

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФГОУ ВО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Кафедра «Технические системы в АПК»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«Технологические процессы и оборудование для хранения и переработки продукции
животноводства и птицеводства»
Модуль первый. Процессы и аппараты.

Лабораторный практикум для студентов направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия,
направленность "Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственной
продукции", 3 курс, очная форма обучения

Кострома 2020

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФГОУ ВО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Кафедра «Технические системы в АПК»

В.Н. Кузнецов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«Технологические процессы и оборудование для хранения и переработки продукции
животноводства и птицеводства»
Модуль первый. Процессы и аппараты.

Лабораторный практикум для студентов направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия,
направленность "Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйствен-
ной продукции", 3 курс, очная форма обучения

Кострома 2020

УДК 664(075)
ББК 36.81-5я7

СОСТАВИТЕЛИ:

В.Н. Кузнецов, к.с.-х.н., доцент кафедры «Механизация животноводства и переработка сельскохозяйственной продукции» ФГОУ ВО КГСХА

Редактор:

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Ответственный за выпуск, Н.А. Ключков

Рекомендовано к изданию

Методической комиссией инженерно-технологического факультета ФГОУ ВО Костромская ГСХА, протокол №

Лабораторный практикум Лабораторный практикум по дисциплине «Технологические процессы и оборудование для хранения и переработки продукции животноводства и птицеводства ,модуль первый «Процессы и аппараты»: лабораторный практикум для студентов направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия, направленность "Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции", 3 курс, очная форма обучения/ сост. Кузнецов В.Н – Кострома: КГСХА 2020.–117 с.

Издание содержит методику выполнения лабораторных работ по дисциплине «Технологические процессы и оборудование для хранения и переработки продукции животноводства и птицеводства , модуль первый «Процессы и аппараты»

УДК 664(075)
ББК 36.81-5я7

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	5
Рекомендации по ведению журнала лабораторных работ по курсу «Процессы и аппараты».....	7
Правила техники безопасности и охраны труда при выполнении студентами лабораторных работ.....	8
Работа 1. Исследование процессов измельчения в вальцовой дробилке.....	10
Работа 2. Исследование процессов перемешивания.....	17
Работа 3. Исследование процессов осаждения.....	24
Работа 4. Исследование процессов фильтрования.....	32
Работа 5. Определение коэффициента теплопроводности сыпучих материалов.....	42
Работа 6. Исследование процессов нагревания.....	49
Работа 7. Экспериментальное определение основных параметров влажного воздуха.....	58
Работа 8. Определение характеристик центробежного вентилятора.....	68
Работа 9. Исследование процессов выпаривания.....	75
Работа 10. Исследование процессов резания.....	86
Работа 11. Исследование процессов смешивания.....	94
Работа 12. Устройство и рабочий процесс экструдера.....	103
Работа 13. Исследование процессов сортирования сыпучих материалов.....	109
Список рекомендованных источников.....	117

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Процессы и аппараты пищевых производств» является специальным переходным курсом от общеинженерного цикла дисциплин к специальному для инженеров-технологов и механиков пищевых производств.

Современное учение о процессах и аппаратах опирается на прочный фундамент химии, физики, математики, ряда инженерных и экономических дисциплин — механики, теплотехники, электротехники, технической кибернетики, материаловедения, промышленной экономики и других смежных областей знания, которые являются базой курса.

Процессы пищевой технологии в большинстве своем значительно сложны и зачастую представляют собой сочетание гидродинамических, тепловых, массообменных (диффузионных), биохимических и механических процессов.

По существу, курс является теоретической основой пищевой технологии, позволяющей проанализировать и рассчитать процесс, определить оптимальные параметры, разработать и рассчитать аппаратуру для его проведения. В нем изучаются закономерности масштабного перехода от лабораторных процессов и аппаратов к промышленным. Знание этих закономерностей необходимо для проектирования и создания современных многотоннажных промышленных процессов пищевой технологии.

Учение о процессах и аппаратах возникло в начале нашего века, одновременно и независимо в нашей стране и в США. В России основы науки о процессах и аппаратах были заложены известными учеными-инженерами А.К. Крупским в Петербургском технологическом институте и И.А. Тищенко в Московском высшем техническом училище. При этом был использован богатый фактический материал, накопленный в промышленности, и то огромное идейное наследие в области химической технологии, которое оставил Д.И. Менделеев.

Большой вклад в разработку отдельных разделов науки о процессах и аппаратах внесли И.А. Тищенко — автор расчетов выпарных установок, Д.П. Коновалов — автор классических исследований в области перегонки жидкостей. И одной из главных задач химической технологии, отличающих ее от чистой химии, является

установление наивыгоднейшего хода операции и проектирование соответствующих ему заводских приборов и механических устройств; так определил задачи химической технологии Д.П. Коновалов.

Следует отметить, что процессы и аппараты химической и пищевой технологий не имеют принципиального различия: используются одни и те же законы, методы расчета оборудования. Тем не менее специфика, связанная с пищевыми производствами, нашла отражение в изложении курса, в методиках расчета ряда процессов и аппаратов, в конструкциях аппаратов и машин.

Наука о процессах и аппаратах призвана играть большую роль в интенсификации развития пищевой и смежных отраслей промышленности и тем самым способствовать удовлетворению потребностей населения в продуктах питания.

Представленный лабораторный практикум соответствует государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования по направлению 660300 «Агроинженерия», специальность 110303 – «Механизация переработки сельскохозяйственной продукции», по дисциплине «Процессы и аппараты».

Рекомендации
по ведению журнала лабораторных работ по курсу
«Процессы и аппараты»

1. Журнал лабораторных работ является основной частью отчетной документации и ведется каждым студентом;

2. Данные наблюдений и расчетов записываются в журнале чернилами, а графические построения и схемы выполняются карандашом;

3. Графики и рисунки оформляются в соответствии с правилами машиностроительного черчения. Масштаб на графиках должен наноситься в технической системе единиц и в системе СИ;

4. К очередному занятию студент должен проработать материал, указанный в перечне вопросов по соответствующей контрольной карте;

5. В конце курса журнал лабораторных работ сдается преподавателю;

6. К лабораторной работе студент допускается лишь тогда, когда он знает устройство, правила эксплуатации лабораторной установки и правила техники безопасности при выполнении работы.

С правилами ведения журнала ознакомился:

Студент _____ группа _____

Правила техники безопасности и охраны труда при выполнении студентами лабораторных работ

1. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, изучившие устройство и правила эксплуатации машин и приборов, получившие инструктаж по безопасной работе и расписавшиеся в журнале учета инструктажей.
2. Одежда студентов, выполняющих лабораторные работы, должна быть хорошо заправлена в брюки, а рукава подвязаны.
3. При работе студент должен выполнять только те операции, которые ему поручены преподавателем.
4. Работа на неисправной машине или приборе категорически запрещена.

Меры оказания первой помощи

1. При ушибах следует приложить холод (лед, холодные примочки), стягивающие повязки. При кровотечении — края раны смазать йодом, положить ватный тампон и забинтовать. При необходимости следует направить пострадавшего в медицинский пункт или вызвать скорую помощь.
2. При поражении электрическим током необходимо срочно обесточить электроэнергию (выключить рубильник); освободить пострадавшего от токоведущих частей, уложить, при необходимости сделать искусственное дыхание и массаж сердца. Вызвать врача. Пострадавшего к работе не допускать.
3. При пожаре необходимо принять меры по его ликвидации имеющимися средствами. При необходимости вызвать пожарную команду по телефону «01».
4. После окончания работы:

- привести в порядок рабочее место;
- доложить преподавателю и завершении работы.

С правилами техники безопасности ознакомился

Студент _____ группа _____

« »

200 г.

РАБОТА №1: ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ВАЛЬЦЕВОЙ ДРОБИЛКЕ

Цель работы: Изучить практическое применение теории измельчения в процессах дробления и измельчения; изучить методику проведения эксперимента по исследованию влияния степени дробления на технико-экономические показатели вальцовой дробилки.

Содержание работы

1. Краткий конспект с описанием основных элементов эксперимента: задача эксперимента; теоретический раздел; методика проведения испытания и результаты расчетов.
2. Таблица результатов эксперимента.
3. Графики зависимостей.
4. Краткий анализ результатов эксперимента и выводы.

Основы теории

Измельчением называется процесс увеличения поверхности твердых тел путем их раздавливания, раскалывания, истирания или удара.

В пищевой промышленности измельчение применяют для увеличения поверхности сыпучих материалов с целью повышения скорости биохимических и диффузионных процессов при переработке фруктов, овощей и другого сырья, а также в переработке пищевых отходов. Измельчение широко применяется в спиртовом, пивоваренном, крахмально-паточном, свеклосахарном, мясном, мукомольном, консервном и других видах производств.

Процесс измельчения разделяется на дробление и резание.

Дробление – процесс уменьшения размеров тела без придания им определённой формы.

Резание – процесс уменьшения размеров тел с приданием им определённой формы.

Для разрушения материала необходимо преодолеть силы взаимного сцепления, на которые требуется затратить работу.

Работа, затрачиваемая на дробление, складывается из нескольких величин:

1. Работа на объемную деформацию материала;
2. Работа на создание новых поверхностей, образуемых при уменьшении размера кусков;
3. Работа на создание тепла, теряемого при работе дробильной машины в окружающую среду.

Дробление бывает крупное – размер получаемых частиц 250...40 мм; среднее – 40...10 мм; мелкое – 10...1мм; тонкое – 1...0,4мм; коллоидное – 0,001 мм.

Работа (Дж), затрачиваемая на деформирование твердого тела, выражается уравнением П.А. Ребендера

$$L_{Д} = L_1 + L_2 = \Delta V \cdot H_m + \Delta S \cdot H_x, \quad (1)$$

где L_1 – работа, затрачиваемая на деформирование твердого тела, Дж; L_2 – работа, затрачиваемая на образование новых поверхностей, Дж; ΔV – уменьшение объёма кусков материала при дроблении, m^3 ; H_m – постоянная для данного материала, характеризующая его структурно-механические и физико-химические свойства, Дж/ m^3 ; ΔS – приращение площади поверхности, m^2 ; H_x – постоянная характерная для данного материала и пропорциональная свободной поверхностной энергии твердого тела, Дж/м.

Работа (Дж), затрачиваемая на деформирование твердого тела, определяется согласно закону Гука

$$L_1 = \sigma^2 \cdot \Delta V / 2E, \quad (2)$$

где σ – напряжение, Па; E – модуль упругости первого рода, Па.

Тогда

$$L_{Д} = \sigma^2 \Delta V / 2E + H_x \cdot \Delta S \quad (3)$$

При глубоком дроблении формула 3 примет вид

$$L_{Д} = \sigma^2 \Delta V / 2E \quad (4)$$

При мелком дроблении работа (Дж), затрачиваемая на дробление, описывается уравнением Риттингера

$$L_0 = H_X \cdot \Delta S \quad (5)$$

При резании материала разрушению предшествует упругость и пластическая деформация, возникающая в материале под действием сил, действующих на режущий инструмент.

Разрушение материала при резании происходит, когда напряжение становится равным временному сопротивлению материала. При этом работа резания тратится на создание упругой и пластической деформации, а также на преодоление трения инструмента.

Работа резания (Дж) определяется по формуле

$$L_p = F \cdot L^2 \quad (6)$$

где F – усилие, которое необходимо приложить к кромке ножа длиной 1 м, Н/м; L – длина резки, м.

Описание экспериментальной установки

Определение технико-экономических показателей выполняется на вальцовой дробилке (Рис.1), которая представляет собой корпус 1, внутри которого размещён червячный редуктор 2 привода валцов измельчения 3. Зазор в дробилке устанавливается с помощью ручного регулятора 4, оснащенного измерительной шкалой (нониусом). Привод дробилки осуществляется от трехфазного электродвигателя 5, к которому подключен амперметр 6. Загрузка дробилки производится через загрузочное устройство 7.

Порядок проведения эксперимента

1. Подключить дробилку к сети.

2. Взвесить навеску зерна, предварительно насыпанную в мерную мензурку в объёме 100 мл.
3. Запустить дробилку и определить мощность ее механических потерь по мощности электродвигателя на прокручивание.
4. Установить регулятор нониуса на определённое число делений, например $n=25; 50; 75; 100; 125; 150; 175;$.
5. Загрузить навеску зерна в загрузочное устройство дробилки и провести дробление, замерив при этом время, расходуемое на дробление данной навески. В ходе дробления записать показания амперметра.
6. Повторить эксперимент несколько раз, изменяя степень дробления.

По результатам эксперимента строятся зависимости

$$N_i = f(i), L_i = f(i), Q_i = f(i), W_i = f(i), \eta_i = f(i). \quad (7)$$

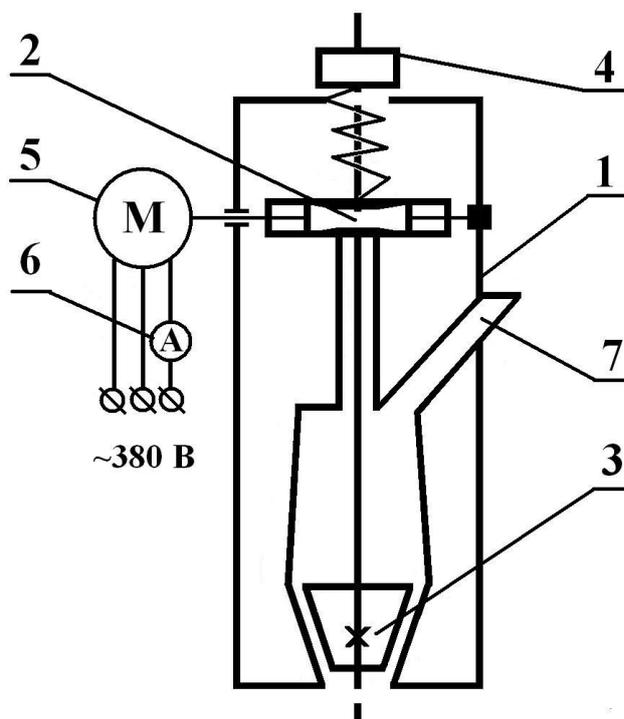


Рисунок 1 – Принципиальная схема дробилки

Обработка результатов

1. Производительность (кг/с) дробилки в условиях эксперимента определяется по формуле:

$$Q_D = \frac{m}{\tau}, \quad (8)$$

где m – масса измельчаемого в дробилке вещества, кг; τ – время процесса дробления, вещества массой m в дробилке, с.

2. Мощность (Вт) электродвигателя, расходуемая на привод дробилки, определяется по формуле

$$N_{ЭД} = \sqrt{3} \cdot I_H \cdot U \cdot \cos \varphi, \quad (9)$$

где I_H - сила тока, потребляемая электродвигателем, А; U - напряжение тока, потребляемое электродвигателем из сети, В, ($U=380В$); $\cos \varphi$ - 0,88.

3. Степень измельчения определяется по формуле из выражения:

$$i = D/d \quad (10)$$

где D – средний размер материала до дробления, м; d – средний размер куска материала после дробления, м.

Для определения степени измельчения дробилки, используя устройство регулирования, по нониусу устанавливают определённое число делений « n ». Число делений нониуса $n=0$ при полностью завернутом регуляторе, при этом дробилка имеет самый минимальный зазор между вальцами.

Зависимость степени измельчения дробилки « i » от числа делений нониуса « n » можно определить по формуле 10, полученной в ходе предварительных экспериментов.

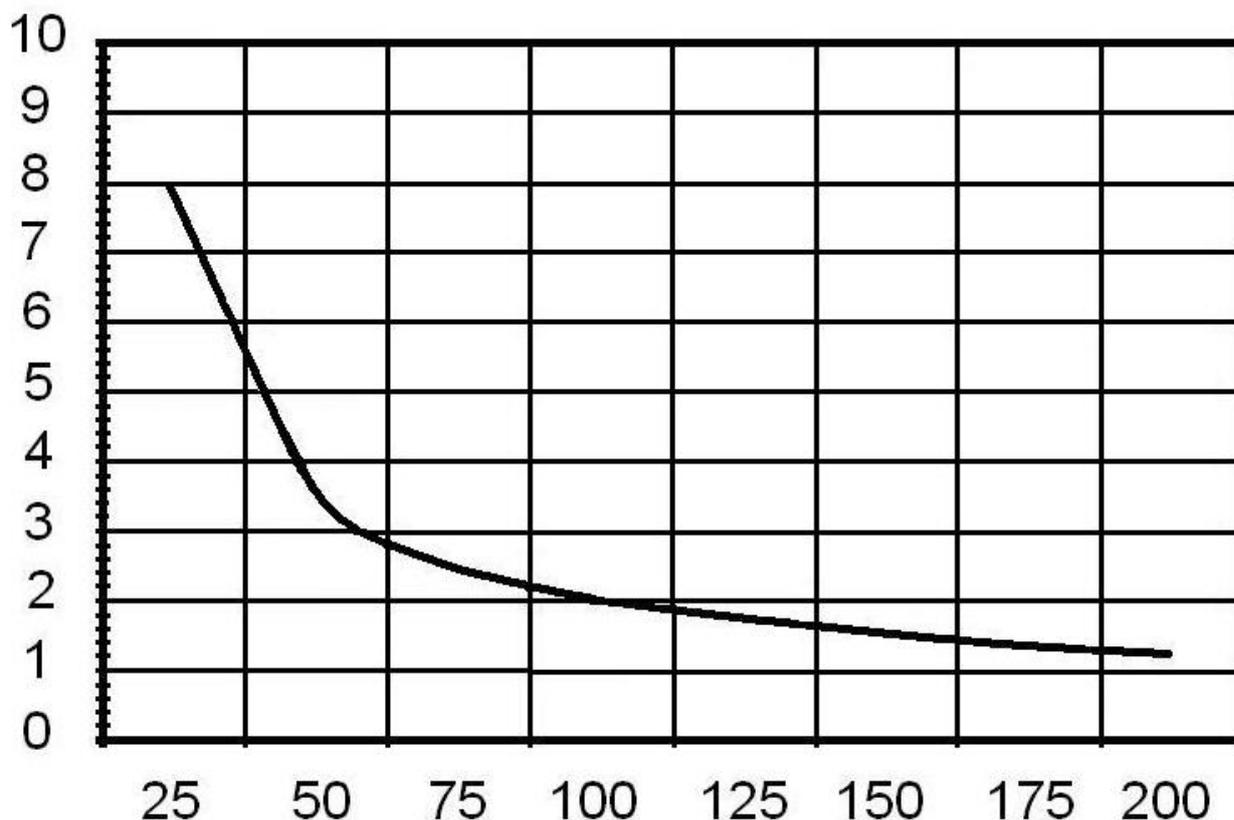


Рисунок 2 – Зависимость степени измельчения дробилки от числа делений нониуса

Результаты эксперимента

Дата проведения эксперимента _____

Объём навески _____ мл

Напряжение сети _____ В

Плотность вещества _____ кг/м³

Ток холостого хода _____ А

Контрольные вопросы

1. Что такое измельчение?
2. Что подразумевается под дроблением?
3. Что такое резание?
4. В чем измеряется работа, затрачиваемая на деформацию твердого тела?
5. Размеры крупных частиц получаемых при дроблении?

6. Согласно, какому закону определяется работа, затрачиваемая на деформирование твердого тела?

7. Производительность дробилки?

8. Величина размеров кусков относящихся к тонкому дроблению?

9. Работа затрачиваемая при мелком дроблении (уравнение Риттингера)?

10. Работа затрачиваемая при грубом дроблении (Закон Гука)?

РАБОТА №2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Цель работы

1. Изучить теоретические основы процессов перемешивания и основные типы мешалок.
2. Научиться использовать основы теории подобия для исследования процессов перемешивания.
3. Исследовать технико-экономические показатели различных мешалок.

Содержание работы

1. Краткий конспект с описанием основных элементов эксперимента: задача эксперимента; теоретический раздел; методика проведения испытания и результаты расчетов.
2. Таблица результатов эксперимента.
3. Графики зависимостей.
4. Краткий анализ результатов эксперимента и выводы.

Основы теории

Перемешиванием называется процесс приведения в тесное соприкосновение жидких, газообразных и сыпучих материалов.

Перемешивание широко применяется в пищевой технологии для получения эмульсий, суспензий и смесей твердых компонентов, а также для интенсификации тепло-, массообменных и биохимических процессов. В зависимости от агрегатного состояния перемешиваемых компонентов и технологического назначения полученной массы выбирают способ перемешивания (механический, пневматический, ультразвуковой и т. д.) и конструкцию аппарата.

Наиболее распространенным способом перемешивания жидких и пастообразных сред является механический, осуществляемый в аппаратах, называемых мешалками. В зависимости от устройства рабочих органов, мешалки делятся на лопастные, пропеллерные, турбинные и специального назначения. Процесс пе-

ремешивания с гидродинамической точки зрения может быть рассмотрен как процесс внешнего обтекания тел потоком жидкости. В соответствии с этим при вращении рабочего органа мешалки энергия затрачивается на преодоление трения лопастей о жидкость и на вихреобразование.

Для описания процессов перемешивания при установившемся режиме используют общее критериальное уравнение, связывающее физические характеристики движения жидкости

$$Eu_M = f(Re_M; Fr_M; \Gamma_1; \Gamma_2) \quad (11)$$

где $Eu_M = N / \rho \cdot n^3 \cdot d^5$ - обобщенная переменная (число) Эйлера или коэффициент мощности K_N ; $Re = n \cdot d^2 \cdot \rho / \mu$ - критерий Рейнольдса; $Fr_M = n^2 \cdot d / g$ - критерий Фруда; Γ_1, Γ_2 – симплексы геометрического подобия; N – мощность на валу мешалки, Вт; ρ – плотность жидкости, кг/м³; n – частота вращения рабочего органа мешалки, с⁻¹; d – диаметр рабочего органа мешалки, (в нашем случае $d=0,1$ м) м; μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па*с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Действительную линейную скорость перемешивания жидкости определить сложно, и вместо нее используют эквивалентную величину – частоту вращения рабочего органа мешалки, а потерю давления характеризуют величиной потребляемой энергии. Рабочий орган мешалки обычно погружен на достаточную глубину, поэтому гидравлическое сопротивление в основном обусловлено силой трения, а влиянием силы тяжести можно пренебречь, т.е. из уравнения следует исключить критерий Фруда. Тогда

$$\frac{N}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5} = f\left(\frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu}\right) \quad (12)$$

Это уравнение можно представить в виде степенной функции

$$Eu_M = A \cdot Re_M^m, \quad (13)$$

где A и m – постоянные коэффициенты, определяемые опытным путем.

На основании экспериментальных исследований определяют энергию, потребляемую мешалкой за время ее работы.

Наиболее широко в пищевой технологии применяются лопастные, пропеллерные и якорные мешалки, имеющие сравнительно простую конструкцию. Важной характеристикой работы мешалок является расход энергии, который может быть определен экспериментально. Для обработки экспериментальных данных целесообразно применить теорию подобия и установить зависимость числа $E_{\text{ц}} = K_N$ от режима процесса, т.е. от числа Рейнольдса.

