

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова»  
(СЛИ)

Кафедра электрификации и механизации сельского хозяйства

## **Процессы и аппараты для подготовки кормов в животноводстве**

Учебно-методический комплекс по дисциплине  
для студентов специальности 110301 «Механизация сельского хозяйства»  
всех форм обучения

*Самостоятельное учебное электронное издание*

СЫКТЫВКАР 2012

УДК 636/639  
ББК 40.729  
П84

Рекомендован к изданию в электронном виде кафедрой  
«Электрификация и механизация сельского хозяйства»  
Сыктывкарского лесного института

Утвержден к изданию в электронном виде советом сельскохозяйственного  
факультета Сыктывкарского лесного института

**Составитель:**

кандидат химических наук, доцент **Т. Л. Леканова**

**Отв. редактор:**

кандидат геолого-минералогических наук **Л. Л. Ширяева**

**Процессы и аппараты для подготовки кормов в животноводстве**  
П84 [Электронный ресурс] : учеб.-метод. комплекс по дисциплине для  
студ. спец. 110301 «Механизация сельского хозяйства» всех форм  
обучения : самост. учеб. электрон. изд. / Сыкт. лесн. ин-т ; сост.: Т. Л.  
Леканова. – Электрон. дан. – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – Режим  
доступа: <http://lib.sfi.komi.com>. – Загл. с экрана.

В издании помещены материалы для освоения дисциплины  
«Процессы и аппараты для подготовки кормов в животноводстве».  
Приведены рабочая программа курса, сборник описаний  
лабораторных работ, методические указания по различным видам  
работ.

УДК 636/639  
ББК 40.729

---

*Самостоятельное учебное электронное издание*

Составитель: **Леканова** Тамара Леонардовна

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ  
КОРМОВ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ**

Электронный формат – pdf. Объем 4,6 уч.-изд. л.  
Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет  
имени С. М. Кирова» (СЛИ),  
167982, г. Сыктывкар, ул. Ленина, 39, [institut@sfi.komi.com](mailto:institut@sfi.komi.com), [www.sli.komi.com](http://www.sli.komi.com)  
Редакционно-издательский отдел СЛИ

© СЛИ, 2012  
© Леканова Т. Л., составление, 2012

## Содержание

Рабочая программа для студентов специальности 110301.65 «Механизация сельского хозяйства»	4
<b>Рекомендации по самостоятельной подготовке студентов</b>	14
Методические рекомендации по самостоятельному изучению тем	14
<b>Контроль знаний студентов</b>	17
Тестовые материалы, используемые при контроле знаний студентов	17
<b>Сборник описаний лабораторных работ</b>	29

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-  
Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова»  
«СЛИ»

**СОГЛАСОВАНО**

Декан сельскохозяйственного факультета

\_\_\_\_\_ Г. Г. Романов

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г.

**УТВЕРЖДАЮ**

Зам. директора по УиНР

\_\_\_\_\_ Л. А. Гурьева

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

по дисциплине:

Процессы и аппараты для подготовки кормов

в животноводстве

(факультатив)

для подготовки дипломированного специалиста

по направлению 110000 Сельское и рыбное хозяйство

специальность 110301 – Механизация сельского хозяйства

**Кафедра электрификации и механизации сельского хозяйства**

Форма обучения	очное
Курс	4
Семестр	8
Всего часов	88
В том числе аудиторных:	44
Лекции	16
Лабораторные работы	28
Самостоятельная работа	44
Зачет	8 семестр

Сыктывкар 2012

Рабочая программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению 110000 Сельское и рыбное хозяйство, специальность 110301 «Механизация сельского хозяйства»

Переработанную программу составила: к. х. н., доцент \_\_\_\_\_ Т. Л. Леканова

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры ЭиМСХ  
Протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Заведующий кафедрой, к.г.-м.н., доц. \_\_\_\_\_ Л. Л. Ширяева

Рабочая программа рассмотрена и одобрена методической комиссией  
сельскохозяйственного факультета,  
протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Председатель комиссии, декан с.-х. ф-та. \_\_\_\_\_ Г. Г. Романов

## **1.1. Цель и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе**

### **Цель преподавания дисциплины**

Целью преподавания дисциплины «Процессы и аппараты для подготовки кормов в животноводстве» является обеспечение теоретической подготовки и фундаментальной базы инженеров-механиков. Данный курс формирует будущего специалиста и обеспечивает глубокое понимание сущности основных физических и химических процессов подготовки кормов в животноводстве, знакомство с наиболее распространенными конструкциями технологической аппаратуры и методами их расчета.

Важнейшее условие успешного развития животноводства – создание прочной кормовой базы. Совершенствование технологии заготовки, хранения, приготовления и раздачи кормов и кормосмесей, применение более совершенных машин и оборудования позволяют переработать в качественный корм практически весь биологический продукт.

Однако из основных условий рационального использования кормов – сбалансированность рационов по основным питательным веществам, протеину, макро- и микроэлементам, витаминам.

Наиболее эффективны в этом смысле полнорационные кормовые смеси, технология получения которых состоит из двух направлений: приготовление полнорационных рассыпных смесей непосредственно на фермах и комплексах из силоса, сенажа, соломы, корнеклубнеплодов, концентрированных кормов, раствора мелассы с карбамидом; приготовление многокомпонентных кормосмесей из сочных и грубых кормов в период их заготовки. Для получения полнорационных кормовых смесей применяют различные виды механической, тепловой, химической и биологической обработки компонентов кормов.

Значительное внимание уделяется вопросам устройства и работы машин и оборудования, применяемых на животноводческих фермах, правила их эксплуатации, а также основы теории и технологических расчетов рабочих процессов, методика проектирования поточных производственных линий, создаваемых при комплексной механизации с учетом зональных особенностей.

Перевод кормопроизводства на индустриальную основу требует повышения качества подготовки инженеров-механиков сельского хозяйства по вопросам механизации всех технологических процессов, связанных с заготовкой, приготовлением, хранением кормов и содержанием животных.

## **1.2. Задачи изучения дисциплины**

В результате изучения курса «Процессы и аппараты для подготовки кормов в животноводстве» студент должен иметь представление:

- о технологиях механической обработки концентрированных кормов;
- о методах измельчения кормов;
- о технологиях механической обработки грубых и сочных кормов;
- о технологии дозирования и смешивания кормов;
- о технологиях тепловой обработки кормов.

### **Требования к знаниям и умениям:**

- технологические операции и машины для приготовления концентрированных кормов;
  - технологические схемы приготовления грубых и сочных кормов;
  - технологические схемы и система машин для приготовления кормовых смесей;
  - технологические схемы тепловой обработки кормов.

### 1.3. Перечень дисциплин и тем, усвоение которых студентом необходимо для изучения данной дисциплины

Для полноценного усвоения учебного материала по дисциплине "Процессы и аппараты для подготовки кормов в животноводстве " студентам необходимо иметь знания по математике, физике, физической и коллоидной химии, технической и химической термодинамике, гидравлике, теплотехнике и др. наукам.

### 1.4. Дополнение к нормам Государственного образовательного стандарта 2000 г.

*Трудоемкость по госстандарту – 88 часов, аудиторных занятий – 44 часа, самостоятельная работа – 44 часа.*

Зоотехнические требования к приготовлению грубых и сочных кормов. Устройства измельчителей грубых кормов и их основные регулировки. Машины для мойки и измельчения корнеплодов. Зоотехнические требования к приготовлению концентрированных кормов. Молотковые роторные дробилки для зерна. Вальцевые мельницы. Зоотехнические требования к тепловой обработке кормов. Запарники смесители кормов. Оборудование для дозирования кормов. Зоотехнические требования к технологическому оборудованию кормоцехов. Приготовление кормов на молочно-товарных фермах. Кормоцехи для свиноведческих ферм. Процессы и оборудование для сушки и уплотнения кормов. Правила безопасности труда на кормоприготовительных машинах.

## 2. Содержание дисциплины

### 2.1. Наименование тем, их содержание, объем в часах лекционных занятий

№ п/п	Краткое содержание занятий	Количество часов
1	2	3
1	<p>Механизация измельчения концентрированных кормов  <i>Технология механической обработки концентрированных кормов.</i> Зоотехнические требования к технологии приготовления концентрированных кормов. Физико-механические свойства концентрированных кормов. Технологические операции и машины для приготовления концентрированных кормов. Универсальные дробилки и агрегаты.  <i>Основы теории измельчения кормов.</i> Измельчение как процесс образования новых поверхностей. Законы измельчения. Приближенные формулы для определения затрат энергии на измельчение кормов. Гранулометрический состав кормов.  <i>Молотковые дробилки.</i> Устройство и работа молотковых дробилок. Теория молотковых дробилок. Расчет молотковых дробилок.</p>	4
2	<p>Механизация измельчения грубых и сочных кормов  <i>Технология механической обработки грубых и сочных кормов.</i> Зоотехнические требования к технологии механической обработки грубых и сочных кормов. Физико-механические свойства грубых и сочных кормов. Технологические схемы приготовления грубых и сочных кормов.  <i>Соломосилосорезки.</i> Устройство и работа</p>	4

	<p>соломосилосорезок. Теория соломосилосорезки. Построение схемы режущего аппарата.</p> <p><i>Корнеклубномойки, корнерезки и пастоизготовители.</i></p> <p>Устройство и работа корнеклубномоек и корнерезок. Основы теории и расчета корнемоек, корнерезок и пастоизготовителей.</p>	
3	<p>Механизация приготовления кормовых смесей и гранул</p> <p><i>Основы технологии дозирования и смешивания кормов.</i></p> <p>Зоотехнические требования к технологии приготовления кормовых смесей. Технологические схемы и система машин для приготовления кормовых смесей.</p> <p><i>Дозаторы.</i> Типы дозаторов. Устройство, работа и расчет дозаторов.</p> <p><i>Смесители.</i> Типы смесителей, их устройство и работа. Элементы теории процесса смешивания. Расчет смесителей кормов.</p> <p><i>Машины для гранулирования кормов.</i> Зоотехнические требования к технологии гранулирования кормов. Технологические схемы и система машин для гранулирования кормов. Пресс-грануляторы. Теория процесса образования гранул и расчет пресс-грануляторов с кольцевой матрицей.</p>	4
4	<p>Механизация тепловой обработки кормов</p> <p><i>Технология тепловой обработки.</i> Способы тепловой обработки кормов. Технологические схемы тепловой обработки кормов.</p> <p><i>Кормозапарники и варочные котлы.</i> Устройство и работа кормозапарников. Расчет расхода тепла на подготовку кормов. Определение основных параметров кормозапарников. Эксплуатация варочного оборудования на фермах.</p>	2
5	<p>Кормоцехи и кормоприготовительные и агрегаты.</p> <p>Зоотехнические требования к технологическому оборудованию кормоцехов. Приготовление кормов на молочно-товарных фермах. Кормоцехи для свиноведческих ферм. Процессы и оборудование для сушки и уплотнения кормов. Правила безопасности труда на кормоприготовительных машинах.</p>	2
	Всего	16

## 2.2. Лабораторные занятия, их наименование и объем в часах

№ п/п	Наименование работ	Количество часов
1	Изучение процесса осаждения твердых частиц в жидкости	4
2	Изучение процесса разделения суспензий фильтрованием	5
3	Изучение гидравлического сопротивления насадочной колонны	5
4	Изучение гидродинамики взвешенного слоя.	4
5	Изучение процессов перемешивания в жидкой среде	4
6	Изучение процесса простой перегонки	2
7	Изучение процесса жидкостной экстракции	2
8	Испытание фильтрующей центрифуги периодического действия	2
	<b>Всего</b>	<b>28</b>

Содержание и методика выполнения лабораторных работ изложены в учебных пособиях и методических указаниях, составленных коллективом преподавателей и сотрудников кафедры.

### 2.3. Самостоятельная работа и контроль успеваемости

№ п/п	Вид самостоятельных работ	Число часов	Вид контроля успеваемости
1.	Проработка лекционного материала по учебной литературе и конспекту	8	ФО, зачет, экзамен
2.	Подготовка к лабораторным работам	14	ОЛР
3.	Подготовка к зачету	22	зачет
	<b>Всего</b>	<b>44</b>	

### 2.4. Распределение часов по темам и видам занятий

№ п/п	Наименование тем	Всего	Количество часов			Форма контроля успеваемости
			Лекции и	Лаб. раб	СРС	
1	2	3	4	5	6	7
1	<p><b>Механизация измельчения концентрированных кормов</b>  <i>Технология механической обработки концентрированных кормов.</i> Зоотехнические требования к технологии приготовления концентрированных кормов. Физико-механические свойства концентрированных кормов. Технологические операции и машины для приготовления концентрированных кормов. Универсальные дробилки и агрегаты.</p> <p><i>Основы теории измельчения кормов.</i> Измельчение как процесс образования новых поверхностей. Законы измельчения. Приближенные формулы для определения затрат энергии на измельчение кормов. Гранулометрический состав кормов.</p> <p><i>Молотковые дробилки.</i>            Устройство и работа молотковых</p>	16	4	6	6	З, КР

	дробилок. Теория молотковых дробилок. Расчет молотковых дробилок.					
2	<p><b>Механизация измельчения грубых и сочных кормов</b></p> <p><i>Технология механической обработки грубых и сочных кормов.</i> Зоотехнические требования к технологии механической обработки грубых и сочных кормов. Физико-механические свойства грубых и сочных кормов. Технологические схемы приготовления грубых и сочных кормов.</p> <p><i>Соломосилосорезки.</i> Устройство и работа соломосилосорезок. Теория соломосилосорезки. Построение схемы режущего аппарата.</p> <p><i>Корнеклубнемойки, корнерезки и пастоизготовители.</i> Устройство и работа корнеклубнемоек и корнерезок. Основы теории и расчета корнемоек, корнерезок и пастоизготовителей.</p>	17	4	6	7	3
3	<p><b>Механизация приготовления кормовых смесей и гранул</b></p> <p><i>Основы технологии дозирования и смешивания кормов.</i> Зоотехнические требования к технологии приготовления кормовых смесей. Технологические схемы и система машин для приготовления кормовых смесей.</p> <p><i>Дозаторы.</i> Типы дозаторов. Устройство, работа и расчет дозаторов.</p> <p><i>Смесители.</i> Типы смесителей, их устройство и работа. Элементы теории процесса смешивания. Расчет смесителей кормов.</p> <p><i>Машины для гранулирования кормов.</i> Зоотехнические требования к технологии гранулирования</p>	17	4	6	5	3, КР

	кормов. Технологические схемы и система машин для гранулирования кормов. Пресс-грануляторы. Теория процесса образования гранул и расчет пресс-грануляторов с кольцевой матрицей.					
4	<b>Механизация тепловой обработки кормов</b> <i>Технология тепловой обработки</i> . Способы тепловой обработки кормов. Технологические схемы тепловой обработки кормов. <i>Кормозапарники и варочные котлы.</i> Устройство и работа кормозапарников. Расчет расхода тепла на подготовку кормов. Определение основных параметров кормозапарников. Эксплуатация варочного оборудования на фермах.	8	2	3	3	3, КР
5	<b>Кормоцехи и кормоприготовительные агрегаты.</b> Зоотехнические требования к технологическому оборудованию кормоцехов. Приготовление кормов на молочно-товарных фермах. Кормоцехи для свиноведческих ферм. Процессы и оборудование для сушки и уплотнения кормов. Правила безопасности труда на кормоприготовительных машинах.	11	2	5	4	3
	Подготовка к зачету	22	-	-	22	Зачет
	<b>Всего</b>	<b>88</b>	<b>16</b>	<b>28</b>	<b>44</b>	

### 3. Вопросы к зачету

1. Производственно-технологическая характеристика ферм
2. Здания и сооружения животноводческих и птицеводческих ферм
3. Технология механической обработки концентрированных кормов
4. Основы теории измельчения кормов
5. Молотковые дробилки
6. Технология механической обработки грубых и сочных кормов
7. Соломосилосорезки
8. Корнеклубнейки, корнерезки и пастоизготовители
9. Основы технологии дозирования и смешивания кормов

10. Дозаторы
11. Смесители
12. Машины для гранулирования кормов
13. Технология тепловой обработки
14. Кормозапарники и варочные котлы

#### **4. Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

##### **Основная учебная литература**

1. Процессы и аппараты для подготовки кормов животноводства [Текст] : учеб. пособие для студ. спец. 110301 "Механизация сельского хозяйства" всех форм обучения / Т. Л. Леканова, Е. Г. Казакова, В. Т. Чупров ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Сыкт. лесн. ин-т (фил.) ФГБОУ ВПО С.-Петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова, Каф. теплотехники и гидравлики. – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – 84 с.

##### **Дополнительная учебная, учебно-методическая литература**

1. Баранов, Д. А. Процессы и аппараты [Текст] : учеб. для студ. образовательных учреждений среднего проф. образования, обучающихся по группе спец. 2500 "Химическая технология" / Д. А. Баранов, А. М. Кутепов. – Москва : Академия, 2005. – 304 с. – (Среднее профессиональное образование).

2. Глущенко, Н. А. Сооружения и оборудование для хранения продукции растениеводства и животноводства [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. 110305 "Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции" / Н. А. Глущенко, Л. Ф. Глущенко. – Москва : КолосС, 2009. – 303 с. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений).

3. Организация сельскохозяйственного производства [Текст] : учеб. для студ. вузов по агроэкономическим спец. / под ред. Ф. К. Шакирова. – Москва : КолосС, 2004. – 504 с. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений).

4. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии [Текст] : учеб. пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – Изд. 13-е изд., стер., перепечатка с изд. 1987 г. – Москва : Альянс, 2006. – 576 с.

5. Практикум по оборудованию и автоматизации перерабатывающих производств [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. 110305 "Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции" / Г. В. Шабурова [и др.]. – Москва : КолосС, 2007. – 183 с. – (Международная ассоциация "Агрообразование") (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений).

6. Родин, А. Р. Основы сельскохозяйственных пользований. Кормопроизводство [Текст] : лекции для студ. спец. 250201 (260400) – Лесное хозяйство / А. Р. Родин, А. И. Угаров ; Моск. гос. ун-т леса. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : МГУЛ, 2006. – 22 с.

7. Федоренко, И. Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. 311300 – "Механизация сельского хозяйства" / И. Я. Федоренко. – Москва : ФОРУМ, 2011. – 176 с. – (Высшее образование).

##### **Дополнительная литература**

1. Агробизнес – Россия. Экономика – Оборудование – Технологии [Текст]. – Москва : ЗАО "Сельхозиздат". – Выходит ежемесячно.

2008 № 7-12;

2. Вестник российской академии сельскохозяйственных наук [Текст] : научно – теоретический журнал. – Выходит раз в два месяца.

2008 № 4-6;

3. Гельфенбейн, С. П. Термины и определения в агроинженерии [Текст] : справочник : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по направлению "Агроинженерия" / С. П. Гельфенбейн. – Москва : КолосС, 2007. – 255 с.

4. Гуревич, Д. Ф. Ремонтные мастерские совхозов и колхозов [Текст] : справочник / Д. Ф. Гуревич, А. А. Цырин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Агропромиздат, 1988. – 336 с.

5. Гуревич, Д. Ф. Ремонтные мастерские совхозов и колхозов [Текст] : справочник / Д. Ф. Гуревич, А. А. Цырин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Агропромиздат, 1988. – 336 с.

6. Новое сельское хозяйство [Текст] : журнал агроменеджера/ ООО "ДЛВ АГРОДЕЛО". – Москва : ООО "ДЛВ АГРОДЕЛО". – Выходит ежемесячно.

2008 № 1-4,6;

2010 № 2-6;

2011 № 1,4-6;

2012 № 1-6;

7. Кормопроизводство [Текст] : науч.-произв. журнал. – Выходит раз в два месяца.

2012 № 10-12;

8. Современные технологии автоматизации [Текст]. – Выходит ежеквартально.

2008 № 1-4;

2009 № 1,2;

9. Техника в сельском хозяйстве [Текст] : научно – теоретическое издание. – Выходит раз в два месяца.

2008 № 1-6;

2009 № 1-4;

2010 № 1-3;

2012 № 1-3.

**Рекомендации по самостоятельной подготовке студентов**  
**Методические рекомендации по самостоятельному изучению тем**

Самостоятельная работа студентов по изучению отдельных тем дисциплины включает поиск учебных пособий по данному материалу, проработку и анализ теоретического материала [1], контроль знаний по данной теме с помощью нижеперечисленных вопросов и заданий.

Наименование темы 2	Контрольные вопросы и задания 3
<p>Механизация измельчения концентрированных кормов  <i>Технология механической обработки концентрированных кормов.</i>                      Зоотехнические требования к технологии приготовления концентрированных кормов. Физико-механические свойства концентрированных кормов. Технологические операции и машины для приготовления концентрированных кормов. Универсальные дробилки и агрегаты.  <i>Основы теории измельчения кормов.</i> Измельчение как процесс образования новых поверхностей. Законы измельчения. Приближенные формулы для определения затрат энергии на измельчение кормов. Гранулометрический состав кормов.  <i>Молотковые дробилки.</i>                      Устройство и работа молотковых дробилок. Теория молотковых дробилок. Расчет молотковых дробилок.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Какие зоотехнические требования предъявляются к измельчению концентрированных кормов?</li> <li>2. Объясните принцип действия молотковых дробилок и конструктивные недостатки дробилки кормов КДУ-2.</li> <li>3. Расскажите о назначении и принципе действия безрешетной дробилки зерна ДБ-5.</li> <li>4. Как определить степень помола корма?</li> <li>5. Как классифицируют машины и механизмы для измельчения кормов резанием?</li> <li>6. Как определяют производительность режущих машин?</li> <li>7. Каково устройство и принципы работы режущих машин?</li> <li>8. Рассмотрите конструкцию измельчителя ИСК-3 и опишите основные регулировки?</li> <li>9. Определите, что такое удельная работа резания и как она определяется?</li> <li>10. Какими способами измельчаются кормовые материалы?</li> <li>11. Как влияет степень дробления материала на производительность дробления и мощность, затрачиваемую на дробление?</li> <li>12. Какое влияние оказывает степень дробления на удельный расход энергии, затрачиваемой на измельчение материала?</li> <li>13. Что такое эквивалентный диаметр измельчаемой частицы и как он определяется?</li> <li>14. Какое влияние оказывает скорость воздушного потока в отверстиях решета рабочей камеры дробилки на ее производительность?</li> <li>15. На преодоление каких сопротивлений расходуется мощность, затрачиваемая на привод дробилки?</li> <li>16. Как регулируется степень помола на дробилке ДБ-5?</li> <li>17. Рассмотрите конструкцию дробилки КДМ-2,0 и опишите ее основные регулировки?</li> </ol>

	18.2. Изложите правила безопасности при работе на дробилках?
<p>Механизация измельчения грубых и сочных кормов</p> <p><i>Технология механической обработки грубых и сочных кормов.</i> Зоотехнические требования к технологии механической обработки грубых и сочных кормов. Физико-механические свойства грубых и сочных кормов. Технологические схемы приготовления грубых и сочных кормов.</p> <p><i>Соломосилосорезки.</i> Устройство и работа соломосилосорезок. Теория соломосилосорезки. Построение схемы режущего аппарата.</p> <p><i>Корнеклубнемойки, корнерезки и пастоизготовители.</i> Устройство и работа корнеклубнемоек и корнерезок. Основы теории и расчета корнемоек, корнерезок и пастоизготовителей.</p>	<p>1. Назовите основные зоотехнические требования к приготовлению грубых и сочных кормов.</p> <p>2. Что называется измельчением и с какими рабочими органами применяются машины для измельчения грубых кормов?</p> <p>3. Устройство измельчителя грубых кормов и принцип работы штифтового дискового измельчителя.</p> <p>4. Как сохранить производительность при высокой влажности корма?</p> <p>5. Назовите основную регулировку бункерных дробилок - измельчителей типа ИРТ.</p> <p>6. Расскажите о рабочем процессе измельчителя камнеуловителя ИКМ-5.</p> <p>7. Какие конструктивные изменения имеют измельчители ИКУ-Ф-10 и ИКУ-Ф-10 по сравнению с ИКМ-5?</p> <p>8. Как регулируется изменение размера частиц измельчаемых корнеплодов на машинах типа ИКМ?</p> <p>9. Какое различие в технологиях заготовки сенажа и силоса?</p> <p>10. Какие особенности технологии заготовки сенажа повышенной влажности?</p> <p>11. Какие особенности технологии заготовки комбисилоса?</p> <p>12. В каких случаях используются химконсерванты при заготовке кормов из сырья растительного происхождения?</p> <p>13. Как регулируют качество резки на соломорезке РСС-6,0Б?</p>
<p>Механизация приготовления кормовых смесей и гранул</p> <p><i>Основы технологии дозирования и смешивания кормов.</i> Зоотехнические требования к технологии приготовления кормовых смесей. Технологические схемы и система машин для приготовления кормовых смесей.</p> <p><i>Дозаторы.</i> Типы дозаторов. Устройство, работа и расчет дозаторов.</p> <p><i>Смесители.</i> Типы смесителей, их устройство и работа. Элементы теории процесса смешивания. Расчет смесителей кормов.</p> <p><i>Машины для гранулирования</i></p>	<p>1. Что такое влажное фракционирование зеленых кормов?</p> <p>2. Какие зоотехнические требования предъявляются к технологии приготовления кормовых смесей?</p> <p>3. Какие зоотехнические требования предъявляются к технологии гранулирования кормов?</p>

<p>кормов. Зоотехнические требования к технологии гранулирования кормов. Технологические схемы и система машин для гранулирования кормов. Пресс-грануляторы. Теория процесса образования гранул и расчет пресс-грануляторов с кольцевой матрицей.</p>	
<p>Механизация тепловой обработки кормов  <i>Технология тепловой обработки.</i>  Способы тепловой обработки кормов. Технологические схемы тепловой обработки кормов.  <i>Кормозапарники и варочные котлы.</i> Устройство и работа кормозапарников. Расчет расхода тепла на подготовку кормов. Определение основных параметров кормозапарников. Эксплуатация варочного оборудования на фермах.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Зоотехнические требования к тепловой обработке кормов.</li> <li>2. Какие машины применяются для смешивания измельченных кормов в сыром и запаренном виде?</li> <li>3. Расскажите о технологическом процессе смешивания кормов сзапариванием.</li> <li>4. Как оценивается производительность смесителя и эффективность его работы?</li> <li>5. На каких фермах применяют системы периодического действия С 12 и С-7?</li> <li>6. Устройство измельчителя смесителя кормов ИСК-3А и основные его регулировки?</li> <li>7. Что такое дозирование кормов и какие бывают дозаторы по принципу работы?</li> </ol>
<p>Кормоцехи и кормоприготовительные и агрегаты.  Зоотехнические требования к технологическому оборудованию кормоцехов. Приготовление кормов на молочно-товарных фермах. Кормоцехи для свиноводческих ферм. Процессы и оборудование для сушки и уплотнения кормов. Правила безопасности труда на кормоприготовительных машинах.</p>	<p>Понятие кормоцеха и зоотехнические условия эффективного его функционирования.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. Расскажите об устройстве и работе агрегата АКМ-7 на молочно-товарных фермах.</li> <li>3. Какова технологическая схема работы миникормоцеха для небольших молочно-товарных ферм?</li> <li>4. Каковы кормоцехи для свиноводческих ферм?</li> <li>5. Объясните назначение, принцип действия и устройство кормоприготовительных агрегатов типов АВМ и ОГМ.</li> <li>6. Назовите основные правила безопасности труда при работе на кормоприготовительных машинах.</li> </ol>

**Контроль знаний студентов**  
**Тестовые материалы, используемые при контроле знаний студентов**

Текущая успеваемость студентов контролируется промежуточной аттестацией в виде тестирования. Тесты промежуточной аттестации включают пройденный материал на лекциях и темы, включенные в лабораторные занятия.

**Тесты**  
**Вариант 1.**

**1. Какое питательное вещество корма снижает переваримость соломы?**

- 1 – жир;
- 2 – сахар;
- 3 – клетчатка

**2. Какая культура является легкосилосуемой?**

- 1 – кукуруза;
- 2 – люцерна;
- 3 – соя

**3. Укажите оптимальную дозу скармливания силоса дойной корове на голову в сутки.**

- 1 – 1...2 кг;
- 2 – 25...30 кг;
- 3 – 7...8 кг

**4. Что является консервирующим началом в сенаже?**

- 1 – уксусная кислота;
- 2 – физиологическая сухость растений;
- 3 – молочная кислота

**5. Каково должно быть минимальное содержание сахара в силосуемой массе?**

- 1 – 0,5 %;
- 2 – 1,0 %;
- 3 – 2,0 %

**6. Назовите ботанический состав трав для получения сена высокой питательности.**

- 1 – вика, овес;
- 2 – клевер;
- 3 – костер

**7. Какая кислота образуется при силосовании культур, которая является консервантом?**

- 1 – уксусная;
- 2 – масляная;
- 3 – молочная

**8. Какие культуры применяются для приготовления сенажа?**

- 1 – люцерна;
- 2 – клевер;
- 3 – соя, рапс

**9. Назовите нужную фазу вегетации растений для заготовки высококачественного сена?**

- 1 – бутонизация;
- 2 – цветение;
- 3 – после цветения

**10. Какие химические вещества применяются для обработки соломы?**

- 1 – поваренная соль, медный купорос;
- 2 – масляная кислота, сернокислородное железо;
- 3 – известь, аммиачная вода, кальцинированная сода

**11. В чем состоит биологическая ценность зеленых кормов?**

- 1 – белки, жиры, углеводы;
- 2 – вещества (экстрагены), повышающие воспроизводительные способности животных;
- 3 – содержат воду, клетчатку

**12. Назовите необходимую влажность сырья при заготовке сенажа.**

- 1 – 60 %;
- 2 – 50 %;
- 3 – 80 %.

**13. При каком способе подготовки соломы к скармливанию повышается ее питательность до 0,4 к.е.?**

- 1 – физический;
- 2 – химический;
- 3 – биологический

**14. Какие культуры применяются для приготовления сена?**

- 1 – многолетние, однолетние травы;
- 2 – пропашные культуры;
- 3 – ботва корнеплодов

**15. К какой группе кормов относится сено?**

- 1 – сочные;
- 2 – грубые;
- 3 – концентрированные

**16. Какие питательные вещества оказывают наибольшее влияние на силосуюемость растений?**

- 1 – сахар;
- 2 – протеин;
- 3 – жир

**17. Укажите дозу скармливания корнеклубнеплодов дойным коровам.**

- 1 – 15...20 кг;

- 2 – 25...30 кг;
- 3 – 40...50 кг

**18. К какой группе кормов относится солома?**

- 1 – сочные;
- +2 – грубые;
- 3 – отходы технических производств

**19. Назовите корм с высоким содержанием клетчатки.**

- 1 – зерно овса;
- 2 – обрат;
- 3 – солома

**20. Назовите высоту среза растений при уборке на сено.**

- 1 – 3...4 см;
- 2 – 6...7 см;
- 3 – 8...10 см

**21. Какие питательные вещества входят в состав кормов?**

- 1 – белки, жиры, углеводы;
- 2 – вода и сухое вещество;
- 3 – минеральные вещества

**22. К какой группе кормов относится силос?**

- 1 – грубые;
- 2 – концентрированные;
- 3 – сочные

**23. Назовите величину частиц при измельчении соломы для КРС.**

- 1 – 8...10 см;
- 2 – 1...2 см;
- 3 – 4...5 см

**24. Назовите питательность 1 кг силоса.**

- 1 – 1,8 к.е.;
- 2 – 0,4 к.е.;
- 3 – 0,2 к.е.

