



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

**Н.И. Барышникова**  
**Л.Г. Коляда**

## **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве лабораторного практикума*

Магнитогорск  
2016

**Рецензенты:**

начальник технического отдела,  
ООО «Алькор»  
**И.Н. Андрушко**

кандидат химических наук,  
доцент кафедры физической химии химической технологии,  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»  
**С.А. Крылова**

**Барышникова Н.И., Коляда Л.Г.**

**Процессы и аппараты пищевых производств** [Электронный ресурс] : лабораторный практикум / Надежда Ивановна Барышникова, Людмила Григорьевна Коляда ; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,14 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

Лабораторный практикум предназначен для подготовки и проведения лабораторных работ по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств». Включает работы по гидромеханическим, механическим, теплообменным и массообменным процессам. В работах изложены основы теории и формулы расчета параметров процессов, даны методики проведения экспериментов и обработки полученных результатов. В каждой лабораторной работе приведены контрольные вопросы для самопроверки. Лабораторный практикум по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств» предназначен для обучающихся по направлениям подготовки 19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья», 19.03.03 «Продукты питания животного происхождения».

УДК 66(075.8)

© Барышникова Н.И., Коляда Л.Г., 2016  
© ФГБОУ ВО «Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова», 2016

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ» .....	5
1.1. Теоретическая часть.....	5
1.2. Практическая часть.....	7
1.3. Контрольные вопросы .....	9
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ПЕРЕГОНКА С ВОДЯНЫМ ПАРОМ».....	9
2.1. Теоретическая часть.....	9
2.2. Практическая часть.....	11
2.3. Контрольные вопросы .....	14
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ» .....	14
3.1. Теоретическая часть.....	14
3.2. Практическая часть.....	17
3.3. Контрольные вопросы .....	20
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ» .....	20
4.1. Теоретическая часть.....	21
4.2. Практическая часть.....	23
4.3. Контрольные вопросы .....	25
5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА».....	26
5.1. Теоретическая часть.....	26
5.2. Практическая часть.....	30
5.3. Контрольные вопросы .....	31
6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ» .....	32
6.1. Теоретическая часть.....	32
6.2. Практическая часть.....	36
6.3. Контрольные вопросы .....	37
ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ .....	38
ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	40

## ВВЕДЕНИЕ

Курс «Процессы и аппараты пищевых производств» является связующим звеном между естественно-научными и специальными дисциплинами. Процессы и аппараты являются общими для различных отраслей промышленности, в том числе пищевой. Любой технологический процесс представляет собой ряд взаимосвязанных типовых технологических стадий, протекающих в аппаратуре определенного класса.

Основные процессы подразделяются на несколько групп, каждая из которых характеризуется общими закономерностями процессов, а аппараты, в которых протекают эти процессы, имеют одинаковое устройство.

Предметами изучения курса «Процессы и аппараты» являются:

- теория основных процессов;
- принципы устройства аппаратов;
- методы расчета основных размеров аппаратов.

Теория основных процессов базируется на законах физики, химии, физической химии, термодинамики и других наук. При анализе ряда процессов пищевых производств используется теория подобия, которая описывает различные процессы переноса движения, теплоты и энергии с помощью дифференциальных уравнений. В различных отраслях промышленности используются одинаковые по физической сущности технологические процессы: нагревание, сушка, перемешивание, фильтрование, ректификация и т.д.

При изучении принципов устройства аппаратов для промышленных установок учитываются физико-химические свойства перерабатываемых материалов.

Методы расчета аппаратов основаны на знании способов определения таких кинетических показателей, как движущая сила и скорость процесса. В зависимости от скорости протекания и движущей силы основные процессы подразделяются на:

- гидромеханические – это процессы, скорость которых определяется законами механики и гидродинамики. К ним относятся процессы перемещения жидкостей и газов по трубопроводам и аппаратам, перемешивания в жидких средах, разделения суспензий и эмульсий путем отстаивания, фильтрования, центрифугирования;

- теплообменные процессы – это процессы, связанные с переносом теплоты от более нагретых тел (или сред) к менее нагретым. К ним относятся процессы нагревания, охлаждения, конденсации, выпаривания и т.п. Скорость тепловых процессов определяется законами теплопередачи;

- массообменные или диффузионные процессы – процессы, связанные с переносом вещества в различных агрегатных состояниях из одной фазы в другую. К ним относятся абсорбция, адсорбция, перегонка и ректификация, экстракция, растворение и кристаллизация, увлажнение и сушка, и др. Скорость массообменных процессов определяется законами массопередачи;

- механические процессы – это процессы механического взаимодействия тел. К ним относятся процессы измельчения, классификации сыпучих материалов, прессования и др.;

- химические и биохимические процессы – процессы, связанные с изменением химического состава и свойств веществ, скорость протекания которых определяется законами химической кинетики.

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

# 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ»

**Цель работы:** экспериментальное изучение скорости осаждения твердых частиц под действием силы тяжести в зависимости от размеров и физических свойств твердого вещества и жидкости.

## 1.1. Теоретическая часть

Осаждение тяжелых частиц в жидкости или газе – это разделение неоднородной системы на составляющие фазы. Неоднородными или гетерогенными называют системы, состоящие из двух фаз: дисперсной, находящейся в тонкораздробленном состоянии, и дисперсионной, окружающей частицы дисперсной фазы. К неоднородным системам относятся суспензии, эмульсии, пены, пыли и др.

Основные методы разделения неоднородных систем в пищевой промышленности – осаждение, фильтрование и центрифугирование. Простейшим методом разделения является гравитационное осаждение, т. е. под действием сил тяжести. На практике его осуществляют в аппаратах, называемых отстойниками. Для расчета этих аппаратов необходимо знать скорость осаждения частиц.

В вязкой и плотной среде при седиментации частица движется под действием силы тяжести ( $G$ ) в гравитационном поле:

$$G = m_T \cdot g, \quad (1)$$

где  $m_T$  - масса частицы, кг;

$g$  - ускорение свободного падения, м/с.

Масса частицы:

$$m_T = V \cdot \rho_T, \quad (2)$$

где  $V$  - объем частицы, м<sup>3</sup>;

$\rho_T$  - плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>.

Тогда сила тяжести имеет вид:

$$G = \left(\frac{\pi \cdot d^3}{6}\right) \cdot \rho_T \cdot g, \quad (3)$$

где  $d$  - диаметр сферической частицы, м.

Подъемную силу Архимеда ( $A$ ), действующую на сферическую частицу, погруженную в жидкость, рассчитывают аналогично:

$$A = \left(\frac{\pi \cdot d^3}{6}\right) \cdot \rho_c \cdot g, \quad (4)$$

где  $\rho_c$  - плотность среды, в которой осаждается частица, кг/м<sup>3</sup>.

Сила вязкого трения ( $T$ ) направлена против движения частицы и определяется по закону Ньютона:

$$T = \xi \cdot S \cdot \rho_c \cdot \frac{W^2}{2}, \quad (5)$$

где  $\xi$  - коэффициент сопротивления среды;

$S$  – площадь сечения частицы, м<sup>2</sup> (для шара  $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ );

$W$  - скорость осаждения, м/с.

Условие равновесия для равномерного движения частицы:

$$G = A + T. \quad (6)$$

Подставив приведенные выше выражения для силы тяжести, силы Архимеда и силы вязкого трения выразим скорость осаждения частицы:

$$W_{oc} = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d (\rho_T - \rho_c)}{3 \cdot \xi \cdot \rho_c}}. \quad (7)$$

Уравнение включает коэффициент сопротивления среды  $\xi$ , который зависит от режима осаждения. При ламинарном режиме обтекания частицы сопротивление обусловлено только силами трения. При турбулентном режиме сопротивление обусловлено затратами энергии на образование турбулентных вихрей. При переходном режиме обе составляющие сопротивления сопоставимы.

Режим обтекания частицы средой можно определить по значениям критериев Рейнольдса ( $Re$ ) и Архимеда ( $A_r$ ):

$$Re = \frac{W \cdot d \cdot \rho_c}{\mu}, \quad (8)$$

$$A_r = \frac{d^3 \cdot \rho_c \cdot g (\rho_T - \rho_c)}{\mu^2}, \quad (9)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость среды.

Зависимость критерия Архимеда от критерия Рейнольдса описывается уравнением:

$$\xi \cdot Re^2 = \frac{4}{3} \cdot A_r. \quad (10)$$

Подставляя в это уравнение критические значения критерия Рейнольдса, отвечающие переходу из одной области осаждения в другую, можно найти критические значения критерия Архимеда. Критериальные зависимости представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Критериальные зависимости

Режим осаждения	$A_r$	Re	Формула расчета Re
Ламинарный	$A_r < 36$	$Re < 2$	$Re = \frac{A_r}{18}$
Переходный	$36 < A_r < 83000$	$2 < Re < 500$	$Re = 0,152 \cdot (A_r)^{0,715}$
Турбулентный	$A_r > 83000$	$Re > 500$	$Re = 1,74 \cdot (A_r)^{0,75}$

Коэффициент сопротивления среды  $\xi$  также зависит от критерия Re:

для ламинарного режима  $\xi = \frac{24}{Re}$ ;

для переходного режима  $\xi = \frac{18,5}{Re^{0,6}}$ ;

для турбулентного режима  $\xi = 0,44$ .

Таким образом, вычислив критерий Архимеда, по его величине определяют значение критерия Рейнольдса. По величине критерия Рейнольдса находят коэффициент сопротивления среды  $\xi$  и вычисляют скорость осаждения частицы.

Движение частиц будет направлено вниз, если разность плотностей дисперсной фазы  $\rho_T$  и дисперсионной среды  $\rho_C$  положительна. Под действием силы  $G$  частицы приходят в равномерно ускоренное движение. Но так как, кроме силы тяжести, на них действует сила сопротивления среды, направленная противоположно и возрастающая пропорционально скорости, то очень скоро сила сопротивления среды уравнивает силу тяжести, благодаря этому далее движение идет равномерно со скоростью  $W$ .

Частицы неправильной формы осаждаются с меньшей скоростью, чем сферические, за счет большего обтекания их средой. При значительной концентрации частиц в среде или при осаждении одиночной частицы в сосуде малого размера происходит стесненное осаждение, скорость которого меньше, чем свободного за счет дополнительного сопротивления от трения и соударения частиц. При ориентировочных расчетах среднюю скорость осаждения принимают равной половине теоретической скорости осаждения одиночной сферической частицы.

Для увеличения производительности отстойника необходимо предусмотреть меры по увеличению скорости осаждения частиц. Скорость осаждения возрастает с увеличением размера частиц, разности плотностей частицы и среды и уменьшением вязкости среды.

## 1.2. Практическая часть

### **Материалы и оборудование:**

1. Стекланные цилиндры вместимостью 1 литр.
2. Раствор глицерина разной концентрации.
3. Шарики различных диаметров.
4. Секундомер.
5. Аналитические весы.

## 6. Штангенциркуль

### Описание лабораторной установки

Установка состоит из трех стеклянных цилиндров, заполненных глицерином с разной концентрацией. Вверху и внизу каждого цилиндра нанесены метки, фиксирующие расстояние, которое частицы проходят в процессе осаждения.

