

Министерство образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий



Кафедра процессов и аппаратов  
пищевых производств

## **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Методические указания  
к лабораторным работам 1–4  
для всех специальностей

Санкт-Петербург 2001

УДК 663.62

**Федоров К.М., Лукин Н.И., Тишин В.Б., Жариков А.Н., Дужий А.Б.**  
Процессы и аппараты пищевых производств: Метод. указания к лабораторным работам 1–4 для всех спец. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2001. – 50 с.

Приводятся схемы экспериментальных установок с их подробным описанием, методики проведения экспериментальных исследований и порядок обработки полученных результатов, а также контрольные вопросы.

Рецензент  
Доктор техн. наук, проф. Л.К. Николаев

Одобрены к изданию советом факультета ТПП

© Санкт-Петербургский государственный  
университет низкотемпературных  
и пищевых технологий, 2001

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## Исследование гидродинамики псевдоожиженного слоя

### Введение

Для интенсификации процессов тепло- и массообмена, процессов смешения сыпучих материалов, агломерации, гранулирования и других процессов широко используются аппараты с псевдоожиженным слоем (ПС) зернистого материала (взвешенный, кипящий слой).

Если через неподвижный слой материала, лежащего на решетке (рис. 1), пропустить снизу вверх поток оживающего агента (жидкость или газ), то состояние слоя будет определяться скоростью оживающего агента, отнесенного к полному поперечному сечению пустого аппарата

$$\omega = \frac{V}{f_a}, \quad (1)$$

где:  $V$  – объемный расход сжижающего агента,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $f_a = \frac{\pi d^2}{4}$  – площадь поперечного сечения аппарата,  $\text{м}^2$ ;  $d$  – диаметр поперечного сечения аппарата,  $\text{м}$ .

Все расчеты по определению параметров псевдоожиженного слоя основаны именно на использовании скорости оживающего агента (1). Это связано с тем, что измерить действительную скорость воздуха в промежутках между твердыми частицами трудно.

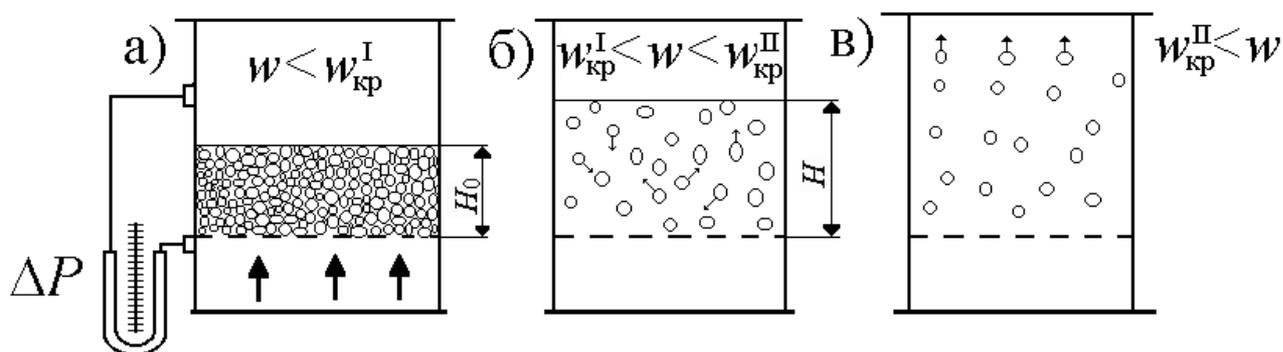


Рис. 1. Изменение структуры слоя в зависимости от скорости оживающего агента:  
а – неподвижный слой; б – псевдоожиженный слой; в – унос частиц из аппарата

При скоростях потока ниже первой критической  $\omega_{кр}^1$  (скорость начала псевдооживления) слой остается неподвижным (НС). Ожижающий агент движется через слой в режиме фильтрации.

При достижении ожижающим агентом первой критической скорости  $\omega_{кр}^1$  слой переходит в ПС. При этом твердые частицы начинают перемещаться по слою. Дальнейшее увеличение скорости приводит к увеличению высоты слоя (слой расширяется).

При достижении ожижающим агентом второй критической скорости  $\omega_{кр}^2$  (скорость уноса) слой разрушается, а частицы в режиме пневмотранспорта уносятся из аппарата.

Расширение ПС характеризуется порозностью  $\varepsilon$ , которая определяется как отношение объема пустот  $V_{п}$  в слое к объему всего слоя  $V_{сл}$

$$\varepsilon = \frac{V_{п}}{V_{сл}} = \frac{V_{сл} - V_{т}}{V_{сл}} = 1 - \frac{V_{т}}{V_{сл}}, \quad (2)$$

где  $V_{т}$  – объем, занимаемый твердыми частицами в слое,  $m^3$ ;  $V_{сл} = f_a H$  – объем слоя ( $H$  – высота псевдооживленного слоя),  $m^3$ .