**25. От чего зависит температура силосуемой массы после закладки в траншеи?**

- 1 – от трамбовки, герметичности;
- 2 – от длины резки;
- 3 – от влажности

**26. К какой группе кормов относится сенаж?**

- 1 – сочные;
- 2 – грубые;
- 3 – комбикорма

**27. Какой способ заготовки сена увеличивает его питательность?**

- 1 – традиционный (естественной сушки);

- 2 – активное вентилирование;
- 3 – прессование

**28. Назовите последовательность операций при подготовке корнеклубнеплодов к скармливанию свиньями.**

- 1 – резка, мойка, дозирование;
- 2 – мойка, варка, смешивание, дозирование, раздача;
- 3 – варка, дозирование, раздача

**29. Назовите необходимую влажность зеленой массы при силосовании.**

- 1 – 40 %;
- 2 – 70 %;
- 3 – 90 %

**30. Укажите оптимальные сроки закладки силосуемой массы в траншеи, башни.**

- 1 – 5...7 дней;
- 2 – 3...4 дня;
- 3 – 8...10 дней

**31. Какие кормовые культуры включают в зеленый конвейер?**

- 1 – кормовые бобы, картофель;
- 2 – однолетние и многолетние злаковые и бобовые;
- 3 – крапива, ботва корнеплодов

**32. Назовите активную кислотность (РН) сенажа.**

- 1 – 4,8...5,3;
- 2 – 6,4...7,2;
- 3 – 7,2...7,6

**33. Для чего применяется искусственная сушка трав?**

- 1 – повысить питательность сена;
- 2 – с целью снижения сроков заготовки сена;
- 3 – для снижения потерь питательных веществ, сокращения сроков заготовки кормов

**34. Назовите питательность одного килограмма сена.**

- 1 – 0,1 к.е.;
- 2 – 0,4 к.е.;
- 3 – 0,7 к.е.

**35. В чем заключается биохимическая сущность сенажирования?**

- 1 – молочно-кислое брожение;
- 2 – физиологическая сухость;
- 3 – уксусно-кислое брожение

**36. К какой группе кормов относится сено?**

- 1 – сочные;
- 2 – концентрированные;
- 3 – грубые

**37. Какой процент влаги содержится в сочных кормах?**

- 1 – 40 %;
- 2 – 80 %;
- 3 – 20 %.

**38. Назовите величину резки зеленой массы с влажностью 60-70 % при закладке силоса.**

- 1 – 4...6 см;
- 2 – 10...12 см;
- 3 – 2...3 см

**39. Какова должна быть влажность силосуемой массы?**

- 1 – 60 %;
- 2 – 70 %;
- 3 – 80 %

**40. Каково должно быть содержание влаги в сене?**

- 1 – 17 %;
- 2 – 10 %;
- 3 – 30 %

**41. Назовите активную кислотность (РН) качественного силоса.**

- 1 – 6,5;
- 2 – 7,3;
- 3 – 4,2

**42. Какие кормовые культуры используются для приготовления силоса?**

- 1 – соя, люцерна;
- 2 – ботва помидоров, крапива;
- 3 – кукуруза, подсолнечник, злаковые, корнеплоды

**43. Какова питательность одного кг соломы?**

- 1 – 0,5 к.е.;
- 2 – 0,11 к.е.;
- 3 – 0,4 к.е.

**44. Какие кормовые культуры используют для приготовления сенажа?**

- 1 – многолетние и однолетние злаковые и бобовые;
- 2 – крапива, соя, однолетние злаковые;
- 3 – ботва корнеплодов, многолетние бобовые

**45. Какова активная кислотность (РН) сенажа высокого качества?**

- 1 – 3,5...3,8;
- 2 – 4,0...4,2;
- 3 – 4,8...5,3

**46. Назовите последовательность технологических операций при заготовке сена.**

- 1 – скашивание, плющение, сгребание, ворошение, копнение, скирдование;
- 2 – скашивание, сгребание, плющение, ворошение, скирдование;
- 3 – скашивание, копнение, ворошение, сгребание, скирдование

**47. Какова доза скармливания сенажа дойной корове?**

- 1 – 5...10 кг;
- 2 – 3...4 кг;
- 3 – 25...30 кг

**48. Назовите высоту среза растений при заготовке силоса.**

- 1 – 5...7 см;
- 2 – 8...10 см;
- 3 – 12...14 см

**49. Какова оптимальная влажность сенажной массы?**

- 1 – 50...60 %;
- 2 – 20...30 %;
- 3 – 40...55 %

**50. Какова питательная ценность сенажа?**

- 1 – 0,5...0,6 к.е.;
- 2 – 1,0 к.е.;
- 3 – 0,1...0,2 к.е.

**51. Какие показатели характеризуют общую питательность кормов?**

- 1 – белки, жиры;
- 2 – кормовые единицы, обменная энергия;
- 3 – сухое вещество, вода

**52. К какой группе кормов относятся сено, солома, травяная мука?**

- 1 – сочные;
- 2 – грубые;
- 3 – концентраты

**53. В чем состоит биологическая сущность силосования?**

- 1 – легкорастворимые сахара превращаются в молочную и уксусную кислоты;
- 2 – при силосовании образуется уксусная и масляная кислоты;
- 3 – образуются масляная и бензойная кислоты

## **Вариант 2.**

**1. Назовите, каким управляющим воздействием изменяют модуль помола фуражного зерна в молотковых измельчителях?**

- 1 – Изменением зазора между концами молотков и решетом;
- 2 – Сменными решетками, имеющими отверстия разного диаметра;
- 3 – Частотой вращения вала измельчителя.

**2. Укажите, какие типы режущих аппаратов реализованы в следующих машинах?**

## ТИПЫ АППАРАТОВ

1. БАРАБАННЫЙ.
2. ДИСКОВЫЙ.
3. ШТИФТОВЫЙ.
4. МОЛОТКОВЫЙ

## МАРКИ МАШИН

- А) «ВОЛГАРЬ – 5А»
- Б) РСС-6Б
- В) КДУ-2
- Г) ИКМ-5
- Д) ИГК-30Б

- 1 – 1-А; 2-В; 3-Б; 4-Г, Д.  
2 – 1-А, В; 2-Б, Г; 3-Д; 4-В.  
3 – 1-Б, Г; 2-А, В; 3-В, 4-Д.

**3. Укажите, каким образом контролируют загрузку электродвигателя в измельчителях кормов?**

- 1 – По индикатору-амперметру;
- 2 – По производительности измельчителя;
- 3 – По размеру частиц готового продукта.

**4. Укажите, в каких машинах применен ножевой барабанный измельчитель кормов?**

- 1 – КДУ-2, «Волгарь-5»;
- 2 – РСС-6Б, ИКМ-5;
- 3 – ИГК-30Б, ИСК-3.

**5. Укажите единицы измерения удельной энергоемкости процесса измельчения кормов.**

- 1 – кВт ч/т;
- 2 – кВт т/ч;
- 3 – кВт/т.

**6. Перечислите рабочие органы, имеющиеся в измельчителе кормов КДУ-2.**

- 1 – Молотки, решета, деки;
- 2 – Молотки, сепаратор, барабанный измельчитель;
- 3 – Молотки, решета, деки, барабанный измельчитель.

**7. Укажите, какой расход воды необходим для мойки корнеклубнеплодов в ИКМ-5?**

- 1 – 200 л/т;
- 2 – 600 л/т;
- 3 – 1000 л/т.

**8. Укажите назначение следующих измельчителей кормов:**

ИЗМЕЛЬЧИТЕЛИ  
ИКВ-5А  
ИГК-30Б

НАЗНАЧЕНИЕ  
А) УНИВЕРСАЛЬНЫЙ  
Б) ДЛЯ СОЛОМЫ  
В) ДЛЯ СИЛОСА И СЕНАЖА

- 1 – 1-Б, 2-В;
- 2 – 1-А, 2-Б;

3 – 1-В, 2-А.

**9. Укажите, какой тип измельчающего аппарата реализован в измельчителях кормов ИКМ-5 и РСС-6Б?**

- 1 – Ножевой дисковый;
- 2 – Молотковый;
- 3 – Штифтовый.

**10. Укажите, на каком свойстве корнеплодов и камней происходит их разделение в мойке ИКМ-5?**

- 1 – На разности их масс;
- 2 – На разности их плотностей;
- 3 – На разности их размеров.

**11. Укажите, как регулируют длину резки кормов в измельчителе РСС-6Б?**

- 1 – Изменением зазора между лезвием ножей и противорежущей пластиной;
- 2 – Изменением числа ножей и скорости подачи корма к режущему аппарату;
- 3 – Изменением частоты вращения вала.

**12. Укажите, какого типа измельчители концентрированных кормов менее энергоемки?**

- 1 – Молотковые с закрытой камерой, например, КДУ-2;
- 2 – Центробежно-роторные, например, ИЛС-5;
- 3 – Молотковые с открытой камерой, например, ДБ-5.

**13. Укажите, как регулируют длину резки кормов в измельчителе «Волгарь-5»?**

- 1 – Изменением скорости подачи кормов к режущему аппарату;
- 2 – Изменением угла установки первого подвижного ножа относительно отогнутого витка шнека во второй ступени измельчения;
- 3 – Изменением зазора между ножами и противорежущей пластиной в первой ступени измельчения.

**14. Что отражает степень измельчения фуражного зерна?**

- 1 – Отношение размеров частиц до и после измельчения;
- 2 – Средний размер частиц после измельчения;
- 3 – Среднюю массу частиц после измельчения.

**15. Укажите, какой способ измельчения фуражного зерна реализован в вальцовых станках?**

- 1 – Истирание;
- 2 – Раскалывание;
- 3 – Удар.

**16. Перечислите рабочие органы измельчающего устройства ИКМ-5.**

- 1 – Горизонтальные ножи, вертикальные ножи, дека, верхний и нижний диски;
- 2 – Молотки, дека, камера измельчения;
- 3 – Подвижные ножи, противорежущая пластина.

**17. Укажите, к каким последствиям приводит износ молотков в измельчителе КДУ-2?**

- 1 – Снижается удельная энергоемкость процесса;
- 2 – Уменьшается производительность измельчителя;
- 3 – Появляется вибрация измельчителя.

**18. Укажите, какие зазоры должны быть в режущих аппаратах дискового типа?**

- 1 – От 0 до 0,5 мм;
- 2 – От 1 до 3 мм;
- 3 – От 4 до 6,5 мм.

**19. Укажите, с какой целью моечный винт ИКМ-5 размещен вертикально, а не наклонно?**

- 1 – Для достижения наибольшей производительности мойки;
- 2 – Для улучшения качества отмыва корнеплодов;
- 3 – Для сокращения расхода воды.

**20. Укажите, какие из перечисленных машин оснащены ножевым барабанным измельчающим аппаратом?**

- 1 – КДУ-2, ИКВ-5;
- 2 – ИКМ-5, РСС-6Б;
- 3 – ИГК-30Б, ИСК-3.

**21. Какие из перечисленных дозаторов, отличающихся рабочими органами, можно применить для дозирования измельченных корнеклубнеплодов?**

- 1 – Тарельчатые;
- 2 – Барабанные;
- 3 – Винтовые.

**22. Укажите, какое влияние оказывает величина зазора в режущей паре для измельчения стебельных кормов?**

- 1 – Влияет на длину резки;
- 2 – Определяет условия защемления и резания;
- 3 – Влияет на момент сопротивления резанию.

**23. Укажите характерный признак штифтового измельчителя грубых кормов.**

- 1 – Обеспечивает минимальные затраты энергии на измельчение в сравнении с другими типами измельчителей;
- 2 – Позволяет получить резку различной длины, что отвечает потребностям различных групп животных;
- 3 – Обеспечивает наибольшую площадь поверхности измельченных кормов, что создает условия для эффективной последующей обработки.

**24. Укажите, какие из указанных зазоров относятся к ножевым режущим аппаратам барабанного типа?**

- 1 – 4...6,5 мм;
- 2 – 1...3 мм;
- 3 – 0...0,5 мм.

**25. В каком диапазоне находится окружная скорость молотков в измельчителях фуражного зерна?**

- 1 – 5...20 м/с;
- 2 – 40...100 м/с;
- 3 – 120...170 м/с.

**26. Какое значение имеет дифференциал скорости валцов зерноплющилок?**

- 1 – 1,5...2,5;
- 2 – 1,25...1,5;
- 3 – 1,0.

**27. Укажите, при каком способе измельчения корнеклубнеплодов обеспечиваются минимальные затраты энергии?**

- 1 – Скользящее резание;
- 2 – Измельчение ударом;
- 3 – Резание рубкой.

**28. Укажите, при каком способе измельчения стебельных кормов обеспечиваются минимальные затраты энергии?**

- 1 – Резание рубкой;
- 2 – Измельчение ударом;
- 3 – Резание со скольжением.

**29. Укажите, как восстанавливают работоспособность молотковых измельчителей фуражного зерна, например, КДУ-2?**

- 1 – Часть изношенных молотков заменяют новыми;
- 2 – Наиболее изношенные молотки заменяют новыми;
- 3 – Меняют установку молотков на осях ротора.

**30. Укажите, какие корма подвергают влаготепловой и химической обработке перед скармливанием?**

- 1 – Солома, картофель, силос, пищевые отходы;
- 2 – Солома, корнеклубнеплоды, сенаж, пищевые отходы;
- 3 – Солома, корнеклубнеплоды, пищевые отходы, концентрированные корма.

**31. Укажите, заготовка какого корма неизбежно сопровождается наибольшими потерями питательных свойств?**

- 1 – Сенаж;
- 2 – Сено активного вентилирования;
- 3 – Силос.

**32. Назовите, какой должна быть технологическая вместимость смесителей кормов?**

- 1 – Технологическая вместимость равна геометрической вместимости;
- 2 – Технологическая вместимость меньше геометрической вместимости;
- 3 – Технологическая вместимость больше геометрической вместимости.

**33. В каких из указанных смесителей применены лопастные рабочие органы?**

- 1 – ИСК-3;
- 2 – РСП-10;

3 – С-12.

**34. Назовите, с какой целью корма обрабатывают перед скармливанием?**

- 1 – Для повышения питательной ценности;
- 2 – Для получения полнорационных смесей;
- 3 – Для повышения питательной ценности и получения полнорационных смесей, а также для санитарно-гигиенической обработки.

**35. Назовите, из чего состоит узел прессования гранулятора ОГМ-0,8?**

- 1 – Вращающаяся кольцевая матрица и два пассивных вальца;
- 2 – Неподвижная кольцевая матрица и два активных вальца;
- 3 – Нагнетательный шнек, цилиндр и матрица.

**36. Укажите допустимые отклонения при дозировании комбикормов в кормовые смеси для крупного рогатого скота.**

- 1 - 5%;
- 2 - 10%;
- 3 - 15%.

**37. Укажите, какое оборудование применяют для получения кормовых брикетов?**

- 1 – ПБС-3, ОПК-2А;
- 2 – АВМ-0,65, АВМ-1,5;
- 3 – ОГМ-0,8, ОГМ-1,5.

**38. Укажите, какие комплекты оборудования кормоцехов применяют на свиноводческих фермах?**

- 1 – КОРК-15, КЦК-5;
- 2- КЦС-200/2000, «Маяк-6»;
- 3 – КЦО-5, КОРК-15А.

**39. Укажите, для каких дозаторов кормовых компонентов характерна наименьшая погрешность?**

- 1 – Объемные дозаторы непрерывного действия;
- 2 – Массовые дозаторы периодического действия;
- 3 – Объемные дозаторы периодического действия.

**40. Укажите, в каких из указанных смесителей применяются лопастные рабочие органы?**

- 1 – ИСК-3, СМ-1,7;
- 2 – РСР-10, АРС-10;
- 3 – С-12, С-7.

**41. Укажите, при каком условии достигают равномерный прогрев корма в запарнике?**

- 1 – При равенстве расхода пара через подводящий паропровод и суммарного расхода пара через паровыпускные отверстия;

- 2 – При равенстве площади сечения подводящего паропровода и суммарной площади паровыпускных отверстий;  
3 – При равенстве количества теплоты, поступающей через подводящий паропровод, и суммарного количества теплоты, поступающей через паровыпускные отверстия.

**42. Укажите, какое оборудование из перечисленного применяют для изготовления гранул из травяной муки?**

- 1 – АЗМ-0,8;  
2 – ОГМ-0,8;  
3 – ПЗМ-1,5.

**43. Укажите, какие типы дозаторов кормов чаще всего применяют для приготовления влажных кормовых смесей?**

- 1 – Массовые;  
2 – Объемные;  
3 – Комбинированные.

**44. Какие из перечисленных комплектов оборудования кормоцехов можно применить на молочной ферме?**

- 1 – КЦО-5, КПО-75;  
2 – КЦС-200/2000, «Маяк-6»;  
3 – КЦК-5, КОРК-15.

**45. Укажите технологическую вместимость смесителя кормов периодического действия С-12, имеющую геометрическую вместимость 12 м<sup>3</sup>.**

- 1 – 7...10 м<sup>3</sup>;  
2 – До 4 м<sup>3</sup>;  
3 – 12 м<sup>3</sup>.

**46. Укажите, какой должна быть влажность сухой сыпучей кормовой смеси?**

- 1 – 5...10%;  
2 – 14...16%;  
3 – 18...20%.

**47. Укажите допустимые отклонения при дозировании корнеклубнеплодов в кормовые смеси для крупного рогатого скота.**

- 1 – 5%;  
2 – 10%;  
3 – 15%.

## Сборник описаний лабораторных работ

### Лабораторная работа № 1

#### Изучение гидродинамики взвешенного слоя

**Цели работы:** ознакомиться с устройством и принципом действия установки для изучения гидродинамики взвешенного слоя

#### Задачи работы

1. Снять при каждом показании скорости, соответствующей показанию микроманометра, начиная от нулевой отметки через выбранный шаг и кончая максимальным показанием.
2. Произвести расчет гидравлического сопротивления слоя при всех значениям  $\Delta p_{\text{общ}}$  и  $\Delta p_{\text{ап}}$ , внести результаты в таблицу расчетных данных.
3. Построить график зависимости гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости воздуха в аппарате.

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд (каб. 309-П).

#### Задание:

- получить экспериментальную зависимость гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости  $\Delta p_{\text{сл}} = f(\omega_{\text{ф}})$ ;
- определить критическую скорость  $\omega_{\text{кр}}$  (псевдооживления) газа;
- определить скорость уноса  $\omega_{\text{ун}}$ ;
- определить средний размер частиц – d, массу слоя – G<sub>сл</sub>.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, график – на миллиметровой бумаге, выполненный в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указываются название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вид обучения, факультет, а также приводятся цель работы, схема установки, методика проведения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, подробные расчеты значений одного из режимов, таблица 1.1 «Экспериментальные и расчетные результаты», график зависимости гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа. После оформления экспериментальной части и обработки опытных данных пишутся выводы по работе, и защищается отчет.

#### Технология работы

Изменяя напряжение в сети лабораторным автотрансформатором, увеличивают расход воздуха до максимального значения, равного скорости уноса частиц. Замерив, максимальное значение показаний микроманометра, определяют значение шага изменения показаний микроманометра из такого расчета, чтобы в диапазоне изменений показаний микроманометра разместилось примерно 8 - 12 экспериментальных значений. Выбирают шаг изменения показаний микроманометра и приступают к эксперименту. Измеряют скорость газового потока для выбранных значений расходов воздуха и по полученным данным строят график зависимости  $\Delta p_{\text{сл}} = f(\omega_{\text{ф}})$ , по которому определяют критическую скорость воздуха  $\omega_{\text{кр}}$  для данных частиц. Затем вычисляют критерий Лященко (Ly) для критической скорости и по графику находят для порозности  $\varepsilon = 0,4$  соответствующее значение критерия Архимеда,

по которому определяют средний диаметр частиц  $d$ . Далее находят предельное значение критерия Лященко при  $\varepsilon = 1$ , позволяющее определить скорость уноса  $\omega_{ун}$  и расход воздуха  $V_{ун}$ , при котором происходит унос из аппарата загруженных в него твердых частиц. Наконец, определяют вес слоя частиц в аппарате  $G_{сл}$ .

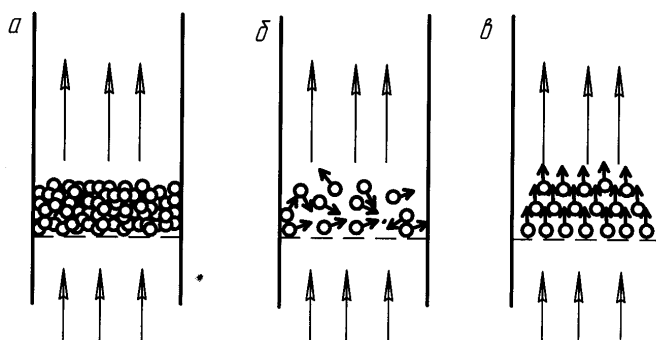
### Контрольные вопросы

1. Для каких процессов применяются аппараты с зернистым слоем?
2. Что такое взвешенный слой?
3. Что такое фиктивная, действительная и критическая скорости газа?
4. Какой характер имеет зависимость порозности слоя от расхода газа?
5. Почему с увеличением фиктивной скорости воздуха гидравлическое сопротивление неподвижного слоя растет, а взвешенного слоя остается постоянным?
6. Какая скорость охлаждающей среды называется скоростью уноса?
7. В чем состоит равновесие сил в процессе псевдооживления?
8. Как определить кажущийся вес слоя в среде?
9. В чем состоят прямая и обратная задачи процесса псевдооживления?

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

**Теоретическая часть.** В настоящее время в химической технологии широко используются процессы, при которых происходит взаимодействие газа или жидкости с мелкораздробленным твердым материалом (сушка, обжиг, адсорбция, каталитические процессы и др.). Такие процессы осуществляют в аппаратах с так называемым взвешенным (псевдооживленным) или кипящим слоем, в которых указанные процессы значительно ускоряются.

Если через слой твердых частиц, лежащих на решетке, пропускать восходящий поток газа или жидкости и при этом постепенно увеличивать его скорость, то при некоторой критической скорости газа весь слой переходит во взвешенное состояние, частицы приобретают подвижность (рис. 1.1).



**Рис. 1.1.** Движение газа в слое твердых частиц:

*a* – неподвижный слой; *б* – псевдооживленный слой; *в* – пневмотранспорт

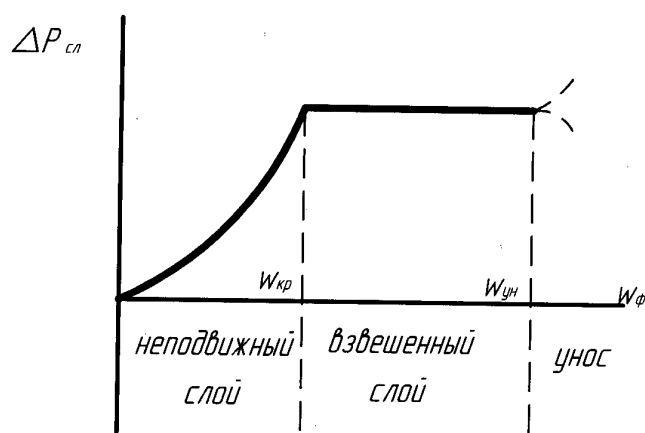
При дальнейшем увеличении скорости высота взвешенного слоя увеличивается, т. е. слой расширяется и его порозность растет, хаотическое движение частиц становится более интенсивным. Такой взвешенный слой во многом напоминает жидкость. Он «течет», принимая форму аппарата, имеет свободную поверхность, свою вязкость. Поэтому такой слой часто называют кипящим или псевдооживленным слоем. При дальнейшем увеличении скорости газа продолжается расширение взвешенного слоя.

Наконец, при некоторой скорости газа, называемой скоростью уноса, взвешенный слой разрушается – твердые частицы уносятся из аппарата потоком газа, возникает их

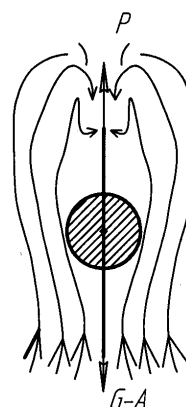
пневмотранспорт. При достижении определенной скорости в аппарате останется одна витающая частица. Это скорость уноса  $\omega_{ун}$ , которая равняется скорости свободного осаждения одиночной твердой частицы.

На графике зависимости перепада давления в слое  $\Delta p_{сл}$  от фиктивной скорости газа  $\omega_{ф}$  в сечении аппарата (рис. 1.2) началу взвешенного слоя соответствует точка перегиба, где скорость устанавливается критической  $\omega_{кр}$ , начиная с которой  $\Delta p_{сл}$  остается постоянным вплоть до значения, соответствующего скорости уноса частиц  $\omega_{ун}$ . Переход твердых частиц неподвижного слоя во взвешенное состояние начнется тогда, когда сила  $P$  динамического воздействия потока среды на частицу станет равной весу частицы  $G$  за вычетом подъемной (архимедовой) силы  $A$  (рис. 1.3).

$$P = G - A. \quad (1.1)$$



**Рис. 1.2.** Зависимость гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа



**Рис. 1.3.** Силы, действующие на твердую частицу в направленном вверх потоке

Для шаровой частицы

$$P = \zeta \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho_{сп}}{2}; \quad (1.2)$$

$$G = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \rho \cdot g; \quad (1.3)$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \rho_{сп} \cdot g, \quad (1.4)$$

где  $\zeta$  – безразмерный коэффициент сопротивления, зависящий от режима течения среды;  $d$  – диаметр частицы, м;  $\omega$  – действительная скорость среды между частицами, м/с;  $\rho$  и  $\rho_{сп}$  – плотность частицы и среды соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>. Из уравнений (1.3) и (1.4) находим

$$G - A = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot (\rho - \rho_{сп}) \cdot g. \quad (1.5)$$

Если среда – газ, то плотностью среды, по сравнению с плотностью частицы, можно пренебречь, и уравнение (1.1) примет вид

$$P = G. \quad (1.6)$$

Когда все частицы слоя перешли во взвешенное состояние, то давление газа перед слоем должно преодолевать вес частиц, приходящихся на единицу площади поперечного сечения аппарата  $F$ .

Отсюда

$$\Delta p_{\text{сл}} = \frac{G_{\text{сл}}}{F}, \quad (1.7)$$

где  $G_{\text{сл}}$  – вес всех частиц слоя, Н;  $F$  – площадь поперечного сечения аппарата,  $\text{м}^2$ .

Из уравнения (1.7) следует, что для взвешенного слоя потеря давления  $\Delta p_{\text{сл}}$  постоянна, т. е. не зависит от скорости газа  $\omega_{\phi}$ . Это постоянство величины  $\Delta p_{\text{сл}}$  объясняется тем, что при увеличении расхода газа  $V$  и его фиктивной скорости  $\omega_{\phi}$  происходит одновременное увеличение объема взвешенного слоя и расстояния между частицами. Вследствие этого действительная скорость газа между частицами  $\omega$ , от которой зависит сопротивление слоя, остается неизменной.

При определении относительного увеличения высоты слоя его важнейшей характеристикой является порозность  $\varepsilon$  – объемная доля газа в слое:

$$\varepsilon = \frac{W_{\text{сл}} - W_{\text{ч}}}{W_{\text{сл}}} = 1 - \frac{W_{\text{ч}}}{W_{\text{сл}}}, \quad (1.8)$$

где  $W_{\text{сл}}$  – общий объем слоя,  $\text{м}^3$ ;  $W_{\text{ч}}$  – объем твердых частиц,  $\text{м}^3$ .

Порозность слоя зависит от расхода газа, например, для неподвижного слоя частиц  $\varepsilon \approx 0,4$ ; для взвешенного  $0,4 < \varepsilon < 1,0$ ; для пневмотранспорта  $\varepsilon \approx 1,0$ .

Для расчета аппаратов со взвешенным слоем необходимы расчетные уравнения, устанавливающие зависимость между физическими свойствами газа и твердых частиц,

скоростью газа  $\omega_{\phi}$  и порозностью слоя  $\varepsilon$ . Такие эмпирические уравнения представляют в виде зависимостей между обобщенными безразмерными переменными, так называемыми критериями подобия, которые содержат все физические величины, оказывающие влияние на рассматриваемый процесс.

В гидродинамике взвешенного слоя удобной для расчетов и наглядной является графическая зависимость между критериями Лященко и Архимеда:

$$Ly = f(Ar) \quad (1.9)$$

при значениях  $\varepsilon$  от 0,4 до 1,0, соответствующих области существования взвешенного слоя шаровых (сферических) частиц (рис. 1.4).