Замеряя время, в течение которого частицы проходят расстояние между метками, можно определить фактическую скорость осаждения.

### Порядок выполнения работы

1. Замерить штангенциркулем диаметры 3-х шариков и рассчитать среднее арифметическое значение  $d_{cp}(м)$ .

2. Взвесить их на аналитических весах и рассчитать среднее арифметическое значение массы  $m_{cp}(кг)$ .

3. По полученным данным рассчитать их плотность  $\rho_T(\frac{кг}{м^3})$ , учитывая, что объем шара равен:  $V = \frac{\pi \cdot d^3}{6} (м^3)$ .

4. Шарики берут пинцетом, вводят на уровень поверхности жидкости и отпускают. Секундомером замеряют время прохождения  $\tau$  шарика между метками. Рассчитывают  $\tau_{cp}(с)$  по трем параллельным замерам.

5. Далее в том же порядке проводят второй и третий опыты с шариками другого диаметра.

6. Результаты опытов и расчетов заносят в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Результаты работы

№ опыта	№ замера	Жидкость		Частица		$\tau_{cp}(с)$	Ar	Re	$\zeta$	Скорость осаждения, м/с		$\varphi, \%$
		$\rho_{ж}, \frac{кг}{м^3}$	$\mu, Па \cdot с$	$d_{cp}(м)$	$\rho_T(\frac{кг}{м^3})$					фактическая $W_{он}$	расчетная $W_{ос}$	
1	1	1270	1,48	1								
	2			2								
	3			3								
2	1	1250	0,316	1								
	2			2								
	3			3								
3	1	1230	0,107	1								
	2			2								
	3			3								

### Обработка результатов экспериментов

1. Рассчитывают фактическую скорость осаждения частицы как отношение расстояния между метками ко времени осаждения  $\tau$ .

2. Для каждого опыта рассчитывают значение критерия Архимеда ( $A_r$ ) по формуле (9).

3. По полученным значениям критерия  $A_r$  определяют режим осаждения твердой частицы, рассчитывают значение критерия Рейнольдса (Re) (табл. 1) и коэффициент сопротивления среды ( $\xi$ ).

4. Полученные результаты заносят в таблицу 2.

5. Теоретическую скорость осаждения твердой частицы шарообразной формы рассчитывают по формуле (7).

6. Сравнивая фактическую скорость осаждения частиц, полученную из опытных данных  $W_{on}$ , с расчетной  $W_{oc}$ , находят поправочный коэффициент, учитывающий отклонение действительного процесса от теоретического:

$$\varphi = \frac{W_{on}}{W_{oc}} \cdot 100\% . \quad (11).$$

7. Сделать вывод по работе.

### 1.3. Контрольные вопросы

1. Какие силы действуют на осаждающуюся частицу в жидкости и как их рассчитать?

2. Какие параметры влияют на величину скорости гравитационного осаждения твердой частицы?

3. Каким образом можно увеличить скорость осаждения?

4. Написать и дать объяснение критерию  $A_r$ .

5. Написать и дать объяснение критерию Re.

6. Чем обусловлена сила сопротивления среды?

7. Как рассчитать коэффициент сопротивления среды для разных режимов осаждения?

8. Что такое свободное и стесненное осаждение? В каком случае скорость осаждения выше и почему?

9. Как зависит скорость осаждения от формы частиц?

10. Осаждение каких частиц, крупных или мелких, лимитирует производительность отстойников?

11. От каких факторов зависит производительность отстойника?

12. Как рассчитать скорость осаждения твердой частицы?

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ПЕРЕГОНКА С ВОДЯНЫМ ПАРом»

### **Цель работы:**

1. Изучить процесс перегонки органической жидкости с водяным паром.

2. Определить органическую жидкость, участвующую в перегонке, по температуре кипения смеси.

3. Определить расход водяного пара.

### 2.1. Теоретическая часть

Перегонка или дистилляция - процесс разделения жидких смесей на практически чистые компоненты или на фракции различного состава. Разделение

перегонкой основано на различной летучести компонентов при одной температуре. Компонент смеси, обладающий большей летучестью, называют легколетучим. Он кипит при более низкой температуре (низкокипящий компонент). Компонент, обладающий меньшей летучестью (труднолетучий), кипит при более высокой температуре (высококипящий компонент).

Простую перегонку осуществляют путем однократного частичного испарения жидкости и последующей конденсации пара. Отогнанная фракция (дистиллят) обогащена относительно более летучим (низкокипящим) компонентом, а остаток жидкости - менее летучим (высококипящим).

Перегонка с водяным паром является эффективным методом очистки органических соединений, не растворимых или трудно растворимых в воде. Она особенно пригодна в тех случаях, когда продукт реакции загрязнен большим количеством труднолетучих смолистых примесей. Этот способ позволяет проводить перегонку веществ при температуре, значительно меньшей, чем их температура кипения. Сущность процесса состоит в непосредственном введении перегретого или насыщенного пара в дистиллируемую жидкую смесь. Так как в образующейся при этом парообразной смеси присутствует водяной пар, то на долю отгоняемого компонента приходится лишь его парциальное давление  $P_k$ , которое ниже полного рабочего давления  $P$  и соответствует более низкой температуре насыщения:

$$P = P_{II} + P_k, \quad (1)$$

где  $P_{II}$  – парциальное давление водяного пара в смеси.

В случае практически нерастворимых друг в друге жидкостей испарение каждой из них идет независимо от другой и давление паров каждого компонента при неизменной температуре остается постоянным при любых соотношениях масс взятых жидкостей. Кроме того, одним из компонентов паровой смеси является водяной пар, поэтому при проведении процесса под атмосферным давлением, поскольку  $P$  меньше 100 кПа (760 мм. рт. ст.), температура кипения гетерогенной жидкой смеси в кубе будет ниже 100°C

На кривых  $P-t$ , выражающих зависимость давления паров от температуры для отгоняемых веществ, искомые температуры кипения гетерогенных смесей соответствуют абсциссам точек пересечения кривых  $P-t$  для воды отгоняемых веществ, т. к. ординаты точек удовлетворяют условию:

$$P_B = P_{II} + P_k = 760 \text{ мм. рт. ст.} \quad (2)$$

Отношение количества отогнанного компонента  $G_K$  к количеству водяного пара  $G_B$ :

$$\frac{G_K}{G_B} = \frac{P_K \cdot M_K}{P_B \cdot M_B}, \quad (3)$$

где  $G_K$  и  $G_B$  - массы, кг;

$P_K$  и  $P_B$  – давления паров компонента и воды, Па;

$M_K$  и  $M_B$  – молекулярные массы, моль.

Расход пара:

$$G_B = G_K \cdot \frac{M_B \cdot (P - P_K \cdot \varphi)}{M_K \cdot P_K \cdot \varphi}, \quad (4)$$

где  $P$  – общее давление;

$\varphi$  – степень насыщения (0,7-0,8).

Парциальное давление водяного пара:

$$P_B = P - \varphi \cdot P_K. \quad (5)$$

Так как условием начала кипения является равенство давления паров над жидкостью внешнему давлению, то при нагревании общее давление пара над системой достигает значения внешнего давления раньше, чем это возможно для паров чистых веществ. Поэтому такие жидкости всегда кипят при более низкой температуре, чем компоненты, образующие их, и температура кипения остается постоянной, пока полностью не отгонится один из компонентов.

В случае перегонки с водяным паром при нормальном давлении температура кипения смеси всегда будет меньше 100 °С.

## 2.2. Практическая часть

### **Материалы и оборудование:**

- Установка для перегонки (рис. 1);
- Дистиллированная вода;
- Органические жидкости (бензол, толуол, гексан и др.);
- Мерный цилиндр.

### **Описание лабораторной установки**

На рис. 2.1 приведена схема установки для перегонки смеси жидкостей. Установка состоит из перегонной колбы 6, куда загружается исследуемая смесь жидкостей, водяной бани 8, где происходит нагревание перегонной колбы. Пары из колбы отводятся по вертикальной трубке со стабилизатором состава пара 2, в верхнюю часть которого вставлен термометр 1. Пары конденсируются в водяном холодильнике 3, и образовавшаяся жидкость расслаивается в мерной емкости 5.

Перегонку, как правило, ведут до тех пор, пока дистиллят не перестанет разделяться на две фазы.

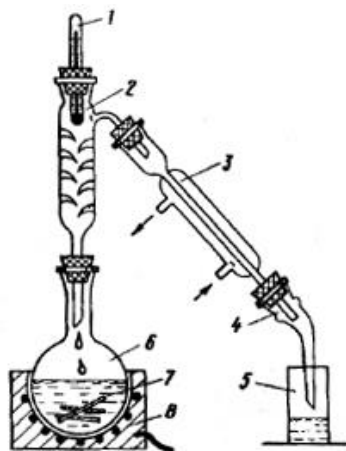


Рис. 2.1 Установка для перегонки:

- 1 – термометр, 2 – дефлегматор, 3 - холодильник, 4 – аллонж, 5 – приемник, 6 - перегонная колба, 7 – капилляры, 8 – нагреватель

### Порядок выполнения работы

1. В колбу налить 150 мл воды и 150 мл перегоняемой жидкости.
2. Пустить воду в холодильник, включить нагреватель водяной бани и нагреть смесь жидкостей. До установления постоянной температуры кипения собрать первый погон.
3. При постоянной температуре кипения собрать 100 мл дистиллята в сухую мерную колбу.
4. По температуре кипения из графика «Зависимость давления насыщения пара от температуры» (Приложение 1) определить перегоняемую жидкость.
5. Записать атмосферное давление.
6. Исходные данные проведенного опыта и результаты определения записать в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Исходные данные и результаты перегонки

Перегоняемая жидкость	
Температура кипения смеси, °С	
Атмосферное давление ( $P_{\text{атм}}$ ), мм рт. ст.	

7. Для интервала температур от 40 до 120 °С рассчитать давление парообразной смеси  $P$  (  $P_{\text{см}}$ ) по формуле Антуана:

$$\ln P = A - \frac{B}{C + T}, \quad (6)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – коэффициенты из таблицы 2.2,  
 $T$  – температура, К.

Таблица 2.2

Параметры для расчета по формуле Антуана

Органическая жидкость	A	B	C	M	$\rho, \text{г/см}^3$
Толуол	16,0137	3096,52	-53,67	92	0,867
Гексан	15,8666	2697,55	-48,78	86	0,655
Анилин	7,63851	1913,8	220	93	1,022
Бензол	15,9008	2788,51	-52,36	78	0,890

8. Расчетные данные занести в таблицу 3.

9. Парциальные давления паров перегоняемой жидкости в смеси интервала температур от 40 до 120 °С определить по графику «Зависимость давления насыщенного пара от температуры» (рис. 2.2) как ординаты точек пересечения кривых  $p$ - $t$  для воды и перегоняемой жидкости. Полученные данные ( $P_{\text{ж}}$ ) занести в таблицу 2.3.

