

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой пищевой инженерии

Решения задач размещены на сайте zadachi24.ru

С.Л. Тихонов

Методические рекомендации и задания по выполнению контрольных работ

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Наименование направления подготовки

*19.03.04 Технология продукции и организация
общественного питания*

Наименование профиля

Технология продукции и организация ресторанного бизнеса

Автор(ы) Шихалев С.В.

Екатеринбург

2017

Рекомендовано к изданию научно-методической комиссией
Уральского государственного экономического университета

Составители: С.В. Шихалев

Рецензент: С.Л. Меснянкина

ВВЕДЕНИЕ

Целевой установкой контрольной работы по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств» является обучение студентов методике расчета и проектирования пищевой аппаратуры путем рассмотрения примеров и решения конкретных задач.

Приступая к решению задачи, следует изобразить схему устройства, обозначить на ней все размеры и величины, отметить стрелками направления движения потоков и разобраться в условиях работы установки. Затем следует выписать все данные задачи, написать основные расчетные уравнения, наметить путь решения, разбив задачу на ряд частных вопросов, выписать нужные численные значения различных физических свойств. Подставив в расчетные уравнения числовые значения, проверить правильность подстановки, после чего приступить к арифметическим вычислениям. Ответ следует с точки зрения соответствия полученного результата практическим условиям работы рассчитываемой установки или аппарата.

Контрольная работа по теме №1 включает в себя задачи по разделу «Основы гидравлики, гидравлические машины» (гидростатика, гидродинамика). Контрольная работа по теме №2 включает в себя задачи по разделу «Гидромеханические процессы» (отстаивание, осаждение, фильтрование). Контрольная работа по теме №3 включает в себя задачи по разделу «Теплообменные процессы» (теплопроводность, теплоотдача, теплопередача).

Выбор задач для контрольной работы проводится по первой букве фамилии студента, в П.1.

Оформлять контрольную работу следует согласно [1].

При решении задач может использовать литературу [2,3,4].

1. Тема №1

1.1. Цель работы

Целью контрольной работы по теме №1 является изучение теоретических и практических вопросов по разделу «Основы гидравлики, гидравлические машины».

1.2. Основные зависимости и расчетные формулы.

Для расчетов аппаратов пищевых производств (гидравлические прессы, баковая аппаратура и т.д.) необходимо определить гидростатическое давление на глубине от поверхности жидкости и силу давления жидкости на плоскую стенку.

Гидростатическое давление в объеме жидкости определяется по основному уравнению гидростатики:

$$P = P_0 + \rho gh, \quad (1)$$

где P – гидростатическое давление в объеме жидкости, Па;

P_0 – давление на поверхности жидкости, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²

h – расстояние от поверхности жидкости до рассматриваемой точки в объеме, м.

Сила давления жидкости на плоскую стенку определяется по уравнению:

$$F = P \cdot S, \quad (2)$$

где F – сила давления, Н;

S – площадь поверхности стенки, м².

Согласно закону Паскаля, давление, создаваемое в любой точке покоящейся жидкости, передается всем точкам её объема.

При расчетах многих процессов и аппаратов пищевых производств важно знать режим течения жидкости в рабочих полостях аппарата. Фактором оценки гидродинамического режима является критерий Рейнольдса Re , который для потока, проходящего по прямым трубам, имеет следующее значения:

ламинарный режим $Re \leq 2320$;

переходный режим $2320 < Re \leq 10000$

турбулентный режим $Re > 10000$

Критерий Рейнольдса определяется отношением следующих физических величин:

$$Re = \frac{Ud}{\nu}, \quad (3)$$

где U – средняя скорость потока жидкости, м/с ;
 d – внутренний диаметр трубопровода, м ;
 ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с.

Средняя скорость потока связана с объемным расходом жидкости отношением:

$$U = \frac{W}{f}, \quad (4)$$

где W – объемный расход жидкости, м³/с;
 f – площадь поперечного сечения потока, м².

Для потока, проходящего по изогнутым трубам (змеевикам), критическое значение $Re_{кр}$ выше, чем в прямых трубах, и зависит от отношения d/D , где D – диаметр витков змеевика (см. рис. П.1).

Для потоков некруглого поперечного сечения в выражение (3) подставляется эквивалентный диаметр $d_э$, определяемый по формуле:

$$d_э = \frac{4f}{\Pi}, \quad (5)$$

где Π – периметр, омываемый потоком, м.

Удельная энергия потока жидкости, в различных сечениях потока, определяется по уравнению Бернулли, которое для реальной жидкости имеет вид:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + h_{\pi}, \quad (6)$$

где Z – геометрический напор, м;
 $P/(\rho \cdot g)$ – пьезометрический напор, м;
 $U^2/(2 \cdot g)$ – скоростной напор, м;
 h_{π} – потери напора, м.

Потери напора h_{π} бывают двух видов: потери напора на трение и местные потери напора. Потери напора на трение $h_{тр}$ определяются по уравнению Вейсбаха – Дарси:

$$h_{\text{тр}} = \lambda_{\text{тр}} \frac{L}{d_3} \cdot \frac{U^2}{2g}, \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{тр}}$ – коэффициент трения;
 L – длина трубы, м.

Коэффициент трения $\lambda_{\text{тр}}$, в зависимости от режима течения, определяется по уравнениям представленным в таблице 1 в зависимости от числа Re .

Таблица 1

Формулы для определения коэффициента трения

Режим течения	Вид формулы	Условие выбора формулы
ламинарный режим	$\lambda_{\text{тр}} = \frac{64}{Re}; (8)$	$Re < 2300$
турбулентный режим	$\lambda_{\text{тр}} = 0,11 \left(\frac{68}{Re} \right)^{0,25}$	$Re \leq 20 \frac{d}{\Delta}, (9)$
	$\lambda_{\text{тр}} = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$	$20 \frac{d}{\Delta} < Re \leq 500 \frac{d}{\Delta}, (10)$
	$\lambda_{\text{тр}} = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$	$Re > 500 \frac{d}{\Delta}. (11)$

где Δ – средняя высота шероховатостей трубы (для новых стальных труб можно принять $\Delta = 0,1$), м.

Местные потери напора h_m , м, определяются по уравнению:

$$h_m = \zeta \frac{U^2}{2g}, \quad (12)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления.

1.3. Примеры расчетов режимных параметров

1) На малый поршень диаметром 40 мм гидравлического пресса действует сила 630 Н. Пренебрегая потерями, определить силу, действующую на прессуемое тело, если диаметр большого поршня 300 мм.
 Решение.

Изображаем схему гидравлического пресса (см. рис.1).