Здесь

$$Ly = \frac{\omega_{\text{cp}}^3 \cdot \rho_{\text{cp}}^2}{\mu_{\text{cp}} \cdot (\rho - \rho_{\text{cp}}) \cdot g} \text{ – критерий Лященко,}$$

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_{\text{cp}} \cdot (\rho - \rho_{\text{cp}}) \cdot g}{\mu_{\text{cp}}^2} \text{ – критерий Архимеда,}$$

где  $\mu_{cp}$  – динамический коэффициент вязкости,  $Pa \cdot c$ ;  $\omega_{cp}$  – средняя скорость, м/с.  
 Если среда – газ, то  $\rho \gg \rho_{cp}$  и выражения для критериев Лященко и Архимеда упрощаются:

$$Ly = \frac{\omega_{cp}^3 \cdot \rho_{cp}^2}{\mu_{cp} \cdot \rho \cdot g}; \quad (1.10)$$

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_{cp} \cdot \rho \cdot g}{\mu_{cp}^2}. \quad (1.11)$$

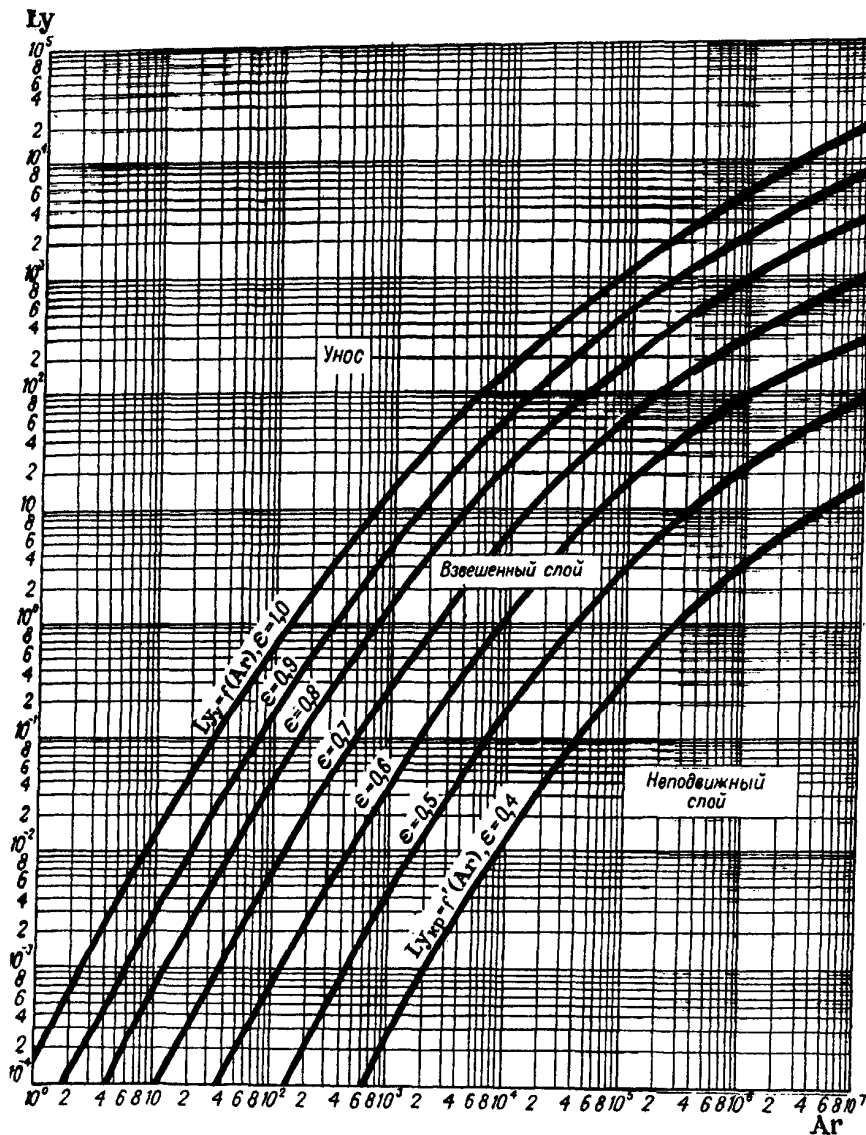
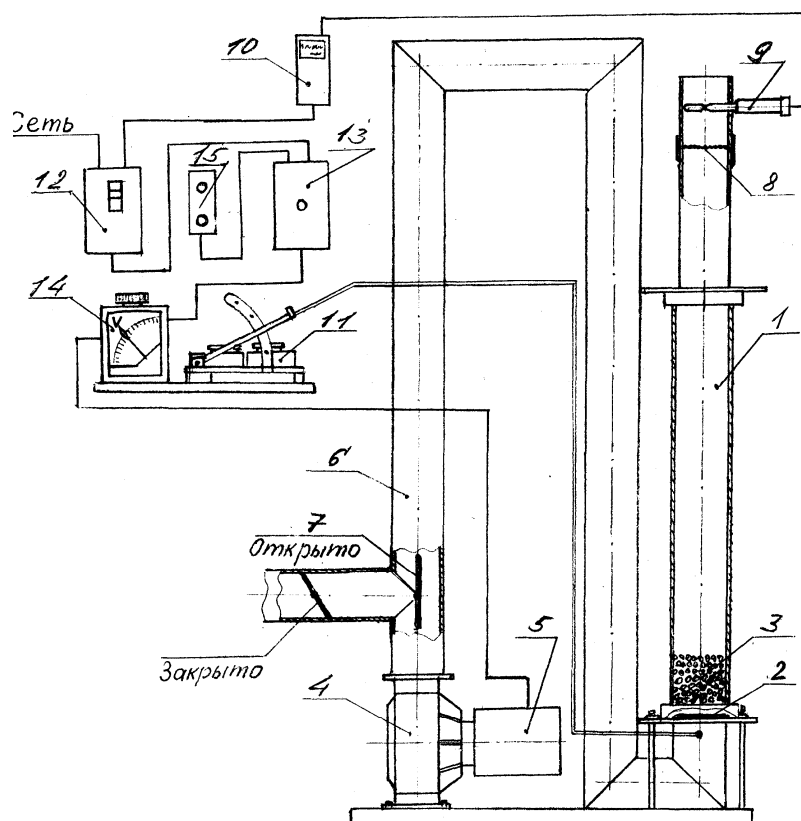


Рис. 1.4. Зависимость критерия Лященко от критерия Архимеда для шаровых частиц

**Описание установки.** Установка для изучения гидродинамики взвешенного слоя (рис. 1.5) состоит из стеклянной трубы 1 с внутренним диаметром 93 мм, в нижней части, которой установлена распределительная решетка 2, поддерживающая зернистый слой полиэтилена 3 с плотностью  $\rho = 524 \text{ кг/м}^3$ . Воздух с помощью воздуходувки 4, которая приводится в действие от электродвигателя 5, направляется в напорный трубопровод 6 при открытой заслонке 7 и далее под распределительную решетку. Над верхней частью стеклянной трубы размещена сетка 8, которая не позволяет зернам полиэтилена уноситься из аппарата. Выше сетки расположен измерительный щуп 9 для замера параметров воздушной среды с

помощью прибора контроля (МЭС-200) 10. На лицевой панели прибора расположены кнопки: «□» для включения и выключения; кнопки «П», «+», «-» для задания режимов работы. Микроанометр 11\* служит для измерения общей потери давления воздуха при прохождении через решетку и слой зернистого материала. Установка снабжена также автоматическим выключателем 12, магнитным пускателем 13, лабораторным автотрансформатором (ЛАТРОм) 14, кнопками пуска и отключения 15. К установке прилагается график зависимости гидравлического сопротивления пустого аппарата с сеткой от скорости воздуха  $\Delta p_{\text{ап}} = f(\omega_{\phi})$ .



**Рис. 1.5.** Схема установки

1 – стеклянная труба; 2 – распределительная решетка; 3 – зернистый слой полиэтилена; 4 – воздуходувка; 5 – электродвигатель; 6 – напорный трубопровод; 7 – заслонка; 8 – сетка; 9 – измерительный щуп; 10 – прибор контроля; 11 – микроанометр; 12 – автоматический выключатель; 13 – магнитный пускатель; 14 – автотрансформатор; 15 – кнопка пуска и управления.

**Методика проведения работы.** Перед началом работы (см. рис. 1.5) заслонку 7 ставят в положение «открыто» и тумблером на автоматическом выключателе 12 и с помощью кнопки пуска 15 приводят в действие воздуходувку 4. Плавно изменяя напряжение в сети лабораторным автотрансформатором 14, постепенно увеличивают расход воздуха до максимального значения равного скорости уноса частиц. Замерив, максимальное значение показаний микроанометра 11, определяют примерное значение шага изменения показаний микроанометра из такого расчета, чтобы в диапазоне изменений показаний

\* Устройство и схема измерения давления с помощью микроанометра рассмотрено в лабораторной работе по изучению поля скоростей потока в трубопроводе [5].

микроманометра разместилось примерно 8 -12 экспериментальных значений. Округлив эти значения, выбирают шаг изменения показаний микроманометра и приступают к эксперименту.

С целью измерения скорости газового потока включают на лицевой панели прибора контроля 10 кнопку «П», а затем кнопку «+» и, выждав 2 - 3 минуты, производят измерение скорости воздуха. При следующем нажатии кнопки «П» прибор контроля МЭС-200 устанавливается в режим измерения температуры.

При каждом показании скорости, соответствующей показанию микроманометра, начиная от нулевой отметки через выбранный шаг и кончая максимальным показанием, записывают показания микроманометра  $\Delta p_{\text{общ}}$  и скорости воздуха  $\omega_{\phi}$ .

После окончания опытов выключают автотрансформатор 14, воздухоподогреватель 4 и закрывают заслонку 7.

**Обработка опытных данных и составление отчета.** Гидравлическое сопротивление, которое показывает микроманометр 11 (рис. 1.5), в действительности представляет собой суммарное сопротивление пустого аппарата, сетки и собственно слоя  $\Delta p_{\text{ап}}$ . По прилагаемому к установке графику (приложение 1) определяют гидравлическое сопротивление пустого

аппарата с сеткой  $\square p_{\text{ап}i}$  при каждом опыте в зависимости от скорости  $\omega_{\phi i}$ .

По значениям  $\Delta p_{\text{общ}i}$  и  $\Delta p_{\text{ап}i}$  определяют гидравлическое сопротивление слоя материала на решетке:

$$\Delta p_{\text{сл}i} = \Delta p_{\text{общ}i} - \Delta p_{\text{ап}i} \quad (1.12)$$

Полученные экспериментальные результаты и расчетные данные сводятся в табл. 1.1. По полученным данным строится график зависимости  $\Delta p_{\text{сл}} = f(\omega_{\phi})$ .

Таблица 1.1

Экспериментальные и расчетные результаты

№ опыта	Показания микроманометра, $\ell$ , мм.вод.ст.	Фиктивная скорость $\omega_{\phi}$ , м/с	Гидравлическое сопротивление, Па		
			$\Delta p_{\text{общ}i}$	$\Delta p_{\text{ап}i}$	$\Delta p_{\text{сл}i}$
1					
2					
3					

По этому графику определяют критическую скорость воздуха  $\omega_{\text{кр}}$  для данных частиц. Затем вычисляют критерий Лященко для критической скорости

$$Ly = \frac{u_{\text{кр}}^3 \cdot c_{\text{ср}}^2}{m_{\text{ср}} \cdot c \cdot g} \quad (1.13)$$

и по графику (рис. 1.4) находят при  $\varepsilon = 0,4$  соответствующее значение критерия Архимеда, по которому определяют средний диаметр частиц  $d$ .

Далее по тому же графику находят предельное значение критерия Лященко при  $\varepsilon = 1$ , позволяющее определить скорость уноса  $\omega_{\text{ун}}$  и расход воздуха  $V_{\text{ун}}$ , при котором происходит

унос из аппарата загруженных в него твердых частиц. Наконец, по формуле (1.7) определяют вес слоя частиц в аппарате.

Необходимые для расчетов значения плотности и вязкости воздуха берут из справочников.

## Лабораторная работа № 2

4 часа

### Изучение процесса разделения суспензий фильтрованием

*Цель работы:* ознакомление с устройством и принципом работы фильтра периодического действия.

*Задачи работы:*

1. Построение кривой фильтрования и определение максимальной производительности фильтра.
2. Определение констант фильтрования на лабораторном фильтре.
3. Расчет времени промывки осадка.

*Обеспечивающие средства:* лабораторный стенд, состоящий из бака с центробежным насосом, фильтра с фильтровальной перегородкой, системы трубопроводов; контрольно-измерительные приборы – манометр, мерный сосуд со шкалой.

*Задание:* исследовать работу фильтра в два этапа: на первом этапе построить кривую фильтрования и определить максимальную производительность фильтра; на втором этапе определить константы фильтрования путем проведения не менее двух опытов при  $\square p = \text{const}$ .

*Требования к отчету:* итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указываются название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вид обучения, факультет, а также приводятся цель работы, схема установки, методика проведения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, подробные расчеты значений одного из режимов; результаты замеров заносят в табл. 2.1, а результаты расчетов – в табл. 2.2, график

зависимости « $\frac{\Delta \tau}{\Delta V}$  от  $V$ » и « $V$  от  $\tau$ ». После оформления экспериментальной части и обработки опытных данных пишется вывод и защищается отчет.

*Технология работы*

Исследовать работу фильтра в два этапа. На первом этапе при определенном перепаде давления  $\Delta p$  фильтровальной перегородке производится отсчет времени и количество собранного фильтрата. В результате необходимо построить кривую фильтрования и определить максимальную производительность фильтра. На втором этапе при  $\square p = \text{const}$  провести серию опытов и построить зависимость  $\frac{\Delta \tau}{\Delta V}$  от  $V$ , определить константы фильтрования  $K$  и  $C$  в уравнении процесса фильтрования.

*Контрольные вопросы*

1. Что называется процессом фильтрования?
2. Движущая сила процесса фильтрования. Какими способами она может быть создана?
3. Какие применяют фильтрующие перегородки и чем обусловлен их выбор?
4. Как определяется скорость фильтрования?
5. Из чего складывается сопротивление фильтрованию?
6. Константы фильтрования и их определение.
7. Как определяется максимальная производительность фильтра?

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

**Теоретическая часть.** Процесс разделения неоднородных систем с твердой дисперсной фазой пористыми перегородками, способными пропускать жидкость или газ и задерживать частицы твердой фазы, называется *фильтрованием*.

Фильтрование широко используется в различных отраслях промышленности. В целлюлозно-бумажной промышленности его применяют для сгущения целлюлозной и бумажной массы, осветления оборотной воды и т. д. В лесохимической промышленности фильтрование служит для получения канифольных продуктов, производства камфары, витаминной муки, биологически активных веществ из сульфатного мыла и др.

Для инженерных расчетов промышленной фильтровальной аппаратуры необходимо знать так называемые константы фильтрования, характеризующие гидравлическое сопротивление осадка и фильтрующей перегородки. Так как при фильтрации жидкость должна преодолеть гидравлическое сопротивление перегородки и слоя осадка, толщина которого увеличивается в процессе фильтрации, то скорость фильтрации непостоянна во времени. Скорость фильтрации зависит от ряда факторов:

- 1) движущей силы процесса фильтрации, т. е. разности давлений на перегородке;
- 2) толщины слоя осадка на фильтре;
- 3) структуры фильтрующей перегородки;
- 4) структуры осадка;
- 5) вязкости фильтрата.

Рассматривая параметры, влияющие на процесс фильтрования, уравнение фильтрования обычно записывается в виде

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta p}{R}, \quad (2.1)$$

где  $dV$  – объем фильтрата, проходящего через  $1 \text{ м}^2$  поверхности фильтра, ( $\text{м}^3/\text{м}^2$ );  $d\tau$  – продолжительность процесса, с;  $\Delta p$  – движущая сила процесса фильтрования, Па;  $R$  – сопротивление фильтрования,  $\text{Па} \cdot (\text{с} / \text{м})$ .

Сопротивление фильтрования  $R$  складывается из сопротивления осадка  $R_{oc}$  и сопротивления фильтрующей перегородки  $R_{ф.п.}$ , т. е.

$$R = R_{oc} + R_{ф.п.}$$

Так как сопротивление осадка пропорционально количеству отложившегося осадка, а, следовательно, пропорционально количеству фильтрата, то

$$R_{oc} = K' \cdot V,$$

где  $K'$  – коэффициент пропорциональности.

Сопротивление фильтрующей перегородки можно заменить сопротивлением слоя осадка, оказывающего такое же сопротивление процессу фильтрования, какое оказывает перегородка, и выразить соответствующим количеством фильтрата  $C$ , ( $\text{м}^3/\text{м}^2$ ), т. е.

$$R_{\text{ф.п.}} = K' \cdot C$$

Тогда

$$R = K' \cdot (V + C) \quad (2.2)$$

Подставив полученное значение  $R$  в уравнение (2.1), разделив переменные и проинтегрировав, после небольших преобразований получим уравнение фильтрования Румса

$$V^2 + 2 \cdot V \cdot C = K \cdot \tau, \quad (2.3)$$

где  $K$  и  $C$  называют константами фильтрования.

Константы фильтрования определяют экспериментально по разделению исследуемой суспензии на фильтре при постоянном перепаде давления  $\Delta p$ . В уравнении фильтрования (2.3) константа  $K$  определяется как

$$K = \frac{2 \cdot \Delta p}{K'} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\mu \cdot r_0 \cdot x_0}, \quad (2.4)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости фильтрата,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $r_0$  – удельное объемное сопротивление осадка,  $\text{м}^{-2}$ , характеризующее сопротивление, оказываемое потоку жидкой фазы слоем осадка толщиной 1 м;  $x_0$  – коэффициент пропорциональности (концентрация суспензии), равный отношению объема осадка к объему фильтрата.

Константа фильтрования  $C$  определяется как

$$C = \frac{R_{\text{ф.п.}}}{r_0 \cdot x_0}. \quad (2.5)$$

Если известны константы фильтрования  $K$  и  $C$  в уравнении (2.3), то можно рассчитать удельную производительность фильтра и далее определить необходимую поверхность фильтрования при заданной производительности фильтра, а также время промывки осадка, что очень важно для проектирования фильтрованной аппаратуры.

После дифференцирования уравнения (2.3) по  $V$  и замены первой производной отношением конечных разностей получим

$$\frac{d\tau}{dV} = \frac{2}{K} \cdot V + \frac{2}{K} \cdot C$$

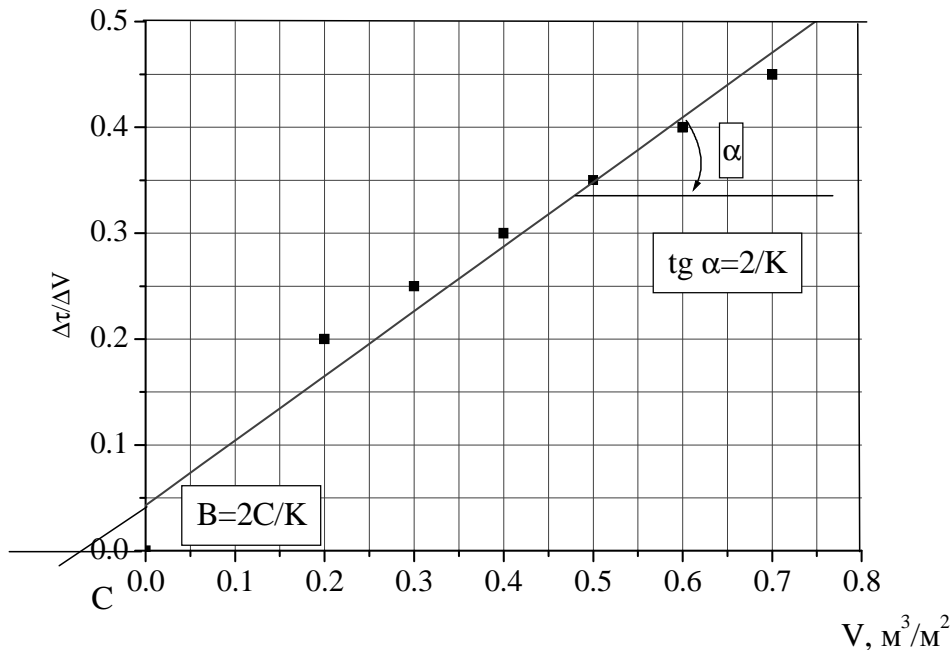
или

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta V} = \frac{2}{K} \cdot V + \frac{2}{K} \cdot C. \quad (2.6)$$

В уравнении (2.6)  $\Delta\tau$  и  $\Delta V$  представляют собой приращение времени фильтрования и объема полученного фильтрата. Это уравнение выражает линейную зависимость между  $\frac{\Delta\tau}{\Delta V}$  и  $V$ . Построив прямую по результатам проведенных опытов (рис. 2.1), можно определить

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{K},$$

а отсюда значение  $K$ .



**Рис. 2.1.** Экспериментальная зависимость для определения констант фильтрования.

Отрезок  $B$  на оси ординат равен  $\frac{2 \cdot C}{K}$ , откуда получаем значение  $C$ . Константа  $K$  характеризует режим процесса фильтрования (при  $\Delta p = \text{const}$ ), а также физические свойства осадка и жидкости, а константа  $C$  – гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки.

Константы фильтрования могут быть определены и аналитически. Аналитическое определение констант фильтрования заключается в решении системы двух уравнений

$$V_1^2 + 2 \cdot V_1 \cdot C = K \cdot \tau_1;$$

$$V_2^2 + 2 \cdot V_2 \cdot C = K \cdot \tau_2. \quad (2.7)$$

Во время промывки осадка количество твердой фазы постоянно и если осадок не сжимается, то и сопротивление его остается так же неизменным. Тогда скорость промывки будет равна скорости фильтрования в конечный момент и  $\frac{dV}{d\tau} = \text{const}$  в уравнении (2.1) производную можно заменить отношением постоянных величин  $\frac{V_{\text{пр}}}{\tau_{\text{пр}}}$ . Таким образом,  $\frac{V_{\text{пр}}}{\tau_{\text{пр}}} = \frac{K'}{2 \cdot (V + C)}$ , откуда

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot V_{\text{пр}} \cdot (V + C)}{K}, \quad (2.8)$$

где  $\tau_{\text{пр}}$  – время промывки, с;  $V_{\text{пр}}$  – объем промывной жидкости на  $1 \text{ м}^3$  фильтрата,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ .

Уравнение (2.8) справедливо, если вязкость промывной жидкости равна вязкости фильтрата и если промывная жидкость проходит через фильтр тем же путем, что и фильтрат, и образовавшийся осадок не сжимается.

**Описание установки.** Установка для исследования процесса фильтрования (рис. 2.2), состоит из друк-фильтра 1 с фильтровальной перегородкой 2, поверхность фильтрования которого составляет  $F = 3,14 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ . Создание движущей силы процесса фильтрования обеспечивается центробежным насосом 3. Бак 4 содержит исходную суспензию хвойной небеленой целлюлозы. Корпус фильтра соединен трубопроводом 5 с мерным сосудом 6. Верхняя часть мерного сосуда сообщается с атмосферой, а нижняя, посредством трубопровода 7, с баком исходной суспензии. Бак снабжен водомерным стеклом 8 и специальной насадкой 9, предназначенной для эффективного перемешивания исходной суспензии. Люк 10 на крышке фильтра служит для загрузки исходной суспензии. Корпус фильтра разборный и состоит из двух перфорированных дисков (решеток) 11, между которыми помещен фильтрующий материал 12. Отдельные элементы установки соединены между собой системой трубопроводов 13–19, вентилями 27, 28 и пробковыми кранами 20–26, 29. Манометр 30 предназначен для измерения давления на фильтровальном элементе. Отбор пробы производится через кран 29. В лабораторном фильтре решетка 11 и фильтрующий элемент 12 выполнены съемными, легко заменяемыми.

Пульт управления включает в себя магнитный пускатель 31, автоматический выключатель 32 и кнопки управления 33.

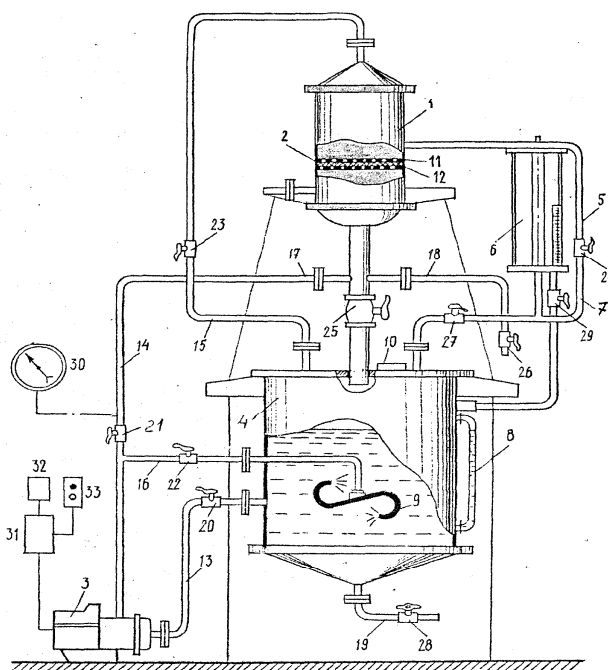


Рис. 2.2. Схема установки

**Методика проведения работы.** Приготавливают суспензию (или используют готовую суспензию промышленной небеленой целлюлозы) и заливают в бак 4 через загрузочный люк 10 (рис. 2.2). Суспензию готовят с концентрацией твердой фазы  $0,1 \div 0,2\%$  массовых единиц (по указанию преподавателя). Если пользуются готовой суспензией, перед началом работы необходимо определить концентрацию твердой фазы весовым методом.

В режиме подготовки суспензия посредством насоса 3 многократно перекачивается по контуру: линия 13 – насос 3 – напорный трубопровод 14 – фильтр 1 – линия 15 – бак исходной суспензии 4. При этом часть исходной суспензии по линии 16 может возвращаться в нижнюю часть бака 4 через специальную насадку 9.

Перед началом работы проверяют готовность установки к пуску. Пробковые краны 24, 25, 26, 27 должны быть закрыты. Пробковые краны 21 и 23 находятся в открытом положении. После чего открывают пробковый кран 20, включают центробежный насос 3. С помощью кранов 21, 22 и 23 устанавливают требуемое давление суспензии на фильтровальном элементе – по манометру 30 в пределах  $1 \div 1,5$  кгс/см<sup>2</sup>. В ходе этой операции осадок на фильтровальном элементе не образуется, т. к. на ней отсутствует перепад давления. В течение  $5 \div 10$  мин после включения насоса за счет циркуляционного перемешивания обеспечивается равномерное распределение твердой фазы суспензии, и установка может считаться готовой к проведению экспериментов.

*Первый этап* проводится с целью построения кривой фильтрования и определения максимальной производительности фильтра. При этом прикрывается пробковый кран 23 с одновременным открытием крана 24 приемника фильтрата. Регулированием крана 22 корректируется давление на фильтровальной перегородке 2. При появлении в мерном сосуде 6 первых капель жидкости включается секундомер и производится отсчет времени и количество собранного фильтрата. Все замеры времени и объема фильтрата производят, не выключая секундомера и считая их от начального процесса фильтрования. Результаты замеров заносят в табл. 2.1.

После окончания опыта отмечают давление в конце процесса фильтрования, открывают вентиль 27 и сливают фильтрат в бак с исходной суспензией. Затем закрывают краны 24, вентиль 27 и открывают краны 23 и 25. В результате обеспечивается циркуляция суспензии и смыв с поверхности фильтра образовавшегося слоя осадка

*Второй этап.* Определение констант фильтрования на лабораторном фильтре путем проведения не менее двух опытов.

Так как в установке, как и в большинстве промышленных фильтров, суспензия подается на фильтр центробежным насосом, характеристика которого не обеспечивает строгого соблюдения  $\Delta p = \text{const}$  в ходе процесса, поэтому при определении констант фильтрования давления суспензии, поступающей на фильтр, изменяется ступенчато дважды, но в пределах каждой ступени оно поддерживается постоянным. Давления  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_2$  могут соответствовать начальному и конечному давлению предыдущего опыта или задаваться.

Опыт в пределах каждой ступени проводится согласно вышеприведенной методике. Однако здесь, в отличие от первого этапа, в ходе процесса давление на фильтре должно поддерживаться постоянным, что достигается регулированием крана 22.

Полученные результаты замеров объемов фильтрата  $V'$  и соответствующие им интервалы времени  $\square$  заносятся в табл. 2.2. Для установления соотношения между массой осадка и

объемом полученного фильтрата  $\left( x = \frac{m_{\text{ос}}}{V'} \right)$  отбирают  $300 \div 500$  мл исходной суспензии, которая отфильтровывается на фильтровальной воронке, где фильтрующим материалом должен служить тот же материал, что и в лабораторной установке. Объем фильтрата измеряется мерным цилиндром, а масса твердого осадка ( $m_{\text{ос}}$ ) определяется весовым методом.

Учитывая, что фильтрующий материал обеспечивает практически полное разделение суспензии величину  $x$  в первом приближении можно оценить по значению начальной концентрации суспензии. Если концентрация исходной суспензии составляет

$C$ ,  $\frac{\text{кг твердого вещества}}{\text{кг жидкости}}$ , то

$$x = \rho_{\phi} \cdot C, \quad (2.9)$$

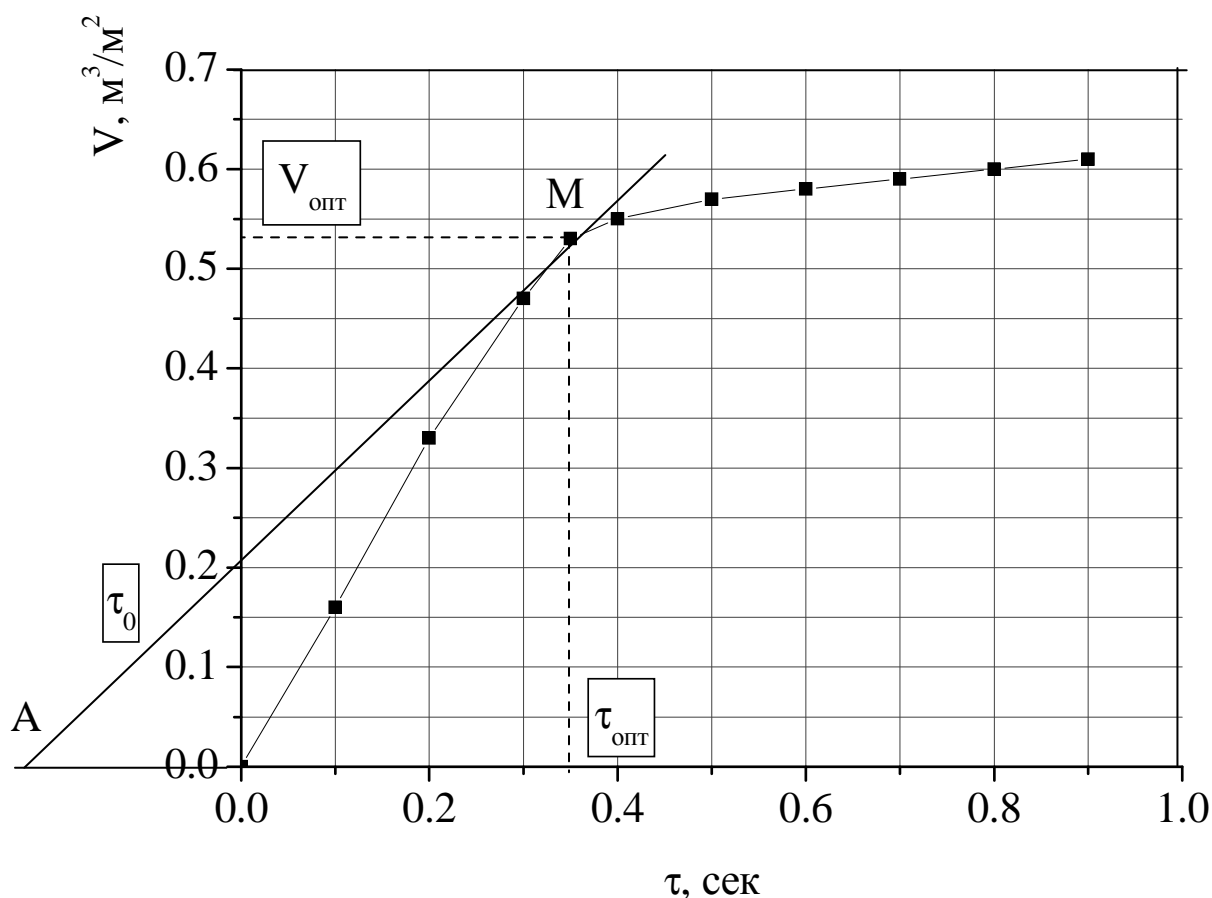
где  $\rho_{\phi}$  – плотность фильтрата,  $\text{кг/м}^3$ .

После окончания опытов следует слить суспензию из корпуса фильтра  $1$ , а фильтрат из мерного сосуда в исходный бак, для чего открыть краны  $25$  и  $27$ .

**Обработка опытных данных.** Для нахождения максимальной производительности фильтра  $V_{\max}$  (первый опыт) по экспериментальным данным отчетной таблицы строят график (рис. 2.3), откладывая по оси абсцисс время процесса фильтрования от  $\tau_1$  до  $\tau_2$ , а по оси ординат – объем фильтрата, полученного с  $1 \text{ м}^2$  поверхности фильтрования от  $V_1$  до  $V_n$ . Затем на оси абсцисс, слева от начала координат, откладывается значение времени процесса фильтрования  $\tau$ , отмечается точка  $A$ , и через эту точку проводится касательная к кривой фильтрования. В точке касания (т.  $M$ ) определяют максимальную производительность фильтра  $V_{\max}$  по уравнению

$$V_{\max} = V_{\text{опт}} \cdot F, \quad (2.10)$$

где  $V_{\text{опт}}$  – оптимальная удельная производительность фильтра,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ .



**Рис. 2.3.** График для определения оптимальной производительности фильтра

Опустив перпендикуляр из точки  $M$  на ось абсцисс, определяют оптимальную продолжительность процесса фильтрации  $\tau_{\text{опт}}$ .

Скорость в конце процесса фильтрации  $\omega_{\phi}$  определяется тангенсом угла наклона касательной  $AM$  к оси абсцисс.

