

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

**В. А. Мельникова**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ  
БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины для студентов,  
обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки  
19.03.01 Биотехнология,  
профиль программы «Пищевая биотехнология»

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»

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

Мельникова, В. А.

Технологическое оборудование биотехнологических производств: учеб.-методич. пособие по изучению дисциплины для студ. бакалавриата по напр. подгот. 19.03.01 Биотехнология, профиль программы «Пищевая биотехнология» / В. А. Мельникова. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2025. – 47 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины «Технологическое оборудование биотехнологических производств» представлены учебно-методические материалы по освоению тем лекционного курса, включающие план лекций по каждой изучаемой теме, материалы по подготовке к практическим занятиям, рекомендуемую литературу.

Табл. 9, рис. 1, список лит. – 11 наименований

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» 31 января 2025 г., протокол № 1

УДК 664

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2025 г.  
Мельникова В. А., 2025 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	
Методические рекомендации по изучению дисциплины.....	
Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям..	
Библиографический список.....	
Приложения.....	

## ВВЕДЕНИЕ

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

Дисциплина «Технологическое оборудование биотехнологических производств» относится к Профилирующему модулю ОПОП ВО по направлению 19.03.01 Биотехнология, профиль программы «Пищевая биотехнология».

Целью освоения дисциплины «Технологическое оборудование биотехнологических производств» является формирование знаний в области биотехнологического оборудования, осуществляющего переработку биотехнологического сырья и пищевых продуктов; умений, навыков правильной и безопасной эксплуатации, которая возможна только при знании принципов работы, конструкций, технических и технологических возможностей данного вида техники.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

*знать:*

- устройство, назначение и принцип действия оборудования, применяемого при организации биотехнологических процессов;
- возможные последствия при возникновении аварий в результате неправильной эксплуатации оборудования;

*уметь:*

- систематизировать и обобщать информацию, касающуюся оборудования для организации биотехнологических процессов с использованием справочной и научно-технической литературы, а также интернет-ресурсов;
- использовать современные достижения науки и передовой технологии, касающиеся технологического оборудования при организации биотехнологических процессов;
- анализировать оборудование с точки зрения эксплуатации, производительности, ресурсосбережения и экологически-вредных факторов;
- составлять технологические схемы биотехнологических процессов с использованием современного технологического оборудования;

*владеть:*

- методиками выбора и расчета технологического оборудования биотехнологических производств;
- методиками рациональной эксплуатации биотехнологического оборудования.

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

Для успешного освоения дисциплины, студент должен активно работать на лекционных и практических занятиях, организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность.

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 по практическим работам.

К оценочным средствам промежуточной аттестации относятся тестовые задания по темам курса.

Промежуточной аттестацией по завершению курса является дифференцированный зачет.

К дифференцированному зачету допускаются студенты:

- посещавшие все лекционные и практические занятия;
- получившие положительные оценки («отлично» или «хорошо») по тестовым заданиям;
- положительно аттестованные по практическим занятиям.

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	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
Критерий	«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	Может найти необходимую информацию	Может найти, интерпретировать и систематизировать	Может найти, систематизировать необходимую

Система оценок  Критерий	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
	информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	в рамках поставленной задачи	необходимую информацию в рамках поставленной задачи	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 в учебно-методическом пособии по изучению дисциплины приводится краткое содержание каждой темы занятия, перечень вопросов для подготовки к практическим занятиям и организации

# 1 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Осваивая курс «Технологическое оборудование биотехнологических производств», студент должен научиться работать на лекциях, практических занятиях 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 и практические занятия.

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 основному биотехнологическому оборудованию. 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.

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.

План лекционных занятий (ЛЗ) представлен в таблицах 2, 3.

Таблица 2 – Тематический план лекционных занятий

Номер темы	Содержание лекционного занятия
1	Лабораторное оборудование
2	Оборудование для получения чистых веществ
3	Фармакологическое оборудование
4	Оборудование для производства БАДов
5	Оборудование для транспортировки сырья и готовой продукции
6	Оборудование подготовительных операций
7	Емкостное технологическое оборудование
8	Оборудование для тепловой обработки
9	Сушильное оборудование
10	Холодильное оборудование
11	Прочее биотехнологическое оборудование

Ключевые вопросы каждой темы:

– описание применяемого оборудования, устройство, назначение и его классификации;

– принцип работы оборудования и ключевые аспекты;

– принцип расчета и/или подбора оборудования;

– техника безопасности при работе с изучаемым оборудованием.

