

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

**В. А. Мельникова**

## **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ БИОТЕХНОЛОГИИ**

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины для студентов,  
обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки  
19.03.01 Биотехнология

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2024

УДК 664

Рецензент  
кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «КГТУ»  
М. Н. Альшевская

Мельникова, В. А.

Процессы и аппараты биотехнологии: учеб.-методич. пособие по изучению дисциплины для студ. бакалавриата по напр. подгот. 19.03.01 Биотехнология / В. А. Мельникова. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2024. – 55 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины «Процессы и аппараты биотехнологии» представлены учебно-методические материалы по освоению тем лекционного курса, включающие подробный план лекций по каждой изучаемой теме, вопросы для самоконтроля, материалы по подготовке к практическим занятиям.

Табл. 8, рис. 1, список лит. – 13 наименований

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к опубликованию кафедрой инжиниринга технологического оборудования 20 февраля 2024 г., протокол № 5

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» 30 апреля 2024 г., протокол № 4

УДК 664

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2024 г.  
© Мельникова В. А., 2024 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	7
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	20
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	49
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	50

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях роль организации и расчета технологических процессов пищевых и биотехнологических производств, а также проектирования технологической аппаратуры существенно возрастает. Для решения этих задач требуются квалифицированные специалисты в области пищевых производств.

Целями подготовки студентов являются рациональный выбор конструкций, расчет машин и аппаратов для определенных биотехнологических процессов, а также метод целесообразной промышленной эксплуатации их, направленный на достижение максимальной производительности при минимальных затратах и высоком качестве готовой продукции.

Дисциплина «Процессы и аппараты биотехнологии» относится к Профессиональному модулю ОПОП ВО по направлению подготовки 19.03.01 Биотехнология.

Целью освоения дисциплины является формирование знаний, умений и навыков в области пищевых производств, осуществляемых с использованием различных процессов и аппаратов, которые входят в состав соответствующих технологических линий.

Задачами изучения дисциплины является формирование:

- знаний об основных процессах, происходящих в биотехнологическом производстве;
- знаний об основных аппаратах, используемых в биотехнологическом производстве;
- навыков в проведении технологических, энергетических (тепловых) и конструктивных расчетов, связанных с проектированием аппаратов;
- навыков работы с различными источниками информации, анализа и обобщения необходимых сведений, связанных с выбором рационального типа аппарата и с основными требованиями по его эксплуатации.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

знать:

- основные процессы и аппараты биотехнологии;
- основные принципы работы биотехнологического оборудования;

уметь:

- выявлять закономерности процессов биотехнологии, проводить обобщение закономерностей гидродинамических, тепловых и массообменных процессов;
- пользоваться методическими и нормативными материалами, техническими условиями и стандартами при расчете и выборе аппаратов;
- выполнять экспериментальные исследования по определению реальных параметров аппаратов (в лабораторных установках);

владеть:

- основным понятийным аппаратом;
- методикой расчета аппаратов при заданных технологических параметрах процесса;
- методами промышленной эксплуатации биотехнологических аппаратов, направленными на достижение максимальной производительности при минимальных затратах и высоком качестве готовой продукции.

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

Для успешного освоения дисциплины «Процессы и аппараты биотехнологии», студент должен активно работать на лекционных и практических занятиях, организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность.

Курсовой проект, выполняемый в шестом семестре, представляет собой решение комплексной инженерно-технической задачи, включающей в себя выбор и разработку технологического процесса, компоновку объекта проектирования, выбор основных элементов и узлов проектируемого объекта, расчет аппарата, основных его узлов и элементов, обоснование принятых методов расчета и технических решений.

Промежуточной аттестацией по завершению курса является экзамен, к которому допускаются студенты, освоившие темы курса и выполнившие практические занятия, лабораторные работы, курсовой проект.

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства текущего контроля успеваемости;
- оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине.

К оценочным средствам текущего контроля успеваемости относятся:

- тестовые задания по темам курса;
- задания и контрольные вопросы к практическим занятиям;
- задания и контрольные вопросы к лабораторным работам.

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

- задания к курсовому проекту;
- экзаменационные тестовые задания.

К экзамену допускаются студенты:

- положительно аттестованные по результатам освоения дисциплины;
- получившие положительную оценку при защите курсового проекта.

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 полной 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 их индивидуальных психофизических особенностей.

Для успешного освоения дисциплины «Процессы и аппараты биотехнологии» в учебно-методическом пособии по изучению дисциплины приводится краткое содержание каждой темы занятия, перечень вопросов для подготовки к практическим занятиям и организации самостоятельной работы студентов.

## **1 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Осваивая курс «Процессы и аппараты биотехнологии», студент должен научиться работать на лекциях, практических занятиях, лабораторных работах и организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность. В начале лекции необходимо уяснить цель, которую лектор ставит перед собой и студентами. Важно внимательно слушать, отмечать наиболее существенную информацию и кратко ее конспектировать; сравнивать то, что услышано на лекции с прочитанным и усвоенным ранее материалом, укладывать новую информацию в собственную, уже имеющуюся, систему знаний. По ходу лекции необходимо подчеркивать новые термины, определения, устанавливать их взаимосвязь с изученными ранее понятиями.

Основными видами учебной деятельности в ходе изучения курса являются лекции, практические занятия, консультирование по выполнению курсового проекта.

При чтении лекций преподаватель имеет право самостоятельно выбирать формы и методы изложения материала, которые будут способствовать качественному его усвоению. При этом преподаватель в установленном порядке может использовать технические средства обучения, имеющиеся на кафедре и в университете.

Вместе с тем, всякий лекционный курс является в определенной мере авторским, представляет собой творческую переработку материала и неизбежно отражает личную точку зрения лектора на предмет и методы его преподавания. В этой связи представляется целесообразным привести некоторые общие методические рекомендации по построению лекционного курса и формам его преподавания.

Лекции составляют основу теоретической подготовки и посвящены основным процессам и аппаратам биотехнологии. При проведении лекций необходимо использовать технические средства обучения, ЭИОС, применять методы, способствующие активизации познавательной деятельности

слушателей. На лекциях целесообразно теоретический материал иллюстрировать рассмотрением различных примеров и конкретных задач. Имеет смысл привлекать студентов к обсуждению как рассматриваемого вопроса в целом, так и отдельных моментов рассуждений и доказательств. Необходимо также использовать возможности проблемного изложения, дискуссии с целью активизации деятельности студентов.

Практические занятия проводятся для расширения и закрепления основных теоретических положений курса и реализации их в практических расчетах, формирования и развития у студентов мышления в рамках будущей профессии.

На практических занятиях следует добиваться точного и адекватного владения теоретическим материалом и его применения для решения задач.

Важным звеном во всей системе обучения является самостоятельная работа обучающихся. В широком смысле под ней следует понимать совокупность всей самостоятельной деятельности студентов, как в отсутствии преподавателя, так и в контакте с ним. Она является одним из основных методов поиска и приобретения новых знаний, работы с литературой, а также выполнения предложенных заданий. Преподаватель призван оказывать в этом методическую помощь студентам и осуществлять руководство их самостоятельной работой.

Необходимо контролировать степень усвоения студентами текущего материала, а также уровень остаточных знаний по уже изученным темам.

При изучении курса предусмотрены следующие формы текущего контроля:

- тестовые задания по разделам курса;
- контроль на практических занятиях;
- контроль на лабораторных занятиях;
- контроль выполнения и защита курсового проекта.

Промежуточный контроль осуществляется в форме сдачи курсовой работы и экзамена в 6 семестре и имеет целью определить степень достижения учебных целей по дисциплине.

С целью формирования мотивации и повышения интереса к предмету особое внимание при чтении курса необходимо обратить на темы, которые можно проиллюстрировать примерами из практической сферы, связывая теоретические положения с будущей профессиональной деятельностью студентов.

Тематический план лекционных занятий (ЛЗ) представлен в таблице 2.



Таблица 2 – Тематический план лекционных занятий

Номер темы	Содержание лекционного занятия
1	Введение в процессы и аппараты пищевых производств
2	Теория химических реакторов
3	Теория биореакторов
4	Прикладные теплофизические аспекты в биотехнологии. Передача и трансформация тепловой энергии в биотехнологических процессах
5	Массообменные процессы
6	Механические процессы
7	Микробиологические процессы

Если лектор приглашает студентов к дискуссии, то необходимо принять в ней активное участие. Если на лекции студент не получил ответа на возникшие у него вопросы, он может в конце лекции задать эти вопросы лектору курса дисциплины.

### **Тема 1. Введение в процессы и аппараты пищевых производств**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Классификация процессов пищевой промышленности. Движущая сила процесса.
2. Технологические свойства материалов.
3. Основы рационального построения аппаратов.
4. Основные принципы расчета процессов и аппаратов.

*Методические рекомендации*

Первая тема курса позволит обучающимся получить представление о базовых понятиях дисциплины, в ней также определяется место изучаемого материала в системе научного знания и его взаимосвязь с другими дисциплинами.

При изучении данной темы курса необходимо обратить особое внимание на классификацию основных процессов пищевой технологии и биотехнологии, свойства сырья, продуктов и полуфабрикатов, структурно-механические, теплофизические и физико-химические свойства материалов, а также требования к аппаратам и материалам, идущим на изготовления аппаратов.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Каким основным законам подчиняются процессы пищевой технологии?

2. В чем заключается оптимизация проведения процесса?
3. Какими техническими свойствами характеризуются сырье, продукты и полуфабрикаты?
4. Какими закономерностями и реализуемыми технологиями характеризуются различные процессы и аппараты?
5. Каким требованиям должны соответствовать материалы, идущие на изготовление аппаратов?
6. Какие конструкционные материалы используются в пищевой отрасли?