Описание экспериментальной установки

Мешалка, используемая для проведения данной лабораторной работы, представляет собой емкость 1, внутри которой размещена лопастная мешалка 2, привод которой осуществляется через ременную передачу 3 от электродвигателя 4. Частота вращения вала двигателя изменяется с помощью реостата 5, на который через лабораторный трансформатор 6 подается регулируемое напряжение, измеряемое вольтметром 7. Для изменения силы тока, потребляемого электродвигателем 4, подключен амперметр 8. Контроль частоты вращения мешалки осуществляется с помощью тахометра 9.

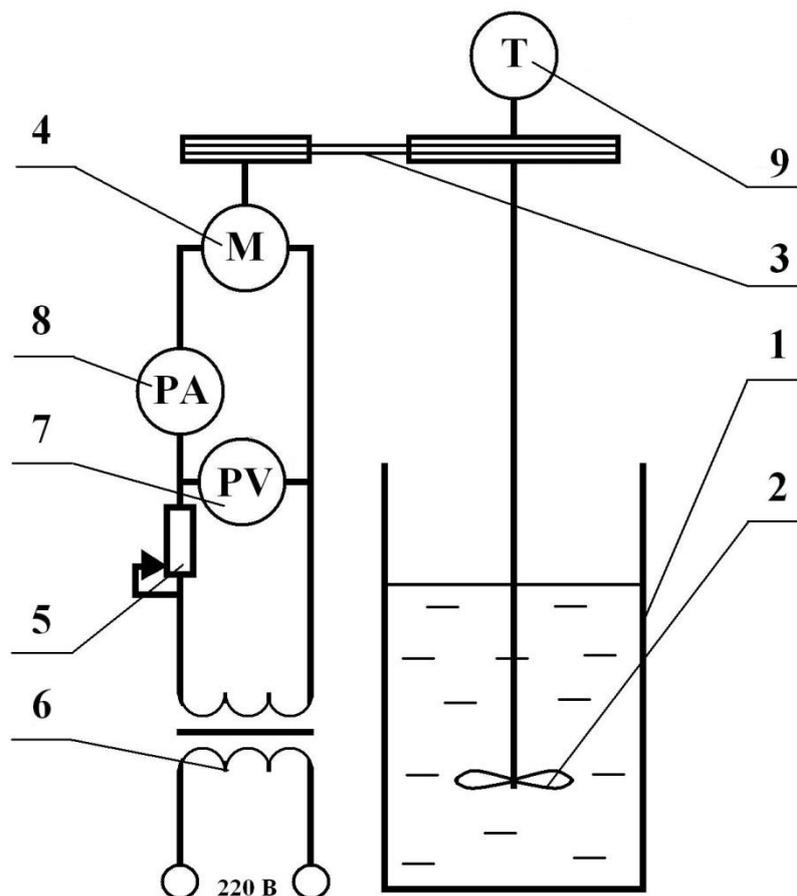


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

Порядок проведения эксперимента

1. Подключить установку для привода мешалки к сети.
2. Установить в аппарат тип исследуемой мешалки.
3. Произвести замер температуры жидкости. По справочнику определить величину плотности и динамической вязкости жидкости.
4. Запустить мешалку и установить с помощью реостата определённую частоту вращения мешалки, контролируя её величину с помощью механического тахометра.
5. На первом этапе испытания установите частоту вращения мешалки $n=100 \text{ мин}^{-1}$.
6. Произведите перемешивание жидкости, замерив при этом силу тока, напряжение и частоту вращения мешалки. Результаты запишите в таблицу 1

7. Произведите второй режим испытания, для этого установите регулятор реостата так, чтобы мешалка имела частоту вращения $n=200 \text{ мин}^{-1}$.

8. Так же, как и в первом режиме испытаний, произведите замеры силы тока, напряжения и частоты вращения. Занесите результаты в таблицу 1

9. Повторив эксперимент, для каждой из трёх типов мешалок, произведите обработку табличных результатов.

По результатам эксперимента постройте зависимости коэффициента мощности от числа Рейнольдса ($K_N = f(\text{Re})$) для каждого типа мешалки.

Обработка результатов

1. Мощность (Вт), потребляемая мешалкой в процессе эксперимента, определяется по формуле:

$$N = \frac{I \cdot U}{\eta_{II} \cdot \eta_{ЭД}}, \quad (14)$$

где I – сила тока, потребляемая электродвигателем, А; U – напряжение, потребляемое электродвигателем, В; η_{II} - КПД привода мешалки, $\eta_{II}=0,85$; $\eta_{ЭД}$ - КПД электродвигателя, $\eta_{ЭД}=0,8$.

2. Число Эйлера определяем по формуле

$$K_N = N / \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (15)$$

3. Число Рейнольдса определяем по формуле

$$\text{Re} = \rho \cdot n \cdot d^2 / \mu \quad (16)$$

Для определения констант A и m , входящих в состав зависимости, это уравнение представим в виде линейного логарифмического уравнения вида:

$$\ln(K_N) = \ln A + m \cdot \ln(\text{Re}) \quad (17)$$

5. Так как уравнение 17 имеет две неизвестных, составляем систему из двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} \ln(K'_N) &= \ln A + m \cdot \ln(Re') \\ \ln(K''_N) &= \ln A + m \cdot \ln(Re'') \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

6. По результатам двух экспериментов, проводимых с трехкратной повторностью для каждой мешалки при различных частотах вращения, определяем константы A и m по формулам

$$m = \frac{\ln(K''_N) - \ln(K'_N)}{\ln(Re'') - \ln(Re')} \quad (19)$$

$$A = \exp(\ln(K'_N) - m \cdot \ln(Re')) \quad (20)$$

На основании полученных значений A и m для различных типов мешалок строят графики зависимостей $K_N = f(Re)$.

Результаты эксперимента

Дата проведения эксперимента _____

Ширина лопасти мешалки _____

Температура перемешиваемой жидкости _____

Плотность жидкости _____

Динамическая вязкость _____

Таблица 1 – Результаты эксперимента

	Тип мешалки	I, А	U, В	n, мин-1	N, Вт	Re	$\ln K_N$	$\ln Re$	K_N	m	A

Контрольные вопросы

1. Что такое перемешивание?
2. Какие бывают мешалки в зависимости от устройства рабочих органов?
3. Какой способ перемешивания бывает, в зависимости от агрегатного состояния перемешиваемых компонентов и технологического назначения полученной массы?

4. По какой формуле определяется критерий Рейнольдса?
5. Уравнение связывающее физические характеристики движения жидкости
6. По какой формуле определяется мощность потребляемая мешалкой?
7. По какой формуле определяется число Эйлера?
8. Что является важной характеристикой работы мешалки?
9. Критерий Фруда?
10. Какая должна быть частота вращения мешалки на первом этапе испытания?

РАБОТА № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОСАЖДЕНИЯ

Цель работы

1. Изучить теоретические основы процессов осаждения и основные конструкции аппаратов осаждения.
2. Освоить методику расчета процессов осаждения.
3. Исследовать влияние теплофизических показателей сплошной среды на скорость и производительность отстойника периодического действия.

Содержание отчёта

1. Краткий конспект с описанием основных элементов эксперимента: задача эксперимента, теоретический раздел; методика проведения испытания и результаты расчетов.
2. Таблица результатов эксперимента
3. Графики зависимостей.
4. Краткий анализ результатов эксперимента и выводы.

Основы теории

Осаждение - процесс освобождения продуктов от нежелательных примесей, или получение продукта из раствора путем отстаивания,

Отстаивание применяют при переработке для сгущения суспензий или разделения их по фракциям для грубой очистки газов от пыли и для разделения эмульсий. Отстаивание является наиболее простым и дешёвым процессом разделения неоднородных систем.

Скорость свободного осаждения в поле сил тяжести зависит от многих величин и определяется критериями Архимеда (Ar), Лященко (Ly) и Рейнольдса (Re).

При ламинарном режиме осаждения твердых частиц в жидкости, когда $Ar < 3,6$; $Ly < 2 \cdot 10^{-3}$, $Re < 0,2$, Стоксом получена формула для расчета скорости осаждения, имеющая вид:

$$\omega_{oc} = d^2 (\rho_T - \rho_C) / 18 \mu_C, \text{ м/с}, \quad (21)$$

где ρ_T и ρ_C - плотность дисперсной и сплошной фазы; μ_C - динамическая вязкость, Па*с; d - диаметр шарообразной частицы, м; g - ускорение свободного падения, м/с².

Для осаждения частиц в газовой среде формула Стокса приобретает иной вид:

$$\omega_{oc} = d^2 * \rho_T * g / 18 \mu_C, \text{ м/с} \quad (22)$$

Скорость осаждения мелких капель жидкости в жидкости рассчитывается по уравнению Адамара

$$\omega_{oc} = (\rho_D - \rho_C) g d^2 (\mu_l - \mu_c) / 6 \mu_C (2 \mu_c + 3 \mu_D), \text{ м/с} \quad (23)$$

В случае осаждения одиночных частиц в неподвижной неограниченной среде при любом режиме осаждения скорость осаждения определяется по формуле:

$$\omega_{oc} = \sqrt[3]{Ly * \mu_c (\rho_t - \rho_c) / \rho_c^2}, \text{ м/с} \quad (24)$$

где $Ly = Re^3 / Ar$ - критерий Лященко.

Так как в реальном процессе происходит осаждение частиц неправильной формы, скорость осаждения в этом случае определяется по тем же формулам, с той лишь разностью, что вместо диаметра « d » используют эквивалентный диаметр d_3 :

$$d_3 = \sqrt[3]{6V / \pi} = 1,24 * \sqrt[3]{m / \rho_T}, \text{ м}, \quad (25)$$

Где V - объём частицы, м³; m - масса частицы, кг; ρ_T - плотность частицы, кг/м³.

В условиях высокой концентрации дисперсной фазы происходит стесненное осаждение частиц, находящихся в сплошной среде, при этом скорость процесса осаждения ω_{oc} будет меньше скорости свободного осаждения.

Этот процесс осаждения характеризуется объемной долей жидкости ε в суспензии.

$$\varepsilon = V_c / V_c - V_d, \quad (26)$$

где V_c – объем суспензии, m^3 ; V_d – объем твердой фазы, находящейся в суспензии, m^3

В зависимости от объемной доли жидкости в суспензии скорость осаждения определяется следующим образом:

$$\text{При } \varepsilon > 0,7 \quad \omega_{oc} = \omega_{oc} * \varepsilon^2 * 10^{-1,82(1-\varepsilon)}$$

$$\text{при } \varepsilon < 0,7 \quad \omega_{oc} = \omega_{oc} * 0,123 * \varepsilon^3 / (1 - \varepsilon)$$

При турбулентном режиме течения суспензии скорость осаждения

$$\omega_{oc} = 5,45 \sqrt{\frac{d(\rho_T - \rho_C)}{\rho_C}} \quad (27)$$

Скорость осаждения определяют из числа Рейнольдса по выражению

$$Re^2 * \xi = \frac{4}{3} Ar, \quad (28)$$

Где ξ – коэффициент сопротивления среды, зависящей от режима движения жидкости(газа):

$$\text{При } Re \leq 0,2 \text{ (ламинарный режим): } \xi = 24/Re$$

$$\text{при } Re \geq 0,2 \text{ (переходный режим): } \xi = 18,5/Re^{0,6}$$

$$\text{при } Re > 500 \text{ (турбулентный режим): } \xi = 0,44$$

Величина силы, действующей на осаждаемую частоту, определяется по формуле

$$R = \xi * F_g * \rho_c * \omega_{oc}^2 / 2, \text{ Н}, \quad (29)$$

Где F_g - площадь поперечного сечения осаждаемых частиц; m^2

$$F_g = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (30)$$

Процесс осаждения кроме количественных показателей характеризуется и качественным показателем, оцениваемым показателем степени очистки η разделения, выраженном в процентах.

Эффективность метода разделения определяется по формуле

$$\eta = (C_1 - C_2 / C_1) * 100\% \quad (31)$$

где C_1 и C_2 – концентрации частиц соответственно до и после разделения.

Описание экспериментальной установки

Одной из важнейших характеристик аппаратов осаждения, применяемых для разделения неоднородных смесей, является скорость осаждения, которая оказывает существенное влияние на производительность отстойника, и зависит от теплофизики сплошной среды. С целью изучения влияния теплофизических характеристик сплошной среды на технико-экономические показатели отстойника производится, эксперимент в данной лабораторной работе.

Определение вышеназванных показателей выполняется на отстойнике периодического действия, в который заливается неоднородная смесь, состоящая из воды и речного песка. В ходе проведения эксперимента смесь с различной температурой сплошной среды перемешивается, а затем отстаивается.

Изменение посредством нагревания теплофизических характеристик среды оказывает влияние на скорость протекания процесса, что выявляется в ходе эксперимента.

Установка, используемая для исследования процессов осаждения, представляет собой корпус 1, внутрь которого устанавливается стеклянная колба 2 с залитой в неё неоднородной смесью, состоящей из воды и речного песка. На стойках 3 и 4 установлены термометр 5 и электрический подогреватель 6. Для определения скорости осаждения в корпусе установлена лампочка 7, которая направляет световой поток 8 на светодиодный датчик 9, подключенный к мультиметру 10.

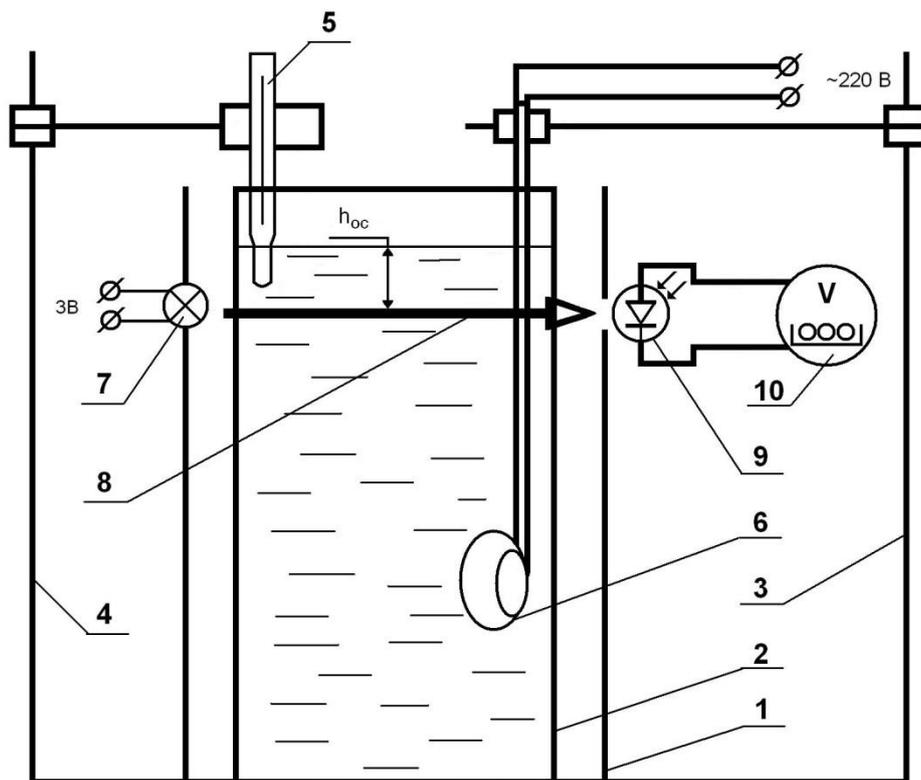


Рисунок 4 – Установка для исследования процессов осаждения

Порядок проведения эксперимента

1. Соберите установку, заполнив отстойник неоднородной смесью, состоящей из речного песка.
2. Включите лампочку и милливольтметр, при этом показания милливольтметра будут соответствовать состоянию смеси с чистой дисперсионной фазой (водой) без посторонних примесей (песка).
3. Включите электронагреватель и подогрейте неоднородную смесь до заданной температуры.
4. Отключите электронагреватель от сети и произведите перемешивание смеси.
5. Закончив перемешивание, подвергните неоднородную смесь отстаиванию, произведя замер времени осаждения смеси с помощью секундомера.

6. После того как смесь отстоится (показания милливольтметра будут соответствовать чистой воде), производите отключение секундомера и замерьте высоту осветленного слоя.

7. Результаты замеров запишите в таблицу 2

8. Повторите эксперимент несколько раз, изменяя температуру сплошной среды. По результатам эксперимента постройте зависимости скорости осаждения, производительности отстойника, гидравлических сопротивлений среды и числа Рейнольдса от температуры среды.

Обработка результатов

1. Скорость осаждения (м/с) определяется по формуле

$$\omega_{i\bar{n}} = \frac{h_{oc}}{\tau}, \quad (32)$$

где h_{oc} - высота осветленного слоя, м; τ - время процесса осаждения, с

2. Производительность (м³/с) отстойника определяется по формуле

$$Q_{oc} = F_{oc} * \omega_{oc}, \quad (33)$$

Где F_{oc} - площадь поверхности осаждения, м²

3. Режим осаждения определяем по числу Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega_{oc} * d * \rho_c}{\nu_c} \quad (34)$$

Где ρ_c - плотность сплошной среды, кг/м³; ν_c - кинематическая вязкость среды, м²/с, определяемая по формуле:

$$\nu_c = \frac{\mu_{\bar{n}}}{\rho_{\bar{n}}} \quad (35)$$

μ_c - динамическая вязкость сплошной среды, Па*с; $d_{\bar{n}}$ – эквивалентный диаметр частиц твердой фазы, определяемый из формулы Стокса:

$$d_y = \sqrt{\frac{18 * \omega_{i\bar{n}} * \mu_{i\bar{n}}}{g * (\rho_{\delta} - \rho_{\bar{n}})}} \quad (36)$$

где ρ_m - плотность частиц осаждаемого тела, кг/м³; g – ускорение свободного падения м/с²

4. Находится коэффициент гидравлического сопротивления среды
5. Теоретическая скорость осаждения определяется по уравнению Стокса
6. Величину отклонения, действительной скорости осаждения частиц песка при различных температурах среды, от действительной скорости осаждения при 20 °С, определяют по формуле:

$$\Delta = \frac{\omega_{i\bar{n}}^{20} - \omega_{i\bar{n}}}{\omega_{i\bar{n}}^{20}} * 100 \quad (37)$$

7. По данным, полученным в ходе эксперимента, постройте зависимости: $\omega_{oc} = f(t_c)$, $\xi = f(t_c)$, $Re = f(t_c)$, $Q_{oc} = f(t_c)$

Результаты эксперимента

Дата проведения эксперимента _____

Площадь поверхности осаждения _____

Масса песка _____

Объём песка _____

Плотность песка _____

Таблица 2 – Результаты эксперимента

№	t_c , °С	ρ_c , кг/м ³	μ_c , Па*с	τ , с	h_{oc} , м	ω_{oc} м/с	Q_{oc} м ³ /с	Re	ξ	ω_{oc}^T , м/с	Δ

Контрольные вопросы.

1. Процесс разделения неоднородных систем с твердой дисперсной фазой, основанный на задержании твердых частиц пористыми перегородками, которые пропускают дисперсную среду.

2. Какими критериями определяется скорость свободного осаждения

3. Какой вид имеет формула Стокса при ламинарном режиме

4. Какой вид имеет формула Стокса при осаждении частиц в газовой среде

5. Скорость процесса осаждения в условиях высокой концентрации дисперсной фазы будет:

6. По какой формуле определяется скорость осаждения при $\epsilon > 0,7$

7. По какой формуле определяется скорость осаждения при $\epsilon \leq 0,7$

8. Чему равен коэффициент сопротивления среды зависящий от режима движения жидкости при $Re \leq 0,2$

9. Чему равен коэффициент сопротивления среды при переходном режиме

10. Как определяется эффективность метода разделения

РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРОВАНИЯ

Цель работы

1. Изучить теоретические основы процессов фильтрации,
2. Освоить методы расчета процессов фильтрации.
3. Освоить экспериментальный метод определения константы фильтрации.
4. Исследовать влияние перепада давления в фильтре на скорость протекания процесса.

Содержание работы

1. Краткий конспект с описанием основных элементов эксперимента; задача эксперимента; теоретический раздел; методика проведения испытания и результаты расчетов,
2. Таблица результатов эксперимента и графики зависимостей,
3. Краткий анализ результатов эксперимента и выводы.

Основы теории

Фильтрацией называется процесс разделения неоднородных систем с твердой дисперсной фазой» основанный на задержании твердых частиц пористыми перегородками, которые пропускают дисперсионную среду.

По характеру дисперсионной среды различают фильтрацию жидкостей и фильтрацию газов. Фильтрация применяется для тонкого разделения жидких и газовых систем. В процессе фильтрации твердые частицы либо задерживаются на поверхности фильтрующих перегородок с образованием осадка, либо проникают в ее глубину, задерживаясь в порах. В соответствии с этим различают *фильтрацию с образованием осадка* и *фильтрацию с закупоркой пор*.

Основной задачей теории фильтрации является определение скорости фильтрации в зависимости от различных факторов.

Скорость фильтрования (w , м/с) - это количество профильтрованного через единицу времени (τ) жидкости, газа, отнесённое к единице фильтрующей поверхности.

$$W\phi = \frac{V_{\phi}}{F_{\phi} \cdot \tau} \quad (38)$$

где V_{ϕ} - объем фильтрата, м³; F_{ϕ} - площадь поверхности фильтрования, м²; τ - время фильтрования, с.

Движущей силой процесса фильтрации является перепад давления. Изменение давления может быть создано при повышении давления перед фильтром или образованием вакуума под ним.

Движение жидкости в фильтре подчиняется уравнению Пуазейля

$$W = \frac{\Delta\rho d^2}{32\mu_1} \quad (39)$$

где d - диаметр капилляра, м; l - длина капилляра, м; μ - динамическая вязкость фильтрата, Па с.

Тогда количество жидкости, проходящей через фильтрующий элемент, будет определяться:

$$W = \frac{\Delta\rho d^4 \cdot \alpha z}{32\mu_1} \quad (40)$$

где $\alpha = \pi/4$ - постоянная, зависящая от формы капилляра; z - число пор на единичную площадь.

Если в формуле (40) произвести несколько замен

$$l = \beta s$$

где β - коэффициент, характеризующий криволинейность капилляра, $\beta > 1$; s - толщина фильтрующего слоя, м.

$$Z = \frac{\varepsilon}{D^2} \quad (41)$$

где D - диаметр частицы, м; ε - коэффициент пропорциональности.

$$d = \delta D, \quad (42)$$

где δ - коэффициент, зависящий от взаимного расположения частиц осадка,
то

$$W_{\phi} = \frac{\Delta\rho}{\frac{32\beta}{\alpha\varepsilon\delta^2} \cdot \frac{1}{D^2} \mu s} \quad (43)$$

Безразмерный комплекс $32\beta/\alpha\varepsilon\delta^4$ обозначим через ϕ , а величину ϕ/D^2 через структурное сопротивление осадка δ , м^{-2}

$$\text{Тогда } W_{\phi} = \frac{\Delta\rho}{\mu\delta s} = \frac{\Delta\rho}{r_{\phi} s} \quad (44)$$

где $r_{\phi} = \delta \cdot \mu$ - удельное сопротивление осадка, м^{-2} .

