

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**М. В. Хомякова**

## **ПРАКТИКУМ ПО ТПАП**

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины для студентов,  
обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки  
15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2022

Рецензент

кандидат технических наук, профессор кафедры инжиниринга  
технологического оборудования ФГБОУ ВО «Калининградский  
государственный технический университет»

А.Э. Суслов

Хомякова, М. В.

Практикум по ТПАП: учеб.-методич. пособие по изучению дисциплины для студ. бакалавриата по напр. подгот. 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств / М. В. Хомякова. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 44 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины Практикум по ТПАП представлены учебно-методические материалы по подготовке к практическим занятиям, отражены рекомендации для выполнения контрольной работы студентами заочной формы обучения.

Табл. 19, рис. 3, список лит. – 10 наименований

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано к опубликованию кафедрой инжиниринга технологического оборудования 23 апреля 2022 г., протокол № 3

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 15 июня 2022 г., протокол № 7

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией института цифровых технологий ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 6 декабря 2022 г., протокол № 10

УДК 664

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2022 г.  
© Хомякова М. В., 2022 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	7
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	28
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	37
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	38

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях роль автоматизации технологических процессов и производств существенно возрастает. Для решения этих задач требуются квалифицированные специалисты в этой области.

Целью освоения дисциплины «Практикум по ТПАП» является формирование знаний, умений и навыков, необходимых в профессиональной деятельности в области автоматизации пищевых производств, осуществляемых с использованием различных процессов и аппаратов, которые входят в состав соответствующих технологических линий.

Задачами дисциплины являются следующие:

- изучение основных понятий, методов и средств переработки сырья и продуктов в рассматриваемой технологической линии;
- приобретение навыков в проведении материальных и энергетических расчетов, связанных с вопросами контроля и управления технологическими процессами и производствами;
- формирование навыков определения оптимальных параметров процесса и способов их достижения.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

знать:

- методы анализа технологических процессов и оборудования для их реализации, как объектов автоматизации и управления, основные схемы автоматизации типовых технологических объектов отрасли, структуры и функции автоматизированных систем управления технологические процессы и производства в пищевой промышленности;
- основные сведения о моделировании физических явлений, о теории тепло- и массообмена; методику расчета важнейших параметров технологических процессов и аппаратов;
- характеристики производства и оборудования как объектов автоматического регулирования;

уметь:

- выполнять анализ технологических процессов и оборудования как объектов автоматизации и управления;
- пользоваться методическими и нормативными материалами при расчёте и анализе технологических процессов и аппаратов;
- выбирать пути интенсификации процессов и совершенствования технологического оборудования;

владеть:

- навыками экспериментального исследования по определению параметров технологических процессов.

При реализации дисциплины «Практикум по ТПАП» организуется практическая подготовка путем проведения практических занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Знания, умения и навыки, полученные при освоении данной дисциплины, используются в дальнейшей профессиональной деятельности.

Для успешного освоения дисциплины «Практикум по ТПАП», студент должен активно работать на лекционных занятиях по дисциплине «Технологические процессы автоматизированных производств (ТПАП)», организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность.

Для оценивания поэтапного формирования результатов освоения дисциплины (текущий контроль) предусмотрены практические задания. Решение практических задач, обучающимися проводится на практических занятиях после изучения соответствующих тем по дисциплине «Технологические процессы автоматизированных производств (ТПАП)».

Промежуточная аттестация проводится в виде зачета в пятом семестре, к которому допускаются студенты, освоившие темы курса, выполнившие практические работы и получившие положительную оценку при выполнении контрольной работы (для заочной формы обучения).

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства поэтапного формирования результатов освоения;
- оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине.

К оценочным средствам поэтапного формирования результатов освоения дисциплины относятся:

- задания и контрольные вопросы к практическим работам;
- задания к контрольной работе;

К оценочным средствам для промежуточной аттестации по дисциплине, проводимой в форме зачета, соответственно относятся:

- вопросы к зачету.

Универсальная система оценивания результатов обучения включает в себя системы оценок: 1) «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»; 2) «зачтено», «не зачтено»; 3) 100-балльную (процентную) систему и правило перевода оценок в пятибалльную систему (таблица 1).

Таблица 1 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок  Критерий	2	3	4	5
	0–40%	41–60%	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
<b>1. Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов</b>	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно- корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект
<b>2. Работа с информацией</b>	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
<b>3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта</b>	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
<b>4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач</b>	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

При необходимости для обучающихся инвалидов или обучающихся с ОВЗ предоставляется дополнительное время для подготовки ответа с учетом его индивидуальных психофизических особенностей.

Для успешного освоения дисциплины «Практикум по ТПАП» в учебно-методическом пособии по изучению дисциплины приводится перечень вопросов для подготовки к практическим занятиям и организации самостоятельной работы студентов. Материал пособия содержит рекомендации по написанию контрольной работы для студентов заочной формы обучения.

## 1 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Практические занятия проводятся с целью формирования у студентов умений и навыков в области технологических процессов автоматизированных производств.

Практические занятия по дисциплине «Практикум по ТПАП» являются важной составной частью учебного процесса изучаемого курса, поскольку помогают лучшему усвоению курса дисциплины «Технологические процессы автоматизированных производств (ТПАП), закреплению знаний.

В ходе самостоятельной подготовки студентов к практическому занятию необходимо не только воспользоваться литературой, рекомендованной преподавателем, но и проявить самостоятельность в отыскании новых источников, связанных с темой практического занятия.

Тематический план практических (ПЗ) занятий представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Объем (трудоёмкость освоения) и структура ПЗ

Номер темы	Содержание практического (семинарского) занятия	Кол-во часов ПЗ	
		очная форма	заочная форма
1	2	3	4
1	Расчет скорости осаждения частиц в гравитационном поле, определение производительности отстойников	4	-
2	Определение необходимой поверхности фильтрования водной суспензии	4	-
3	Определение мощности электродвигателя и частоты вращения мешалки	4	-
4	Расчет теплообменника типа «труба в трубе»	2	-
5	Расчет пластинчатого теплообменника	4	-
6	Определение конечных концентраций растворов в корпусах четырёхкорпусной выпарной установки	2	-

1	2	3	4
7	Определение расхода греющего пара на однокорпусную выпарную установку непрерывного действия	4	2
8	Определение производительности вытяжного вентилятора в сушилке	4	2
<b>Итого</b>		28	4

### Практическое занятие № 1: Расчет скорости осаждения частиц в гравитационном поле, определение производительности отстойников

*Цель:* получение практических умений и навыков в области расчетов гидромеханических процессов.

*Задание по практической работе:*

Рассчитать отстойник непрерывного действия для осаждения твердых частиц водной суспензии. Диаметр наименьших частиц, подлежащих осаждению  $d_{\text{ч}}$ , мкм. Производительность отстойника по суспензии  $G_{\text{с}}$ , кг/ч. Концентрация суспензии  $x_{\text{с}}$ , Плотность частиц  $\rho_{\text{ч}}$ , кг/м<sup>3</sup>. Температура суспензии  $t$ , °С. Влажность осадка  $U$ .

Определить производительность отстойника по осветленной жидкости  $G_{\text{осв}}$ , производительность отстойника по твердой фазе  $G_{\text{т.ф.}}$ , площадь осаждения  $F_{\text{ос}}$ , диаметр отстойника  $D$ , общую высоту отстойника  $H$ , объемную производительность  $V_{\text{осв}}$ . Варианты заданий представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Варианты заданий

Номер варианта	$d_{\text{ч}}$ , мкм	$G_{\text{с}}$ , кг/ч	$x_{\text{с}}$	$\rho_{\text{ч}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$t$ , °С	$U$
1	80	30000	0,05	1300	30	0,7
2	75	30000	0,055	1275	40	0,6
3	70	25000	0,06	1250	25	0,65
4	65	25000	0,065	1225	45	0,7
5	60	20000	0,07	1200	20	0,6
6	55	20000	0,075	1175	30	0,65
7	50	15000	0,08	1150	40	0,7
8	45	15000	0,085	1175	35	0,6
9	40	10000	0,09	1150	40	0,65
10	35	10000	0,095	1175	45	0,6

Расчетные формулы:

1. Скорость осаждения шарообразных частиц для ламинарного режима ( $Re \leq 2$ ;  $\xi = 24/Re$ )

$$\omega_{\text{ос}} = g d_{\text{ч}}^2 \frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}{18 \mu_{\text{ж}}}$$



где  $d_{\text{ч}}$  – эквивалентный диаметр частицы, м;  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{\text{ж}}$  – коэффициент динамической вязкости среды, Па·с.

Если плотности смешиваемых компонентов отличаются более чем на 30 %, то плотность смеси по формуле:

$$\rho_{\text{с}} = \frac{1}{\frac{x_{\text{с}}}{\rho_{\text{ч}}} + \frac{1 - x_{\text{с}}}{\rho_{\text{ж}}}}$$

Объемная доля твердой суспензии

$$\varphi = \frac{x_{\text{с}} \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ч}}}$$

2. Проверить режим осаждения, т.е. провести перерасчет числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\omega_{\text{ос}} d_{\text{ч}} \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}}$$

Если число Рейнольдса меньше двух ( $\text{Re} < 2$ ), то  $\xi = 24/\text{Re}$ .

Если число Рейнольдса больше двух ( $\text{Re} > 2$ ), то необходимо провести перерасчет скорости осаждения

$$\omega_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4gd_{\text{ч}}(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}{3\xi\rho_{\text{с}}}}$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления среды.

Для переходного режима ( $2 < \text{Re} \leq 500$ )

$$\xi = \frac{18,5}{\text{Re}^{0,6}}$$

Для турбулентного режима ( $\text{Re} > 500$ )

$$\xi = 0,44.$$

3. Скорость стесненного осаждения

$$\omega_{\text{ос}}'' = \lambda \omega_{\text{ос}}$$

где  $\lambda$  – поправочный коэффициент, учитывающий объемную концентрацию  $\varphi$  (в долях),

$$\lambda = \frac{(1 - \varphi)^2}{(1 + 2,5\varphi + 7,35\varphi^2)}$$

4. Массовая производительность по осветленной жидкости

$$G_{\text{осв}} = G_{\text{с}} - G_{\text{ос}}$$

где  $G_{\text{с}}$  – производительность по суспензии;  $G_{\text{ос}}$  – производительность отстойника по сгущенной суспензии.

Производительность по твердой фазе, поступающей с суспензией

$$G_{\text{т.ф}} = G_{\text{с}} x_{\text{с}}$$

Количество получаемого из суспензии влажного осадка

$$G_{\text{ос}} = \frac{G_{\text{т.ф}}}{1 - U}$$

где  $U$  – влажность осадка.

5. Объемная производительность отстойника по осветленной жидкости

$$V_{\text{осв}} = F\omega_{\text{ос}},$$

где  $F$  – площадь осаждения отстойника,  $\text{м}^2$ ,

$$F = 1,3G_c \frac{\left(1 - \frac{x_c}{1-U}\right)}{\rho_c \omega_{\text{ос}}}.$$

6. Чтобы устранить перемешивание жидкости у свободной поверхности, высоту зоны свободного осаждения в отстойнике принимают равной  $h_1 = 0,45 \dots 0,75$  м, при этом наибольшее значение выбирают для более концентрированных суспензий.