## **Тема 2. Теория химических реакторов**

### *Ключевые вопросы темы:*

1. Химические реакторы. Определения, общая характеристика, области применения, классификация.
2. Классификация химических реакторов по конструктивным признакам.
3. Классификация химических реакторов по тепловому режиму.
4. Классификация химических реакторов по способу организации теплообмена.
5. Классификация химических реакторов по фазовому состоянию реакционной смеси.
6. Классификация химических реакторов по характеру изменения параметров процесса во времени.
7. Классификация химических реакторов по способу организации процесса.
8. Классификация химических реакторов по гидродинамическому режиму.
9. Каскад реакторов.
10. Расчет реакторов.

### *Методические рекомендации*

Целью изучения второй темы курса является формирование у обучающихся общих представлений о химических реакторах.

Первый вопрос посвящен рассмотрению стадий любого химико-технологического процесса, а именно подготовка сырья, химическое превращение, выделение целевых продуктов, утилизация отходов.

Вторым вопросом идет рассмотрение термина «реактор» и классификация существующих аппаратов подобного типа. Более подробно рассматриваются основные типы химических реакторов: реактор идеального вытеснения и реактор идеального смешения.

В конце рассматриваются основные положения по теории и расчету химических реакторов.

Вопросы для самоконтроля:

1. Что такое химический реактор, требования, предъявляемые к нему. Классификация реакторов.
2. Характеристика периодического процесса. Почему его называют нестационарным? Особенности протекания, область применения, достоинства и недостатки.
3. Характеристика непрерывного процесса. Почему его называют стационарным? Особенности протекания, область применения, достоинства и недостатки.
4. Реактор периодического действия, устройство, принцип действия, достоинства и недостатки, область применения.
5. Реактор непрерывного действия РИС-Н, устройство, принцип действия, достоинства и недостатки, область применения.
6. Модель идеального перемешивания, определение, допущения. Ее использование в расчете основного времени работы РИС-П.
7. Модель идеального вытеснения, определение, допущения. Ее использование в расчете времени пребывания РИВ.
8. Основы расчета изотермического процесса в реакторе. Сравнение эффективности работы реакторов, описываемых различными моделями – идеального смешения и идеального вытеснения.

### **Темы 3. Теория биореакторов**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Биореактор и ферментер. Определения, общая характеристика, области применения, типы.
2. Качества идеального биореактора.
3. Разница между биореактором и ферментером.
4. Основные показатели, которые надо контролировать при работе с биореакторами, на примере схемы производства и очищения терапевтических белков.
5. Биореакторы непрерывного действия с мешалкой. Общая характеристика, особенности конструкции, области применения, основные преимущества и недостатки.
6. Биореакторы с барботажной колонной. Общая характеристика, особенности конструкции, области применения, основные преимущества и недостатки.
7. Эрлифтные биореакторы. Общая характеристика, особенности конструкции, области применения, основные преимущества и недостатки.
8. Реакторы с уплотненным слоем. Общая характеристика, особенности конструкции, области применения, основные преимущества и недостатки.
9. Биореактор с псевдооживленным слоем. Общая характеристика, особенности конструкции, области применения, основные преимущества и

недостатки.

10. Фотобиореактор. Общая характеристика, особенности конструкции, области применения, классификация, основные преимущества и недостатки.

11. Вращающийся барабанный биореактор. Общая характеристика, особенности конструкции, области применения, основные преимущества и недостатки.

12. Туманный биореактор. Общая характеристика, особенности конструкции, области применения, основные преимущества и недостатки.

13. Биореактор с иммобилизованными клетками. Общая характеристика, особенности конструкции, области применения, основные преимущества и недостатки.

14. Биореактор с активным илом. Общая характеристика, особенности конструкции, области применения, основные преимущества и недостатки.

15. Мембранный биореактор, погружной мембранный биореактор, биореактор с обратной мембраной. Общая характеристика, особенности конструкции, области применения, основные преимущества и недостатки.

16. Принципы выращивания клеток в биореакторах.

#### *Методические рекомендации*

Целью изучения темы курса является формирование у обучающихся знаний об оборудовании, предназначенном для культивирования микроорганизмов – биореакторов.

Подробно рассматриваются конструкции биореакторов, их типы, области применения, преимущества и недостатки. Изучаются системы аэрации, перемешивания, асептики и пеногашения в биореакторах различных типов.

На примере производства и очищения терапевтических белков изучаются основные параметры, за которыми необходимо следить при выращивании клеток в биореакторах (а именно: содержание растворенного кислорода и углекислого газа; pH; температура; клеточная культура и среда) и основные формулы и коэффициенты (коэффициент массопереноса кислорода; коэффициент массопередачи кислорода; скорость поглощения кислорода; уровень растворенного кислорода при культивировании в биореакторах; уровень растворенного углекислого газа при культивировании в биореакторах; скорость рассеивания энергии).

В общих чертах рассматривается процесс периодического глубинного культивирования микроорганизмов.

Уделяется внимание понятиям масштабирование процесса (многоступенчатые аппараты) и каскад биореакторов, включая области применения аппаратов каждого вида.

Важно уяснить разницу между биореактором и ферментером.

*Вопросы для самоконтроля:*

- 1) Что собой представляют биореакторы и ферментаторы? В чем между ними разница?
- 2) Какие требования предъявляют к биореакторам и к другому оборудованию для реализации биотехнологических процессов?
- 3) Какие типы биореакторов Вам известны?
- 4) Какими характеристиками (системами) должен обладать современный биореактор?
- 5) В чем сущность принципа масштабирования биотехнологических процессов?
- 6) Каким образом в биореакторе осуществляется аэрация?
- 7) Что такое мембрана и пермеат?
- 8) Что такое активный ил?
- 9) В чем сущность иммобилизации клеток и ферментов? Какие преимущества у процесса ферментации иммобилизованными клетками (ферментами) перед свободными?
- 10) Приведите примеры применения биореакторов в промышленности.
- 11) Какими качествами должен обладать идеальный биореактор?
- 12) В чем разница между аэробными и анаэробными биореакторами? Приведите примеры аппаратов обоих типов.

#### **Тема 4. Прикладные теплофизические аспекты в биотехнологии. Передача и трансформация тепловой энергии в биотехнологических процессах**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Общие признаки теплообменных процессов.
2. Теплопроводность.
3. Конвекция.
4. Излучение.
5. Нагревание.
6. Охлаждение.
7. Испарение.
8. Конденсация.

*Методические рекомендации*

Целью изучения темы курса является формирование у обучающихся представлений о теплообменных процессах (нагревание, охлаждение, испарение, конденсация) и способах (формах) передачи тепла (теплопроводность, конвекция, излучение).

Биотехнологические процессы всегда связаны с энергетическим обменом.

Тепловая энергия, как один из видов энергии, может передаваться, трансформироваться и превращаться в другие виды энергии. В биотехнологии для различных целей часто приходится рассчитывать источники тепловой энергии или температурные режимы. В одних случаях нужно оценить время процесса нагрева или охлаждения, в других – потребляемую мощность и предельную температуру. Даже простое термостатирование – это тоже теплообмен. При проектировании и модернизации производств или лабораторий надо знать необходимое количество тепловой энергии для отопления и горячего водоснабжения помещения или целого сооружения.

Подробно представлены основные механизмы переноса и передачи тепловой энергии, в том числе с учетом жизнедеятельности микроорганизмов; рассмотрены современные способы определения теплофизических свойств биотехнологических сред и материалов. На примерах показаны разнообразные теплофизические задачи, решаемые при создании биотехнологий и эксплуатации оборудования.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. В каких единицах измеряется количество теплоты?
2. Что такое глухой пар?
3. Какие преимущества и недостатки электронагрева при подводе тепловой энергии к исследуемому образцу вещества?
4. Что такое поле температур?
5. Какой механизм переноса тепловой энергии преобладает в газах?
6. Что такое граничные условия при постановке тепловой задачи?
7. Что характеризует критерий Рейнольдса?
8. Какое ориентировочное значение имеет коэффициент теплоотдачи при естественной вынужденной конвекции в воде?
9. Что означает понятие сложный теплообмен?
10. Теплопроводность материала теплоизоляции больше или меньше теплопроводности воздуха?
11. Как определять тепловые параметры биотехнологических сред (смеси, суспензии, эмульсии и т. п.)?
12. Что такое коэффициент теплопередачи при работе с биотехнологическими средами?
13. Какие особенности тепловых процессов наблюдаются при работе с микроорганизмами?
14. Что такое теплопродукция в процессе жизнедеятельности микроорганизмов?
15. Как соотносится баланс массы с балансом энергии в биопроцессах?

## Тема 5. Массообменные процессы

*Ключевые вопросы темы:*

1. Общие признаки массообменных процессов.
2. Кинетика массопередачи.
3. Материальный баланс массообменных процессов.
4. Основные законы массопередачи.
5. Массопередача с твердой фазой.
6. Движущая сила массообменных процессов.
7. Формы связи влаги с материалом.
8. Кинетика сушки.
9. Способы сушки и их характеристики.
10. Устройство и принцип действия сушилок.
11. Абсорбция.
12. Адсорбция.
13. Десорбция.
14. Схемы абсорбционных и адсорбционных аппаратов.
15. Ионообменные процессы.
16. Физическая сущность процесса экстрагирования.
17. Схемы установок для экстрагирования из твердой фазы.
18. Кристаллизация, применение процесса в пищевой промышленности.
19. Простая перегонка.
20. Теоретические основы процессов.
21. Ректификация.
22. Ректификационные аппараты.
23. Схемы ректификационных аппаратов.

*Методические рекомендации*

Изучить общие признаки массообменных процессов и их классификацию.

Ознакомиться с процессом перехода вещества (или нескольких веществ) из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия.

Рассмотреть схему элементарного массообменного аппарата, в котором происходит массообмен между двумя движущимися потоками фаз.

Освоить основные законы массопередачи: закон молекулярной диффузии (первый закон Фика), закон массоотдачи (закон Ньютона-Шукарева) и закон массопроводности, а также ознакомиться с критериальными уравнениями конвективной диффузии.

Рассмотреть массопередачу с твердой фазой и движущую силу массообменных процессов.

Изучить процесс сушки в пищевой промышленности. Рассмотреть виды связи влаги с материалом. Ознакомиться с диаграммой состояния влажного воздуха. Освоить кинетику сушки и кривые скорости сушки.