С учетом сопротивления фильтрующей перегородки

$$W_{\phi} = \Delta P / (r_{\phi} \cdot s + R_{\phi}) \quad (45)$$

где R_{ϕ} - сопротивление фильтрующей перегородки, $\text{кг}\cdot\text{с}/\text{м}^3$.

Полученное уравнение не учитывает сжимаемость осадка и изменение диаметра D частиц осадка, который в зависимости от разности давлений ΔP будет равен:

$$D = D_0 \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\delta_0} \right) \quad (46)$$

где D_0 - диаметр частиц, соответствующих нормальному осадку, м; δ_0 - модуль сжатия осадка, Па,

Под нормальным осадком понимают осадок, образуемый при некотором определённом давлении, например, 1 м столба фильтруемой суспензии.

С изменением D произойдет изменение и толщины осадка;

$$S = S_0 \left(1 - \Delta\rho / \delta_0\right) \quad (47)$$

Тогда с учетом этих поправок получим уравнение профессора Г.М. Знаменского:

$$W_\phi = \frac{\Delta P \left(1 - \frac{\Delta P}{\delta_0}\right)}{r_\phi \cdot s_0 + R_\phi \left(1 - \frac{\Delta P}{\delta_0}\right)} \quad (48)$$

где $r_{\phi 0}$ - удельное сопротивление нормального осадка, м^{-2} ; s_0 - толщина нормального осадка, м.

Экспериментальное исследование процессов фильтрации

Для инженерных расчетов фильтровальной аппаратуры необходимо знать так называемые константы фильтрации, характеризующие гидравлическое сопротивление осадка и фильтрующей перегородки.

Скорость фильтрации суспензий (взвесей) существенным образом зависит от физических свойств и крупности твердых частиц. По степени крупности твердых частиц суспензии делят:

- а) на грубые (размер частиц более 100 мкм);
- б) тонкие (размер частиц от 100 до 0,5 мкм);
- в) мути (жидкости с размерами твердых частиц до 0,5 мкм);
- г) коллоидные растворы (размер твердых частиц от 100 мкм и меньше).

На практике встречаются все виды суспензий, большей частью с разными размерами частиц, т. е. полидисперсные системы.

При фильтрации суспензия поступает на пористую фильтрующую перегородку, через которую жидкая фаза проходит, а взвешенные частицы остаются на поверхности фильтра в виде осадка.

Эффективная работа фильтра во многом зависит от свойств фильтрующей перегородки. Фильтрующие перегородки изготавливают из различных хлопчатобумажных тканей (бельтинг, бязь, миткаль и др.), шерстяных тканей (сукно, бай-

ка, войлок), тканей из синтетических волокон (поливинилхлоридные, перхлорвиниловые, полиамидные, виньон, саран, орлон, лавсан и др.), тканей из волокон минерального происхождения (асбестовые и стеклянные) и др. В последнее время все шире начинают применять пористые металлические, керамические и металлокерамические фильтрующие перегородки.

Выбор той или иной фильтрующей перегородки обусловлен:

- пористостью (размеры пор должны быть такими, чтобы частицы осадка задерживались на перегородке);
- химической стойкостью к действию фильтруемой среды;
- достаточной механической прочностью;
- теплостойкостью при температуре фильтрования,

Рассматривая параметры, влияющие на процесс фильтрования, можно написать в самом общем виде **закон фильтрования**

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{R} \quad (49)$$

где dV - производительность по фильтрату за время $d\tau$; $dV/d\tau$ - скорость фильтрования, м/с; ΔP - движущая сила процесса фильтрования (перепад давлений), Па; R - сопротивление фильтрованию, кг·с/м.

Движущей силой процесса фильтрования служит разность давлений по обе стороны фильтрующей перегородки. Разность давлений может быть создана

- а) слоем самой суспензии, налитой на фильтр;
- б) подачей суспензии на фильтр под давлением (например, в фильтропрессах давление достигает 0,12 МПа);
- в) созданием вакуума под фильтрующей перегородкой (например, в промышленных вакуум-фильтрах вакуум составляет 600...650 мм рт. ст.).

Сопротивление фильтрования складывается из сопротивления осадка R и сопротивления фильтрующей перегородки (ткани)

$$R = R_{oc} + R_{тк} \quad (50)$$

Так как сопротивление осадка пропорционально количеству отложившегося осадка, а следовательно пропорционально количеству прошедшего фильтра-та, то

$$R_{oc} = K' \cdot V, \quad (51)$$

Сопротивление фильтрующей перегородки (ткани) можно заменить сопротивлением слоя осадка, оказывающего такое же сопротивление процессу филь-трования, какое оказывает ткань, и выразить соответствующим количеством фильтрата C , т. е.

$$R_{oc} = K' \cdot C \quad (52)$$

где K' - коэффициент пропорциональности. Тогда

$$R = K'(V + C) \quad (53)$$

Подставив полученное значение R в уравнение (50), разделив переменные и проинтегрировав, после небольших преобразований получим **основное уравнение фильтрования** вида;

$$V^2 + 2 \cdot V \cdot C = K \cdot \tau \quad (54)$$

где μ - вязкость фильтрата, Па·с; γ_0 - удельное сопротивление осадка, м⁻²;
 x_0 - концентрация суспензии.

Размерность V можно выразить в м³/м² или л/м², C в м³ /м² или л/м², K в м⁶/(м⁴·с) или л²/(м⁴·с) и τ в с.

Так как уравнение (54) содержит две переменных, то для их определения необходимо выполнить два опыта с получением различных объемов фильтра-та, определив соответствующее им время фильтрования. В результате чего будет получено два уравнения вида:

$$\begin{cases} V_1^2 + 2V_1 C = K\tau_1 \\ V_2^2 + 2V_2 C = K\tau_2 \end{cases} \quad (55)$$

совместное решение которых позволяет определить константы фильтро-вания, и в частности:

$$K = \frac{V_1^2 + 2 \cdot V \cdot C_1}{\tau_1} \quad (56)$$

$$C = \frac{V_2^2 \tau_1 - V_1^2 \tau_2}{2V_1 \tau_2 - 2V_2 \tau_1} \quad (57)$$

Зная константы фильтрования, можно определить сопротивление фильтрующей перегородки

$$R = \frac{2\Delta\rho}{K(V + C)} \quad (58)$$

а следовательно, и определить зависимости скорости фильтрования и производительности фильтра от перепада давления.

Описание экспериментальной установки

Установка (рисунок 5) для проведения опытов по фильтрованию состоит из емкости 1, в которую заливается фильтруемая суспензия 2. Для измерения уровня суспензии 2 емкость 1 соединяется с контрольной трубкой 3, снабженной мерной линейкой 4. В нижней части емкости 1 установлена фильтрующая перегородка 5 и трубопровод, снабженный краном 6, с помощью которого емкость 1 соединяется с емкостью 7, в которой установлен поршневой механизм 8 с регулятором хода 9 поршня. Для контроля величины вакуумметрического давления емкость 7 снабжена вакуумметром 10.

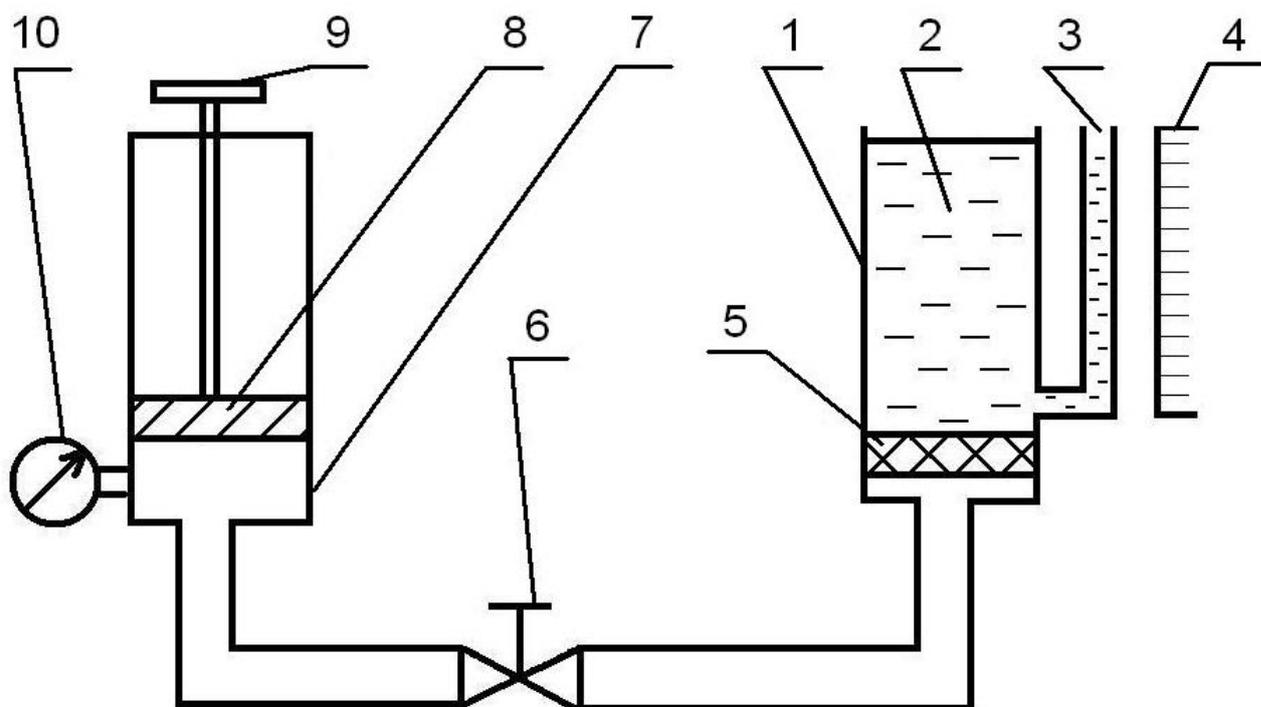


Рисунок 5 – Схема лабораторной установки

Порядок проведения эксперимента

Константы фильтрования определяют следующим образом:

1. Собирают фильтр, закрывают кран 6 и создают разрежение в емкости 7 с помощью поршневого механизма 8.
2. Приготовленную суспензию в соотношении Т:Ж заливают в емкость 1.
3. Открывают кран 6, включают секундомер и производят первый опыт по определению констант фильтрования.
4. После истечения некоторого времени кран 6 закрывают и определяют объем жидкости, прошедшей через фильтр, по уменьшению уровня жидкости в трубке 3 по мерной линейке 4. Полученные данные заносят в таблицу 3.
5. После первого замера вновь открывают кран 6, включают секундомер и производят второй опыт, после чего определяют константы фильтрования.

Исследование влияния изменения давления на скорость фильтрования и производительность фильтра производят в следующей последовательности:

1. В подготовленный к испытаниям аппарат заливают суспензию.
2. С помощью поршневого механизма устанавливают определенное ва-

куумметрическое давление и производят открытие крана 6, измеряя при этом время фильтрования.

3. Повторяют опыт, увеличивая последовательно глубину вакуума. Результаты измерений записывают в таблицу 4. Обработывают данные таблицы 4 и строят зависимости скорости фильтрования и производительности фильтра в зависимости от движущей силы процесса.

Обработка результатов

1. Предварительно определяется зависимость сопротивления фильтрования от перепада давления

$$p = B - p_v, \quad (59)$$

где B - атмосферное давление, Па; p_v - вакуумметрическое давление, Па.

2. Производится расчет скорости процесса фильтрования

$$W_\phi = \frac{4V_\phi}{\pi D_\phi^2 \tau} \quad (60)$$

где D_ϕ - диаметр фильтрующего элемента, м.

3. С учетом диаметра фильтрующего элемента и скорости процесса фильтрования, определяется производительность фильтра в зависимости от перепада давления

$$Q_\phi = \frac{V_\phi}{\tau} \quad (61)$$

Результаты эксперимента

Дата проведения эксперимента _____

Барометрическое давление _____ Па;

Вакуумметрическое давление _____ Па;

Площадь поверхности фильтра _____ м²

Температура суспензии _____ °С;

Соотношение твердой и жидкой фаз (Т:Ж) _____ %,

Таблица 3 – Определение констант фильтрования

№	$V, \text{ м}^3/\text{с}$	$\tau, \text{ с}$	$C, \text{ м}^3/\text{м}^2$	$K, \text{ м}^6/(\text{м}^4 \cdot \text{с})$
1				
2				

Таблица 4 – Исследование влияния движущей силы на скорость и производительность фильтра

№	$P_v, \text{ Па}$	$\Delta p, \text{ Па}$	$C, \text{ м}^3/\text{м}^2$	$K, \text{ м}^6/(\text{м}^4 \cdot \text{с})$	$Q_f, \text{ м}^3/\text{с}$

Контрольные вопросы

1. Что такое фильтрование?
2. Что такое скорость фильтрования?
3. Что является движущей силой процесса фильтрации?
4. По какой формуле определяется движение жидкости в фильтре (уравнение Пуазейля)?
5. Как определяется удельное сопротивление осадка?
6. Какие частицы суспензии соответствуют грубому размеру частиц?
7. Какие размеры частиц суспензии соответствуют тонким размерам частиц?
8. Математическое выражение закона фильтрования?
9. Основное уравнение фильтрования?
10. По какой формуле определяется производительность фильтра в зависимости от перепада давления?

РАБОТА № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы

1. Закрепить теоретические знания по законам передачи и распространения теплоты.
2. Изучить методику экспериментального определения коэффициента теплопроводности твердых (сыпучих) тел при стационарном режиме.
3. Освоить некоторые элементы методики проведения теплотехнического эксперимента и математическую обработку его результатов.

Содержание работы

1. Краткий конспект с описанием основных элементов эксперимента: задача эксперимента; теоретический раздел; методика проведения испытания и результаты расчетов.
2. Таблица результатов эксперимента и график зависимости $\lambda=f(t_{cp})$
3. Краткий анализ результатов эксперимента и выводы.

Основы теории

В основе теории теплопроводности положена гипотеза Фурье, которая может быть сформулирована в следующем виде: «Плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры»

$$q = -\lambda \frac{dt}{dn} \quad (62)$$

где dt/dn - градиент температуры в направлении, перпендикулярном к изометрической поверхности, град/м; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м•град),

Из уравнений (62) видно, что коэффициент теплопроводности численно равен тепловому потоку, проходящему через 1 м сечения стенки при изменении температуры стенки на 1 °С

Величина коэффициента теплопроводности зависит от природы вещества, его структуры, температуры и других факторов. Наибольшим коэффициентом теплопроводности обладают металлы, наименьшим - газы. Для материалов он резко уменьшается при введении примесей. Так, следы мышьяка в меди уменьшают коэффициент теплопроводности с 390 до 142 Вт/(м • град). При этом коэффициент теплопроводности смеси материалов изменяется не пропорционально их концентрации, что существенно затрудняет его оценку, которая может быть существенна только при проведении эксперимента.

Материалы, имеющие λ менее 0,25 Вт/(м• град), называется теплоизоляционными. Особенно хорошими теплоизоляционными свойствами обладают пенопласта, имеющие λ от 0,046 до 0,057 Вт/(м•град) и газы (0,006...0,058 Вт/(м•град).

Методы определения коэффициента теплопроводности можно разделить на две группы, соответственно их принципам, основанные на принципе стационарного и нестационарного тепловых режимов. В методах стационарного теплового режима тепловой поток остается постоянным по величине и направлению. Методы нестационарного теплового режима основаны на закономерностях нестационарного теплового поля - при охлаждении и нагревании тел.

Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности методом трубы

Метод трубы основан на использовании решения уравнения для случая цилиндрической стенки с источником тепла, расположенным по его оси. Это решение имеет вид:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{d_n}{d_s}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l(t_n - t_s)} \quad (63)$$

где Q - тепловой поток от одной изометрической поверхности с температурой t_b к другой, с температурой t_n , Вт; d_n , d_b - внутренний и наружный диаметры трубы ($d_b = 0,01$, $d_n = 0,038$), м; l - длина цилиндрической стенки ($l = 0,45$), м.

Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема установки представлена на рисунке 6. Исследуемый материал 1 (в нашем случае - песок), засыпается между внутренней 4 и наружной 2 тонкостенными металлическими трубками, закрытыми по концам теплоизолирующими заглушками 9. На внутренней трубке расположен нагреватель 3 со спиралью из нихромовой проволоки, через которую проходит переменный ток, напряжение которого регулируется ЛАТР (лабораторным автоматическим трансформатором 8), и контролируется вольтметром 6 и амперметром 7. Для измерения температур поверхностей нагревателя и внешней трубы служат термопары 5, подключаемые переключателем 10 к потенциометру 11 (Ф-136), при помощи которого измеряется термо-ЭДС, возбуждаемая в термопарах. Для измерения температуры поверхности нагревателя служат термопары (датчики температуры) внутренние - 2, 3, 4, а на поверхности внешней трубы - 5, 6, 7, 8, 9 и 10. Измеряемая таким образом термо-ЭДС пересчитывается в температуру при помощи градуировочной таблицы 5.1 или по формуле:

$$t = 0,073376 + 15,390654 U - 0,165107 U^2 + 0,003871 U^3 - 0,000051 U^4. \quad (64)$$

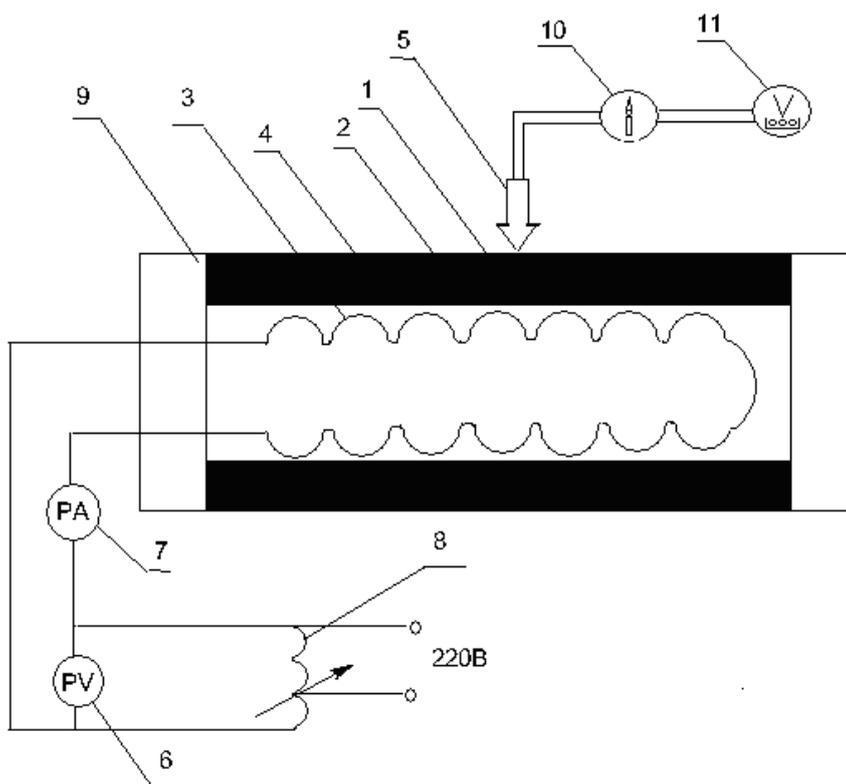


Рисунок 6 – Схема лабораторной установки

Проведение эксперимента

Для выполнения эксперимента необходимо выполнить следующее:

1. Включить электронагреватель и подогреть установку на первом выбранном режиме до наступления стационарного режима, т. е. несколько последовательных измерений в одной точке должны отличаться не более чем на 0,05 мВ (от 30 до 60 минут).
2. Измерить термо-ЭДС в термопарах, попеременно подключая их переключателем 10 к потенциометру 11 и произвести замер.
3. Прогреть установку до наступления следующего стационарного режима и повторить замеры термо-ЭДС (см. пункт 2).
4. Выполнить замер термо-ЭДС на последнем стационарном режиме.
5. Отключить все электрические приборы от источников питания.

Обработка результатов

1. Определить среднее значение термо-ЭДС (мВ) на внутренней и наружной поверхностях труб по формулам;

$$E_{ин} = \frac{E_5 E_6 E_7 E_8 E_9 E_{10}}{6} \quad (65)$$

$$E_{твн} = \frac{E_2 E_3 E_4}{3} \quad (66)$$

2. По градуировочной таблице (или по уравнению 64) пересчитать измеренные термо-ЭДС в значения температур на внутренней ($t_{срвн}$) и наружной ($t_{срн}$) поверхностях труб:

2.1. Найти меньшее ближайшее значение термо-ЭДС и записать соответствующую ему температуру.

2.2. Разницу между измеренным значением термо-ЭДС и табличными разделить на величину поправки, находящейся в таблице 5 справа, и целое число полученных при этом градусов прибавить к определенному ранее (кратному 10).

Таблица 5 – Градуировочная таблица для термопар группы "Х-К"

t, С	U, мВ	По- правка мВ/град	t,С	U, мВ	По- правка мВ/град
0	0,00		160	11,46	
10	0,65	0,065	170	12,24	0,078
20	1,31	0,066	180	13,04	0,080
30	1,98	0,067	190	13,84	0,080
40	2,66	0,068	200	14,65	0,081
50	3,35	0,069	210	15,47	0,082
60	4,05	0,070	220	16,29	0,082
70	4,76	0,071	230	17,12	0,083
80	5,48	0,072	240	17,95	0,083
90	6,21	0,073	250	18,78	0,083
100	6,95	0,074	260	19,61	0,083
110	7,69	0,074	270	20,45	0,084
120	8,43	0,075	280	21,30	0,085
130	9,18	0,075	290	22,15	0,085
140	9,93	0,076	300	23,00	0,085
150	10,69	0,077	350	27,51	0,090

3. Снять показания вольтметра и амперметра и подсчитать мощность нагревателя:

$$Q=I*U=W, \quad (67)$$

где $Q = W$ - соответственно тепловая и электрическая мощность нагревателя, Вт; I - сила тока, А; U - напряжение, В.

4. Определить среднюю температуру образца по формуле

$$t_{cp} = \frac{t_{cp.n} + t_{cp.вн}}{2} \quad (68)$$

5. Определить температурный перепад по формуле

$$\Delta t = t_{cp.вн} - t_{cp.n} \quad (69)$$

6. Вычислить значение теплопроводности по формуле

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln}{2 \cdot \pi} \quad (70)$$

Контрольные вопросы

1. Что называется коэффициентом теплопроводности?
2. В чем смысл гипотезы Фурье?
3. Выберите математическое выражение гипотезы Фурье
4. От чего зависит величина теплопроводности?
5. На чем смысл метода определения коэффициента теплопроводности на принципе стационарных тепловых режимов?
6. На чем смысл метода определения коэффициента теплопроводности на принципе нестационарного теплового поля?
7. Выберите уравнение для определения коэффициента теплопроводности методом трубы
8. Как определить среднее значение термо –ЭДС на наружной поверхности трубы?