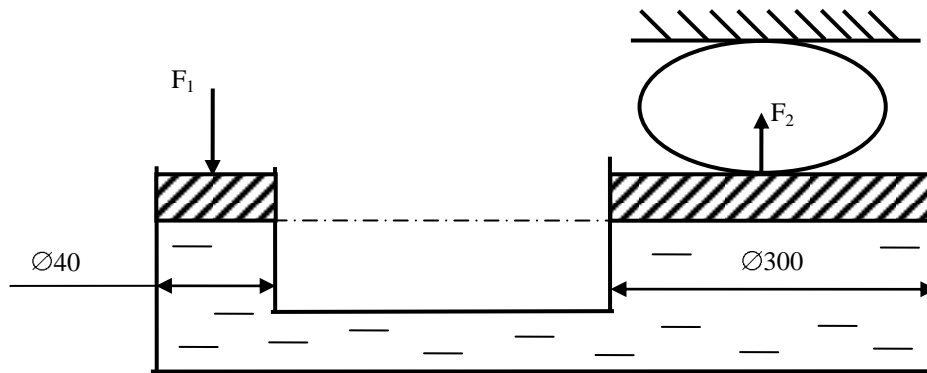


Рисунок 1 – Схема гидравлического пресса

Определяем по уравнению (2) давление на поверхности жидкости, создаваемое малым поршнем:

$$P_1 = \frac{4 \cdot 630}{3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = 500 \text{ кПа.}$$

Согласно закону Паскаля, учитывая, что оба поршня находятся на одном уровне, давления жидкости на большой поршень $P_2 = P_1$. Тогда, искомая сила F_2 , по уравнению(2), равна

$$F_2 = \frac{500 \cdot 10^3 \cdot 3,14 \cdot 300 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{4} = 35,3 \text{ кН.}$$

2) Определить режим течения воды, при течении её в змеевиковом нагревателе с диаметром трубы 35 x 2,5 мм и диаметром витков 600 мм. Объёмный расход воды $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, средняя температура воды 50°C .

Решение.

Изображаем схему змеевикового нагревателя (см. рис.2).

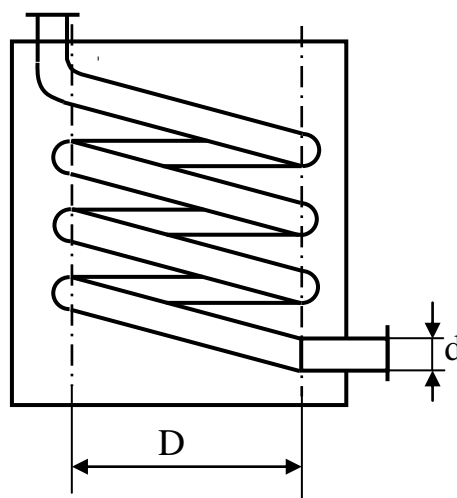


Рисунок 2 – Схема змеевикового нагревателя

Определяем среднюю скорость потока воды по уравнению (4)

$$U = \frac{4 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = 5 \text{ м/с.}$$

Определяем коэффициент кинематической вязкости воды при 50⁰С (см. таблицу П.2 приложения), учитывая, что коэффициенты кинематической и динамической вязкости связаны отношением $\nu = \mu / \rho$:

$$\nu = \frac{549 \cdot 10^{-6}}{988} = 5,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

По уравнению (3) критерий Re равен:

$$Re = \frac{5 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{5,5 \cdot 10^{-7}} = 272727.$$

Согласно графика (рис. П1) критическое значение $Re_{кр}$, при котором еще осуществляется ламинарный режим течения, для данного змеевикового нагревателя $Re_{кр} = 7000$, следовательно, можно сделать вывод, что режим течения турбулентный.

3) Поток воды движется по горизонтальной трубе диаметром 32x2 мм, длиной 15 м со скоростью 3 м/с. Определить перепад давления потока на входе и выходе из трубы. Температура воды 30⁰С.

Решение

Изображаем расчетную схему процесса (см. рис.3).

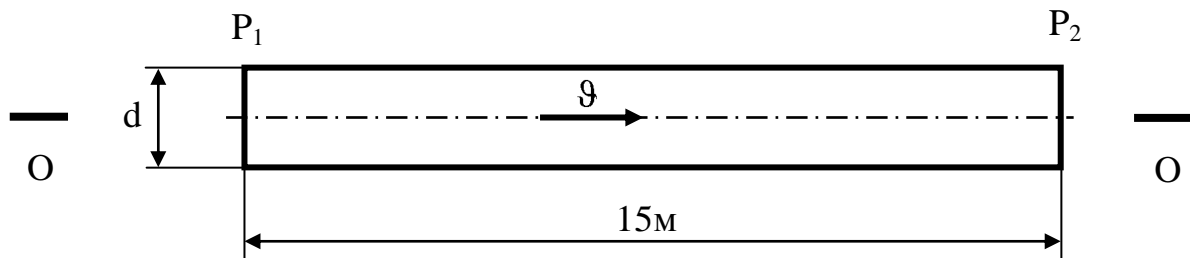


Рисунок 3 – Расчетная схема процесса

Составляем уравнение Бернулли для сечений на входе и выходе потока воды из трубы, взяв в качестве плоскости сравнения плоскость О-О (рис.3, уравнение (6))

$$\frac{\rho_1}{\rho q} = \frac{\rho_2}{\rho q} + h_{тр},$$

откуда

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho q h_{тр}$$

Для определения режима течения используем уравнение (3), предварительно определив по П.2 значение коэффициента кинематической вязкости ν (как это было показано в задаче 1), $\nu = 8,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

$$\text{Re} = \frac{3 \cdot 28 \cdot 10^{-3}}{8,1 \cdot 10^{-7}} = 103703,7.$$

Так как режим турбулентный, определяем коэффициент трения $\lambda_{\text{тр}}$, применяя уравнения (9-11):

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,11 \left(\frac{68}{103703,7} + \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,25} = 2,8 \cdot 10^{-2}.$$

Потери напора, по уравнению (7), равны

$$h_{\text{тр}} = 2,8 \cdot 10^{-2} \frac{15}{28 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{3^2}{2 \cdot 9,81} = 6,9 \text{ м}.$$

Тогда искомый перепад давления равен

$$\Delta P = 996 \cdot 9,81 \cdot 6,9 = 67,4 \text{ кПа}.$$

1.4. Контрольные задачи

1. Аппарат прямоугольной формы с размерами 1,5x0,8x1,0 м заполнен водой. На поверхности воды действует давление 0,15 МПа, температура воды 90⁰С. Определить силу, действующую на дно аппарата.