Допускается использование на лекциях видеоматериала для более глубокого понимания работы оборудования и техники безопасности.

Таблица 3 – Содержание дисциплины

Номер темы	Содержание лекционного занятия	Темы и/или вопросы для обсуждения и самоконтроля	Литература
1	Лабораторное оборудование	Виды лабораторного оборудования	–8 и др.]
2	Оборудование для получения чистых веществ	Оборудование хроматографических методов. Ультрафильтрационное оборудование. Оборудование для масс-спектрометрии. Аналитическое оборудование для фармакопейного контроля качества готовой продукции и сырья	[7–8 и др.]
3	Фармакологическое оборудование	Смеситель. Гомогенизатор. Дезинтегратор. Измельчитель. Мельницы. Сито. Сушилка. Установки водоподготовки. Жиротопки и варочные котлы. Реакторы. Автоклавы. Диссольтверы. Экстракторы. Фармацевтические бины и колонны. Оборудование для упаковки/наполнения сыпучих, жидких, густых продуктов, твердых лекарственных форм, сашет. Наполнение аэрозольных баллонов	7–9 и др.]
4	Оборудование для производства БАДов	Линии по производству суппозиториев. Капсуляторы. Микрокапсулирование. Дражировочная машина. Тубонаполнительное оборудование. Вакуумные реакторы, миксеры, гомогенизаторы. Оборудование для смешивания и	–9 и др.]

Номер темы	Содержание лекционного занятия	Темы и/или вопросы для обсуждения и самоконтроля	Литература
		гранулирования	
5	Оборудование для транспортировки сырья и готовой продукции	<p>Назначение и устройство оборудования для транспортировки сырья и готовой продукции.</p> <p>Виды транспортировки.</p> <p>Оборудование для учета сырья, поступающего в жидком виде.</p> <p>Оборудование для учета сырья, поступающего в твердом и сыпучем состоянии.</p> <p>Правила эксплуатации и назначение планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания оборудования для транспортировки сырья.</p> <p>Какие принципы использованы в работе объемных счетчиков, индукционных расходомеров, тензометрических устройств, весового оборудования для учета сырья и готовой продукции?</p> <p>Назначение и периодичность государственной поверки оборудования для учета сырья и готовой продукции.</p> <p>Оборудование для внутризаводской транспортировки сырья и готовой продукции</p>	[1–2, 10–11 и др.]
6	Оборудование подготовительных операций	<p>Назначение и устройство различных фильтров, центрифуг, центробежных очистителей, магнитных улавливателей. Области</p>	[10–11 и др.]

Номер темы	Содержание лекционного занятия	Темы и/или вопросы для обсуждения и самоконтроля	Литература
		применения данного вида оборудования, его технологические характеристики и правила эксплуатации	
7	Емкостное технологическое оборудование	Емкостное оборудование для хранения сырья и готовой продукции. Изотермические резервуары, обычные резервуары, резервуары для осуществления биотехнологических процессов. Назначение, устройство и принцип действия, технические характеристики резервуаров. Перемешивающие устройства резервуаров. Приборы и средства контроля количества и качества сырья или продукта в резервуаре. Влияние конструктивных особенностей резервуаров на качество и сроки хранения сырья, полуфабрикатов и готовой продукции до упаковки. Основные типы резервуаров, используемые в технологических процессах	[5–7 и др.]
8	Оборудование для тепловой обработки	Назначение, устройство и принцип действия пластинчатых пастеризационных установок, трубчатых установок, роторных скребковых теплообменников, варочных котлов, жарочных печей. Устройство и принцип работы различных стерилизаторов: роторных, гидростатических, автоклавов, поточных	[1–2, 10–11 и др.]

Номер темы	Содержание лекционного занятия	Темы и/или вопросы для обсуждения и самоконтроля	Литература
		стерилизаторов для жидких сред. Технические характеристики вышеуказанного оборудования и его применение в технологических линиях	
9	Сушильное оборудование	Назначение, устройство и принцип действия распылительных сушилок. Сушка в среде инертных тел. Сублимационные сушильные установки периодического, полунепрерывного и непрерывного действия. Техника безопасности при монтаже и эксплуатации технологического оборудования	[1–2, 10–11 и др.]
10	Холодильное оборудование	Классификация холодильных установок. Холодильные витрины. Холодильные шкафы. Бонеты. Морозильные лари. Горки холодильные. Холодильные камеры. Льдогенераторы. Столы холодильные	[1–2, 10–11 и др.]
11	Прочее биотехнологическое оборудование	По данной теме предполагается подбор и обсуждение оборудования по темам ВКР	[1–11]

## 2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Практические занятия проводятся с целью расширения у студентов знаний, умений и навыков в области биотехнологического оборудования 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 по теме исследования и решение расчетных задач.