9. Как определить мощность нагревателя?

10. Выберите выражение для вычисления температурного перепада

РАБОТА №6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВАНИЯ

Цель работы

1. Экспериментальным путем определить значение коэффициента теплоотдачи при свободном обтекании воздухом горизонтальной трубы.
2. По результатам измерений температуры поверхности, используя критериальное уравнение Михеева, определить коэффициент теплоотдачи.
3. Принести сравнение коэффициентов теплоотдачи, определенных различными способами. Оценить точность критериального метода теплового баланса.
4. Определить влияние температурного перепада на коэффициент теплопередачи в процессе нагревания.

Содержание работы

1. Краткий конспект с описанием основных элементов эксперимента: задача эксперимента; теоретический раздел; методика проведения испытаний и результатов расчетов.
2. Таблица результатов эксперимента.
3. Краткий анализ результатов эксперимента и выводы

Основы теории

Процесс теплообмена между поверхностью твердого тела и окружающей его средой, жидкой или газообразной, называется **теплоотдачей**. Мощность теплового потока при этом будет пропорциональна разности температур поверхности и окружающей ее среды и, согласно закону Ньютона-Рихмана, может быть вычислена по формуле

$$Q = \alpha \cdot (t_n - t_0) \cdot F, \quad (71)$$

где Q - мощность теплового потока, Вт; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К); t_n , t_0 - температуры поверхности тела и окружающей среды соответственно, °С; F - площадь поверхности теплообмена, м².

В этой формуле коэффициент пропорциональности & называется **коэффициентом теплоотдачи**. Он характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью и окружающей средой и численно равен мощности теплового потока, снимаемого с 1 м² поверхности при разности температур между поверхностью и окружающей средой равной 1 градусу.

Величина коэффициента теплоотдачи зависит от большого количества факторов, характеризующих условие теплообмена и физические свойства тел, участвующих в нем (качество поверхности, теплопроводность материала, скорость движения теплоносителя, его температура и т. д.).

Теплотехнические качества нагревательного прибора (радиатор, ребристой трубы, конвектора, теплообменника, пастеризатора и др.) оцениваются **коэффициентом теплопередачи**, т. е. тепловым потоком, проходящим через 1 м² поверхности нагрева прибора при разности средней температуры теплоносителей 1° С.

Чем больше коэффициент теплопередачи, тем лучше прибор передает теплоту от теплоносителя к нагреваемому продукту. На значение коэффициента теплопередачи основное влияние оказывают конструктивные особенности прибора и условия его эксплуатации (температурный напор, скорость движения теплоносителя).

Коэффициент теплопередачи нагревательного прибора определяется по формуле

$$K = \frac{Q}{F\Delta t} \quad (72)$$

где Q - мощность теплового потока от нагревательного прибора к нагреваемому объекту, Вт; F - площадь поверхности нагревательного прибора, м²; Δt - температурный перепад между температурами нагревательного прибора и нагреваемым объектом, °С. Цилиндрические поверхности в теплообменных устройствах принято характеризовать коэффициентом теплопередачи, отнесенным к 1 м длины трубы, т. е. линейным коэффициентом теплопередачи k₁, кото-

рый при установившемся тепловом состоянии системы определяют по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\pi\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi\alpha_2 d_2}} \quad (73)$$

где α - коэффициенты теплоотдачи соответственно на горячей и холодной стороне трубы, Вт/(м²·К); λ - коэффициент теплопроводности трубы, Вт/(м·К); d_1 и d_2 - внутренний и наружный диаметры трубы, м.

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6, а ее описание приведено в предыдущей работе. Следует учесть, что в этой работе для расчетов используются значения температур, измеренных на поверхности наружной трубы (термопары 5... 10) и температура окружающей среды (воздуха) в момент проведения опыта.

Размеры труб приведены в предыдущей работе.

Проведение эксперимента

Подготовка эксперимента и измерение термо ЭДС в термопарах 5... 10 аналогичны и приведены в предыдущей работе, т. е. для данной работы используются данные, полученные в предыдущей работе. Однако дальнейшие расчеты проводятся по другой методике.

Обработка результатов

Результаты измерения температуры на наружной поверхности трубы дают возможность рассчитать коэффициент теплоотдачи двумя методами теплового баланса и критериальным, а затем провести сравнение полученных результатов для выявления точности критериального метода.

Определение коэффициента теплоотдачи методом теплового баланса.

При стационарном режиме работы нагревателя, мощность теплового потока Q_H , выделяемого им при этом, будет равна мощности теплового потока, отдаваемого трубой в окружающую среду Q , т. е.

$$Q - Q_H = U \cdot I, \quad (74)$$

где U , I - напряжение (В) и сила тока (А) в нагревателе.

Это уравнение представляет собой уравнение теплового баланса, в котором величина Q является суммой двух тепловых потоков:

- теплового потока, передаваемого конвективным путем (Q_K); - теплового потока, передаваемого радиацией (Q_L).

$$Q = Q_K + Q_L \quad (75)$$

Величина теплового потока, переданная радиацией (лучистым теплообменом) может быть определена из закона Стефана -Больцмана по формуле;

$$Q_L = C_0 \cdot \varepsilon_n \cdot F \cdot \left(\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right) \quad (76)$$

где C_0 - коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела ($C_0 = 5,67$ Вт/м²); ε_n - степень черноты поверхности трубы ($\varepsilon_n = 0,21$); F - площадь поверхности трубы, с которой происходит теплоотдача, м²

$$F = \pi \cdot d_n \cdot l = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 0,45 = 0,0537 \text{ м}^2 \quad (77)$$

Тогда

$$Q_K = Q - Q_L = I \cdot U - C_0 \cdot \varepsilon_n \cdot F \cdot \left(\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right) \quad (78)$$

Используя уравнение (78) можно легко определить коэффициент теплоотдачи α_k^{δ} из формулы

$$\alpha_k^{\delta} = \frac{Q_K}{(T_n - T_c) \cdot F} = \frac{Q_K}{(T_n - T_c) \cdot \pi d_n l} \quad (79)$$

где T_n, T_c - соответственно средняя температура поверхности и среды, К.

Температура поверхности трубы находится как среднее арифметическое значение температуры, измеряемое шестью термопарами в точках (с 5-й по 10-ю), расположенных на поверхности трубы.

$$t_n = \frac{t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}}{6} \quad (80)$$

$$T_n = 273 + t_n \quad (81)$$

Так как при выполнении данной работы используются результаты эксперимента, выполненного в лабораторной работе № 5, то

$$t_n = t_{срн} \quad (82)$$

где $t_{срн}$ — средняя температура наружной поверхности (см. лаб. работу № 5).

Определение коэффициента теплоотдачи критериальным методом.

Методика расчета α_k^k по критериальным уравнениям теплоотдачи при свободном движении теплоносителя заключается в следующем.

Для определения α_k^k используется критериальное уравнение Михеева, описывающее случай обтекания горизонтальной трубы свободным потоком газа (в данном случае воздуха), имеющее вид;

$$N_u = \frac{\alpha l}{\lambda} = C \cdot (G_r \cdot P_r)^n \quad (83)$$

где l - определяющий размер (для нашего опыта $l = d_n = 0,038$); λ - теплопроводность теплоносителя (воздуха) находится методом интерполяции по таблице 6; C, n - величины, зависящие от критериев Грасгофа и Прандтля, находятся по таблице 8; G_r - средний критерий Грасгофа; P_r - средний критерий Прандтля. Средний критерий Грасгофа определяемый по формуле

$$G_r = \frac{g \cdot d_n^3 \cdot \Delta t}{U_0^2 T_m} \quad (84)$$

где g - ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; d_s - наружный диаметр трубы, м; ν_v - кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; T_m - средняя температура пограничного слоя воздуха, определяемая как среднее арифметическое, К:

$$T_m = \frac{t_n + t_c}{2} + 273 \quad (85)$$

Средний критерий Прандтля находится по формуле

$$P_r = \frac{\nu}{a} \quad (86)$$

где ν - коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; a - коэффициент теплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$ (см. таблицу 6).

После вычисления критерия Нуссельта представляется возможность вычислить величину коэффициента теплоотдачи α_κ по формуле:

$$\alpha_\kappa = \frac{N_u \cdot \lambda_\theta}{dn} \quad (87)$$

Таблица 6 – Физические параметры сухого воздуха (при барометрическом давлений 101,3 кПа)

Темпер. воздуха, С	Коэффициент теплопроводности, $\lambda \cdot 10^{-2}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Коэффициент Температуропроводности, $a \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Коэффициент кинематической вязкости $\nu \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Термический критерий Прандтля, P_r
0	2,41	18,8	13,28	0,707
10	2,51	20,0	14,16	0,705
20	2,59	21,4	15,06	0,703
30	2,67	22,9	16,00	0,701
40	2,76	24,3	16,96	0,699
50	2,83	25	17,95	0,698

Таблица 7 – Значения величин n и C в зависимости от произведения Gr·Pr

Номер интервалов	Gr·Pr	n	C
1	$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
2	$5 \cdot 10^2 \dots 2^4$	0,54	1/4
3	$3 \cdot 10^4 \dots 2^7$	0,35	2/7
4	$2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$	0,135	1/3

Полученные опытные данные по измерению термо-ЭДС и рассчитанные по ним температуры заносят в таблицу 8 вычисляют все необходимые величины по приведённым выше формулам.

Результаты расчетов сравнивают и находят относительную ошибку критериального метода из соотношения:

$$\delta = \frac{\alpha_{\kappa}^{\bar{\delta}} - \alpha_{\kappa}^{\kappa}}{\alpha_{\kappa}^{\bar{\delta}}} 100\% \quad (88)$$

Каждое звено выполняет полный объем измерений и расчета по своим данным.

Экспериментальное определение влияния температурного перепада на коэффициент теплопередачи. Методика основана на использовании решения уравнения для случая нагревания цилиндрической стенки источником тепла, расположенном на ее оси.

Для определения коэффициента теплопередачи нагревательного прибора необходимо определить коэффициент теплопроводности стенки, пропускающий через себя тепло.

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln(d_n / d_v)}{2\pi l (t_n - t_c)} \quad (89)$$

где Q - тепловой поток от одной изотермической поверхности к другой, Вт; d_v и d_n - внутренний и наружный диаметры трубы, м; l - длина цилиндрической стенки, м (см. лаб, работу № 5).

Затем определить коэффициент теплоотдачи с поверхности трубы нагревательного прибора окружающему воздуху

$$\alpha = \frac{Q}{\pi d_n l (t_n - t_c)} \quad (90)$$

где t_n и t_c - соответственно средняя температура поверхности и среды, °С.

На основании полученных коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи производят расчет коэффициента теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\pi \alpha_n d_n} + \frac{1}{2\pi \lambda} \ln \frac{d_n}{d_e}} \quad (91)$$

Результаты эксперимента

Таблица 8 – Результаты эксперимента

Наименование показателя	Данные (обозначения, формулы,	Режимы испытаний (№№ звена)		
		1	2	3
1	2	3	4	5
1 Дата испытаний				
2. Температура окружающей				
3. Размер трубы; длина рабочего участка наружный диаметр	$l = 0,450$ м $d_n = 0,038$ м			
7. Конвективный тепловой поток	$Q_k, \text{Вт}$			
8. Коэффициенты теплоотдачи	$\alpha_k^6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ $\alpha_k^k \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$			
9. Погрешность критериального метода	$\delta, \%$			
10. Коэффициент теплопередачи	$K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$			

Контрольные вопросы

1. Что такое процесс теплоотдачи?
2. По какой формуле может быть вычислена мощность теплового потока?
3. Что характеризует коэффициент теплоотдачи?
4. Чему численно равен коэффициент теплоотдачи?
5. По какой формуле определяется коэффициент теплопередачи нагревательного прибора?
6. По какой формуле определяют коэффициент теплопередачи нагревательного прибора?
7. Напишите математическое выражение для определения среднего критерия Грасгофа?
8. По какой формуле определяется средний критерий Прандтля?
9. Напишите уравнения Михеева?
10. В каких единицах измеряется коэффициент теплопередачи?

РАБОТА № 7 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Цель работы

1. Изучить основные параметры влажного воздуха.
2. Ознакомиться с оборудованием для определения относительной влажности воздуха.
3. Научиться определять основные параметры влажного воздуха с помощью h, d-диаграммы.

Основы теории

Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара, и широко используется во многих тепловых процессах, таких, как вентиляция, отопление и кондиционирование помещений, сушка материалов и т. д.

Влажный воздух как влаго и теплоноситель характеризуется абсолютной и относительной влажностью, влагосодержанием, энтальпией и плотностью.

Смесь сухого воздуха и перегретого водяного пара называется **ненасыщенным влажным воздухом**. Смесь сухого воздуха и насыщенного водяного пара называется **насыщенным влажным воздухом**. Температура, до которой должен охладиться не насыщенный влажный воздух, чтобы перегретый пар стал насыщенным, называется температурой точки росы.

Абсолютной влажностью называют количество водяного пара (в кг), содержащегося в 1 м³ влажного воздуха, Так как водяной пар, находясь под парциальным (частичным) давлением, занимает весь объем смеси, например 1 м³, то абсолютная влажность равна плотности водяного пара,

Относительной влажностью называют отношение фактического количества водяных паров в 1 м³ воздуха к максимально возможному при тех же температуре и давлении:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n} \quad (92)$$

где φ - относительная влажность воздуха, %; p_n - плотность водяного пара, кг/м³; p_n - плотность насыщенного водяного пара, кг/м³.

Так как парциальное давление паров, находящихся в газе, пропорционально его количеству, то относительная влажность может быть выражена как отношение парциального давления водяного пара в воздухе к давлению насыщенных водяных паров при тех же давлении и температуре:

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n} \quad (93)$$

где p_n - парциальное давление водяного пара в воздухе, Па; p_n - давление насыщенных водяных паров, Па.

Влагосодержанием влажного воздуха называют количество водяного пара (в кг), содержащегося в нем, отнесенное к 1 кг абсолютно сухого воздуха

$$d = \frac{G_{\Pi}}{G_{CB}} = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{CB}} \quad (94)$$

где G_{Π} и G_{CB} - массы водяного пара и абсолютно сухого воздуха, кг; ρ_{Π} и ρ_{CB} - плотности водяного пара и абсолютно сухого воздуха, кг/м³
Связь между влагосодержанием и относительной влажностью.

$$d = 0,622 \frac{\varphi p_n}{P - \varphi p_n} \quad (95)$$

где P - общее давление, Па.

Согласно закону Дальтона общее давление с учетом парциального давления сухого воздуха

$$P = P_{\Pi} + P_{CB}, \quad (96)$$

где p_{CB} - парциальное давление сухого воздуха, Па,

Энтальпия влажного воздуха откосится к 1 кг абсолютно сухого воздуха и определяется при данной температуре воздуха, равной t , как *сумма* энтальпий абсолютно сухого воздуха и водяного пара (в Дж на 1 кг сухого воздуха);

$$h = c_{ce}t + dh_n \quad (97)$$

где $c_{св}$ - средняя удельная теплоемкость абсолютно сухого воздуха ($c_{св}$ - 1000 Дж/(кгК); t - температура воздуха, ° С; d - влагосодержание, кг/кг; $h_{п}$ - удельная энтальпия водяного пара, Дж/кг.

Плотность влажного воздуха равна сумме плотностей абсолютно сухого воздуха и водяного пара:

$$P_{вл.в} = P_{св} + P_n = P_{св}(l + d) \quad (98)$$

Плотность влажного воздуха может определяться с учетом парциального давления водяного пара в воздухе:

$$\rho_{вл.в} = \frac{p - 0.378 \rho_{п}}{287T} \quad (99)$$

где T - абсолютная температура влажного воздуха, К.

Изменение основных свойств воздуха при нагревании, охлаждении и сушке наглядно изображается и с достаточной точностью определяется при помощи h,d -диаграммы влажного воздуха (рисунок 8), разработанной Л.К. Разиным в 1918 г. Диаграмма построена для постоянного давления, равного 99 кПа (745 мм рт. ст.). Диаграмма построена в координатах энтальпия (ось ординат) влагосодержание (ось абсцисс). Угол между осями составляет

Для удобства использования диаграммы значения влагосодержания спроектированы на вспомогательную горизонтальную ось, перпендикулярную к оси ординат.

На диаграмму нанесены следующие линии: вертикальные линии постоянного влагосодержания, параллельные оси ординат ($d = \text{const}$); наклонные линии постоянной энтальпии ($h = \text{const}$) проходящие под углом 135° к вспомогательной оси абсцисс; линии постоянных температур (изотермы); линии постоянной относительной влажности ($\varphi = \text{const}$); линии парциальных давлений водяного пара во влажном воздухе.

Описание экспериментальной установки

Для измерения влажности воздуха и газов используют так называемые *гигрометры* и *психрометры*.

Наиболее распространены волосяной и пленочный **гигрометры**, предназначенные для измерения относительной влажности воздуха в пределах 20... 100 % и в интервале температур 35...60С

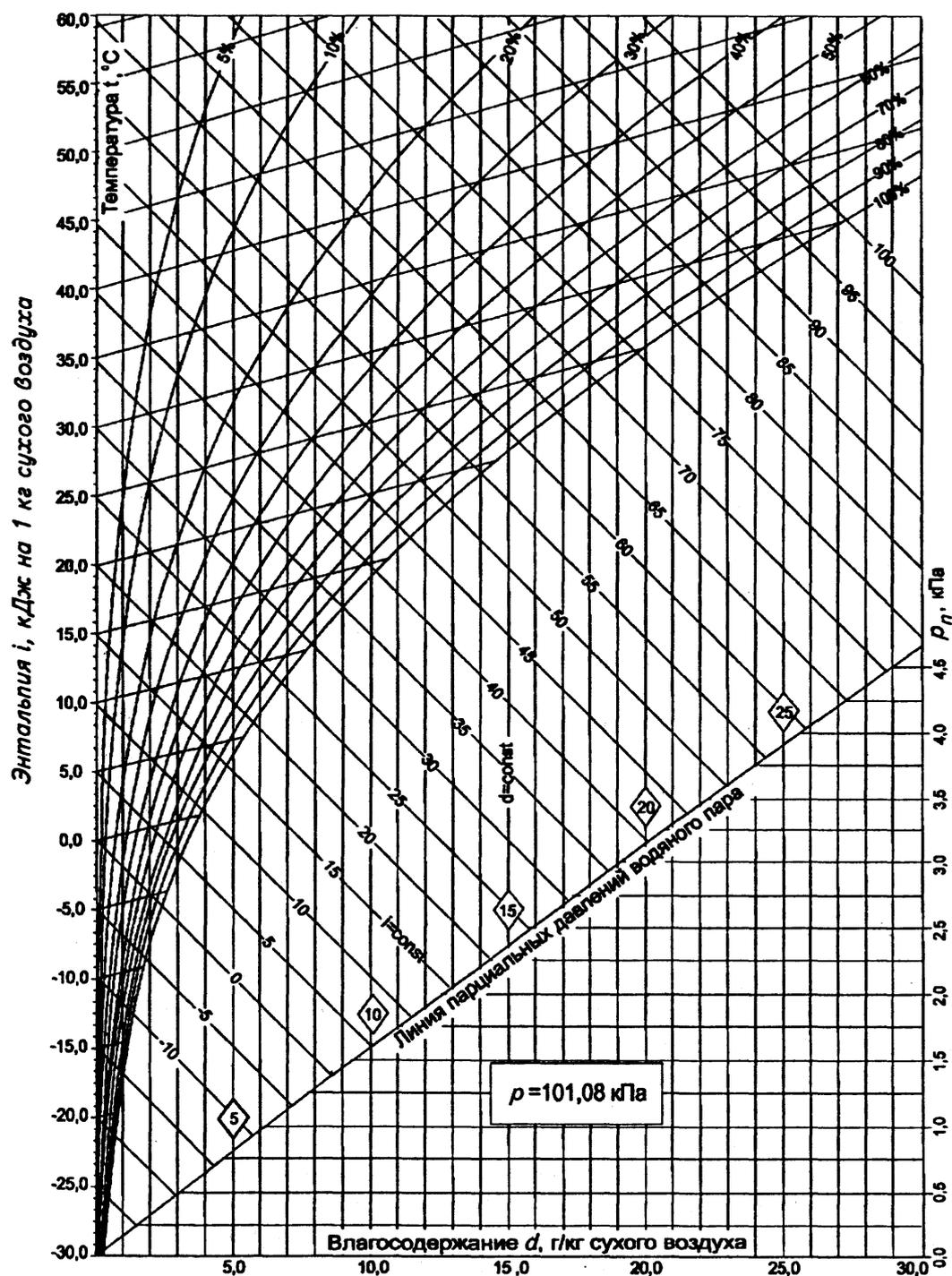


Рисунок 7 – h, d-диаграмма влажного воздуха

Действие волосяного пирометра основано на свойстве обезжиренного волоса изменять длину с изменением влажности воздуха. Принцип действия пленочного гигрометра заключается в том, что при изменении относительной влажности воздуха появляется упругая деформация пленочного преобразователя влажности, которая системой рычагов передается на стрелку, перемещающуюся относительно шкалы.

Психрометры предназначены для определения относительного содержания влаги в воздухе.

Статический психрометр состоит из двух совершенно одинаковых термометров, укрепленных на одном штативе (рисунок 8). Нижняя часть одного из них обмотана гигроскопической тканью (марлей) и погружена в маленький сосуд с водой. Вследствие испарения воды на поверхности шарика «мокрого» термометра ртутный столбик устанавливается ниже столбика «сухого».

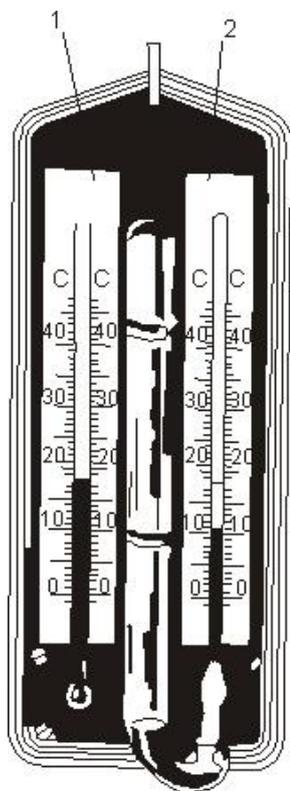


Рисунок 8 – Статический психрометр. 1 - сухой термометр; 2—мокрый термометр

Скорость испарения и охлаждения «мокрого» термометра зависит от относительного содержания влаги. Когда падение столбика ртути термометров прекратится, отсчитывают температуру по шкалам обоих термометров. Чем суше воздух, тем быстрее испарение со смачиваемого термометра и тем ниже его показания, так как воздух, затрачивая свою теплоту на процесс испарения воды, охлаждает резервуар термометра. По разности показаний сухого и мокрого термометров, пользуясь специальной психрометрической таблицей, прилагаемой к прибору, определяют относительную влажность воздуха φ (проц.).