2. На прессуемое тело действует сила 100 кН. Определить, какую силу необходимо приложить к малому поршню гидравлического пресса, если диаметры поршней 100 мм и 800 мм, малый поршень расположен на 5 м выше уровня большого поршня.

3. Определить силу, действующую на дно аппаратов, если высота их одинакова и равна 2 м, размеры дна аппаратов: первого-2x2 м, второго-диаметр 1м, третьего-1,5x6 м. Аппараты заполнены жидкостью, плотность жидкости 1250 кг/м³. На поверхности жидкости действует атмосферное давление.

4. Определить режим течения воды в трубном пространстве кожухотрубного теплообменника. Объёмный расход воды 1,5·10³ м³/с, диаметр труб 50x2,5 мм, количество труб 20 шт., температура воды 30⁰С.

5. Определить режим течения воды в змеевиковом нагревателе с диаметром трубы 22x2 мм и диаметром витков 200 мм. Объёмный расход воды 2·10⁻⁴ м³/с, средняя температура воды 60⁰С.

6. Вода движется в трубе квадратного сечения, со стороной 30 мм и толщиной стенки 2,5 мм. Скорость потока 0,6 м/с, температура воды 20⁰С. Определить режим течения воды.

7. Определить объёмный расход, при котором произойдет изменение режима течения жидкости в трубе диаметром 5 мм. Плотность жидкости 1500 кг/м^3 , коэффициент динамической вязкости $2 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

8. Поток воды движется по наклонной трубе диаметром 60x5 мм, длиной 50 м со скоростью 0,2 м/с. Разность высот трубы на входе и выходе воды составляет 10 м, температура воды 10°C . Определить перепад давления потока на входе и выходе из трубы.

9. Определить перепад давления при движении потока воды через заслонку, если коэффициент местного сопротивления заслонки равен 3, скорость потока 2 м/с, температура воды 40°C .

10. Определить перепад давления потока воды на входе и выходе из горизонтальной трубы диаметром 100x5 мм, длиной 20 м. Объёмный расход воды $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, температура воды 20°C .

11. Требуется перекачать за 1 ч 20 т воды из бака в реактор. Перепад давления при этом составил $\Delta p = 169995 \text{ Н/м}^2$. Определить мощность и подобрать тип насоса, если КПД насоса равен $\eta_m = 0,65$.

2. Тема № 2

2.1. Цель работы

Целью контрольной работы по теме №2 является изучение теоретических и практических вопросов по разделу «Гидромеханические процессы».

2.2. Основные зависимости и расчетные формулы.

Для описания в критериальной форме процесса осаждения шарообразной частицы в неподвижной неограниченной среде могут быть применены критерии подобия Архимеда Ar и Рейнольдса Re .

При ламинарном режиме осаждения, когда критерии имеют значения $Ar \leq 3,6$; $Re \leq 0,2$, Стоксом теоретически получена следующая формула для скорости осаждения U_{oc} (м/с) шарообразной частицы:

$$U_{oc} = \frac{d^2 \cdot (\rho - \rho_c) \cdot g}{18 \cdot \mu_c}, \quad (13)$$

где d - диаметр шарообразной частицы, м;
 ρ - плотность частицы, кг/м³ ;
 ρ_c - плотность среды, кг/м³ ;
 g - ускорение свободного падения, м/с² ,
 μ_c - коэффициент динамической вязкости среды, Па·с.

Определение скорости осаждения шарообразной одиночной частицы в неподвижной неограниченной среде по обобщенному методу, пригодному при любом режиме осаждения, осуществляют следующим образом.

Определяют критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho - \rho_c) \cdot g}{\mu_c^2}. \quad (14)$$

Для ламинарного режима ($Re \leq 0,2$, $Ar < 0,33$)

$$Re = 1/18 \cdot Ar$$

При переходном режиме ($0,18 \leq Re \leq 500$, $33 < Ar < 83 \cdot 10^3$)

$$Re = 0,152 \cdot (\Psi \cdot Ar)^{0,715}$$

Турбулентный режим ($Re \geq 500$, $Ar > 83 \cdot 10^3$)

$$Re = 1,74 \cdot (\Psi \cdot Ar)^{0,5}$$

Определив критерий Re находим значение скорости осаждения U .

$$U_{oc} = \frac{Re \cdot \mu_c}{\rho_c \cdot d}, \quad (15)$$

Площадь осаждения F_{oc} , m^2 , отстойника для суспензий (взвесей) определяется по формуле:

$$F_{oc} = \frac{V}{U_{oc}}, \quad (16)$$

где V – объемный расход жидкости, проходящей через аппарат параллельно поверхности осаждения, m^3/c ;

U_{oc} – средняя расчетная скорость осаждения частиц, m/c .

При ориентировочных расчетах, учитывая приближенно отличия реальных условий осаждения от теоретических (стесненность осаждения форма частиц, движение среды), среднюю расчетную скорость осаждения часто принимают равной половине теоретической скорости осаждения одиночной шарообразной частицы:

$$U_{oc}^{\lambda} = 0,5 \cdot U_{oc}, \quad (17)$$

В применении к отстойнику непрерывного действия для отстаивания суспензий формула (4) принимает вид:

$$F_{oc} = \frac{G_H \left(1 - \frac{c_H}{c_{cr}} \right)}{\rho_c U_{oc}}, \quad (18)$$

где G_H – массовый расход начальной (разбавленной) суспензии, $кг/с$;

c_H – массовая концентрация твердой фазы в начальной суспензии, $кг/кг$;

c_{cr} – массовая концентрация твердой фазы в сгущенной суспензии (шламе), $кг/кг$.

В процессе фильтрования при $\Delta p = const$, объем фильтрата V , прошедшего через $1 m^2$ фильтрующей поверхности за время τ , выраженные уравнением:

$$V^2 + 2VC = K\tau, \quad (19)$$

- где V – объем фильтрата, прошедшего через 1 м^2 фильтрующей поверхности, $\text{м}^3 / \text{м}^2$;
 C – константа фильтрования, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки (ткани), $\text{м}^3 / \text{м}^2$;
 K – константа фильтрования, учитывающая режим процесса фильтрования и физико-химические свойства осадки и жидкости, $\text{м}^2 / \text{с}$;
 T – продолжительность фильтрования, с.

2.3. Примеры расчетов режимных параметров

1) Найти скорость осаждения в воде частиц кварцевого песка шарообразной формы диаметром $0,9 \text{ мм}$, если плотность песка $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$, а температура воды $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение

Изображаем схему процесса осаждения (рис.4).