Подготовка студентами докладов направлена на формирование навыка самостоятельного исследования выбранной темы и её подробной презентации на занятиях. Доклады оформляются в виде презентации, рекомендуемая продолжительность выступления 30 мин.

В качестве тем выступают реальные биотехнологические процессы по выбору студента. В презентации и тексте доклада должно быть отражено следующее:

1. Описание выбранного биотехнологического процесса.

.....  
Виды, сущность, принцип работы всего задействованного в выбранном процессе. Основные формулы (с подробным пояснением составляющих) для расчета подбираемого оборудования.

Примерные темы по цветовой матрице биотехнологий в современном мире:

1. Красная биотехнология.
2. Зеленая биотехнология.
3. Белая биотехнология.
4. Желтая биотехнология.
5. Синяя биотехнология.
6. Коричневая биотехнология.
7. Черная биотехнология.
8. Фиолетовая биотехнология.
9. Золотая биотехнология.
10. Серая биотехнология.

На первом занятии студент выбирает область/цвет биотехнологии, и определяется с конкретным продуктом, исследованием которого займется.

Второй вид практических занятий – расчет некоторого биотехнологического оборудования.

Тематический план расчетных занятий представлен в таблице 4.

Таблица 4 – 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:*

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.

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 м<sup>3</sup> для получения 150 т/сут 10%-ного раствора хлорида натрия в воде при комнатной температуре.

Производственный цикл включает загрузку воды со скоростью 10 м<sup>3</sup>/ч, растворение хлорида натрия и выгрузку раствора – со скоростью 20 м<sup>3</sup>/ч.

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

3. Необходимо определить производительность аэрлифтного биореактора объемом 10 м<sup>3</sup> 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  $2 \text{ мм}$ , 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  $80 \text{ т/сут}$   $8\%$ -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  $50 \text{ т/сут}$   $10\%$ -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  $2 \text{ мм}$ , 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 практической работе:*

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

Производственный цикл включает загрузку воды в течение  $15 \text{ мин.}$ , растворение хлорида натрия и выгрузку раствора со скоростью в течение  $15 \text{ мин.}$

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

1. Находим время растворения частиц хлорида натрия в воде:

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

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

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 м<sup>3</sup>.

4. Находим высоту жидкости из справочных данных: 1,09 м<sup>3</sup>.

5. Находим необходимое давление:

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

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  $c = 2500$  Дж/(кг\*К) за 2 ч с коэффициентом теплопередачи от теплоносителя к среде –  $K = 360$  Вт/(м<sup>2</sup>\*К).

Начальная температура – 75 °С, конечная – 20 °С, средняя разница температур теплоносителя и среды – 30 °С.

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

Начальная температура – 80 °С, конечная – 20 °С, средняя разница

температур теплоносителя и среды – 15 °С.

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 °С, конечная – 25 °С.

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 °С, конечная – 95 °С, средняя разница температур теплоносителя и культуральной жидкости – 30 °С.

*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 °С, конечная – 20 °С, средняя разница температур теплоносителя и реакционной смеси – 35 °С.

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:

где  $N_y$  – число единиц переноса;  $h$  – высота единицы переноса,  $\text{м}$ .

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

$$V_{ад} = H \cdot S_{сл}$$

*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 –  $0,25 \text{ м/с}$ , 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 –  $0,3 \text{ м/с}$ , а объемный коэффициент массопереноса –  $0,8 \text{ с}^{-1}$ .

3. Необходимо определить диаметр и максимальную производительность адсорбера периодического действия (т/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  $0,3 \text{ м/с}$ , плотность –  $1 \text{ кг/м}^3$ , 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  $0,3 \text{ м/с}$ , 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 –  $0,25 \text{ м/с}$ , 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  $2400 \text{ м}^3/\text{ч}$ , ее скорость  $0,3 \text{ м/с}$ , а объемный коэффициент массопереноса  $1,5 \text{ с}^{-1}$ .