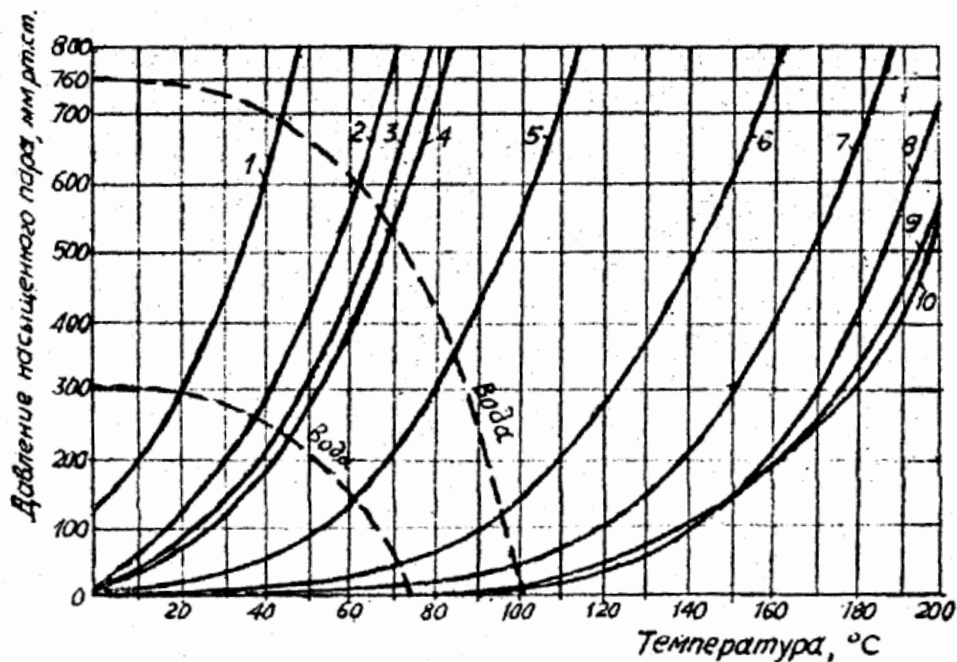


Рис. 2.2. Зависимость давления насыщенного пара органических жидкостей от температуры:

1 – сероуглерод, 2 – гексан, 3 – четыреххлористый углерод, 4 – бензол, 5 – толуол, 6 – скипидар, 7 – анилин, 8 – крезол, 9 – нитробензол, 10 – нитротолуол

10. Рассчитать парциальное давление водяного пара в смеси ( $P_{вод}$ ) для интервала температур 40-120 °С по формуле:

$$P_{см} = P_{вод} + P_{ж} \quad (7)$$

Полученные данные занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3

Давление перегонки с водяным паром смеси \_\_\_\_\_ и воды при различных температурах

Температура, °С	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Температура, К	313	323	333	343	353	363	373	383	393
$P_{вод}$ , мм рт.ст.									
$P_{ж}$ , мм рт.ст.									
$P_{см}$ , мм рт.ст.									

11. По данным таблицы 3 построить зависимость  $P_{ж}=f(t)$ . Отметить на графике температуру кипения ( $t_{кип}$ ) смеси при давлении  $P_{атм}$ .

12. Найти значение парциального давления перегоняемой жидкости ( $P_{ж}$ ) при этой температуре кипения путем пересечения перпендикуляра от  $t_{кип}$  с зависимостью  $P_{ж}=f(t)$ .

13. Определить расход пара на перегонку по формуле:

$$G_{вод} = G_{ж} \cdot \frac{M_{вод}}{M_{ж}} \cdot \frac{(P - P_{ж})}{P_{ж} \cdot \varphi} \quad (8)$$

где  $G_{вод}$  – количество водяного пара, кг;

$G_{ж}$  – количество перегоняемой жидкости, кг;

$M_{вод}, M_{ж}$  – мольные массы воды и перегоняемой жидкости;

$P_{ж}$  – давление насыщенного пара перегоняемой жидкости при температуре перегонки;

$P$  – давление перегонки ( $P=P_{атм}$ );

$\phi$  – степень насыщения (0,7-0,8).

14. Определить массовую долю в парах перегоняемой жидкости и воды:

$$\bar{y}_{ж} = \frac{G_{ж}}{G_{ж} + G_{вод}}, \quad \bar{y}_{вод} = 1 - \bar{y}_{ж}. \quad (9)$$

15. Сделать выводы по работе.

### 2.3. Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется перегонкой?
2. В чем заключается сущность закона Рауля?
3. Чему равно давление паров над поверхностью бинарной смеси?
4. Какой параметр является действующей силой перегонки?
5. Какие методы применяют для разделения жидких однородных систем?
6. Что такое простая перегонка? Виды перегонки.
7. В чем заключается сущность закона Дальтона?
8. Как определяется температура кипения при перегонке с водяным паром?
9. Диаграмма для определения температуры кипения.
10. Как определить расход пара?
11. В чем заключаются различия в поведении идеальных и реальных смесей?
12. Схема простой перегонки.
13. Схема простой перегонки с дефлегмацией.
14. С какой целью применяют дефлегмацию?

## 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ»

### Цель работы:

1. Изучение процесса теплоотдачи и теплопередачи.
2. Определение коэффициентов теплоотдачи от горячего теплоносителя стенке трубы, от стенки трубы холодному теплоносителю.

### 3.1. Теоретическая часть

Перенос энергии в форме тепла происходит между телами, имеющими различную температуру, и называется *теплообменом*.

Движущаяся среда (газ, пар, жидкость), используемая для переноса теплоты, называется *теплоносителем*. Движущая сила процесса теплообмена – разность температур между двумя теплоносителями.

Перенос тепла от более нагретого теплоносителя к менее нагретому через разделяющую твердую стенку называется *теплопередачей*. Процесс теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой называется *теплоотдачей*. Процесс теплопередачи складывается из трех стадий:

- 1) процесс теплоотдачи от горячего теплоносителя стенке трубы;
- 2) процесс теплопроводности через стенку;
- 3) процесс теплоотдачи от стенки трубы холодному теплоносителю.

Для установившегося процесса, параметры которого не меняются во времени, основное уравнение теплопередачи имеет вид:

$$Q = KF\Delta t_{cp}, \quad (1)$$

где  $Q$  - тепловой поток или количество переданной теплоты, Вт;  $K$  - коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>К;  $F$  - площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{cp}$  - средняя разность температур горячего и холодного теплоносителей.

Коэффициент теплопередачи показывает, какое количество теплоты передается от горячего теплоносителя к холодному через 1 м<sup>2</sup> поверхности при средней разности температур в 1 градус за 1 секунду.

Коэффициент теплопередачи определяется по уравнению:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи соответственно от горячего теплоносителя стенке и от стенки холодному теплоносителю, Вт/м<sup>2</sup>К;  $\delta$  - толщина стенки трубы, м;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/мК.

Коэффициенты теплоотдачи зависят от большого числа факторов: гидравлических параметров потока (режима движения), тепловых свойств жидкости. Поэтому расчет коэффициентов теплоотдачи проводят на основе критериального уравнения:

$$Nu = f(Re, Pr, \Gamma...), \quad (3)$$

В данное уравнение входят:

определяемый критерий - критерий Нуссельта  $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ ; (4)

определяющие критерии: критерий Рейнольдса  $Re = \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\mu}$ ; (5)

критерий Прандтля  $Pr = \frac{\mu \cdot l}{\lambda}$  (6)

Величины, используемые в формулах (4) – (6):

$\mu$  - динамическая вязкость, Па·с;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/м·К;  $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  - теплоемкость жидкости, Дж/кг·К;  $w$  - скорость движения жидкости, м/с;  $l$  - характерный размер потока, м;  $\Gamma$  – геометрический параметр.

В данной работе коэффициент теплопередачи определяется двумя методами: экспериментально по формуле (1) и аналитически по формуле (2).

Для определения  $K$  по формуле (1) вычисляют тепловую нагрузку  $Q$  путем составления баланса тепла. Тепловая нагрузка  $Q$  определяется по формулам:

$$\begin{aligned} Q &= G_1 \cdot c_1 \cdot (T_1 - T_2) \\ Q &= G_2 \cdot c_2 \cdot (t_2 - t_1) \end{aligned} \quad (7)$$

где  $G_1$  - массовый расход горячего теплоносителя, кг/с;  $G_2$  - массовый расход холодного теплоносителя, кг/с;  $c_1$  - теплоемкость горячего теплоносителя, Дж/кг·К;  $c_2$  - теплоемкость холодного теплоносителя, Дж/кг·К.

Поверхность теплообмена для цилиндрической однослойной стенки  $F$  рассчитывают по формуле:

$$F = \pi \cdot d_{cp} \cdot L, \quad (8)$$

где  $d_{cp} = (d_n + d_e)/2$ , а  $d_n$  и  $d_e$  - наружный и внутренний диаметры трубки, м;  $L$  - общая длина трубки, м.

Средняя разность температур зависит от способа движения теплоносителей.

При противотоке схема процесса выглядит следующим образом:

для горячего теплоносителя  $T_1$  ----->  $T_2$

для холодного теплоносителя  $t_2$  ----->  $t_1$ .

Согласно этой температурной схеме вычисляются средние температурные напоры (средняя разность температур) на входе и выходе из аппарата:

$$\text{на входе: } \Delta t_1 = T_1 - t_2 \quad (9)$$

$$\text{на выходе: } \Delta t_2 = T_2 - t_1 \quad (10).$$

При прямотоке температурная схема изображается так:

для горячего теплоносителя  $T_1$  ----->  $T_2$

для холодного теплоносителя  $t_1$  ----->  $t_2$ .

Согласно температурной схеме вычисляются средние температурные напоры (средняя разность температур) на входе и выходе из аппарата:

$$\Delta t_1 = T_1 - t_1 \quad (11)$$

$$\Delta t_2 = T_2 - t_2 \quad (12).$$

Для обеих температурных схем из двух температурных разностей ( $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ ) определяется большая ( $\Delta t_б$ ) и меньшая ( $\Delta t_м$ ), затем проверяется условие:

$$\Delta t_б / \Delta t_м < 2. \quad (13)$$

Если условие выполняется, то средняя разность температур вычисляется как среднеарифметическая по формуле:

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_б + \Delta t_м) / 2 \quad (14)$$

Если условие (8) не выполняется, то средняя разность температур вычисляется как среднелогарифмическая по формуле:

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_6 - \Delta t_m) / \ln (\Delta t_6 / \Delta t_m). \quad (15)$$

Для определения  $K$  по формуле (2) необходимо вычислить по отдельности для горячего и холодного теплоносителей значение критерия  $Re$ , для чего необходимо знать конкретный вид выражения (3).

В данной работе геометрия потоков теплоносителей следующая: горячий теплоноситель движется в коаксиальном (межтрубном кольцевом) пространстве, а холодный – по внутренней трубке. Для первого потока выражение (3) приобретает вид:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{D}{d_n}\right)^{0,45} \quad (16)$$

где  $D$  - внутренний диаметр большой трубы, м;  $d_n$  - наружный диаметр внутренней трубы, м.