Во время измерения влажности воздуха психрометр нужно оградить от источников лучистой теплоты и случайных возмущений воздуха. Продолжительность наблюдения 10... 15 мин.

Аспирационный психрометр (рисунок 9) - более совершенный и точный прибор по сравнению со статическим. Его показания уже не зависят от колебаний скорости движения окружающего воздуха, потому что резервуары термометров, заключенные в двойные трубчатые оправы, во время измерения омываются принудительным потоком воздуха, движущимся с постоянной скоростью (около 2,5 м/с). Поток этот создается аспиратором (вентилятором) с пружинным заводом, установленным в верхней части прибора. «Сухой» термометр (левый) показывает температуру окружающего воздуха. Резервуар «мокрого» термометра обернут батистом в один слой. Воздух засасывается снизу через трубки, обтекает резервуары термометров и выбрасывается аспиратором через выпускные щели.

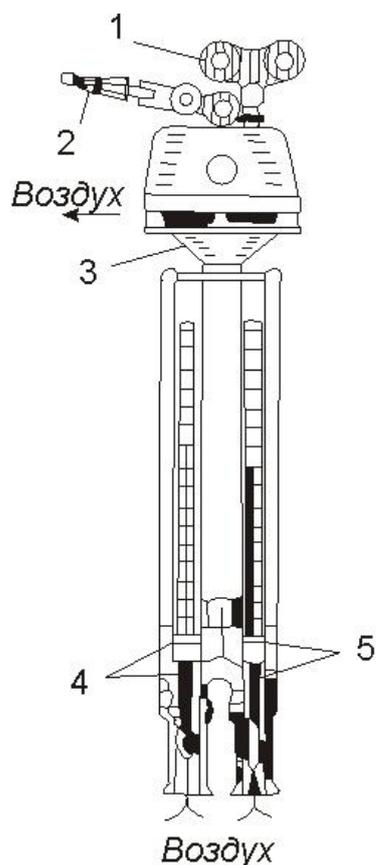


Рисунок 9 – Аспирационный психрометр:

*1 - заводная рукоятка вентилятора; 2 - подвеска; 3 - вентилятор, 4, 5
сухой и мокрый термометры*

За пять минут до начала наблюдения смачивают дистиллированной водой батист «мокрого» термометра с помощью резинового баллона с пипеткой, прила-гаемого к прибору. При смачивании термометра нужно остерегаться, чтобы вода по соединительной полости не попала на сухой термометр. Смочив термометр, заводят ключом аспиратор и по истечении четырех минут после его пуска регистрируют показания сухого и мокрого термометров.

Относительную влажность воздуха находят по разности показаний термометров, используя психрометрическую таблицу данного психрометра (психрометрический график).

По вертикальным линиям отмечают показания «сухого» термометра, а по наклонным - «мокрого».

На пересечении этих линий получают значения относительной влажности, выраженные в процентах. Линии, соответствующие десяткам процентов, обозначены на графике цифрами 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90.

Пример. Температура, показываемая «сухим» термометром, 21,7 °С, «мокрым» - 14,3 °С. На графике находят точку пересечения вертикальной и наклонной линии, соответствующих этим температурам. Она находится выше 42, но ниже 44. Следовательно, относительная влажность исследуемой среды составляет приблизительно 43 %.

Графики удобны в тех случаях, когда требуется знать только относительную влажность. При определении абсолютной влажности пользуются психрометрическими таблицами.

Порядок проведения эксперимента

1. Укрепить аспирационный психрометр на штативе.
2. Смочив «мокрый» термометр, завести ключом аспиратории по истечении четырех минут после его пуска снять показания «сухого» и «мокрого» термометров,
3. По психрометрическому графику определить относительную влажность воздуха,
4. С помощью h, d -диаграммы влажного воздуха определить влагосодержание, энтальпию и парциальное давление водяного пара в паровоздушной смеси.
5. Для достоверности результатов измерений следует провести эксперимент в трехкратной повторности. Результаты занести в таблицу 9.

Результаты эксперимента

Дата проведения эксперимента: «__» _____ 20__ г.

Таблица 9 – Результаты эксперимента

t_c, C	t_M, C	$\varphi, \text{ проц}$	$d, \text{ кг/кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$P_{\text{п}}, \text{ Па}$

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой влажный воздух?
2. Что называется ненасыщенным влажным воздухом?
3. Что называется насыщенным влажным воздухом?
4. Что такое точка росы?
5. По какому выражению определяется относительная влажность воздуха?
6. Что такое влагосодержание влажного воздуха?
7. Выберите математическое выражение закона Дальтона
8. Что такое энтальпия влажного воздуха?
9. Чему равна плотность влажного воздуха?
10. Каким прибором определяется относительная влажность воздуха?

РАБОТА № 8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Цель работы

1. Ознакомиться с устройствами и принципами работы вентиляторов и областями их применения.
2. Определить экспериментальным путем характеристики центробежного вентилятора.

Содержание отчета

1. Краткий конспект с описанием основных элементов эксперимента: задача эксперимента; теоретический раздел; методика проведения испытаний и результатов расчетов.
2. Таблица результатов эксперимента.
3. Краткий анализ результатов эксперимента и выводы.

Основы теории

Вентиляторами называют машины, предназначенные для перемещения газов при атмосферном или близком к нему давлении. Перемещаемый газ подвергается в вентиляторе незначительному сжатию - разность давлений газа после вентилятора и до него не превышает 10^4 Па (0,1 кгс/см² или 1000 мм вод. ст.), а обычно бывает много меньше. По устройству вентиляторы разделяют на *центробежные* и *осевые*. Центробежные вентиляторы создают большую разность давлений, чем осевые.

Сжатие и перемещение газа в центробежном вентиляторе происходит под действием центробежной силы, возникающей при вращении с большой скоростью рабочего колеса 1 вентилятора (рисунок 10). Это колесо имеет изогнутые лопатки, между которыми проходит газ. Газ всасывается рабочим колесом в центре и выбрасывается с периферии в улиткообразный корпус 2 вентилятора.

При постоянной частоте вращения (при постоянном значении развиваемой центробежной силы) работа центробежного вентилятора характеризуется следующими величинами:

-объемным расходом перемещаемого газа Q , м³/с;

-создаваемой разностью давлений после вентилятора и до него Δp , Па (эту разность давлений иногда называют напором вентилятора);

-затрачиваемой мощностью N , Вт, т. е. коэффициентом полезного действия η , представляющим собой отношение мощности $Q \cdot \Delta p$, требуемой теоретически для сжатия газа (так как давление газа до и после вентилятора мало отличаются, то объемный расход газа Q до и после вентилятора практически одинаков, как и плотность газа ρ), к мощности N , затрачиваемой в действительности:

$$\eta = \frac{Q \cdot \Delta p}{N} \quad (100)$$

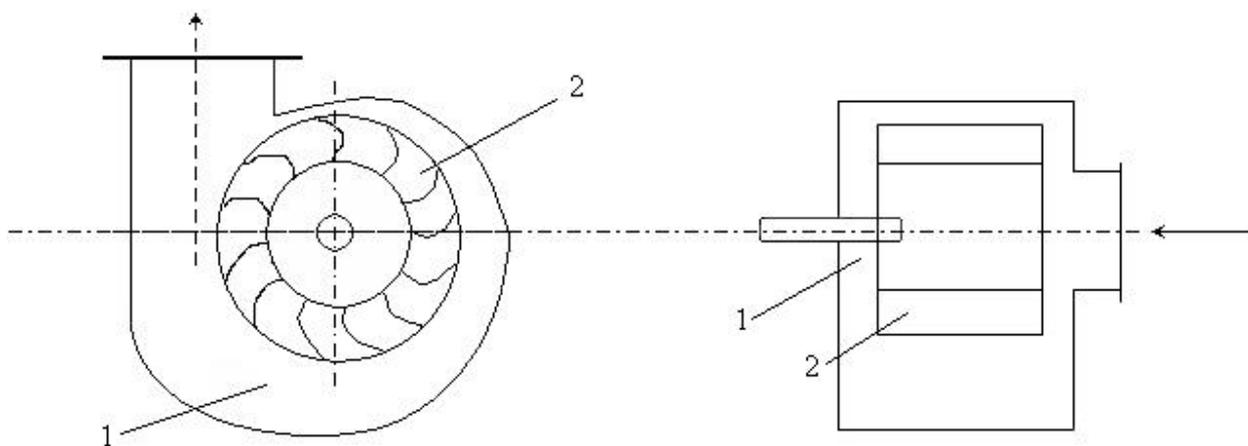


Рисунок 10 – Схема центробежного вентилятора:

1 – корпус; 2 – рабочее колесо

У центробежных вентиляторов Q , и N связаны между собой, и изменение одной из этих величин вызывает изменение остальных.

Графические зависимости $\Delta p=f_1(Q)$, $N=f_2(Q)$, $\eta=f_3(Q)$ называют **характеристиками вентилятора**.

На основании теоретических расчетов эти характеристики с достаточной точностью построить нельзя. Поэтому на практике применяют характеристики вентиляторов, полученные опытным путем. Типичные характеристики центробежного вентилятора при постоянной частоте вращения n показаны на рисунке 11. При другой частоте вращения характеристики вентиляторов будут другими. В небольших пределах изменения n изменения определяются следующими приближенными соотношениями, называемыми **законами пропорциональности**:

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Характеристики вентиляторов служат для исследования их работы в различных условиях и для подбора вентиляторов при проектировании вентиляционных установок.

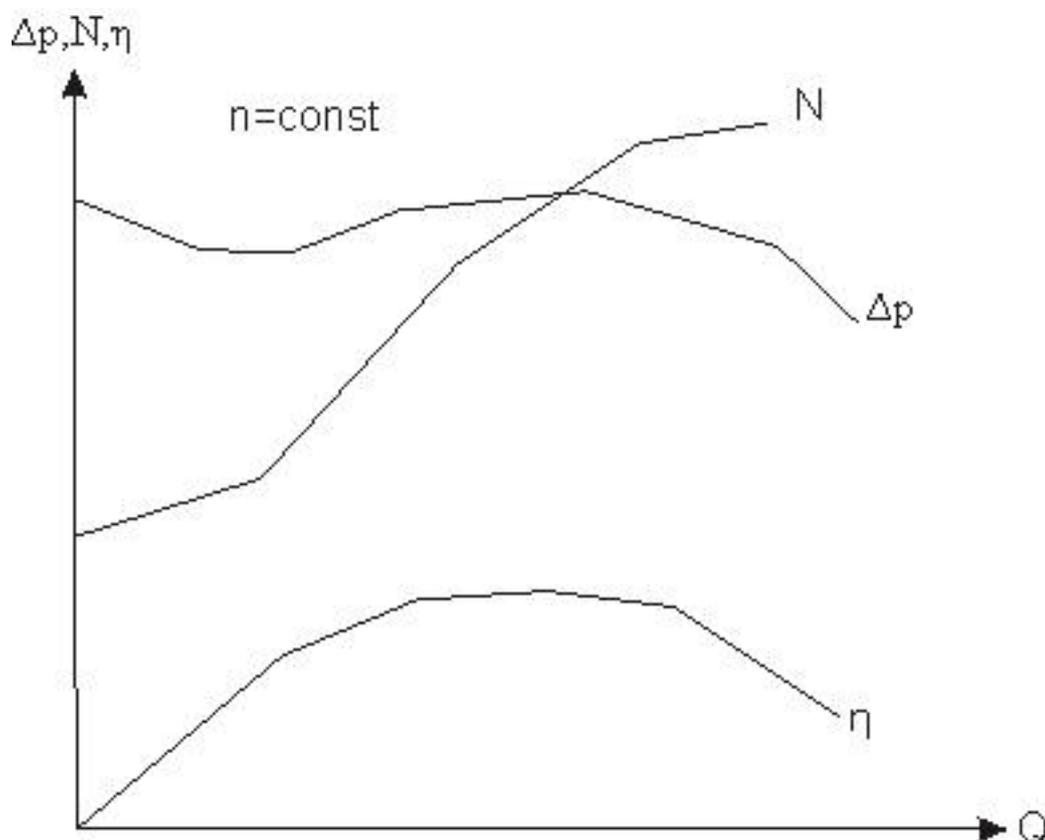


Рисунок 11 – Характеристики центробежного вентилятора

Первая часть данной лабораторной работы заключается в экспериментальном определении трех характеристик центробежного вентилятора при $n = \text{const}$. Для этого, изменяя регулируемой заслонкой, установленной на выходе из нагнетательного трубопровода (рисунок 12), площадь поперечного сечения выходного отверстия и расход перемещаемого вентилятором воздуха, измеряют соответствующими контрольно-измерительными приборами, как об этом сказано ниже, все величины, необходимые для определения Q , Δp и N .

Разность давлений, создаваемая вентилятором:

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (101)$$

где p_1 и p_2 – статические давления воздуха перед вентилятором и после него в местах присоединения трубок дифманометра.

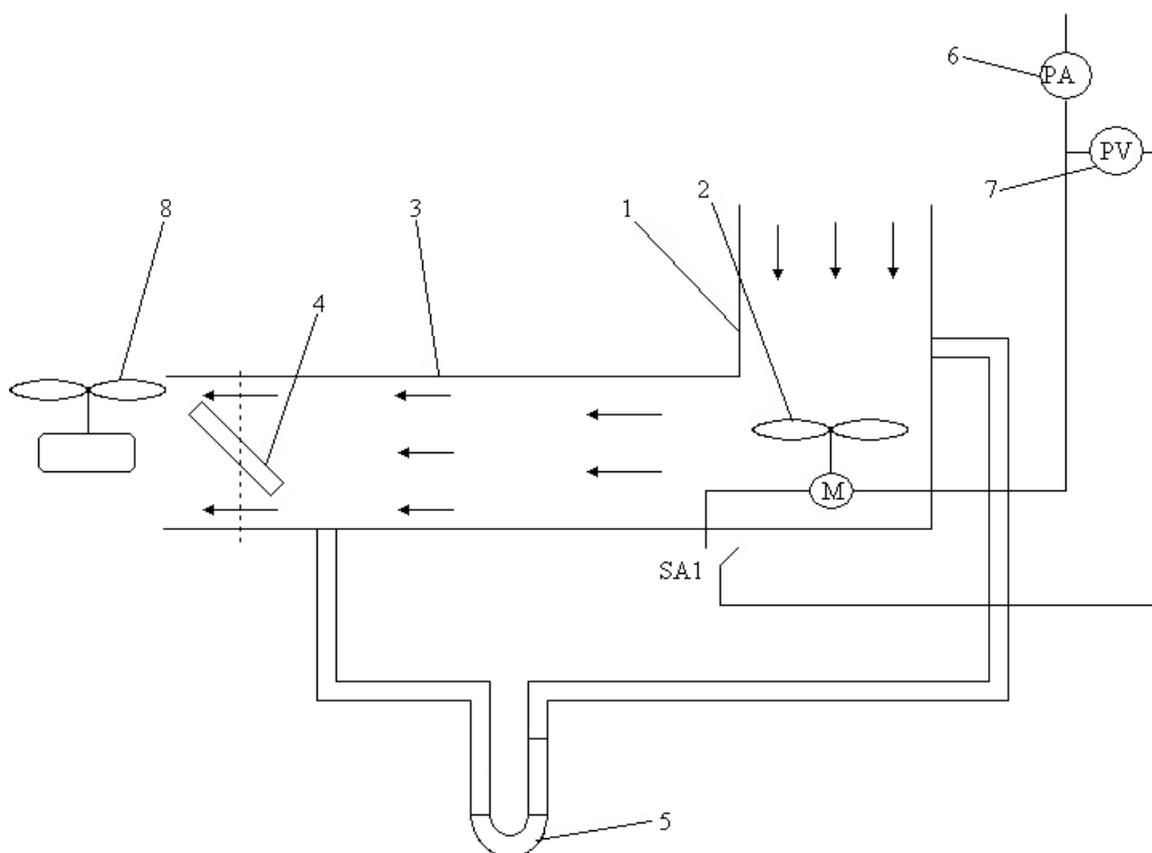


Рисунок 12 – Схема измерения разности давлений, создаваемой вентилятором: 1 – всасывающий трубопровод; 2 – центробежный вентилятор; 3- нагнетательный трубопровод; 4 – регулируемая заслонка; 5 – дифманометр; 6 – амперметр; 7 – вольтметр; 8 – анемометр.

Методика проведения работы

Для получения характеристик вентилятора Q - Δp , Q - N и Q - η проводят первую серию опытов (10 наблюдений) при постоянной частоте вращения n . Расход перемещаемого вентилятором воздуха изменяют регулируемой заслонкой 3, меняя ее открытие.

Необходимые для построения характеристик вентилятора значения Q , Δp и N , η определяют путем соответствующей обработки показаний контрольно-измерительных приборов, полученных во время испытания. Показания дифманометра 5, амперметра 6, вольтметра 7 и анемометра 8 снимают одновременно по команде «отсчет». Эту команду подает студент, регулирующий частоту вращения вентилятора, после того как регулируемая заслонка 3 переставлена в новое положение.

После ознакомления с описанием работы и с установкой в натуре проверяют правильность положения трубок Пито в трубопроводах, нулевые положения жидкости в дифференциальных манометрах и с разрешения преподавателя пускают вентилятор.

Обработка опытных данных и составление отчета.

Полученные данные обрабатывают в следующей последовательности:

1. Определяют разность давлений $\Delta p = p_2 - p_1$, создаваемую вентилятором, определяют (мм. вод. ст.) непосредственным замером по дифференциальному манометру 5.
2. Определяют мощность, потребляемую вентиляционной установкой:

$$N = U * I \quad (102)$$

где U - напряжение постоянного тока,

I – сила тока, А.

3. Определяют расход перемещаемого вентилятором воздуха рассчитывают по уравнению расхода для потока воздуха в трубопроводе:

$$Q = v * f \quad (103)$$

где v – средняя скорость воздуха в трубопроводе, м/с;

$f = 0,785d^2$ – площадь поперечного сечения трубопровода, m^2 (d – внутренний диаметр трубопровода, м).

Среднюю скорость воздуха определяют с помощью анемометра, передвигая его вдоль выходного патрубка.

4. Определяют КПД вентилятора (с электродвигателем) вычисляют по уравнению.

Измеренные и расчетные величины заносят в таблицу 10.

Таблица 10 – Характеристики вентилятора при постоянной частоте вращения

№ опыта	Площадь поперечного сечения выходного патрубка, m^2	Измеренные величины				Расчитанные величины		
		Δp		I, А	U, В	Q, m^3/c	N, Вт	$\eta, \%$
		мм. вод. ст.	Па					

Контрольные вопросы:

1. Какие машины называют вентиляторами?
2. Как определить КПД вентилятора?
3. Напишите математическое выражение характеристик вентилятора?
4. Напишите математическое выражение закона пропорциональности
5. Напишите формулу для определения мощности, потребляемую вентилятором
6. Напишите формулу для определения расхода мощности для перемещаемого вентилятором воздуха.

7. Чем можно определить разность давлений?
8. Каким прибором определяют среднюю скорость воздуха ?
9. С какой целью применяются характеристики вентиляторов?
10. Чем характеризуется работа центробежного вентилятора при постоянной частоте вращения?

РАБОТА №9 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫПАРИВАНИЯ

Цель работы

1. Изучить теоретические основы выпаривания.
2. Освоить методы процессов выпаривания.
3. Изучить конструкции выпарных аппаратов.
4. Исследовать влияние перепада температуры между нагревателем и рабочим телом на процессы выпаривания.

Содержание работы

1. Краткий конспект с описанием основных элементов эксперимента: задача эксперимента; теоретический раздел; методика проведения испытания и результаты расчетов.
2. Таблица результатов эксперимента.
3. Графики зависимостей.
4. Краткий анализ результатов эксперимента и выводы.

Основы теории.

Процесс концентрирования растворов, заключающийся в частичном удалении растворителя путем его испарения при кипении, называется **выпариванием**.

Процесс выпаривания широко применяется для повышения концентрации разбавленных растворов, выделения из них растворенных веществ путем кристаллизации, а иногда и для выделения растворителя (например, при получении питьевой и технической воды в выпарных опреснительных установках).

Для осуществления процесса выпаривания необходимо чтобы между теплоносителями и кипящим раствором была разница температур. Эту разницу температур в процессе выпаривания, называют **полезной разностью температур**.

В качестве теплоносителя в выпарных аппаратах используют насыщенный водяной пар, который называют *греющим* или *первичным*. Выпаривание проводят при атмосферном давлении, под вакуумом или под избыточным давлением. При этом образующийся при выпаривании раствор, называют *вторичным* или *соковым*.

Выпаривание под вакуумом имеет ряд преимуществ по сравнению с выпариванием под атмосферным давлением:

- снижается температура кипения раствора;
- повышается полезная разность температур;
- снижаются потери тепла в окружающую среду;
- появляется возможность использования теплоносителей низкого потенциала.

Недостатками вакуумного выпаривания являются:

- удорожание установки, т.к. требуется дополнительное оборудование (конденсатор, вакуум-насос и др.);
- несколько больший расход греющего пара и энергии на 1 кг выпариваемой жидкости.

При выпаривании под избыточным давлением, вторичный пар может быть, использован в качестве греющего для различных технологических нужд. Вторичный пар, отбираемый из выпарной установки для других нужд, называется *экстра – паром*.

В случае, если в выпарной установке имеется один выпарной аппарат, такую установку называют *однокорпусной*, а если два и более последовательно соединенных корпуса, то – *многокорпусной*. Однокорпусное выпаривание применяется при малых производительностях и необходимости упаривания раствора до высоких концентраций. При многокорпусном выпаривании вторичный пар одного корпуса, является первичным для следующего, что приводит к существенной экономии греющего пара, однако уменьшает теплопередачу из-за малой разности температур.

Материальный баланс и тепловой расчет процесса выпаривания

В процессе однокорпусного выпаривания материальный баланс продуктов имеет вид:

$$G_H = G_K + W, \quad (104)$$

где G_H и G_K - соответственно расходы начального и конечного растворов, кг/с;

W – выход вторичного пара, кг/с.