Высота зоны осаждения, м

$$h_2 = \frac{m_{\text{т.ф}}}{\rho_{\text{ч}}},$$

где  $m_{\text{т.ф}}$  – масса твердой фазы, осаждающейся в единицу времени ( $\tau = 1$  ч) на единице свободной поверхности отстойника, кг,

$$m_{\text{т.ф}} = \frac{G_c x_c \tau}{F}.$$

Высоту зоны расположения лопастей мешалки определяют исходя из наклона лопастей, равного приблизительно 0,146 м на 1 м длины.

Высота этой зоны

$$h_3 = 0,146 \frac{D}{2} = 0,073D,$$

где  $D$  – диаметр отстойника, м,

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}.$$

Общая высота отстойника, м

$$H = h_1 + h_2 + h_3.$$

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Дайте определение процессу отстаивания.
2. Для каких целей применяется отстаивание?
3. Укажите взаимосвязь между производительностью и размерами отстойника.
4. Сформулируйте качественные и количественные кинетические закономерности процесса осаждения твердых частиц в жидкой среде.
5. Какие силы действуют на осаждающую частицу при отстаивании?
6. По какому закону определяется скорость осаждения частицы?
7. Какие параметры влияют на скорость осаждения частицы?
8. Какие существуют пути интенсификации отстаивания?

**Практическое занятие № 2: Определение необходимой поверхности**

## фильтрации водной суспензии

*Цель:* получение практических умений и навыков в области расчетов гидромеханических процессов.

*Задание по практической работе:*

Определить необходимую поверхность фильтрации водной суспензии, содержащей  $x_c$  твердой фазы. Влажность осадка  $U$ . Производительность фильтра по фильтрату  $V_\phi$ . Перепад давления на фильтре  $\Delta P$ . Удельное сопротивление несжимаемого осадка  $r_o$ , сопротивление фильтровальной перегородки  $R_\Pi$ , плотность твердой фазы  $\rho_{т.ф}$ . Осадок промывают используя 1,5 м<sup>3</sup> воды на 1 м<sup>3</sup> осадка. Динамическая вязкость промывных вод  $\mu_{пр}$ , а динамическая вязкость фильтрата  $\mu_\phi$ . Плотность жидкости  $\rho_{ж}$  1000 кг/м<sup>3</sup>. В таблице 4 представлены варианты заданий.

Таблица 4 – Варианты заданий

Номер варианта	$x_c$	$U$	$V_\phi$ , м <sup>3</sup> /ч	$\Delta P \cdot 10^{-5}$ , Па	$r_o \cdot 10^{-12}$ , м <sup>2</sup>	$R_\Pi \cdot 10^{-10}$ , м <sup>-1</sup>	$\rho_{т.ф}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_{пр}$ , Па·с	$\mu_\phi$ , Па·с
1	0,05	0,45	5	0,7	19	2	2000	0,0004	0,0006
2	0,05	0,40	7	1,0	18	2	1700	0,0005	0,0007
3	0,07	0,50	9	1,5	16	1	1600	0,0003	0,0006
4	0,09	0,45	10	2,0	14	9	1300	0,0005	0,0008
5	0,11	0,35	11	2,5	12	7	1400	0,0003	0,0004
6	0,10	0,40	8	0,8	05	6	2100	0,0004	0,0007
7	0,06	0,45	6	1,2	13	3	1800	0,0003	0,0005
8	0,08	0,50	7	1,4	17	5	1500	0,0004	0,0006
9	0,07	0,35	9	0,9	11	8	1900	0,0006	0,0008
10	0,12	0,40	5	1,1	19	4	1400	0,0003	0,0004

### Расчётные формулы

1. Количество получаемого фильтрата, кг/с

$$G_\phi = V_\phi \cdot \rho_\phi,$$

где  $V_\phi$  – объёмная производительность по фильтрату, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_\phi$  – плотность фильтрата, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_\phi = \frac{1}{\frac{x_{т.ф}}{\rho_{т.ч}} + \frac{1 - x_{т.ф}}{\rho_{ж}}},$$

где  $\rho_{т.ф}$  – плотность твердых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости (воды) при 20 °С, кг/м<sup>3</sup>;  $x_{т.ф}$  – содержание твердой фазы.

2. Массовый расход суспензии  $G_c$ , кг/с

$$G_c = \frac{G_{\phi}}{1 - \frac{x_{т.ф.}}{1 - U}}$$

где  $U$  – влажность осадка.

3. Количество твёрдой фазы, поступающей с суспензией  $G_{т.ф.}$ , кг/с,

$$G_{т.ф.} = G_c x_{т.ф.}$$

4. Количество получаемого из суспензии влажного осадка  $G_{ос.}$ , кг/с,

$$G_{ос.} = \frac{G_{т.ф.}}{1 - U}$$

5. Плотность влажного осадка  $\rho_{ос.}$ , кг/м<sup>3</sup>,

$$\rho_{ос.} = \rho_{т.ф.}(1 - U) + \rho_{ж.}U$$

6. Количество влажного осадка, приходящего на 1 м<sup>3</sup> получаемого фильтрата, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,

$$x_{ос.} = \frac{G_{ос.}}{\rho_{ос.} \cdot v_{\phi}}$$

7. Удельная производительность фильтра за 1 цикл, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>,

$$v = \frac{h_{ос.}}{x_{ос.}}$$

где  $h_{ос.}$  – высота слоя осадка, м. Для барабанного вакуум-фильтра высоту слоя осадка принимают  $h_{ос.} = 10 \dots 12$  мм.

8. Продолжительность фильтрования  $\tau(c)$  при  $\Delta P = \text{const}$

$$\tau_{\phi} = \frac{\mu_{\phi} r_0 x_{ос.} v^2}{2\Delta P} + \frac{\mu_{\phi} R_{п.} v}{\Delta P},$$

где  $\mu_{\phi}$  – динамическая вязкость фильтрата, Па · с;  $r_0$  – удельное сопротивление осадка, м<sup>-2</sup>;  $R_{п.}$  – сопротивление фильтрованной перегородки, м<sup>-1</sup>;  $\Delta P$  – перепад давления в секции фильтрации, Па.

9. Удельное сопротивление осадка при промывке, м<sup>-2</sup>,

$$r_{пром} = \frac{\mu_{пр.} \cdot r_0}{\mu_{\phi}}$$

где  $\mu_{пр.}$  – динамическая вязкость промывных вод, Па · с.

10. Продолжительность промывки  $\tau_{пр.}$ , с,

$$\tau_{пр.} = \frac{W x_{ос.} v \mu_{пр.} (r_{пр.} x_{ос.} v + R_{п.})}{\Delta P_{пр.}}$$

где  $W$  – расход воды на 1 м<sup>3</sup> осадка, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

11. Примем общее число секций в барабане  $m = 18$ , из которых в зоне фильтрования находится 6 секций ( $m_{\phi} = 6$ ) и в зоне промывки 3 секции ( $m_{пр.} = 3$ ). Продолжительность полного цикла фильтрования для барабанного вакуум-фильтра непрерывного действия  $T$ , с

$$T = (\tau_{\phi} + \tau_{пр.}) \frac{m}{m_{\phi} + m_{пр.}}$$

12. Необходимая площадь фильтрования  $F$ , м<sup>2</sup>,

$$F = \frac{V_{\phi} \cdot T}{v}$$

13. Частота вращения барабана  $n$ , об/мин,

$$n = \frac{60}{T}$$

14. Степень погружения барабана в суспензию  $\varphi$

$$\varphi = \frac{\tau_{\phi}}{T}$$

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Какова сущность процесса фильтрования суспензий?
2. Что является движущей силой процесса фильтрования?
3. Как определить плотность фильтрата?

### **Практическое занятие № 3: Определение мощности электродвигателя и частоты вращения мешалки**

*Цель:* получение практических умений и навыков в области расчетов гидромеханических процессов.

*Задание по практической работе:*

Определить мощность электродвигателя и частоту вращения мешалки (диаметр  $d_m$  и ширина  $b_m$ ), установленной в аппарате диаметром  $D$  для перемешивания жидкости слоем  $H$  с твердыми частицами, если плотность жидкости  $\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$ , а ее вязкость  $\mu_{ж} = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Массовое содержание твердой фазы в жидкости  $x_{т.ф}$ , эквивалентный диаметр твердых частиц  $d_{ч} = 1 \text{ мм}$  и их плотность  $\rho_{т.ч} = 1500 \text{ кг/м}^3$ . Аппарат имеет шероховатые внутренние стенки и гильзу для термометра. Шаг винта лопасти пропеллерной мешалки  $S$ . Количество перемещений жидкости через диффузор  $m$ . Угол подъема винтовой линии  $\Theta$ . Варианты заданий приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Варианты заданий

Номер варианта	$d_m$ , м	$b_m$ , м	$D$ , м	$H$ , м	$x_{т.ф}$	$S$ , м	$m$	$\Theta$ , °	Тип мешалки
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,0	0,1	1,5	1,2	0,18	-	-	-	Лопастная
2	1,0	0,13	1,2	1,0	0,2	-	-	-	Лопастная
3	0,5	-	1,5	0,8	0,22	0,3	10	25	Пропеллерная
4	0,33	-	1,0	1,1	0,15	0,33	12	30	Пропеллерная в диффузоре
5	1,0	0,15	2,0	0,9	0,1	-	-	-	Лопастная в аппарате со змеевиком
6	1,0	0,1	1,1	1,0	0,2	-	-	-	Якорная
7	0,35	-	1,3	1,3	0,18	0,33	8	35	Пропеллерная в диффузоре
8	0,5	0,15	1,0	0,9	0,15	-	-	-	Якорная
9	0,75	0,1	1,5	0,8	0,15	-	-	-	Лопастная в аппарате со змеевиком
10	0,6	-	1,7	1,0	0,25	0,3	5	40	Пропеллерная

## Расчётные формулы

1. Плотность перемешиваемых компонентов суспензии  $\rho_c$ , кг/м<sup>3</sup>,

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{x_{т.ф}}{\rho_{т.ч}} + \frac{1 - x_{т.ф}}{\rho_{ж}}},$$

где  $\rho_{т.ч}$  – плотность твердых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $x_{т.ф}$  – массовое содержание твердой фазы в жидкости.

2. Объемная доля твердой фазы в суспензии

$$\varphi = \frac{\rho_c}{\rho_{т.ч}} x_{т.ф}.$$

3. Динамическая вязкость смеси:

а) если  $\varphi \leq 0,1$ , то  $\mu_c = \mu_{ж} (1 + 2,5 \varphi)$ ;

б) если  $\varphi > 0,1$ , то  $\mu_c = \frac{0,59\mu_{ж}}{(0,77 - \varphi)^2}$ .

4. Частота вращения мешалки, об/с,

а) для лопастной и якорной мешалок

$$n = C \sqrt{\frac{\rho_{т.ч} - \rho_{ж} \cdot d_{ч}}{\rho_c}} \left( \frac{D^x}{d_M^y} \right),$$

где  $d_{ч}$  – эквивалентный диаметр твердой частицы, м;  $D$  – диаметр аппарата, м;  $d_M$  – диаметр мешалки, м;  $C, x, y$  – постоянные (приложение А, таблица П.А.1);

б) для пропеллерной и турбинной мешалок

$$n = \frac{\omega_0}{S c \cos^2 \Theta},$$

где  $\omega_0$  – осевая скорость перемешивания суспензии, м/с;  $S$  – шаг винта пропеллерной или турбинной мешалки, м;  $\Theta$  – угол подъема винтовой линии, °.