Для потока во внутренней трубе выражение зависит от критерия  $Re$ :

при $Re > 10^4$	$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$
при $2300 < Re < 10^4$	$Nu = 0,008 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,43}$
при $Re < 2300$	$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43}$

В качестве определяющего размера при расчете критерия  $Re$  используют диаметр внутренней трубы.

### 3.2. Практическая часть

#### Описание лабораторной установки

Установка состоит из двух секций теплообменника типа «труба в трубе», средств регулирования потоков воды и контроля температур (рис. 3.1). В качестве нагревателя воды используется термостат типа NBE.

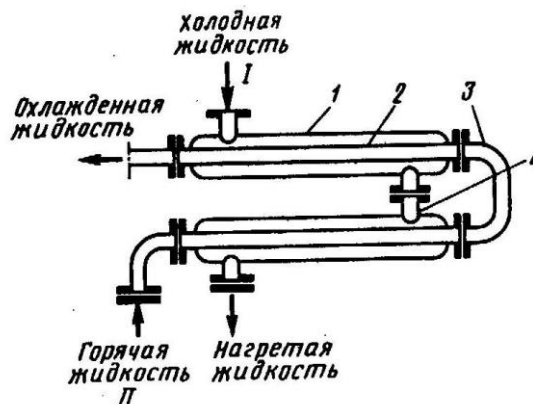


Рис. 3.1. Теплообменник типа «труба в трубе»:

1-наружная труба; 2-внутренняя труба; 3-колени; 4-патрубок

Внутренняя труба теплообменника изготовлена из латуни: наружный диаметр 10 мм, внутренний диаметр 8 мм. Теплопроводность латуни 93 Вт/м·К. Внешняя труба выполнена из пластика ПВХ: внутренний диаметр 18 мм. Длина каждой секции 970 мм.

Общий поток жидкости из водопровода делится на два: один – холодный (из водопровода) поступает во внутреннюю трубу, другой – горячий (вода проходит через термостат) в коаксиальное пространство каждой секции теплообменника.

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучить установку и схему движения теплоносителей.
2. Проверить уровень воды в термостате (~50 мм от края).
3. Выставить рабочую температуру термостата по шкале контактного термометра в пределах 55 – 60 °С.
4. Подключить вилку питания к сети 220 В.
5. Пустить воду в трубное и межтрубное пространство теплообменника.
6. Отрегулировать потоки до приблизительно одинаковых величин в пределах 220-280 мл/мин и определить расход воды теплоносителей с использованием мерного стакана и секундомера.
7. После установления стационарного режима теплообменника (когда перестанет меняться температура теплоносителей) записать показания режима в таблицу 3.1. Определить расход воды теплоносителей.

Таблица 3.1

#### Полученные результаты при противотоке

Температура, °С				Расход воды, м <sup>3</sup> /час	
Горячая вода		Холодная вода		Горячая вода	Холодная вода
вход T <sub>1</sub>	выход T <sub>2</sub>	вход t <sub>1</sub>	выход t <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>

8. Изменив режим путем смены направления движения теплоносителей, выждать необходимое время для получения стационарного режима. Записать показания режима в таблицу 3.2. Определить расход воды теплоносителей.

Таблица 3.2

#### Полученные результаты при прямотоке

Температура, °С				Расход воды, м <sup>3</sup> /час	
Горячая вода		Холодная вода		Горячая вода	Холодная вода
вход T <sub>1</sub>	выход T <sub>2</sub>	вход t <sub>1</sub>	выход t <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>

9. После окончания работы необходимо отключить термостат, закрыть подачу воды через теплообменник.

### **Обработка результатов эксперимента**

#### **Расчет коэффициента теплопередачи K по данным эксперимента**

1. Вычислить площадь теплообменника – площадь внутренних труб во всех секциях:

$$F = \frac{\pi \cdot (d_в + d_н)}{2} \cdot l \cdot n,$$

где  $l$  - длина одной секции, м;  $n$  - количество секций.

2. Составить температурную схему и вычислить среднюю разность температур  $\Delta t_{cp}$  отдельно для каждого опыта по формулам (9) – (15).

3. Привести объемный расход ( $\text{м}^3/\text{час}$ ) к массовому ( $\text{кг}/\text{с}$ ) по формуле:

$$G_1 = V_1 \cdot \rho_0 / 3600 ,$$

где  $V_1$  - расход горячего теплоносителя,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\rho_0$  - плотность жидкости при средней температуре,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Для расчета плотности воды при температуре  $T$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) можно использовать приближенную формулу:

$$\rho(T) = \frac{995,7}{0,984 + 0,483 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273)} \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

4. Из уравнения теплового баланса вычислить тепловую нагрузку:

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (T_1 - T_2) ,$$

где  $c_1$  – теплоемкость горячего теплоносителя при средней температуре,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{K}$ .

Для расчета теплоемкости воды при температуре  $T$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) можно использовать приближенную формулу:

$$c(T) = [4194 - 1,15 \cdot (T - 273) + 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot (T - 273)^2] \cdot (\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{K})$$

5. Вычислить коэффициенты теплопередачи ( $\text{Вт}/\text{м}^2\text{K}$ ) для противотока и прямотока:

$$K = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{cp}} .$$

### **Расчет коэффициента теплопередачи $K$ по критериальным уравнениям**

1. Рассчитать сечение потоков теплоносителей.

Холодный теплоноситель движется внутри малой трубки и сечение его потока определяется по формуле:

$$F_{хол} = \frac{\pi d^2}{4} .$$

Горячий теплоноситель движется в межтрубном пространстве, сечение которого определяется по формуле:

$$F_{гор} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} .$$

2. Рассчитать отдельно для каждого опыта скорости потоков:

$$W_{хол(гор)} = \frac{V_{хол(гор)}}{3600 \cdot F_{хол(гор)}} .$$

3. Рассчитать величину критерия  $Re$  для холодного и горячего теплоносителей для каждого опыта. Для расчета динамического коэффициента вязкости  $\mu$  ( $\text{Па}\cdot\text{с}$ ) при температуре  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) можно использовать 'эмпирическую формулу Пуазейля:

$$\mu = \frac{0,000183}{1 + 0,0337t + 0,000221t^2}$$

где  $t$  – температура воды.

4. Рассчитать величину критерия  $Pr$  для холодного и горячего теплоносителей для каждого опыта. Для расчета теплопроводности воды при температуре  $T$  (Вт/м·К) можно использовать приближенную формулу:

$$\lambda = 0,553(1 + 0,003(T - 273)) .$$

5. Рассчитать величину критерия  $Nu$  отдельно для холодного и горячего теплоносителей в каждом опыте.

6. Рассчитать значение коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{\text{экв}}},$$

где  $d_{\text{экв}}$  для внутренней трубки равен  $d_g$ , а для межтрубного пространства

$$d_{\text{экв}} = \frac{D^2 - nd_n^2}{D + nd_n}.$$

7. Рассчитать коэффициент теплопередачи  $K$  по формуле (2).

8. Сделать вывод по работе.

### 3.3. Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется теплообменом?
2. Способы переноса теплоты.
3. Что называется теплоотдачей?
4. Что называется теплопередачей?
5. Основное уравнение теплопередачи.
6. Какой процесс называется теплопроводностью?
7. Закон Фурье.
8. Основной закон теплоотдачи.
9. Что характеризует критерий Нуссельта?
10. Что характеризует критерий Прандтля?
11. Критериальное уравнение конвективного теплообмена.
12. Расчет средней разности температур при противотоке теплоносителей.
13. Расчет средней разности температур при прямотоке теплоносителей.

## 4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ»

**Цель работы:**

1. Освоение методики фильтрования суспензии.
2. Определение констант фильтрования.
3. Определение сопротивлений осадка и фильтровальной перегородки.

#### 4.1. Теоретическая часть

**Фильтрация** – процесс разделения неоднородных систем (суспензий, пылей и туманов) через пористую перегородку, способную пропускать жидкость или газ, но задерживать взвешенные в них твердые частицы. В результате неоднородная система разделяется на осветленную жидкость (фильтрат) и осадок.

Свойства фильтровальных перегородок должны соответствовать следующим требованиям: хорошо задерживать твердые частицы, иметь небольшое гидравлическое сопротивление, обладать достаточной механической прочностью, быть химически устойчивыми, легко отделяться от осадка. В качестве фильтрующих материалов применяют зернистые материалы: песок, гравий, различные ткани, картон, сетки, пористые полимерные материалы и др.

По целевому назначению процесс фильтрации может быть очистным или продуктовым. Очистное фильтрация применяют для разделения суспензий, очистки растворов от различных включений. В этом случае целевым продуктом является фильтрат. Назначение продуктового фильтрации – выделение из суспензии твердых частиц в виде осадка.

Движущая сила процесса фильтрации – разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки. Разность давлений можно получить разными способами: созданием избыточного давления над фильтровальной перегородкой либо созданием вакуума под фильтровальной перегородкой. При  $\Delta P = const$  процесс фильтрации описывается кинетическим уравнением:

$$\frac{dV}{Fd\tau} = \frac{\Delta p}{\mu(R_0 + R_{\phi.n})}, \quad (1)$$

где -  $V$  - объем фильтрата, м<sup>3</sup>;  $F$  - площадь поверхности фильтрации, м<sup>2</sup>;  $\tau$  - продолжительность фильтрации, с;  $\Delta p$  - перепад давлений, Па;  $\mu$  - вязкость фильтрата, Па·с;  $R_0$  и  $R_{\phi.n}$  - сопротивление соответственно осадка и фильтровальной перегородки, м<sup>-1</sup>.

Как видно из уравнения (1), скорость фильтрации тем больше, чем больше  $\Delta p$  и меньше вязкость среды и сопротивление процессу.

Объем фильтрата  $V$ , прошедшего через 1 м<sup>2</sup> фильтрующей поверхности за время  $\tau$ , и продолжительность фильтрации  $\tau$  связаны уравнением:

$$V^2 + 2VC = K\tau, \quad (2)$$

где  $C$  – константа фильтрации, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>;  $K$  – константа фильтрации, учитывающая режим процесса фильтрации и физико-химические свойства осадка в жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Константа фильтрации  $K$ , отнесенная к 1 м<sup>2</sup> фильтрующей поверхности, связана с удельным сопротивлением осадка уравнением:

$$K = \frac{2\Delta p}{\mu cr_0}, \quad (3)$$

где  $r_0$  - удельное сопротивление осадка (в расчете на 1 кг содержащегося в нем твердого сухого вещества), м/кг;  $c$  - масса сухого твердого вещества, отлагающегося на фильтре при прохождении через фильтрующую поверхность 1 м<sup>3</sup> фильтрата, кг/м<sup>3</sup>.

Величина  $c$  может быть выражена через концентрацию фильтруемой суспензии  $x$ :

$$c = \frac{\rho x}{1 - mx}, \quad (4)$$

где  $\rho$  - плотность фильтрата, кг/м<sup>3</sup>;  $x$  - массовая концентрация твердой фазы в суспензии, кг/кг;  $m$  - масса влажного осадка в расчете на 1 кг содержащегося в нем сухого вещества, кг/кг.