Количество полученного осадка, соответствующего максимальной производительности, находим по уравнению

$$m_{oc} = V_{oc} \cdot x, \quad (2.11)$$

а количество суспензии, прошедшей через фильтр,

$$m_c = m_{oc} + m_{\phi} = V_{\max} \cdot (x + \rho), \quad (2.12)$$

где  $m_{\phi}$  – масса фильтрата, г.

Для определения констант процесса фильтрации  $K$  и  $C$  в течение каждого опыта ( $\Delta p = \text{const}$ ) отмечают несколько значений объемов полученного фильтрата  $V_1, V_2, V_3, \dots$  и продолжительности фильтрации  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$  определяют приращение объемов фильтрата  $\Delta V_1 = V_1; \Delta V_2 = V_2 - V_1; \Delta V_3 = V_3 - V_2, \dots$  и приращение продолжительности фильтрации  $\Delta \tau_1$

$= \tau_1; \Delta\tau_2 = \tau_2 - \tau_1; \Delta\tau_3 = \tau_3 - \tau_2, \dots$ , после чего вычисляют отношения  $\frac{\Delta\tau}{\Delta V}$  для всех опытов и строят график согласно рис. 2.1. Полученные точки соединяют прямыми линиями, каждая из которых отвечает своему перепаду давлений на фильтровальной перегородке. Линии продолжают до пересечения с осью ординат и находят отрезки  $B_1$  и  $B_2$ . По найденным значениям отрезков для каждой ступени опыта вычисляют константы фильтрования  $K_1$  и  $K_2$ ,  $C_1$  и  $C_2$ . Затем проводят усреднение значений констант фильтрования:

$$K_{\text{ср}} = \frac{(K_1 + K_2)}{2}; \quad (2.12)$$

$$C_{\text{ср}} = \frac{(C_1 + C_2)}{2}. \quad (2.13)$$

Кроме того, эти константы рассчитывают, решая систему уравнений (2.7). Сравнивают полученные графически и аналитически значения констант фильтрования.

Далее рассчитывают время процесса фильтрования  $\tau$  по уравнению (2.3) и время промывки осадка по уравнению (2.8) при заданной преподавателем производительности.

Таблица 2.1

Экспериментальные данные

№ опыта	Время замера, $\tau$ , с		Высота жидкости в мерном цилиндре, $h$ , м			Движущая сила процесса, $\Delta p$ , Па	
	Первый этап	Второй этап		Первый этап	Второй этап		Второй этап
		$\Delta p_1$	$\Delta p_2$		$\Delta p_1$	$\Delta p_2$	
1							
2							
.							
.							
.							

Таблица 2.2

Расчетные значения

№ опыта	Объем фильтрата		Приращение объема $\Delta V, \text{м}^3/\text{м}^2$	Приращение времени $\Delta\tau, \text{с}$	$\frac{\Delta\tau}{\Delta V}, (\text{с} \cdot \text{м}^2)/\text{м}^3$	Константы фильтрования	
	$V', \text{м}^3$	$V, \text{м}^3/\text{м}^2$				$K, \text{м}^2/\text{с}$	$C, \text{м}^3/\text{м}^2$
$\Delta p_1 = \text{const}$							
1							
2							
.							
.							
.							

$\Delta p_2 = \text{const}$							
1							
2							
.							
.							
.							

## Лабораторная работа № 3

4 часа

### Изучение гидравлического сопротивления насадочной колонны

*Цель работы:* ознакомление с устройством и принципом работы насадочной колонны, визуальное наблюдение за режимами работы; определение гидравлического сопротивления аппарата экспериментальным и расчетным путем.

#### *Задачи работы*

1. Снять при каждом показании скорости, соответствующей показанию микроманометра, начиная от 0,5 м/с через выбранный шаг и заканчивая максимальным показанием.
2. Произвести расчет гидравлического сопротивления для сухой и орошаемой насадки.

*Обеспечивающие средства:* лабораторный стенд (каб. 309-П).

*Задание:* изучить работу насадочной колонны при различных режимах, провести работу в два этапа: 1 – с неорошаемой насадкой, 2 – с орошаемой насадкой.

*Требования к отчету:* итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, график – на миллиметровой бумаге, выполненный в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указываются название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вид обучения, факультет, а также приводятся цель работы, схема установки, методика проведения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, подробные расчеты значений одного из режимов, таблица «Экспериментальные данные и расчетные данные» (таблица 3.1), графическая зависимость для сухой и орошаемой насадки. После оформления экспериментальной части и обработки опытных данных пишется вывод и защищается отчет.

#### *Технология работы*

Сначала работу проводят с неорошаемой насадкой. Измеряют перепад давления в скруббере  $\Delta p$  при различных расходах воздуха. Второй этап: при заданных расходах воды определяют по дифманометру гидравлическое сопротивление скруббера при различных расходах воздуха и заданных плотностях орошения, данные заносят в таблицу с экспериментальными и расчетными данными (табл. 3.1). По опытным данным рассчитывают значения фиктивной скорости газа  $\omega_{\text{ф}}$  и вычисляют соответствующие ей значения градиента

давления  $\frac{\Delta p}{H} = f(\omega_{\text{ф}})$  для сухой и орошаемой насадки, строят график зависимости

$\frac{\Delta p}{H} = f(\omega_{\text{ф}})$  в полулогарифмических координатах.

По вычисленной фиктивной скорости газа рассчитывают значения чисел Рейнольдса и определяют значения коэффициента сопротивления  $\lambda_{\text{с}}$ . Для заданных расходов воздуха  $G_{\text{г}}$  и различных расходов жидкости  $G_{\text{ж}}$  рассчитывают скорость инверсии фаз  $\omega_{\text{ф.ин}}$  и, определив

отношение скоростей  $\frac{\omega_{\text{ф}}}{\omega_{\text{ф.ин}}}$ , устанавливают величину коэффициента  $C$ , а затем рассчитывают значения поправочного коэффициента  $K$ .

#### *Контрольные вопросы*

1. Способы создания поверхности контакта фаз в колонных аппаратах.
2. Конструкции насадочных колонн.
3. Типы насадочных тел.
4. Геометрические параметры насадочных тел (свободный объем, удельная поверхность и эквивалентный диаметр).
5. Что означает фиктивная и действительная скорость газа в аппарате и связь между этими скоростями?
6. Какие режимы работы насадочных колонн и их влияние на эффективность работы колонны?
7. Модель слоя насадочных тел.
8. Определение гидравлического сопротивления сухой и орошаемой насадки.
9. Почему увеличивается сопротивление орошаемой насадки?

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

**Теоретическая часть.** В химической технологии широкое распространение получили массообменные процессы, в которых одно или несколько веществ переходит из жидкой фазы в газовую или наоборот. Переход вещества из одной фазы в другую осуществляется через поверхность их контакта, и при прочих равных условиях количество прошедшего вещества пропорционально площади этой поверхности, поэтому увеличение межфазной поверхности в массообменных аппаратах является одним из способов повышения их производительности.

В промышленных массообменных аппаратах для создания поверхности контакта между жидкой и газовой фазами применяются следующие способы:

- пленочное течение жидкости вдоль твердой поверхности, омываемой потоком газа;
- барботаж газа через слой жидкости;
- распыление жидкости в газовом потоке;
- движение газа вдоль зеркала жидкости.

Конструкции аппаратов, в которых реализуются эти способы, отличаются большим разнообразием.

Широкое распространение в промышленности получили насадочные аппараты, когда поверхность контакта образуется по первому способу. Насадочный аппарат (рис. 3.1) представляет собой колонну 1, заполненную насадкой 2 (насадка - это твердые тела различной формы). Насадка укладывается на опорные решетки 3, имеющие отверстия или щели для прохождения газа и стока жидкости. Жидкость с помощью распределителя 4 равномерно орошает насадку и стекает по ее поверхности вниз, а снизу вверх через слой насадки продувается газ.

Обычно орошающая жидкость равномерно распределяется только вверху колонны по поперечному сечению аппарата и по мере продвижения вниз оттесняется потоком газа от центра колонны к стенкам, поэтому для равномерного смачивания по всему объему, в колоннах большого диаметра насадку укладывают слоями высотой 2 ÷ 3 м и под опорной решеткой каждого слоя, кроме нижнего, устанавливают перераспределители жидкости 5.

В качестве насадки

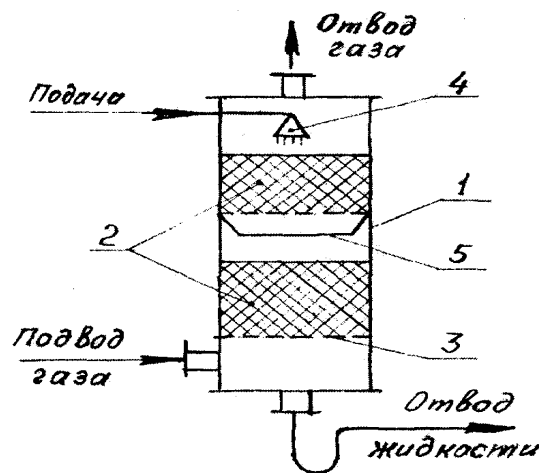


Рис. 3.1. Схема насадочного скруббера

применяются разнообразные по форме и размерам тела. Наиболее распространенные в промышленности типы насадки изображены на рис. 3.2.

Иногда в качестве насадки используют куски кварца или кокса размером  $25 \div 100$  мм, засыпанные в колонну навалом. Насадка, заполняющая колонну, характеризуется свободным объемом (пористостью), удельной поверхностью и эквивалентным диаметром.

Свободный объем  $\varepsilon$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , определяет относительную долю пустой в общем объеме насадки и вычисляется как

$$\varepsilon = \frac{W_n}{W} = \frac{W - W_m}{W} = 1 - \frac{W_m}{W}, \quad (3.1)$$

где  $W_n$  – объем пустот в слое насадки,  $\text{м}^3$ ;  $W$  – общий объем, занимаемый слоем насадки,  $\text{м}^3$ ;  $W_m$  – объем материала, из которого изготовлена насадка,  $\text{м}^3$ .

Свободный объем можно вычислить и как отношение:

$$e = \frac{S_0}{S}, \quad (3.2)$$

где  $S_0$  – суммарное живое сечение пустот и пор в поперечном сечении насадки,  $\text{м}^2$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения аппарата,  $\text{м}^2$ .

Удельная поверхность  $a$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ , представляет собой поверхность насадки, приходящуюся на единицу ее объема. При движении через слой насадки жидкости или газа или их смеси можно считать, что поток движется внутри каналов неправильной формы, образуемых пустотами и порами между элементами насадки. Эти каналы имеют различную конфигурацию, они не существуют изолированно, и по пути потока происходит их постоянное слияние и разветвление, поэтому количество каналов в каждом поперечном сечении слоя насадки различно. В расчетах под количеством каналов слоя следует понимать некоторую осредненную по его высоте величину. Средний эквивалентный диаметр таких каналов и представляет собою эквивалентный диаметр слоя насадки, который определяется как

$$d_s = \frac{4 \cdot S_0}{\Pi}, \quad (3.3)$$

где  $d_s$  – эквивалентный диаметр канала, м;  $\Pi$  – смоченный (средний по высоте слоя) периметр канала, м.

Эквивалентный диаметр выражается через пористость и удельную поверхность насадки. Если умножить  $S_0$  и  $\Pi$  на число каналов  $n$  и высоту слоя  $H$ , то можно получить:

$\tilde{V}$  – объем пустот слоя насадки;

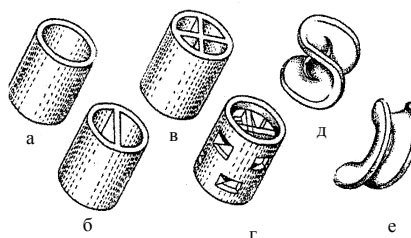


Рис. 3.2. Типы насадок:

*a* – кольца Рашига; *б* – кольца с перегородкой;  
*в* – кольца с крестообразной перегородкой;  
*г* – кольца Палля; *д* – седла Берля; *е* – седла «Инталокс»

$\Pi \cdot n \cdot H = S_n = W \cdot a$  - общая поверхность слоя насадки.

Решение этих уравнений относительно  $S_0$  и  $\Pi$  и подстановка их значений в (3.3) приводит к выражению

$$d_3 = \frac{4e}{a}. \quad (3.4)$$

В гидравлических расчетах насадочных аппаратов обычно используется не действительная скорость движения потока в каналах слоя насадки  $\omega_k$ , м/с, а фиктивная  $\omega_\phi$ , м/с, т. е. отнесенная к полному сечению аппарата и определяемая как

$$\omega_\phi = \frac{V}{S} = \frac{4 \cdot G}{\rho \cdot D^2 \cdot c_r}, \quad (3.5)$$

где  $V$  – объемный расход газа в аппарате, м<sup>3</sup>/с;  $G$  – массовый расход газа в аппарате, кг/с;  $D$  – диаметр аппарата, м;  $\rho_r$  – плотность газа в аппарате, кг/м<sup>3</sup>.

Из условия неразрывности потока

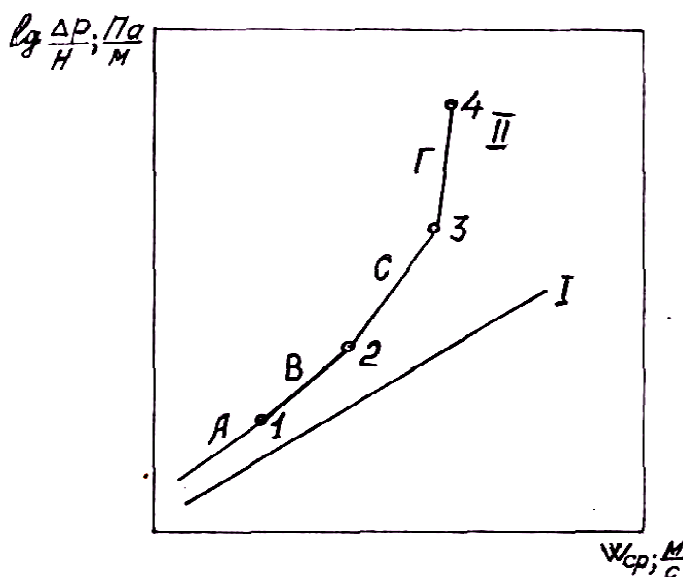
$$\omega_k \cdot S_0 = \omega_\phi \cdot S$$

следует, что

$$\omega_k = \omega_\phi \cdot \frac{S}{S_0} = \frac{\omega_\phi}{e}. \quad (3.6)$$

В насадочном аппарате при противоточном движении газовой и жидкой фаз наблюдаются четыре гидродинамических режима: пленочный, подвисяния, эмульгирования и уноса, которые по мере увеличения скорости движения газовой фазы последовательно сменяют друг друга. Характер зависимости потери давления в газовой фазе от скорости ее движения определяется режимом работы аппарата. На рис. 3.3 в полулогарифмической системе координат изображен типичный для насадочного аппарата график зависимости градиента давления от фиктивной скорости:

$$\lg \frac{\Delta p}{H} = f(\omega_\phi), \quad (3.7)$$



**Рис. 3.3.** Зависимость градиента давления от фиктивной скорости в аппарате при  $L = \text{const}$  ( $L$  – расход абсорбента): I – сухая насадка; II – орошаемая насадка; А – пленочный режим; В – режим подвисяния; С – режим эмульгирования; Г – режим уноса

где  $\Delta p$  – потеря давления в газовой фазе, по высоте слоя насадки, Па;  $H$  – высота слоя насадки, м. Кривая  $I$  относится к сухой насадке, кривая  $II$  – к орошаемой насадке.

При малых скоростях движения газа имеет место пленочный режим (участок  $A$ ). В этом режиме жидкость перемещается от элемента к элементу насадки в виде капель и пленок, причем некоторые участки элементов могут не смачиваться. В пленочном режиме газ движется между элементами насадки как сплошная фаза и контактирует с жидкостью в основном на смоченных поверхностях элементов. В точке  $1$ , называемой точкой торможения, движение жидкости по насадке начинает тормозиться газовым потоком, скорость жидкости уменьшается и пленочный режим сменяется режимом подвисяния (участок  $B$ ). В этом режиме жидкость покрывает насадку в виде стекающей тонкой пленки и отдельных струек, образуются отдельные вихри. В режиме подвисяния взаимодействие между фазами происходит не только на смоченной поверхности насадки, но и на развитой поверхности пленок и струек. С увеличением скорости газа в результате возрастающего торможения жидкость при скоростях газового потока в точке  $2$ , называемой точкой подвисяния, режим сменяется режимом эмульгирования (участок  $C$ ). При этом режиме жидкость накапливается в свободном объеме насадки, ее поверхность турбулизуется, и во всем объеме аппарата на поверхности жидкости наступает интенсивное вихреобразование. При этом наступает обращение, или инверсия фаз (жидкость становится сплошной фазой, а газ – дисперсной). Режим эмульгирования соответствует максимальной эффективности насадочных колонн. Эмульгирование возникает не одновременно во всем объеме аппарата. В виду неравномерности укладки насадки он появляется там, где скорость движения газа наибольшая, т. е. в местах с наиболее плотной укладкой насадки, и по мере увеличения расхода газа быстро распространяется на весь объем аппарата. Гидравлическое сопротивление колонны при этом резко возрастает. На графике этот режим характеризуется почти вертикальным отрезком.

Когда весь слой насадки оказывается заполненным газожидкостной эмульсией, увеличение расхода газа приводит к накоплению жидкости поверх насадки. Это явление называется захлебыванием. В режиме захлебывания колонна перестает нормально работать, и этот режим на практике используется только для смачивания насадки при пуске колонны.

При визуальном наблюдении за работой насадочной колонны и на графике зависимости градиента давления от фиктивной скорости точки торможения и подвисяния и режим эмульгирования иногда проявляются не резко, точка же инверсии  $3$  всегда проявляется резко и четко обнаруживается. По мере увеличения расхода газовой фазы наступает режим уноса (участок  $\Gamma$ ), который на практике не используется.

Определение потерь давления в газе при его течении через сухую неорошаемую насадку сопряжено со значительными математическими трудностями. Задача определения потерь давления намного усложняется, когда газ движется через орошаемую насадку, поэтому для получения простых расчетных зависимостей, пригодных для инженерных расчетов, рассматривают движение потока не в каналах реального слоя насадки, а в каналах идеальной пористой среды, являющейся упрощенной моделью реального слоя насадки. Идеальная пористая среда представляет собою набор цилиндрических каналов, диаметр которых равен эквивалентному диаметру слоя насадки, длина каналов равна высоте слоя, а их число количеству каналов реального слоя насадки.

Согласно известному уравнению Дарси, при движении в прямолинейном цилиндрическом канале длиной  $l$  и диаметром  $d$  жидкости с плотностью  $\rho$  и вязкостью  $\mu$  со скоростью  $\omega$  потери давления равны:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}, \quad (3.8)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения для цилиндрического канала.

Чтобы применить это уравнение для движения газов в прямолинейных цилиндрических каналах сухой идеальной пористой среды, надо в уравнение (3.8) и в выражении для числа Рейнольдса заменить  $l$  на  $H$ ,  $d$  на  $d_3$ ,  $\omega$  на  $\omega_k$ . После указанной подстановки получается следующая зависимость, позволяющая рассчитать гидравлическое сопротивление при движении газа через сухую насадку:

$$\Delta p_{\text{сух}} = \lambda_c \cdot \frac{H}{d_3} \cdot \frac{c_r \cdot \psi_k^2}{2} = \lambda_c \cdot \frac{H \cdot a}{4 \cdot e^3} \cdot \frac{c_r \cdot \psi_{\phi}^2}{2}, \quad (3.9)$$

где  $\lambda_c = f(Re)$  – коэффициент сопротивления для слоя насадки;

Число Рейнольдса для газа, движущегося в слое насадки

$$Re = \frac{\omega_k \cdot d_3 \cdot c_r}{\mu_r} = \frac{4 \cdot \omega_{\phi} \cdot c_r}{a \cdot \mu_r} \quad (3.10)$$

где  $\mu_r$  – динамический коэффициент вязкости газа,  $Pa \cdot c$ .

Коэффициент сопротивления  $\lambda_c$  в уравнении (3.9) лишь формально напоминает коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  уравнения (3.8). Коэффициент  $\lambda_c$ , в отличие от  $\lambda$ , учитывает не только потери на трение, но и дополнительные потери давления в местных сопротивлениях, возникающие в потоке газа при движении по искривленным реальному слою насадки.

Вид зависимости  $\lambda_c = f(Re)$  для различных насадок выявляется экспериментально. Установлено, например, что для слоя насадки, состоящего из беспорядочно засыпанных колец Рашига при ламинарном режиме движения газа в слое, когда  $Re < 40$ :

$$\lambda_c = \frac{140}{Re}; \quad (3.11)$$

при турбулентном режиме движения газа, когда  $Re > 40$ :

$$\lambda_c = \frac{16}{Re^{0,2}}. \quad (3.12)$$

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки  $\Delta p_{\text{ор}}$  больше сопротивления сухой  $\Delta p_{\text{сух}}$ . Это объясняется тем, что часть жидкости удерживается насадкой вследствие смачивания ее поверхности и скопления в узких криволинейных каналах, что уменьшает их живое сечение и соответственно увеличивает скорость движения газа в насадке, в результате чего возрастает гидравлическое сопротивление слоя. Сопротивление орошаемой насадки до начала режима эмульгирования можно определить как

$$\Delta p_{\text{ор}} = k \cdot \Delta p_{\text{сух}}, \quad (3.13)$$

где  $k$  – поправочный коэффициент, определяемый из уравнения

$$k = 1 + C \left( \frac{G_{\text{ж}}}{G_r} \right)^{0,405} \cdot \left( \frac{c_r}{c_{\text{ж}}} \right)^{0,225} \cdot \left( \frac{M_{\text{ж}}}{M_r} \right)^{0,0405}, \quad (3.14)$$

где  $C$  – безразмерный коэффициент, определяемый по графику (рис. 3.4);  $G_{\text{ж}}$  – расход жидкости, подаваемой на орошение колонны,  $\frac{кг}{м^2 \cdot c}$ ;  $G_r$  – расход газа через колонну,  $\frac{кг}{м^2 \cdot c}$ ;

$\frac{G_{ж}}{G_{г}}$  – относительное орошение;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\mu_{ж}$  – динамический коэффициент вязкости жидкости,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ .

На горизонтальной оси графика (рис. 3.4) отложены значения,  $\frac{\omega_{ф}}{\omega_{ф.ин}}$ , где  $\omega_{ф.ин}$  – фиктивная скорость газа, соответствующая точке инверсии. Значение скорости  $\omega_{ф.ин}$  можно определить с помощью уравнения

$$\lg \left( \frac{\omega_{ф.ин}^2 \cdot a \cdot c_{г} \cdot M_{ж}^{0,16}}{g \cdot e^3 \cdot c_{ж}} \right) = 0,022 - 1,75 \left( \frac{G_{ж}}{G_{г}} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{c_{г}}{c_{ж}} \right)^{0,125} \quad (3.15)$$

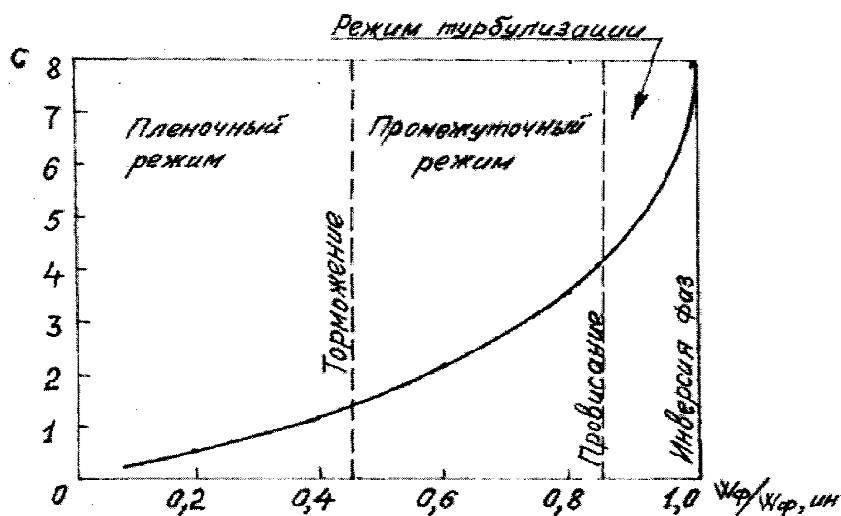


Рис. 3.4. График для определения коэффициента  $C$

**Описание установки.** На рис. 3.5 изображена лабораторная установка, которая состоит из скруббера 1, заполненного насадочными телами 2. Внутренний диаметр скруббера  $D_{вн} = 93$  мм, высота 850 мм; насадочные тела - кольца Рашига размером  $25 \times 25 \times 3$  мм. Верхний фланец абсорбера соединен с брызгоотделителем 3, в котором размещен распределитель жидкости 4 и каплеотбойник 5. Вода, стекающая по насадке, проходит опорную решетку 6 и накапливается в баке 7, уровень которой контролируется водомерной трубкой 8. Поступление воды в скруббер осуществляется с помощью насоса 9, который приводится в действие электродвигателем 10. Расход воды регулируют вентилем 11 по показателям ротаметра 12. В нижнюю часть скруббера под опорную решетку подается воздух с помощью газодувки 13, соединенной с электродвигателем 14; при этом заслонка 15 должна быть в положении «открыто», а заслонка 16 в положении «закрыто». Вентиль 17 открывают на втором этапе, для подачи воды на орошение колонны. В схему лабораторной установки также входят следующие приборы: автоматический выключатель 18, 19; магнитный пускатель 20; кнопки управления 21; лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 22; розетки 23, 24; щуп измерительный 25; измеритель скорости 26; термометр 27; дифманометр 28.

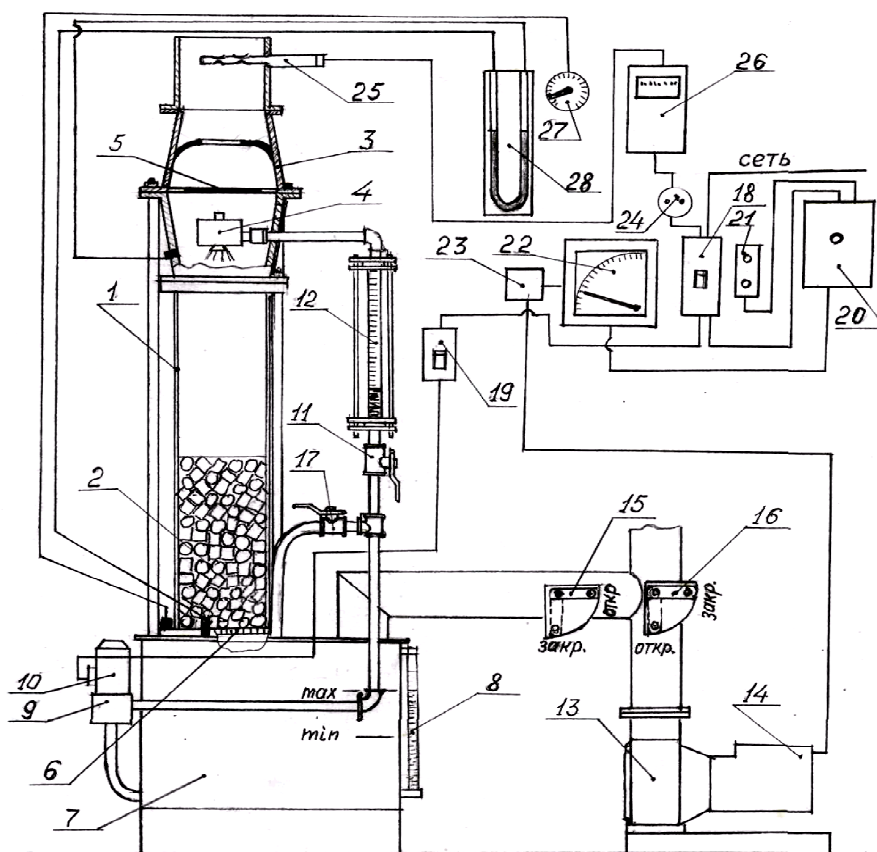


Рис. 3.5. Схема установки

### Методика проведения работы.

#### Первый этап (сухая насадка).

Сначала работу проводят с неорошаемой насадкой (см. рис. 3.5). Включают газодувку 13 кнопкой 21 и подают воздух через опорную решетку 6 в насадочный абсорбер 1, где он взаимодействует с поверхностью насадочных тел 2 и удаляется из верхней части аппарата в атмосферу. Диапазон изменения скорости воздуха в скруббере осуществляется с помощью изменения оборотов электродвигателя 14 ЛАТРОм 22. Скорость воздуха измеряется щупом 25, подсоединенного к прибору контроля МЭС-200. Перепад давления в скруббере  $\Delta p$  измеряется дифманометром 28; высота слоя насадки  $H$  составляет 450 мм. Температура воздуха измеряется термометром 27. Выше перечисленные параметры заносятся в табл. 3.1.

#### Второй этап (орошаемая насадка).

Перед началом работы проверяют уровень воды в баке 7 с помощью водомерной трубки 8, при этом уровень воды в баке должен находиться между отметками «min» и «max». Затем приводят в действие центробежный насос 9 включателем 19 и вентилями 11, 17 устанавливают наименьший расход воды в скруббер по ротаметру 12. Вода через распределитель 4 орошает насадку 2. Далее включают газодувку 13 кнопкой 21, и воздух поступает через опорную решетку 6 в скруббер, где взаимодействует с водой на поверхности насадки. Отработанный воздух с захваченными капельками воды направляется в брызгоотделитель 3 и с помощью каплеотбойника 5 отделяется от воды и уходит в атмосферу.

При заданном расходе воды по ротаметру, плавно изменяя напряжение ручкой ЛАТРа 22, последовательно устанавливают расходы воздуха и определяют по дифманометру 28 гидравлическое сопротивление скруббера при различных расходах воздуха и заданных плотностях орошения, данные заносят в табл. 3.1.

## Экспериментальные и расчетные данные

№ опы-та	Расход воздуха $V_r, \text{ м}^3/\text{с}$	Фиктивная скорость, $\square_\phi, \text{ м/с}$	Гидравлическое сопротивление насадки $\Delta p$ при различных расходах жидкости										
			$G_{ж} = \dots, \text{ кг/с}$		$G_{ж} = \dots, \text{ кг/с}$		$G_{ж} = \dots, \text{ кг/с}$		$G_{ж} = \dots, \text{ кг/с}$		$G_{ж} = \dots, \text{ кг/с}$		
			мм вод. ст.	Па	мм вод. ст.	Па	мм вод. ст.	Па	мм вод. ст.	Па	мм вод. ст.	Па	
1		0,5											
2													
3													
...													

Температура воздуха \_\_\_\_\_ °С;

Температура воды \_\_\_\_\_ °С.

При определенных расходах воздуха и плотности орошения показания дифманометра растут без изменения напряжения, а расход воздуха уменьшается. Эта неустойчивость процесса говорит о наступлении режима эмульгирования и захлебывания колонны. Следя за поведением газа и жидкости в колонне и поддерживая постоянный расход жидкости, фиксируют показания по ротаметру, при которых наблюдается захлебывание колонны, и также заносят в табл. 3.1. После чего второй этап повторяют для других расходов воды.