Обратить внимание на способы сушки и их характеристики. Познакомиться с устройством и принципом работы контактных, конвективных, радиационных, сублимационных сушилок и сушилок с применением токов высокой частоты.

Рассмотреть поглощение твердым телом либо жидкостью различных веществ из окружающей среды. Получить общие сведения об абсорбции адсорбции и десорбции (обратном процессе абсорбции). Изучить аппараты, применяемые при абсорбции и адсорбции. Обратить внимание на характеристики наиболее распространенных адсорбентов. Освоить процесс ионного обмена и рассмотреть принцип работы ионообменной установки периодического действия.

Рассмотреть общие сведения процесса экстрагирования. Изучить устройство и схемы установок для экстрагирования из твердой фазы.

Освоить общие сведения и условия кристаллизации, ее методы и устройства кристаллизаторов.

В данной теме необходимо изучить простую и многократную перегонку как способ разделения однородных систем. Рассмотреть процесс ректификации. Понять различие между этими процессами.

Ознакомиться с подразделением по конструкции колонн ректификационных аппаратов, принципами их работы.

Рассмотреть схемы ректификационных аппаратов для разделения многокомпонентных смесей.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Какие признаки объединяют все массообменные процессы?
2. В каком направлении протекают массообменные процессы? Как выражается движущая сила процесса?
3. Каков физический смысл коэффициентов массопередачи и массоотдачи? Какая существует между ними связь?
4. Что характеризуют рабочая и равновесная линии процесса?
5. Как изобразить процесс массопередачи графически?
6. Какими законами описывается перенос вещества из ядра потока к поверхности раздела фаз?
7. Какой закон описывает диффузию вещества в твердом теле?
8. Как можно определить, когда процесс протекает во внутридиффузионной области, а когда во внешнедиффузионной?
9. Почему в расчетной практике пользуются не дифференциальными уравнениями массопереноса, а критериальными?
10. Какой процесс называется сушкой? Назовите ее виды?
11. Перечислите свойства влажного воздуха?
12. В чем отличие конвективных и контактных сушилок?



13. Назовите специальные виды сушки.
14. В чем сущность абсорбции и адсорбции?
15. Что является движущей силой абсорбции?
16. Какие конструкции абсорберов применяют в промышленности?
17. Какие насадки применяются в абсорберах?
18. При каких режимах работают насадочные и барботажные абсорберы?
19. Какие адсорбенты применяются в пищевой промышленности? Какими свойствами они должны обладать?
20. Какие конструкции абсорберов применяются для очистки растворов и газовых веществ?
21. В чем сущность процесса экстрагирования?
22. Назовите аппараты для экстрагирования из твердой фазы.
23. Что называется процессом кристаллизации?
24. Какие факторы оказывают влияние на скорость кристаллизации?
25. Перечислите способы кристаллизации.
26. Перечислите виды кристаллизаторов?
27. Что такое простая перегонка и ректификация?
28. Какие конструкции ректификационных аппаратов применяются в пищевой промышленности?
29. Какие пути интенсификации перегонки и ректификации вы можете привести?

## **Тема 6. Механические процессы**

### *Ключевые вопросы темы:*

1. Основные теоретические положения процесса измельчения.
2. Устройство и принцип действия аппаратов для измельчения.
3. Основные положения процесса сортирования.
4. Устройство и принцип действия аппаратов просеивания.
5. Основные теоретические положения процесса прессования.
6. Прессы для отжатия жидкости из твердого материала.
7. Формование пластического материала.
8. Формовочные прессы.
9. Уплотнение сыпучего материала.

### *Методические рекомендации*

При изучении данной темы курса необходимо усвоить основные теоретические положения процесса измельчения. Особое внимание уделить процессам, на которые подразделяется измельчение при уменьшении размеров

кусков материала. Изучить зависимость класса измельчения от размера кусков, понятие степени измельчения и его способы.

Необходимо ознакомиться с устройством и работой измельчающих аппаратов.

Рассмотреть процесс и цели механического сортирования частиц зернистых материалов. Уделить внимание основным характеристикам сит.

Изучить устройство и принцип действия грохотов, бурата, отсева, триера, и других аппаратов для сортирования. Обратить внимание на виды сортирования.

В данной теме необходимо ознакомиться с обработкой материалов прессованием. Рассмотреть элементы теории процесса отжатия жидкости из твердого материала давлением.

Изучить принципы работы и устройства отжимающих прессов непрерывного и периодического действия.

Ознакомиться с процессом формования пластического материала и формовочными прессами.

Рассмотреть процесс уплотнения сыпучего материала, в частности: брикетирование и гранулирование.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Какие процессы относятся к механическим?
2. Для какой цели производят измельчение материалов?
3. Чем характеризуется эффективность измельчения?
4. По каким показателям различают классы измельчения?
5. Какими способами измельчают материалы?
6. Перечислите общие требования, предъявляемые к измельчающим машинам.
7. На чем основан принцип действия вальцовой, молотковой, дисковой дробилок, резальных машин, центробежной резки, шаровых мельниц?
8. Для какой цели осуществляется процесс разделения сыпучей смеси на фракции?
9. От чего зависят виды сортирования?
10. По каким признакам характеризуются сита?
11. Каков принцип действия грохотов, буратов, триеров?
12. В чем существенное отличие пневматического и гидравлического сортирования материала?
13. На чем основана магнитная сепарация сыпучей смеси?
14. С какой целью проводят прессование?
15. Каков принцип действия прессов для отжатия жидкости из твердого материала?
16. С какой целью, и в каких производствах производят формование

пластических материалов и уплотнение сыпучих материалов

## **Тема 7. Микробиологические процессы**

Ключевые вопросы темы:

1. Основные понятия макрокинетики культивирования, выделения и сушки микроорганизмов.
2. Пеногашение.
3. Стерилизация жидкости и воздуха.
4. Измельчение и фасовка.
5. Аппараты для проведения микробиологических процессов.

В данной теме рассматриваются принципы проведения процессов и работы аппаратов, используемых в биотехнологии. Даются основные положения макрокинетики культивирования, выделения и сушки микроорганизмов. Особое внимание уделяется особенностям протекания массообменных, тепловых, гидродинамических и механических процессов в сочетании с биологическими процессами роста, метаболизма и отмирания микроорганизмов. Изложены закономерности таких процессов, как пеногашение, стерилизация жидкости и воздуха, измельчение и фасовка.

Рассмотрены основные особенности аппаратурного оформления микробиологических производств.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. В виде каких последовательных стадий может быть представлен типовой технологический процесс микробиологического синтеза?
2. Что такое культивирование?
3. Что осуществляется на стадии культивирования?
4. Что называют стерилизацией?
5. Как классифицируются аппараты для стерилизации?
6. Что относится к тепловым способам стерилизации?
7. Что относится к холодным способам стерилизации?
8. Какими могут быть стерилизаторы по структуре рабочего цикла?
9. Какими могут быть стерилизаторы для твердых питательных сред по конструктивному исполнению?
10. Для чего используются многоступенчатые фильтрующие комплексы?
11. Что входит в состав многоступенчатого фильтрующего комплекса?
12. Как работает многоступенчатый фильтрующий комплекс?
13. Что называют глубинными фильтрами?
14. Для чего используются парные автоматизированные фильтрующие комплексы?
15. Что называют ферментаторами?

16. Что называют измельчением?
17. Какие машины для измельчения используются в биотехнологии?
18. Что подвергают гранулированию?
19. Какое оборудование используется для гранулирования в биотехнологии?

## **2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ**

Практические занятия проводятся с целью расширения у студентов знаний, умений и навыков в области процессов и аппаратов биотехнологии и являются важной составной частью учебного процесса изучаемого курса, поскольку помогают лучшему усвоению курса дисциплины, закреплению знаний.

Практические занятия включают в себя два вида работ – подготовку докладов и решение расчетных задач.

Подготовка студентами докладов направлена на формирование навыка работы в команде на примере самостоятельного исследования выбранной темы и её подробной презентации на занятиях. Доклады оформляются в виде презентации по выбранной теме. В презентации и тексте доклада должны быть отражены следующие аспекты:

1. Вид, сущность, принцип действия выбранного процесса, область применения (сделать акцент на область биотехнологии).
2. Аппаратурное оформление процесса. Его преимущества и недостатки.
3. Основные формулы (с подробным пояснением составляющих) для расчета процесса или ключевого аппарата (установки).
4. Пути развития на современном этапе (изучить современные научные или патентные разработки и исследования преимущественно отечественных ученых).

Работа идет в группах по 2–4 человека в зависимости от сложности выбранной тематики. В выступлении должен быть задействован каждый участник команды. Продолжительность выступления 30–40 мин.

Примерные темы:

1. Процессы и аппараты экстракции.
2. Сушильные аппараты.
3. Мембранные процессы и аппараты. Основы мембранной технологии.
4. Процесс фильтрации.
5. Аппараты для перемешивания.
6. Центрифуги, сепараторы, флотаторы, гидроциклоны.
7. Аппараты для дробления и измельчения.

8. Выпарные и кристаллизационные аппараты (кристаллизация и растворение; способы кристаллизации; устройство и принцип действия кристаллизации).

9. Оборудование для пастеризации и стерилизации.

10. Сорбционные процессы. Абсорберы и адсорберы.

11. Аппараты для перегонки и ректификации. Процессы и аппараты для производства дистиллятов, пива и вина.

12. *Своя тема.*

Перечень тем может меняться по решению преподавателя.

Второй вид практических занятий – расчета биотехнологического оборудования.