При подстановке значения  $c$  в уравнение (3) получаем следующую формулу для константы фильтрования  $K$  (в м<sup>2</sup>/с):

$$K = \frac{2\Delta p(1 - mx)}{\mu r_0 x \rho}. \quad (5)$$

Если известна константа фильтрования  $K$ , то удельное сопротивление осадка  $r_0$  может быть найдено из уравнения (5), решенного относительно  $r_0$ :

$$r_0 = \frac{2\Delta p(1 - mx)}{K \mu x \rho}. \quad (6)$$

Константа фильтрования  $C$  (в м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>), характеризующая сопротивление фильтрующей перегородки и отнесенная к 1 м<sup>2</sup> поверхности фильтра, определяется следующим выражением:

$$C = \frac{r_\phi}{r_0 c}, \quad (7)$$

где  $r_\phi$  - удельное сопротивление фильтрующей перегородки (на 1 м<sup>2</sup> поверхности), м/м<sup>2</sup>.

Выразив величину  $c$  из уравнения (4) и подставив в уравнение (7), получим следующее выражение для расчета константы фильтрования  $C$ :

$$C = \frac{r_\phi(1 - mx)}{r_0 x \rho}. \quad (8)$$

Следовательно, если значение константы фильтрования  $C$  известно, то удельное сопротивление фильтрующей перегородки может быть вычислено по формуле:

$$r_\phi = \frac{C r_0 x \rho}{1 - mx}. \quad (9)$$

На практике  $r_{\phi}$  определяют экспериментальным путем. После преобразования уравнение (2) приобретает вид:

$$\tau/V = 2V/K + 2C/K \quad (10).$$

Уравнение (10) является уравнением прямой линии, наклоненной к горизонтальной оси под углом  $\alpha$ , тангенс которого  $\operatorname{tg}\alpha = 2/K$ , и отсекающий на оси ординат отрезок  $m = 2C/K$  (рис.4.1).

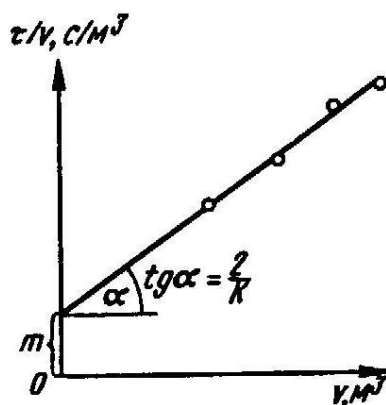


Рис. 4.1. Определение констант фильтрования

По графику находят константы фильтрования  $K$  и  $C$ . Для построения этой линии откладывают по оси абсцисс измеренные значения  $V_1$  и  $V_2$ , а по оси ординат – соответствующие значения  $\tau_1/V_1$  и  $\tau_2/V_2$ .

Общая продолжительность процесса фильтрования складывается из продолжительности фильтрования и продолжительности вспомогательных операций (промывание, сушка, загрузка, выгрузка).

Промышленность выпускает большое количество типов и конструкций фильтров периодического и непрерывного действия.

## 4.2. Практическая часть

### Материалы и оборудование:

- мел ( $\text{CaCO}_3$ ), дистиллированная вода;
- мерный цилиндр, стаканы, фарфоровая ступка с пестиком, стеклянная палочка, чашка Петри;
- фильтры (бумажные, тканевые, полимерные);
- технические весы с точностью до 0,01 г;
- насос Комовского;
- воронка Бюхнера;
- сушильный шкаф;
- секундомер.

### Схема установки

Установка для фильтрования суспензии представлена на рис. 4.2.

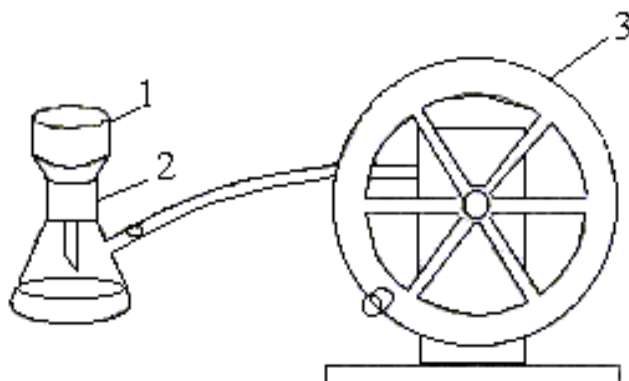


Рис. 4.2. Установка для фильтрования суспензии:

1-воронка Бюхнера, 2-коническая колба, 3-вакуумный насос Комовского

### Порядок выполнения работы

1. Приготовить 100 мл водной суспензии карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$  заданного состава.

2. Приготовить фильтр и вложить его в воронку Бюхнера. Рассчитать площадь фильтра по формуле:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \text{ (м}^2\text{)},$$

где  $d$  - диаметр воронки Бюхнера, м.

3. Вакуумный насос Комовского включить в сеть.

4. Приготовленную суспензию разделить пополам и провести фильтрование суспензии в два приема при постоянном заданном давлении. Данные занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

### Результаты фильтрования

Давление (P)		Собрано фильтрата (V)		Время от начала опыта (t)	
кгс/см <sup>2</sup>	Па*	см <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	сек	час
Примечание: 1 кгс/см <sup>2</sup> = 9,81 · 10 <sup>4</sup> Па					

5. Фильтр с осадком перенести на чашку Петри и взвесить на технических весах -  $m_{\text{вл}}$ , Г.

6. Фильтр с осадком поместить в сушильный шкаф и высушить при температуре 120 °С в течение 30 мин. Затем фильтр с осадком взвесить на технических весах -  $m_{\text{сух}}$ , Г.

7. Рассчитать влажность осадка по формуле:

$$\omega = \frac{m_{вл} - m_{сух}}{m_{сух}},$$

где  $m_{вл}$  и  $m_{сух}$  - массы влажного и сухого фильтра с осадком, г.

8. Рассчитать объем фильтрата в м<sup>3</sup> на м<sup>2</sup> площади фильтра (м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>).

9. Подставить полученные значения объема фильтрата (V) и времени фильтрования (t) в уравнение (2) и решить систему уравнений относительно констант фильтрования K (м<sup>2</sup>/ч) и C (м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>). Полученные значения констант фильтрования занести в таблицу 2.

10. Рассчитать удельное сопротивление осадка карбоната кальция по формуле (6). Для расчета принять плотность фильтрата равной 1000 кг/м<sup>3</sup>, динамический коэффициент вязкости фильтрата равным 27,8·10<sup>-8</sup> кг/(м·ч). Массовое отношение влажного осадка к сухому m рассчитать по формуле:

$$m = \frac{1}{1 - \omega}.$$

11. Рассчитать удельное сопротивление фильтра по формуле (9).

12. Результаты работы представить в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Результаты работы

Константа фильтрования K, (м <sup>2</sup> /ч)	Константа фильтрования C, (м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> )	Удельное сопротивление осадка r <sub>0</sub> , м/кг	Удельное сопротивление фильтра r <sub>φ</sub> , м/м <sup>2</sup>

13. Построить график в координатах  $\tau/V - V$  и определить константы фильтрования K и C.

14. Сделать вывод по работе.

#### 4.3. Контрольные вопросы

1. Какие системы называют неоднородными или гетерогенными?
2. Какой процесс называется фильтрованием?
3. Какие неоднородные системы разделяют фильтрованием?
4. Что является движущей силой фильтрования?
5. Какими способами можно получить разность давлений?
6. Требования, предъявляемые к фильтровальным перегородкам.
7. Виды фильтровальных перегородок.
8. Формула для расчета скорости фильтрования.
9. Константы фильтрования.
10. Графическое определение констант фильтрования.

## 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА»

### **Цель работы:**

1. Освоение методики проведения ситового анализа.
2. Определение фракционного (гранулометрического) состава сыпучих материалов и его крупности.
3. Определение степени измельчения твердого материала.

### 5.1. Теоретическая часть

*Измельчение* - это процесс увеличения поверхности твердых материалов путем их раздавливания, раскалывания, истирания и удара. метод измельчения выбирают в зависимости от крупности и физико-механических свойств измельчаемых материалов. процессы измельчения разделяются на дробление (крупное, среднее и мелкое), измельчение (тонкое и очень тонкое) и резание.

Классификация – это процесс разделения однородного сыпучего материала по величине его частиц.

Процесс измельчения характеризуется степенью измельчения, т.е. отношением среднего размера куска материала до измельчения  $d$  к среднему размеру куска после измельчения.

Обычно куски измельчаемого материала и куски, получаемые в результате измельчения имеют неправильную форму. для практических целей желательно характеризовать величину отдельного куска одним размером. за этот размер обычно принимают диаметр отверстий сит, через которые просеивают сыпучий материал до и после измельчения.

Дробление и измельчение проводят в открытых или замкнутых циклах. В открытом цикле материал проходит измельчающую машину один раз. В открытом цикле проводят крупное и среднее дробление, когда не требуется получать зерна конечного продукта определенного размера. При наличии мелочи в исходном материале его предварительно отсеивают и присоединяют к конечному продукту. при измельчении в замкнутом цикле материал неоднократно проходит через дробилку. измельченный продукт поступает в классификатор. зерна размерами больше допустимого предела возвращаются в ту же дробилку.

В зависимости от начальных и конечных размеров наибольших кусков и частиц материала измельчение подразделяется на следующие виды:

Вид измельчения	$d_n$ , мм	$d_k$ , мм
Крупное	1500...2000	250...25
Среднее	200...25	25...5
Мелкое	25...5	5...1
Тонкое	5...1	1...0,075
Коллоидное	0,2...0,1	до $1 \cdot 10^{-4}$

Крупное и среднее измельчение проводят сухим способом, а мелкое и тонкое – мокрым способом обычно в воде. При этом резко снижается образование пыли.

Работа, затрачиваемая на измельчение, складывается из работы, расходуемой на деформацию объема разрушаемого куска  $A_d$ , и работы, расходуемой на образование новой поверхности  $A_n$ .

Полная работа внешних сил выражается уравнением Ребиндера:

$$A = A_D + A_{II} = K_1 \Delta V + K_2 \Delta F, \quad (1)$$

где  $K_1$  - коэффициент пропорциональности, равный работе деформирования единицы объема тела;

$\Delta V$  - изменение объема разрушаемого тела;

$K_2$  - коэффициент пропорциональности, равный работе, затрачиваемой на образование единицы новой поверхности;

$\Delta F$  - приращение вновь образованной поверхности.

В случае крупного дробления с малой степенью измельчения можно пренебречь работой, затрачиваемой на образование новой поверхности. Учитывая, что  $\Delta V \approx D^3$ , получим:

$$A = K_1 \Delta V = K_1 D^3, \quad (2)$$

где  $D$  - характерный размер куска.

Таким образом, работа дробления пропорциональна объему дробимого куска.

Для дробления с большой степенью измельчения можно пренебречь работой, затрачиваемой на деформирование объема куска. Тогда, учитывая, что  $\Delta F \approx D^2$ , получим:

$$A = K_2 \Delta F = K_2 D^2. \quad (3)$$

Таким образом, работа дробления пропорциональна величине вновь образованной при дроблении поверхности.