Осевая скорость перемешивания суспензии

$$\omega_0 = \frac{mV}{60F_{о.в}},$$

где  $m$  – количество перемещений жидкости через диффузор;  $V$  – объём аппарата, м<sup>3</sup>;  $F_{о.в}$  – поверхность, отмечанная винтом, м<sup>2</sup>.

Объем аппарата

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4}.$$

Поверхность, отмечаемая винтом,

$$F_{о.в} = 0,8 \frac{\pi d_M^2}{4}.$$

5. Критерий Рейнольдса для мешалки,

$$Re_M = \frac{n \cdot \rho_c \cdot d_M^2}{\mu_c}.$$

По полученному значению  $Re_m$  из графика (приложение Б, рисунок П.Б.1)  $K_N = f(Re_m)$ , находим значение коэффициента мощности  $K_N$  для модельной мешалки.

Величина  $K_N$ , полученная из рисунка П.Б.1, справедлива только для мешалок геометрически подобных модельным мешалкам. При отклонении от этого условия расход энергии на перемешивание изменяется, поэтому при отсутствии геометрического подобия мешалок значение  $K_N$  умножают на поправочные коэффициенты:

$$f_D = \left(\frac{D}{\alpha d_m}\right)^a$$

$$f_h = \left(\frac{H}{D}\right)^h$$

$$f_b = \left(\frac{b}{\beta d_m}\right)^k$$

$$f_s = \left(\frac{S}{d_m}\right)^p$$

где  $\alpha$  – отношение  $\frac{D}{d}$  для модельной мешалки;  $\beta$  – отношение  $\frac{b}{d}$  для модельной мешалки. Значения коэффициентов **a**, **h**, **k** и **p** приведены в (приложение А, таблица П.А.3). Тогда

$$K_{N1} = K_N f_D f_h f_b f_s.$$

7. Мощность, потребляемая мешалкой в рабочий период, Вт:

а) для лопастной и якорной мешалок

$$N_p = K_{N1} d_m^5 n^3 \rho_c,$$

б) для пропеллерной и турбинной мешалок

$$N_p = 0,2 \sin^3 \theta \cos \theta K_{N1} d_i^5 n^3 \rho_c.$$

Если высота слоя жидкости в аппарате отлична от его диаметра, то поправочный множитель

$$f_H = \sqrt{\frac{H}{D}}.$$

Шероховатость внутренних стенок аппарата, наличие в нём змеевика и гильзы для термометра учитываются следующими поправочными коэффициентами:

$f_{ш} = 1,1 \dots 1,2$  – для шероховатых стенок;

$f_z = 2 \dots 3$  – при наличии змеевика вдоль вертикальных стенок или у днища аппарата;

$f_r = 1,1$  – при наличии гильзы для термометра.

8. При коэффициенте  $f_n = 1,3$ , учитывающем пусковой момент и КПД передачи  $\eta = 0,8 \dots 0,85$ , необходимая мощность электродвигателя мешалки, кВт,

$$N_{\text{дв}} = \frac{1,3 \cdot N_p \cdot f_H \cdot f_{\text{ш}} \cdot f_3 \cdot f_{\Gamma}}{1000\eta}$$

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Назначение процесса перемешивания.
2. Способы перемешивания в жидких средах.
3. Типы наиболее широко применяемых мешалок, их основные достоинства и недостатки.
4. Физический смысл критерия мощности.
5. Что понимают под интенсивностью и эффективностью процесса перемешивания?
6. Почему при характеристике работы мешалок скорость движения жидкости в аппаратах заменяют произведением частоты вращения на диаметр мешалки?
7. Вид и значение общего критериального уравнения.

#### **Практическое занятие № 4: Расчет теплообменника типа «труба в трубе»**

*Цель:* получение практических умений и навыков в области расчетов теплообменных аппаратов.

*Задание по практической работе:*

Определить поверхность нагрева и число секций теплообменника типа «труба в трубе» для нагревания воды в количестве  $W = 1$  кг/с от  $t_{\text{в1}}$  до  $t_{\text{в2}}$  горячим конденсатом, движущимся в межтрубном пространстве.

Температура конденсата начальная  $t_{\text{к1}}$ ; конечная  $t_{\text{к2}}$ . Внутренняя труба диаметром  $d$  38 x 55 мм – из нержавеющей стали, а наружная диаметром  $D$  76 x 2 мм – из Ст. 3. Длина одного элемента 3 м. Движение сред в теплообменнике противоточное. Варианты заданий приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Варианты заданий

Номер варианта	$t_{\text{в1}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{в2}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{к1}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{к2}}, ^\circ\text{C}$
1	20	65	90	65
2	15	60	70	50
3	30	75	95	65
4	30	70	95	60
5	20	60	95	70
6	10	65	80	65
7	25	70	90	55
8	40	75	85	65
9	10	60	80	60
10	35	65	95	60



## Расчётные формулы

1. Из таблицы П.А.5 (приложение А) находим теплоемкость  $c_{\text{в}}$ , плотность  $\rho_{\text{в}}$ , теплопроводность  $\lambda_{\text{в}}$ , вязкость  $\mu_{\text{в}}$  и критерий Прандля  $Pr_{\text{в}}$  для средней температуры воды и конденсата.

2. Тепловая нагрузка  $Q$ , Вт, при нагревании воды количеством  $W$ , кг/с, от  $t_{\text{в1}}$  до  $t_{\text{в2}}$

$$Q = Wc_{\text{в}}(t_{\text{в2}} - t_{\text{в1}})x_1,$$

где  $x_1$  – коэффициент, учитывающий потери тепла при нагревании,  $x_1 = 1,03$  (3%).

3. Расход конденсата на нагревание воды можно найти из уравнения теплового баланса

$$G_{\text{к}}c_{\text{к}}(t_{\text{к1}} - t_{\text{к2}})x_2 = Wc_{\text{в}}(t_{\text{в2}} - t_{\text{в1}}),$$

где  $x_2$  – коэффициент, учитывающий потери тепла на охлаждение,  $x_2 = 0,97$  (3 %).

4. Скорость движения сред

Скорость воды

$$\omega_{\text{в}} = \frac{4 \cdot W}{\rho_{\text{в}} \pi d_{\text{внутр}}^2}.$$

Скорость конденсата в межтрубном пространстве

$$\omega_{\text{к}} = \frac{G_{\text{к}}}{\rho_{\text{к}} f},$$

где площадь сечения межтрубного пространства

$$f = \frac{\pi(D_{\text{внутр}}^2 - d_{\text{нар}}^2)}{4}.$$

5. Режим движения сред определяется по числу Рейнольдса

$$Re_{\text{в}} = \frac{\omega_{\text{в}} d_{\text{внутр}} \rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}}.$$

Аналогично находится критерий Рейнольдса для конденсата.

6. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  рассчитывается по следующей схеме

Находим критерий Нуссельта для воды:

при  $Re > 10\,000$

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

при  $10\,000 > Re > 2320$

$$Nu = 0,008 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,43}$$

при  $Re < 2320$

$$Nu = 0,017 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1},$$

тогда коэффициент теплоотдачи для воды

$$\alpha_2 = \frac{Nu \lambda_{\text{в}}}{d_{\text{внутр}}}.$$

Аналогично рассчитывается критерий Нуссельта для конденсата, где

$$Re = \frac{\omega_{\text{к}} d_{\text{э}} \rho_{\text{к}}}{\mu_{\text{к}}}.$$

При эквивалентном диаметре межтрубного пространства

$$d_3 = D_{\text{внутр}} - d_{\text{нар.}}$$

Тогда коэффициент теплоотдачи для конденсата

$$\alpha_1 = \frac{\text{Nu}\lambda_k}{d_3}$$

7. Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

где  $\delta$  – толщина стенки внутренней трубы;  $\lambda$  – теплопроводность внутренней трубы,  $\lambda = 16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

8. Необходимая поверхность теплообмена для установившегося процесса  $F, \text{ м}^2$ ,

$$F = \frac{Q}{K\Delta t'}$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $\Delta t$  – средняя (полезная) разность температур между средами,  $^{\circ}\text{C}$ .

Средняя разность температур – это разность температур между температурами конденсата и воды на входе и выходе из аппарата (рисунок 1).

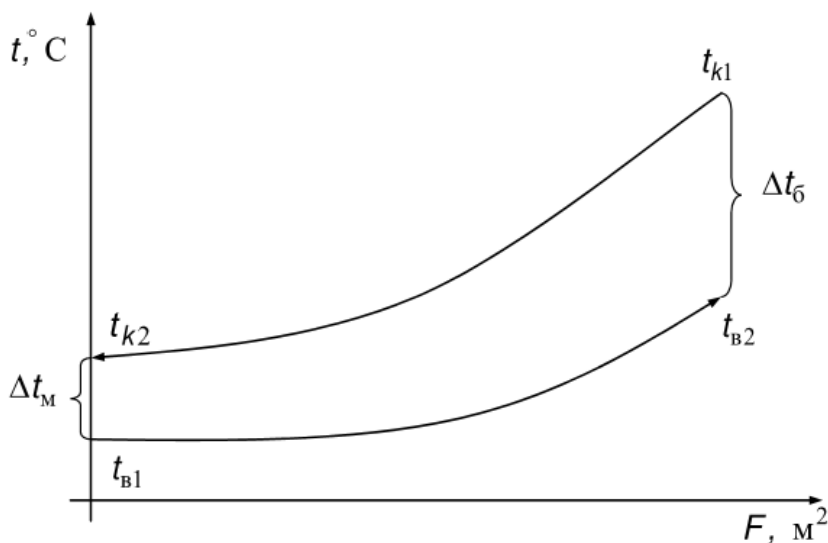


Рисунок 1 – График изменения температуры носителей по площади аппарата:  $\Delta t_6$  большая разность температур;  $\Delta t_M$  – меньшая разность температур

Если  $\Delta t_6/\Delta t_M > 2$ , то среднюю разность температур находят как среднелогарифмическую разность

$$\Delta t = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{2,3 \cdot \lg \left( \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} \right)}$$

Если  $\Delta t_6/\Delta t_M \leq 2$ , то  $\Delta t$  находят как среднеарифметическую разность

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{г}} + \Delta t_{\text{м}}}{2}$$

9. Число секций в теплообменнике

$$n = \frac{F}{\pi d_{\text{ср}} l'}$$

где  $d_{\text{ср}} = \frac{d_{\text{н}} + d_{\text{в}}}{2}$ .

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Чем отличается коэффициент теплоотдачи от коэффициента теплопередачи по физическому смыслу?
2. Каково соотношение между коэффициентами теплоотдачи и теплопередачи, их размерность?
3. Объясните физический смысл критериев теплообмена.

### **Практическое занятие № 5: Расчет пластинчатого теплообменника**

*Цель:* получение практических умений и навыков в области расчетов теплообменных аппаратов.

*Задание по практической работе:*

Рассчитать секцию регенерации пластинчатого теплообменника для молока. Производительность установки  $G$ , кг/ч, начальная температура молока  $t_1$ , °С, температура пастеризации  $t_3$ , °С, коэффициент регенерации  $\varepsilon$ , конечная температура молока  $t_{\text{к}}$ , °С.