Тематический план расчетных занятий представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Тематический план практических (расчетных) занятий

Номер темы	Содержание практического (семинарского) занятия
1	Расчет биореакторов
2	Расчет теплообменного оборудования биореакторов
3	Расчет адсорбционного оборудования
4	Расчет сушильного оборудования
5	Определение необходимой поверхности фильтрования водной суспензии
6	Определение мощности электродвигателя и частоты вращения мешалки
7	Расчет теплообменника типа «труба в трубе»
8	Определение расхода греющего пара на однокорпусную выпарную установку непрерывного действия
9	Определение производительности вытяжного вентилятора в сушилке

### **Практическое занятие № 1: Расчет биореакторов.**

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

*Типовые формулы:*

1. Определяют время производственного цикла  $\tau$ , которое равно времени проведения массообменного процесса:

$$\tau = \frac{\rho \cdot r}{2K_c \cdot \Delta C},$$

где  $K_c$  – коэффициент массопереноса, м/с;  $r$  – диаметр частицы, м;  $\rho$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta C$  – разница концентраций при массопереносе.

2. Определяют объем реактора для емкостных сосудов или длину для

трубчатых реакторов:

$$V = \frac{G \cdot \tau}{\rho \cdot \varphi \cdot n}$$

$$L = \omega \tau,$$

где  $\tau$  – время одного цикла, с;  $G$  – массовая производительность, кг/с;  $\varphi$  – коэффициент заполнения реактора;  $\rho$  – плотность реакционной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $n$  – число реакторов;  $\omega$  – скорость реакционной смеси, м/с.

3. Выбирают ближайший больший объем реактора из стандартного ряда.

4. Определяют высоту реактора и слоя жидкости, используя справочные материалы по стандартным реакторам.

5. Вычисляют давление, необходимое для подачи газа в реактор:

$$P = 1,2 \cdot H \cdot \rho \cdot g + P_{\text{атм}},$$

где  $H$  – высота слоя жидкости в реакторе, м;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P_{\text{атм}}$  – атмосферное давление.

6. Выбирают коэффициент расхода газа исходя из типа биореактора:

– 25 – для биореакторов с механическим перемешиванием и мембранных биореакторов;

– 40–50 – для аэрлифтных реакторов;

– 60 – для реакторов с пневматическим перемешиванием.

7. Определяют расход газа, м<sup>3</sup>/ч:

$$V = K \cdot F \cdot P,$$

где  $K$  – коэффициент расхода газа, м;  $F$  – площадь сечения реактора, м<sup>2</sup>;  $P$  – давление газа в атм.

*Варианты заданий по практической работе:*

1. Необходимо определить объем биореактора с пневматическим перемешиванием для получения 60 т/сут 10%-ного раствора хлорида натрия в воде при комнатной температуре.

Производственный цикл включает загрузку воды в течение 20 мин., растворение хлорида натрия и выгрузку раствора со скоростью в течение 10 мин.

Средний размер частиц твердого хлорида натрия составляет 2 мм, скорость массопереноса –  $2 \cdot 10^{-6}$  м/с, разница концентраций при массопереносе – 450 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент заполнения реактора – 0,8, конечная плотность реакционной смеси – 1070 кг/м<sup>3</sup>.

2. Необходимо рассчитать количество биореакторов с механическим перемешиванием объемом  $6,3 \text{ м}^3$  для получения 150 т/сут 10%-ного раствора хлорида натрия в воде при комнатной температуре.

Производственный цикл включает загрузку воды со скоростью  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ , растворение хлорида натрия и выгрузку раствора – со скоростью  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Средний размер частиц твердого хлорида натрия составляет 3 мм, скорость массопереноса –  $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ , разница концентраций при массопереносе –  $350 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент заполнения реактора – 0,8, конечная плотность реакционной смеси –  $1070 \text{ кг/м}^3$ .

3. Необходимо определить производительность аэрлифтного биореактора объемом  $10 \text{ м}^3$  для получения 10%-ного раствора хлорида натрия в воде при комнатной температуре.

Производственный цикл включает загрузку воды со скоростью  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ , растворение хлорида натрия и выгрузку раствора – со скоростью  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Средний размер частиц твердого хлорида натрия составляет 2 мм, скорость массопереноса –  $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ , разница концентраций при массопереносе –  $300 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент заполнения реактора – 0,8, конечная плотность реакционной смеси –  $1070 \text{ кг/м}^3$ .

4. Необходимо определить максимальный размер частиц для получения 80 т/сут 8%-ного раствора хлорида натрия в воде при комнатной температуре в аэрлифтном биореакторе объемом  $10 \text{ м}^3$ .

Производственный цикл включает загрузку воды со скоростью  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ , растворение хлорида натрия и выгрузку раствора – со скоростью  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Скорость массопереноса  $2 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ , разница концентраций при массопереносе –  $400 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент заполнения реактора – 0,8, конечная плотность реакционной смеси –  $1050 \text{ кг/м}^3$ .

5. Необходимо определить минимальную скорость массообмена для получения 50 т/сут 10%-ного раствора хлорида натрия в воде при комнатной температуре в биореакторе с пневматическим перемешиванием объемом  $6,3 \text{ м}^3$ .

Производственный цикл включает загрузку воды со скоростью  $12 \text{ м}^3/\text{ч}$ , растворение хлорида натрия и выгрузку раствора – со скоростью  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Средний размер частиц твердого хлорида натрия составляет 2 мм, разница концентраций при массопереносе –  $300 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент заполнения реактора – 0,8, конечная плотность реакционной смеси –  $1070 \text{ кг/м}^3$ .

*Пример решения по практическое работе:*

Необходимо определить объем биореактора с механическим перемешиванием для получения 40 т/сут 10%-ного раствора хлорида натрия в воде при комнатной температуре.

Производственный цикл включает загрузку воды в течение 15 мин., растворение хлорида натрия и выгрузку раствора со скоростью в течение 15

мин.

Средний размер частиц твердого хлорида натрия составляет 2 мм, скорость массопереноса –  $2 \cdot 10^{-6}$  м/с, разница концентраций при массопереносе –  $300 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент заполнения реактора – 0,8, конечная плотность реакционной смеси  $1070 \text{ кг/м}^3$ .

1. Находим время растворения частиц хлорида натрия в воде:

1а. Для этого находим плотность частиц хлорида натрия в справочнике, составляющую  $2165 \text{ кг/м}^3$ .

$$\tau = (2165 * (1 * 10^{-3})) / (2 * (2 * 10^{-6}) * 300) = 1804 \text{ с.}$$

1б. Находим общее время производственного цикла:

$$\tau = 1804 + 900 + 900 = 3604 \text{ с.}$$

2. Находим объем реактора:

$$V = (40000 * 3604) / (24 * 3600 * 1070 * 0,8 * 1) = 1,947 \text{ м}^3$$

3. Выбираем ближайший по объему стандартный реактор:  $2,0 \text{ м}^3$ .

4. Находим высоту жидкости из справочных данных:  $1,09 \text{ м}^3$ .

5. Находим необходимое давление:

$$P = 1,2 * 1,09 * 1020 * 9,8 + 9,9 * 10^4 = 11,2 \cdot 10^4 \text{ Па, или } 1,12 \text{ атм.}$$

6. Выбираем коэффициент расхода воздуха: 25

7. Находим расход воздуха:

$$V = 25 * 3,14 * 0,72 * 1,12 = 43,1 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Какое оборудование используют для подачи кислорода в биореакторы?

2. Назовите основные преимущества глубинного культивирования микроорганизмов.

3. Каким образом осуществляется перемешивание культуральной жидкости в аэрлифтных биореакторах?

4. В каких биотехнологических процессах используются реакторы, работающие по принципу идеального вытеснения?

5. Назовите основные преимущества и недостатки газовихревых биореакторов.



## Практическое занятие № 2: Расчет теплообменного оборудования биореакторов.

*Цель:* получение практических умений и навыков в области расчетов теплообменного оборудования биореакторов.

*Типовые формулы:*

1. Определяют разницу температур реакционной смеси.

Используется разница между температурой в начале и в конце технологического процесса.

2. Определяют среднюю разницу температуры реакционной смеси и теплоносителя.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}},$$

где  $\Delta t_6$  – наибольшая разница между температурами реакционной смеси и теплоносителя;  $\Delta t_m$  – наименьшая разница между температурами реакционной смеси и теплоносителя.

3. Определяют количество тепла, которое нужно подвести или отвести:

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta t,$$

где  $G$  – масса реакционной смеси, кг;  $c$  – теплоемкость смеси, Дж/(кг\*К);  $\Delta t$  – разница температур в начале и конце процесса.

4. Определяют параметры реактора, например, поверхность теплообмена:

$$F = \frac{Q}{K_t \cdot \Delta t_{cp} \cdot \tau},$$

где  $\tau$  – время процесса, с;  $Q$  – количество тепла, Дж;  $K_t$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>\*К);  $\Delta t_{cp}$  – разница температур между теплоносителем и реакционной средой.

*Варианты заданий по практической работе:*

1. Рассчитать время, необходимое для охлаждения 5000 кг культуральной жидкости с теплоемкостью  $c = 3000$  Дж/(кг\*К), в биореакторе с поверхностью теплообмена 20 м<sup>2</sup> и коэффициентом теплопередачи от теплоносителя к среде –  $K = 200$  Вт/(м<sup>2</sup>\*К).

Начальная температура – 85 °С, конечная – 25 °С, средняя разница температур теплоносителя и среды – 25 °С.

2. Рассчитать площадь поверхности теплообменника, необходимую для охлаждения 7500 кг культуральной жидкости с теплоемкостью  $c = 2500 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  за 2 ч с коэффициентом теплопередачи от теплоносителя к среде –  $K = 360 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

Начальная температура –  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ , конечная –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , средняя разница температур теплоносителя и среды –  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

3. Рассчитать минимальный коэффициент теплопередачи от теплоносителя к среде, необходимый для охлаждения 6500 кг культуральной жидкости с теплоемкостью  $c = 3500 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , в биореакторе с поверхностью теплообмена  $18 \text{ м}^2$  за 1 ч.

Начальная температура –  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , конечная –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , средняя разница температур теплоносителя и среды –  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

4. Рассчитать минимальную разницу температур теплоносителя и среды, необходимую для охлаждения 2700 кг культуральной жидкости с теплоемкостью  $c = 1800 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , в биореакторе с поверхностью теплообмена  $12 \text{ м}^2$  и коэффициентом теплопередачи от теплоносителя к культуральной жидкости –  $K = 450 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  за 1 ч.