1. Находим диаметр адсорбера:

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

2. Находим площадь сечения слоя:

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

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;  
– 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 практической 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:

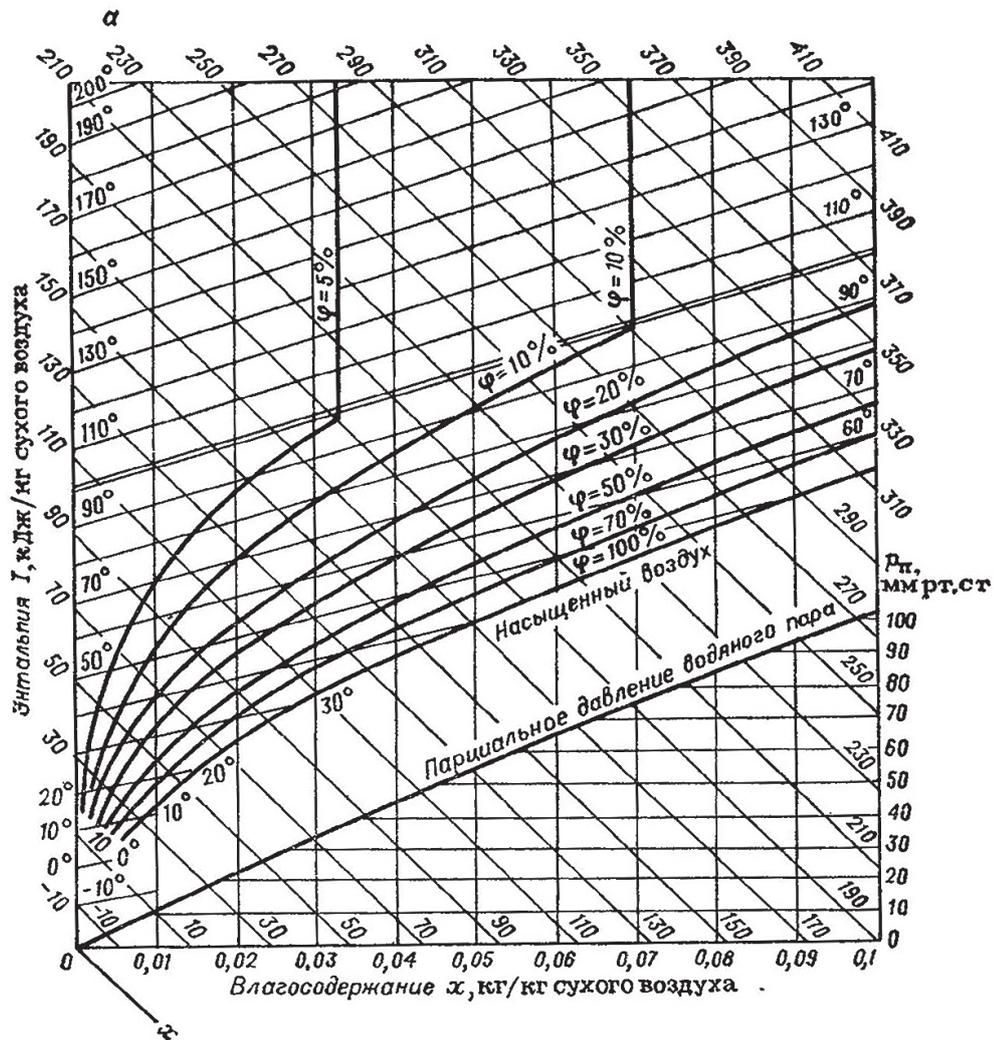
$$W = 650 \cdot (0,17 - 0,01) / (1 - 0,01) = 105,05 \text{ кг.}$$

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:

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



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 фильтрации водной суспензии

Цель: получение практических умений и навыков в области расчетов

гидромеханических процессов.

*Задание по 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  $R_{п}$ , 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  $\mu_{пр}$ , а динамическая вязкость фильтрата  $\mu_\phi$ . Плотность жидкости  $\rho_{ж} 1000 \text{ кг/м}^3$ .

Варианты заданий представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Варианты заданий

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

### Расчётные формулы

1. Количество получаемого фильтрата, кг/с

$$G$$

где  $V_\phi$  – объёмная производительность по фильтрату,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\rho_\phi$  – плотность фильтрата,  $\text{кг/м}^3$

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

где  $\rho_{т.ф}$  – плотность твердых частиц,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости (воды) при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;  $x_{т.ф}$  – содержание твердой фазы.

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

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

где  $U$  – влажность осадка.