Известно, что порозность неподвижного слоя твердых частиц одинакового диаметра составляет приблизительно 0,4. В процессе псевдооживления объем остается величиной постоянной, следовательно, его можно определить по параметрам неподвижного слоя

$$V_{т} = f_a H_0 (1 - \varepsilon_0), \quad (3)$$

где  $H_0$  – высота неподвижного слоя частиц.

Подставив (3) в (2), получим формулу для расчета порозности по измеренным значениям высот слоя

$$\varepsilon = 1 - \frac{f_a H_0 (1 - \varepsilon_0)}{f_a H} = 1 - (1 - \varepsilon_0) \frac{H_0}{H}. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что с увеличением скорости ожижающего агента порозность слоя растет. При скорости уноса, предельной для псевдооживленного слоя, можно считать, что  $V_{сл} \geq V_{т}$ , следовательно,  $\varepsilon = 1$ . Таким образом, псевдооживленный слой может существовать в пределах от  $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0,4 (\omega < \omega_{кр}^1)$  до  $\varepsilon = 1 (\omega \geq \omega_{кр}^1)$ .

С некоторым приближением эти пределы можно принять и для частиц неправильной формы.

Слой твердых частиц является для ожижающего агента гидравлическим сопротивлением, следовательно дифференциальным манометром (рис. 1) можно измерить перепад давления, возникающий при движении ожижающего агента через этот слой.

На рис. 2 показаны графики типичных изменений гидравлического сопротивления слоя  $\Delta P$  и порозности  $\varepsilon$ .

В момент начала псевдоожижения вес зернистого материала, приходящейся на единицу площади поперечного сечения аппарата, уравновешивается силой гидравлического сопротивления слоя

$$\Delta P_c = \frac{G_c}{f_a}, \quad (5)$$

где  $G_c$  – вес материала в слое  $H$ .

С учетом архимедовых сил, используя формулы (3) и (5), получим

$$\Delta P_c = gH_0(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})(1 - \varepsilon_0). \quad (6)$$

Так как сопротивление ПС остается величиной постоянной, то его можно определить по формуле (6) для любого значения  $\varepsilon$

$$\Delta P_c = gH(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})(1 - \varepsilon_0). \quad (7)$$

Если  $\rho_{\text{ч}} \gg \rho_{\text{с}}$  (например система газ–твердые частицы), то формулу (7) можно записать

$$\Delta P_c = gH_0\rho_{\text{ч}}(1 - \varepsilon_0). \quad (8)$$

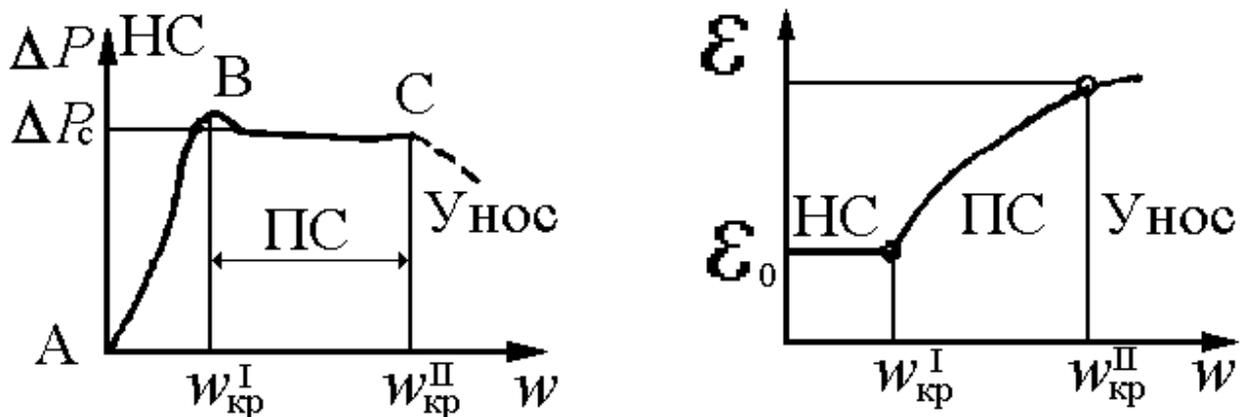


Рис. 2. Зависимости:  
а –  $\Delta P = f(\omega)$ ; б –  $\varepsilon = f(\omega)$

Из графика (рис. 2) видно, что гидравлическое сопротивление псевдоожигенного слоя остается величиной постоянной и не зависит от скорости ожигающего агента. Это постоянство обусловлено тем, что для частиц, находящихся во взвешенном состоянии, выполняется следующее соотношение

$$G = R + A,$$

где  $R = \xi \frac{\rho_c \omega_g^2}{2} f$  – сила сопротивления твердой частицы, Н;  $G = mg = V_q \rho_c g$  – сила тяжести, Н;  $A = V_q \rho_c g$  – сила Архимеда, Н;  $\xi$  – коэффициент сопротивления твердой частицы (зависит от режима обтекания);  $f$  – площадь поперечного сечения частицы, м<sup>2</sup>;  $m$  – масса частицы, кг;  $\rho_c$  – плотность ожигающего агента, кг/м<sup>3</sup>;  $V_q$  – объем твердой частицы, м<sup>3</sup>;  $\rho_q$  – плотность твердых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega_g = \frac{\omega}{\varepsilon}$  – действительная скорость ожигающего агента в промежутках между частицами, м/с.