Начальная температура –  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ , конечная –  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

5. Рассчитать минимальный коэффициент теплопередачи от теплоносителя к культуральной жидкости, необходимый для нагрева 4000 кг среды с теплоемкостью  $c = 2500 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  в биореакторе с поверхностью теплообмена  $14 \text{ м}^2$  за 1 ч.

Начальная температура –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , конечная –  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ , средняя разница температур теплоносителя и культуральной жидкости –  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Пример решения по практической работе:*

Рассчитать время, необходимое для охлаждения 8000 кг реакционной смеси с теплоемкостью  $c = 4190 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  в реакторе с поверхностью теплообмена  $25 \text{ м}^2$  и коэффициентом теплопередачи от теплоносителя к реакционной смеси –  $K = 350 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

Начальная температура –  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , конечная –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , средняя разница температур теплоносителя и реакционной смеси –  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

1. Определяем разницу температур реакционной смеси:

$$\Delta t = 100 - 20 = 80.$$

2. Определяем количество тепла, которое необходимо отвести:

$$Q = 8000 \cdot 4190 \cdot 80 = 2,68 \cdot 10^9 \text{ Дж}.$$

3. Определяем время необходимое для охлаждения:

$$\tau = 2,68 \cdot 10^{-9} / (350 \cdot 35 \cdot 25) = 8756 \text{ с.}$$

Ответ: 2 ч 26 мин.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Какие виды теплоносителей используются в биотехнологических процессах?
2. Назовите основные преимущества и недостатки рубашек в качестве теплообменного оборудования.
3. Какой вид теплообменного оборудования находит наибольшее применение в случае биореакторов большого объема и почему?
4. Какие различия существуют при определении поверхности теплообмена у внутренних и внешних змеевиков?
5. Назовите параметры, влияющие на интенсивность переноса тепла между теплоносителем и средой.

### **Практическое занятие № 3: Расчет адсорбционного оборудования.**

*Цель:* получение практических умений и навыков в области расчетов адсорбционного оборудования.

*Типовые формулы:*

1. Определяют диаметр адсорбера  $D_a$  по уравнению расхода:

$$D_a = \sqrt{\frac{V_r}{0,785 w_r}},$$

где  $V_r$  – объем парогазовой смеси, проходящей через аппарат,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $w_r$  – скорость парогазовой смеси, отнесенная к свободному сечению аппарата,  $\text{м}/\text{с}$ .

Для адсорберов с неподвижным слоем адсорбента  $w_r = (0,25-0,30) \text{ м}/\text{с}$ .

2. Определяют площадь сечения слоя адсорбента:

$$S = \pi \frac{D^2}{4},$$

где  $D$  – диаметр аппарата,  $\text{м}$ .

3. Определяют высоту единицы переноса:

$$h = \frac{G_r}{\rho_r \cdot S_{\text{сл}} \cdot \beta_y} = \frac{V_r}{S_{\text{сл}} \cdot \beta_y},$$

где  $G_r$  – массовый расход парогазовой смеси,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $S_{\text{сл}}$  – сечение слоя,  $\text{м}^2$ ;

$\beta_y$  – объемный коэффициент массоотдачи в газовой смеси,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\rho_r$  – плотность парогазовой смеси,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

4. Определяют высоту слоя адсорбента:

$$H = h \cdot N_y,$$

где  $N_y$  – число единиц переноса;  $h$  – высота единицы переноса, м.

5. Определяют объем слоя адсорбента  $V_{\text{ад}}$ :

$$V_{\text{ад}} = H \cdot S_{\text{сп}}.$$

*Варианты заданий по практической работе:*

1. Необходимо определить диаметр и высоту слоя адсорбента в адсорбере периодического действия для улавливания паров воды из воздуха на цеолите, если число единиц переноса равно 5, расход парогазовой смеси составляет  $3600 \text{ м}^3/\text{ч}$ , ее скорость –  $0,25 \text{ м}/\text{с}$ , а объемный коэффициент массопереноса –  $0,5 \text{ с}^{-1}$ .

2. Необходимо определить диаметр и объем слоя адсорбента в адсорбере периодического действия для улавливания паров воды из воздуха на цеолите, если число единиц переноса равно 6, расход парогазовой смеси составляет  $5700 \text{ м}^3/\text{ч}$ , ее скорость –  $0,3 \text{ м}/\text{с}$ , а объемный коэффициент массопереноса –  $0,8 \text{ с}^{-1}$ .

3. Необходимо определить диаметр и максимальную производительность адсорбера периодического действия ( $\text{т}/\text{ч}$ ) с объемом слоя адсорбента  $3,5 \text{ м}^3$  для улавливания паров метанола из воздуха на активном угле, если число единиц переноса равно 6, скорость парогазовой смеси составляет  $0,3 \text{ м}/\text{с}$ , плотность –  $1 \text{ кг}/\text{м}^3$ , а объемный коэффициент массопереноса –  $2 \text{ с}^{-1}$ .

4. Необходимо определить диаметр и максимальную производительность адсорбера периодического действия ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) с объемом слоя адсорбента  $1,2 \text{ м}^3$  для улавливания паров метанола из воздуха на активном угле, если число единиц переноса равно 5, скорость парогазовой смеси составляет  $0,3 \text{ м}/\text{с}$ , а объемный коэффициент массопереноса –  $3 \text{ с}^{-1}$ .

5. Необходимо определить диаметр и объем слоя адсорбента в адсорбере непрерывного действия для извлечения муравьиной кислоты из смеси  $\text{CO}_2$  и азота на молекулярных ситах, если число единиц переноса равно 5, расход парогазовой смеси составляет  $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$ , ее скорость –  $0,25 \text{ м}/\text{с}$ , а объемный коэффициент массопереноса –  $0,7 \text{ с}^{-1}$ .

*Пример решения по практической работе:*

Необходимо определить диаметр и высоту слоя адсорбента в адсорбере периодического действия для улавливания паров воды из воздуха на цеолите, если число единиц переноса равно 4, расход парогазовой смеси составляет 2400 м<sup>3</sup>/ч, ее скорость 0,3 м/с, а объемный коэффициент массопереноса 1,5 с<sup>-1</sup>.

1. Находим диаметр адсорбера:

$$D_a = (2400/3600 * 0,785 * 0,3)^{0,5} = 1,682 \text{ м.}$$

2. Находим площадь сечения слоя:

$$S_{\text{сл}} = 3,14 * 1,68^2 / 4 = 2,216 \text{ м}^2.$$

3. Находим высоту единицы переноса:

$$h = 2400 / (2,216 * 1,5 * 3600) = 0,20 \text{ м.}$$

4. Находим высоту слоя адсорбента:

$$H = 4 * 0,2 = 0,8 \text{ м.}$$

5. Находим объем слоя адсорбента:

$$V = 0,8 * 2,216 = 1,77 \text{ м}^3.$$

Ответ: выбираем адсорбер диаметром 1,8 м со слоем адсорбента 80 см.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Какие материалы нашли широкое применение в качестве адсорбентов и почему?
2. Назовите основные преимущества и недостатки адсорбции в псевдооживленном слое.
3. Как определяется скорость подачи газа в адсорберах различного типа?
4. Каким образом осуществляется регенерация адсорбентов в аппаратах различного типа?
5. Опишите основные конструктивные особенности адсорберов непрерывного действия.

#### **Практическое занятие № 4: Расчет сушильного оборудования.**

*Цель:* получение практических умений и навыков в области расчетов сушильного оборудования.

*Типовые формулы:*

1. По диаграмме Рамзина находят разницу во влагосодержании воздуха на

входе и выходе из сушилки.

2. Определяют количество удаляемой влаги:

$$W = \frac{G \cdot (w_1 - w_2)}{(1 - w_2)},$$

где  $G$  – производительность сушилки по влажному материалу, кг/с;  
 $w_1, w_2$  – начальная и конечная влажность материалы, масс. доля.

3. Определяют расход воздуха в сушилке:

$$V_r = \frac{W}{\Delta x \cdot \rho},$$

где  $W$  – количество удаляемой влаги, кг/с;  $\Delta x$  – разница во влагосодержании воздуха на входе и выходе из сушилки (определяется по диаграмме Рамзина);  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

4. Определяют диаметр сушилки  $D_a$  по уравнению расхода:

$$D_a = \sqrt{\frac{V_r}{0,785 w_r}},$$

где  $V_r$  – расход воздуха в сушилке, м<sup>3</sup>/с;  $w_r$  – скорость подачи воздуха, м/с.

*Варианты заданий по практической работе:*

1. Рассчитать пневматическую сушилку (диаметр аппарата и расход воздуха) при следующих сходных данных:

– производительность по конечному материалу (древесные опилки) – 300 кг/ч;

– начальное влагосодержание продукта – 0,2 кг/кг;

– конечное влагосодержание продукта – 0,05 кг/кг;

– начальные параметры воздуха: температура – 20 °С, влажность – 70 %;

– конечная температура воздуха в калорифере – 150 °С;

– конечная влажность воздуха в сушилке – 50 %;

– скорость подачи воздуха в сушилку равна 6,5 м/с.

2. Рассчитать распылительную сушилку (диаметр аппарата и расход

воздуха) при следующих исходных данных:

- производительность по исходному материалу – 1200 кг/ч;
- начальное влагосодержание продукта – 0,35 кг/кг;
- конечное влагосодержание продукта – 0,01 кг/кг;
- начальные параметры воздуха: температура – 20 °С, влажность – 60 %;
- конечная температура воздуха в калорифере – 120 °С;
- конечная влажность воздуха – 90 %;
- скорость подачи воздуха в сушилку равна 0,8 м/с.

3. Рассчитать барабанную сушилку (диаметр аппарата и расход воздуха) при следующих сходных данных:

- производительность по конечному материалу – 360 кг/ч;
- начальное влагосодержание продукта – 0,1 кг/кг;
- конечное влагосодержание продукта близко к нулю;
- исходное влагосодержание воздуха – 0,01 кг/кг, а конечное – 0,05 кг/кг;
- скорость подачи воздуха в сушилку равна 0,3 м/с.