**Обработка опытных данных и составление отчета.** Для построения графических зависимостей  $\lg \frac{\Delta p}{H} = f(\omega_\phi)$  рекомендуется обрабатывать опытные данные в следующем порядке: по показаниям дифференциального манометра 28 и ротаметра 12 определяют расходы воздуха и воды. Затем по опытным данным рассчитывают по уравнению (3.5) значения фиктивной скорости газа  $\omega_\phi$  с помощью прибора МЭС-200 и вычисляют соответствующие ей значения градиента давления (3.7) для сухой и орошаемой насадки.

После чего строят графики зависимости градиента давления  $\frac{\Delta p}{H}$  от фиктивной скорости газа  $\omega_\phi$  для сухой и орошаемой насадки. Далее по вычисленной фиктивной скорости газа рассчитывают значения чисел Рейнольдса по формуле (3.10) и определяют из выражений (3.11) или (3.12) значения коэффициента сопротивления  $\lambda_c$ . Полученное значение коэффициента сопротивления  $\lambda_c$  подставляют в выражение (3.9) и вычисляют гидравлическое сопротивление сухой насадки.

Для заданного объемного расхода газа  $V_r$  вычисляют массовый расход  $G_r = V_r \cdot \rho_r$  и при различных расходах жидкости  $G_{ж}$  рассчитывают по уравнению (3.15) скорость инверсии фаз

$\omega_{\phi, \text{ин}}$ . Определив отношение скоростей  $\frac{\omega_\phi}{\omega_{\phi, \text{ин}}}$ , для различных массовых расходов жидкости  $G_{ж}$ , по рис. 3.4, устанавливают величину коэффициента  $C$  в формуле (3.14), а затем рассчитывают из этой формулы значения поправочного коэффициента  $K$  для различных расходов жидкости  $G_{ж}$  при заданном расходе газа  $G_r$ .

Работа заканчивается построением графической зависимости (3.7) для сухой и орошаемой насадки.

**Лабораторная работа № 5**  
**4 часа**  
**Изучение процесса осаждения твердых частиц**  
**в жидкости**

*Цели работы*

1. Ознакомление с устройством и принципом работы установки осаждения твердых частиц в жидкости.
2. Изучение закономерностей процесса осаждения твердых частиц в жидкой среде.
3. Изучение влияния расхода исходной суспензии на эффективность работы отстойника.

*Задачи работы*

1. Изучить закономерности процесса осаждения твердых частиц в жидкой среде.
2. Определить скорость осаждения сферических частиц в жидкости.

*Обеспечивающие средства:* лабораторный стенд в ауд. 309-2.

*Задание:* для трех опытов отобрать определенный объем суспензии после установления режима. Определить скорость осаждения и размер сферической частицы.

*Требования к отчету:* итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, график – на миллиметровой бумаге, выполненный в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указываются название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вида обучения, факультета, а также приводятся цель работы, методика проведения работы, таблица 5.4 «Экспериментальные и расчетные данные процесса осаждения». После оформления экспериментальной части и обработки опытных данных пишется вывод и защищается отчет.

*Технология работы*

Добиваются постоянного уровня суспензии в баке (рекомендуемый уровень 100 мм) и в окне распределительной воронки. Устанавливают соотношения между концентрацией твердой фазы в суспензии и в осветленной жидкости, соответствующие трем различным расходам исходной суспензии. Оценивают оптимальный режим осаждения, при котором наблюдается наименьшее значение концентрации твердой фазы в осветленной жидкости ( $C_{осв}$ ). Для заданного диаметра частиц  $d$ , подлежащих удалению из суспензии, рассчитывают скорость осаждения  $\omega_{ос}$ , предварительно определив значения критериев Архимеда ( $Ar$ ) и Рейнольдса ( $Re$ ). Расчет скорости осаждения проверяют, используя зависимость  $Ly = f(Ar)$ . Для каждого опыта определяют производительность отстойника  $V_{исх}$ .

*Контрольные вопросы*

1. Какие силы действуют на осаждающуюся частицу?
2. Какие физические величины входят в число Рейнольдса для осаждающихся частиц?
3. Какие режимы осаждения известны?
4. Как определить скорость осаждения для несферических частиц?
5. С помощью какой графической зависимости можно вести приближенные расчеты  $\omega_{ос}$  или  $d$  для любого режима осаждения?
6. Как рассчитать площадь осаждения в отстойниках?

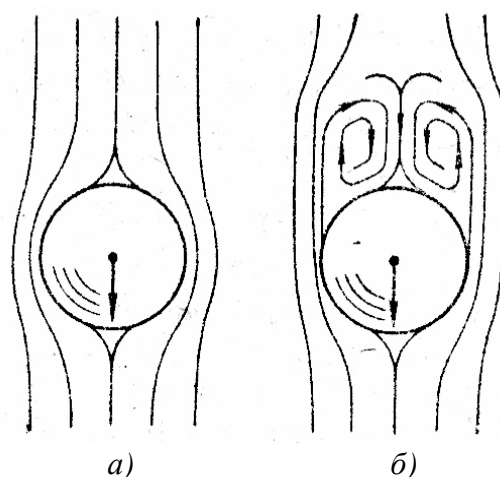
### Описание лабораторной работы

**Теоретическая часть.** Процесс разделения, при котором взвешенные в жидкости или газе твердые или жидкие частицы отделяются от сплошной фазы под действием сил тяжести, инерции, центробежных и электростатических сил называют осаждением. Осаждение, происходящее под действием силы тяжести, называют отстаиванием.

Отстаивание применяют в промышленности для сгущения суспензий или классификации по фракциям частиц твердой фазы суспензии. Основной характеристикой рассматриваемого процесса разделения суспензий является скорость осаждения, т. е. скорость относительного движения твердых частиц. Скорость осаждения взвешенных частиц зависит как от плотности, так и от степени дисперсности, причем осаждение будет протекать тем медленнее, чем меньшими размерами обладают частицы дисперсной фазы и чем меньше разность плотностей обеих фаз. Практически методом отстаивания пользуются, главным образом, для разделения грубых суспензий. Осаждение происходит по законам падения тел в среде, оказывающей сопротивление их движению. Когда сопротивление трения уравнивает действие силы тяжести, она приобретает постоянную скорость и осаждается равномерно.

При движении частицы в жидкости возникает сопротивление, величина которого зависит главным образом от режима движения, формы и поверхности движущейся частицы. Наблюдаются два принципиально различных режима движения частицы в жидкости: ламинарный и турбулентный. Ламинарный режим движения имеет место при малых размерах частиц и высокой вязкости среды, что обуславливает небольшие скорости движения частицы. В этом случае частица плавно обтекается потоком (рис. 5.1, а). Величина сопротивления

определяется в основном лишь силами трения и давления вследствие сил вязкости. Турбулентный режим движения частицы в жидкости наблюдается при больших размерах частиц и малой вязкости среды, т. е. при высоких скоростях движения частиц, когда все большую роль начинают играть силы инерции. Под действием этих сил происходит отрыв жидкости от поверхности частицы в кормовой части, что приводит к образованию беспорядочных местных завихрений за движущейся частицей (рис. 4.1, б). Сопротивление движению в



**Рис. 4.1.** Движение твердого тела в жидкости:  
а) ламинарный режим; б) турбулентный

данном случае, как и при движении жидкости по трубам, будет определяться в основном лишь силами инерции, а влиянием вязкостных сил можно пренебречь.

Характер режима движения осаждения частиц в среде устанавливается модифицированными значениями чисел Рейнольдса ( $Re$ ) и Архимеда ( $Ar$ ). Значение чисел  $Re$  и  $Ar$  рассчитывают по формулам

$$Re = \frac{\omega_{oc} \cdot d \cdot \rho_{cp}}{\mu_{cp}}; \quad (4.1)$$

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_{cp} \cdot g \cdot (\rho - \rho_{cp})}{\mu_{cp}^2}, \quad (4.2)$$

где  $\omega_{oc}$  – скорость осаждения частицы, м/с;  $d$  – диаметр частицы, м;  $\rho_{cp}$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{cp}$  – вязкость среды, Па · с;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность материала частиц, кг/м<sup>3</sup>.

При ламинарном режиме  $Ar < 36$

$$Re = Ar/18; \quad (4.3)$$

при переходном режиме  $36 < Ar < 83\,000$

$$Re = 0,152Ar^{0,714}; \quad (4.4)$$

при развитом турбулентном осаждении  $Ar > 83\,000$

$$Re = 1,74 \cdot Ar^{0,5}. \quad (4.5)$$

При движении частицы в жидкости, в результате взаимодействия ее со средой действуют нормальные и касательные напряжения, обуславливающие силы гидродинамического давления и силы трения. Векторная сумма действующих на поверхность частицы сил равна силе сопротивления среды, которая имеет направление, противоположное вектору скорости движения частицы. Сила сопротивления среды на сферическую частицу определяется по закону сопротивления Ньютона:

$$T = \zeta \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho \cdot \omega_{oc}^2}{2}, \quad (4.6)$$

где  $\zeta$  – коэффициент сопротивления среды,  $\zeta = f(Re)$ ,  $\omega_{oc}$  – скорость осаждения, м/с.

В области ламинарного режима движения частицы действует закон сопротивления Стокса приблизительно при  $Re < 2$ :

$$\zeta = \frac{24}{Re}; \quad (4.7)$$

в переходной области зависимость Аллена при  $Re = 2 - 500$ :

$$\zeta = \frac{18,5}{Re^{0,6}}; \quad (4.8)$$

в турбулентной области – закон сопротивления Ньютона при  $2 \cdot 10^5 > Re > 500$ :

$$\zeta = 0,44 = \text{const.} \quad (4.9)$$

При осаждении частицы в жидкости под действием собственного веса в начальный момент времени движение ее происходит с изменяющейся скоростью. Однако с увеличением скорости сопротивление движению частицы растет и соответственно уменьшается ее ускорение. Через короткий промежуток времени наступает динамическое равновесие. При этом сила кажущегося веса частицы в жидкости, равного разности между силой действительного веса и силой Архимеда, под действием которой она движется, становится равной силе сопротивления среды. Ускорение движения практически исчезает, и частица начинает двигаться равномерно с постоянной скоростью, направленной вниз (скорость осаждения), если  $\rho > \rho_{\text{ср}}$ .

Условие динамического равновесия сил, действующих на частицу, т. е. условие равномерного движения ее в жидкости, записывается в виде

$$G - A = T, \quad (4.10)$$

где  $G$  – вес частицы;  $A$  – выталкивающая Архимедова сила;  $T$  – сила сопротивления среды. Подъемная Архимедова сила равна

$$A = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot g. \quad (4.11)$$

Вес частицы определяется по уравнению

$$G = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \rho \cdot g. \quad (4.12)$$

С учетом этих формул условие динамического равновесия принимает вид:

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot (\rho - \rho_{\text{ср}}) \cdot g = \zeta \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho_{\text{ср}} \cdot \omega_{\text{ос}}^2}{2}, \quad (4.13)$$

откуда

$$\omega_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot d \cdot (\rho - \rho_{\text{ср}})}{\zeta \cdot \rho_{\text{ср}}}}. \quad (4.14)$$

Значение коэффициента сопротивления  $\zeta$  может быть определено по одной из зависимостей (4.7)–(4.9). При подстановке в уравнение (4.14) выражения (4.7) для ламинарной области получаем формулу

$$\omega_{\text{ос}} = \frac{d^2 \cdot g \cdot (\rho - \rho_{\text{ср}})}{18 \cdot \mu_{\text{ср}}}. \quad (4.15)$$

В случае переходной области после подстановки в уравнение (4.14) выражения (4.8) и некоторых преобразований имеем

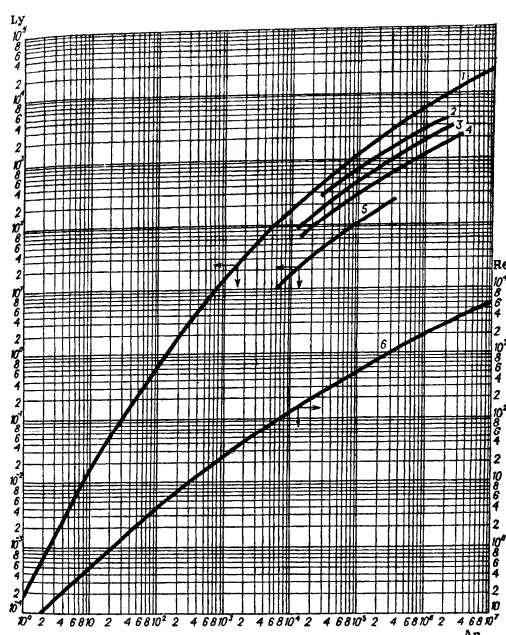
$$\omega_{\text{ос}} \approx 0,78 \cdot \frac{d^{0,43} \cdot (\rho - \rho_{\text{ср}})^{0,715}}{\rho_{\text{ср}}^{0,285} \cdot \mu_{\text{ср}}^{0,43}}. \quad (4.16)$$

Аналогично для турбулентной области, согласно выражению (4.9), подставив  $\zeta = 0,44$  в уравнение (4.14), находим

$$\omega_{oc} \approx 5,46 \cdot \sqrt{\frac{d \cdot (\rho - \rho_{cp})}{\rho_{cp}}}. \quad (4.17)$$

Расчеты  $\omega_{oc}$  при известном диаметре частиц  $d$  для любого режима осаждения приближенно можно вести также с помощью графических зависимостей  $Re = f(Ar)$  или  $Ly = f(Ar)$ , экспериментально установленных для частиц различной формы и приведенных на рис. 4.2, где критерий Лященко записывается в виде

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{\omega_{oc}^3 \cdot \rho_{cp}^2}{\mu_{cp} \cdot (\rho - \rho_{cp}) \cdot g}. \quad (4.18)$$



**Рис. 4.2.** Зависимость критериев  $Re$  и  $Ly$  от критерия  $Ar$  для осаждения одиночной частицы в неподвижной среде:  
1 и 6 – шарообразные частицы; 2 – округленные; 3 – угловатые;  
4 – продолговатые; 5 – пластинчатые

Расчитанная графически скорость осаждения хорошо совпадает с опытными данными для свободно осаждающихся частиц в неограниченном пространстве. Для частиц неправильной формы скорость осаждения обычно меньше, и поэтому скорость, рассчитанную для сферической частицы, необходимо умножить (при отсутствии соответствующих графиков) на поправочный коэффициент формы  $\psi$  (табл. 4.1):

$$\omega_{oc} = \psi \cdot \omega_{oc.c\phi} \quad (4.19)$$

где  $\omega_{oc.c\phi}$  – скорость осаждения частиц сферической формы, м/с.

Таблица 4.1.

Значения фактора (коэффициента) формы  $\psi$  для некоторых геометрических тел ( $h$  – высота;  $r$  – радиус)

Форма частиц	$\psi$	Форма частиц	$\psi$
Куб	0,806	Цилиндр ( $h = 10r$ )	0,691
Цилиндр ( $h = 3r$ )	0,860	Цилиндр ( $h = 20r$ )	0,580

Состав суспензии, т. е. смеси твердого материала (Т) и жидкости (Ж) характеризуют относительной массовой концентрацией  $C = \left( \frac{\text{кг твердого вещества}}{\text{кг жидкости}} \right)$ . Обозначив концентрации твердого материала в исходной суспензии, в осветленной жидкости и в осадке соответственно  $C_{исх}$ ,  $C_{осв}$ ,  $C_{ос}$ , а объемные производительности по жидкости в перечисленных потоках как  $V_{исх}$ ,  $V_{осв}$ ,  $V_{ос}$ , запишем уравнение материальных балансов при непрерывном процессе разделения суспензии на осветленную жидкость и осадок для единицы времени:

- по массовым жидкостным потокам:

$$\rho \cdot V_{исх} - \rho \cdot V_{осв} - \rho \cdot V_{ос} = 0. \quad (4.20)$$

После сокращения на  $\rho$  получим

$$V_{исх} = V_{осв} + V_{ос}; \quad (4.21)$$

- по потокам твердого материала:

$$\rho \cdot V_{исх} \cdot C_{исх} - \rho \cdot V_{осв} \cdot C_{осв} - \rho \cdot V_{ос} \cdot C_{ос} = 0, \quad (4.22)$$

откуда после сокращений на  $\rho$  и исключения величины  $V_{ос}$  имеем

$$V_{исх} \cdot C_{исх} = V_{осв} \cdot C_{осв} + (V_{исх} - V_{осв}) \cdot C_{ос}. \quad (4.23)$$

Отсюда

$$V_{осв} = V_{исх} \cdot \frac{C_{ос} - C_{исх}}{C_{ос} - C_{осв}}. \quad (4.24)$$

При рациональном проведении осаждения, когда концентрация твердой фазы в осветленной жидкости отсутствует, т. е.  $C_{осв} \rightarrow 0$ , выражение упрощается:

$$V_{осв} = V_{исх} \cdot \left( 1 - \frac{C_{исх}}{C_{ос}} \right). \quad (4.25)$$

Рабочая скорость потока поступающей суспензии  $\omega_{раб}$  может быть выбрана различной, но не любой, ее значение не может превышать  $\omega_{ос}$ , т. е.  $\omega_{раб} \leq \omega_{ос}$ , иначе жидкостной поток подхватит и унесет твердые частицы, так что полного осветления не будет и должно выполняться условие  $V_{исх} \leq F \cdot \omega_{раб}$  или

$$F \geq \frac{V_{исх}}{\omega_{раб}} = \frac{V_{осв}}{\omega_{раб}} \cdot \left( 1 - \frac{C_{исх}}{C_{ос}} \right), \quad (4.26)$$

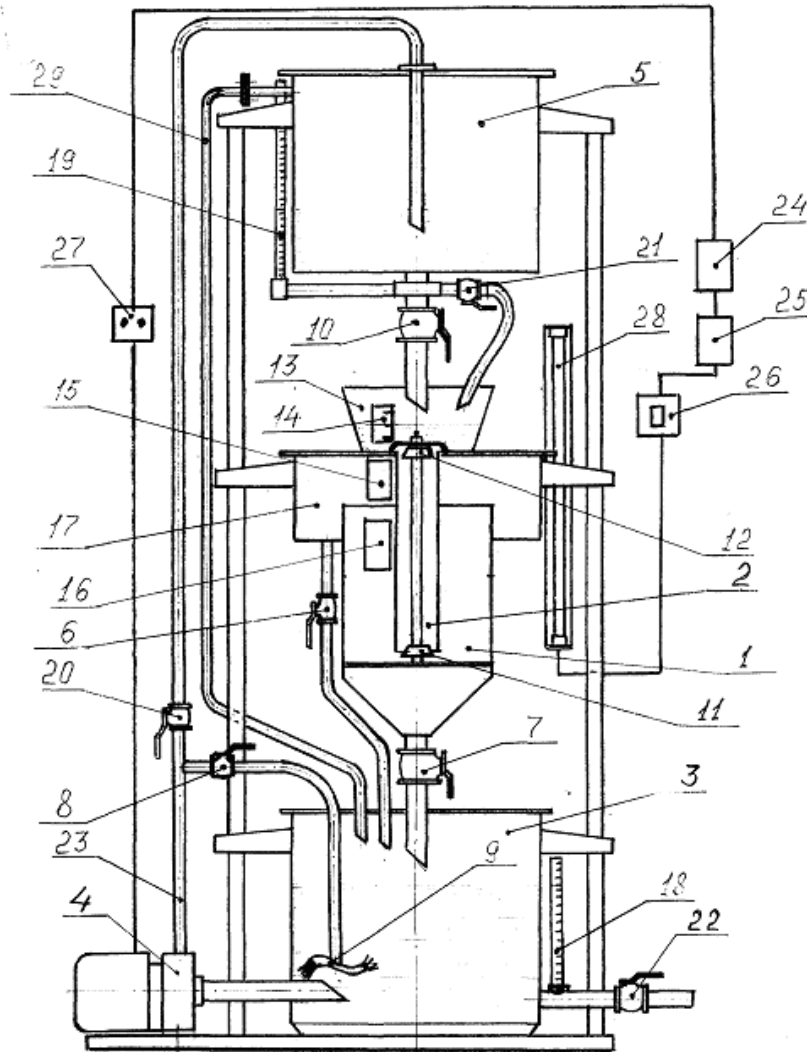
где  $F$  – площадь поперечного сечения в зоне осветленной жидкости,  $\text{м}^2$ ;  $\omega_{раб}$  – рабочая скорость,  $\text{м/с}$ .

Из полученных соотношений следует, что для вертикального отстойника непрерывного действия  $\omega_{ос}$  не зависит от высоты отстойника, а определяется его поперечным сечением (площадью осаждения)  $F$ .

**Описание установки.** Экспериментальная установка (рис. 4.3) работает в замкнутом режиме при постоянной концентрации твердой фазы, воспроизводимой в каждом последующем опыте. Основным аппаратом для изучения процесса осаждения твердых частиц в жидкости является отстойник 1 вертикального типа с центральной трубой 2 для ввода суспензии в отстойник. Суспензия из нижнего бака 3 центробежным насосом 4 по трубопроводу 23 подается в расходный бак 5 и самотеком через кран 10 поступает в цилиндрическую трубу и заполняет отстойник. Поступив в отстойник, суспензия начинает расслаиваться под действием силы тяжести на осадок и осветленную фазу. Осадок перемещается вниз и, скользя по коническому днущу отстойника, удаляется через кран 7 в бак 3. Осветленная фаза собирается в кольцевом сборнике 17, откуда через кран 6 отводится в бак 3, где обе фазы (твердая и осветленная) смешиваются. Смешивание фаз в баке осуществляется с помощью насадка 9 и крана 8, установленных на линии байпаса исходной суспензии. Регулирование уровня суспензии в баке 5 производится пробковыми кранами 6, 8, 10 и 20. Конусные регуляторы 11 и 12 служат для наладки режима отстаивания. Распределительная воронка 13 позволяет установить ряд уровней суспензии через смотровое окно 14. Смотровые окна 14, 15 и 16 расположены на противоположных стенках отстойника и освещены светильником 28. Мерные трубки 18 и 19 позволяют контролировать уровни суспензии в баках. Трубопровод 29 служит дренажной линией и предупреждает переполнение бака 5.

**Методика проведения работы.** Перед началом работы готовят установку к пуску. В режиме подготовки к работе водная суспензия кварца (плотность твердых частиц –  $2600 \text{ кг/м}^3$ ) с концентрацией твердой фазы  $0,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  и размером шарообразных частиц 200 - 250 мкм многократно перекачивается по контуру: насос 4 – линия 23 – кран 8 – насадок 9 – бак 3 – насос 4; при этом пробковый кран 20 должен быть закрыт. После чего при открытом кране 8 и работающем насосе 4 открывают пробковый кран 20 и добиваются установления рекомендуемого уровня суспензии в баке 5 (показание мерного стекла 19 – не менее 100 мм). Затем открывают пробковый кран 10 и добиваются с помощью кранов 8, 10 и 20 постоянства первого из трех уровней суспензии, отмеченных рисками в окне 14, после чего открывают кран 7.

Опыты по осветлению исходной суспензии повторяют для трех режимов, соответствующих трем различным расходам поступления исходной суспензии в цилиндрическую трубу 2. Для установления соотношения между концентрацией твердых частиц кварца в исходной суспензии и в осветленной жидкости их отбирают после крана 10 (исходная суспензия) и крана 6 (осветленная жидкость). Концентрации твердых частиц в исходной суспензии и осветленной жидкости определяют весовым методом после фильтрования определенного количества пробы (300 мл) на бумажных фильтрах. Оптимальный режим осаждения будет соответствовать опыту, при котором наблюдалось наименьшее значение концентрации твердой фазы в осветленной жидкости ( $C_{осв}$ ).



**Рис. 4.3.** Схема установки осаждения твердых частиц в жидкости:

- 1 – отстойник; 2 – цилиндр (труба – стакан) для ввода суспензии; 3 – нижний бак;  
 4 – центробежный насос; 5 – бак расходный; 6, 7, 8, 10, 20, 21, 22 – краны пробковые;  
 9 – насадка; 11, 12 – конусные регуляторы; 13 – распределитель исходной суспензии;  
 14, 15, 16 – смотровые окна; 17 – кольцевой сборник; 18, 19 – мерные стекла;  
 23 – линия нагнетания; 24 – автоматический выключатель; 25 – магнитный пускатель;  
 26 – выключатель светильника; 27 – розетка; 28 – светильник; 29 – дренажная линия

**Обработка опытных данных и составление отчета.** Для заданного диаметра частиц  $d$ , подлежащих удалению из суспензии рассчитывают скорость осаждения  $\omega_{ос}$  по уравнению (4.1), предварительно определив критерий  $Ar$  по уравнению (4.2) и вычислив критерий  $Re$  по уравнению Тодеса:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}. \quad (4.27)$$

Расчет скорости осаждения необходимо продублировать, используя зависимость  $Lu = f(Ar)$ , для чего используя значение  $Ar$ , вычисленное по уравнению (4.2) и по графику, найдя критерий  $Lu$  из уравнения (4.18) рассчитывают скорость осаждения.

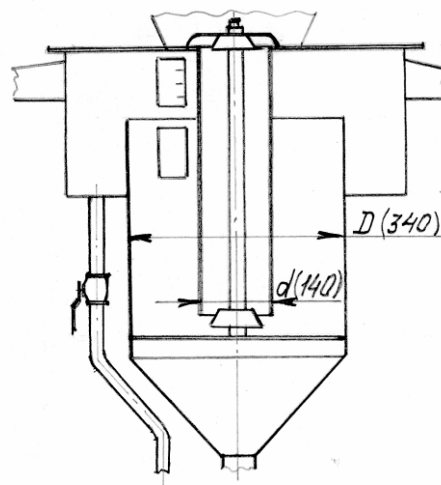
Зная размеры отстойника, т. е. диаметр  $D$  и диаметр цилиндрической трубы  $d$  (рис. 4.4), определяют для каждого из опытов производительность отстойника  $V_{исх}$  по выражению

$$V_{исх} = 0,785 \cdot (D^2 - d^2) \cdot 0,5 \cdot \omega_{ос}. \quad (4.28)$$

Определение концентрации твердых частиц в исходной суспензии и осветленной жидкости производят путем отбора проб в мерные цилиндры в двух точках (рис. 4.3): после крана  $10$  (исходная суспензия) и крана  $б$  (осветленная жидкость).

Концентрации определяют весовым методом после фильтрования определенного количества пробы на бумажных фильтрах. Предварительно бумажные фильтры необходимо увлажнить и взвесить на аналитических весах. Затем определенное количество пробы отфильтровывают на воронке Бюхнера. Полученный осадок вместе с фильтровальной бумагой снова взвесить и определить концентрацию  $C$ , кг/м<sup>3</sup>, по выражению

$$C = \frac{m_2 - m_1}{W}, \quad (4.29)$$



**Рис. 4.4.** Изображение отстойника вертикального типа с цилиндрической трубой к определению его производительности

где  $m_1$  – масса увлажненного бумажного фильтра, кг;  $m_2$  – масса бумажного фильтра с осадком, кг;  $W$  – объем суспензии, м<sup>3</sup>.

Сравнивая концентрации твердой фазы в осветленных жидкостях для трех режимов, оценивают оптимальный режим осаждения, соответствующий поступлению исходной суспензии в отстойник. Значения расходов в осадительном аппарате для трех режимов (опытов) представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Значения расходов суспензии в осадительном аппарате

№ опыта	Расход суспензии, $V \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /с
1	0,31
2	0,34
3	0,39

Результаты экспериментальных и расчетных данных сводят в табл. 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3

Исходные и расчетные данные процесса осаждения

№ опыта	Диаметр частиц, $d$ , мкм	Плотность твердых частиц, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность среды, $\rho_{\text{ср}}$ , кг/м <sup>3</sup>	Вязкость среды, $\mu_{\text{ср}}$ , Па · с	Число Архимеда, $Ar$	Число Рейнольдса, $Re$	Скорость осаждения $\omega_{\text{ос}}$ , м/с
1							
2							
3							

Таблица 4.4

Экспериментальные и расчетные данные процесса осаждения

№ опыта	Расход суспензии, $V_{\text{исх}}$ , м <sup>3</sup> /с	Число Архимеда, $Ar$	Число Лященко, $Lu$	Скорость осаждения, $\omega_{\text{ос}}$ , м/с	Масса фильтра, $m_1$ , кг	Масса фильтра с осадком, $m_2$ , кг	Объем суспензии, $W$ , м <sup>3</sup>	Концентрация твердой фазы в исходной суспензии, $C_{\text{исх}}$ , кг/м <sup>3</sup>	Концентрация твердой фазы в осветленной жидкости, $C_{\text{осв}}$ , кг/м <sup>3</sup>
1									
2									
3									

## Лабораторная работа № 5

### Исследование процессов перемешивания в жидкой среде

4 часа

**Цель работы:** изучить закономерности механического перемешивания.

**Задачи работы:**

1. Установить для двух несмешивающихся жидкостей (масло – вода) зависимость эффективности перемешивания от заданного типа мешалки и числа оборотов.
2. Установить вид зависимости  $\lg K_N = f(\lg Re_u)$ , определить константы перемешивания  $C$ ,  $m$  для данного типа мешалки в указанном диапазоне чисел оборотов мешалки (4 – 5 значений).
3. Определить мощность на перемешивание и для указанных чисел оборотов мешалки установить коэффициент полезного действия.

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд включает – реактор и мешалку с приводом; ЛАТР для изменения частоты вращения мешалки. Контрольно-измерительные приборы – тахометр, для определения частоты вращения мешалки; тахогенератор, амперметр переменного тока; вольтметр переменного напряжения, автотрансформатор.

**Задание:**

1. Установить вид зависимости  $\lg K_N = f(\lg Re_u)$ , определить константы перемешивания  $C$ ,  $m$  для данного типа мешалки в указанном диапазоне чисел оборотов мешалки (4-5 значений) – с минимальным интервалом времени отбора проб.
2. Установить зависимость эффективности перемешивания от заданного типа мешалки и числа оборотов.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указывается название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вида обучения, факультета, а также: цель работы, схема установки, методика проведения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, подробные расчеты значений одного из режимов; результаты представить в виде таблицы 5.1. «Опытные и расчетные данные при определении эффективности перемешивания» и таблицы 5.2. «Опытные и расчетные данные при определении потребляемой мощности» для каждого типа мешалки; построить для каждого типа мешалки графики зависимости  $\lg K_N = f(\lg Re_u)$  и определить коэффициенты  $C$  и  $m$ . Написать вывод по работе и защитить отчет.

**Технология работы:** После установившегося режима перемешивания (3–5 мин) с минимальным интервалом времени необходимо отобрать пробы со всех уровней в пронумерованные мерные цилиндры и определить высоты (или объемы) слоев масла и воды в каждой пробе. Далее установить последующие числа оборотов мешалки в порядке их увеличения и повторить опыт 5 раз. Установить вид зависимости  $\lg K_N = f(\lg Re_u)$ , определить константы перемешивания  $C$ ,  $m$  для двух типов мешалок. Установить зависимость эффективности перемешивания от заданного типа мешалки и числа оборотов.

**Контрольные вопросы**

1. Промышленное значение и способы перемешивания жидких сред.
2. Особенности течения жидкости при перемешивании вращающимися механическими мешалками.
3. Понятие об интенсивности и эффективности перемешивания.

4. Как зависят физические свойства гетерогенных систем от свойств исходных компонентов?
5. Что влияет на мощность, потребляемую мешалкой?
6. Физический смысл центробежных критериев Рейнольдса и Фруда.
7. Физический смысл критерия мощности.
8. Вид зависимости критерия мощности от центробежного критерия Рейнольдса и определение констант перемешивания.
9. Каким прибором определяют частоту вращения мешалки и на каком принципе он основан?
10. Какое назначение имеют перегородки в аппарате?
11. Методика определения мощности электродвигателя.