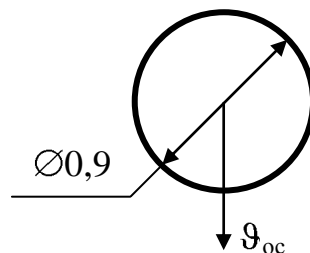


Рисунок 4 – Схема процесса осаждения

Определяем критерий Ar по формуле (14), необходимые для расчета физические величины определяем, в зависимости от температуры, по приложению П.2, где $\rho_c = 998 \text{ кг/м}^3$; $\mu_c = 1000 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$:

$$Ar = \frac{0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 2650 - 998 \cdot 9,81}{1000 \cdot 10^{-6}} = 1,18 \cdot 10^4 .$$

По значению Ar находим расчетную формулу в зависимости от вида осаждения и вычисляем критерий $Re = 140$.

Скорость осаждения U_{oc} определяем по формуле (15):

$$U_{oc} = \frac{140 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}}{998 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}} = 0,15 \text{ м/с}$$

2) Определить диаметр отстойника для непрерывного осаждения отмученного мела в воде. Производительность отстойника 80 т/ч начальной суспензии, содержащей 8% (масс.) CaCO_3 . Диаметр наименьших частиц, подлежащих осаждению, 35 мкм. Температура суспензии 20°C . Влажность шлама 70%. Плотность мела 2710 кг/м^3 .

Решение

Изображаем схему отстойника непрерывного действия (см. рис.5).

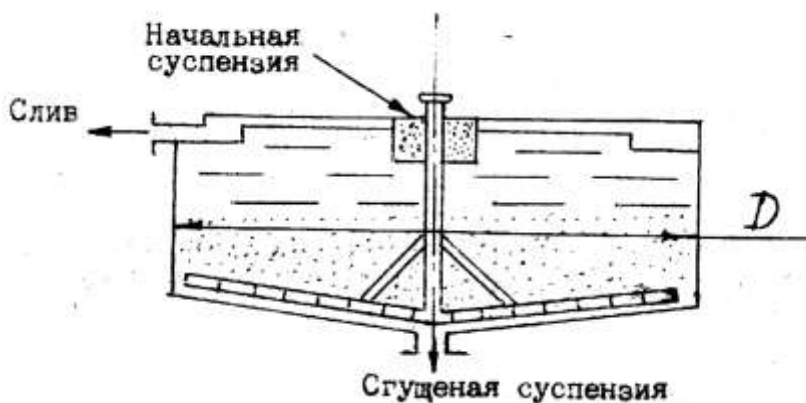


Рис. 5. Схема отстойника непрерывного действия

Вычисляем критерий Ar , по которому определяем, что режим осаждения ламинарный. Находим скорость осаждения по формуле Стокса (13), необходимые для расчета физические величины определяем, в зависимости от температуры, по П.3, где $\rho = 988 \text{ кг/м}^3$; $\mu_c = 1000 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$:

$$U_{oc} = \frac{35 \cdot 10^{-6} \sqrt{2710 - 988} \cdot 9,81}{18 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}} = 0,001 \text{ м/с}$$

Определяем действительную скорость осаждения по формуле (5);

$$U_{oc} = 0,5 \cdot 0,01 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$$

Определяем площадь отстойника по формуле (6):

$$F_{oc} = \frac{80 \cdot 10^3 \left(1 - \frac{8}{30}\right)}{988 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3600} = 32,5 \text{ м}^2$$

Определяем диаметр отстойника

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 32,5}{3,14}} = 6,4 \text{ м.}$$

3) Необходимо отфильтровать суспензию на рамном фильтрпрессе и за 3 часа получить 6 м³ фильтрата. Опытное фильтрование этой суспензии на лабораторном фильтрпрессе при том же давлении и той же толщине слоя осадка показало, что константы фильтрования, отнесенные к 1 м² площади фильтра, имеют следующие значения: $K = 20,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$ и $C = 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2$. Определить требуемую поверхность фильтрования.

Решение

Изображаем схему рамного фильтр–пресса (см. рис.6.)

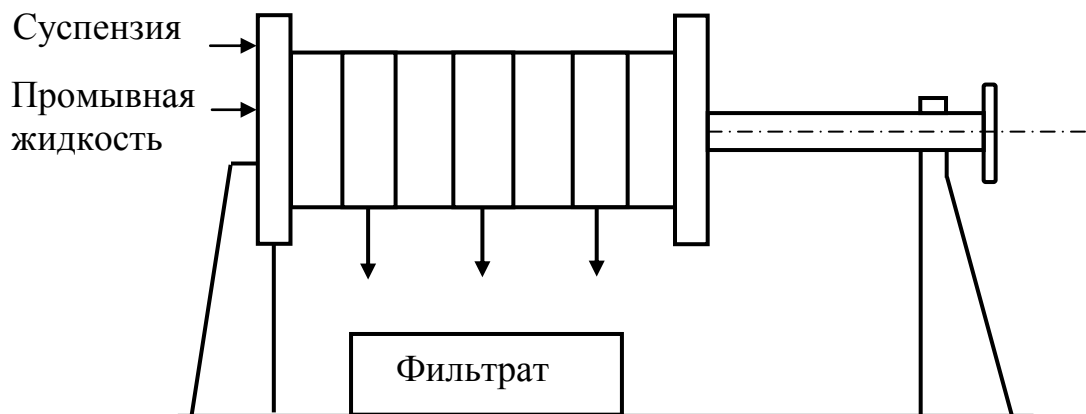


Рисунок 6 – Схема рамного фильтрпресса

Находим производительность 1 м² фильтрпресса по уравнению (19), откуда:

$$V = \sqrt{C^2 + K\tau} - C.$$

За цикл фильтрования, т.е. за 3 часа, получаем:

$$V = \sqrt{\left(1,45 \cdot 10^{-3}\right)^2 + 20,7 \cdot 10^{-4} \cdot 3} - 1,45 \cdot 10^{-3} = 7,73 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{м}^2$$

Следовательно, для заданной производительности необходима поверхность фильтрования:

$$F = \frac{6}{7,73 \cdot 10^{-2}} = 77,5 \text{ м}^2.$$

2.4 Контрольные задачи

1. С какой скоростью будут осаждаться шарообразные частицы кварца плотностью $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$, диаметром $d = 10 \text{ мкм}$ в воде при 10°C и при 80°C .

2. Определить скорость осаждения шарообразных частиц угля ($\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$) и сланца ($\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$) диаметром 2 мм в воде при 20°C и при 60°C .

3. Найти верхний предел (т.е. наибольший диаметр частиц) применимости формулы Стокса к частицам кварца плотностью 2650 кг/м^3 , осаждающимся в воде при 20°C .