4. Рассчитать однокамерную сушилку с кипящим слоем (диаметр аппарата и расход воздуха) при следующих исходных данных:

- производительность по исходному материалу – 400 кг/ч;
- начальное влагосодержание продукта – 0,18 кг/кг;
- конечное влагосодержание продукта – 0,03 кг/кг;
- начальные параметры воздуха: температура – 20 °С, влажность – 60 %;
- конечная температура воздуха в калорифере – 110 °С;
- конечная температура воздуха в сушилке – 50 °С.

5. Рассчитать пневматическую сушилку (диаметр аппарата и расход воздуха) при следующих сходных данных:

- производительность по конечному материалу – 150 кг/ч;
- начальное влагосодержание продукта – 0,4 кг/кг;
- конечное влагосодержание продукта – 0,08 кг/кг;
- начальные параметры воздуха: влагосодержание – 0,005;
- конечная температура воздуха в калорифере – 150 °С;
- конечная влажность воздуха в сушилке – 50 %;
- скорость подачи воздуха в сушилку равна 10,5 м/с.

*Пример решения по практическое работе:*

Рассчитать однокамерную сушилку с кипящим слоем (диаметр аппарата и расход воздуха) при следующих исходных данных: производительность по исходному материалу – 650 кг/ч; начальное влагосодержание продукта – 0,17 кг/кг; конечное влагосодержание продукта – 0,01 кг/кг; начальные параметры воздуха: температура – 20 °С, влажность – 50 %; конечная температура воздуха в калорифере – 120 °С; конечная температура воздуха в сушилке – 60 °С; скорость подачи воздуха в сушилку равна 0,5 м/с.

1. По диаграмме Рамзина находим разницу во влагосодержании воздуха на входе и выходе из сушилки:

$$\Delta x = 0,0271 \text{ кг/кг.}$$

2. Определяем количество удаляемой влаги:

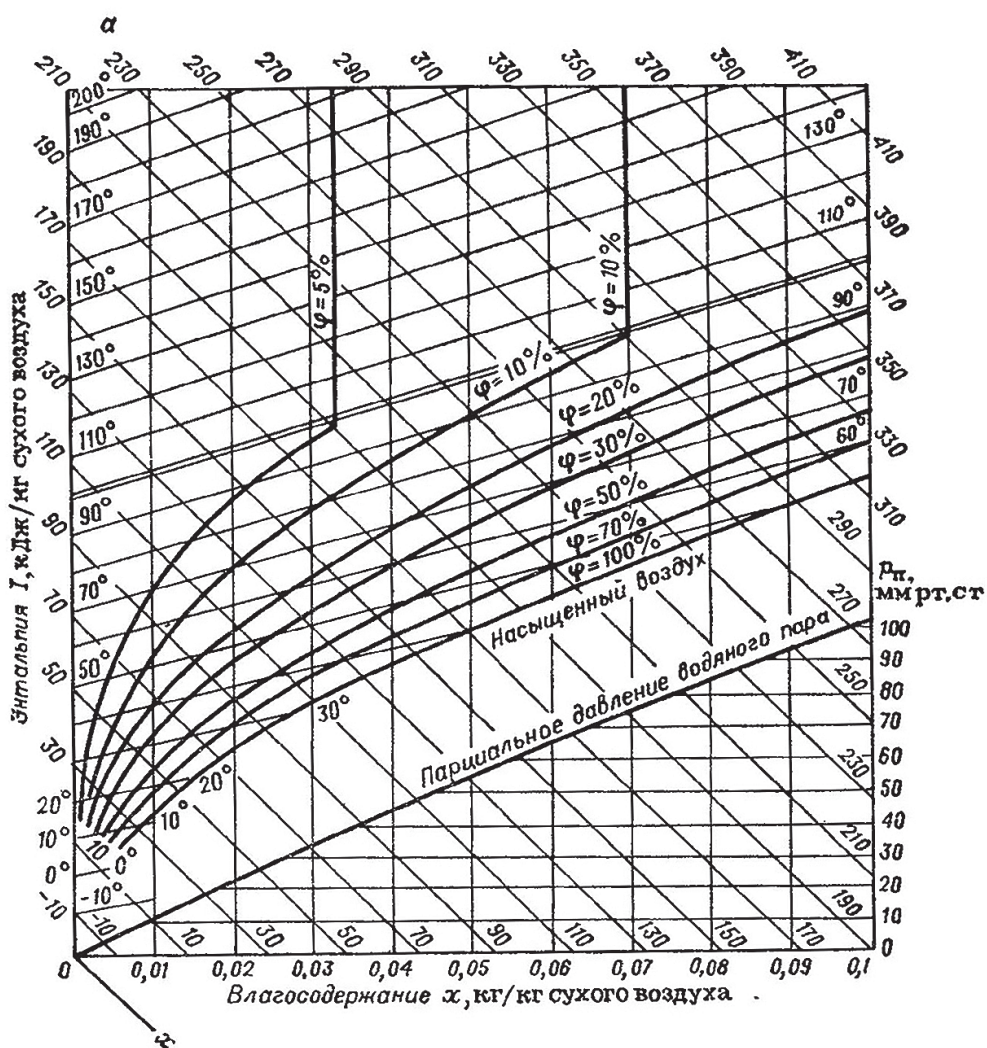
$$W = 650 \cdot (0,17 - 0,01) / (1 - 0,01) = 105,05 \text{ кг.}$$

3. Определяем расход воздуха в сушилке:

$$V_r = 105,05 / 0,0271 \cdot 0,97 = 4000 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

4. Находим диаметр сушилки:

$$D_a = (4000 / 3600 \cdot 0,785 \cdot 0,5)^{0,5} = 1,682 \text{ м.}$$



Вопросы для самоконтроля:



1. Какие факторы учитываются при выборе сушилок конвективного типа?
2. Как определяется скорость подачи сушильного агента в конвективных сушилках различных конструкций?
3. Назовите основные преимущества и недостатки сушилок конвективного типа.
4. Каким образом определяется влагосодержание воздуха на выходе из сушилки с помощью диаграммы Рамзина?
5. Какой тип сушилок можно использовать для получения твердых продуктов из эмульсий?

### Практическое занятие № 5: Определение необходимой поверхности фильтрования водной суспензии

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

*Задание по практической работе:*

Определить необходимую поверхность фильтрования 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  $1,5 \text{ м}^3$  воды на  $1 \text{ м}^3$  осадка. Динамическая вязкость промывных вод  $\mu_{\text{пр}}$ , а динамическая вязкость фильтрата  $\mu_{\phi}$ . Плотность жидкости  $\rho_{\text{ж}} 1000 \text{ кг/м}^3$ .

Варианты заданий представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Варианты заданий

№ варианта	$x_c$	$U$	$V_{\phi}$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	$\Delta P \cdot 10^{-5}$ , Па	$r_o \cdot 10^{-12}$ , $\text{м}^{-2}$	$R_{\Pi} \cdot 10^{-10}$ , $\text{м}^{-1}$	$\rho_{т.ф}$ , $\text{кг/м}^3$	$\mu_{\text{пр}}$ , 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  $\rho_{т.ч}$  – 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 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,  $\text{м}^{-2}$

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

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

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

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

где  $W$  – расход воды на 1  $\text{м}^3$  осадка,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

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 ( $m_{\text{пр}} = 3$ ). Продолжительность полного цикла фильтрования для барабанно вакуум-фильтра непрерывного действия  $T$ , с

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

12. Необходимая площадь фильтрования  $F$ ,  $\text{м}^2$

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

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 № 6: 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 представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Варианты заданий

№ варианта	$d_m$ , м	$b_m$ , 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  $\rho_c$ ,  $\text{кг/м}^3$

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

где  $\rho_{т.ч}$  – плотность твердых частиц,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $x_{т.ф}$  – 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 (см. приложение А, таблица 1);

б) для пропеллерной и турбинной мешалок

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

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

Осевая скорость перемешивания суспензии

$$\omega_o = \frac{mV}{60F_{o.в}}$$

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

Объем аппарата

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

Поверхность, отметаема винтом,

$$F_{o.в} = 0,8 \frac{\pi d_M^2}{4}$$

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 (см. приложение Б, рисунок 2)  $K_N = f(Re_M)$ , находим значение коэффициента мощности  $K_N$  для модельной мешалки.

Величина  $K_N$ , полученная из рисунка 2, 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 приложении А, таблица 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

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

*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 № 7: 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  $t_{в1}$  до  $t_{в2}$  горячим конденсатом, движущимся в межтрубном пространстве.

Температура конденсата начальная  $t_{к1}$ , конечная  $t_{к2}$ . 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 представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Варианты заданий

№ варианта	$t_{в1}, ^\circ\text{C}$	$t_{в2}, ^\circ\text{C}$	$t_{к1}, ^\circ\text{C}$	$t_{к2}, ^\circ\text{C}$
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 5 (приложение А) находим теплоемкость  $c_{в}$ , плотность  $\rho_{в}$ , теплопроводность  $\lambda_{в}$ , вязкость  $\mu_{в}$  и критерий Прандля  $Pr_{в}$  для средней температуры воды и конденсата.

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

$$Q = Wc_{в}(t_{в2} - t_{в1})x_1,$$

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

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

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

4. Скорость движения сред

Скорость воды

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

Скорость конденсата в межтрубном пространстве

$$\omega_{к} = \frac{G_{к}}{\rho_{к} f}.$$

где площадь сечения межтрубного пространства

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

5. Режим движения сред определяется по числу Рейнольдса



$$Re_B = \frac{\omega_B d_{\text{внутр}} \rho_B}{\mu_B}$$

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

$$\alpha_2 = \frac{Nu \lambda_B}{d_{\text{внутр}}}$$

Аналогично рассчитывается критерий Нуссельта для конденсата, где

$$Re = \frac{\omega_k d_{\text{э}} \rho_k}{\mu_k}$$

При эквивалентном диаметре межтрубного пространства

$$d_{\text{э}} = D_{\text{внутр}} - d_{\text{нар}}$$

Тогда коэффициент теплоотдачи для конденсата

$$\alpha_1 = \frac{Nu \lambda_k}{d_{\text{э}}}$$

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).