***Библиографический список*** приведен в конце сборника.

## Описание лабораторной работы

### Теоретическая часть

Перемешивание в гетерогенных (неоднородных) системах *жидкость–газ*, *жидкость–жидкость*, *жидкость–твердое тело* применяется в промышленности для приготовления газожидкостных систем, эмульсий, суспензий, растворов, а также для интенсификации ряда массообменных, тепловых и химических процессов.

Перемешивание заключается в многократном перемещении частиц текучей среды относительно друг друга, происходящем в объеме аппарата под действием импульса, передаваемого среде мешалкой, струей жидкости или газа.

В зависимости от целей и условий проведения процесса применяют аппараты с перемешивающими устройствами различных конструкций. Наиболее распространены в настоящее время аппараты с вращающимися механическими мешалками разных типов. При перемешивании такими мешалками возникает сложное трехмерное течение жидкости. Первичным в этом течении является тангенциальное движение, которое в пространстве, ограниченном дном, стенками аппарата и свободной поверхностью жидкости вызывает радиальные и аксиальные потоки.

Поскольку аналитического описания поля скоростей в аппаратах с мешалками до настоящего времени получить не удалось, то их характеризуют технологической интенсивностью и эффективностью перемешивания.

Интенсивностью перемешивания ( $I$ ) называют возможность достижения некоторого заданного, строго определенного технологического результата за определенное время ( $\tau$ )

$$I_{n=const} = f(n). \quad (5.1)$$

При одинаковой частоте вращения ( $n$ ) действие мешалки будет тем более интенсивным, чем меньше время перемешивания. Если требуемое качество перемешивания может быть обеспечено лишь при частоте вращения, не меньше некоторой определенной величины, то интенсивность будет выражаться

$$I_{\tau=const} = f(n). \quad (5.2)$$

Следовательно, при одинаковом времени достижения заданного технологического результата, действие мешалки будет тем более интенсивным, чем с меньшей частотой она вращается.

Эффективностью перемешивания ( $E$ ) называется возможность достижения заданного технологического результата при затрате определенной работы ( $N\tau$ )

$$E = \Psi(N\tau), \quad (5.3)$$

где  $N$  – мощность, потребляемая мешалкой.

Очевидно, что действие мешалки тем более эффективно, чем меньше работы затрачивается на достижение требуемого технологического результата.

Для определения эффективности перемешивания двух взаимно нерастворимых жидкостей, например, масло–вода, сравнивают содержание масла в пробах, взятых в различных точках аппарата, со средним (расчетным) его содержанием в воде. При этом сравнение обычно ведется по компоненту меньшей концентрации.

В качестве характеристики равномерности распределения фаз в жидкости может быть использована локальная степень перемешивания  $S$ , определяемая из следующих уравнений:

$$S = \frac{\bar{x}}{\bar{x}_{cp}} \text{ при } \bar{x} \leq \bar{x}_{cp}, \quad (5.4)$$

$$S = 1 - \frac{\bar{x} - \bar{x}_{cp}}{x_{cp}} \text{ при } \bar{x}_{cp} \leq \bar{x} \leq 2\bar{x}_{cp}, \quad (5.5)$$

где  $\bar{x}, \bar{x}_{cp}$  – содержание масла в пробе и среднее содержание масла в воде в объеме реактора (массовые доли).

Среднее арифметическое всех локальных значений степени перемешивания, называемое индексом перемешивания  $Y$ , может служить оценкой равномерности распределения фаз в дисперсных системах

$$Y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S, \quad (5.6)$$

где  $k$  – число проб.

Как следует из приведенных выражений, в хорошо перемешанных системах величины  $S$  и  $Y$  стремятся к 1.

Для гетерогенных систем, например эмульсий, содержание дисперсной фазы можно выразить в массовых  $\bar{x}_{cp}$  долях

$$\bar{x}_{cp} = \frac{\rho_m V_m}{\rho_v V_v + \rho_m V_m}, \quad (5.7)$$

где  $V_m, V_v$  и  $\rho_m, \rho_v$  – соответственно объемы и плотности дисперсной фазы (масла) и дисперсной фазы (воды).

Если эмульсия *масло–вода* содержится в цилиндрическом аппарате, то содержание масла можно узнать после расслоения системы по высотам слоев масла  $h_m$  и воды  $h_v$ .

$$\bar{x}_{cp} = \frac{c_m h_m}{c_v h_v + c_m h_m}. \quad (5.8)$$

Локальное содержание масла в пробах, отбираемых в градуированные сосуды (мензурки), может быть определено как по формуле (5.7), так и по формуле (5.8) с заменой обозначения  $\bar{x}_{cp}$  на  $\bar{x}$ .

Распределение одной фазы в другой при перемешивании приводит к существенному изменению свойств получаемой гетерогенной системы. В частности, плотность  $\rho$  и вязкость  $\mu$  эмульсий зависят от концентрации дисперсной фазы, плотности и вязкости исходных жидкостей

$$\rho = \rho_m \bar{x}_{cp} + \rho_B (1 - \bar{x}_{cp}), \quad (5.9)$$

$$\mu = \mu_B \left( 1 + 2,5 x_{cp} \frac{\mu_m + 0,4 \mu_B}{\mu_m + \mu_B} \right) \text{ при } \bar{x}_{cp} \leq 0,3, \quad (5.10)$$

$$\mu = \frac{\mu_B}{1 - \bar{x}_{cp}} \left( 1 + \frac{A \bar{x}_{cp} \mu_m}{\mu_m + \mu_B} \right) \text{ при } \bar{x}_{cp} \geq 0,3, \quad (5.11)$$

где  $\mu_B, \mu_m$  – вязкости сплошной и дисперсной фаз;  $A$  – коэффициент ( $A = 6$  при  $\mu_B > \mu_m$ ,  $A = -1,5$  при  $\mu_B < \mu_m$ ).

Мощность  $N$ , потребляемая мешалкой  $N$ , тратится на преодоление сил трения, на образование и срыв вихрей с лопастей мешалки и отражательных перегородок, часто устанавливаемых внутри аппарата для повышения эффективности перемешивания. Эта мощность зависит от свойств обрабатываемой среды, основных геометрических размеров рабочих органов мешалки и аппаратов, скорости вращения мешалки, сил тяжести и в общем виде записывается как

$$N = f(\rho, \mu, d, D, H, b_n, h, n, g), \quad (5.12)$$

где  $d$  – диаметр мешалки, м;  $D$  – диаметр аппарата, м;  $H$  – высота слоя жидкости в аппарате, м;  $b_n$  – ширина отражательных перегородок, м;  $h$  – высота расположения мешалки над дном аппарата, м;  $n$  – число оборотов мешалки,  $c^{-1}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ .

Зависимость (5.12) методом анализа размерностей ( $\pi$ -теорема Бэкингема) можно представить в критериальном виде

$$\frac{N}{\rho n^3 d^5} = f\left(\frac{\rho n d^2}{\mu}, \frac{n^2 d}{g}, \frac{D}{d}, \frac{H}{d}, \frac{b_n}{D}, \frac{h}{H}\right), \quad (5.13)$$

где  $\frac{N}{\rho n^3 d^5} = K_N$  – критерий мощности;  $\frac{\rho n d^2}{\mu} = Re$  – критерий Рейнольдса

(центробежный);  $\frac{n^2 d}{g} = Fr_{\omega}$  – критерий Фруда (центробежный);  $\frac{D}{d} = \Gamma_D$ ,  $\frac{H}{d} = \Gamma_H$ ,

$\frac{b_n}{D} = \Gamma_B$ ,  $\frac{h}{H} = \Gamma_h$  – симплексы геометрического подобия.

Влияние силы тяжести сказывается на образовании воронки и волн на свободной поверхности жидкости. В тех случаях, когда на поверхности перемешиваемой жидкости не образуется воронка или при наличии отражательных перегородок, влиянием сил тяжести

можно пренебречь и исключить критерий Фруда из уравнения (5.13). Для геометрически подобных аппаратов зависимость (5.13) может быть записана в следующей форме

$$K_N = C Re_u^m, \quad (5.14)$$

где  $C$ ,  $m$  – постоянные, зависящие от типа мешалки и соотношений геометрических размеров, а также от режима движения перемешиваемой жидкости (критерий  $Re_u$ ).

Зависимость (5.14) определяется по опытными данным и обычно изображается графически в логарифмических координатах, где эта зависимость представляется в виде прямых линий. Количественно зависимости между  $\lg K_N$  и  $\lg Re_u$  отличаются для различных типов мешалок, но имеют четыре характерных области (рис. 5.1).

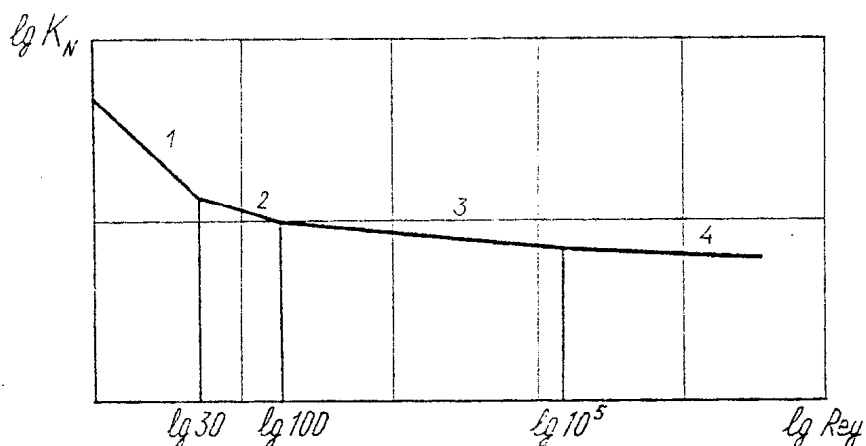


Рис. 5.1. Зависимость коэффициента мощности от режима движения перемешиваемой жидкости:

- 1 – область ламинарного режима (угловой коэффициент для всех типов мешалок практически одинаков,  $m = 1$ );
- 2 – переходная область;
- 3 – область турбулентного режима;
- 4 – автомодельная область, где критерий мощности не зависит или мало зависит от  $Re_u$  т. к. силы инерции значительно превосходят силы трения.

Как видно из графика, значения констант  $C$ ,  $m$  для одной и той же мешалки при различных режимах ее работы не одинаковы.

Рассмотренные зависимости, полученные из опытных данных, позволяют определить рабочую мощность мешалки  $N$ .

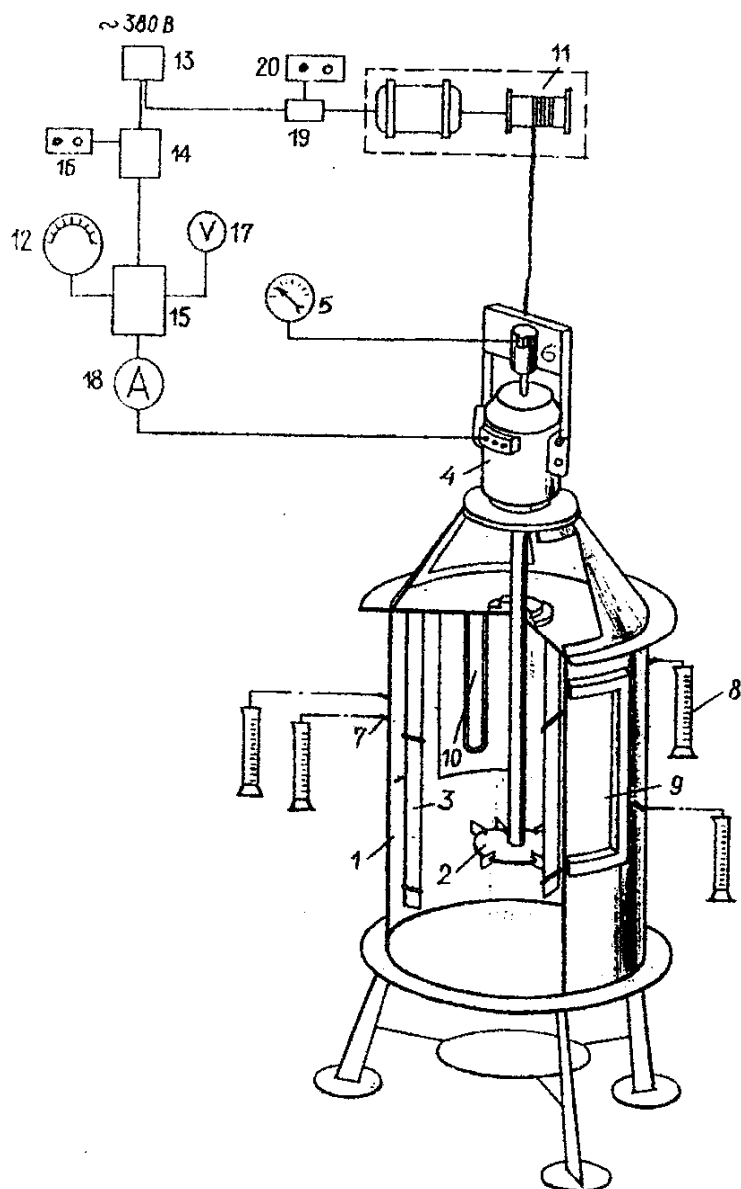


Рис. 5.2. Схема установки:

1 – реактор; 2 – мешалка; 3 – отражательная перегородка; 4 – электродвигатель постоянного тока; 5 – тахометр; 6 – тахогенератор; 7 – пробоотборник; 8 – мерный цилиндр; 9 – смотровое окно; 10 – лампа подсвечивания; 11 – грузоподъемный механизм; 12 – автотрансформатор; 13 – автоматический выключатель; 14, 19 – магнитный пускатель; 15 – выпрямитель; 16, 20 – кнопки управления; 17 – вольтметр; 18 – амперметр

## Описание установки

Установка для исследования процесса перемешивания приведена на рис. 5.2 и состоит из реактора 1 цилиндрической формы с внутренним диаметром  $D = 450$  мм и мешалки 2. Внутри реактора размещены отражательные перегородки 3, которые устанавливаются для быстроходных мешалок, типа пропеллерной и турбинной во избежание образования воронки. Мешалку в действие приводит электродвигатель постоянного тока 4 мощностью 0,25 кВт. Измерение числа оборотов мешалки осуществляется с помощью тахометра 5. В реакторе находятся две нерастворимые друг в друге жидкости (*масло–вода*). Для отбора проб эмульсии, получаемой в процессе перемешивания, на разных уровнях установлены четыре пробоотборника 7, соединенные с мерными цилиндрами 8. С целью визуального наблюдения за характером перемешивания реактор снабжен смотровыми окнами 9, на одном из которых размещено устройство с лампой подсвечивания 10. Для подъема и замены перемешивающего устройства (мешалки), установления отражательных перегородок служит грузоподъемный механизм 11.

Блок контроля и управления электродвигателем постоянного тока для поддержания заданной частоты вращения мешалки состоит из автотрансформатора (ЛАТРа) 12 питаемого от сети переменного тока, автоматического выключателя 13, магнитного пускателя 14, выпрямителя 15 и кнопок управления 16. Для определения мощности потребляемой электродвигателем, установлены вольтметр 17 и амперметр 18.

Управление работой грузоподъемного механизма осуществляется с помощью магнитного пускателя 19 и кнопок управления 20.

## Методика проведения работы

Испытания начинают с первоначального замера высоты слоев жидкостей (масла и воды) в реакторе 1, которые заносят в таблицу 5.1. После чего устанавливают заданную мешалку, предварительно выполнив соответствующие замеры мешалки (диаметр  $d$  и ширину лопастей  $b$ ). Эскиз мешалки с размерами приводят в отчете. Если установлена лопастная мешалка, которая относится к тихоходным, то отражательные перегородки не устанавливают. Затем включают лампу подсвечивания 10, автоматический выключатель 13, кнопку управления 16 и с помощью ручки ЛАТРа 12 плавно выводят мешалку на заданный режим перемешивания (частота вращения мешалки задается преподавателем). Число оборотов мешалки снимают с цифрового табло тахометра 5.

Время перемешивания определяется достижением установившегося режима движения и составляет 3–5 мин (для всех опытов время перемешивания должно быть примерно одинаковым).

Промывают пробоотборники 7 путем слива 10–20 мл эмульсии в мерные цилиндры 8. Промывные объемы жидкости переливают в вспомогательную емкость с целью возвращения обратно в реактор. С минимальным интервалом времени отбирают пробы со всех уровней в пронумерованные мерные цилиндры, не допуская их переполнения. Отобрав пробы, останавливают мешалку. После отстаивания эмульсии в мерных цилиндрах определяют высоты (или объемы) слоев масла и воды в каждой пробе и сливают их в реактор, а мерные цилиндры насухо протирают.

Полученные результаты заносят в таблицу 5.1.

Далее устанавливают последующие числа оборотов мешалки в порядке их увеличения и повторяют опыт. Записав результаты измерений в отчетную таблицу, проводят в той же последовательности измерения на другом типе мешалки (по заданию преподавателя). При этом мешалка пропеллерная или открытая турбинная может работать в аппарате без

перегородок и с перегородками. Оба эти варианта должны быть экспериментально проверены.

### Обработка опытных данных и составление отчета

По экспериментальным данным для каждого типа мешалки зная  $\bar{X}_{cp}$  высоту слоев жидкостей в реакторе, по формуле (5.8) определяют среднее содержание масла  $\bar{X}_{cp}$ .

Локальное содержание масла в пробах рассчитывают по формулам (5.7) или (5.8), а локальную степень перемешивания по формулам (5.4), (5.5).

Индекс перемешивания для заданных чисел оборотов вычисляется по формуле (5.6). По результатам вычислений для каждого типа мешалки строят график зависимости  $Y = f(n)$ . По формулам (5.9), (5.10) или (5.11) определяют плотность и вязкость перемешиваемой среды. Необходимые при этом физические свойства используемого в работе масла и воды берутся по справочнику.

Для определения мощности на перемешивание по формуле  $Re_u = \frac{nd^2\rho}{\mu}$  и по графику  $K_N = f(Re_u)$ , взятому из справочника для данного типа мешалки, находят критерий мощности  $K_N$ , а из выражения  $K_N = \frac{N}{n^3 d^5 \rho}$  – расход мощности на перемешивание. Зная силу тока  $I$  и напряжение  $U$ , определяют потребляемую электродвигателем мощность

$$N_{\partial в} = IU \quad (5.15)$$

и КПД

$$\eta = \frac{N}{N_{\partial в}}. \quad (5.16)$$

Используя критериальную зависимость (5.14), по рассчитанным значениям  $K_N$  и  $Re_u$  строят график зависимости  $\lg K_N = f(\lg Re_u)$ . Логарифмируя уравнение (5.14), получаем

$$\lg K_N = \lg C + m \lg Re_u. \quad (5.17)$$

Это уравнение прямой линии в логарифмических координатах, где по оси абсцисс отложены значения  $\lg Re_u$ , а по оси ординат  $\lg K_N$ . В результате построения логарифмической зависимости определяют коэффициенты  $C$  и  $m$ , где постоянная  $m$  определяется тангенсом угла наклона прямой к оси абсцисс, а постоянная  $C$  находится из соотношения для любой точки прямой

$$C = \frac{K_N}{Re^m}. \quad (5.18)$$

Результаты расчетов заносят в таблицу 5.2.

Таблица 5.1

Опытные и расчетные данные при определении эффективности перемешивания  
Тип мешалки \_\_\_\_\_

№ опыта	Число оборотов мешалки, $n$ , об/мин	Высота масла в реакторе, $h_m$ , м	Высота воды в реакторе, $H_B$ , м	Высота (или объем)						Локальное содержание масла в пробах, $\bar{x}$			Локальная степень перемешивания, $S$			$\sum S$	Индекс перемешивания, $Y$
				масла в пробах, $h_m$ , м (или $V_m$ , м <sup>3</sup> )			воды в пробах, $H_B$ , м (или $V_B$ , м <sup>3</sup> )										
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	

Таблицы 5.2

Опытные и расчетные данные при определении потребляемой мощности  
Тип мешалки \_\_\_\_\_

№ опыта	Число оборотов мешалки, $n$ , с <sup>-1</sup>	Физические свойства перемешиваемой среды		Диаметр мешалки, $d$ , м	Критерий Рейнольдса, Рейнольдса, $Re_u$	Критерий мощности, $K_N$	Напряжение, $U$ , В	Расход мощности на перемешивание, $N$ , Вт	Сила тока, $I$ , А	Мощность электродвигателя, $N_{дв}$ , Вт	КПД, $\eta$	Коэффициенты	
		$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu$ , Па*с									$m$	$C$
1													
2													

3													
4													
5													

**Лабораторная работа № 6**  
**6 часов**  
**Изучение процесса простой перегонки**

*Цель работы:* изучение процесса простой перегонки.

*Задачи работы*

1. Изучить процесс простой перегонки, ознакомиться с устройством и работой установки.
2. Теоретически рассчитать процесс перегонки и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными.

*Обеспечивающие средства:* ротационный испаритель; набор ареометров для определения плотности смеси; исходная смесь «этанол – вода».

*Задание:* провести процесс простой перегонки смеси «этанол – вода» с заданной начальной концентрацией  $x_F$  (масс. %) практически и рассчитать теоретически (методом графического интегрирования) количество кубового остатка  $W$  и дистиллята  $D$ . Сравнить теоретические и экспериментальные данные.

*Требования к отчету:* итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указываются название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вид обучения, факультет, а также приводятся цель работы, схема установки, методика выполнения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов (табл. 6.1), график «Температурная диаграмма для смеси

этиловый спирт–вода» (приложение 2) и график зависимости « $\frac{1}{(y^* - x)} = \varphi(x)$ » (рис. 6.1).

После оформления экспериментальной части и обработки опытных данных, пишется вывод по работе и оформляется отчет.

*Технология работы*

Получить определенный объем  $V$  исходной смеси «этиловый спирт – вода»; определить с помощью ареометров ее плотность и по таблице рассчитать концентрацию  $x_F$  (масс. %) и температуру кипения  $t_F$ . Зная количество исходной смеси  $F$  и задавшись концентрацией кубового остатка  $x_W$  после перегонки, теоретически рассчитать (методом графического интегрирования) количество кубового остатка  $W$  и дистиллята  $D$ , получаемые по окончании перегонки; определить среднюю концентрацию легколетучего компонента  $x_{Dcp}$  в дистилляте.

Открыв вентиль и подав воду в холодильник, устанавливают ручку регулятора температуры на значение (на 15 - 20 °С выше температуры  $t_F$ ), необходимое для работы установки по простой перегонке. Отмечают время начала перегонки. Набрав в приемную колбу рассчитанное количество дистиллята, заканчивают перегонку. Отбирают пробы дистиллята и кубового остатка в мерные цилиндры, охлаждают их до комнатной

температуры, измеряют ареометром плотность и по таблице определяют концентрацию легколетучего компонента в дистилляте и в кубовом остатке. Найденный экспериментально средний состав дистиллята  $x_{Dэ}$  сравнивают с расчетным  $x_{Dр}$  и рассчитывают ошибку  $\epsilon$ . Определяют расход тепла на перегонку  $Q$  и мощность, затраченную на перегонку  $N_p$ . Находят КПД установки. Все данные, полученные экспериментальным и расчетным путем, заносят в таблицы 6.1 и 6.2.

#### Контрольные вопросы

1. На чем основан процесс перегонки жидкостей?
2. Что понимают под простой перегонкой?
3. Когда применяется простая перегонка?
4. Закон Рауля.
5. Коэффициент относительной летучести.
6. Уравнение материального баланса простой перегонки.
7. Как осуществляется процесс простой перегонки?

### Описание лабораторной работы

**Теоретическая часть.** Разделение жидкой смеси путем простой перегонки основано на различной летучести компонентов, составляющих ее, и представляет собой однократное испарение части жидкости при кипении с последующей конденсацией паров. Пар, образующийся в процессе простой перегонки, обогащается легколетучим низкокипящим компонентом, а кубовый остаток – менее летучим (высококипящим) компонентом. При достаточно длительном соприкосновении между жидкой смесью и паром достигается равновесие; для бинарной смеси равновесный состав пара ( $y^*$ ) может быть определен в соответствии с законами Рауля

$$p_A = P_A \cdot x_A; \quad p_B = P_B \cdot x_B = P_B(1 - x_A) \quad (6.1)$$

и Дальтона:

$$p_A = \Pi \cdot y_A, \quad (6.2)$$

где  $p_A$  и  $p_B$  – парциальные давления низкокипящего ( $A$ ) и высококипящего ( $B$ ) компонентов;  $P_A$  и  $P_B$  – давление насыщенных паров чистых компонентов  $A$  и  $B$  при данной температуре;  $x_A$  и  $x_B$  – мольные доли низкокипящего и высококипящего компонентов в жидкой смеси;  $\Pi$  – полное (общее) давление смеси паров ( $\Pi = p_A + p_B$ );  $y_A$  – концентрация (мольная доля) легколетучего компонента в паровой фазе.

При равновесии ( $y_A = y_A^*$ )

$$y_A^* = \frac{p_A}{\Pi} = \frac{P_A}{P_A + P_B} = \frac{P_A \cdot x_A}{P_A \cdot x_A + P_B \cdot (1 - x_A)} = \frac{\alpha \cdot x_A}{\alpha \cdot x_A + (1 - x_A)}, \quad (6.3)$$

где  $\alpha = \frac{P_A}{P_B}$  – коэффициент относительной летучести ( $\alpha > 1$ ).

Простая перегонка применяется в том случае, если компоненты достаточно сильно отличаются по летучести, т. е. для очистки веществ от малолетучих и нелетучих примесей или когда не требуется большого обогащения дистиллята низкокипящим компонентом.

При периодическом ведении процесса перегонки концентрация низкокипящего компонента в дистилляте постепенно уменьшается и приближается к его содержанию в первоначальной смеси. Расчет простой перегонки обычно заключается в том, чтобы определить какое количество жидкости надо отогнать с целью получения требуемого среднего состава дистиллята и кубового остатка.

Уравнение материального баланса простой перегонки по низкокипящему компоненту имеет вид

$$Lx = (L - dL)(x - dx) + dLy^*, \quad (6.4)$$

где  $L$  – количество исходной смеси в некоторый момент времени;  $x$  – текущая концентрация смеси по низкокипящему компоненту;  $dL$  – количество жидкости, испарившееся за бесконечно малый промежуток времени  $dx$ ;  $y^*$  – равновесная концентрация легколетучего компонента в паре.

Раскрывая скобки и пренебрегая произведением  $dL \cdot dx$ , как бесконечно малой величиной второго порядка, получим

$$dL \cdot dx = dL \cdot (y^* - x) \text{ или } \frac{dL}{L} = \frac{dx}{y^* - x} \quad (6.5)$$

Интегрируем уравнение (6.5) в пределах изменения количества жидкости в кубе от начального  $L = F$  до конечного  $L = W$  и соответствующего падения ее концентрации от  $x_F$  до  $x_W$  за весь цикл перегонки:

$$\int_F^W \frac{dL}{L} = \int_{x_F}^{x_W} \frac{dx}{y^* - x} \text{ или } \int_W^F \frac{dL}{L} = \int_{x_W}^{x_F} \frac{dx}{y^* - x} \quad (6.6)$$

После интегрирования получим:

$$\ln \frac{F}{W} = \int_{x_F}^{x_W} \frac{dx}{y^* - x} \quad (6.7)$$

Вид функции  $y^* = \varphi(x)$  определяется формой кривой равновесия и обычно не может быть установлен аналитически. Поэтому интегрирование правой части уравнения (6.7) проводят

графически – путем построения зависимости  $\frac{1}{(y^* - x)}$  от  $x$ . При графическом вычислении

интеграла берут последовательно различные значения  $x$  в пределах от  $x_W$  до  $x_F$ , находят по

таблице (приложение 2) или диаграмме  $y^* = \varphi(x)$  (приложение 4) соответствующие им значения  $y^*$ , вычисляют  $\frac{1}{(y^* - x)}$  и строят кривую (рис. 6.1). Размер площади, ограниченной

кривой и осью абсцисс в пределах от  $x_W$  до  $x_F$  представляет величину искомого интеграла.

Среднюю концентрацию легколетучего компонента в дистилляте ( $x_{Dcp}$ ) рассчитывают из уравнения материального баланса:

$$Fx_F = Wx_W + (F - W) \cdot x_{Dcp} = Wx_W + Dx_{Dcp}, \quad (6.8)$$

Откуда

$$x_{Dcc} = \frac{F \cdot x_F - W \cdot x_W}{D} \quad (6.9)$$

где  $D = F - W$  – количество перегнанной жидкости (дистиллята).

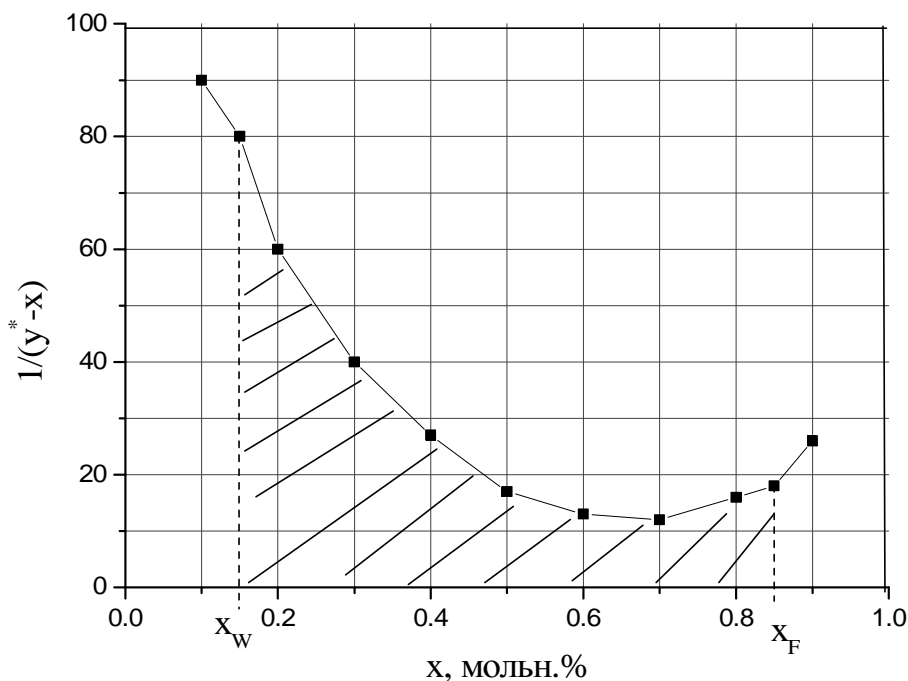


Рис. 6.1. Графическое решение интеграла  $\int \frac{dx}{y^* - x}$

**Описание установки.** Перегонка осуществляется в ротационном испарителе (рис. 6.2) в тонком слое жидкости. Пленка

жидкости образуется на внутренней поверхности вращающейся испарительной колбы. Вращение способствует увеличению площади испарения и интенсифицирует процесс парообразования; одновременно устраняется вспенивание испаряемой жидкости. Вращение испарительной колбы производится от электродвигателя постоянного тока через червячный редуктор 3 с торцевым вакуумным уплотнением. Управление частотой вращения электродвигателя осуществляется ручкой задатчика оборотов; расположенной на лицевой панели регулятора температуры 10. Диапазоны изменения частоты вращения испарительной колбы – 15 - 180 об/мин, температуры теплоносителя в бане – 20 - 150 °С.