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

*хт.ф.*

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

$$G_{oc} = G_{т.ф} (1 - U).$$

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

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

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

$$x_{oc} = G_{oc} \rho_{oc} \cdot V_{ф}$$

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

=

где  $h_{oc}$  – высота слоя осадка, м  $h_{oc} = \frac{x_{oc}}{\rho_{oc}}$

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

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

$$\tau_{ф} = \frac{\mu_{ф} r_0 x_{oc} v^2}{2 \Delta P} + \frac{\mu_{ф} R_{п} v}{\Delta P},$$

где  $\mu_{ф}$  – 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>

$$r_{пром} = \mu_{пр} \cdot r_0 \mu_{ф}$$

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

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

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

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 ( $m_{ф} = 6$ ) и в зоне промывки 3 секции ( $m_{пр} = 3$ ). Продолжительность полного цикла фильтрования для барабанно вакуум-фильтра непрерывного действия  $T$ , с



		–							Пропеллерная в диффузоре
						–	–	–	Лопастная в аппарате со змеевиком
						–	–	–	Якорная
		–							Пропеллерная в диффузоре
						–	–	–	Якорная
						–	–	–	Лопастная в аппарате со змеевиком
		–							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

) б

)

е 4. Частота вращения мешалки, об/с:

е

п а) для лопастной и якорной мешалок

и

=

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

,

1 б) для пропеллерной и турбинной мешалок

,

=

$$\omega = Scos 2\theta$$

т

о

$$\mu c = 0,59 \mu ж (0,77 - \varphi)^2$$

ж

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

$$\omega_0 = \frac{mV}{60F_{o.B}}$$

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

Объем аппарата

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

Поверхность, отмечаемая винтом,

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

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  $\frac{b}{a}$  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

$$f_H = HD.$$

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

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

*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 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 7.

Таблица 7 – 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 Прандтля  $Pr_{в}$  для средней температуры воды и конденсата.

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

=

где  $x_1$  – коэффициент, учитывающий потери тепла при нагревании,

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,  $x_2 = 0,97$

4. Скорость движения сред

Скорость воды

$$\omega_B = 4 \cdot W_{\rho B} / \pi d_{\text{внутр}}^2.$$

Скорость конденсата в межтрубном пространстве

$$\omega_K = G_{K\rho K} / f.$$

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

$$\text{Re}_B = \frac{\omega_B d_{\text{внутр}} \rho_B}{\mu_B}.$$

Аналогично находится критерий Рейнольдса для конденсата.

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

Находим критерий Нуссельта для воды:

при  $\text{Re} > 10\,000$

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

при  $10\,000 > \text{Re} > 2320$

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

при  $\text{Re} < 2320$

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

тогда коэффициент теплоотдачи для воды

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

Аналогично рассчитывается критерий Нуссельта для конденсата, где

$$\text{Re} = \frac{\omega_K d_3 \rho_K}{\mu_K}.$$

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)

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

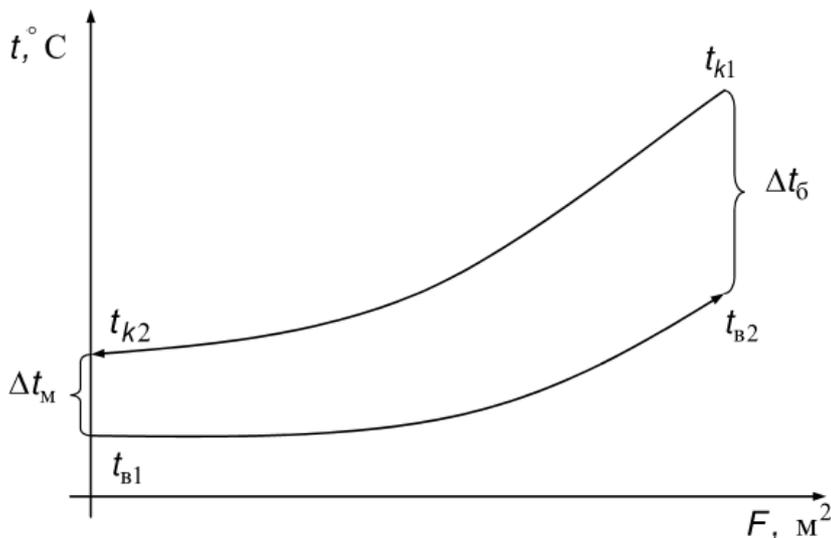


Рисунок 1 – График изменения температуры носителей по площади аппарата:  $\Delta t_б$  – большая разность температур;  $\Delta t_м$  – меньшая разность температур

Если  $\Delta t_б/\Delta t_м > 2$ , то среднюю разность температур находят как среднелогарифмическую разность

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

Если  $\Delta t_б/\Delta t_м \leq 2$ , то  $\Delta t$  находят как среднеарифметическую разность

$$\Delta t = \frac{\Delta t_б + \Delta t_м}{2}$$

9. Число секций в теплообменнике

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

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

°C.