4. Найти верхний предел (т.е. наибольший диаметр частиц) применимости формулы Стокса к частицам свинцового блеска плотностью 7560 кг/м^3 , осаждающимся в воде при 20°C .

5. Определить диаметр отстойника для непрерывного уплотнения водной суспензии мела, имеющей температуру 40°C . Производительность отстойника 50 т/ч начальной суспензии, содержащей 5% (масс) CaCO_3 . Диаметр наименьших частиц, подлежащих осаждению, 20 мкм . Влажность шлама 50% . Плотность $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$.

6. Определить диаметр отстойника для непрерывного уплотнения суспензии кварцевого песка. Производительность отстойника 15 т/ч начальной суспензии, содержащей 10% (масс) кварцевого песка. Диаметр наименьших частиц, подлежащих осаждению, 10 мкм . Температура суспензии 10°C , влажность шлама 80% . Плотность кварцевого песка 2600 кг/м^3 .

7. Определить продолжительность фильтрования 10 дм^3 жидкости через 1 м^2 фильтра, если при предварительном испытании фильтра с 1 м^2 было собрано фильтрата: 1 дм^3 через $2,25 \text{ мин}$ и 3 дм^3 через $14,5 \text{ мин}$ после начала фильтрования.

8. Во время опытного фильтрования водной суспензии с содержанием карбоната кальция $13,9\%$, при 20°C и избыточном давлении $3,43 \cdot 10^4 \text{ Па}$, на лабораторном фильтрпрессе с $F = 0,1 \text{ м}^2$ и толщиной осадка 50 мм были получены следующие результаты: собрано фильтрата $2,92 \text{ дм}^3$ через 146 с и $7,80 \text{ дм}^3$ через 888 с . Определить константы фильтрования: $K(\text{м}^2/\text{ч})$ и $C(\text{м}^3/\text{м}^2)$.

9. Во время опытного фильтрования водной суспензии с содержанием $13,9\%$ карбоната кальция, при 20°C и избыточном давлении $10,3 \cdot 10^4 \text{ Па}$, на лабораторном фильтрпрессе с $F = 0,1 \text{ м}^2$ и толщиной осадка 50 мм были получены следующие результаты: собрано фильтрата $2,45 \text{ дм}^3$ через 50 с и $9,80 \text{ дм}^3$ через 660 с . Определить константы фильтрования: $K(\text{м}^2/\text{ч})$ и $C(\text{м}^3/\text{м}^2)$.

10. Определить продолжительность фильтрования 25 дм^3 жидкости через 1 м^2 фильтра, если при предварительном испытании фильтра с 1 м^2

было собрано фильтрата: 3 дм^3 через 1,15 мин и $5,5 \text{ дм}^3$ через 10,5 мин после начала фильтрования.

11. Определить сопротивление фильтровальной перегородки высотой 0,1 м, изготовленной из зернистого материала с эквивалентным диаметром каналов 0,5 мм. Через перегородку протекает водная тонкодисперсная суспензия при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью, отнесенной к свободному сечению каналов, 0,2 м/с.

3. Тема №3

3.1. Цель работы

Целью контрольной работы по теме №3 является изучение теоретических и практических вопросов по разделу «Теплообменные процессы».

3.2. Основные зависимости и расчетные формулы

Основную группу теплообменных аппаратов, применяемых в пищевой промышленности и общественном питании, составляют поверхностные теплообменники, в которых теплота от горячего теплоносителя передается холодному теплоносителю через разделяющую их стенку. Другую группу составляют теплообменники смешения, в которых теплота передается непосредственно при соприкосновении горячего и холодного теплоносителей.

Уравнение теплопроводности для установившегося теплового потока через плоскую однослойную стенку:

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{\lambda}{\delta} (t_r - t_x), \quad (20)$$

где q – удельный тепловой поток, Вт/м²;

Q – тепловой поток, Вт;

F – площадь поверхности стенки, м²;

t_r – температура горячей поверхности стенки, °С;

t_x – температура холодной поверхности стенки, °С;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК);

δ – толщина стенки, м.

Уравнение теплопроводности для установившегося теплового потока через многослойную стенку:

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{t_r - t_x}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots}, \quad (21)$$

Для цилиндрической однослойной стенки площадь поверхности определяется по формуле:

$$F_{cp} = \pi d_{cp} L = \frac{\pi (d_2 - d_1) \cdot L}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (22)$$

где d_1 – внутренний диаметр, м;

d_2 – наружный диаметр, м;
 L – длина цилиндра, м.

Если $\frac{d_2}{d_1} < 2$, то можно среднюю площадь поверхности определять по формуле:

$$F_{\text{ср}} = \frac{\pi \cdot (d_1 + d_2) \cdot L}{2}, \quad (23)$$

Уравнение теплопроводности для установившегося теплового потока через многослойную цилиндрическую стенку:

$$Q = \frac{2\pi L (t_{\text{г}} - t_{\text{х}})}{\sum \frac{1}{\lambda} l_n \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{в}}}}, \quad (24)$$

где $d_{\text{н}}$ – наружный диаметр каждого цилиндрического слоя, м;
 $d_{\text{в}}$ – внутренний диаметр каждого цилиндрического слоя, м.

Основное уравнение передачи имеет вид:

$$Q = k \cdot \Delta t \cdot F, \quad (25)$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²К);
 F – площадь поверхности теплопередачи, м²;
 Δt – разность температур горячего и холодного теплоносителей, °С.

Для плоской поверхности коэффициент теплопередачи k определяется из соотношения:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{г}}} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{х}}}}, \quad (26)$$

где $\alpha_{\text{г}}$ – коэффициент теплоотдачи для горячего теплоносителя, Вт/(м²К);
 $\alpha_{\text{х}}$ – коэффициент теплоотдачи для холодного теплоносителя, Вт/(м²К);

$\sum \frac{\delta}{\lambda}$ – сумма термических сопротивлений всех слоев, из которых состоит стенка, м²·К/Вт.

При расчетах теплоотдачи используют закон Ньютона–Рихмана:

$$Q = \alpha \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{х}}) \cdot F, \quad (27)$$

где $t_{\text{ст}}$ – температура стенки, отдающей тепло, °С.

Коэффициент пропорциональности α наз. коэффициентом теплоотдачи; $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{сек}) = \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Зависит и определяется видом процесса теплообмена.

Как известно [2,3,4], теплообменные процессы могут протекать без изменения и с изменением агрегатного состояния теплоносителя. К процессам, протекающим без изменения агрегатного состояния теплоносителя можно отнести свободную и вынужденную конвекцию. В свою очередь с изменением агрегатного состояния теплоносителя: кипение, испарение.

