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

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

$n$  - 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:

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

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

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:

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

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

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 контрольной 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 %.

Контрольная 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				

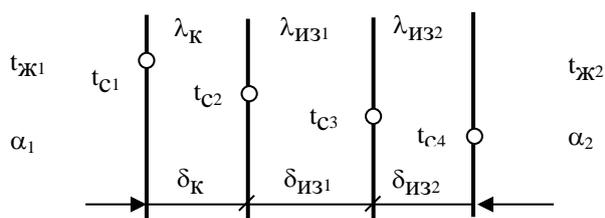


Рис. 1.1

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,  $\text{м}^2$ .

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,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , 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,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

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

Линейное термическое сопротивление теплоотдачи рассчитывается по формуле

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

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , 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.

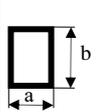
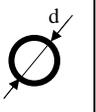
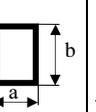
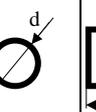
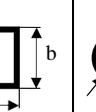
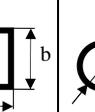
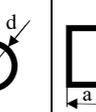
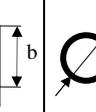
Рекомендуемый порядок решения задачи о теплопередаче через цилиндрическую стенку полностью совпадает с рассмотренным выше для плоской стенки.

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,  $\text{м}^2$ ;  $\Pi$  – 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 ( $10^3 < \text{Gr} \cdot \text{Pr} < 10^9$ ):

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

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

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

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

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

В формулах (13) и (14) приняты следующие определяющие параметры:  $l_0 = h$  – высота поверхности;  $t_0 = t_{\text{ж}}$  – 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:

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

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):  $t_0 = 0,5 \cdot (t_{\text{ж}} + t_{\text{с}})$  – средняя температура;  $l_0 = h$  – высота для вертикальных пластин и труб (цилиндров);  $l_0 = d_{\text{н}}$  – наружный диаметр для горизонтальных труб (цилиндров) и шаров.

4. Теплоотдача при вынужденном движении в трубе:

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

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

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 ( $\text{Re} > 10^4$ ):

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

Поправка на начальный участок:

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

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

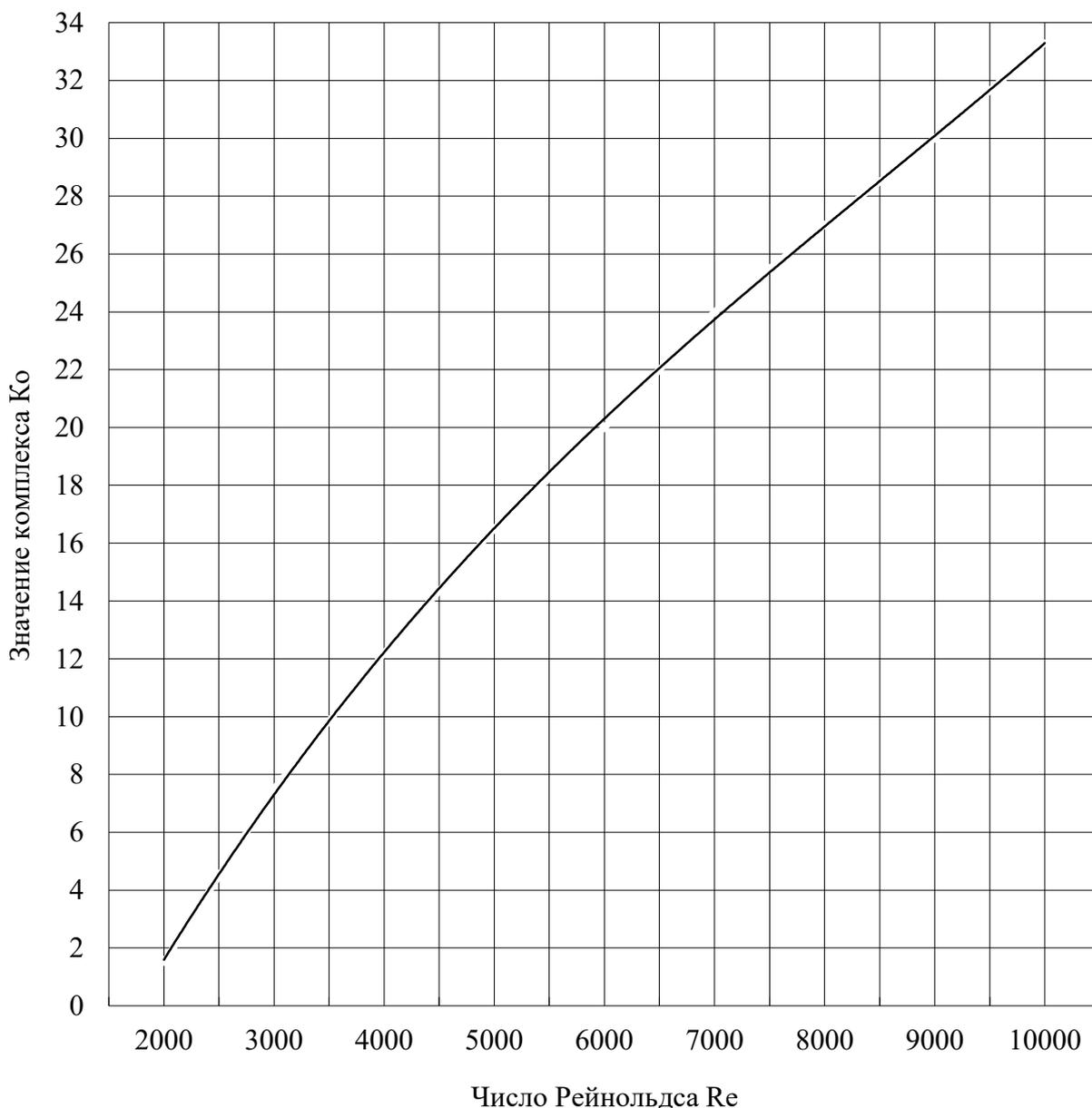
$$\text{Nu} = \text{Ko} \cdot \text{Pr}^{0,43} (\text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с}})^{0,25}, \quad (18)$$

где значение комплекса  $\text{Ko}$  зависит от числа Рейнольдса (см. рис. 1.3).

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

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

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



### **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 жидкости, 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.