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 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); теплотери  $x$  5% ( $x = 1,05$ ). Высота аппарата  $H = 2$  м. Рассчитать температурную депрессию.

Варианты заданий представлены в таблице 8.

Таблица 8 – 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

=

$$G_n c_p (t_{кип} - t_1) + W (i_{вп} - c_v t_{впк}) i_{гп} - c_k t_k x,$$

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

=

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  $t_k$

$$t_k = t_{гп} - (2...3),$$

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

Температура вторичного пара  $t_{впк}$

$$t_{впк} = t_{вп} - (2...3).$$

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

Удельный расход пара  $d$ , кг/кг

=

Температурная депрессия равна  $DW$ .

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

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

Физико-химическую депрессию рассчитываем по формуле:

$$T1 = 0,38 \cdot e^{0,05} + 0,045 \cdot x_k,$$

где  $x_k$  – конечная концентрация продукта, %.

Гидростатическая депрессия рассчитывается следующим образом.

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

=

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

$$T_2 = t_{об} - t_{в.п.}$$

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

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

$$t_{кип} = t_{в.п} + \Delta T'$$

=

$$T_1 + \Delta T_2.$$

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 работе:*

В сушилке, работающей по нормальному сушильному варианту,

у

д

а

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

е

т

с

$$K = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Варианты заданий представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Варианты заданий

№ варианта	$t_0, \text{°C}$	$\varphi_0,$	$t_2, \text{°C}$	$t_m, \text{°C}$	$x, \%$
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  $P_{\text{п}}$ , Па.

2. Удельный расход сухого воздуха

$$= x_2 - x_0.$$

1. Расход сухого воздуха, кг/с

=

2. Удельный объем влажного воздуха

$$v_{\text{уд}} = RB(T - P_{\text{п}}),$$

Г

Д  
е

$RB$  – газовая постоянная для воздуха,  $RB = 287$  Дж/(кг·К);  
 $T$  – температура воздуха на выходе из сушильной камеры, К;  $P$  – давление паровоздушной смеси (атмосферное давление), Па;  $P_{\text{п}}$  – парциальное давление водяного пара на выходе из сушильной камеры, Па;

=

$v_{\text{уд}}$ .

6. Удельный расход теплоты в теоретической сушилке

$$q_T = i_2 - i_0 x_2 - x_0 = l(i_2 - i_0).$$

7. Удельный расход теплоты для реальной сушилки

=

$$q_T.$$

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

$$i_1 = i_0 + ql.$$

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

9. Расход теплоты в калорифере

=

10. Расход греющего пара

$$G_{г.п} = Q r x'',$$

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. Александровский, С. А. Расчет основного оборудования биотехнологических и пищевых производств: учеб. пособие / С. А. Александровский; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2021. – 112 с.
2. 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.
3. Белокурова, Е. С. Биотехнология продуктов растительного происхождения: учеб. пособие для вузов / Е. С. Белокурова, О. Б. Иванченко. – 3-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 232 с.
4. Биотехнологии биополимеров: учеб. пособие / И. В. Горькова, И. Н. Гагарина, И. А. Гнеушева [и др.]. – Орел, 2023. – 177 с.
5. Долгунин, В. Н. Биотехнологические процессы и аппараты: учеб. пособие / В. Н. Долгунин, В. А. Пронин. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – 80 с.
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. Оборудование в промышленной технологии лекарственных средств: учеб.-метод. пособие / Н. С. Голяк [и др.]. – Минск: БГМУ, 2021. – 131 с.
9. Процессы и аппараты биотехнологии: ферментационные аппараты: учеб. пособие для вузов / под редакцией В. А. Быкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2019. – 274 с.
10. Процессы и аппараты пищевых производств / под ред. А. Н. Острикова. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2012. – 613 с.
11. Процессы и аппараты пищевых производств: учеб. пособие / В. Н. Тепляшин, Л. И. Ченцова, В. Н. Невзоров, И. В. Мацкевич; Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2022. – 273 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А

Таблица 1

Тип мешалки	$C$	$x$	$y$
Лопастная и якорная Пропеллерная и турбинная			

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			—
2	Лопастная в аппарате со змеевиком			—
3	Пропеллерная		—	
4	Пропеллерная в диффузоре		—	
5	Турбинная закрытая		—	—
6	Якорная			—