Основные данные пластины П-2 теплообменника: поверхность теплообмена  $F = 0,2 \text{ м}^2$ , рабочая ширина  $b = 0,27 \text{ м}$ , приведенная длина потока  $L_{\text{п}} = F/b = 0,8 \text{ м}$ , расстояние между пластинами  $h = 0,0028 \text{ м}$ , площадь поперечного сечения одного канала  $f_1 = 0,0008 \text{ м}^2$ , эквивалентный диаметр потока  $d_3 = 2 \cdot h = 0,056 \text{ м}$ , толщина пластины  $\delta = 0,0012 \text{ м}$ , теплопроводность пластины  $\lambda = 16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Варианты заданий приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Варианты заданий

Номер варианта	$t_1$ , °С	$t_3$ , °С	$t_{\text{к}}$ , °С	$\varepsilon$	$G$ , кг/ч
1	5	76	4	0,82	5000
2	10	80	6	0,81	5500
3	7	73	7	0,80	6000
4	5	71	3	0,79	4000
5	8	74	5	0,78	4500
6	7	75	4	0,76	3000
7	6	72	5	0,75	3500
8	8	78	6	0,84	65000
9	9	79	3	0,83	25000
10	6	77	7	0,77	2000

## Расчётные формулы

1. Средняя разность температур в секции рекуперации

$$\Delta t_p = \frac{\Delta t_{\bar{6}} - \Delta t_M}{2,3 \cdot \lg \left( \frac{\Delta t_{\bar{6}}}{\Delta t_M} \right)}$$

при условии  $\Delta t_{\bar{6}}/\Delta t_M > 2$ .

Если это условие не выполняется, то  $\Delta t_p$  рассчитывают как среднеарифметическую разность температур

$$\Delta t_p = \frac{\Delta t_{\bar{6}} + \Delta t_M}{2}.$$

Температура сырого молока на выходе из секции регенерации

$$t_2 = t_1 + \varepsilon(t_3 - t_1).$$

Температура пастеризованного молока на выходе из секции регенерации

$$t_4 = t_1 + (t_3 - t_2).$$

2. Скорость потока в секции регенерации рассчитывается следующим способом.

Объемная производительность установки по молоку, м<sup>3</sup>/с,

$$V = \frac{G}{\rho},$$

где  $G$  – производительность установки, кг/с;  $\rho$  – плотность молока при  $t = \frac{t_3 + t_k}{2}$  кг/м<sup>3</sup> (приложение А, таблица П.А.6).

При скорости молока  $\omega_M = 0,46$  м/с число каналов в пакете

$$m = \frac{V}{f_1 \omega_M}.$$

Принимаем  $m_d$  как ближайшее целое число к  $m$ . Тогда действительная скорость молока

$$\omega_d = 0,46 \frac{m}{m_d}.$$

3. Определим теплофизические характеристики молока ( $\mu, \mu', \lambda_M, \lambda_M', \rho, \rho', c, c', Pr, Pr'$ ) для средней температуры сырого молока  $t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}$  и средней температуры пастеризованного молока в секции регенерации  $t_{cp}' = \frac{t_3 + t_4}{2}$  (приложение А, таблица П.А.6).

4. Число Рейнольдса для сырого молока

$$Re = \frac{\omega_d d_3 \rho}{\mu}.$$

Аналогично рассчитывается  $Re'$  для пастеризованного молока.

5. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и  $\alpha'$  для пластин П-2

$$\alpha = 0,1 \frac{\lambda_m Re^{0,7} Pr^{0,43}}{d_3}.$$

Коэффициент теплопередачи  $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$$K_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha'}}.$$

6. Рабочая поверхность теплопередачи и число пластин в секции регенерации

$$F_p = \frac{G c_m (t_2 - t_1)}{K_p \Delta t_p},$$

где  $F_p$  – рабочая поверхность, м<sup>2</sup>;  $c_m$  – теплоемкость молока при температуре  $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$ .

Число пластин в секции

$$n_p = \frac{F_p}{F}.$$

Величину  $n_p$  принимают ближайшим целым числом.

При числе каналов в пакете  $m_d$  число пакетов

$$x_p = \frac{n_p}{2m_d}.$$

7. Гидравлическое сопротивление в секции регенерации, кПа,

$$\Delta P = \xi \left( \frac{L_n}{d_3} \right) \left( \frac{\rho \omega^2}{2} \right) x_p,$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления, для пластин П-2

$$\xi = 11,2 \cdot Re^{-0,25}.$$

Аналогично рассчитывается гидравлическое сопротивление для охлаждаемого молока  $\Delta P'$ .

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Как рассчитывается скорость потока в секции регенерации теплообменника?
2. Какие теплофизические характеристики продукта определяются при расчете теплообменника?
3. Как определяется число пластин в секции теплообменника?

**Практическое занятие № 6: Определение конечных концентраций растворов в корпусах четырёхкорпусной выпарной установки**

*Цель:* получение практических умений и навыков в области расчетов теплообменных процессов.

*Задание по практической работе:*

Определить конечные концентрации раствора во всех корпусах четырехкорпусной выпарной установки, если на выпаривание поступает  $G$ , кг/с, раствора, концентрацией  $x_n$ , % сухих веществ, а количество воды, удаляемой из корпусов, составляет  $W_1, W_2, W_3, W_4$ , кг/с. В таблице 8 даны варианты заданий.

Таблица 8 – Варианты заданий

Номер варианта	$G$ , кг/с	$X_n$ , %	$W_1$ , кг/с	$W_2$ , кг/с	$W_3$ , кг/с	$W_4$ , кг/с
1	24	11	4	3	2	3,56
2	26	12	5	4	3	3,58
3	28	13	6	5	4	3,60
4	30	14	7	6	5	3,62
5	32	15	8	7	6	3,64
6	34	16	8	6	5	3,66
7	36	17	9	5	4	3,68
8	38	18	6	4	3,9	3,7
9	40	19	6	5	4	3,72
10	42	20	5	4	3,8	3,74

Расчетные формулы

Для многокорпусной выпарной установки общее количество выпаренной воды  $W$ , кг/с,

$$W = G \left( 1 - \frac{x_n}{x_k} \right),$$

где  $G$  – количество раствора, поступающего в первый корпус, кг/с;  $x_k$  – концентрация раствора, уходящего из последнего корпуса, %;  $x_n$  – начальная концентрация сухих веществ, %.

Общее количество воды, выпаренной на установке, равно сумме воды, выпаренной в каждом из корпусов

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n = \sum_{i=1}^n W_i.$$

Конечная концентрация раствора  $x_k$  в любом  $n$ -корпусе установки

$$x_k = \frac{G x_n}{G - \sum_{i=1}^n W_i}.$$

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Раскройте сущность процесса выпаривания.
2. На какие группы делятся выпарные установки в зависимости от количества корпусов? Назовите достоинства и недостатки каждой из этих групп.
3. Что называют многократным выпариванием?

**Практическое занятие № 7: Определение расхода греющего пара на однокорпусную выпарную установку непрерывного действия**

*Цель:* получение практических умений и навыков в области расчетов теплообменных процессов.

*Задание по практической работе:*

Определить удельный расход греющего пара на однокорпусную выпарную установку непрерывного действия, в которой  $G_H$ , кг/ч, раствора концентрацией  $x_H$  сухих веществ до  $x_K$ . Давление греющего пара  $P_{г.п}$ , бар; давление в аппарате  $P_a=1,17$  бар; температура исходного раствора  $t_1$ , °С; средняя теплоемкость раствора  $c_p$ , Дж/(кг·К); теплотери  $x$  5 % ( $x = 1,05$ ). Высота аппарата  $H = 2$  м. Рассчитать температурную депрессию. Варианты заданий даны в таблице 9.

Таблица 9 – Варианты заданий

Номер варианта	$G_H$ , кг/ч	$x_H$ , %	$x_K$ , %	$P_{г.п}$ , бар	$t_1$ , °С	$c_p$ , (Дж/кг·К)
1	11000	5	25	2,50	88	4000
2	12000	9	29	2,70	92	4200
3	13000	11	27	2,55	89	3800
4	14000	13	32	2,65	86	4500
5	15000	7	30	2,75	90	4100
6	16000	14	34	2,80	94	4400
7	17000	6	26	2,90	91	3600
8	18000	8	33	2,60	87	4300
9	19000	12	31	2,85	95	3900
10	20000	10	28	3,00	93	3700

### Расчетные формулы

Расход пара на однокорпусную выпарную установку  $D$ , кг/с,

$$D = \frac{[G_H c_p (t_{кип} - t_1) + W (i_{вп} - c_v t_{впк})]}{i_{гп} - c_k t_k} x,$$

где  $c_p$  – средняя теплоемкость раствора, Дж/(кг·К);  $G_H$  – массовый расход раствора, кг/с;  $t_1$  и  $t_{кип}$  – температуры раствора до сгущения и температура кипения, °С;  $i_{гп}$  и  $i_{вп}$  – энтальпии греющего и вторичного пара, Дж/кг;  $c_k$  и  $c_v$  – теплоемкост конденсата для греющего и вторичного пара, Дж/(кг·К);  $t_k$  – температура конденсата, °С;  $x$  – тепловые потери. Величина  $ct = i$  при искомой температуре;  $x$  – коэффициент, учитывающий потери тепла при нагревании ( $x = 1,05$ ).

Количество воды  $W$ , кг/с, выпаренной в однокорпусной выпарной установке

$$W = G_H \left( 1 - \frac{x_H}{x_K} \right),$$

где  $x_H$  и  $x_K$  – начальная и конечная концентрации сухих веществ, %.

Находим энтальпию греющего и вторичного пара по таблице насыщенных

паров (приложение А, таблица П.А.4).

Температура конденсата  $t_k$

$$t_k = t_{гп} - (2 \dots 3),$$

где  $t_{гп}$  – температура греющего пара.

Температура вторичного пара  $t_{впк}$

$$t_{впк} = t_{вп} - (2 \dots 3).$$

Теплоемкость конденсата и воды находим по таблице свойств воды на линии насыщения (приложение А, таблица П.А.5).

Удельный расход пара  $d$ , кг/кг,

$$d = \frac{D}{W}.$$

Температурная депрессия равна

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3,$$

где  $\Delta T_1$  – физико-химическая депрессия;  $\Delta T_2$  – гидростатическая депрессия;  $\Delta T_3$  – гидравлическая депрессия.

Физико-химическую депрессию рассчитываем по формуле

$$\Delta T_1 = 0,38 \cdot e^{0,05 + 0,045 \cdot x_k},$$

где  $x_k$  – конечная концентрация продукта, %.

Гидростатическая депрессия рассчитывается следующим образом.

Дополнительное давление в середине столба жидкости в кипятильных трубках аппарата для паровой смеси

$$\Delta P = \frac{\rho_t g H}{4},$$

где  $\rho_t$  – плотность суспензии при температуре  $t$

$$\rho_t = \rho_{20} - 0,5(t - 20),$$

где  $\rho_{20}$  – плотность суспензии при температуре 20 °С

$$\rho_{20} = 10[1,42x_k + (100 - x_k)].$$

Общее давление в аппарате

$$P_{об} = P_{в.п} + \Delta P.$$

По таблице насыщенных паров (приложение А, таблица П.А.4) находим температуру  $t_{об}$ . Значение гидростатической депрессии  $\Delta T_2$  будет равно

$$\Delta T_2 = t_{об} - t_{в.п}$$

$\Delta T_2$  для однокорпусной выпарной установки можно принять равной 1–2 °С.