Все измельчающие машины делятся на дробилки и мельницы. Дробилки применяют для крупного и среднего дробления, мельницы - для среднего, мелкого, тонкого и коллоидного измельчения. Ко всем измельчающим машинам предъявляют общие требования: равномерность кусков измельченного материала; удаление измельченного материала из рабочего пространства; сведение к минимуму пылеобразования; непрерывная и автоматическая разгрузка; возможность регулирования степени измельчения; возможность легкой смены быстро изнашивающихся частей; небольшой расход энергии на единицу продукции.

Для разделения смеси зернистых материалов на фракции с узкими пределами размеров частиц применяют три вида классификаций:

- механическая классификация заключается в рассеивании сыпучих материалов на ситах, решетках или других устройствах;
- гидравлическая классификация – разделение смеси твердых частиц на фракции в зависимости от скорости оседания частиц в жидкости;
- воздушная сепарация - разделение смеси твердых частиц на фракции в зависимости от скорости отстаивания частиц в воздухе.

Механическая классификация применяется для разделения частиц размерами от нескольких сантиметров до долей миллиметра. Для рассеивания материалов

используют металлические или другие сита, решета из металлических листов со штампованными отверстиями, решетки из параллельных стержней – колосников.

Крупность всей массы сыпучего материала оценивают по содержанию в ней классов определенной крупности, т. е. по ее гранулометрическому составу. Ориентировочный диапазон крупности (мкм) для некоторых методов анализа:

Ситовый анализ, в том числе на микроситах	100 000 – 10
Отмучивание	40 – 5
Оптическая микроскопия	50 – 0,25
Гравитационная седиментация	40 – 1
Центробежная седиментация	5 – 0,05
Электронная микроскопия	1 – 0,005

Наиболее часто для контроля процессов грохочения, дробления и измельчения применяют ситовый анализ.

Ситовый анализ - определение гранулометрического или фракционного состава измельченных сыпучих материалов. Ситовый анализ применим для материалов с размерами частиц (зерен) 0,05-10 мм; для анализа крупнозернистых и кусковых материалов используют, как правило, грохочение.

Ситовый анализ осуществляют просеиванием проб материала через набор стандартных сит с квадратными или прямоугольными отверстиями, размер которых последовательно уменьшается сверху вниз. В результате материал разделяется на классы, или фракции, в каждой из которых частицы незначительно различаются размерами. При просеивании часть материала, размеры частиц которого меньше размера отверстий  $d$ , проходит через сито (фракция  $-d$ , или проход), а остальная часть с более крупными частицами остается на сите (фракция  $+d$ , остаток, или сход). Число фракций, получаемых при просеивании через набор из  $n$  сит, составляет  $n + 1$  и не должно быть менее 5 и более 20.

Сита изготавливают из плетеных или тканых сеток (стальная, медная, латунная проволока; шелковая, капроновая, нейлоновая нить) либо штамповкой из металлических листов (решета). Для анализа очень тонких слипающихся порошков (размеры частиц 0,005 - 0,1 мм) применяют микросита, представляющие собой никелевую фольгу с расширяющимися книзу (для предотвращения забивки) квадратными отверстиями. Отношение размеров отверстий каждого и соседнего нижележащего сит, или модуль набора сит, суммарная площадь отверстий составляет 0,36 % от общей площади поверхности сита (эта величина также постоянна для всего набора сит). Сита обозначают номерами, соответствующими размеру стороны отверстия сита в свету, выраженному в миллиметрах или микронах (например, сито № 5 имеет отверстия с длиной стороны 5 мм).

Ситовый анализ можно производить вручную или механически (устройство с различными приводами) и в зависимости от крупности, свойств материала и необходимой точности анализа сухим либо мокрым способом. При сухом способе проба материала предварительно перемешивается и высушивается (при температуре 105 - 110 °С). Минимальная масса пробы определяется размерами наиболее крупных частиц. Например, для частиц размерами 0,1; 0,3; 0,5; 1; 3; 5-10; мм составляет соответственно 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 2,25-18 кг. Пробу засыпают на верхнее сито и весь комплект сит встряхивают 10-30 мин. При просеивании тонкодисперсных материалов, склонных к агрегированию, в нижнее сито помещают

резиновые шайбы либо пробки для растирания образовавшихся комков. После просеивания остаток на каждом сите взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г и вычисляют содержание  $\omega$  (% по массе) фракций в исходной пробе:

$$\omega = \frac{m_{фр}}{m_{исх}} \cdot 100\% \quad (4),$$

где  $m_{фр}$  - масса каждой фракции, г;  
 $m_{исх}$  – масса пробы материала, г.

В каждой фракции находят средний характерный размер, как полусумму нижнего и верхнего размеров сит:

$$d_{cp} = \frac{d_n + d_{n+1}}{2} \quad (5),$$

где  $d_n$  - средний размер каждой из фракций, мм.

Средний диаметр исходного материала  $D_{cp}$  вычисляют по формуле:

$$D_{cp} = \frac{\omega_1 \cdot d_1 + \omega_2 \cdot d_2 + \dots + \omega_n \cdot d_n}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n} \quad (6).$$

В случае необходимости очень точного определения гранулометрического состава материалов, растрескивающихся при температуре ниже 105 °С, а также слипающихся или содержащих большое количество мелкой фракции, пробу просеивают мокрым способом. Для этого мельчайшие частицы отмывают слабой струей воды до тех пор, пока слив не станет прозрачным. Остаток на сите высушивают, взвешивают и по разности масс находят количество отмытого шлама.

Фракции частиц обозначают номерами сит. Например, если класс получен последовательным просеиванием материала на ситах № 2 и №1, фракцию обозначают следующим образом: -2+1 мм.

Результаты ситового анализа представляют графически в виде характеристик крупности, или кривых распределения. Последние подразделяют на дифференциальные (показывают процентное содержание отдельных фракций в материале) и интегральные (изображают суммарное процентное содержание всех фракций меньше или больше данного размера). Для построения характеристики крупности на оси абсцисс откладывают размеры зерен материала по классам или номера сит, а по оси ординат – выход соответствующих классов в %. Полученные точки соединяют прямыми линиями, начиная с нуля данных координат.

Для оперативного контроля гранулометрического состава материалов на потоке используют различные конструкции автоматических гранулометров. По принципу действия гранулометры разделяют на ситовые, седиментационные, ультразвуковые, лазерные, оптические и т.д. Гранулометры осуществляют контроль одного (определяющего) либо нескольких классов крупности.

## 5.2. Практическая часть

### Материалы и оборудование:

- мельница роторная ножевая РН-120;
- сыпучий материал (например, горох);
- набор стандартных сит [7-5-3-2-1-0,5-0,25-0];
- технические весы.

### Порядок выполнения работы

#### Определение среднего размера зерен исходного сыпучего материала

1. Для отсева до дробления используется следующий набор сит [7-5-3].
  2. Взвесить пробу сыпучего материала на весах ( $m_{исх}$ ).
  3. Взвешенную пробу материала высыпать на верхнее сито, закрыть крышкой и провести ситовый анализ в течение 5 минут.
  4. Взвесить остатки материала на каждом сите, включая материал, прошедший через последнее сито. Данные внести в таблицу 1.
  5. По полученным данным рассчитать:
    - относительное содержание каждой фракции по формуле (4):
    - средний диаметр каждой фракции ( $d_{cp}$ ) по формуле (5):
    - средний диаметр исходного материала по формуле (6).
- Результаты расчетов внести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

Результаты опыта

№	Класс сит, мм	Масса фракции сыпучего материала $m_{фр}$ , Г	Выход фракции $\omega$ , %	Средний диаметр каждой фракции $d_{cp}$ , мм	Средний диаметр исходного материала $D_{ср}$ , мм
1	7				
2	5				
3	3				
4	<3				

#### Определение степени дробления

1. Для отсева после дробления используется следующий набор сит [3-2-1-0,5-0,25-0].
2. Включить в сеть дробилку.
3. На пульте управления включить тумблер «Сеть».
4. Запуск дробилки производится нажатием красной кнопки «Пуск».
5. Предварительно взвешенную пробу сыпучего материала ( $m_n$ ), загружать небольшими порциями и дробить пока не закончится материал.
6. Отключить дробилку нажатием кнопки «Стоп».
7. Высыпать раздробленный материал на верхнее сито, закрыть крышкой и провести ситовый анализ в течение 5 минут.
8. После отсева, каждую фракцию взвесить на технических весах (величины указать до сотых). Сита почистить кистью от остатков сыпучих материалов.
9. Занести данные ситового анализа пробы материала в таблицу 5.2.

10. По полученным данным рассчитать:

- относительное содержание проходной фракции по формуле (4):
- средний диаметр каждой фракции по формуле (5):
- средний диаметр частиц измельченного материала по формуле (6):
- степень дробления  $i$  по формуле:

$$i = \frac{D_{cp}}{d_{cp}} \quad (7),$$

где  $D_{cp}$  – средний размера куска материала до измельчения, мм;  
 $d_{cp}$  - средний размер после измельчения, мм.

Таблица 5.2

Результаты опыта

№	Класс сит, мм	Масса фракции сыпучего материала, г	Выход фракции $\omega$ , %	Средний диаметр каждой фракции, $d_n$ , мм	Средний диаметр измельченного материала $d_{cp}$ , мм
1	3				
2	2				
3	1				
4	0,5				
5	0,25				
6	<0,25				
		после отсева			
		потери при отсева			
		Всего:	100		

11. Построить характеристику крупности в координатах "содержание фракции–номера сит". График строится на миллиметровой бумаге.

12. Сделать выводы по работе.

### 5.3. Контрольные вопросы

1. С какой целью применяют измельчение твердых материалов?
2. На какие виды подразделяется измельчение в зависимости от начальных и конечных размеров частиц?
3. Какими методами производится измельчение твердых материалов?
4. Что представляет открытый и замкнутый цикл измельчения?
5. Как определить степень измельчения?
6. Формула для определения среднего диаметра фракции.
7. Формула для определения среднего диаметра исходного материала.
8. Что представляет собой характеристика крупности?
9. Какие виды классификации используются в промышленности?

10. Что представляет собой ситовой анализ?
11. Из чего складывается работа, затрачиваемая на измельчение твердого материала?
12. Уравнение Ребиндера для крупного и мелкого дробления.
13. Какие типы измельчающих машин применяются в промышленности?

## **6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ»**

**Цель работы:** изучение процесса сушки влажного материала и определение продолжительности сушки.

### **6.1. Теоретическая часть**

Сушкой или высушиванием называют процесс термического удаления части содержащейся в исходном, влажном материале жидкости. Чаще всего такой жидкостью является вода. Однако в некоторых случаях из материалов удаляют иные жидкости, например органические растворители.

Высушивание производится с целью улучшения каких-либо физико-химических свойств материалов, уменьшения расходов на транспорт значительных количеств материала или когда наличие в материале влаги нежелательно для его последующей химической или физико-химической переработки или использования.