Если обозначить через X_H и X_K концентрации растворенного продукта в исходном и упаренном растворе, то:

$$G_K = \frac{G_H \cdot X_H}{X_K} \quad (105)$$

$$W = G_H \cdot \left(1 - \frac{X_H}{X_K}\right) \quad (106)$$

$$X_H = \frac{W}{G_H} \quad (107)$$

$$X_K = \frac{W}{G_K} \quad (108)$$

Расход тепла на проведение процесса выпаривания определится из уравнения теплового баланса и имеет вид:

$$Q = D \cdot (h_{гп} - h_{кп}) = G_H \cdot C_H \cdot (t_K - t_H) + W \cdot (h_{кп} - C_v \cdot t_{кон}) + Q_n + Q_{кк} \quad (109)$$

где D – расход греющего пара, кг/с;

$h_{гп}$ – энтальпия греющего пара, кДж/кг;

$h_{кп}$ – энтальпия конденсата греющего пара, кДж/кг;

C_H – теплоемкость исходного раствора, кДж/кг;

C_K – теплоемкость воды, выпаренной из раствора, кДж/кг.

Теплоемкость водных растворов при концентрации ниже 20% может быть определена по формуле:

$$C = 4,19 \cdot \left(1 - \frac{x}{100}\right), \quad (110)$$

t_n и t_k - начальная и конечная температуры раствора в выпарной установке

$h_{вп}$ – энтальпия вторичного пара, кДж/кг;

$t_{кон}$ – температура конденсации;

$Q_{кг}$ – расход теплоты на концентрирование раствора в интервале концентраций от X_n до X_k , кДж/с.

$$Q_{кг} = W \cdot r \quad (111)$$

r – теплота парообразования упаренного раствора, кДж/кг;

Q_n – потери теплоты в окружающую среду, кДж/с.

$$Q_n = F \cdot \frac{\alpha}{1000} \cdot (t_c - t_o) \quad (112)$$

α – коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата к окружающей среде, Вт/(м²*К), определяемый по формуле:

$$\alpha \approx 9,74 + 0,07 \cdot (t_c - t_o), \quad (113)$$

F – площадь наружной поверхности выпарного аппарата, м²;

t_c – температура стенки аппарата, определяемая по формуле

$$t_c \approx \frac{t_k + t_o}{2} \quad (114)$$

Температура кипения раствора и температурные потери

Обычно в однокорпусных выпарных установках известны давления первичного и вторичного пара, при этом разность температур между температурой греющего, и вторичного пара, называемая *общей разностью температур* выпарного аппарата, равна:

$$\Delta t = t_{гп} - t_{вп} \quad (115)$$

где $t_{вп}$ – температура вторичного пара

$t_{гп}$ – температура греющего пара

При определении площади поверхности выпарной установки пользуются полезной разностью температур:

$$\Delta t_{п} = t_{гп} - t_{к} \quad (116)$$

Обе эти температуры связаны между собой уравнением:

$$\Delta t_{п} = \Delta t_{об} - \Delta' - \Delta'' \quad (117)$$

где Δ' и Δ'' – температурные потери (температурные депрессии).

Величину Δ' называют *концентрационной температурной депрессией* (физико-химической):

$$\Delta' = t_{к} - t_{вп} \quad (118)$$

При давлениях больше атмосферного концентрационная температурная депрессия, определяемая по формуле Тищенко:

$$\Delta' = 1,62 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta'_{атм} \cdot \left(\frac{T_{кип}^2}{r} \right) \quad (119)$$

где $T_{кип}$ – температура кипения чистого растворителя, К;

r – теплота парообразования чистого растворителя при данном давлении, кДж/кг;

$\Delta'_{атм}$ – концентрационная температурная депрессия при атмосферном давлении (принимается по справочнику).

Величину Δ'' называют *гидростатической температурной депрессией*. Она характеризуется повышением температуры кипения ($t_{кип}$) раствора с увеличением давления. Эта величина проявляет себя лишь в аппаратах с кипением раствора в кипятильных трубах нагревательной камеры и определяется по формуле

$$\Delta'' = t_{ср} - t_{вп} \quad (120)$$

$t_{ср}$ – температура кипения растворителя при давлении $P_{ср}$ в средней части кипятильных труб:

$$P_{ср} \approx Pa + \frac{H \cdot \rho_{жс} \cdot 9,81}{4} \quad (121)$$

где Pa – давление в аппарате, Па;

H – высота кипятильных труб, м;

$\rho_{ж}$ – плотность раствора, кг/м³

Типы выпарных установок

Выпарные аппараты классифицируют по различным признакам. Наиболее часто используемой, является классификация по принципу организации циркуляции кипящего раствора в аппарате.

По этой классификации различают: выпарные аппараты с естественной и принудительной циркуляцией раствора, пленочные и барботажные аппараты.

При выборе типа и конструкции выпарного аппарата руководствуются следующими положениями:

1. При выпарке маловязких растворов ($6 \cdot 10^{-3}$ - $8 \cdot 10^{-3}$ Па*с) применяют аппараты с естественной циркуляцией.
2. Выпаривание сильно кристаллизующихся растворов умеренной вязкости (до 0,05 Па*с) можно проводить в аппаратах со сниженной поверхностью нагрева.
3. Пенящиеся некристаллизующиеся растворы выпаривают в пленочных аппаратах
4. Сгущение вязких некристаллизующихся растворов следует производить в аппаратах с принудительной циркуляцией или в пленочных аппаратах.
5. Выпаривание агрессивных жидкостей выполняют на барботажных выпарных установках.

Основные типы выпарных аппаратов.

1. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией.

Скорость циркуляции (кратность) в этих аппаратах невелика скорость парожидкостной смеси составляет $0,3 \dots 0,8$ м/с, поэтому коэффициент теплопередачи (k) таких аппаратов низкий.

Для увеличения коэффициента теплопередачи применяют выпарные аппараты с вынесенной циркуляционной трубой. В этих аппаратах циркуляционная трубка не обогревается, следовательно, раствор в ней не кипит. Разность плотностей парожидкостной смеси в трубах и раствора в циркуляционной трубе значительны, из-за чего увеличивается кратность циркуляции и коэффициент теплопередачи.

2. Выпарные аппараты с принудительной циркуляцией.

Эти аппараты имеют более высокую кратность циркуляции. Повышение кратности циркулирования обеспечивается установкой в циркуляционной трубе осевых насосов. В этих аппаратах $K=2000$ Вт/м² *К, поэтому они работают при полезной разнице температур $3 \dots 5$ градусов.

3. Пленочные аппараты.

В этих аппаратах процесс выпаривания осуществляется за один проход жидкости по кипяtilьным трубам, причем раствор движется в них в виде восходящей или нисходящей пленки. Эти аппараты работают в прямоточной схеме движения. В связи с этим в них отсутствует гидростатический столб и гидростатическая депрессия. Для снижения температуры кипения раствора процесс, как правило. В этих аппаратах проводят в вакууме.

4. Барботажные выпарные аппараты.

В барботажных аппаратах рабочим телом являются дымовые газы, которые, проходя через раствор, выпаривают его.

Описание экспериментальной установки.

Известно, что давление и температура в процессе выпаривания оказывают значительное влияние на технико – экономические показатели выпарных установок. С целью исследования влияния этих параметров на производительность и коэффициент полезного действия выпарного аппарата собирают установку, изображенную на рисунке 13.

Выпарная установка представляет собой колонну 1, внутрь которой заливается исходный раствор 2. Раствор нагревается электронагревателем 3. Контроль за температурой и давлением в установке производится с помощью манометра 4 и термометра 5. Упаренный раствор через кран 6 поступает в охладитель 7 по спиральному трубчатому теплообменнику. Полученный конденсат упаренного раствора собирается в емкости 8. Потребляемую установкой мощность определяет по показаниям амперметра 9 и вольтметра 10, включенных в цепь электронагревателя.

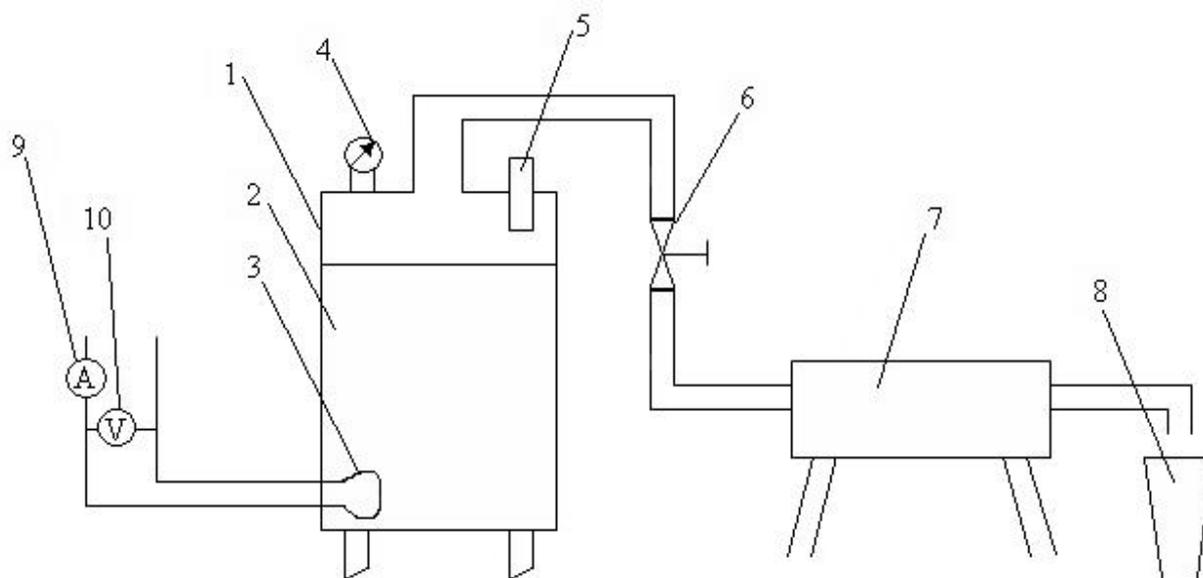


Рисунок 13 – Схема лабораторной установки для исследования процесса выпаривания

Порядок проведения эксперимента

1. Подготавливают разбавленный водо-солевой раствор в концентрации X_n и заливают его в выпарную установку в количестве G_n .

2. Закрывают кран 6 установки, после чего начинают процесс выпаривания, включив электронагреватель и секундомер.

3. Производят нагрев раствора до температуры кипения (t_k), замеряя при этом напряжение (U), силу тока (I) и давление (P_k).

4. Открывают кран 6 и производят сбор конденсата в емкость 8.

5. Отключают электронагреватель и секундомер.

6. Замеряют объем полученного конденсата (W) и температуру конденсата ($t_{кон}$).

7. Полученные данные записывают в таблицу 11.

8. Опыт повторяют 5...7 раз и на основании полученных данных строят графики зависимостей $\eta_v=f(P_k)$, $W=f(P_k)$ или $\eta_v=f(t_k)$, $W=f(t_k)$.

Обработка результатов.

1. Мощность нагревателя определяется по формуле

$$N=I*U, \quad (122)$$

где I – сила тока, А;

U – напряжение, В.

2. Количество выпаренной из раствора воды за единицу времени рассчитывается по выражению

$$W = \frac{W' \cdot 10^{-6} \cdot \rho_v}{\tau}, \quad (123)$$

где W' - количество собранного конденсата, мл; ρ_v – плотность воды, определяемая в зависимости от температуры конденсата по таблицам насыщенного водяного пара, кг/м³; τ - время выпаривания, с.

3. Начальная концентрация раствора определяется по формуле:

$$X_n = \frac{W' \cdot 10^{-4} \cdot \rho_v}{G_n}, \quad (124)$$

4. Конечная концентрация раствора определяется по формуле:

$$X_k = \frac{W' \cdot 10^{-4} \cdot \rho_v}{G_H - W}, \quad (125)$$

5. Количество теплоты, израсходованной на выпаривание, находится из уравнения:

$$Q_w = W' \cdot \rho_v \cdot r \cdot 10^{-6} \quad (126)$$

Где r – теплота парообразования упаренного раствора, определяемая в зависимости от температуры или давления по таблицам насыщенного водяного пара, кДж/кг.

6. Коэффициент полезного действия выпарной установки определяется по формуле:

$$\eta_v = \frac{Q_w \cdot 100}{N \cdot \tau} \quad (127)$$

Результаты эксперимента

Дата проведения эксперимента «__» _____ 20__ г.

Начальная температура раствора _____ С

Количество исходного раствора _____ кг

Таблица 11 – Результаты эксперимента

№	I, А	U, В	N, Вт	P _к , Па	T _к	T _{кон}	τ, с	W, кг/с	W', мл	X _н , %	X _к , %	Q _w , кДж	η, %

Контрольные вопросы

1. Что такое выпаривание?
2. При каком давлении проводят выпаривание?
3. Какой вид имеет материальный баланс продуктов в процессе одно-корпусного выпаривания?
4. Какой вид имеет теплоемкость водных растворов при концентрации ниже 20%

5. Как определить коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата окружающей среде?
6. Полезная разность температур?
7. Формула Тищенко?
8. По какой формуле определяется мощность нагревателя?
9. По какой формуле определяется коэффициент полезного действия выпарной установки?
10. По какой формуле определяется количество теплоты, израсходованной на выпаривание?

РАБОТА №10 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Цель работы.

Экспериментальное определение основных закономерностей процесса резания.

Оборудование рабочего места. Лабораторная установка для резания, угломер, планиметр ПП-М

Содержание работы

1. Рассмотрение основных положений теории резания лезвием и анализ схемы двухопорного резания лезвием
2. Методика проведения исследования на приборе резания
3. Определение основных показателей процесса резания и анализ результатов исследования.
4. Знакомство с основными устройствами для резания

Методика выполнения работы

Рассмотрение основных положений теории резания лезвием и анализ схемы двухопорного резания лезвием

Резание — разделение материала с приданием ему заданной формы, размеров и качества поверхности. Устройства для резания классифицируют:

по назначению — для резания хрупких, твердых, упруговязко-пластичных и неоднородных материалов;

по принципу действия — на периодические, непрерывные и комбинированные;

по виду режущего инструмента — на пластинчатые, дисковые, струнные, гильотинные, роторные, струйные (жидкостные и пневматические), ультразвуковые и лазерные;

по характеру движения режущего инструмента — с вращательным, возвратно-поступательным, плоскопараллельным, поворотным и вибрационным движением;

по характеру движения материала при резании и по виду его крепления.

Резание заключается в разрушении некоторого слоя материала непосредственно под режущей кромкой инструмента под влиянием давления на нее со стороны инструмента. Разрушающийся слой материала иногда называют граничной зоной. По мере продвижения инструмента данный слой подвергается вначале упругой, а потом пластической деформации. Если напряжение превышает предел прочности, происходит его разрушение и продвижение через него режущей кромки инструмента. Работа в процессе резания затрачивается на создание упругой и пластической деформации, а также на преодоление трения инструмента о разделяемые части материала.

Обозначим усилие, которое необходимо приложить к кромке ножа длиной 1 м для разрушения материала, через P (Н/м), а площадь резания через Lb , где Lb — соответственно длина и ширина разреза, м.

Тогда работа резания (Дж)

$$A = PLb. \quad (128)$$

Отнеся работу к 1 м^2 , получим удельную работу резания $A_{\text{уд}}$ (Дж/м²).

На процесс резания лезвием влияет целый ряд технологических, кинематических и конструктивных показателей. Рассмотрим процесс двухопорного резания на многоножевом дисковом измельчителе.

1) Критического условия резания $P_{\text{кр}}$, Н, при котором заканчивается процесс сжатия материала лезвием и начинается непосредственно процесс резания:

$$P_{\text{кр}} = \sum P_Z = P_{\text{рез}} + P_{\text{сж}} + T = P_{\text{рез}} + P_{\text{вред}} \quad (129)$$

$$P_{\text{кр}} = \frac{\sigma_{\text{разр}} \cdot (\delta + \delta_1 \cdot \xi) + E \cdot \kappa_1}{2 \cdot h} + \frac{f \cdot E \cdot k_2}{2 \cdot h} \quad (130)$$

где $P_{\text{ВРЕД}}$ - суммарная составляющая $P_{\text{КР}}$, включающая затраты усилия и сжатия материала ($P_{\text{сж...1,2}}$) лезвием, на трение материала о кромки лезвия ($T_{1,2,3}$), на обжатие лезвия перерезаемым материалом ($P_{\text{ОБЖ}}$), Н;

$P_{\text{РЕЗ}}$ - суммарная составляющая $P_{\text{КР}}$, затрачиваемая непосредственно на резание материала обеими режущими кромками, $P_{\text{РЕЗ}} = P_{\text{РЕЗ1}} + P_{\text{РЕЗ2}}$, Н;

δ и δ_1 - острота (толщина) лезвий, м;

$\sigma_{\text{РАЗ}}$ - разрушающее (контактное) напряжение под кромками лезвий,

Па;

E - модуль упругости перерезаемого материала, Па;

$h_{\text{СЖ}}$ - величина предварительного сжатия слоя материала, м (5.1);

h - толщина слоя перерезаемого материала, м;

β - углы заточки лезвий, град, (принято ($\beta = 30^\circ$, $\beta_1 = 85^\circ$,));

ξ - коэффициент, учитывающий снижение $\sigma_{\text{РАЗ}}$ за счет наличия второй режущей кромки;

k_1, k_2 - коэффициенты, учитывающие влияние геометрических параметров и физико-механических свойств материала;

f - коэффициент трения материала о грани лезвия;

$P_{\text{СЖ}}$ - усилие сжатия материала, Н;

T - сила трения лезвия о материал, Н.

2) Удельного давления, q Н/м нормальной составляющей N усилия резания $P_{\text{РЕЗ}}$, достаточной для перерезания материала и отнесенной к единице длины нагруженного участка лезвия ΔS , м:

$$q = \frac{N}{\Delta S} = \frac{P_{\text{рез}} \cdot \cos \tau}{\Delta S} \quad (131)$$

где τ - угол наклона ножа, град.

$$\Delta S = \frac{a}{\sin \varphi} \quad (132)$$

где a - толщина перерезаемого слоя, 35 см;

φ - угол защемления, град., $\varphi = 30^\circ - 51^\circ$

3) Удельной работы резания $A_{уд}$, Дж/м, затрачиваемый на перерезание единицы площади поперечного слоя стеблей:

$$A_{уд} = q(1 + f^l \cdot tg \tau) \quad (133)$$

где $(1 + f^l \cdot tg \tau)$ - характеристика ножа;

f - коэффициент скользящего резания.

$A_{уд} = (3-7) \times 10^3$ Дж/см², (сено, солома);

$A_{уд} = (3-5) \times 10^3$ Дж/см² (трава).

4) Усилие защемления материала:

$$\delta \leq 2\varphi_{\min} \quad (134)$$

где φ_{\min} - минимальный угол трения лезвия по материалу (для режущих аппаратов: дисковых $\chi = 40-50^\circ$; барабанных $\chi = 24-30^\circ$).

5) Режущего (контактного) напряжения резания $G_{РАЗ}$ усилия, необходимого для внедрения лезвия в материал, отнесенного в единице площади режущей кромки лезвия:

$$\sigma_{раз} = \frac{P_{раз}}{(\delta \cdot \Delta S)} \quad (135)$$

где $P_{РАЗ}$ - составляет 60-70% от критического (общего) условия резания $P_{КР}$;

δ - острота (толщина) лезвия, ΔS - рабочая длина (нагруженный участок) лезвия, м.

Методика проведения исследования

- Познакомиться с устройством лабораторной установки для резания

- Проверить техническое состояние прибора. Установить под заданным углом сменный нож, противорезающие пластины и диаграммную бумагу. Проверить работу записывающего устройства.

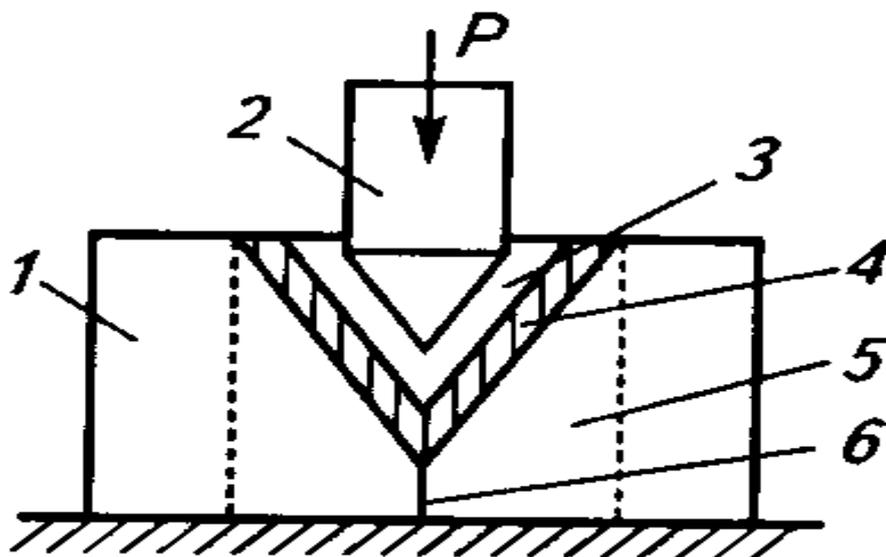


Рисунок 14 – Лабораторная установка для резания

1— корпус; 2 — режущий инструмент; 3— зона пластических деформаций; 4— зона упругих деформаций; 5— зона воздействия инструмента; 6— разрушения

Для исследований отбирают 200-300 моркови, свеклы, картофеля.

Измельчаемый материал закладывают в лоток прибора, и, нажав на рычаг прибора, уплотняют стебли в лотке. Площадь поперечного сечения F измельчаемого материала

- Провести экспериментальные исследования

Перед началом опыта на диаграммах наносят нулевую линию. Устанавливая нож с углом заточки $\beta = 20, 35$ и 60° под углом $\tau = 0, 30$ и 60° , проводят исследование процесса резания в трехкратной потребности. Процесс резания осуществляют резким перемещением рычага прибора вниз. Полученные диаграммы снимают и планиметрируют.

Определение основных показателей процесса резания и анализ результатов исследований

- 1) Провести расчеты работы резания
- 2) Полученные данные проанализировать и построить зависимости

$P_{кр} = f(\beta)$ и $q = \varphi(\tau)$ определить наиболее благоприятные условия резания.

Знакомство с устройствами для резания

Свеклорезка

Принцип действия свеклорезки заключается в следующем. Свекла загружается в свеклорезку через загрузочный бункер, увлекается вращающейся улиткой и под действием центробежной силы прижимается к режущей кромке ножей, которыми изрезывается в стружку. Свекловичная стружка через проемы ножевых рам выпадает в пространство между корпусом свеклорезки и кожухом и затем через люк поступает на дальнейшую переработку

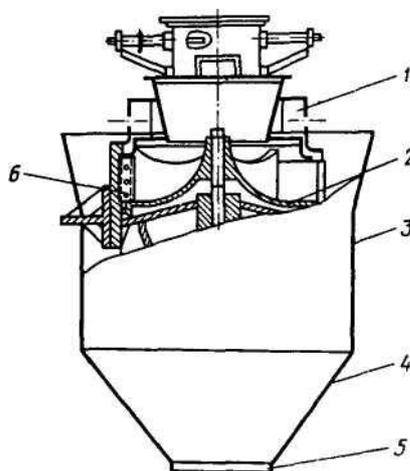


Рисунок 15 – Свеклорезка

1 – разрезаемый материал; 2 – режущий инструмент; 3 – зона пластических деформаций; 4 – зона упругих деформаций; 5 – зона воздействия инструмента; 6 – линия разрушения.