Таблица 3

Тип мешалки	$a$	$h$	$k$	$p$
Лопастная, якорная				—
Пропеллерная, турбинная			—	

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

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

Таблица 5 – Основные теплофизические свойства воды

<i>t</i> , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	<i>c</i> , Дж/(м·К)	$\mu \cdot 10^3$ , (Н·с)/м <sup>2</sup>	Pr	$\sigma \cdot 10^3$ , Н/м

Таблица 6 – Основные физические свойства молока

<i>t</i> , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	<i>c</i> , Дж/(м·К)	$\mu \cdot 10^3$ , (Н·с)/м <sup>2</sup>	Pr	$\sigma \cdot 10^3$ , Н/м

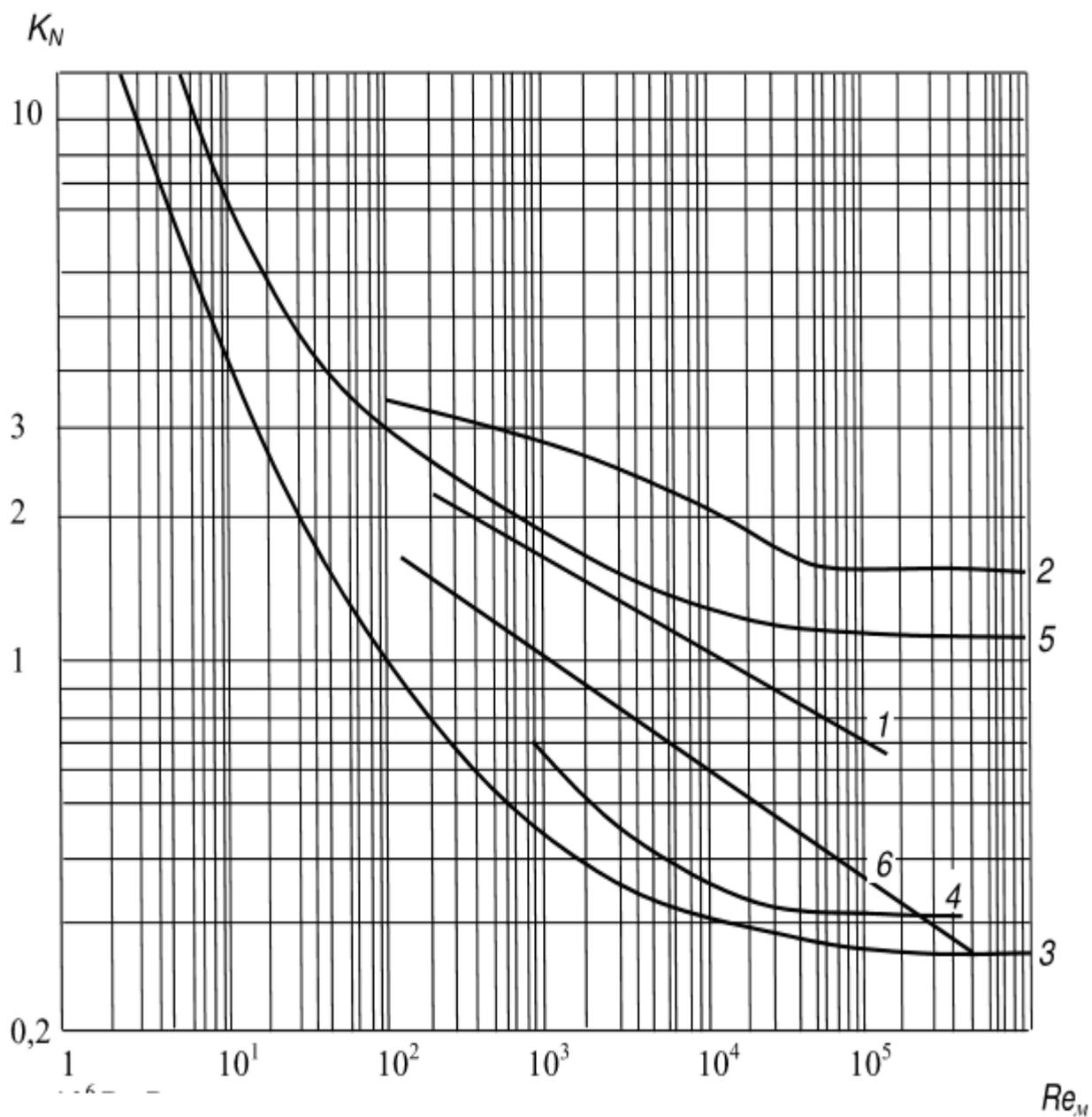


Рисунок 2 – Графическая зависимость  $K_N = f(Re_M)$  для различных типов мешалок:  
 1 – лопастная; 2 – лопастная в аппарате со змеевиком; 3 – пропеллерная;  
 4 – пропеллерная в диффузоре