В сушильной технике влажные материалы подразделяют на капиллярно-пористые (не деформируемые в процессе сушки), коллоидные (как правило, деформируемые) и коллоидные капиллярно-пористые, обладающие промежуточными свойствами.

### **Формы связи влаги с материалом**

Формы связи влаги с материалом в значительной степени определяют механизм и скорость сушки: чем эта связь прочнее, тем труднее протекает процесс. При сушке связь влаги с материалом нарушается. Различают следующие формы связи (в порядке убывания ее энергии): химическую, физико-химическую, механическую.

Химически связанная влага (гидратная, или кристаллизационная, влага комплексных соединений) соединена с материалом наиболее прочно и при сушке обычно удаляется частично или вообще не удаляется.

Физико-химическая связь объединяет адсорбционную и осмотическую влагу (например, в коллоидных материалах). Адсорбционно связанная влага прочно удерживается силами межмолекулярного взаимодействия на поверхности пор материала в виде монослоя или нескольких слоев. Осмотически связанная влага находится внутри и между клеток материала и менее прочно удерживается осмотическими силами. Влага этих видов связи с трудом удаляется при сушке.

Механическая, или капиллярно связанная, влага подразделяется на влагу макрокапилляров (радиус более  $10^{-7}$  мм) и микрокапилляров (менее  $10^{-7}$  мм). Влага макрокапилляров наименее прочно связана с материалом и может быть удалена не только при сушке, но и механическими способами.

Применительно к сушке влагу классифицируют в более широком смысле на свободную (легко удаляемую) и связанную (адсорбционную, осмотическую, микрокапилляров). Скорость испарения свободной влаги из материала равна скорости испарения воды со свободной поверхности жидкости. Связанная влага испаряется из материала с меньшей скоростью, чем с поверхности.

Независимо от вида влажного материала и его исходного состояния (твердофазное, пастообразное или жидкофазное), на высушивание необходимо затрачивать внешнюю энергию в форме теплоты, равную, как минимум, теплоте парообразования удаляемой влаги, вследствие чего термическая сушка представляет собой весьма энергоемкий процесс.

По способу подвода теплоты к высушиваемому материалу различают следующие виды промышленной сушки: 1) конвективная, при которой поверхность влажного материала непосредственно контактирует с сушильным агентом (горячим воздухом или топочными газами); 2) контактная, когда материал получает теплоту от контактирующей с ним твердой горячей поверхности; 3) инфракрасная (лучистая, радиационная), при которой поверхность материала получает теплоту в виде электромагнитного излучения от соответствующего высокотемпературного источника; 4) диэлектрическая (сушка токами высокой частоты), когда энергию на испарение влаги материал получает от высокочастотного электромагнитного поля, проникающего в глубь влажного материала. Часто выделяют сублимационную сушку, проводимую при отрицательных температурах и низких давлениях паров влаги; теплота в этом случае подводится к материалу либо контактными, либо инфракрасным способом.

Наиболее распространенной является конвективная сушка, в которой сушильный агент не только подводит к поверхности материала необходимую теплоту, но и эвакуирует выделяющиеся из него пары влаги. При конвективной сушке существенное значение имеют его параметры.

### **Параметры и диаграмма состояния влажного воздуха**

В процессе контакта с влажным материалом температура сушильного агента уменьшается, а содержание в нем паров влаги увеличивается. По этим и другим изменяющимся параметрам агента можно судить о необходимых для удаления влаги из материала расходах сушильного агента и подводимой с ним теплоты. Поскольку состав топочных газов (продуктов сгорания органических топлив) с точки зрения их теплофизических свойств не слишком значительно отличается от атмосферного воздуха, то и их параметры в смеси с парами влаги обычно можно принимать практически одинаковыми. Сушильный агент характеризуется следующими основными параметрами: абсолютной и относительной влажностью, влагосодержанием и энтальпией.

Абсолютная влажность определяется количеством водяного пара (кг), содержащегося в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха.

Относительная влажность воздуха – отношение фактической массы водяного пара в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха к максимально возможной массе водяного пара при тех же условиях:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{нас}}}, \quad (1)$$

где  $p_{\text{п}}$  – парциальное давление водяного пара;

$p_{\text{нас}}$  – давление насыщенного водяного пара

Влагосодержание – это отношение массы водяного пара (кг), содержащегося во влажном воздухе, к массе абсолютно сухого воздуха:

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot P_{нас}}{P - \varphi \cdot P_{нас}}, \quad (2)$$

где  $P$  – общее давление влажного воздуха;

0,622 – коэффициент – отношение молярной массы влаги (18) к средней молярной массе сухого воздуха (29).

Энтальпия влажного воздуха есть сумма энтальпий абсолютно сухого воздуха и водяного пара: (кДж/кг сухого воздуха):

$$I = (c_s + c_n x) \cdot t + r_0 \cdot x, \quad (3)$$

где  $c_s$  – средняя удельная теплоемкость сухого воздуха кДж/(кг К);

$c_n$  – средняя удельная теплоемкость водяного пара, кДж/(кг К);

$x$  – влагосодержание воздуха, кг пара/кг сухого воздуха;

$r_0$  – удельная теплота парообразования влаги при 0 °С, кДж/кг;

$t$  – температура воздуха, °С.

Согласно (3), энтальпия влажного воздуха при 0 °С равна  $r_0 x$ .

Связь между параметрами влажного воздуха  $x$ ,  $\varphi$ ,  $t$ ,  $I$  легко определяется по диаграмме Рамзина, которая построена по приведенным соотношениям и дополнительно учитывает зависимости теплоемкостей воздуха и пара от температуры (рис. 6.1).

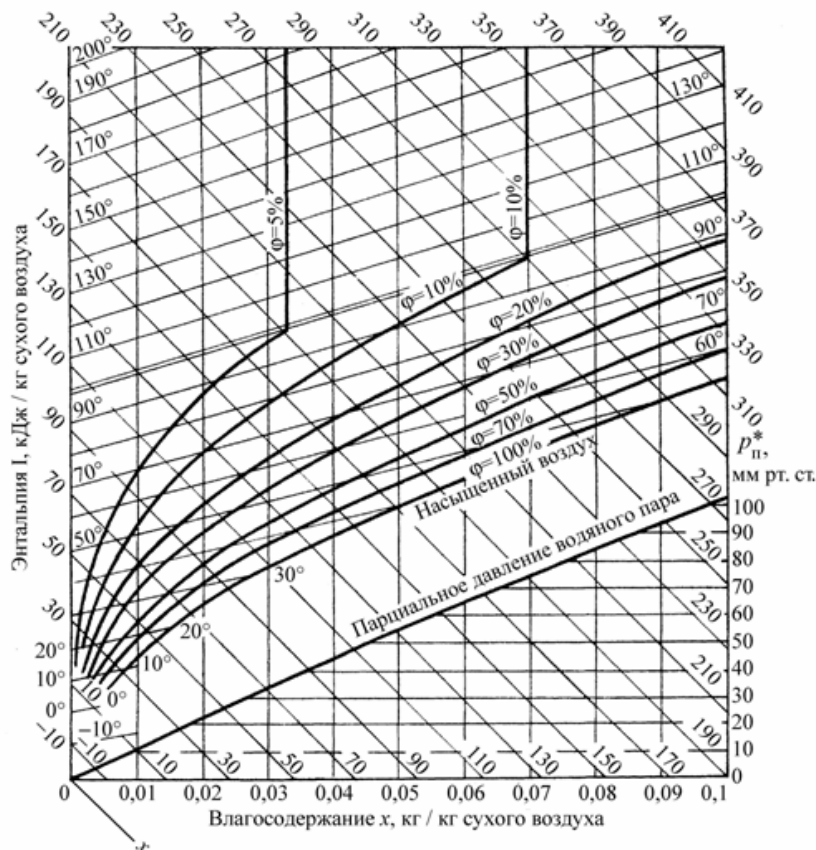


Рис. 6.1. Диаграмма состояния влажного воздуха (Рамзина)

### Кинетика процесса сушки

Для расчета сушилок необходимо знать скорость сушки, которая зависит от формы связи влаги с материалом и механизма перемещения в нем влаги. Кинетика сушки характеризуется изменением во времени влажности материала. Зависимость между влажностью материала и временем изображается кривой сушки (рис. 6.2). Сушка материала протекает неравномерно во времени. Различают два периода сушки. После нагрева материала до температуры сушки наступает период постоянной скорости сушки (период I). В начальный период сушки, когда влажность материала велика, количество влаги, испаряющееся с поверхности в единицу времени, постоянно. В этих условиях скорость испарения влаги с поверхности влажного материала определяется скоростью, с которой влага диффундирует через пограничный слой воздуха, насыщенный влагой.

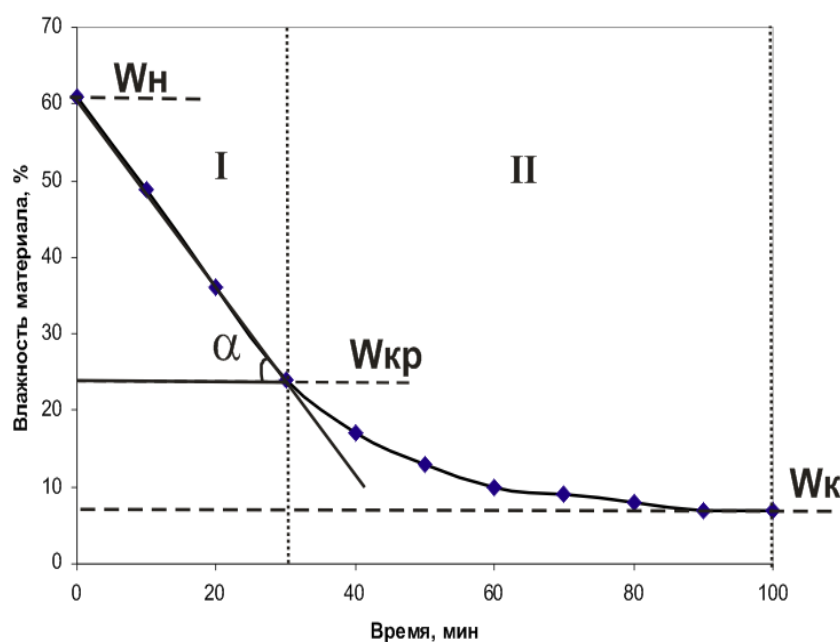


Рис. 6.2. Кривая сушки материала

Здесь  $W_n$ ,  $W_{кр}$ ,  $W_k$  — начальная, критическая и конечная влажность материала, соответственно; I — период постоянной скорости сушки, соответствующий линейному уменьшению влажности во времени до  $W_{кр}$ ; II — период падающей скорости сушки, влажность материала убывает от  $W_{кр}$  до  $W_k$ .

Движущей силой сушки в первом периоде является разность давлений пара в пограничном слое у поверхности материала и в токе воздуха. Поэтому в этот период скорость сушки не зависит от влажности материала и является величиной постоянной. Влажность материала уменьшается по прямолинейному закону до достижения критической влажности  $W_{кр}$ . Первый период называют периодом внешней диффузии.