Гидравлическую депрессию принимаем равной  $\Delta T_3 = 1$  °С. Тогда температура кипения раствора

$$t_{кип} = t_{в.п} + \Delta T',$$

$$\Delta T' = \Delta T_1 + \Delta T_2.$$

В однокорпусной установке гидравлическую депрессию считать не следует, поскольку мы знаем давление и температуру в аппарате.



*Вопросы для самоконтроля:*

1. Назовите исходные данные для расчета расхода первичного пара и площади поверхности нагрева аппарата в выпарной установке.
2. Какие три вида температурных депрессий приходится учитывать при расчете выпарной установки, и какая из них имеет наибольшее значение?
3. Какие выпарные установки имеют большой удельный расход пара на 1 кг выпаренной воды: периодического или непрерывного действия?

### **Практическое занятие № 8: Определение производительности вытяжного вентилятора в сушилке**

*Цель:* получение практических умений и навыков в области расчетов массообменных процессов.

*Задание по практической работе:* В сушилке, работающей по нормальному сушильному варианту, удаляется из материала влага  $W=1000$  кг/ч. Атмосферный воздух ( $t_0, ^\circ\text{C}$ ;  $\varphi, \%$ ) нагревается в паровом калорифере, давление греющего пара в котором  $P_{г.п} = 4$  кгс/см<sup>2</sup> по манометру. Психрометр на воздухопроводе после сушки показывает  $t_2, t_m, ^\circ\text{C}$ . Удельный расход теплоты на 13 % больше, чем в теоретической сушилке.

Определить производительность вытяжного вентилятора  $V, \text{м}^3/\text{с}$ , расход греющего пара, имеющего влажность  $x, \%$ , и площадь поверхности нагрева калорифера  $F, \text{м}^2$ , если коэффициент теплопередачи в нем равен  $K = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . В таблице 10 приведены варианты заданий.

Таблица 10 – Варианты заданий

Номер варианта	$t_0, ^\circ\text{C}$	$\varphi_0, \%$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$x, \%$
1	20	60	60	40	7
2	15	70	55	30	4
3	25	60	60	41	6
4	25	70	55	35	5
5	10	78	50	37	5
6	25	55	55	33	4
7	20	80	50	35	5
8	10	60	45	30	4
9	15	60	60	43	6
10	20	50	50	33	5

### Расчётные формулы

1. По диаграмме Рамзина (приложение Б, рисунок П.Б.2) находим: влагосодержание  $x_0, \text{кг}/\text{кг}$ , при этом необходимо учесть, что  $x = d \cdot 10^{-3}$  энтальпию

сухого воздуха  $i_0$ , Дж/кг; влагосодержание воздуха на выходе из аппарата  $x_2$ , кг/кг; энтальпию влажного воздуха на выходе из сушильной камеры  $i_2$ , Дж/кг, и его парциальное давление  $P_{\Pi}$ , Па.

2. Удельный расход сухого воздуха

$$l = \frac{1}{x_2 - x_0}.$$

3. Расход сухого воздуха, кг/с

$$L = Wl.$$

4. Удельный объем влажного воздуха

$$v_{\text{уд}} = \frac{R_B T}{\Pi - P_{\Pi}},$$

где  $R_B$  – газовая постоянная для воздуха,  $R_B = 287$  Дж/(кг·К);  $T$  – температура воздуха на выходе из сушильной камеры, К;  $\Pi$  – давление паровоздушной смеси (атмосферное давление), Па;  $P_{\Pi}$  – парциальное давление водяного пара при температуре сушильного агента на выходе из сушильной камеры.

5. Производительность вытяжного вентилятора, кг/с,

$$V = Lv_{\text{уд}}.$$

6. Удельный расход теплоты в теоретической сушилке

$$q_{\text{т}} = \frac{i_2 - i_0}{x_2 - x_0} = l(i_2 - i_0).$$

7. Удельный расход теплоты для реальной сушилки

$$q = \Delta q_{\text{т}}$$

8. Энтальпия воздуха на выходе из калорифера, кДж/кг,

$$i_1 = i_0 + \frac{q}{l}.$$

По полученному значению  $i_1$  определяем температуру  $t_1$  на выходе из калорифера (приложение Б, рисунок П.Б.2).

9. Расход теплоты в калорифере

$$Q = Wq.$$

10. Расход греющего пара

$$G_{\text{г.п}} = \frac{Q}{rx''},$$

где  $r$  – теплота конденсации,  $r = 2117$  кДж/(кг·К);  $x'' = 1 - x'$  – паросодержание греющего пара.

11. Средняя разность температур в калорифере.

Сначала необходимо найти разность температур между температурой греющего пара и температурами холодного продукта и продукта на выходе из аппарата, т. е.

$$\Delta t_{\text{б}} = t_{\text{п}} - t_0,$$

$$\Delta t_{\text{м}} = t_{\text{п}} - t_1,$$

где  $\Delta t_{\text{б}}$  – большая разность температур, °С;  $\Delta t_{\text{м}}$  – меньшая разность температур, °С;  $t_{\text{п}}$  – определяют по давлению  $P_{\text{п}}$  (или по формуле  $t_{\text{п}} = t_1 + 20$  °С).

Если  $\Delta t_{\text{б}}/\Delta t_{\text{м}} > 2$ , то среднюю разность температур  $\Delta t$  находят как среднелогарифмическую

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \cdot \lg \left( \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} \right)}.$$

Если  $\Delta t_{\text{б}}/\Delta t_{\text{м}} \leq 2$ , то  $\Delta t$  находят как среднеарифметическую разность

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{2}.$$

12. Площадь поверхности нагрева калорифера, м<sup>2</sup>,

$$F = \frac{Q}{K\Delta t}.$$

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Какова кинетика процесса сушки?
2. Что называется влажным воздухом?
3. Как определяется энтальпия влажного воздуха?
4. Почему в процессе испарения в идеальной сушилке энтальпию влажного воздуха можно считать постоянной?
5. Назовите основные параметры состояния влажного воздуха.

## **2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

Согласно учебному плану дисциплины «Практикум по ТПАП» направления подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, студенты заочной формы обучения закрепляют изучаемый материал, самостоятельно в виде выполнения контрольной работы.

Все студенты выбирают варианты контрольной работы в зависимости от номера зачетной книжки – по последней ее цифре (т. е. номер варианта должен совпадать с последней цифрой шифра зачетной книжки). При выполнении контрольной работы необходимо:

- последовательно и подробно изложить решение задачи вначале в буквенных выражениях, затем в цифрах;
- привести ответы решенных задач в системе единиц измерения СИ.

### Контрольная работа

#### 1. Осаждение:

**Задача.** Рассчитать отстойник непрерывного действия для осаждения твердых частиц водной суспензии. Диаметр наименьших частиц, подлежащих осаждению  $d_{ч}$ , мкм. Производительность отстойника по суспензии  $G_c$ , кг/ч. Концентрация суспензии  $x_c$ , Плотность частиц  $\rho_{ч}$ , кг/м<sup>3</sup>. Температура суспензии  $t$ , °С. Влажность осадка  $U$ .

Определить производительность отстойника по осветленной жидкости  $G_{осв}$ , производительность отстойника по твердой фазе  $G_{т.ф.}$ , площадь осаждения  $F_{ос}$ , диаметр отстойника  $D$ , общую высоту отстойника  $H$ , объемную производительность  $V_{осв}$ . В таблице 11 приведены варианты заданий.

Таблица 11 – Варианты заданий

Номер варианта	$d_{ч}$ , мкм	$G_c$ , кг/ч	$x_c$	$\rho_{ч}$ , кг/м <sup>3</sup>	$t$ , °С	$U$
1	80	30000	0,05	1300	30	0,7
2	75	30000	0,055	1275	40	0,6
3	70	25000	0,06	1250	25	0,65
4	65	25000	0,065	1225	45	0,7
5	60	20000	0,07	1200	20	0,6
6	55	20000	0,075	1175	30	0,65
7	50	15000	0,08	1150	40	0,7
8	45	15000	0,085	1175	35	0,6
9	40	10000	0,09	1150	40	0,65
10	35	10000	0,095	1175	45	0,6

### Расчетные формулы

1. Скорость осаждения шарообразных частиц для ламинарного режима ( $Re \leq 2$ ;  $\xi = 24/Re$ )

$$\omega_{oc} = gd_{\text{ч}}^2 \frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}{18\mu_{\text{ж}}},$$

где  $d_{\text{ч}}$  – эквивалентный диаметр частицы, м;  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{\text{ж}}$  – коэффициент динамической вязкости среды, Па·с.

Если плотности смешиваемых компонентов отличаются более чем на 30 %, то плотность смеси по формуле:

$$\rho_{\text{с}} = \frac{1}{\frac{x_{\text{с}}}{\rho_{\text{ч}}} + \frac{1 - x_{\text{с}}}{\rho_{\text{ж}}}}.$$

Объемная доля твердой суспензии

$$\varphi = \frac{x_{\text{с}}\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ч}}}.$$

2. Проверить режим осаждения, т.е. провести перерасчет числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\omega_{oc}d_{\text{ч}}\rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}}.$$

Если число Рейнольдса меньше двух ( $\text{Re} < 2$ ), то  $\xi = 24/\text{Re}$ .

Если число Рейнольдса больше двух ( $\text{Re} > 2$ ), то необходимо провести перерасчет скорости осаждения

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{4gd_{\text{ч}}(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}{3\xi\rho_{\text{с}}}},$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления среды.

Для переходного режима ( $2 < \text{Re} \leq 500$ )

$$\xi = \frac{18,5}{\text{Re}^{0,6}}.$$

Для турбулентного режима ( $\text{Re} > 500$ )

$$\xi = 0,44.$$

3. Скорость стесненного осаждения

$$\omega_{oc}'' = \lambda\omega_{oc},$$

где  $\lambda$  – поправочный коэффициент, учитывающий объемную концентрацию  $\varphi$  (в долях),

$$\lambda = \frac{(1 - \varphi)^2}{(1 + 2,5\varphi + 7,35\varphi^2)}.$$

4. Массовая производительность по осветленной жидкости

$$G_{ocв} = G_{\text{с}} - G_{oc},$$

где  $G_{\text{с}}$  – производительность по суспензии;  $G_{oc}$  – производительность отстойника по сгущенной суспензии.

Производительность по твердой фазе, поступающей с суспензией

$$G_{\text{т.ф}} = G_{\text{с}}x_{\text{с}}.$$

Количество получаемого из суспензии влажного осадка

$$G_{oc} = \frac{G_{\text{т.ф}}}{1 - U'}$$

где  $U$  – влажность осадка.

5. Объемная производительность отстойника по осветленной жидкости

$$V_{\text{осв}} = F \omega_{\text{ос}}''$$

где  $F$  – площадь осаждения отстойника,  $\text{м}^2$

$$F = 1,3G_c \frac{\left(1 - \frac{x_c}{1-U}\right)}{\rho_c \omega_{\text{ос}}}$$

6. Чтобы устранить перемешивание жидкости у свободной поверхности, высоту зоны свободного осаждения в отстойнике принимают равной  $h_1 = 0,45 \dots 0,75$  м, при этом наибольшее значение выбирают для более концентрированных суспензий.