Под свободной, или естественной, конвекцией понимают перемещение частиц жидкости или газа в объеме аппарата или теплообменных устройств вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости или газа. Движущей силой свободно-конвективного движения является величина $g \cdot (\rho_1 - \rho_2)$, пропорциональная силе Архимеда. Поэтому мерой интенсивности такого движения служит безразмерное число (критерий) Архимеда:

$$Ar = \frac{g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot l^3}{\rho_1 \cdot \nu^2} \text{ или } Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot (t_1 - t_2) \cdot l^3}{\nu^2} \quad (28)$$

где ν – кинематическая вязкость;

l – определяющий размер;

β – температурный коэффициент расширения среды.

Свойства теплоносителя определяются по его температуре вдали от поверхности теплообмена согласно П.2.

Для определения коэффициента теплоотдачи при свободно-конвективном движении используют критериальное уравнение:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr_{ж})^n \cdot \varepsilon_t, \quad (29)$$

где $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ – критерий Нуссельта;

$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$ – поправка на переменность свойств среды.

Критерии $Pr_{ж}$ и $Pr_{ст}$ определяют по П.2 по температуре соответственно вдали от поверхности теплообмена и по температуре стенки.

Таблица 2

К определению коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции

Коэффициент	Ламинарный $1 \cdot 10^{-3} \leq Gr \cdot Pr \leq 5 \cdot 10^2$	Переходной $5 \cdot 10^2 \leq Gr \cdot Pr \leq 2 \cdot 10^7$	Турбулентный $5 \cdot 10^7 \leq Gr \cdot Pr \leq 2 \cdot 10^{13}$
C	1,18	0,54	0,115
n	0,125	0,25	0,33

Вынужденная конвекция возникает в каналах технологических теплообменных аппаратов, если среда совершает общемассовое движение вдоль поверхности теплообмена. Например, в кольцевой части рубашки, под действием насоса или вентилятора, мешалка в емкости. Причина – разность давлений на входе в канал и выходе из него.

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot \epsilon_t, \quad (30)$$

где $Re = \frac{\omega \cdot l}{\nu}$ – критерий Рейнольдса;

ω – скорость среды, c^{-1} .

Для труб круглого сечения:

ламинарный режим: $Re < 2300$

$$Nu = 1,55 \cdot Re^{1/3} \cdot Pr^{1/3} \cdot \epsilon_t,$$

турбулентный режим: $4 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^3$

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \epsilon_t,$$

3.3. Примеры расчетов режимных параметров

1. Аппарат диаметром 2 м и высотой 5 м покрыт слоем теплоизоляции из асбеста толщиной 75 мм. Температура стенки аппарата $146^{\circ}C$, температура наружной поверхности изоляции $40^{\circ}C$. Определить потери теплоты через слой изоляции. Коэффициент теплопроводности асбеста $\lambda = 0,151$ Вт/(мК).

Решение

Изображаем схему аппарата (см. рис. 7):

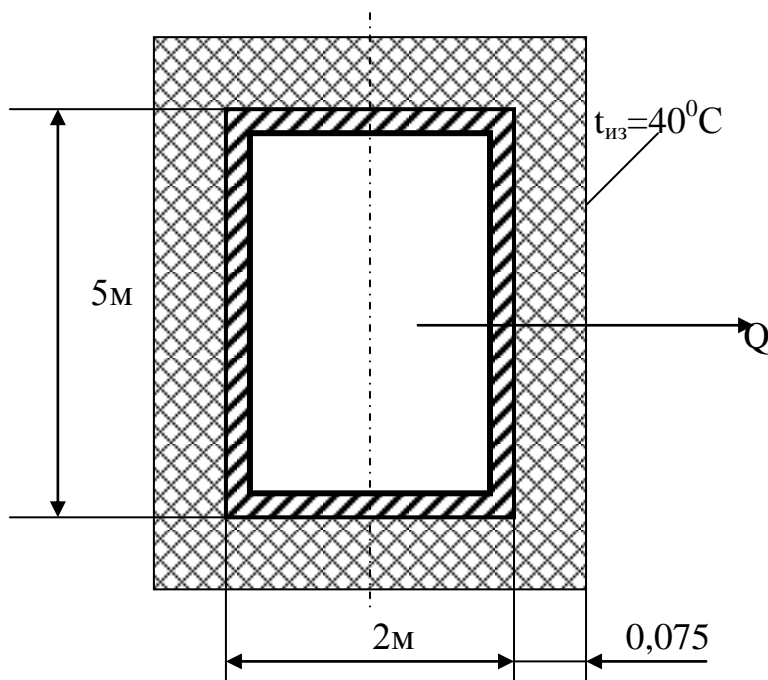


Рисунок 7 – Схема аппарата

Определяем среднюю площадь, через которую проходит теплота, по формуле (23), учитывая наличие у аппарата дна и крышки:

$$F_{\text{ср}} = \frac{3,14(2,15 + 2) \cdot 5}{2} + 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{2^2}{4} = 38,8 \text{ м}^2$$

Определяем потери теплоты через изоляцию по формуле (20):

$$Q = \frac{0,151}{0,075} \cdot (146 - 40) \cdot 38,8 = 8280, \text{ Вт}$$

2. Стенка печи состоит из двух слоев: огнеупорного кирпича ($\delta_1 = 500 \text{ мм}$) и строительного кирпича ($\delta_2 = 250 \text{ мм}$). Температура внутри печи 1300°C , температура окружающего пространства 25°C . Определить потери теплоты с 1 м^2 поверхности стенки. Коэффициент теплоотдачи от печных газов к стенке $\alpha_1 = 34,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху $\alpha_2 = 16,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. Коэффициент теплопроводности огнеупорного кирпича $\lambda_1 = 1,16 \text{ Вт}/(\text{мК})$; коэффициент теплопроводности строительного кирпича $\lambda_2 = 0,58 \text{ Вт}/(\text{мК})$.

Решение.

Изображаем схему теплопередачи через стенку печи (рис.8).