После достижения  $W_{кр}$  начинается второй период сушки. Количество влаги, подводимой к поверхности, становится меньше того, которое могло бы испариться. Скорость сушки начинает падать. Процесс определяется скоростью внутренней диффузии влаги из глубины материала к его поверхности. Движущей силой сушки во втором периоде является в основном градиент влажности — уменьшение влажности по толщине материала в результате испарения влаги с поверхности.

Сушку материала обычно заканчивают по достижении некоторой конечной влажности  $W_k$ , определяемой технологическими условиями. В пределе влажность материала может понижаться до равновесной влажности, значение которой определяется влагосодержанием и температурой воздуха.

Конечной целью изучения кинетики сушки является определение продолжительности сушки. Для оценочных технических расчетов продолжительность сушки можно определить без учета равновесной влажности материала по формуле:

$$\tau = \frac{W_n - W_{кр}}{N} + \frac{W_{кр}}{N} \cdot \ln \frac{W_{кр}}{W_c} \quad (4),$$

где  $N$  - скорость сушки в первом периоде, которая представляет собой тангенс угла наклона линейного участка кривой сушки (см. рис. 2) к оси абсцисс.

## 6.2. Практическая часть

### **Материалы и оборудование:**

- образец пористого материала (например, пемза или кирпич);
- стакан с дистиллированной водой;
- сушильный шкаф;
- аналитические весы;
- эксикатор;
- фильтровальная бумага;
- щипцы.

### **Порядок выполнения работы:**

1. Включить сушильный шкаф и нагреть до 120 °С.
2. Сухой образец взвесить на аналитических весах и погрузить в стакан с дистиллированной водой на 20 минут.
3. Влажный образец подсушить фильтровальной бумагой и взвесить.
4. Рассчитать влажность образца по формуле:

$$W_c = \frac{m_{вл.}}{m_{сух.}} \cdot 100(\%) \quad (5)$$

5. Данные внести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

#### Исходные данные

№	Образец	Обозначение	Масса, г
1	Сухой	$m_{сух}$	
2	Влажный	$m_{вл}$	

6. Влажный образец поместить в сушильный шкаф на 7 минут.
7. По истечении времени щипцами достать образец, охладить в эксикаторе в течение 5 минут и взвесить.
8. Пункты 5 и 6 повторить до тех пор, пока не прекратится убыль массы образца.
9. Результаты измерений занести в таблицу 4.
10. По полученным данным рассчитать:

- Убыль влаги ( $\Delta m$ ) рассчитывают по формуле:

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (6),$$

где  $m_1, m_2$  - масса образца предыдущего и последующего взвешиваний, г.

- Массу влаги в образце определяют, как разность между массой влажного образца и массой абсолютно сухого образца:

$$m_{\text{вл}} = m - m_{\text{сух}} \quad (7),$$

где  $m$  - масса влажного образца, г;

$m_{\text{сух}}$  - масса абсолютно сухого образца, г.

- Влажность материала на абсолютно сухое вещество  $W_c$  рассчитывают по формуле (5).

11. Результаты расчетов занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2

Результаты эксперимента

№	Текущее время $\tau$ , мин	Масса материала $m$ , г	Убыль влаги $\Delta m$ , г	Масса влаги в материале $m_{\text{вл}}$ , г	Влажность материала $W_c$ , %
1		$m_1$			
2		$m_2$			
...					

12. Построить кривую сушки в координатах «влажность материала  $W_c$  – время  $\tau$ ». График строится на миллиметровой бумаге.

13. Рассчитать продолжительность сушки по формуле (4).

14. Сравнить расчетные значения времени сушки с продолжительностью сушки, найденной экспериментально. Найти относительную величину расхождения  $\Delta$ , %.

15. Сделать выводы по работе.

### 6.3. Контрольные вопросы

- Какой процесс называется сушкой?
- Способы удаления влаги из материала.
- Методы сушки по способу подвода теплоты к высушиваемому материалу.
- Что называется абсолютной влажностью?
- Что называется относительной влажностью?
- Что называется влагосодержанием?
- Что называется энтальпией влажного воздуха?
- Что представляет собой диаграмма Рамзина?
- Формы связи влаги с материалом.

10. Что является движущей силой сушки?
11. Что такое кривая сушки?
12. Какие факторы определяют скорость сушки в первом периоде?
13. Какие факторы определяют скорость сушки во втором периоде?
14. Каков механизм удаления влаги из материала в первом и втором периодах сушки?
15. Формула для расчета продолжительности сушки.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ**

1. Процессы типовые и специфические. Классификация изучаемых процессов и аппаратов.
2. Изучение процессов на микро- и макромолекулярном уровнях с использованием молекулярно-кинетического и термодинамического принципов описания их закономерностей. Статика и кинетика процессов. Движущая сила и скорость процессов. Балансы массы и энергии.
3. Аналитический, экспериментальный и синтетический методы изучения процессов.
4. Теория подобия и теория размерностей, их применение для выражения кинетических закономерностей. Основные положения масштабного перехода и моделирования процессов.
5. Методы и задачи инженерного расчета процессов и аппаратов. Управление технико-экономическими показателями и оптимизация процессов. Критерии оптимизации. Общие принципы устройства аппаратов.
6. Процессы измельчения твердых тел. Способы измельчения. Классификация способов измельчения твердых тел. Степень измельчения.
7. Основы теории деформации и разрушения тел. Затраты энергии на измельчение. Устройство и принцип действия аппаратов для измельчения: раскалыванием, истиранием, ударом, резанием.
8. Процессы обработки материалов давлением. Процессы формования, экструзии, брикетирования. Устройство и принцип действия прессов и экструдеров.
9. Процессы сортирования. Классификационные признаки сортирования тел и зернистых масс. Характеристика способов сортирования. Устройство и принцип действия основных типов аппаратов для сортирования.
10. Гидростатика. Основное уравнение гидростатики. Практическое использование основного уравнения гидростатики.
11. Гидродинамика. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.
12. Режимы движения жидкости. Потери напора на местных сопротивлениях. Критериальные уравнения движения вязкой жидкости.
13. Насосы. Классификация насосов. Основные параметры насосов.
14. Процессы осаждения. Образование и разделение фаз дисперсных систем. Относительная скорость движения твердых, жидких или газообразных частиц в вязких средах под действием массовых сил.
15. Процессы фильтрования. Классификация способов и режимов фильтрования, устройство фильтров и фильтрующих центрифуг. Основы теории фильтрования.

16. Процессы перемешивания жидких, пластических, зернистых масс и порошкообразных материалов. Механическое и пневматическое перемешивание. Способы перемешивания. Затраты энергии. Устройство мешалок и смесителей.

17. Общие положения теории и расчета теплообменных процессов и аппаратов. Классификация теплообменных процессов и аппаратов. Типы применяемых тепло- и хладоносителей.

18. Процессы нагревания и охлаждения. Теплообменники. Типы теплообменников. Основные положения расчета теплообменников.

19. Процессы выпаривания. Выпарные аппараты. Основные положения расчета выпарных аппаратов и многокорпусных выпарных установок.

20. Основы массопередачи. Материальные балансы массообменных процессов. Основное уравнение массопередачи.

21. Молекулярная диффузия. Закон Фика. Конвективный перенос. Закон массоотдачи.

22. Критериальные уравнения подобия массообменных процессов. Связь между коэффициентом массопередачи и коэффициентом массоотдачи. Основные положения расчета массообменных процессов и аппаратов.

23. Процессы экстракции и распределение компонентов в твердых материалах. Физико-химические основы, статика, кинетика, материальный баланс.

24. Свойства влажного воздуха. Диаграмма Рамзина. Способы удаления влаги из материала.

25. Формы связи влаги с материалом. Статика и кинетика сушки.

26. Конвективная сушка. Расчет процессов конвективной сушки. Основные типы сушилок. Сублимация.

27. Сорбционные процессы. Процессы абсорбции: физические основы, материальный баланс. Типы абсорберов.

28. Процессы адсорбции. Физико-химические основы процесса. Типы адсорбентов. Устройство адсорберов.

29. Процессы кристаллизации. Кинетика и условия кристаллизации. методы кристаллизации. Материальный и тепловой балансы кристаллизации. Устройство кристаллизаторов.

30. Обратный осмос и ультрафильтрация. Теоретические основы. Устройство мембранных аппаратов.

## **ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

1. Не включайте и не выключайте без разрешения преподавателя рубильники и электрические приборы.

2. С легковоспламеняющимися жидкостями нельзя работать вблизи нагревательных приборов.

3. При воспламенении горючих веществ выключите электронагревательные приборы. Горящие жидкости прикройте войлоком или засыпьте песком.

4. При термическом ожоге обожженное место обработайте перманганатом калия.

5. Опыты с ядовитыми веществами, концентрированными кислотами и щелочами надо проводить в вытяжном шкафу.

6. Нельзя брать вещества руками и пробовать их на вкус. При определении веществ по запаху склянку следует держать на расстоянии и направлять движением руки воздух от отверстия склянки к носу.

7. При ожоге реактивом обожженное место промойте большим количеством воды, затем либо разбавленной уксусной кислотой (в случае ожога щелочью), либо раствором соды (в случае ожога кислотой), а затем опять водой.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Плаксин Ю.М. Процессы и аппараты пищевых производств. Учебник. М.: Колос, 2006.

2. Айнштейн, В.Г. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс [Электронный ресурс]: Учебник /В.Г.Айнштейн, М.К.Захаров, Г.А.Носов и др.; под ред. В.Г.Айнштейна. – «Бином. Лаборатория знаний», 2014. – 1758 с. - Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=42602](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=42602) –Заглавие с экрана. – ISBN 978-5-9963-2214-5.

3. Кошевой Е.П. Практикум по расчетам технологического оборудования. Учебное пособие. -СПб: ГИОРД, 2007.

4. Процессы и аппараты химической технологии. Уч. пособие. под ред. А.А. Захаровой – М.: Академия, 2006.

5. Касаткин Л.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Логос, 2005.

6. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2 кн. – М.: Химия, 2002.

7. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии [Текст]: Учеб. пособие для вузов под ред. чл.-корр. АН России П.Г. Романкова /К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков; М.: ООО ТИД «Альянс», 2006.-

8. Бородулин, Д.М. Процессы и аппараты химической технологии. [Электронный ресурс]: учеб. пособие /Д.М. Бородулин, В.Н. Иванец – Кемерово: ТИПП. 2007.-528с.: (Учеб. пособие для вузов) - Режим доступа: <http://portal magtu.ru>, электронная библиотечная система «Лань». – Загл. с экрана. – ISBN 978-5-89289-435-7.

Учебное текстовое электронное издание

**Барышникова Надежда Ивановна  
Коляда Людмила Григорьевна**

## **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Лабораторный практикум

1,14 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2016 год  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,  
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»  
Кафедра стандартизации, сертификации и технологии продуктов питания  
Центр электронных образовательных ресурсов и  
дистанционных образовательных технологий  
e-mail: ceor\_dot@mail.ru