Высота зоны осаждения, м,

$$h_2 = \frac{m_{\text{т.ф}}}{\rho_{\text{ч}}}$$

где  $m_{\text{т.ф}}$  – масса твердой фазы, осаждающейся в единицу времени ( $\tau = 1\text{ч}$ ) на единице свободной поверхности отстойника, кг,

$$m_{\text{т.ф}} = \frac{G_c x_c \tau}{F}$$

Высоту зоны расположения лопастей мешалки определяют исходя из наклона лопастей, равного приблизительно 0,146 м на 1 м длины.

Высота этой зоны

$$h_3 = 0,146 \frac{D}{2} = 0,073D,$$

где  $D$  – диаметр отстойника, м,

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}$$

Общая высота отстойника, м

$$H = h_1 + h_2 + h_3.$$

## 2. Перемешивание

**Задача.** Определить необходимую поверхность фильтрования водной суспензии, содержащей  $x_c$  твердой фазы. Влажность осадка  $U$ . Производительность фильтра по фильтрату  $V_{\text{ф}}$ . Перепад давления на фильтре  $\Delta P$ . Удельное сопротивление несжимаемого осадка  $r_o$ , сопротивление фильтровальной перегородки  $R_{\text{п}}$ , плотность твердой фазы  $\rho_{\text{т.ф}}$ . Осадок промывают используя 1,5  $\text{м}^3$  воды на 1  $\text{м}^3$  осадка. Динамическая вязкость промывных вод  $\mu_{\text{пр}}$ , а динамическая вязкость фильтрата  $\mu_{\text{ф}}$ . Плотность жидкости  $\rho_{\text{ж}}$  1000  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Варианты заданий даны в таблице 12.

Таблица 12 – Варианты заданий

Номер варианта	$x_c$	$U$	$V_\phi$ , м <sup>3</sup> /ч	$\Delta P \cdot 10^{-5}$ , Па	$r_o \cdot 10^{-12}$ , м <sup>-2</sup>	$R_{п} \cdot 10^{-10}$ , м <sup>-1</sup>	$\rho_{т.ф.}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_{пр}$ , Па·с	$\mu_\phi$ , Па·с
1	0,05	0,45	5	0,7	19	2	2000	0,0004	0,0006
2	0,05	0,40	7	1,0	18	2	1700	0,0005	0,0007
3	0,07	0,50	9	1,5	16	1	1600	0,0003	0,0006
4	0,09	0,45	10	2,0	14	9	1300	0,0005	0,0008
5	0,11	0,35	11	2,5	12	7	1400	0,0003	0,0004
6	0,10	0,40	8	0,8	05	6	2100	0,0004	0,0007
7	0,06	0,45	6	1,2	13	3	1800	0,0003	0,0005
8	0,08	0,50	7	1,4	17	5	1500	0,0004	0,0006
9	0,07	0,35	9	0,9	11	8	1900	0,0006	0,0008
10	0,12	0,40	5	1,1	19	4	1400	0,0003	0,0004

### Расчётные формулы

1. Количество получаемого фильтрата, кг/с

$$G_\phi = V_\phi \cdot \rho_\phi,$$

где  $V_\phi$  – объёмная производительность по фильтрату, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_\phi$  – плотность фильтрата, кг/м<sup>3</sup>,

$$\rho_\phi = \frac{1}{\frac{x_{т.ф.}}{\rho_{т.ч.}} + \frac{1 - x_{т.ф.}}{\rho_{ж.}}},$$

где  $\rho_{т.ф.}$  – плотность твёрдых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ж.}$  – плотность жидкости (воды) при 20 °С, кг/м<sup>3</sup>;  $x_{т.ф.}$  – содержание твёрдой фазы.

2. Массовый расход суспензии  $G_c$ , кг/с,

$$G_c = \frac{G_\phi}{1 - \frac{x_{т.ф.}}{1 - U}},$$

где  $U$  – влажность осадка.

3. Количество твёрдой фазы, поступающей с суспензией  $G_{т.ф.}$ , кг/с,

$$G_{т.ф.} = G_c x_{т.ф.}$$

4. Количество получаемого из суспензии влажного осадка  $G_{ос.}$ , кг/с,

$$G_{ос.} = \frac{G_{т.ф.}}{1 - U}.$$

5. Плотность влажного осадка  $\rho_{ос.}$ , кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{ос.} = \rho_{т.ф.}(1 - U) + \rho_{ж.}U.$$

6. Количество влажного осадка, приходящего на 1 м<sup>3</sup> получаемого фильтрата, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,

$$x_{ос.} = \frac{G_{ос.}}{\rho_{ос.} \cdot V_\phi}.$$

7. Удельная производительность фильтра за один цикл, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>,

$$v = \frac{h_{oc}}{x_{oc}},$$

где  $h_{oc}$  – высота слоя осадка, м. Для барабанного вакуум-фильтра высоту слоя осадка принимают  $h_{oc} = 10 \dots 12$  мм.

8. Продолжительность фильтрования  $\tau(c)$  при  $\Delta P = \text{const}$

$$\tau_{\phi} = \frac{\mu_{\phi} r_o x_{oc} v^2}{2\Delta P} + \frac{\mu_{\phi} R_{\Pi} v}{\Delta P},$$

где  $\mu_{\phi}$  – динамическая вязкость фильтрата, Па · с;  $r_o$  – удельное сопротивление осадка, м<sup>-2</sup>;  $R_{\Pi}$  – сопротивление фильтрованной перегородки, м<sup>-1</sup>;  $\Delta P$  – перепад давления в секции фильтрации, Па.

9. Удельное сопротивление осадка при промывке, м<sup>-2</sup>,

$$r_{\text{пром}} = \frac{\mu_{\text{пр}} \cdot r_o}{\mu_{\phi}},$$

где  $\mu_{\text{пр}}$  – динамическая вязкость промывных вод, Па · с.

10. Продолжительность промывки  $\tau_{\text{пр}}$ , с

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{W x_{oc} v \mu_{\text{пр}} (r_{\text{пр}} x_{oc} v + R_{\Pi})}{\Delta P_{\text{пр}}},$$

где  $W$  – расход воды на 1 м<sup>3</sup> осадка, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

11. Примем общее число секций в барабане  $m = 18$ , из которых в зоне фильтрования находится шесть секций ( $m_{\phi} = 6$ ) и в зоне промывки – три секции ( $m_{\text{пр}} = 3$ ). Продолжительность полного цикла фильтрования для барабанного вакуум-фильтра непрерывного действия  $T$ , с,

$$T = (\tau_{\phi} + \tau_{\text{пр}}) \frac{m}{m_{\phi} + m_{\text{пр}}}.$$

12. Необходимая площадь фильтрования  $F$ , м<sup>2</sup>,

$$F = \frac{V_{\phi} \cdot T}{v}.$$

13. Частота вращения барабана  $n$ , об/мин,

$$n = \frac{60}{T}.$$

14. Степень погружения барабана в суспензию  $\varphi$

$$\varphi = \frac{\tau_{\phi}}{T}.$$

### 3. Фильтрование

**Задача.** Определить мощность электродвигателя и частоту вращения мешалки (диаметр  $d_m$  и ширина  $b_m$ ), установленной в аппарате диаметром  $D$  для перемешивания жидкости слоем  $H$  с твердыми частицами, если плотность жидкости  $\rho_{ж} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, а ее вязкость  $\mu_{ж} = 0,001$  Па·с. Массовое содержание



твердой фазы в жидкости  $x_{т.ф}$ , эквивалентный диаметр твердых частиц  $d_{ч} = 1$  мм и их плотность  $\rho_{т.ч} = 1500$  кг/м<sup>3</sup>. Аппарат имеет шероховатые внутренние стенки и гильзу для термометра. Шаг винта лопасти пропеллерной мешалки  $S$ . Количество перемещений жидкости через диффузор  $m$ . Угол подъема винтовой линии  $\Theta$ . В таблице 13 даны варианты заданий.

Таблица 13 – Варианты заданий

Номер варианта	$d_{м},$ м	$b_{м},$ м	$D,$ м	$H,$ м	$x_{т.ф}$	$S,$ м	$m$	$\Theta,$ °	Тип мешалки
1	1,0	0,1	1,5	1,2	0,18	-	-	-	Лопастная
2	1,0	0,13	1,2	1,0	0,2	-	-	-	Лопастная
3	0,5	-	1,5	0,8	0,22	0,3	10	25	Пропеллерная
4	0,33	-	1,0	1,1	0,15	0,33	12	30	Пропеллерная в диффузоре
5	1,0	0,15	2,0	0,9	0,1	-	-	-	Лопастная в аппарате со змеевиком
6	1,0	0,1	1,1	1,0	0,2	-	-	-	Якорная
7	0,35	-	1,3	1,3	0,18	0,33	8	35	Пропеллерная в диффузоре
8	0,5	0,15	1,0	0,9	0,15	-	-	-	Якорная
9	0,75	0,1	1,5	0,8	0,15	-	-	-	Лопастная в аппарате со змеевиком
10	0,6	-	1,7	1,0	0,25	0,3	5	40	Пропеллерная

### Расчётные формулы

1. Плотность перемешиваемых компонентов суспензии  $\rho_c$ , кг/м<sup>3</sup>,

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{x_{т.ф}}{\rho_{т.ч}} + \frac{1 - x_{т.ф}}{\rho_{ж}}},$$

где  $\rho_{т.ч}$  – плотность твердых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $x_{т.ф}$  – массовое содержание твердой фазы в жидкости.

2. Объемная доля твердой фазы в суспензии

$$\varphi = \frac{\rho_c}{\rho_{т.ч}} x_{т.ф},$$

3. Динамическая вязкость смеси:

а) если  $\varphi \leq 0,1$ , то  $\mu_c = \mu_{ж} (1 + 2,5 \varphi)$ ;

б) если  $\varphi > 0,1$ , то  $\mu_c = \frac{0,59 \mu_{ж}}{(0,77 - \varphi)^2}$ .

4. Частота вращения мешалки, об/с:

а) для лопастной и якорной мешалок

$$n = C \sqrt{\frac{\rho_{т.ч} - \rho_{ж} \cdot d_{ч}}{\rho_{с}}} \left( \frac{D^x}{d_{м}^y} \right),$$

где  $d_{ч}$  – эквивалентный диаметр твердой частицы, м;  $D$  – диаметр аппарата, м;  $d_{м}$  – диаметр мешалки, м;  $C, x, y$  – постоянные (приложение А, таблица П.А.1);

б) для пропеллерной и турбинной мешалок

$$n = \frac{\omega_0}{S \cos^2 \theta},$$

где  $\omega_0$  – осевая скорость перемешивания суспензии, м/с;  $S$  – шаг винта пропеллерной или турбинной мешалки, м;  $\theta$  – угол подъема винтовой линии, °.

Осевая скорость перемешивания суспензии

$$\omega_0 = \frac{mV}{60F_{о.в}},$$

где  $m$  – количество перемещений жидкости через диффузор;  $V$  – объем аппарата, м<sup>3</sup>;  $F_{о.в}$  – поверхность, отмечанная винтом, м<sup>2</sup>.