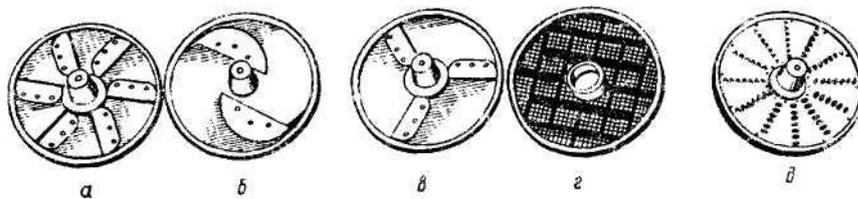


Рисунок 16 – Режущие диски овощерезки:

а — стандартный лимтерезный; *б* — тонкий для резки мягких продуктов,
в — нож для нарезки волнистых ломтиков; *г* — для нарезания кубиков;
д — терка

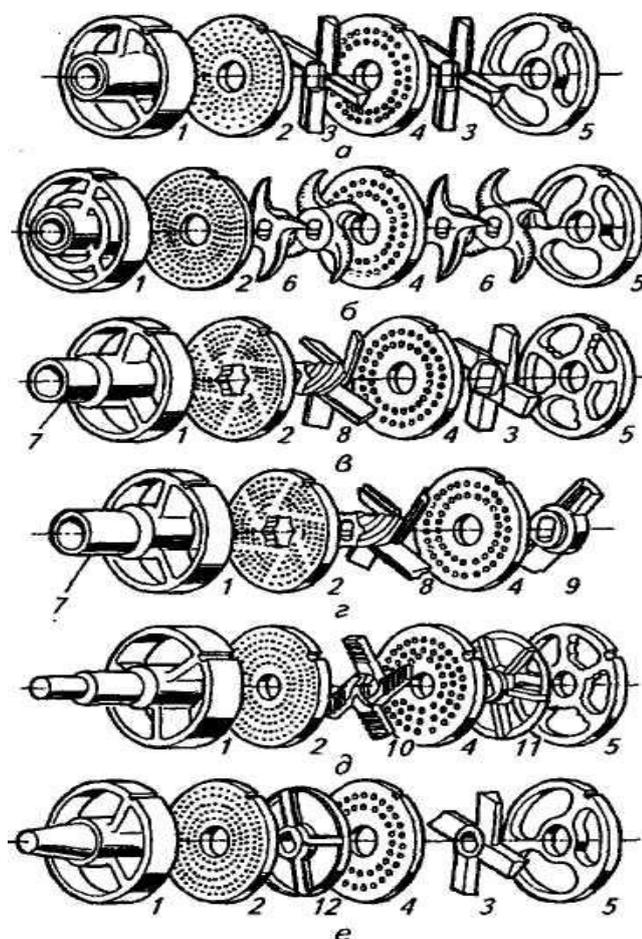


Рисунок 17 – Режущие механизмы

а— К6-ФВЗП-200; *б*- К6-ФВП-160; *в, г*-фирмы «*Seydeltmann*» (Германия); *д* —
 фирмы «*Laska*» (Австрия); *е* — фирмы «*Kramer + Grebe*» (Германия): 1 —
 кольцо-подпорка; 2— выходная решетка; 3 — четы-рехзубый нож с прямоли-
 нейными режущими кромками; 4—промежуточная решетка; 5—приемная ре-
 шетка; 6— четырехзубый нож с криволинейными режущими кромками; 7—
 трубчатая насадка; 8, 10, 12 — жилолочные

Контрольные вопросы

1. Дать определение процесса резания.
2. Дать классификацию устройств для резания
3. Как определить работу резания
4. По схеме двухопорного резания показать составляющие усилия, необходимого для внедрения ножа со ступенчатой режущей кромкой в материал.
5. Объяснить выражение для определения критического усилия $P_{кр}$.
6. Раскрыть понятия: удельное давление, удельная работа резания $A_{уд}$.
7. Объяснить выражение для определения контактного напряжения резания.
8. По диаграмме резания дать характеристику и измеряемые параметры.
9. Каково влияние угла заточки лезвия на величину критического усилия резания $P_{кр}$?
10. Каковы условия защемления материала при резании

РАБОТА №11: ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ КОРМОВ

Цель работы

Изучение процесса смешивания кормов и получения навыков по определению качества смеси.

Содержание работы

1. Ознакомление с методами определения однородности кормовых смесей.
2. Изучение экспериментальной установки для смешивания и определения ее энергетических и кинематических показателей.
3. Определение однородности кормовой смеси, производительности смесителя и мощности, необходимой для привода рабочего органа смесителя.
4. Составление отчета.

Порядок выполнения работы

Ознакомление с методами определения однородности кормовых смесей

Смешивание - процесс получения однородной смеси из нескольких компонентов, т.е. создание равномерного распределения частиц каждого компонента во всем объеме смеси путем взаимного перемещения их под воздействием внешних сил. В реальных условиях на механических смесителях может быть достигнуто так называемое неупорядочное состояние смеси, при котором вероятность нахождения каждого компонента в любой произвольной точке объема есть величина постоянная, равная его доле во всей массе смеси. Количественной характеристикой завершенности процесса смешивания является степень однородности смеси λ , представляющая собой массовое отношение содержания контрольного компонента в анализируемой про-

бе к содержанию того же компонента в идеальной (рецептурной) смеси, выраженное в процентах или долях единицы.

Смесь *считается* хорошей при $\lambda > 92 \%$, удовлетворительной при $\lambda = 90..92 \%$, плохой при $\lambda < 85 \%$.

Для определения степени однородности смеси можно использовать выражения

$$\lambda = \sum_1^n \frac{B_t}{B_0}, \text{ при } B_t < B_0 \quad (136)$$

$$\lambda = \sum_1^n \frac{(2B_0 - B_t)}{B_0}, \text{ при } B_t > B_0 \quad (137)$$

где B_t - доля меньшего компонента в пробе;

B_0 - доля того же компонента в расчетной (идеальной) смеси;

n - число проб.

При промышленном производстве кормовых смесей о степени однородности судят по коэффициенту вариации. В этом случае однородность смеси:

$$\lambda = 100 - \gamma \quad (138)$$

где γ - коэффициент вариации, %

$$\gamma = \frac{100 \cdot \sigma}{\bar{B}_t} \quad (139)$$

где σ - среднеквадратическое отклонение содержания компонента;

\bar{B}_t - среднее арифметическое содержание компонента, найденное из опыта.

Значение σ определяют из выражения

$$\sigma = \pm \sqrt{\sum_1^n \frac{(B_{ti} - \bar{B}_t)^2}{(n-1)}} \quad (140)$$

где B_{ti} - содержание компонента в i -й пробе.

Процесс смешивания следует рассматривать, как вероятность и степень однородности смеси можно определять методом отбора проб смеси с последующим статистическим анализом. Определяющими признаками при

этом могут быть: число зерен компонента в пробе или его массовая доля, размеры зерен и т.п. В результате получается группа чисел, характеризующие состав проб по признаку, принятому в качестве определяющего.

В дальнейших расчетах эти группы цифр обрабатываются методами математической статистики.

Для определения степени однородности смеси пробы следует брать с разных участков по длине смесителя. С каждого участка следует взять не менее 5 проб. Чем больше масса пробы, тем достовернее значение λ :

Г.М. Кукта рекомендует принимать массу пробы при анализе комбикормов равной 2-5 г, а влажных смесей 50-200 г. В лабораторной работе рекомендуется принять массу пробы комбикормов 5 г, при использовании влажных смесей -100 г.

Энергоемкость процесса смесеобразования в значительной мере зависит от рода перемешиваемых кормов, их реологической характеристики. При перемешивании влажных текучих кормовых смесей, например, мясорыбных фаршей, в смесителях с ленточным рабочим органом зависимость потребляемой смесителями энергии от скорости и реологической характеристики смеси может быть определена как:

$$K_m = c \cdot Re^m \quad (141)$$

где K_m - критерий мощности;

Re - критерий Рейнольдса;

c, m - коэффициенты (для одно-спирального рабочего органа $c=1,43 \times 10^3$; $m=-1$).

Критерий Рейнольдса для смесителя с ленточным рабочим органом имеет вид

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot d_{\text{пр}}^2}{\mu_{\text{эф}}} \quad (142)$$

где ρ - плотность смеси, кг/м³;

n - частота вращения рабочего органа смесителя, с⁻¹;

$d_{\text{пр}}$ — приведенный диаметр рабочего органа, м;

$\mu_{\text{эф}}$ - эффективная вязкость смеси, Па с.

Приведенный диаметр ленточного рабочего органа смесителя:

$$d_{\text{пр}} = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (143)$$

где d_1, d_2 – наружный и внутренний диаметр спирали, м

Расчетная мощность привода ленточного рабочего органа:

$$N_p = K_m \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_{\text{пр}}^5 \quad (144)$$

Изучение лабораторной установки и определение её энергетические и кинематических показателей

Экспериментальное исследование рабочего процесса смесителя шнекового типа выполняется на лабораторной смесительной установке (рисунок 19). Основными рабочим органом является шнек 1 длиной 1,5 метров, расположенный в кожухе 2. Для загрузки ингредиентов имеется бункер 3, а для взятия проб в днище кожуха выполнены отверстия, под которыми устанавливаются отборники проб 4. Пробы берутся на расстояниях 0,5 и 1,5 метра от места загрузки. Изменение кинематического режима привод шнека осуществляется от электродвигателя 5 через 4-х ступенчатую коробку перемены передач 6. Привод от вала коробки перемены передач осуществляется клиноременной передачей 7.

Кинематические параметры привода шнекового смесителя.

1. Частота вращения вала электродвигателя $n = 1410$ об./мин.
2. Передаточные числа коробки перемены передач:
 - а) на первой передаче - 6,4
 - б) на 2-й передаче - 3,09
 - в) на 3-й передаче - 1,69
 - г) на 4-й передаче - 1,0
3. Передаточное число клиноременной передачи — 1,6.

Для оценки быстроходности смесителя тахометром определяют частоту вращения мешалки и измерив ее радиус, рассчитывают показатель кинематического режима работы смесителя лабораторной установки по формуле

$$K = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} \quad (145)$$

где ω - частота вращения шнека, с^{-1} ;

R - радиус шнека, м;

g - ускорение силы тяжести, равное $9,81 \text{ м/с}^2$.

В зависимости от частоты вращения шнека смесителя делят на тихоходные и быстроходные. К тихоходным относят смесители, у которых показатель кинематического режима $k < 30$, а к быстроходным $k > 30$. Значения мощности холостого хода и величины определяют для 3-5 скоростей рабочего органа, начиная с наименьшей.

В экспериментальной установке радиус шнека $R=0,042 \text{ м}$.

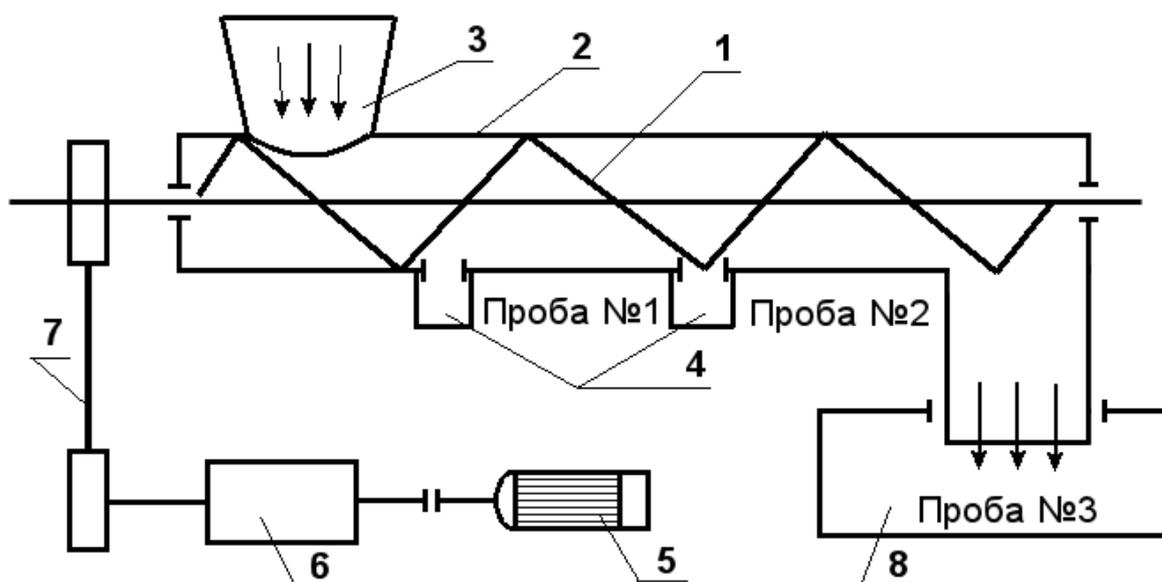


Рисунок 18 – Схема экспериментальной установки.

1 - шнек; 2 - кожух; 3 - бункер для загрузки; 4 - емкость для отбора проб; 5 - электродвигатель; 6 - коробка перемены передач; 7 - клиноременная передача; 8 - бункер готовой смеси.

Определение однородности кормовой смеси, производительности смесителя и мощности, необходимой для привода рабочего органа смесителя

1. Определить кинематический режим для четырех положений переключателя в коробке передач по формуле

$$K = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} \quad (146)$$

где ω - угловая скорость шнека шнека, с^{-1} ;

Результаты занести в таблицу 12.

2. В качестве ингредиентов для проведения опытов берется дерть с различными размерами (мелкая, крупная) или горох и овес; смесь готовится по заданной пропорции из 2-х ингредиентов. Взвесить смешиваемые ингредиенты согласно заданной пропорции (масса одной пропорции должна находиться в пределах 0,5... 1 кг).

3. Засыпать ингредиенты в бункер, распределяя их беспорядочно.

4. Установить рычаг коробки передач в необходимое для опыта положение (1-я передача).

5. Установить емкость для отбора проб строго под отверстиями в кожухе шнека. Конечная проба берется в бункере готовой смеси во время опыта в количестве, не превышающем 50 г.

6. Включить электродвигатель и секундомер.

7. После того как загруженное количество ингредиентов переместится шнеком в бункер готовой смеси включить электродвигатель, секундомер.

8. Снять емкости с пробами и взвесить каждую пробу. Результаты записать в таблицу 13.

9. С помощью решетного классификатора разделить смесь на компоненты и взвесить каждый ингредиент. Результаты взвешивания записать в таблицу 13.

10. Разделить с помощью классификатора готовую смесь из бункера на ингредиенты.

11. В такой же последовательности проделать опыты на 2-й, 3-й и 4-й передачах. Все опыты проводить с трехкратной повторностью.

После разделения взвешивают меньший компонент и, заполнив таблицу 16, рассчитывают однородность смеси.

По результатам опытов строят график зависимости:

$$\lambda = f(l)$$

После определения степени однородности смеси вновь включают установку и при тех же значениях частоты вращения мешалки, что и на холстом ходу записывают величину мощности, требуемую для привода. Определение мощности выполняют, используя прибор типа К-51. Взамен прибора К-51 в состав установки может быть включен ваттметр-самописец. Увеличивая затем скорость вращения мешалки до максимальной, записывают еще 3-4 значения мощности привода.

Результаты определения мощности заносят в таблицу 12.

По результатам наблюдений строят график зависимости

$$N = f(v) \quad (147)$$

где v - окружная скорость рабочего органа смесителя, м/с.

После окончания процесса смешивания и определения мощности на привод открывают выгрузное окно и фиксируют по секундомеру продолжительность выгрузки смеси. Рассчитывают производительность смесителя по выражению

$$\Theta = \frac{G}{(\tau_3 + \tau_{см} + \tau_в)} \quad (148)$$

где Θ - производительность смесителя, кг/с;

G - масса смеси в смесителе, кг;

τ_3 - продолжительность загрузки, с (для условий лабораторной работы можно принять $\tau_3 = 5$ с);

τ_v - продолжительность выгрузки, с (определяется при разгрузке смесителя);

$\tau_{см}$ - продолжительность смешивания, с (задается в пределах 5, 10, 15, 20, и 25 минут; можно принимать продолжительность смешивания от 2 до 10 мин., через две минуты).

Контрольные вопросы

1. Что такое смешивание?
2. Что является количественной характеристикой завершенности процесса смешивания?
3. Критерий Рейнольдса для смесителя с ленточным рабочим органом?
4. Расчетная мощность привода ленточного рабочего органа?
5. Частота вращения вала электродвигателя шнекового смесителя?
6. По какой формуле рассчитывают показатель кинематического режима работы смесителя?
7. Какой должен быть показатель кинематического режима у тихоходного смесителя?
8. К быстроходным относят смесители, у которых показатель кинематического режима:
9. По какой формуле рассчитывают производительность смесителя?
10. Приведенный диаметр ленточного рабочего органа смесителя?

Таблица 12 – Результаты определения мощности режимов работы смесителя

№ опыта	v м/с смесителя	N_{xx} , Вт	$N_{раб}$, Вт	$N_{пол}=(N_{раб}-N_{xx})$, Вт	Кинематические режимы, k , k_1
1					
2					
3					
Среднее					

Таблица 13 – Оценка качества работы смесителя

№ опы та	Проба №1 $\alpha=0,5$ м			Проба №1 $\alpha=1,0$ м			Проба №1 $\alpha=1,5$ м		
	Масса пробы	Содержание в пробе, г	Однородность смеси	Масса пробы	Содержание в пробе, г	Однородность смеси	Масса пробы	Содержание в пробе, г	Однородность смеси
Кинематический режим $k_1=$									
1									
2									
3									
Ср									
Кинематический режим $k_2=$									
1									
2									
3									
Ср									
Кинематический режим $k_3=$									
1									
2									
3									
Ср									
Кинематический режим $k_4=$									
1									
2									
3									
Ср									

РАБОТА №12 УСТРОЙСТВО И РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ЭКСТРУДЕРА

Цель работы

Изучить устройство пресс – экструдера ПЭК – 125 – 8.

Содержание работы

1. По методическому пособию изучить принцип работы установки ПЭК –125 – 8.
2. Изучить устройство ПЭК – 125 – 8.
3. Изучить распределение давлений по длине нажимного шнека.
4. Изучить требования к исходному сырью.

Общие сведения

В последнее время количество недостающего перевариваемого протеина в кормах, вскармливаемых в стойловый период, ежегодно составляет 3,8...4,8 млн. тонн, или около 25% общей потребности. За счет этого количества протеина можно было бы обеспечить получение 25 млн. тонн прироста живой массы молока, или 3,5 млн. тонн прироста живой массы животных дополнительно. Многочисленные исследования показали, что использование карбамида в качестве компонента в кормовой смеси АКД – наиболее перспективный способ восполнения протеина в рационах кормления скота.

Экструдирование кормов может осуществляться по двум методам:

1. Производство карбамидного концентрата на основе злаковых культур и карбамида.
2. Термодинамическая обработка фуражного зерна.

Применение карбамидного концентрата в рационах жвачных животных в количестве до 1 кг в сутки дает возможность увеличить надои молока на 15%, привес скота на откорме – на 15...20%, снизить расход кормов 10...15%.

Назначение пресс – экструдера

Пресс – экструдер ПЭК – 125 – 8 предназначен для производства методом экструзии карбамидных концентратов на основе размолотого зерна ячменя, пшеницы или кукурузы с добавлением мочевины, бентонита натрия и премиксов.

Таблица 14 – Техническая характеристика пресс – экструдера

Показатели	КМЗ - 2	ПЭК – 125 – 8
Производительность, кг/ч	500	650
Температура процесса, °С	130...160	до 180
Давление на выходе, МПа	1,86	2,0
Габаритные размеры, мм:		
Длина	1610	3330
Ширина	860	710
Высота	1550	1620
Мощность электродвигателя, кВт		
Основного привода	40	55
Шнека дозатора	0,8	0,5
Частота вращения, мин ⁻¹		
Основного электродвигателя	1000	1460
Вала шнека дозатора	3000	1500
Длина сборного шнека, мм	482	1000
Число обогреваемых зон, шт		
Корпуса	-	2
Головки	-	1
Емкость бункера, дм ³	-	50

Требования к исходному сырью

Рецептура перерабатываемого сырья включает (в весовых частях):

- 1) дробленое зерно пшеницы, ячменя или кукурузы – 70...80%,
- 2) мочевины гранулированная – 15...25%,
- 3) бентонит натрия порошкообразный – 5%,
- 4) влажность – 12...14%,
- 5) плотность – 0,6 г/м³,
- 6) угол естественного откоса – 27...50°.

Устройство пресс – экструдера ПЭК – 125 – 8

С 1975 года наша промышленность выпускает серийно пресс – экструдер типа КЗМ – 2. В настоящее время создан опытный образец экструдера ПЭК – 128 – 8 (рисунок 19).

Пресс – экструдер ПЭК – 125 – 8 состоит из следующих основных узлов: основания (рамы) – 2, основного привода – 19, 18, 1, 17, бункера – 13, питающего шнека дозатора – 8, 9, нагнетающего шнека – 6, сборного корпуса (цилиндра) – 24, матрицы – 4, шайбы с прорезями – 7. Шнековая часть рабочего органа экструдера разделена на несколько ступеней (зон). В первой ступени – зона загрузки – где продолжается интенсивное перемешивание частиц вдоль оси шнека, а также начинается их уплотнение. Уплотнению способствуют шайбы, которые создают сопротивление перемещению смеси. Смесь перемещается из первой зоны во вторую. Происходит рост взаимных контактов, что в свою очередь ведет к увеличению молекулярного взаимодействия частиц и, следовательно, к увеличению сопротивления скольжения. Вследствие неровности поверхностей частиц корма в процессе прессования происходит сдвиг и срез поверхностного слоя, что свидетельствует о наличии предельного трения.

В третьей и последующих зонах кормовая смесь приобретает вязко – пластическое состояние. При нарастании давления повышается температура концентрата до 110...150 °С. при этом карбамид плавится и растворяется за счет влаги зерна, равномерно распределяясь в смеси ингредиентов.

В завершающей стадии обработки смесь ингредиентов в вязко – пластическом состоянии продавливается через регулируемые отверстия матрицы, где под действием возрастающего давления и температуры между частицами укрепляются молекулярные связи. Из матрицы протеиновая смесь выходит в виде жгута, который потом ножом экструдера разрезается на гранулы. Затем гранулы охлаждаются до температуры 25...30°С и подвергаются повторному измельчению на дробилках.

При экструдировании происходит преобразование механической работы, совершаемой шнеком, в тепловую энергию.