Нагрев и испарение раствора осуществляется с помощью бани 1, в которой температура жидкого теплоносителя (воды, масла, глицерина) поддерживается автоматически. Испарительно-конденсационная система состоит из испарительной колбы 2, конденсатора-холодильника 4, загрузочной воронки 5 с исходным раствором, переходника 7, отборника 8 и приемной колбы 9. Система кранов отборника обеспечивает возможность снятия приемной колбы дистиллята без нарушения рабочего давления при непрерывном ведении процесса перегонки. В периодическом режиме работы установка отборника не обязательна, т. е. приемную колбу в этом случае можно закреплять непосредственно на шлифе переходника 7.

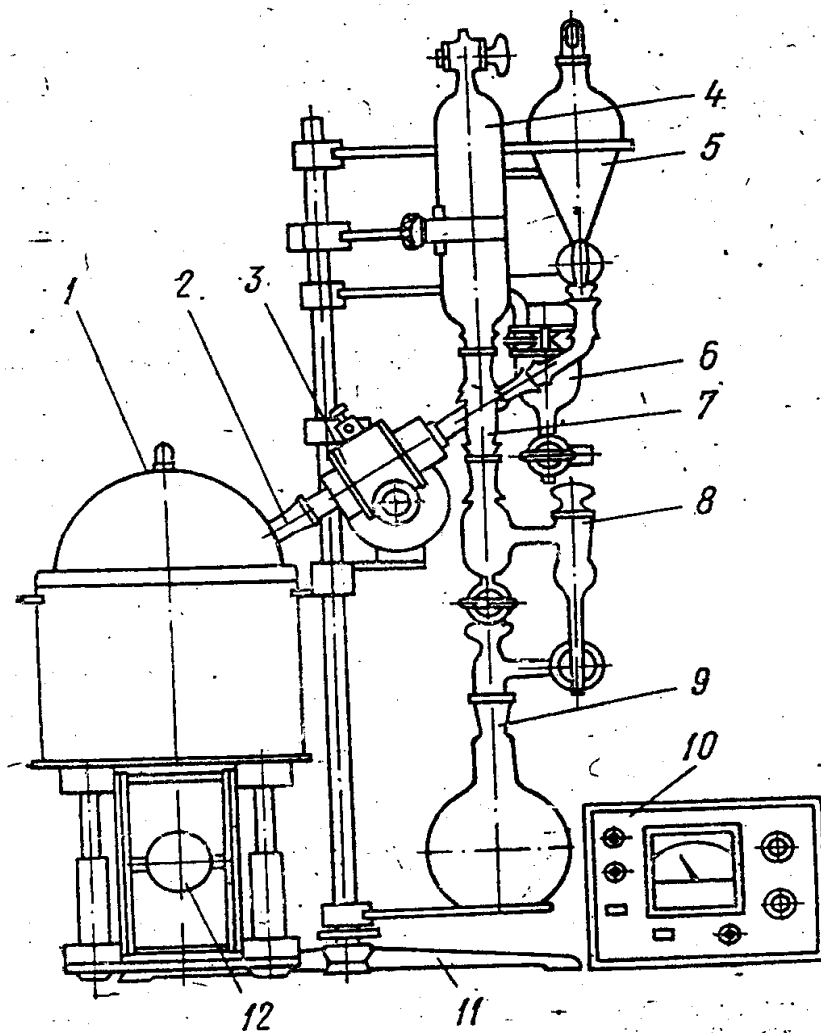


Рис. 6.2. Схема установки

Процесс перегонки можно осуществлять под атмосферным давлением или под вакуумом, в периодическом и непрерывном режимах. Для предотвращения попадания паров низкокипящих жидкостей в систему откачки предусмотрена установка охлаждающей ловушки б. Паровая фаза охлаждается и конденсируется в холодильнике-конденсаторе, дистиллят собирается в приемной колбе, а остаток – в испарительной колбе.

Для подъема и опускания бани предназначен подъемник 12 с механизмом, работающим по принципу винт – гайка. Испарительно-конденсационная система и привод с редуктором закреплены при помощи держателей на штативе 11.

**Методика проведения работы.** Работа проводится в следующем порядке:

1. Ознакомиться с установкой и нарисовать ее схему.
2. Для исходной смеси «этиловый спирт – вода» (или какой-либо другой) построить по табличным данным температурную диаграмму  $t - x, y$ , (приложение 3).

3. С помощью ареометра измерить плотность раствора исходной смеси, определить его концентрацию  $x_F$ , в масс. % (приложение 5) и температуру кипения.

4. Зная количество исходной смеси, ее концентрацию по легколетучему компоненту и задавшись концентрацией кубового остатка после перегонки, теоретически по уравнению (6.7) на ЭВМ или методом графического интегрирования рассчитать

количество кубового остатка  $W$  и дистиллята  $D$ ;, получаемых после окончания перегонки ( $D = F - W$ , где  $F$  – количество исходной смеси). По уравнению (6.9) рассчитать среднюю концентрацию легколетучего компонента  $x_{Dcp}$  в дистилляте..

При графическом интегрировании необходимо:

а) выписать данные по равновесию и заполнить табл. 6.1 в пределах изменения концентрации исходной смеси от  $x_F$  до  $x_W$ . Вторая графа табл. 6.1 ( $x^2$ ) заполняется при расчете на ЭВМ;

б) на миллиметровой бумаге, в масштабе построить график зависимости  $\frac{1}{(y^* - x)} = \varphi(x)$ . Площадь под кривой в пределах изменения  $dx$  от  $x_W$  до  $x_F$  представляет собой искомым интеграл, т. е. величину  $\ln \frac{F}{W}$ ;

в) определить количество кубового остатка  $W$  и дистиллята  $D$ ;

г) по уравнению (6.9) рассчитать средний состав дистиллята  $x_{Dcp}$ .

Для расчета интеграла на ЭВМ надо табличную зависимость  $y^* = \varphi(x)$  аппроксимировать кривой, например, квадратным трехчленом вида  $y^* = a + bx + cx^2$ . Найдя коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$ , по стандартной программе вычислить определенный интеграл уравнения (6.7). Теоретически рассчитав количество и среднюю концентрацию дистиллята, приступают к выполнению, экспериментальной части работы.

Таблица 6.1

Расчетные данные

$x$ , масс. доля	$x^2$	$y^*$ , масс. доля	$y^* - x$ , масс. доля	$\frac{1}{(y^* - x)}$
1	2	3	4	5

5. Измерить начальную температуру исходной смеси и налить ее в заданном количестве  $F$  в испарительную колбу 2.

6. Проверить количество теплоносителя и при необходимости дополнить ее; закрепить испарительную колбу на вращающейся части редуктора, поднять подъемником баню и погрузить испарительную колбу в теплоноситель примерно наполовину.

7. Установить ручку регулятора температуры в крайнее левое положение и включить кнопку «нагрев бани» на лицевой панели. Включение в сеть сигнализируется лампочкой «ВКЛ».

8. Ручку регулятора температуры установить на значении, необходимом для работы (на 15 - 20°C выше температуры кипения исходной смеси). Работа нагревателя сигнализируется лампочкой «АВТ».

9. Открыть вентиль и подать водопроводную воду в холодильник-конденсатор. По часам отметить время начала и окончания эксперимента. Набрав в приемную колбу рассчитанное количество дистиллята, закончить перегонку.

10. По окончании работы установить ручку управления в крайнее левое положение и выключить привод. Ручку регулятора температуры также перевести в крайнее левое положение, выключить кнопку «нагрев бани» и отключить регулятор температуры от сети.

11. Отобрать пробы дистиллята и кубового остатка в мерные цилиндры, охладить их до комнатной температуры, измерить ареометром плотность, и по таблице определить концентрацию легколетучего компонента в дистилляте и в кубовом остатке (в масс. %).

12. Не ранее чем через 10 мин после окончания перегонки отключить подачу воды в холодильник.

### **Обработка опытных данных.**

1. Найденный экспериментально средний состав дистиллята  $x_{D_{\text{ср}}}$  сравнивают с расчетным  $x_{D_{\text{ср}}}$  и рассчитывают ошибку  $\varepsilon$ , %:

$$\varepsilon = \frac{x_{D_{\text{ср}}} - x_{D_{\text{э}}}}{x_{D_{\text{ср}}}} \cdot 100, \% \quad (6.10)$$

1. Определяют расход тепла на перегонку. Он складывается из трех величин:

а) расхода тепла на подогрев исходной смеси:

$$Q_1 = F \cdot c_F \cdot (t_{\text{кF}} - t_{\text{н}}) \quad (6.11)$$

где  $c_F$  – удельная, теплоемкость исходной смеси, кДж/(кг · К);  $c_c, c_b$  – удельная теплоемкость компонентов в смеси (спирта и воды), кДж/(кг · К);  $t_{\text{кF}}$  – температура кипения исходной смеси, °С;  $t_{\text{н}}$  – начальная температура исходной смеси, °С;

Удельная теплоемкость исходной смеси определяется по формуле

$$c_F = c_c \cdot x_F + c_b \cdot (1 - x_F) \quad (6.12)$$

где  $x_F$  – концентрация исходной смеси, масс. доли.

б) расхода тепла на испарение дистиллята:

$$Q_2 = D \cdot r_D \quad (6.13)$$

где  $r_D$  – теплота парообразования дистиллята, кДж/кг;  $r_c; r_b$  – теплота парообразования компонентов смеси, кДж/кг;  $x_{D_{\text{э}}}$  – концентрация дистиллята, масс. доли.

Теплота парообразования дистиллята определяется по формуле:

$$r_D = r_c \cdot x_{Dэ} + \kappa_э \cdot (1 - x_{Dэ}) \quad (6.14)$$

в) расхода тепла на нагрев кубового остатка:

$$Q_3 = W \cdot c_W \cdot (t_{кW} - t_{кF}) \quad (6.15)$$

где  $c_W$  – удельная теплоемкость кубового остатка, кДж/(кг · К);  $t_{кW}$  – температура кипения кубового остатка в конце процесса перегонки, °С.

Удельная теплоемкость кубового остатка определяется по формуле

$$c_W = c_c \cdot x_W + c_э \cdot (1 - x_W) \quad (6.16)$$

где  $x_W$  – концентрация кубового остатка, масс. доли.

Тогда общий расход тепла:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (6.17)$$

Мощность, затраченная на перегонку  $N_p$  (расчетная), кВт:

$$N_p = \frac{Q}{\tau}, \quad (6.18)$$

где  $\tau = \tau_n + \tau_{п}$  – общее время, затраченное на нагрев исходной смеси ( $\tau_n$ ) и испарение ( $\tau_{п}$ ), с.

По показаниям вольтметра и амперметра рассчитать фактическую мощность ( $N_{ф}$ , кВт), затраченную электродвигателем на перегонку. Определить КПД установки (%):

$$\eta = \frac{N_p}{N_{ф}} \cdot 100, \% \quad (6.16)$$

Все данные, полученные экспериментальным и расчетным путем, занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Опытные и расчетные данные

№	Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение величины
<b>1. Опытные данные</b>				
1	Количество исходной смеси	$F$	кг	
2	Концентрация исходной смеси по низкокипящему компоненту	$x_F$	масс. доли	
3	Средняя концентрация дистиллята	$x_{Dэ}$	масс. доли	
4	Концентрация кубового остатка	$x_W$	масс. доли	
5	Начальная температура исходной смеси	$t_n$	°С	
6	Температура кипения исходной смеси	$t_{кF}$	°С	
7	Температура кипения кубового остатка	$t_{кW}$	°С	
8	Время нагрева исходной смеси	$\tau_n$	мин (с)	
9	Время перегонки	$\tau_{п}$	мин (с)	

10	Количество кубового остатка	$W$	кг	
11	Количество дистиллята	$D$	кг	
12	Показания амперметра	$I$	А	
13	Показания вольтметра	$U$	В	
<b>2. Расчетные данные</b>				
1	Количество кубового остатка	$W_p$	кг	
2	Количество дистиллята	$D_p$	кг	
3	Средняя концентрация дистиллята	$x_{Dcp}$	масс. доли	
4	Процент ошибки в определении концентрации дистиллята	$\varepsilon$	%	
5	Мощность, затраченная на перегонку (расчетная)	$N_p$	кВт	
6	Фактическая мощность	$N_{\phi}$	кВт	
7	КПД установки	$\eta$	%	

## Лабораторная работа № 7 6 часов Изучение процесса жидкостной экстракции

*Цель работы:* ознакомление с процессом экстракции в системе «жидкость – жидкость».

### *Задачи работы*

1. Графическим методом рассчитать процесс экстракции в системе «жидкость – жидкость» по треугольной диаграмме.
2. Рассчитать коэффициент распределения.

*Обеспечивающие средства:* набор реактивов для проведения экстракции: смесь «ацетон +  $CCl_4$ » и дистиллированная вода, оборудование для проведения анализа (стаканы, делительные воронки, магнитные мешалки, рефрактометр).

*Задание:* провести процесс экстракции в системе «жидкость – жидкость», построить треугольную диаграмму и рассчитать коэффициент распределения  $m$ .

*Требования к отчету:* итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указываются название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вид обучения, факультет, а также приводятся цель работы, схема установки, методика проведения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, табл. 7.1. На треугольной диаграмме строится кривая равновесия (бинодальную кривую) и наносятся точки, отвечающие составу исходной смеси ( $F$ ), экстрагента ( $C$ ), полученного раствора ( $M$ ), экстракта и рафината. После оформления экспериментальной части и обработки опытных данных пишется вывод по работе и защищается отчет.

### *Технология работы*

Получить исходную смесь «ацетон +  $CCl_4$ », определить концентрацию (по калибровочным графикам) и рассчитать плотность исходной смеси; смешать ее в определенном соотношении с экстрагентом (дистиллированной водой); после отстаивания и разделения смеси в делительной воронке слить обе образовавшиеся фазы (экстракт и рафинат), определить их

объем и концентрации; при необходимости провести вторую ступень экстракции; построить треугольную диаграмму и рассчитать коэффициент распределения  $m$ .

#### Контрольные вопросы

1. Что такое экстракция?
2. Виды экстракции, область применения.
3. Что такое экстрагент, экстракт и рафинат?
4. Требования, предъявляемые к экстрагенту.
5. Закон распределения. Что называется коэффициентом распределения?
6. Правило рычага.
7. Обозначение концентраций на треугольной диаграмме.

#### Описание лабораторной работы

**Теоретическая часть.** Экстракцией называется процесс извлечения одного или нескольких компонентов из растворов или твердых тел с помощью избирательных растворителей (экстрагентов). Экстрагент должен хорошо растворять только извлекаемый компонент и значительно слабее или совсем не растворять остальные компоненты исходной смеси. Процессы экстракции широко применяются в различных отраслях химической промышленности, в т. ч. при химической переработке древесины. Примерами экстракции в системе «жидкость – твердое тело» являются важнейшие процессы производства целлюлозы – варка, промывка, отбелка; в лесохимической промышленности – извлечение канифоли, скипидара и других смолистых веществ из пневого осмола. Очистка сточных вод от фенолов при помощи органических растворителей, извлечение уксусной кислоты из водных растворов (пиролизатов) этилацетатом представляют собой экстракцию в системе «жидкость – жидкость».

Экстракция в системе «жидкость – жидкость», которая изучается в данной лабораторной работе, – это массообменный процесс, протекающий с участием двух ограниченно растворимых жидкостей (фаз), между которыми при их смешении распределяется экстрагируемое вещество (целевой компонент). Принципиальная схема процесса жидкостной экстракции представлена на рис. 7.1.

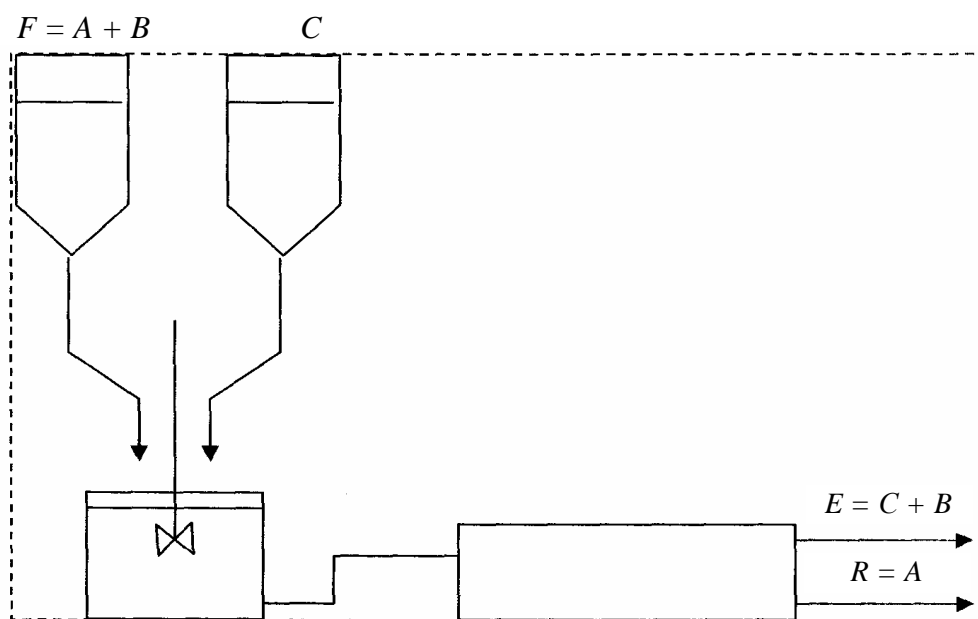


Рис. 7.1. Схема процесса одноступенчатой жидкостной экстракции:

$F$  – исходная смесь;  $A$  – первичный растворитель;  $B$  – извлекаемое вещество;  
;  $C$  – чистый вторичный растворитель;  $E$  – экстракт ( $C + B$ );  $R$  – рафинат

Исходная гомогенная смесь:  $F = A + B$ , где  $A$  – первичный растворитель,  $B$  – извлекаемое вещество (целевой компонент), тщательно перемешивается в экстракторе с экстрагентом  $C$ , представляющим собой либо чистый вторичный растворитель  $C$ , либо (если используется регенерированный экстрагент) вторичный растворитель с небольшим количеством компонента  $B$ : ( $C + B$ ). При выборе вторичного растворителя необходимо руководствоваться следующим:

- 1) растворимость извлекаемого компонента  $B$  во вторичном растворителе  $C$  должна быть значительно большей, чем в первичном растворителе  $A$ ;
- 2) взаимная растворимость вторичного и первичного растворителей должна быть ничтожной;
- 3) плотности образующихся фаз по возможности должны существенно отличаться.

При интенсивном перемешивании исходной смеси  $F$  с экстрагентом  $C$  целевой компонент  $A$  переходит в раствор во вторичном растворителе. Образовавшуюся эмульсию разделяют на две фазы отстаиванием или центрифугированием. Одну из этих фаз – вторичный растворитель  $C$  с растворенным в нем целевым компонентом  $B$  – называют экстрактом  $E$ , другую (первичный растворитель  $A$  плюс остатки компонента  $B$ ) – рафинатом  $R$ .

Экстракт подвергают дальнейшей обработке – ректификации или выпариванию с целью выделения компонента  $B$  в чистом виде и регенерации вторичного растворителя  $C$ . Жидкостная экстракция может осуществляться различными методами, отличаясь как в технологическом, так и в аппаратном оформлении: периодически и непрерывно, одним или двумя экстрагентами, в одну (одноступенчатая экстракция) или несколько ступеней, перекрестным током и противотоком и т. д. Однако независимо от способа осуществления процесса экстракции, основные теоретические положения, касающиеся статистики (равновесие фаз, материальный баланс) и кинетики процесса, сохраняются.

Движущей силой процесса экстракции, как и других массообменных процессов, является степень отклонения двухфазной системы от состояния равновесия, иначе говоря – разность между равновесной и рабочей (фактической) концентрациями извлекаемого компонента в одной из фаз – экстракте или рафинате. Компонент  $B$  будет переходить из исходной смеси  $F$  во вторичный растворитель  $C$  до тех пор, пока между обеими фазами (экстрактом и рафинатом) не установится, равновесие. Количественная связь между составами равновесных фаз описывается уравнением

$$y^* = m \cdot x, \quad (7.1)$$

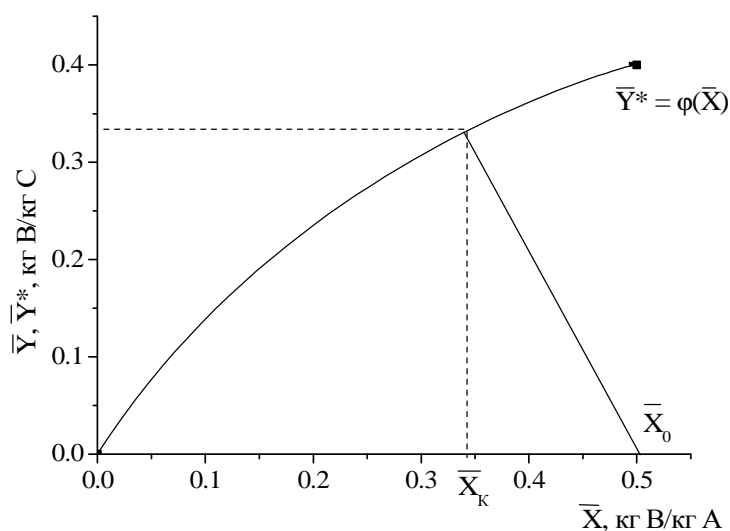
где  $x$  – массовая доля вещества  $B$  в первичном растворителе  $A$  (в фазе рафината);  $y^*$  – массовая доля вещества  $B$  во вторичном растворителе  $C$  (в фазе экстракта) при равновесии;  $m$  – коэффициент распределения, зависящий от температуры и концентрации (в области разбавленных растворов при постоянной температуре  $m = \text{const}$ ).

Коэффициент распределения  $m$ , как правило, не является постоянной величиной и вид зависимости  $y^* = \varphi(x)$  устанавливается опытным путем.

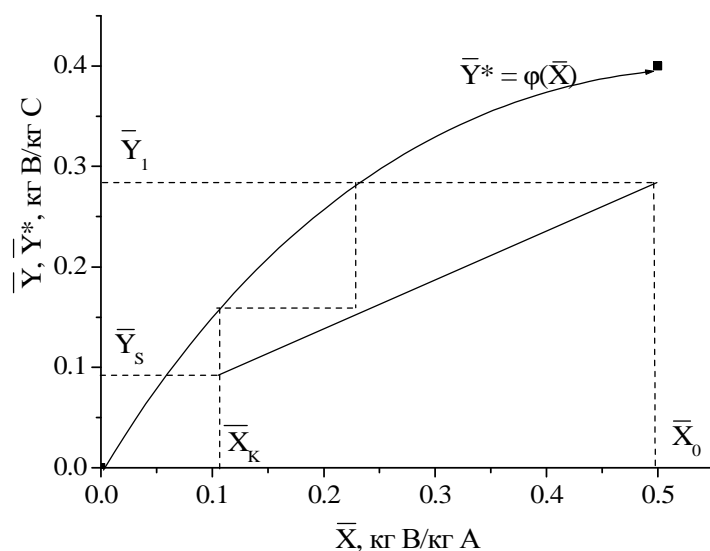
Линия рабочих концентраций при экстракции так же, как и в других массообменных процессах, прямая. В общем случае уравнение ее типа  $y = ax + b$  устанавливает зависимость между рабочими концентрациями извлекаемого компонента  $B$  в исходном растворителе и экстрагенте.

В идеальном случае при полной взаимной нерастворимости первичного ( $A$ ) и вторичного ( $C$ ) растворителей графически линия рабочих и равновесных концентраций изображаются как

обычно для массообменных процессов в прямоугольной диаграмме « $y - x$ » (рис. 7.2, а, б). Положение линии рабочих концентраций при этом определяется схемой ведения процесса экстракции – перекрестным током, или противотоком, положение же линии равновесия неизменно.



(а)



(б)

**Рис. 7.2.** Изображение процесса экстракции на прямоугольной диаграмме  $y - x$ :  
а) одноступенчатая экстракция; б) многоступенчатая экстракция, противоточная

При частичной взаимной растворимости первичного растворителя и экстрагента (что и наблюдается в данной лабораторной работе) после проведения процесса экстракции и отстаивания каждая из образовавшихся фаз представляет собой трехкомпонентный раствор. Определение состава жидких тройных смесей, а также построение линии равновесия

(бинодальной кривой) и расчет основных характеристик процесса в этом случае осуществляется по треугольной диаграмме (рис. 7.3).

Вершины треугольника соответствуют 100 %-му содержанию отдельных компонентов  $A$ ,  $B$  и  $C$ , точка на любой стороне треугольника выражает состав бинарной смеси ( $F = A + B$  или  $E = B + C$ ), а точка внутри треугольника – состав трехкомпонентной системы. Кривая равновесия строится при постоянной температуре по опытным данным – точкам, отвечающим равновесному содержанию извлекаемого компонента  $B$ , в двух расслоившихся после перемешивания фазах – экстракте и рафинате. На рис. 7.3 – это точки 1 и 1', 2 и 2' и т. д.; линии, соединяющие эти точки, называются хордами равновесия, или конодами. На две фазы будут расслаиваться только те смеси, средний состав которых выражается точкой, расположенной внутри кривой равновесия, например точкой  $M$ . Смеси, состав которых выражается точкой, лежащей за кривой равновесия, гомогенны, т. е. не расслаиваются.

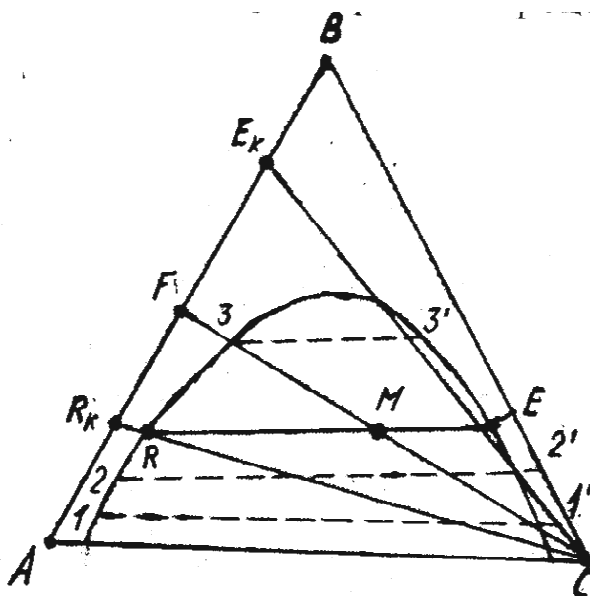


Рис. 7.3. Изображение процесса экстракции на треугольной диаграмме

При смешении двух растворов, например исходной смеси, состоящей из двух компонентов (точка  $F$ ) и чистого растворителя (точка  $C$ ), получается новая смесь, состав которой выражается точкой  $M$ , лежащей на прямой, соединяющей  $F$  и  $C$ . Положение точки  $M$ , т. е. состав смеси, определяется уравнением материального баланса

$$M = F + C = R + E \quad (7.2)$$

и правилом рычага

$$F \times FM = C \times CM \quad \text{или} \quad \frac{F}{C} = \frac{CM}{FM} \quad (7.3)$$

где  $F$ ,  $C$  и  $M$  – количество смешиваемых и образующегося раствора (смеси);  $R$  и  $E$  – количество рафината и экстракта;  $FM$  и  $CM$  – величина (мм) отрезков прямых на треугольной диаграмме.

Зная положение хорды равновесия, проходящей через точку  $M$  (или построив ее по опытным данным, полученным в ходе эксперимента), и применяя то же правило рычага

$$R \times RM = E \times EM ; \frac{R}{E} = \frac{EM}{RM} \quad (7.4)$$

или

$$\frac{R}{M} = \frac{ME}{RE} ; R = M \cdot \frac{ME}{RE} \quad (7.5)$$

можно определить массу рафината и экстракта.

Для определения состава рафината проводят через точки  $C$  и  $R$  луч до пересечения со стороной  $AB$  треугольника. Точка  $R_K$  определяет состав конечного рафината (после отгонки вторичного растворителя  $C$ ). Аналогично, проводя луч через точки  $C$  и  $E$ , находят точку  $E_K$ , выражающую состав экстракта (без экстрагента).

При однократном смешении исходной смеси и экстрагента степень извлечения растворенного вещества сравнительно невелика. С целью более полного извлечения того или иного компонента применяют многоступенчатую экстракцию, которая в промышленных условиях осуществляется обычно непрерывно противотоком. В лабораторных условиях эту операцию проводят последовательно, обрабатывая рафинат новыми порциями свежего растворителя (перекрестный ток).

**Описание установки.** Схема лабораторной установки для изучения процесса жидкостной экстракции показана на рис. 7.4. Экстрагент – дистиллированная вода и подлежащий разделению исходный раствор ацетона в четыреххлористом углероде – поступают самотеком из делительных воронок 1 и 2 в стакан 3, где тщательно перемешиваются магнитной мешалкой 4. Разделение смеси на отдельные фазы – экстракт и рафинат осуществляется в делительной воронке 5.

Исходный раствор приготавливается заранее; содержание ацетона в нем, а также в экстракте и рафинате определяют на рефрактометре по показателю преломления  $n$ . По градуировочным графикам находят соответствующие значения концентрации и заносят их в табл. 7.1. Рефрактометр перед замерами надо прогреть в течение 5 – 10 мин, после каждого определения необходимо тщательно протирать линзу рефрактометра фильтровальной бумагой.

Количество подаваемой смеси и экстрагента (воды), а также количество ступеней обработки или конечная концентрация рафината задаются перед началом работы преподавателем.

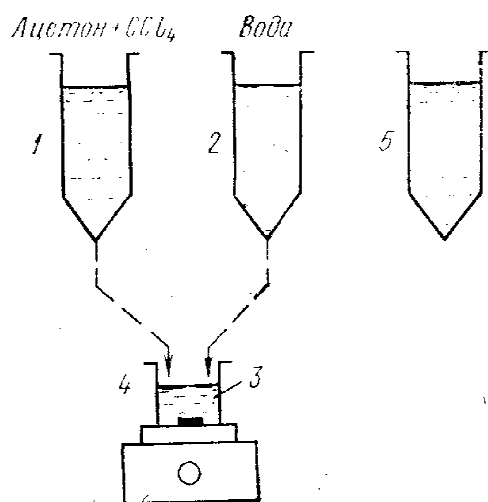


Рис. 7.4. Схема установки

**Методика проведения работы.** Перед началом работы необходимо усвоить сущность и теоретические основы процесса экстракции, ознакомиться со схемой установки, методикой проведения работы, обработкой опытных данных и ответить на контрольные вопросы. Работа выполняется в следующем порядке.

1. Получить от преподавателя задание относительно условий проведения эксперимента: количество и соотношение (по объему) между исходной смесью и экстрагентом; количество ступеней обработки.

2. Определить концентрацию и рассчитать плотность исходной смеси.

3. Открыть краны подачи исходной смеси и воды, включить магнитную мешалку и постепенно при непрерывном перемешивании подать необходимое их количество.

4. Тщательно перемешать смесь и перенести ее в делительную воронку 5, где выдержать до полного расслоения фаз. Измерить объемы полученных фаз, взять пробы экстракта (верхняя часть) и рафината и определить их концентрации. Полученные результаты занести в табл. 7.1.

5. При необходимости повторной экстракции (в соответствии с заданием) аккуратно слить нижнюю часть раствора (рафинат) в стакан с мешалкой и провести вторую экстракцию с заданным количеством воды;

6. С полученной смесью повторить п. 4.