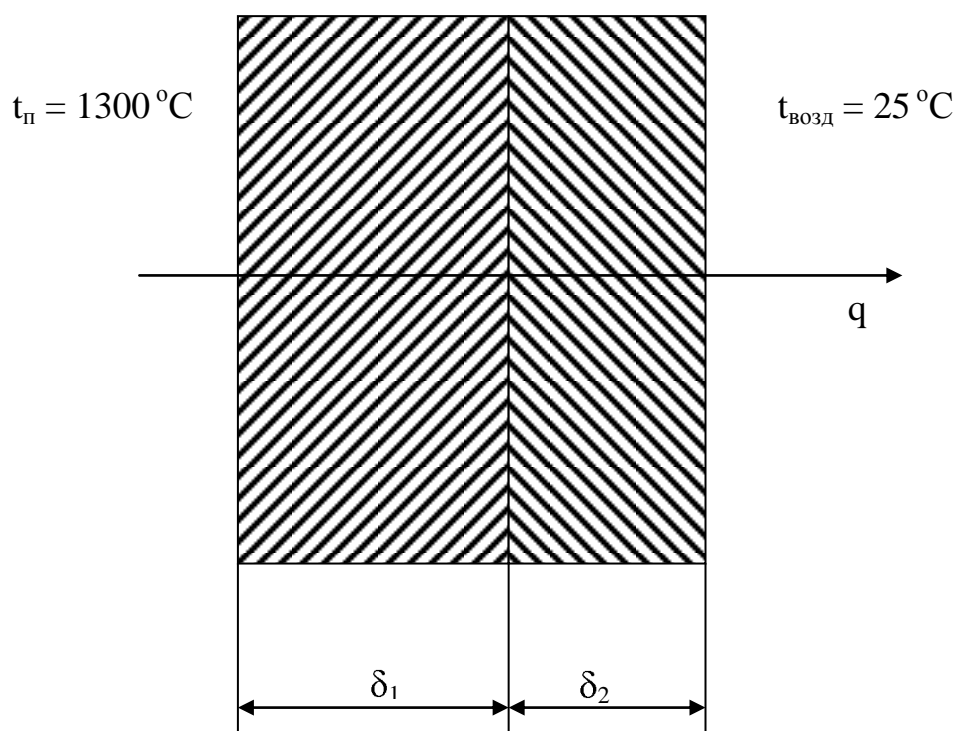


Рисунок 8 – К расчету процесса теплопередачи

Определяем коэффициент теплопередачи по формуле (26);

$$K = \frac{1}{\frac{1}{34,8} + \frac{0,5}{1,16} + \frac{0,25}{0,58} + \frac{1}{16,2}} = 1,05 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}},$$

Удельная плотность потока потери теплоты с 1 м² поверхности стенки определяем по формуле (20);

$$q = 1,05 \cdot (1300 - 25) = 1340 \text{ Вт/м}^2.$$

Потери теплоты в результате составят:

$$Q = 1340 \cdot 1 = 1340 \text{ Вт}.$$

3.4 Контрольные задачи

1. Паропровод длиной 40 м, диаметром 51х2,5 мм покрыт слоем изоляции толщиной 30 мм; температура наружной поверхности изоляции $t_{\text{п}} = 45^{\circ}\text{C}$, а внутренней $t_{\text{ст}} = 175^{\circ}\text{C}$. Определить количество теплоты, теряемое паропроводом в 1 час. Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda = 0,016 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

2. Найти температуру внутренней поверхности обмуровки аппарата, если температура на наружной поверхности ее 35°C . Толщина обмуровки 260 мм. Термометр, заделанный на глубину 50 мм от наружной поверхности, показывает температуру 70°C .

3. Во сколько раз увеличится термическое сопротивление стенки змеевика, свернутого из трубы диаметром 38х2,5 мм, если покрыть ее слоем эмали толщиной 0,5 мм? Считать стенку плоской. Коэффициент теплопроводности стали $46,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, эмали $1,055 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

4. Аппарат прямоугольной формы, с размерами 5х3х2,5 м, покрыт слоем теплоизоляции из стекловаты толщиной 40 мм. Температура стенки аппарата 100°C , температура наружной поверхности изоляции 55°C . Определить потери теплоты (тепловой поток) через слой теплоизоляции. Коэффициент теплопроводности стекловаты $\lambda = 0,05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

5. Паропровод длиной 10 м, диаметром 50х2,5 м покрыт слоем изоляции из асбеста толщиной 25 мм. Температура наружной поверхности изоляции 35°C , внутренней 150°C . Коэффициент теплопроводности асбеста $\lambda = 0,15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Определить потери теплоты от паропровода за 1 час.

6. Паропровод длиной 10 м, диаметром 40·1,5 мм покрыт слоем изоляции из стекловаты толщиной 15 мм. Температура наружной поверхности изоляции 55°C , внутренней 100°C . Коэффициент теплопроводности стекловаты $\lambda = 0,05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Определить потери теплоты от паропровода за 1 час.

7. Стенка печи состоит из двух слоев: огнеупорного кирпича ($\delta_1 = 300 \text{ мм}$) и строительного кирпича ($\delta_2 = 100 \text{ мм}$). Температура внутри печи 1500°C , температура окружающего пространства 20°C . Определить потери теплоты с 1 м² поверхности стенки. Коэффициент теплоотдачи от печных

газов к стенке $\alpha_1=34,8$ Вт/(м²К); коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху $\alpha_2=18,4$ Вт/(м²К). Коэффициент теплопроводности огнеупорного кирпича $\lambda_1=1,08$ Вт/(мК); коэффициент теплопроводности строительного кирпича $\lambda_2=0,72$ Вт/(мК).

8. Определить температуру внутренней и наружной стенки теплообменника. Температура жидкости в теплообменнике $t_{ж}= 80^{\circ}\text{C}$, температура наружного воздуха $t_{\text{возд}}= 10^{\circ}\text{C}$. Теплообменник сделан из стали; толщина стальной стенки $\delta_{\text{ст}}= 5$ мм, коэффициент теплопроводности стали $\lambda_2=46,5$ Вт/(мК). Коэффициент теплоотдачи от жидкости к стенке $\alpha_1=232$ Вт/(м²К), коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху $\alpha_2=10,4$ Вт/(м²К).

9. Определить температуру наружной поверхности теплоизоляции аппарата. Толщина изоляции $\delta_{\text{ст}} = 50$ мм, коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к воздуху $\alpha_2 = 10,4$ Вт/(м²К). Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda_{\text{из}}=0,12$ Вт/(м·К). Остальные необходимые для расчета данные взять из задачи №8.

10. Определить среднюю температуру стенки в паровом подогревателе, в котором водяным паром температурой $t_{п}=143^{\circ}\text{C}$ подогревается вода. Средняя температура воды 30°C . Толщина стенки стальных труб $\delta_{\text{ст}}= 4$ мм. Коэффициент теплоотдачи для конденсирующего пара $\alpha_1=13300$ Вт/(м²К), коэффициент теплоотдачи для воды $\alpha_2=3420$ Вт/(м²К). Коэффициент теплопроводности стали $\lambda_{\text{ст}}=46,5$ Вт/(мК).