Распределение давления в экструдере по длине нагнетающего шнека показано на рисунок 20.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен экструдер?
2. Какая производительность экструдера ПЭК-125-8., Кг/ч.?
3. При каком давлении на выходе проходит процесс экструдирования?
4. Какая мощность электродвигателя основного привода, кВт?
5. Какая температура процесса на экструдере КМЗ-2 °С?
6. Для чего нужны шайбы на нагнетающем шнеке?
7. В какой зоне распределения давления в экструдере максимальное давление достигает порядка 4 МПа?
8. Какое давление на первой греющей шайбе?
9. Какое давление на второй греющей шайбе?
10. Какой процесс происходит при экструдировании?

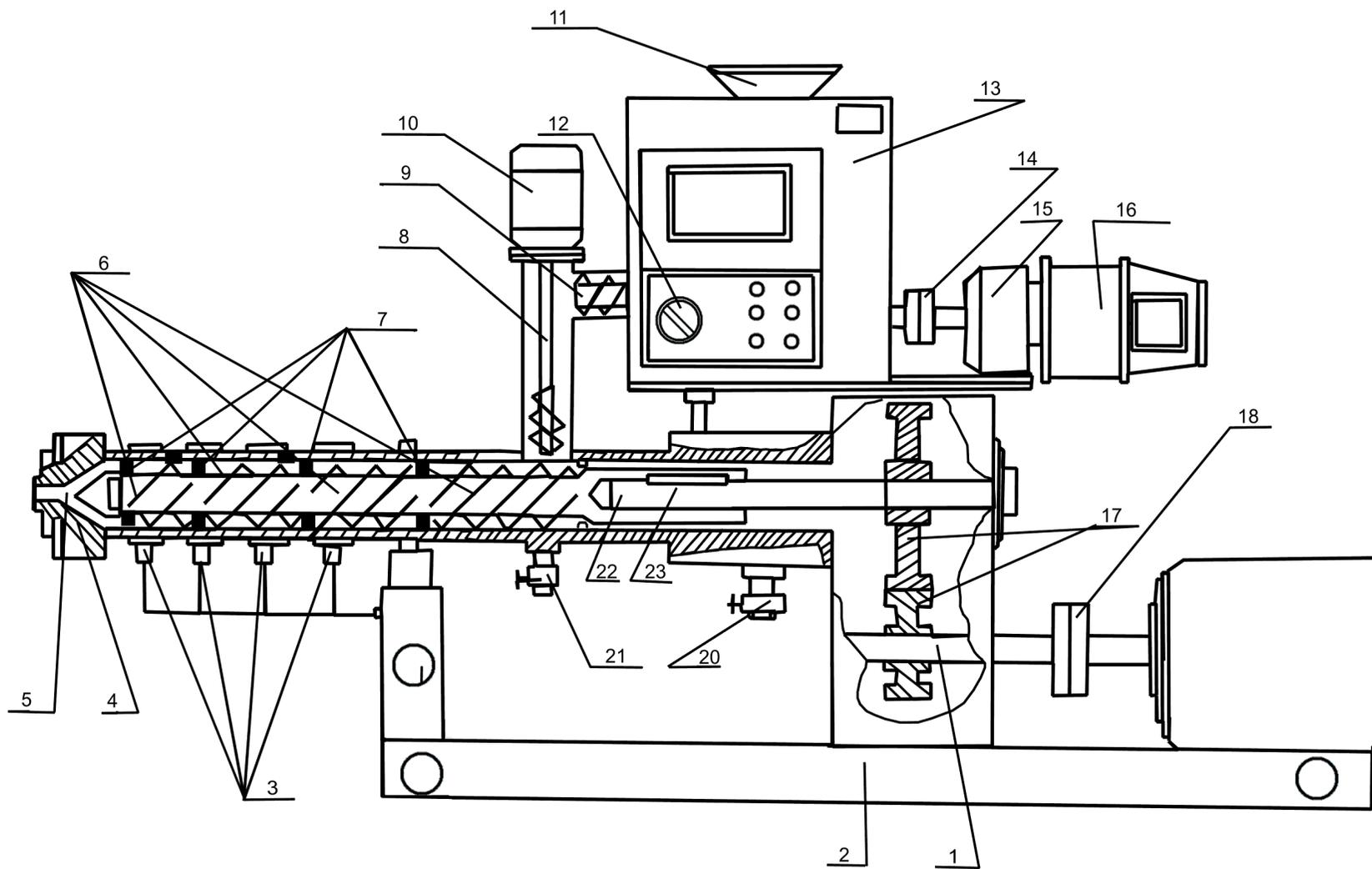


Рисунок 19 – Общий вид экструдера

P, МПа

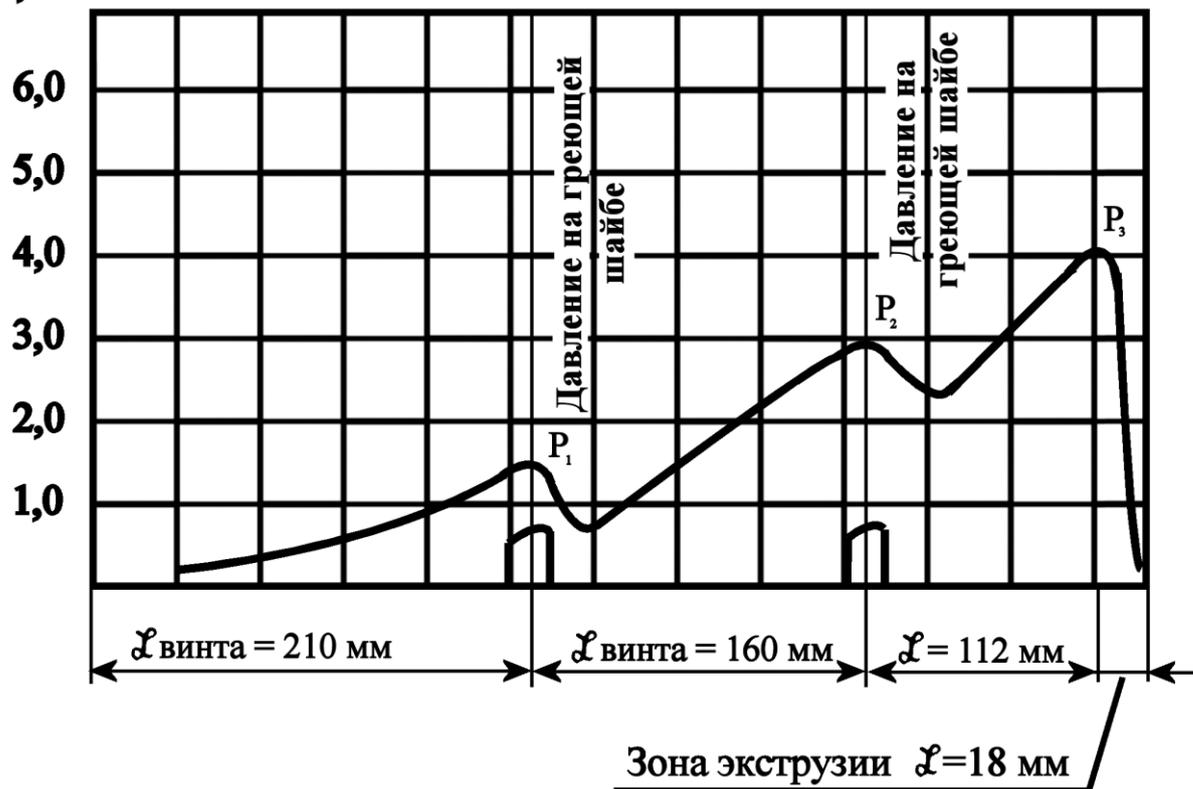


Рисунок 20 – Распределение давления в экструдере по зонам

РАБОТА №13 ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы

Определить энергетические параметры процесса дробления и дать анализ гранулометрическому составу зерна и продуктов его измельчения.

Содержание работы

1. Методика определения факторов, влияющих на энергетические показатели дробилки.
2. Определить модуль помола и степень измельчения зерна.
3. Определить гранулометрический состав продуктов измельчения зерна.
4. Определить удельный расход энергии на процесс дробления зерна.
5. Построить гистограмму распределения дерти (измельченного зерна).
6. Составить отчет.

Методика определения факторов, влияющих на энергетические показатели дробилки

1. Влажность зерна W , которое будет измельчаться в процессе выполнения лабораторной работы, определить по формуле:

$$W = \left(\frac{G2 - G1}{G1 - G} \right) \cdot 100 \quad (149)$$

Где G – масса пустой боксы, г;

$G1$ – масса боксы с навеской после высушивания, г;

$G2$ – масса боксы с навеской до высушивания, г.

Для определения влажности навеска размолотого продукта массой 10 г помещается в алюминиевую боксу, которая устанавливается на 20 мин в сушильный шкаф СЭШ – 3М или прибор ИЛ-ЭМА.

2. Эффективность (\mathcal{E}) рабочего процесса измельчения зерна на дробилке определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = Q/P \quad (150)$$

где \mathcal{E} – эффективность процесса измельчения зерна, кг/(кВт·ч);

Q – производительность дробилки, кг/ч;

P – установленная мощность, кВт.

О качестве продукта полученного при измельчении, судят по результатам ситового анализа, выполняемого на решетном классификаторе.

Показателем, с помощью которого можно оценить тонкость помола в соответствии с ГОСТом 8770-58, является средневзвешенный диаметр частиц (модуль), определяемый по формуле:

$$M = \frac{3,5G_3 + 2,5G_2 + 1,5G_1 + 0,5G_0}{100} \quad (151)$$

где G_0 – остаток на сборном дне, % от массы навески;

G_1, G_2, G_3 – остатки на ситах с отверстиями диаметром соответственно 1,2,3 мм, % от массы навески;

M – модуль, мм.

Помол считается:

- тонким при $M=0,2 \dots 1,0$ мм;
- средним при $M=1,0 \dots 1,2$ мм;
- крупным при $M=1,8 \dots 2,6$ мм.

О работе дробилки можно судить по степени измельчения зерна, определяемой из выражения:

$$\lambda = \frac{D_{\mathcal{E}}}{d_{cp}} \quad (152)$$

где d_{cp} – средневзвешенный диаметр частиц измельченного зерна, мм;

Дэ – диаметр шара объемом, равным объему одного зерна, называемый эквивалентным диаметром зерна.

По данным С.В. Мельникова, для расчета можно принять значение Дэ для ячменя равным 4,2 мм; овса – 3,7 мм; ржи – 3,3мм; пшеницы – 3,8 мм. Для материала из-за сложной формы зерен довольно затруднительно. Поэтому определение удельной площади поверхности зерна основывается на использовании понятия эквивалентного диаметра Дэ.

Определение эквивалентного диаметра зерна производится в следующем порядке:

- из партии зерна отобрать навеску массой 0,5 кг, руководствуясь методикой ГОСТа 3040-55 «Зерно. Методы определения качества».

- Из пробы выделить две навески зерна по 5 г и от каждой из них отобрать по 100 зерен. Взвесить отобранные 100 зерен и определить среднюю массу одного зерна.

- В наполненный карасином мерный цилиндр (в мензурку) поместить 100 отобранных зерен и по разнице отметок уровня керосина до и после погружения зерен найти средний объем зерна $V_з$, см³.

- Опыт по определению среднего объема одного зерна $V_з$ повторить еще раз на другой партии из 100 зерен и для дальнейших расчетов принять среднее значение из двух определений.

- по полученному значению объема зерна вычислить эквивалентный диаметр зерна Дэ по формуле: $Дэ = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_з}{\pi}} \cong 1,24 \cdot \sqrt[3]{V_з}$

- по полученному значению Дэ определить удельную площадь поверхности S_n , см²/г исходного (начального) зернового материала по формуле: $S_n = \frac{6}{\rho \cdot Дэ}$, где ρ – плотность зерна, г/см³

Определение гранулометрического состава продуктов измельчения зерна.

Гранулометрический состав дерти характеризует распределение частиц в соответствии с их размерами по классам (фракциям), т.е показывает сколько частиц дерти принадлежит к тому или иному классу.

Относительное содержание частиц тех или иных размеров (фракций) определяют методом ситового анализа, который проводят в следующем порядке:

❖ из пробы измельченного зерна взять навеску 100 г; на лабораторном классификаторе провести рассев 100г измельченного зерна в течение 5 мин; на технических весах взвесить остатки дерти на ситах с точностью до 0,01 г.

❖ по результатам ситового анализа:

1. вычислить средневзвешенный диаметр d_{cp} частиц дерти по формуле:

$$d_{cp} = \frac{\sum P_i \cdot d_i}{\sum P_i}$$

или

$$d_{cp} = \frac{\frac{d_1}{2} \cdot P_0 + \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot P_1 + \frac{d_2 + d_3}{2} \cdot P_2 + \frac{d_3 + d_4}{2} \cdot (P_3 + P_4)}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4} \quad (153)$$

Остаток с верхнего решета P4 складывают с остатком, расположенным на втором решете сверху, т.е (P4+P3).

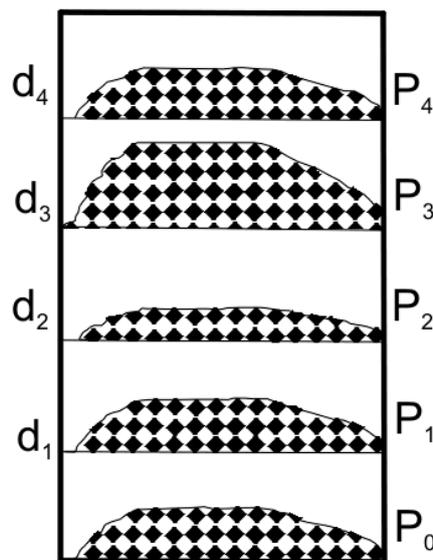


Рисунок 21 – Схема ситовой установки.

2. Определить удельную площадь поверхности продуктов измельчения зерна, см²/г из формулы:

$$S_k = \frac{6}{\rho \cdot d_{cp}} \quad (154)$$

где, d_{cp} – средневзвешенный диаметр частиц измельченного зерна, мм;

ρ – плотность зерна, г/см³

3. Вычислить приращение величины удельной площади поверхности см²/г, полученное в результате измельчения зерна:

$$\Delta S = S_k - S_n \quad (155)$$

4. Результаты ситового анализа нужно представить в виде таблицы 15.

Таблица 15 – Результаты ситового анализа дерти

Показатели	Порядковый номер сита в наборе					
	1	2	3	4	5	Дно
Размер отверстий сит d_i , мкм	5	4	3	2	1	0
Остаток P_i на сите, г						

Определить удельный расход энергии на процесс дробления

Наряду с определением удельного расхода энергии на измельчение единицы зерна представляет интерес и значение удельного расхода энергии на образование единицы новой поверхности при измельчении зерна.

В этом случае принимаются во внимание результативность процесса, качество дробления. Поэтому для определения затрат на процесс дробления рассчитывают расход полезной энергии на образование единицы новой поверхности по формуле:

$$A = \frac{P_d - P_{xx}}{Q \cdot \Delta S} \quad (156)$$

где A – удельный расход энергии, Дж/м²;

P_d – мощность на валу ротора дробилки при дроблении зерна, кВт;

$$P_d = 30 \text{ кВт};$$

P_{xx} – мощность холостого хода дробилки, кВт;

ΔS – приращение удельной площади поверхности, $\text{м}^2/\text{кг}$.

При определении P_d принять по технической характеристике; P_{xx} принять 15% от установленной мощности двигателя.

Производительность дробилки Q кг/с, определяется по формуле:

$$Q = \frac{G}{t} \quad (157)$$

$$Q = (2 \dots 3) \text{ т/ч};$$

где Q – масса измельченного за время опыта зерна, кг;

t – продолжительность опыта, с.

Приращение площади поверхности, достигаемое при измельчении, можно принять на основе данных таблицы 16.

Таблица 16 – Степень измельчения и удельная поверхность ячменной дерти при $D_э = 4,2$ мм

Размол	Средневзвешенный диаметр частиц d_{cp} , мм	Степень измельчения λ	Приращение удел. площади поверхности ΔS , $\text{м}^2/\text{кг}$
Очень мелкий	0,2	21,0	21,9
Мелкий	1,0	4,2	3,3
Средний	1,8	2,3	1,4
Крупный	2,6	1,6	0,7

Определить удельный расход энергии на единицу массы измельченного зерна. Для энергетической характеристики процесса дробления следует определить величину удельного расхода полезной энергии на единицу массы по формуле:

$$A_M = \frac{P_D - P_{xx}}{Q} \quad (158)$$

где A_M – удельный расход энергии на единицу массы. Дж/кг;

Энергоемкость процесса определяется по формуле:

$$A_C = \frac{P_n}{Q \cdot \lambda} \quad (159)$$

где A_C – энергоемкость процесса измельчения с учетом степени измельчения, кВт-ч/т;

P_n – полезная мощность, расходуемая на измельчение, кВт.

Удельный расход полезной энергии на единицу массы измельчаемого зерна можно рассчитать аналитическим путем по формуле, предложенной С.В. Мельниковым:

$$A_{изм} = C_1 \cdot X_1 \cdot q \cdot \lambda^3 - C_2 (\lambda - 1), \quad (160)$$

где $A_{изм}$ – удельный расход полезной энергии на единицу массы измельчаемого зерна, Дж/кг;

Коэффициент C_1 и C_2 определяют опытным путем (для ячменя они могут быть приняты):

$$C_1 = (10 \dots 13) \cdot 10^3 \text{ Дж/кг};$$

$$C_2 = (6 \dots 9) \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}.$$

По результатам опытов построить гистограмму распределения дерти (рисунки 22).

На оси абсцисс откладывают размеры отверстий сит, мм, а по оси ординат – остатки продукта на каждом сите, % от массы всей навески.

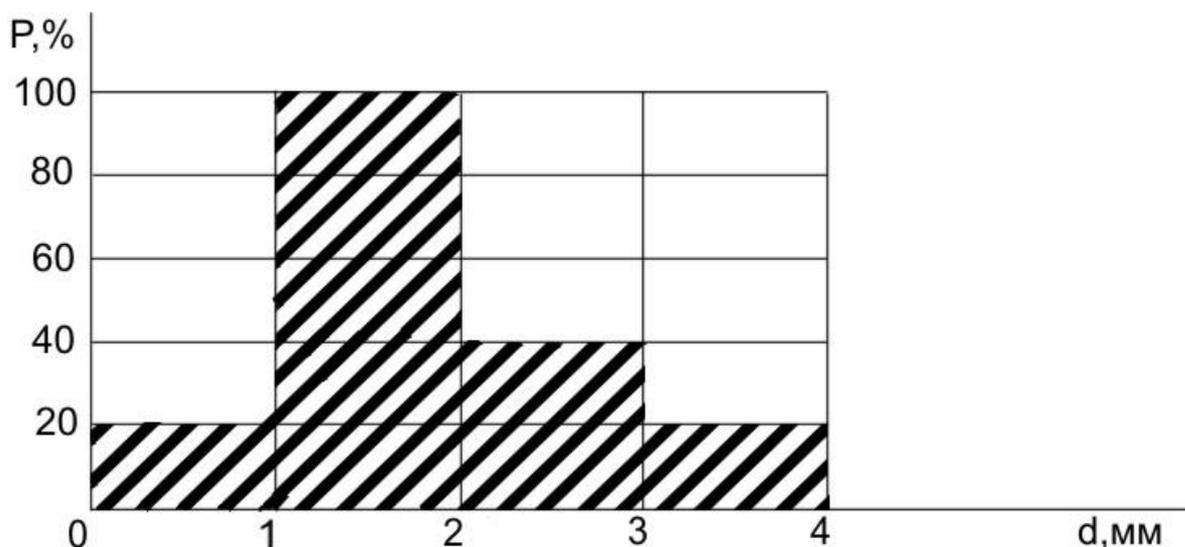


Рисунок 22 – Гистограмма распределения для измельченного зерна.

Контрольные вопросы

1. По какой формуле можно определить влажность зерна?
2. По какой формуле определяется эффективность процесса измельчения зерна?
3. Каким ГОСТом оценивается тонкость помола?
4. По какой формуле можно определить средневзвешенный диаметр частиц?
5. Какой помол считается средним?
6. По какой формуле вычисляется степень измельчения зерна?
7. По какой формуле можно определить удельную площадь поверхности исходного зернового материала?
8. По какой формуле можно определить энергоёмкость процесса измельчения?
9. По какой формуле можно рассчитать расход полезной энергии на единицу массы измельченного зерна?
10. По какой формуле определяется производительность дробилки?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кавецкий Г.Д., Королев А.В. Процессы и аппараты пищевой промышленности. -М.: Агропромиздат, 1991.
2. Процессы и аппараты: Методические указания по выполнению лабораторных работ. Денисюк Е.А., Засыпкин Г.П., Носова И.А. и др. - Нижний Новгород: Нижегородская ГСХА, 2001.
3. Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Кавецкий Г.Д., Королев А.В. Процессы и аппараты пищевых производств. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, – 2005. – 760 с.: ил.– (Учебник и учебное пособие для студентов высших учеб. заведений)
4. Стабников В.Н., Лысянский В.М., Попов В.Д. Процессы и аппараты пищевых производств. - М.: Агропромиздат, 1985.
5. Алексеев, Г.В. Виртуальный лабораторный практикум по курсу "Процессы и аппараты пищевых производств" [Электронный ресурс] / Г. В. Алексеев, И. И. Бриденко, Н. И. Лукин. - Электрон. дан. - СПб : Лань, 2011. - 1 электрон. опт. диск: цв. - Приложение к книге. - Загл. с экрана. - М112.
6. Титова, Л.М. Массообменные процессы в химической и пищевой технологии. Лабораторные и практические занятия [Текст] : учеб. пособие для вузов / Л. М. Титова, И. Ю. Алексанян, Нугманов А.Х-Х. - СПб. : Лань, 2014. - 224 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-1729-2. - к215 : 650-10.
7. Расчет и проектирование массообменных аппаратов [Текст] : учеб. пособие для бакалавриата / Остриков А.Н., ред. - СПб. : Лань, 2015. - 352 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-1672-1. - к215 : 949-96
8. [Текст] : лаборатор. практикум для студентов направления подготовки 35.03.06 "Агроинженерия", профиль "Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции" очной формы обучения / Костромская ГСХА. Каф. технических систем в АПК ; Лебедев Д.С. ; Кузнецов В.Н. ; Макарова Ю.А. - 2-е изд., стереотип. - Караваево : Костромская ГСХА, 2015. - 94 с. - к215 : 65-00.
9. Процессы и аппараты [Электронный ресурс] : метод. рекомендации по выполнению расчетно-графической работы для студентов направления 35.03.06 "Агроинже-

нерия", профиль "Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции" очной формы обучения / Костромская ГСХА. Каф. технических систем в АПК ; Лебедев Д.С. ; Кузнецов В.Н. - Электрон. дан. (1 файл). - Караваево : Костромская ГСХА, 2015. - Режим доступа: <http://lib.ksaa.edu.ru/marcweb>, требуется регистрация. - Загл. с экрана. - Яз. рус. - М115.