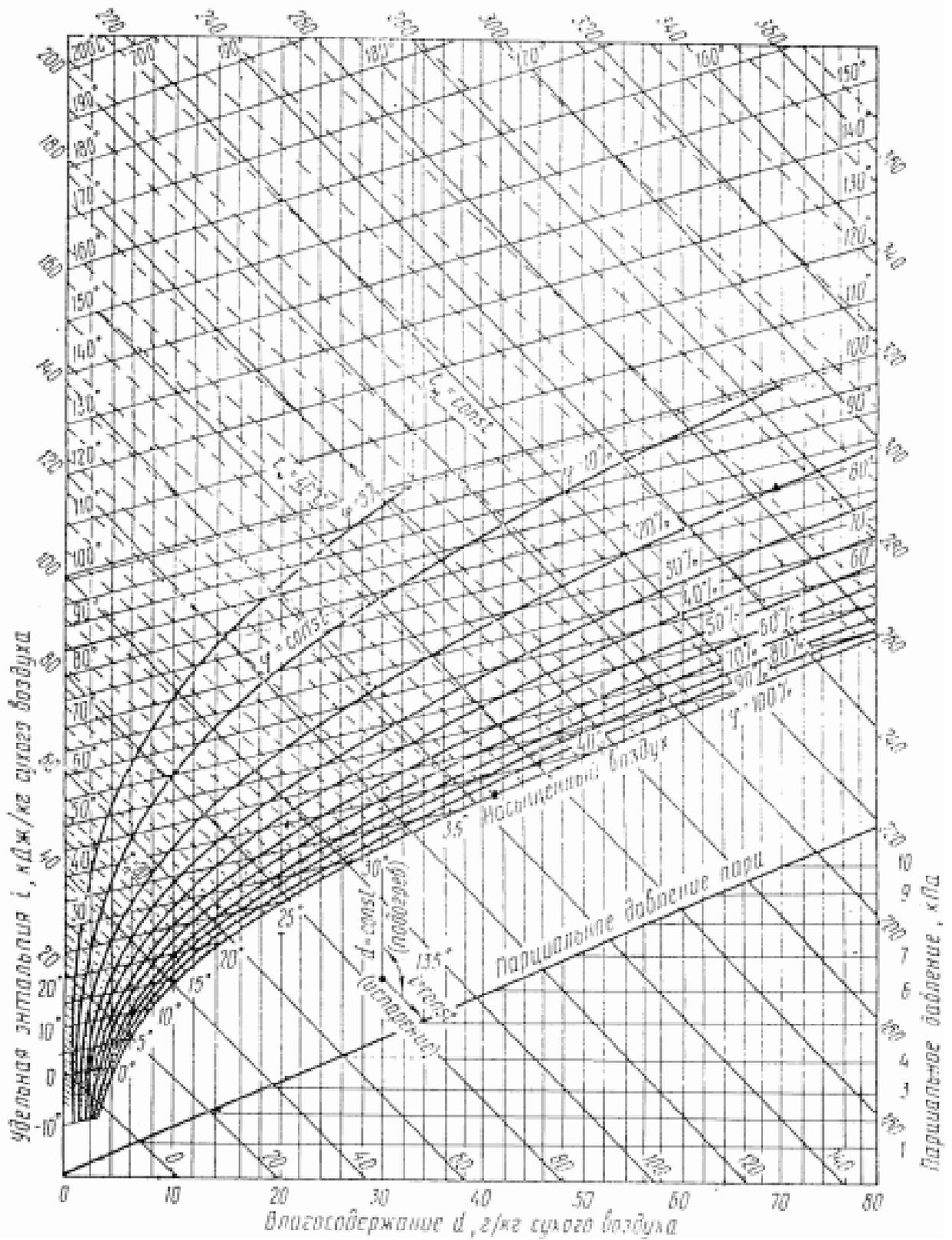


Рисунок 3 – Диаграмма Рамзина для влажного воздуха ( $d = 1000x$ )

Локальный электронный методический материал

Виктория Александровна Мельникова

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ  
БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

*Редактор С. Кондрашова*  
*Корректор Т. Звада*

Уч.-изд. л. 3,5. Печ. л. 3,0.

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