11. Определить потери теплоты плоской крышкой варочного котла за 45 мин его работы, если температура поверхности крышки $t_{\text{пов}}=60$ °С, температура окружающей среды $t_{\text{окр}}=22$ °С, площадь поверхности крышки $F=0,19$ м² коэффициент теплоотдачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Правила оформления текстовых документов: Метод. указания* / В.З. Порцев, Г.Ф. Фролова, И.Ф. Решетников и др. Екатеринбург: Изд-во УрГЭУ, 2005. – 53 с.

2. Кавецкий Г.Д., Касьяненко В.П. Процессы и аппараты пищевых производств. Издательство: КолосС, серия: Учебники и учеб.пособия для высших учебных заведений, 2009, стр. 59

3. Остриков А.Н., Шевцов А.А., Алексеев Г.В., Логинов А.В., Красовицкий Ю.В. Процессы и аппараты пищевых производств. Издательство: Гиорд, 2012, стр. 616

4. Ларин В.А., Малахов Н.Н., Малахов Ю.М. Процессы и аппараты пищевых производств. Издательство: КОЛОСС, учебник для высших учебных заведений, 2008, стр. 760

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица III

Выбор задач для контрольной работы

Первая буква фамилии	Номер задачи		
	Тема №1	Тема № 2	Тема №3
А	1;10	1;7	6;10
Б	2;9	1;8	6;9
В	3;8	1;9	6;8
Г	1;7	1;10	6;7
Д	2;6	2;7	5;11
Е	3;5	2;11	5;9
Ж	4;11	2;9	5;8
З	5;9	2;10	5;7
И	6;3	3;7	4;10
К	4;1	3;8	4;9
Л	5;2	3;9	4;8
М	6;10	3;1	4;7
Н	1;9	4;7	3;10
О	1;11	4;8	3;9
П	1;6	4;9	3;11
Р	2;10	4;10	3;7
С	2;8	5;7	2;10
Т	2;7	5;8	2;9
У	3;4	5;9	2;8
Ф	3;7	5;10	2;7
Х	3;9	6;7	1;10
Ц	4;2	6;8	1;9
Ч	4;9	6;9	1;8
Ш	4;10	6;10	1;7
Щ	5;1	2;7	4;10
Э	5;8	3;8	2;7
Ю	5;10	5;9	5;8
Я	6;9	6;10	3;9

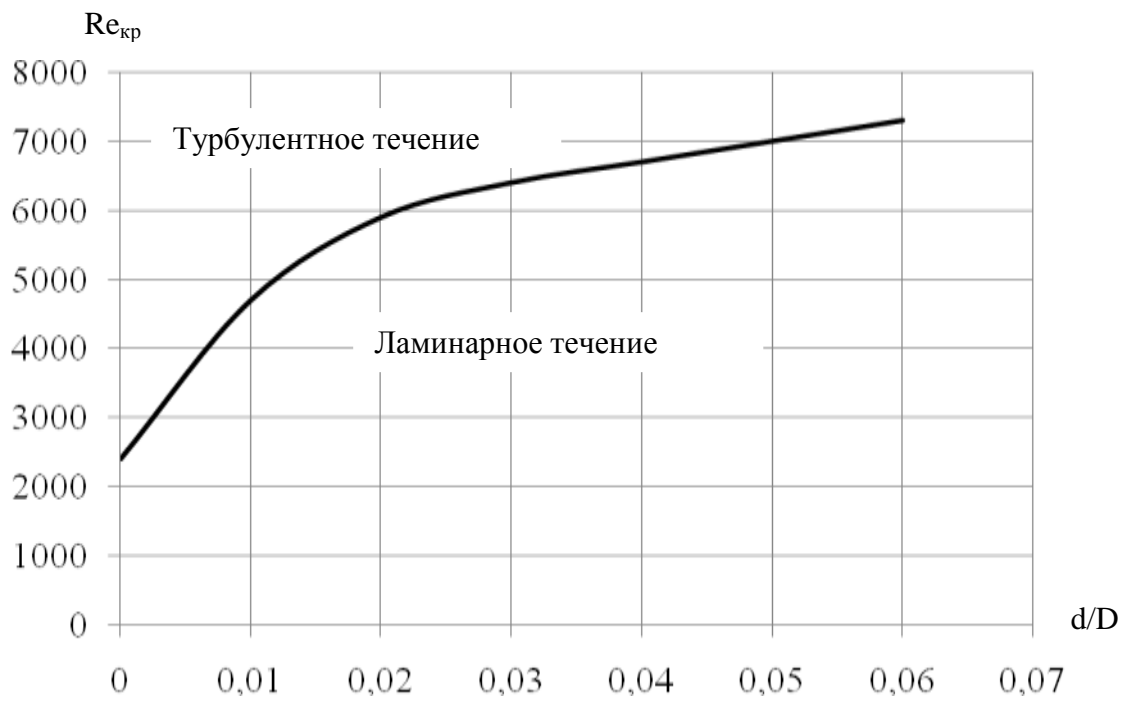


Рисунок П1 – Зависимость $Re_{кр}$ в змеевиках от отношения d/D (см. рис. 2)

Физические свойства воды на линии насыщения

t , $^{\circ}\text{C}$	ρ , кг/м ³	C , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, 1/К	r , кДж/кг	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
10	999,7	4,191	57,4	1,306	0,70	2477,4	741,6	9,52
20	998,2	4,183	59,9	1,004	1,82	2453,8	720,9	7,02
30	995,7	4,174	61,8	0,805	3,21	2430,2	712,2	5,42
40	992,2	4,174	63,5	0,659	3,87	2406,5	696,5	4,31
50	988,1	4,174	64,8	0,556	4,49	2382,5	676,9	3,54
60	983,1	4,179	65,9	0,478	5,11	2358,4	662,2	2,98
70	977,8	4,179	66,8	0,415	5,70	2333,8	643,5	2,55
80	971,8	4,187	67,4	0,365	6,32	2308,9	625,9	2,21
90	965,3	4,195	68,0	0,326	6,95	2283,4	607,2	1,95
100	958,4	4,208	68,3	0,295	7,52	2257,2	588,6	1,75
110	951,0	4,220	68,5	0,272	8,08	2230,5	569,0	1,60
120	943,1	4,233	68,6	0,252	8,64	2202,9	548,4	1,47
130	934,8	4,266	68,6	0,233	9,19	2174,4	528,8	1,36
140	926,1	4,287	68,5	0,217	9,72	2144,9	507,2	1,26
150	917,0	4,313	68,4	0,203	10,3	2114,1	486,6	1,17