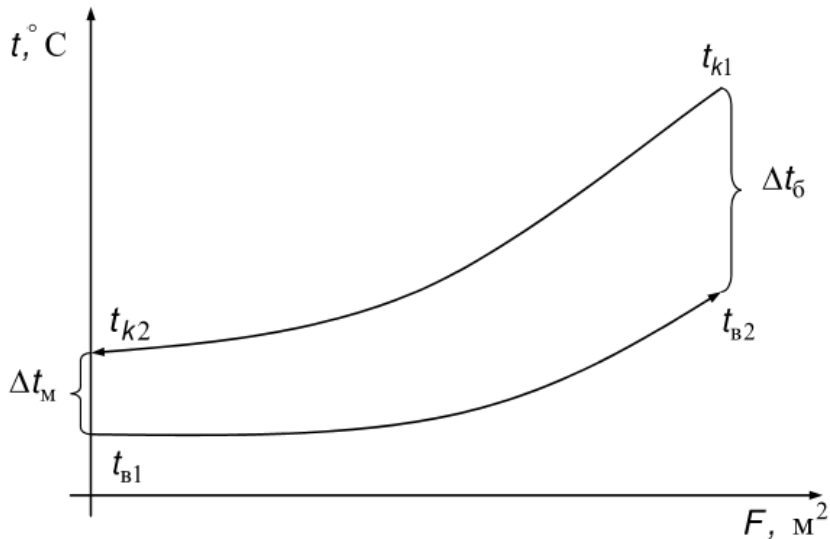


Рисунок 1. График изменения температуры носителей по площади аппарата:  
 $\Delta t_6$  — большая разность температур;  $\Delta t_M$  — меньшая разность температур

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

$$\Delta t = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_M}{2}$$

#### 9. Число секций в теплообменнике

$$n = \frac{F}{\pi d_{cp} l}$$

где  $d_{cp} = \frac{d_H + d_B}{2}$

*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 № 8: 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  $G_n$ , кг/ч, раствора концентрацией  $x_n$  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); теплопотери  $x$  5 % ( $x = 1,05$ ). Высота аппарата  $H = 2$  м. Рассчитать температурную депрессию.

Варианты заданий представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Варианты заданий

№ варианта	$G_n$ , кг/ч	$x_n$ , %	$x_k$ , %	$P_{г.п.}$ , 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

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

где  $c_p$  – средняя теплоемкость раствора, Дж/(кг·К);  $G_n$  – 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  $c_v$  – теплоемкость 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

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

где  $x_n$  и  $x_k$  – начальная и конечная концентрации сухих веществ, %.

Находим энтальпию греющего и вторичного пара по таблице насыщенных паров (Приложение А, таблица 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 (см. приложение А, таблица 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 (см. приложение А, таблица 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 № 9: 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 ( $t_0$ , °С;  $\phi$ , %) 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  $t_2$ ,  $t_m$ , °С. Удельный расход теплоты на 13 % больше, чем в теоретической сушилке.

Определить производительность вытяжного вентилятора  $V$ , м<sup>3</sup>/с, расход греющего пара, имеющего влажность  $x$ , % и площадь поверхности нагрева калорифера  $F$ , м<sup>2</sup>, если коэффициент теплопередачи в нем равен  $K = 30$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Варианты заданий представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Варианты заданий

№ 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 (см. приложение Б, рисунок 2) находим: влагосодержание  $x_0$  кг/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

4.

$$L = Wl.$$

5. Удельный объем влажного воздуха

6.

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

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

$$V = L v_{\text{уд}}.$$

6. Удельный расход теплоты в теоретической сушилке

$$q_T = \frac{i_2 - i_0}{x_2 - x_0} = l(i_2 - i_0).$$

7. Удельный расход теплоты для реальной сушилки

$$q = \Delta q_T.$$

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 (см. приложение Б, рисунок 2).

9. Расход теплоты в калорифере

$$Q = Wq.$$

10. Расход греющего пара

$$G_{г.п} = \frac{Q}{rx''},$$

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.

$$\Delta t_6 = t_{п} - t_0,$$

$$\Delta t_M = t_{п} - t_1,$$

где  $\Delta t_6$  – большая разность температур, °С;  $\Delta t_M$  – меньшая разность температур, °С;  $t_{п}$  – определяют по давлению  $P_{гп}$  (или по формуле  $t_{п} = t_1 + 20$  °С).

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

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

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

$$\Delta t = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_M}{2}.$$

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.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арсеньева, Т. П. Технологическое оборудование биотехнологических производств: учеб.-метод. пособие / Т. П. Арсеньева, А. А. Брусенцев, Н. В. Яковченко. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. – 93 с.
2. Лаптева, Е. А. Гидродинамика барботажных аппаратов / Лаптева Е.А., Лаптев А.Г. – Казань: Центр инновационных технологий, 2017. –190 с.
3. Долгунин, В. Н. Биотехнологические процессы и аппараты: учеб. пособие / В. Н. Долгунин, В. А. Пронин. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – 80 с.
4. Дульнев, Г. Н. Теория тепло- и массообмена: учеб. пособие / Г. Н. Дульнев. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.
5. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов / А. Г. Касаткин. – 12-е изд., стер., дораб. – Москва: Альянс, 2005. – 750 с. – ISBN 5-98535-018-5.
6. Конструирование биореакторов будущего пищевых технологий (научно-прикладные аспекты): учебник для вузов / С. Т. Антипов, С. А. Бредихин, А. И. Ключников [и др.]; под редакцией В. А. Панфилова. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 524 с.
7. Миронов, М. А. Методы расчета оборудования биотехнологических производств: учеб.-метод. пособие / М. А. Миронов, М. И. Токарева; науч. ред. М. Н. Иванцова; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 47 с.
8. Попов, Ю. В. Химические реакторы. (Теория химических процессов и расчет реакторов): учеб. пособие / Ю. В. Попов, Т. К. Корчагина, В. С. Лобасенко. – 2-е изд., перераб. и допол.; ВолГТУ. – Волгоград, 2015. – 240 с.
9. Процессы и аппараты биотехнологии: ферментационные аппараты: учеб. пособие для вузов / А. Ю. Винаров, Л. С. Гордеев, А. А. Кухаренко, В. И. Панфилов; под ред. В. А. Быкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2019. – 274 с.
10. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов / под ред. А. Н. Острикова. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2012. – 613 с.
11. Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В. Н. Тепляшин, Л. И. Ченцова, В. Н. Невзоров, И. В. Мацкевич; Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2022. – 273 с.
12. Тепловые процессы: учеб. пособие / А.Г. Липин [и др.]; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2018. – 80 с.
13. Прикладные теплофизические аспекты в биотехнологии: учеб. пособие / А. В. Федоров, Е. В. Тамбулатова, П. Е. Баланов [и др.]. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО. 2024 – 88 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А

Таблица 1

Тип мешалки	$C$	$x$	$y$
Лопастная и якорная	46,4	0	1
Пропеллерная и турбинная	20,6	1	2

Таблица 2

Номер кривой на рисунке 2	Тип мешалки	Отношение размеров мешалки к ее диаметру при $\frac{H}{D} = 1$		
		$D/d_m = \alpha$	$b/d_i = \beta$	$S/d_m$
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 3

Тип мешалки	$a$	$h$	$k$	$p$
Лопастная, якорная	1,1	0,6	0,3	—
Пропеллерная, турбинная	0,93	0,6	—	1,5

Таблица 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 парообразо- вания <i>r</i> , кДж/кг
0,01	6,6	131,60	0,00760	27,7	2506 2518	2478 2465
0,015	12,7	89,64	0,01116	53,2	2526 2533	2455 2447
0,02	17,1	68,27	0,01465	71,6	2539 2548	2440 2429
0,025	20,7	55,28	0,01809	86,7	2556 2562	2420 2413
0,03	23,7	46,53	0,02149	99,3	2573 2581	2400 2390
0,04	28,6	35,46	0,02820	119,8	2588 2596	2382 2372
0,05	32,5	28,73	0,03481	136,2	2607 2620	2358 2336
0,06	35,8	24,19	0,04133	150,0	2632 2642	2320 2307
0,08	41,1	18,45	0,05420	172,2	2650 2657	2296 2286
0,10	45,4	14,96	0,06686	190,2	2663 2668	2278 2270
0,12	49,0	12,60	0,07937	205,3	2677 2686	2264 2249
0,15	53,6	10,22	0,09789	224,6	2693 2703	2237 2227
0,20	59,7	7,977	0,1283	250,1	2709 2710	2217 2208
0,30	68,7	5,331	0,1876	287,9	2730 2744	2171 2141
0,40	75,4	4,072	0,2456	315,9	2754 2768	2117 2095
0,50	80,9	3,304	0,3027	339,0	2769 2776	2075 2057
0,60	85,5	2,785	0,3590	358,2	2780 2784	2040 2024
0,70	89,3	2,411	0,4147	375,0	2787 2790	2009
0,80	93,0	2,128	0,4699	389,7	2793 2795	1995
0,90	96,2	1,906	0,5246	403,1	2796 2798	1984 1968
1,0	99,1	1,727	0,5790	415,2	2799 2800	1965 1943
1,2	104,2	1,457	0,6865	437,0	2801 2802	1931 1920
1,4	108,7	1,261	0,7931	456,3	2801 2793	1909 1898
1,6	112,7	1,113	0,898	473,1	2780 2763	1800 1715
1,8	116,3	0,997	1,003	483,6	2746 2726	1637 1565
2,0	119,6	0,903	1,107	502,4	2705 2684	1497
3,0	132,9	0,6180	1,618	558,9	2638 2592	1432
4,0	142,9	0,4718	2,120	601,1	2540 2483	1369
5,0	151,1	0,3825	2,614	637,7	2400 2100	1306
6,0	158,1	0,3222	3,104	667,9		1183
7,0	164,2	0,2785	3,591	694,3		1061
8,0	169,6	0,2454	4,075	718,4		934
9,0	174,5	0,2195	4,536	740,0		799
10	179,0	0,1985	5,037	759,6		617
11	183,2	0,1813	5,516	778,1		0
12	187,1	0,1668	5,996	795,3		
13	190,7	0,1545	6,474	811,2		
14	194,1	0,1438	6,952	826,7		
15	197,4	0,1346	7,431	840,9		
16	200,4	0,1264	7,909	854,8		
17	203,4	0,1192	8,389	867,7		
18	206,2	0,1128	8,868	880,3		
19	208,8	0,1070	9,349	892,5		
20	211,4	0,1017	9,83	904,2		
30	232,8	0,06802	14,70	1002		
40	249,2	0,05069	19,73	1079		
50	262,7	0,04007	24,96	1143		
60	274,3	0,03289	30,41	1199		
70	284,5	0,02769	36,12	1249		
80	293,6	0,02374	42,13	1294		