7. По окончании работы отключить все приборы, вымыть посуду и привести рабочее место в порядок.

Ниже приведены некоторые данные, необходимые для последующего расчета процесса экстракции при  $t = 20^\circ\text{C}$  (табл. 7.2).

Таблица 7.1

Экспериментальные и расчетные данные

Измеряемые (рассчитываемые) параметры	Исход- ная смесь	Экстрагент (вода)		Экстракт		Рафинат	
		Первая ступень	Вторая ступень	Первая ступень	Вторая ступень	Первая ступень	Вторая ступень
1. Показатель преломления $n$							
2. Концентрация ацетона $B$ , масс. %							
3. Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>							
4. Расход, мл/г							
5. Количество образующихся растворов (фаз), мл/г							

Таблица 7.2

Справочные данные

Параметры	Вода	Ацетон	Четыреххлористый углерод
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1000	790	1600
Показатель преломления, $n$	1,3330	1,3591	1,4603

### Обработка опытных данных.

1. По данным, приведенным в табл. 7.3, на треугольной диаграмме построить кривую равновесия (бинодальную кривую).

2. На треугольной диаграмме нанести точки, отвечающие составу исходной смеси ( $F$ ), экстрагента ( $C$ ) и полученного раствора ( $M_1$ ). Точка  $M_1$  находится по правилу рычага.

3. Нанести точки, соответствующие составу экстракта ( $E_1$ ) и рафината ( $R_1$ ), т. е. построить хорду равновесия  $R_1E_1$  одноступенчатой экстракции.

4. Зная количество исходной смеси, экстрагента, экстракта и рафината и их концентрации (содержание ацетона), рассчитать коэффициент распределения  $m$ .

5. При проведении двухступенчатой экстракции найти точку  $M_2$  и построить вторую хорду равновесия  $R_2E_2$ .

Таблица 7.3

Равновесные данные для системы  
«ацетон – четыреххлористый углерод – вода», масс. %

Ацетон (B)	Четыреххлористый углерод (A)	Вода (C)
32,9	65,80	1,3
54,7	38,20	7,1
60,3	17,70	22,0
52,1	5,20	42,7
48,1	3,97	47,9
23,8	0,60	95,6
0,5	0,40	99,1
26,8	72,20	1,0
16,2	83,40	0,4

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### РАЗДЕЛЕНИЕ СУСПЕНЗИЙ НА ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ЦЕНТРИФУГЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

**4 часа**

**Цель работы:** изучить основные закономерности разделения под действием центробежной силы и ознакомиться с устройством фильтрующей центрифуги периодического действия.

**Задачи работы:**

- определить скорость разделения, фактор разделения и индекс производительности центрифуги;
- вычислить параметры, характеризующие качество центрифугирования.

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд, состоящий из центрифуги с вращающимся ротором, снабженным фильтрами в шести патрубках; центробежный насос для подачи суспензии из сборного бака в расходный, снабженный мешалкой.

**Задание:** провести в течение 3–5 мин разделение суспензии на твердую и жидкую фазы при вращении ротора центрифуги; измерить среднюю толщину осадка; выполнить отбор проб суспензии, фильтрата и осадка на фильтрах; определить содержание твердой фазы в суспензии и фильтрате, а также влажность осадка; произвести замер интервалов времени, за которые вытекает определенный объем фильтрата (~ 0,25 л); рассчитать скорость разделения при двух различных значениях частоты вращения барабана; по расчетным данным и данным опыта строится график зависимости  $w_p = f(\tau)$ .

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, график – на миллиметровой бумаге, выполненный в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет.

В отчете указываются название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вида обучения, факультета, а также приводятся цель работы, схема установки, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, подробные расчеты значений одного из режимов, табл. 6.1 «Экспериментальные данные и результаты расчетов», строится график зависимости:  $w_p = f(\tau)$ , записываются выводы по работе и защищается отчет.

**Технология работы:** проводятся две серии опытов при установившихся оборотах барабана центрифуги (задаются преподавателем) по определению зависимости объема вытекающего фильтрата от времени центрифугирования; по расчетным данным и результатам испытаний строится график зависимости  $w_p = f(\tau)$ ; отбираются пробы и определяются массовые доли твердых частиц в исходной суспензии и фильтрате. После разделения суспензии определяется средняя толщина и влажность осадка.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие типы конструкции центрифуг применяются в химической промышленности и каков принцип их действия?
2. Какие параметры характеризует работу центрифуг?
3. Что такое фактор разделения и как его определяют?
4. Как определить влажность осадка после центрифугирования?
5. Поясните порядок проведения работы и проведите анализ опытных данных.

**Библиографический список** приведен в конце учебного пособия.

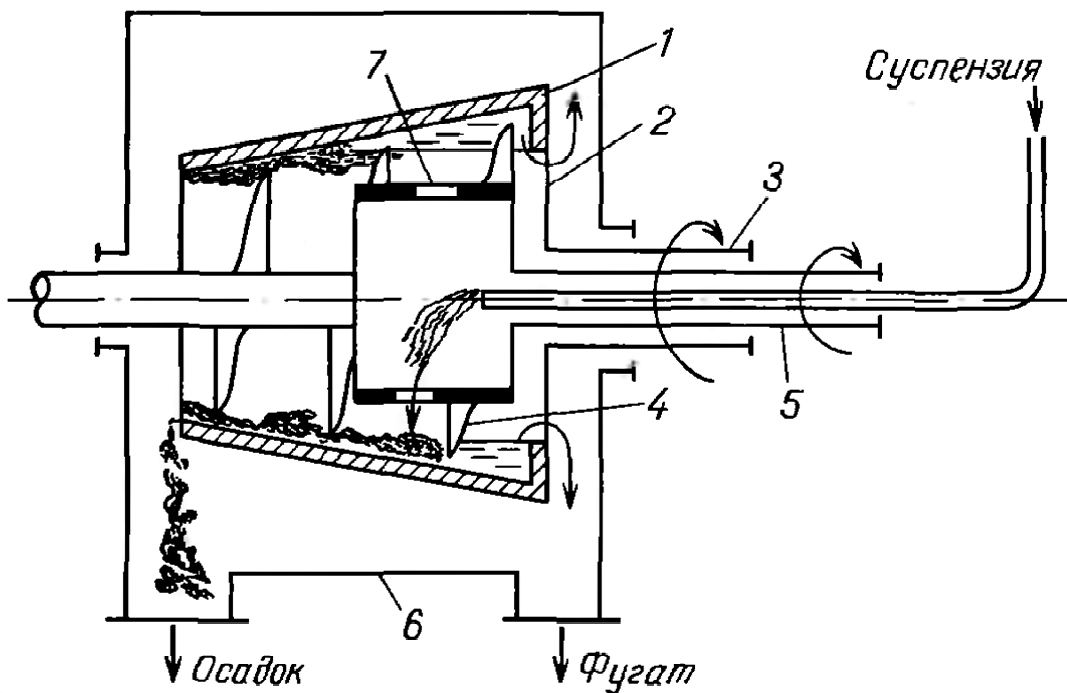
## **Описание лабораторной работы**

### **Теоретическая часть**

Одним из наиболее эффективных способов разделения жидких неоднородных систем, применяемых в промышленности, является центрифугирование. Под *центрифугированием* понимают процесс разделения суспензий и эмульсий в поле центробежных сил с использованием сплошных или пористых для жидкости перегородок. Процессы центрифугирования проводятся в машинах, называемых центрифугами.

По принципу действия и технологическому назначению центрифуги делятся на отстойные и фильтрующие. Барабаны (роторы) *отстойных* центрифуг имеют сплошную, а *фильтрующих* – дырчатую (перфорированную) стенку, покрытую фильтровальной сеткой или тканью.

Отстойные центрифуги (рис. 8.1) предназначены для разделения плохо фильтрующихся суспензий, эмульсий, а также для разделения суспензий по крупности частиц твердой фазы.

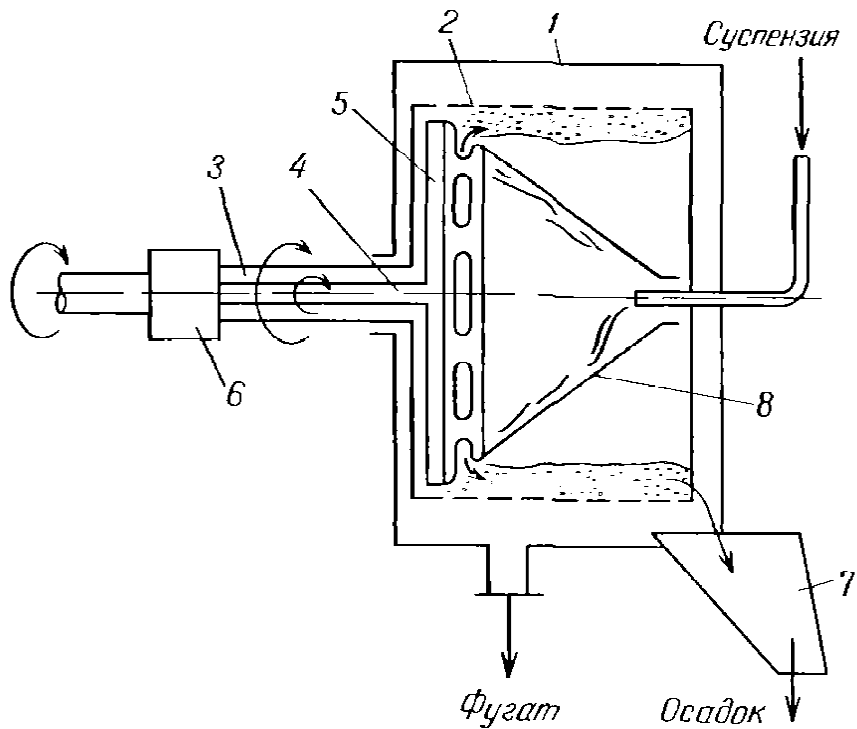


**Рис. 8.1.** Схема отстойной центрифуги непрерывного действия с горизонтальным валом и шнековой выгрузкой осадка:

- 1 – конический барабан; 2 – внутренний барабан; 3 – полый внешний вал;  
 4 – лопасти шнека; 5 – полый внутренний вал; 6 – кожух;  
 7 – окна во внутреннем барабане

Фильтрующие центрифуги (рис. 8.2) применяют для разделения крупнодисперсных суспензий кристаллических и аморфных продуктов, промывки получающихся при этом осадков, а также отделения влаги от штучных материалов.

В центрифугах поступающая суспензия разделяется на два продукта: фугат (слив) и влажный осадок. В фугат уходят частицы, размеры которых меньше некоторой определенной величины (граничного диаметра), в осадке же остаются в основном частицы с размером больше этой величины. Главными факторами, определяющими выбор центрифуги, являются: для суспензий – степень дисперсности твердой фазы, эффективная плотность (разность плотностей твердой и жидкой фаз) твердых частиц и их концентрация; для эмульсий – стойкость эмульсии. В суспензии содержится бесконечно узкий класс твердых частиц, вероятность попадания которых как в слив, так и в осадок одинакова. Размер этих частиц (их приведенный диаметр) называется *крупностью разделения*.



**Рис. 8.2.** Схема фильтрующей центрифуги непрерывного действия с пульсирующим поршнем для выгрузки осадка:

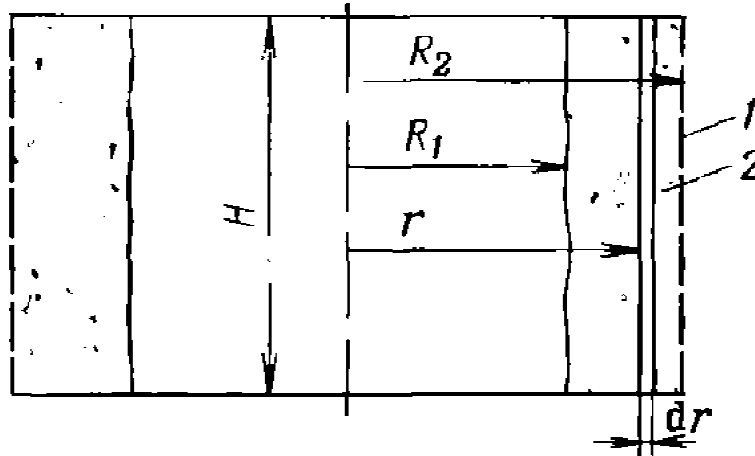
- 1 – кожух; 2 – перфорированный барабан с фильтровальной перегородкой;  
 3 – полый вал; 4 – вал-шток; 5 – поршень-толкатель;  
 6 – устройство, придающее поршню-толкателю вращательное и возвратно-поступательное движение; 7 – желоб; 8 – коническая воронка

При центрифугировании (рис. 8.3) скорость осаждения частиц, величина которых соответствует крупности разделения, может быть рассчитана по формуле Стокса с учетом ускорения центробежного поля:

$$w_p = \frac{d^2(\rho - \rho_{\text{ср}})\omega^2 r}{18\mu_{\text{ср}}}, \quad (8.1)$$

где  $d$  – крупность разделения, м;  $\rho$  и  $\rho_{\text{ср}}$  – плотность твердых частиц и жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\omega$  – угловая скорость вращения,  $\text{с}^{-1}$ ;  $r$  – радиус вращения, м;  $\mu_{\text{ср}}$  – вязкость жидкости,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ .

Скорость осаждения частиц, находящихся в центробежном поле, в  $\frac{\omega^2 r}{g}$  раз больше, чем при осаждении их только под действием силы тяжести.



**Рис. 8.3.** Схема барабана фильтрующей центрифуги:  
1 – стенка барабана; 2 – осадок

Величина  $\frac{\omega^2 r}{g}$  называется *фактором разделения*  $K_p$ , который по существу является центробежным критерием Фруда  $Fr_{ц}$ :

$$Fr_{ц} = K_p = \frac{F_{ц}}{G} = \frac{m w^2}{r m g} = \frac{w^2}{g r} = \frac{\omega^2 r^2}{g r} = \frac{r n^2}{900}, \quad (8.2)$$

где  $F_{ц}$  и  $G$  – центробежная сила и вес вращающегося тела соответственно, Н;  $m$  – масса вращающегося тела, кг;  $w$  – окружная скорость вращения барабана, м/с, которая связана с угловой скоростью  $\omega$  равенством  $w = \omega r = \frac{2\pi n}{60} r$ ,  $n$  – число оборотов в минуту.

Фактор разделения является одним из основных параметров, определяющих условия осаждения частиц под действием центробежной силы. Чем выше фактор разделения, тем интенсивнее протекает процесс центрифугирования. Величина фактора разделения устанавливается в современных центрифугах условиями прочности и динамической устойчивости машины. Значение  $K_p$  для центрифуг – 100–3000, движущая сила процесса осаждения в центрифугах на 2–3 порядка выше, чем в отстойниках, благодаря этому производительность центрифуг выше производительности отстойников и в них можно отделять мелкие частицы размером порядка 1 мкм.

Если представить скорость разделения как

$$w_p = \frac{dr}{d\tau}, \quad (8.3)$$

где  $r$  – радиус вращения частицы, м, то продолжительность разделения определится интегралом:

$$\tau_p = \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{w_p}, \quad (8.4)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – соответственно максимальный и минимальный радиусы вращения потока в барабане, м.

Подставив в выражение (8.4) скорость осаждения при центрифугировании согласно уравнению (8.1), можно теоретически рассчитать время (продолжительность) разделения частиц:

$$\tau_p = \frac{18\mu}{d^2(\rho - \rho_{cp})\omega^2} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \frac{18\mu}{d^2(\rho - \rho_{cp})\omega^2} \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (8.5)$$

Экспериментально продолжительность осаждения в центрифуге можно рассчитать из выражения (8.7), предполагая, что она должна быть равной времени осаждения частиц, т. е. времени, за которое жидкость проходит путь  $H$  (рис. 8.3) со скоростью

$$w_p = \frac{V}{F_{oc}}, \quad (8.6)$$

где  $V$  – секундный расход материала, м<sup>3</sup>/с;  $F_{oc}$  – площадь поверхности осаждения, м<sup>2</sup>. Следовательно, экспериментальная продолжительность осаждения в центрифуге, с:

$$\tau_{эксп} = \frac{H}{w_p} = \frac{H F_{oc}}{V}. \quad (8.7)$$

Зависимость между продолжительностью разделения, полученной экспериментально ( $\tau_{эксп}$ ), и продолжительностью разделения, рассчитанной аналитически ( $\tau_p$ ), можно выразить так:

$$\tau_{эксп} = \Phi \tau_p, \quad (8.8)$$

где  $\Phi$  – поправка на форму частиц и другие неучтенные факторы (например, зависимость вязкости от температуры и др.).

Фактор разделения не является исчерпывающей характеристикой центрифуг и их способности к разделению неоднородных жидких систем. Для суждения об этой способности в ряде случаев используют *индекс производительности центрифуги*  $\Sigma$ . Он определяется как произведение площади осаждения  $F_{oc}$  на фактор разделения  $K_p$ :

$$\Sigma = F_{oc} K_p. \quad (8.9)$$

Индекс производительности центрифуг имеет размерность площади и в расчетах фигурирует в квадратных метрах. Физический смысл этой важнейшей технологической

характеристики – это площадь гравитационного отстойника, способного обработать за тот же промежуток времени, что и центрифуга, то же количество загрязненной жидкости.

При расчете фильтрующих центрифуг определяют следующие параметры процесса центрифугирования.

Объемную массу разделяемой суспензии  $\rho_c$  (кг/м<sup>3</sup>) находим по формуле:

$$\rho_c = \frac{100 \rho \rho_{cp}}{100 \rho - (\rho - \rho_{cp}) C_1}, \quad (8.10)$$

где  $\rho$  и  $\rho_{cp}$  – плотность соответственно твердой фазы и жидкости в кг/м<sup>3</sup>;  $C_1$  – концентрация твердой фазы в суспензии, масс. %.

Объемную массу осадка  $\rho_{oc}$  (кг/м<sup>3</sup>) рассчитывают как

$$\rho_{oc} = \frac{100 \rho \rho_{cp}}{100 \rho_{cp} + (\rho - \rho_{cp}) b_k}, \quad (8.11)$$

где  $b_k$  – конечная влажность осадка, масс. %.

Тогда объемная доля жидкой фазы в суспензии  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_c}{\rho - \rho_{cp}}, \quad (8.12)$$

а объемная доля жидкой фазы во влажном осадке  $\beta$

$$\beta = \frac{\rho - \rho_{oc}}{\rho - \rho_{cp}}. \quad (8.13)$$

В процессе центрифугирования не достигается полного разделения суспензии на твердую и жидкую фазы. Осадок содержит жидкую фазу суспензии, а фугат – некоторое количество твердой фазы, так называемый *унос*. Как и любой другой технологический процесс, центрифугирование характеризуется качеством и интенсивностью процесса. Качество фугата характеризует:

- *степень очистки*  $\eta_o$  – отношение количества задержанной на перегородке твердой фазы к количеству твердой фазы, содержащейся в исходной суспензии:

$$\eta_o = \frac{C_1 - C_2}{C_1}, \quad (8.14)$$

где  $C_1$  – концентрация твердой фазы в суспензии, масс. %;  $C_2$  – концентрация твердой фазы в фильтрате, масс. %;

- *коэффициент уноса*  $K_y$  – отношение содержания твердой фазы в фильтрате и исходной суспензии:

$$K_y = \frac{C_2}{C_1} 100\% = (1 - \eta_o) 100\%; \quad (8.15)$$

- *коэффициент очистки*  $K_o$ , который показывает, во сколько раз снизилось содержание твердой фазы в результате фильтрования, т. е. отношение содержания твердой фазы в исходной суспензии и фильтрате:

$$K_o = \frac{100}{K_y}; \quad (8.16)$$

- *качество осадка*, которое оценивают содержанием в нем жидкой фазы, или влажностью,  $b_k$ . Содержание жидкой фазы выражается в массовых процентах:

$$b_k = \frac{m_{\text{вл}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{вл}}} 100 \%, \quad (8.17)$$

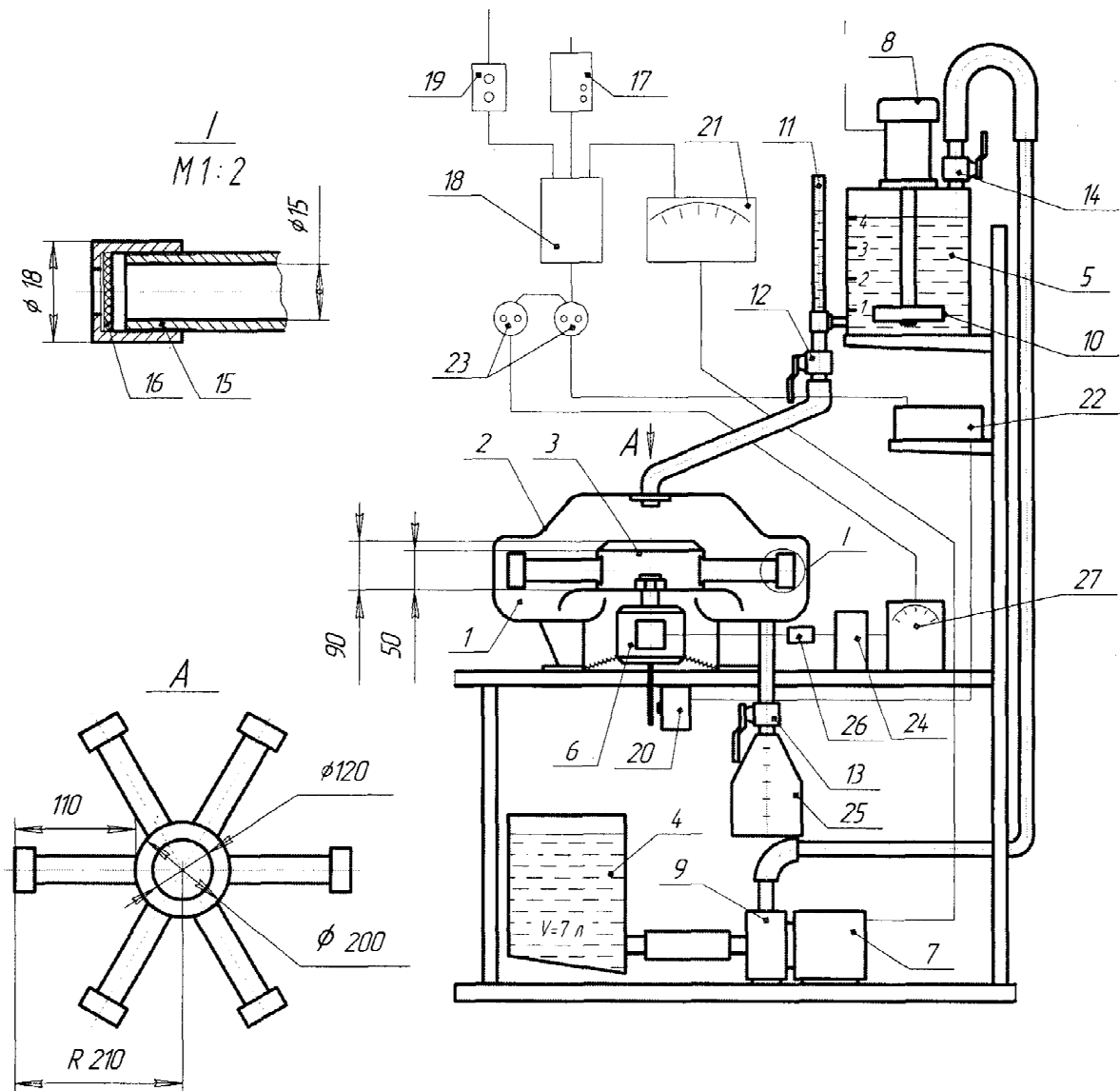
где  $m_{\text{вл}}$  – масса влажного осадка,  $m_{\text{сух}}$  – масса высушенного осадка, кг.

### **Описание установки**

Установка для изучения процесса разделения суспензий центрифугированием (рис. 8.4) состоит из корпуса центрифуги 1, крышки 2, вращающегося барабана 3, соединенного с валом электродвигателя 6 центрифуги. Исходная суспензия (суспензия на основе кварцевого песка) из бака 4 центробежным насосом 9 подается в расходный бак 5. Насос приводится во вращение электродвигателем 7.

В расходном баке суспензия перемешивается (в течение 5–7 мин) мешалкой 10, вращаемой электродвигателем 8. Уровень суспензии контролируется мерным стеклом 11. Через кран 12 производится наполнение барабана центрифуги и отбор пробы суспензии. Отбор фильтрата проводится через кран 13. Включение электродвигателя 8, вращающего мешалку 10, производится включателем 19. Регулирование оборотов мешалки производится лабораторным автоматическим трансформатором 21.

В цепь электродвигателя 6 центрифуги включены: сопротивление 26, конденсатор 24, регулятор оборотов 27. Число оборотов электродвигателя 6 измеряют с помощью датчика 20, соединенного со стробоскопическим тахометром 22. Управление электромотора 6 барабана центрифуги производится автоматическим выключателем 17, магнитным пускателем 18 и кнопками управления 19. Барабан 3 снабжен шестью патрубками 15, на резьбовой конец которых закручиваются колпачки 16 с латунной сеткой – фильтровальным материалом. За счет центробежных сил, возникающих при вращении барабана 3, через перфорированную перегородку (сетку) фильтрат поступает в корпус центрифуги и через кран 13 в бак 4.



**Рис. 8.4.** Схема установки для изучения работы фильтрующей центрифуги:  
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – барабан с патрубками; 4 – сборный бак;  
 5 – расходный бак; 6, 7, 8 – электродвигатели центрифуги, насоса и мешалки;  
 9 – центробежный насос; 10 – мешалка; 11 – мерное стекло; 12, 13, 14 –  
 краны; 15 – патрубок; 16 – колпачки с латунной сеткой и фильтром; 17 –  
 автоматический выключатель; 18 – магнитный пускатель; 19 – кнопки пуска (остановки); 20  
 – датчик строботактометра; 21 – регулятор оборотов  
 центрифуги; 22 – стробоскопический тахометр; 23 – розетки; 24 – конденсатор;  
 25 – мерный сосуд; 26 – сопротивление; 27 – регулятор оборотов

### Методика проведения испытания

В барабан 3, где расположены пальчиковые элементы центрифуги 15, периодически подают предварительно подготовленную суспензию (30 %-й водный раствор кварца) и одновременно включают электродвигатель центрифуги. Суспензия равномерно заполняет пальчиковые элементы и происходит процесс центрифугирования. От момента пуска центрифуги измеряют интервалы времени, через которые образуется определенный объем вытекающего фильтрата (~ 0,25 л), фиксируемый мерным сосудом 25. Объем подаваемой суспензии определяется степенью загрузки барабана центрифуги и обычно составляет половину его емкости. В процессе работы изменяют частоту вращения ротора барабана (600–1100 об/мин). Производят отбор проб исходной суспензии в мерную колбу при непрерывном вращении мешалки 10 в расходном баке. После завершения испытаний центрифугу останавливают и производят определение концентрации твердой фазы в исходной суспензии и фугате. Осадок, осевший на фильтровальных поверхностях пальчиковых элементов, снимают, высушивают и взвешивают, предварительно измерив его толщину на элементах. Все полученные результаты сводят в табл. 8.1.

### Обработка результатов испытания и составление отчета

Полный объем барабана центрифуги  $W_6$  (м<sup>3</sup>) рассчитывают из выражения

$$W_6 = \pi R_{61}^2 h + \frac{1}{3} \pi (H - h) (R_{61}^2 + R_{61} R_{62} + R_{62}^2) + 6 \pi r_{\phi}^2 l, \quad (8.18)$$

где  $R_{61}$  и  $R_{62}$  – соответственно радиус цилиндрической и верхней усеченной части барабана, м;  $H$  – полная высота барабана, м;  $h$  – высота цилиндрической части барабана, м;  $r_{\phi}$  – радиус фильтра пальчиковых элементов, м;  $l$  – длина патрубков барабана, м.

Коэффициент заполнения барабана  $\psi$  вычисляют по уравнению

$$\psi = \frac{W_p}{W_6}, \quad (8.19)$$

где  $W_p$  – объем поданной суспензии для центрифугирования, м<sup>3</sup>.

Площадь поверхности осаждения  $F_{oc}$  (м<sup>2</sup>):

$$F_{oc} = 6 \pi r_{\phi}^2. \quad (8.20)$$

Скорость разделения  $w_p$  определяют по уравнению:

$$w_p = \frac{\Delta W}{F_{oc} \Delta \tau}, \quad (8.21)$$

где  $\Delta W$  – объем собранного фугата за отрезок времени  $\Delta \tau$ .

По полученным экспериментальным данным строят график зависимости  $w_p = f(\tau)$ .

Продолжительность осаждения экспериментально вычисляют по уравнению

$$\tau_{\text{эксп}} = \frac{h_{\phi}}{w_p} = \frac{h_{\phi} F_{\text{ос}}}{V}, \quad (8.22)$$

где  $h_{\phi}$  – высота пальчиковых элементов, м (рис. 8.4).

Фактор разделения  $K_p$  определяют по выражению (8.2). Индекс производительности центрифуги  $\Sigma$  рассчитывают по уравнению (8.9).

Определение концентрации твердых частиц в исходной суспензии и фильтрате производят путем отбора проб в мерные цилиндры в двух точках: после крана 12 (исходная суспензия) и крана 13 (фугат). Содержание твердой фазы в суспензии  $C_1$  и в фильтрате  $C_2$  определяют весовым методом после фильтрования определенного количества пробы (~ 400 мл) на бумажных фильтрах по выражениям:

$$C_1 = \frac{m_{\text{ос.с}}}{m_c} 100 \% ; \quad (8.23)$$

$$C_2 = \frac{m_{\text{ос.ф}}}{m_{\phi}} 100 \% , \quad (8.24)$$

где  $m_{\text{ос.с}}$ ,  $m_{\text{ос.ф}}$  – масса высушенных осадков, содержащихся в суспензии и фугате, кг;  $m_c$ ,  $m_{\phi}$  – масса отобранных объемов суспензии и фугата, кг.

Объемную массу разделяемой суспензии и фугата определяют по формулам (6.10) и (8.11); объемную долю жидкой фазы в суспензии и влажном осадке – по формулам (8.12) и (8.13). Качество фильтрата характеризуют: степенью очистки  $\eta_o$ , которую определяют по уравнению (8.14); коэффициентом уноса  $K_y$ , определяемым по формуле (8.15); коэффициентом очистки  $K_o$ , который находят по выражению (8.16). Для определения влажности осадка  $b_k$  взвешивают пробу влажного осадка ( $m_{\text{вл}}$ ), высушивают его в сушильном шкафу до постоянной массы ( $m_{\text{сух}}$ ) и проводят расчет по уравнению (8.17). Результаты расчетов заносят в табл. 8.1.

**Таблица 8.1.** Экспериментальные данные и результаты расчетов

Номер замера	Время замера, $\tau$ , с	Интервалы между замерами, $\Delta\tau$ , с	Объем фильтрата, л		Частота вращения, $n$ , мин <sup>-1</sup>	Скорость разделения, $w_p$ , м/с	Степень очистки, $\eta_o$ , %	Коэффициент уноса, $K_y$ , %	Коэффициент очистки, $K_o$ , %	Содержание жидкой фазы в осадке, $b_k$ , %
			от начала испытания, $W$	приращение объема, $\Delta W$						
1										
2										

3									
4									
5									
6									
7									
8									
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									