Объем аппарата

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4}.$$

Поверхность, отмечаемая винтом,

$$F_{о.в} = 0,8 \frac{\pi d_{м}^2}{4}.$$

5. Критерий Рейнольдса для мешалки,

$$Re_{м} = \frac{n \cdot \rho_{с} \cdot d_{м}^2}{\mu_{с}}.$$

По полученному значению  $Re_{м}$  из графика (Приложение Б, рисунок П.Б.1)  $K_N = f(Re_{м})$ , находим значение коэффициента мощности  $K_N$  для модельной мешалки.

Величина  $K_N$ , полученная из рисунка П.Б.1, справедлива только для мешалок геометрически подобных модельным мешалкам. При отклонении от этого условия расход энергии на перемешивание изменяется, поэтому при отсутствии геометрического подобия мешалок значение  $K_N$  умножают на поправочные коэффициенты:

$$f_D = \left( \frac{D}{\alpha d_{м}} \right)^a,$$

$$f_h = \left( \frac{H}{D} \right)^h,$$

$$f_b = \left( \frac{b}{\beta d_{м}} \right)^k,$$

$$f_s = \left( \frac{S}{d_{м}} \right)^p,$$

где  $\alpha$  – отношение  $\frac{D}{d}$  для модельной мешалки;  $\beta$  – отношение  $\frac{b}{d}$  для модельной мешалки. Значения коэффициентов **a**, **h**, **k** и **p** приведены в (приложение А, таблица П.А.3). Тогда

$$K_{N1} = K_N f_D f_h f_b f_s$$

7. Мощность, потребляемая мешалкой в рабочий период, Вт:

а) для лопастной и якорной мешалок

$$N_p = K_{N1} d_M^5 n^3 \rho_c;$$

б) для пропеллерной и турбинной мешалок

$$N_p = 0,2 \sin^3 \theta \cos \theta K_{N1} d_i^5 n^3 \rho_c.$$

Если высота слоя жидкости в аппарате отлична от его диаметра, то поправочный множитель

$$f_H = \sqrt{\frac{H}{D}}.$$

Шероховатость внутренних стенок аппарата, наличие в нём змеевика и гильзы для термометра учитываются следующими поправочными коэффициентами:

$f_{ш} = 1,1 \dots 1,2$  – для шероховатых стенок;

$f_3 = 2 \dots 3$  – при наличии змеевика вдоль вертикальных стенок или у днища аппарата;

$f_r = 1,1$  – при наличии гильзы для термометра.

8. При коэффициенте  $f_n = 1,3$ , учитывающем пусковой момент и КПД передачи  $\eta = 0,8 \dots 0,85$ , необходимая мощность электродвигателя мешалки, кВт,

$$N_{дв} = \frac{1,3 \cdot N_p \cdot f_H \cdot f_{ш} \cdot f_3 \cdot f_r}{1000 \eta}.$$

Работа должна быть выполнена на листах формата А4 с одной стороны листа, в печатном варианте. Шрифт текстовой части размер – 12 (для заголовков – 14), вид шрифта – Times New Roman, интервал 1,5. Поля страницы: левое 3 см, правое 1,5 см, верхнее и нижнее 2 см. Нумерация страниц внизу справа.

*Структура контрольной работы:*

- титульный лист (приложение В)
- содержание
- решение задач

Контрольная работа должна быть оформлена в соответствии с общими требованиями, предъявляемыми к контрольным работам:

- текст должен быть отпечатан на компьютере;
- основной текст подразделяется на озаглавленные части в соответствии с содержанием работы. Заглавия не подчеркиваются, в конце заголовка точка не ставится, переносы допускаются;

- страницы текста пронумерованы арабскими цифрами в правом верхнем углу без точек. Титульный лист считается первым и не нумеруется;

- на каждой странице оставлены поля для замечаний рецензента.

Стиль и язык изложения материала контрольной работы должны быть четкими, ясными и грамотными. Грамматические и синтаксические ошибки недопустимы. Выполненная контрольная работа представляется для регистрации на кафедре, затем поступает на рецензирование преподавателю.

Положительная оценка («зачтено») выставляется в зависимости от полноты и правильности решения задач, объема предоставленного материала в контрольной работе, а также степени его усвоения, которая выявляется при ее защите (умение использовать при ответе на вопросы научную терминологию, лингвистически и логически правильно отвечать на вопросы). Студент, получивший контрольную работу с оценкой «зачтено», знакомится с рецензией и с учетом замечаний преподавателя дорабатывает отдельные вопросы с целью углубления своих знаний.

Контрольная работа с оценкой «не зачтено» возвращается студенту с рецензией, выполняется студентом вновь и сдается вместе с не зачтенной работой на проверку преподавателю. Контрольная работа, выполненная не по своему варианту, возвращается без проверки и зачета.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кавецкий, Г. Д. Процессы и аппараты пищевых производств / А. В. Кавецкий, А. В. Королёв. – Москва: Агропромиздат, 1991. – 432 с.
2. Кавецкий, Г. Д. Технологические процессы и производства (пищевая промышленность): учеб. / Г. Д. Кавецкий, А. В. Воробьева. – Москва: КолосС, 2006. – 367 с.
3. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. – Москва: Химия, 1983. – 272 с.
4. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 13-е изд., стер. – Москва: Альянс, 2006. – 576 с.
5. Попов, В. В. Лабораторный практикум по процессам и аппаратам пищевых производств: учеб. пособие для студ. вузов спец. 260601.65 - Машины и аппараты пищ. пр-в, 260602.65 - Пищ. инженерия мал. предприятий, 220100.62 - Технология продуктов питания, 240902.65 - Пищ. биотехнология, 220301.65 - Автоматизация технологич. процессов и пр-в / В. В. Попов, Н. В. Захаркив. – Калининград: КГТУ, 2005. – 92 с.
6. Попов, В. В. Процессы и аппараты пищевых производств. Курсовое проектирование: учеб. пособие для студентов вузов специальностей 260601.65 - Машины и аппараты пищ. пр-в и 260602.65 - Пищ. инженерия малых предприятий / В. В. Попов, Н. В. Захаркив. – Калининград : КГТУ, 2009. – 50 с.
7. Попов, В. В. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справ. пособие по курс. и дип. проект. для студ. Вузов спец. 170600 - Машины и аппараты пищ. пр-в, 271300 - Пищ. инженерия мал. предприятий, 271100 - Технология продуктов питания, 210200 - Автоматизация техн. процессов и пр-в, 330500 - Безопасность техн. процессов и пр-в / В. В. Попов, Ю. А. Фатыхов, Н. В. Захаркив. – Калининград: КГТУ, 2004. – 73 с.
8. Попов, В. В. Технологические процессы пищевых производств: учеб. пособие по изучению дисциплины "Технол. процессы и пр-ва" и "Произв. оборудование и его эксплуатация" для студентов специальности 220301.65 - Автоматизация технол. процессов и пр-в / В. В. Попов, Н. В. Захаркив. – Калининград: КГТУ, 2008. – 49 с.
9. Процессы и аппараты пищевых производств / под ред. А. Н. Острикова. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2012. – 613 с.
10. Стабников, В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В. Н. Стабников, В. М. Лысянский, В. Д. Попов. – Москва: Агропромиздат, 1985. – 503 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А

Таблица П.А.1

Тип мешалки	<i>C</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
Лопастная и якорная	46,4	0	1
Пропеллерная и турбинная	20,6	1	2

Таблица П.А.2

Номер кривой на рис. 1	Тип мешалки	Отношение размеров мешалки к ее диаметру при $\frac{H}{D} = 1$		
		$D/d_M = \alpha$	$b/d_1 = \beta$	$S/d_M$
1	Лопастная	1,5	0,885	-
2	Лопастная в аппарате со змеевиком	2,0	0,885	-
3	Пропеллерная	3,0	-	1
4	Пропеллерная в диффузоре	3,0	-	1
5	Турбинная закрытая	4,0	-	-
6	Якорная	1,15	0,066	-

Таблица П.А.3

Тип мешалки	<i>a</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>p</i>
Лопастная, якорная	1,1	0,6	0,3	-
Пропеллерная, турбинная	0,93	0,6	-	1,5

Таблица П.А.4

## Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления

Давление (абсолютное), кгс/см <sup>2</sup>	Температура, °С	Удельный объем, м <sup>3</sup> /кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная энтальпия жидкости <i>i'</i> , кДж/кг	Удельная энтальпия пара <i>i''</i> , кДж/кг	Удельная теплота парообразования <i>r</i> , кДж/кг
0,01	6,6	131,60 89,64	0,00760	27,7	2506	2478
0,015	12,7	68,27 55,28 46,53	0,01116	53,2	2518	2465
0,02	17,1	35,46 28,73 24,19	0,01465	71,6	2526	2455
0,025	20,7	18,45 14,96 12,60	0,01809	86,7	2533	2447
0,03	23,7	10,22 7,977 5,331	0,02149	99,3	2539	2440
0,04	28,6	4,072 3,304 2,785	0,02820	119,8	2548	2429
0,05	32,5	2,411 2,128 1,906	0,03481	136,2	2556	2420
0,06	35,8	1,727 1,457 1,261	0,04133	150,0	2562	2413
0,08	41,1	1,113 0,997 0,903	0,05420	172,2	2573	2400
0,10	45,4	0,6180 0,4718	0,06686	190,2	2581	2390
0,12	49,0	0,3825 0,3222	0,07937	205,3	2588	2382
0,15	53,6	0,2785 0,2454	0,09789	224,6	2596	2372
0,20	59,7	0,2195 0,1985	0,1283	250,1	2607	2358
0,30	68,7	0,1813 0,1668	0,1876	287,9	2620	2336
0,40	75,4	0,1545 0,1438	0,2456	315,9	2632	2320
0,50	80,9	0,1346 0,1264	0,3027	339,0	2642	2307
0,60	85,5	0,1192 0,1128	0,3590	358,2	2650	2296
0,70	89,3	0,1070 0,1017	0,4147	375,0	2657	2286
0,80	93,0	0,06802 0,05069	0,4699	389,7	2663	2278
0,90	96,2	0,04007 0,03289	0,5246	403,1	2668	2270
1,0	99,1	0,02769 0,02374	0,5790	415,2	2677	2264
1,2	104,2	0,02064 0,01815	0,6865	437,0	2686	2249
1,4	108,7	0,01437 0,01164	0,7931	456,3	2693	2237
1,6	112,7	0,00956 0,00782	0,898	473,1	2703	2227
1,8	116,3	0,00614 0,00310	1,003	483,6	2709	2217
2,0	119,6		1,107	502,4	2710	2208
3,0	132,9		1,618	558,9	2730	2171
4,0	142,9		2,120	601,1	2744	2141
5,0	151,1		2,614 3,104	637,7	2754	2117
6,0	158,1		3,591 4,075	667,9	2768	2095
7,0	164,2		4,536 5,037	694,3	2769	2075
8,0	169,6		5,516 5,996	718,4	2776	2057
9,0	174,5		6,474 6,952	740,0	2780	2040
10	179,0		7,431 7,909	759,6	2784	2024
11	183,2		8,389 8,868	778,1	2787	2009
12	187,1		9,349	795,3	2790	1995
13	190,7		9,83	811,2	2793	1984
14	194,1		14,70 19,73	826,7	2795	1968
15	197,4		24,96 30,41	840,9	2796	1965
16	200,4		36,12 42,13	854,8	2798	1943
17	203,4		48,45 55,11	867,7	2799	1931
18	206,2		69,60 85,91	880,3	2800	1920
19	208,8		104,6 128,0	892,5	2801	1909
20	211,4		162,9 322,6	904,2	2802	1898
30	232,8			1002	2801	1800
40	249,2			1079	2793	1715
50	262,7			1143	2780	1637