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 $i'$ , кДж/кг	Удельная энтальпия пара $i''$ , кДж/кг	Удельная теплота парообразо- вания $r$ , кДж/кг
90	301,9	0,02064	48,45	1337		
100	309,5	0,01815	55,11	1377		
120	323,1	0,01437	69,60	1455		
140	335,0	0,01164	85,91	1531		
160	345,7	0,00956	104,6	1606		
180	355,4	0,00782	128,0	1684		
200	364,2	0,00614	162,9	1783		
225	374,0	0,00310	322,6	2100		

Таблица 5 – Основные теплофизические свойства воды

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

Таблица 6 – Основные физические свойства молока

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

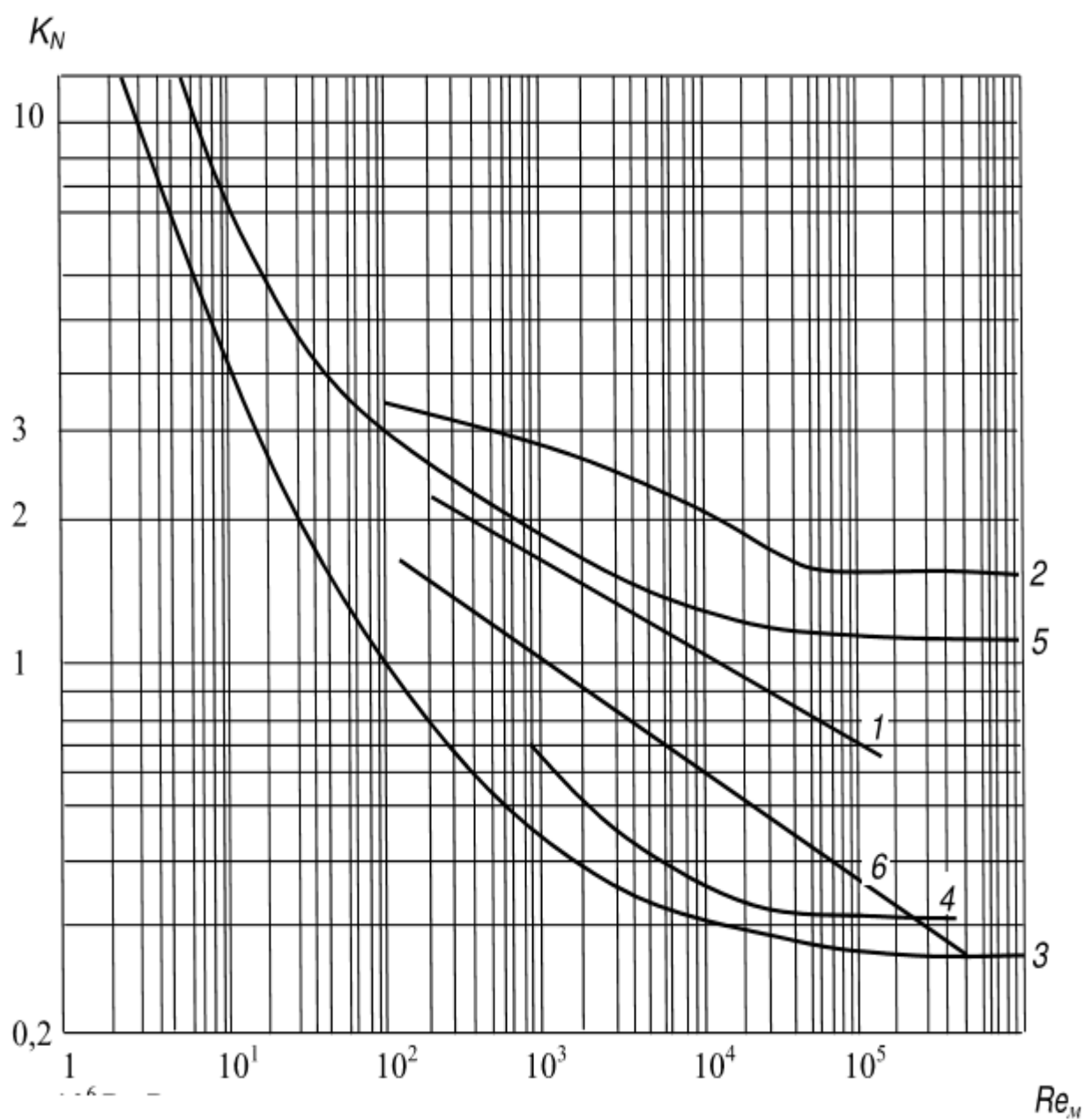


Рисунок 2. Графическая зависимость  $K_N = f(Re_M)$  для различных типов мешалок:  
 1 – лопастная; 2 – лопастная в аппарате со змеевиком; 3 – пропеллерная;  
 4 – пропеллерная в диффузоре

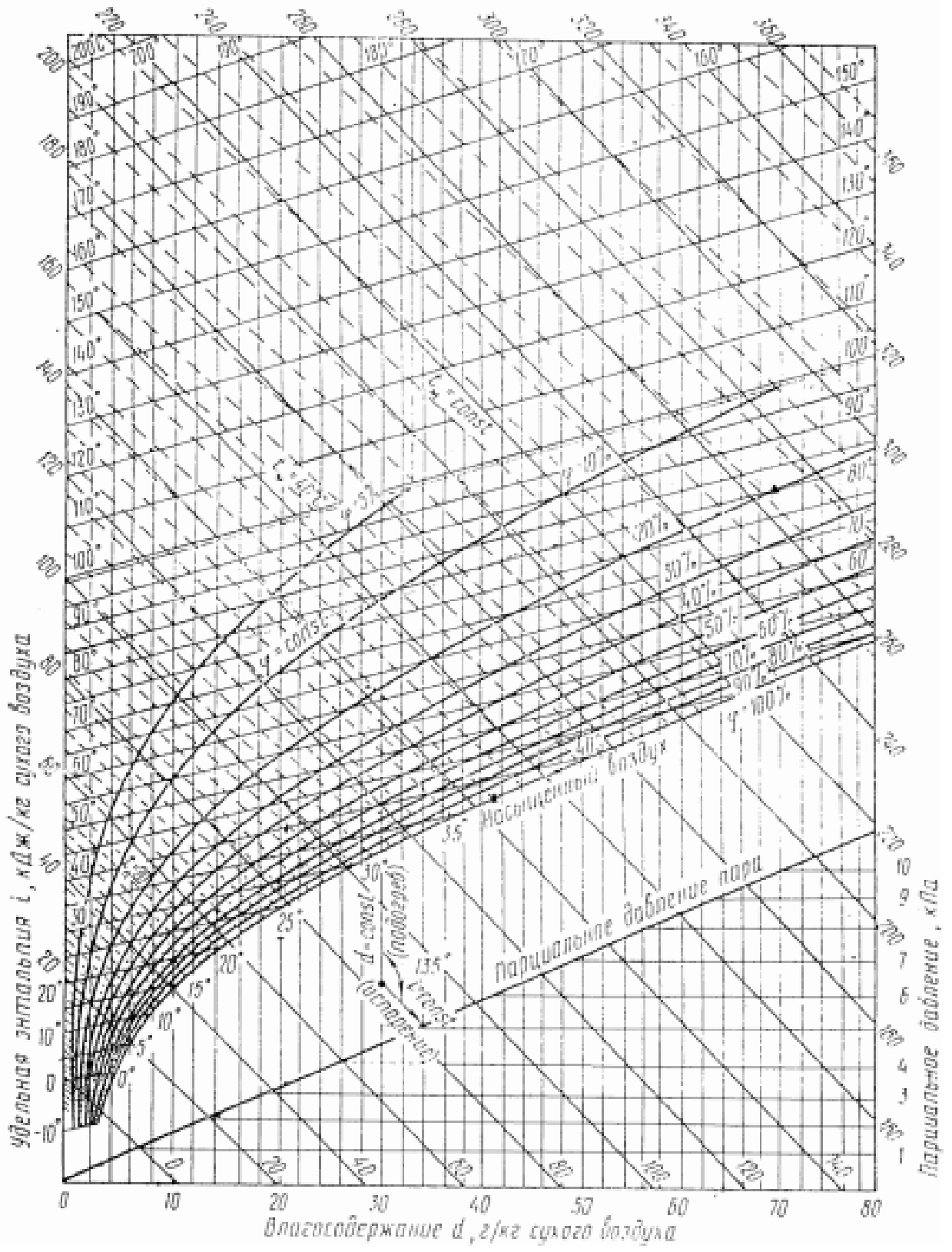


Рисунок 3. Диаграмма Рамзина для влажного воздуха ( $d = 1000x$ )

Локальный электронный методический материал

Виктория Александровна Мельникова

## ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ BIOTEХНОЛОГИИ

*Редактор С. Кондрашова  
Корректор Т. Звада*

Уч.-изд. л. 3,9. Печ. л. 3,4.

Издательство федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»,  
236022, Калининград, Советский проспект, 1