60	274,3			1199	2763	1565
70	284,5			1249	2746	1497
80	293,6			1294	2726	1432
90	301,9			1337	2705	1369
100	309,5			1377	2684	1306
120	323,1			1455	2638	1183
140	335,0			1531	2592	1061
160	345,7			1606	2540	934
180	355,4			1684	2483	799
200	364,2			1783	2400	617
225	374,0			2100	2100	0

Таблица П.А.5 – Основные теплофизические свойства воды

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$c, \text{Дж/(м}\cdot\text{К)}$	$\mu \cdot 10^3, \text{(Н}\cdot\text{с)/м}^2$	Pr	$\sigma \cdot 10^3, \text{Н/м}$
0	1000	0,65 0,575	4230 4190	1,79 1,31	13,7 9,52	77,1 75,6
10	1000 998	0,6	4190 4180	1,0 0,804	7,02 5,42	74,1 72,6
20	996	0,618	4180 4180	0,675	4,31 3,54	71,0 69,0
30	992	0,634	4180 4180	0,549	2,98 2,55	67,5 65,5
40	986	0,648	4190 4190	0,47	2,21 1,95	63,8 61,9
50	983	0,659	4190	0,406	1,75	61,0
60	976	0,668		0,355		
70	972	0,675 0,68		0,315		
80	965	0,67		0,28		
90	959					
100						

Таблица П.А.6 – Основные физические свойства молока

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$c, \text{Дж/(м}\cdot\text{К)}$	$\mu \cdot 10^3, \text{(Н}\cdot\text{с)/м}^2$	Pr	$\sigma \cdot 10^3, \text{Н/м}$
5	1032,6	0,486	3868 3870	3,02 2,52	30,2 20,0	47
10 15	1031,7	0,489	3880 3890	2,14 1,82	16,9 14,3	45
20 30	1030,7	0,492	3900 3910	1,35 1,10	10,6	45
40 50	1028,7	0,495	3870 3850	0,87 0,72	8,5	43
60 70	1024,8	0,500	3850 3850	0,63 0,58	6,5	42
80 90	1020,9	0,506	3850 3850	0,56 0,54	5,35 4,65	42
100	1015,9	0,516			4,2	42
	1011,1	0,518			4,07 3,84	42
	1005,2	0,524				42
	1000,3	0,530				42
	999	0,531				42
	887	0,542				42



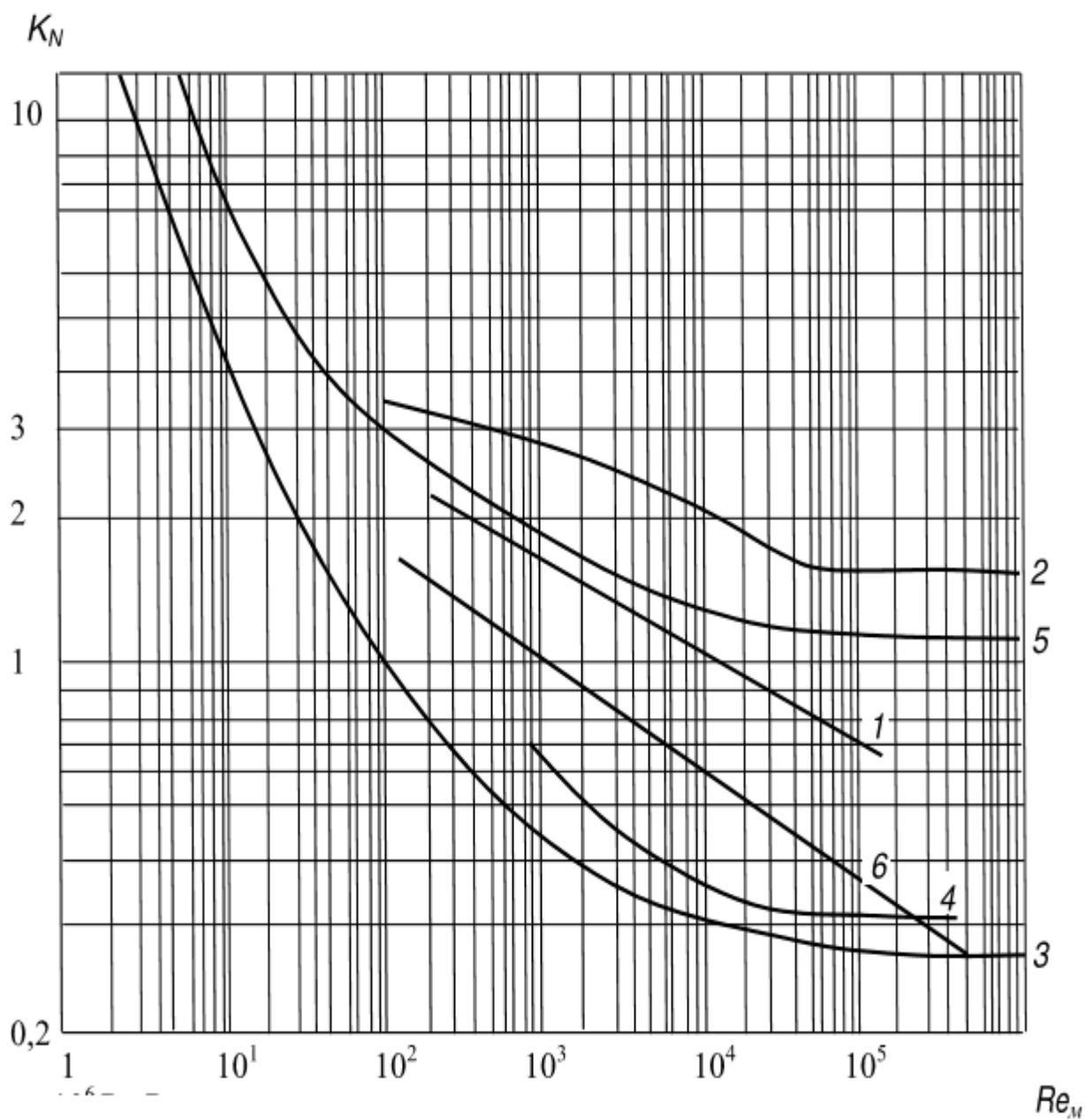


Рисунок П.Б.1 – Графическая зависимость  $K_N = f(Re_M)$  для различных типов мешалок:  
 1 – лопастная; 2 – лопастная в аппарате со змеевиком; 3 – пропеллерная;  
 4 – пропеллерная в диффузоре

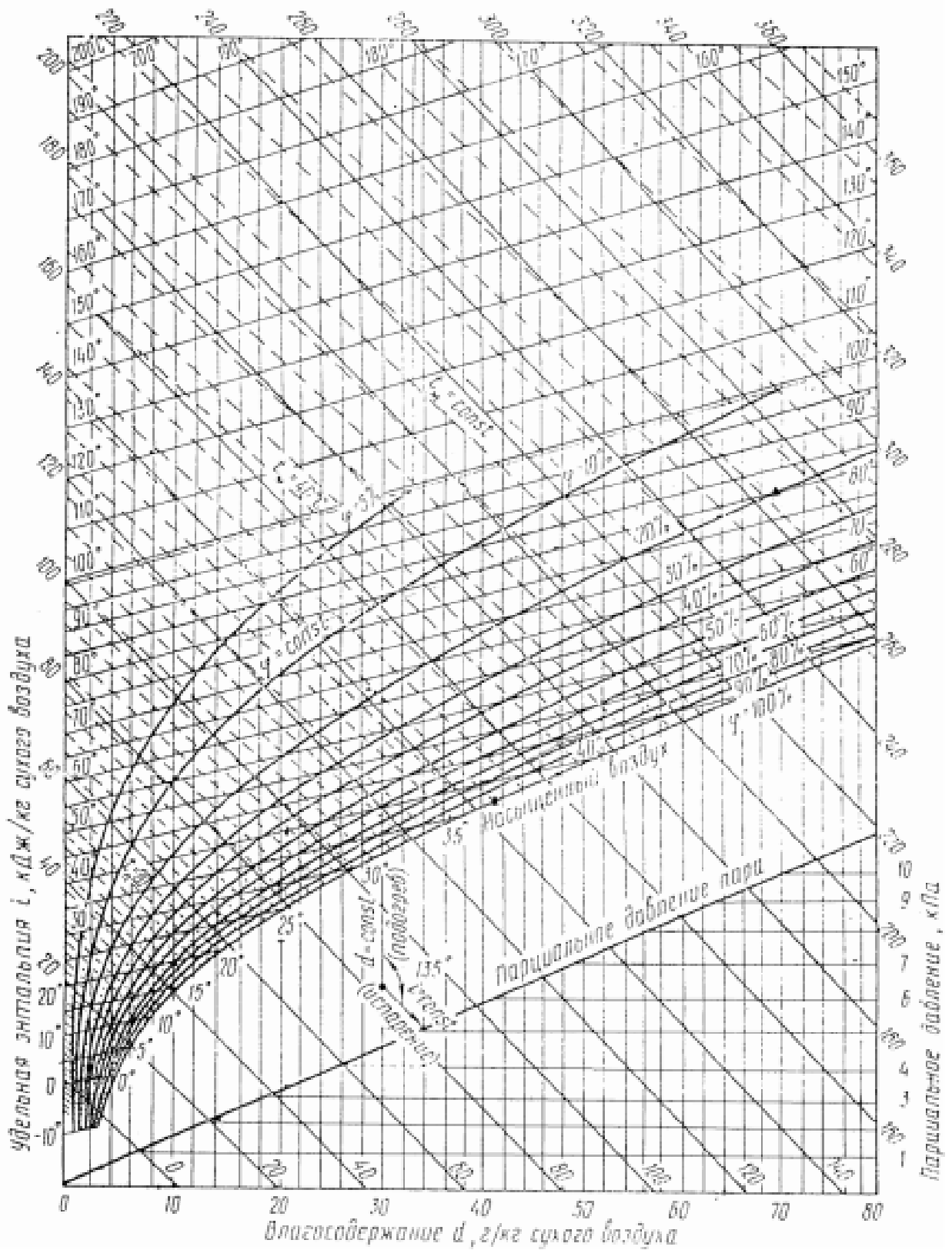


Рисунок П.Б.2 – Диаграмма Рамзина для влажного воздуха ( $d = 1000x$ )

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ**  
**БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**  
**ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ**  
**УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт агроинженерии и пищевых систем  
Кафедра инжиниринга технологического оборудования

Контрольная работа  
допущена к защите:  
должность (звание), ученая степень  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Контрольная работа  
защищена  
должность (звание), ученая степень  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Контрольная работа № \_\_\_\_\_

по дисциплине  
«ПРАКТИКУМ ПО ТПАП»

Шифр студента \_\_\_\_\_  
Вариант № \_\_\_\_\_

Работу выполнил:  
студент гр. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Калининград - 20\_\_

Локальный электронный методический материал

Мария Вячеславовна Хомякова

## ПРАКТИКУМ ПО ТПАП

Редактор Е. Билко

Уч.-изд. л. 3,3. Печ. л. 2,8

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»,  
236022, Калининград, Советский проспект, 1