Таким образом

$$R = G - A, \quad (10)$$

откуда

$$\xi \frac{\rho_c \omega_g^2}{2} f = V_q g (\rho_q - \rho_c). \quad (11)$$

Поделив правую и левую части уравнения (11) на  $f$  и подставив в него значение  $\omega_g$ , получим

$$\xi \frac{\rho_c \omega^2}{2\varepsilon^2} = \frac{V_q g (\rho_q - \rho_c)}{f}, \quad (12)$$

или при  $\rho_q \gg \rho_c$

$$\Delta P = \frac{V_q g \rho_q}{f} = \frac{mg}{f}. \quad (13)$$

Из формулы (13) следует, что перепад давления, возникающий при псевдоожигении твердой частицы, равен массе частицы, деленной на площадь поперечного сечения частицы. Следовательно, когда все частицы слоя перейдут в псевдоожигенное состояние, перепад давления

$$\Delta P = \frac{G_c}{f_a}, \quad (14)$$

где  $G_c$  – вес частиц слоя, Н.

Из уравнений (13) и (14) видно, что перепад давления для псевдооживленного слоя есть величина постоянная, независящая от скорости газа. Это постоянство для слоя объясняется тем, что при повышении расхода оживжающего агента происходит одновременное увеличение порозности слоя, а следовательно, действительная скорость оживжающего агента между частицами остается величиной постоянной (см. формулы (11) и (12)).

Расчет критических скоростей для псевдооживленного слоя проводится с использованием зависимости между критериями Лященко и Архимеда (рис. 3)

$$Ly = f(Ar) \quad (15)$$

где  $Ly = \frac{\omega^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) g}$  – критерий Лященко;  $Ar = \frac{d^3 \rho_c (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) g}{\mu_c^2}$  – критерий Архимеда;  $\mu_c$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Для расчета критических скоростей можно воспользоваться формулой Годеса, полученной из анализа экспериментальных данных

$$Re = \frac{Ar \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar \varepsilon^{4,75}}}, \quad (16)$$

где  $Re = \frac{\omega d_{\text{ч}} \rho_c}{\mu_c}$  – критерий Рейнольдса.

Для расчета скорости начала псевдооживления ( $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0,4$ )

$$Re_{\text{кр}}^1 = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \sqrt{Ar}} \quad (17)$$

где  $Re_{\text{кр}}^1 = \frac{\omega_{\text{кр}}^1 d_{\text{ч}} \rho_c}{\mu_c}$ .

Для расчета скорости уноса ( $\varepsilon = 1$ )

$$Re_{\text{кр}}^2 = \frac{Ar}{18 + 0,61 \sqrt{Ar}} \quad (18)$$

где  $Re_{кр}^2 = \frac{\omega_{кр}^{\Pi} d_{ч} \rho_c}{\mu_c}$ .

Для частиц неправильной формы вместо  $d_{ч}$  используется эквивалентный диаметр  $d_{э}$ . Эквивалентный диаметр  $d_{э}$  для частиц неправильной формы вычисляют как диаметр условного шара  $d_{ш}$ , объем которого  $V$  равен объему реальной частицы, умноженному на фактор формы  $\varphi$ ,

$$d_{э} = d_{ш} \varphi, \quad (19)$$

где  $d_{ш} = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$  – диаметр условного шара, м;  $\varphi = f_{ш} / f_p = \frac{\pi d_{ш}^2}{f_p}$  – фактор формы;  $f_p$  – поверхность реальной частицы, м<sup>2</sup>.

Фактор формы вычисляется как отношение поверхности частицы с диаметром  $d_{ш}$  к поверхности реальной частицы, причем фактор формы всегда меньше или равен единице.

Для полидисперсного слоя, состоящего из частиц разного диаметра

$$d_{э} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i / d_i)}, \quad (20)$$

где  $n$  – число фракций;  $d_i = \frac{d_{i-1} + d_i}{2}$  – средний ситовый размер  $i$ -й фракции, м;  $d_{i-1}$  – размер проходного сита, м;  $d_i$  – размер непроходного сита, м;  $x_i = M_i / \sum_{\gamma=1}^n M_{\gamma}$  – массовая доля материала в  $i$ -й фракции;  $M_i$  – масса материала, оставшегося на  $i$ -ом сите, кг.

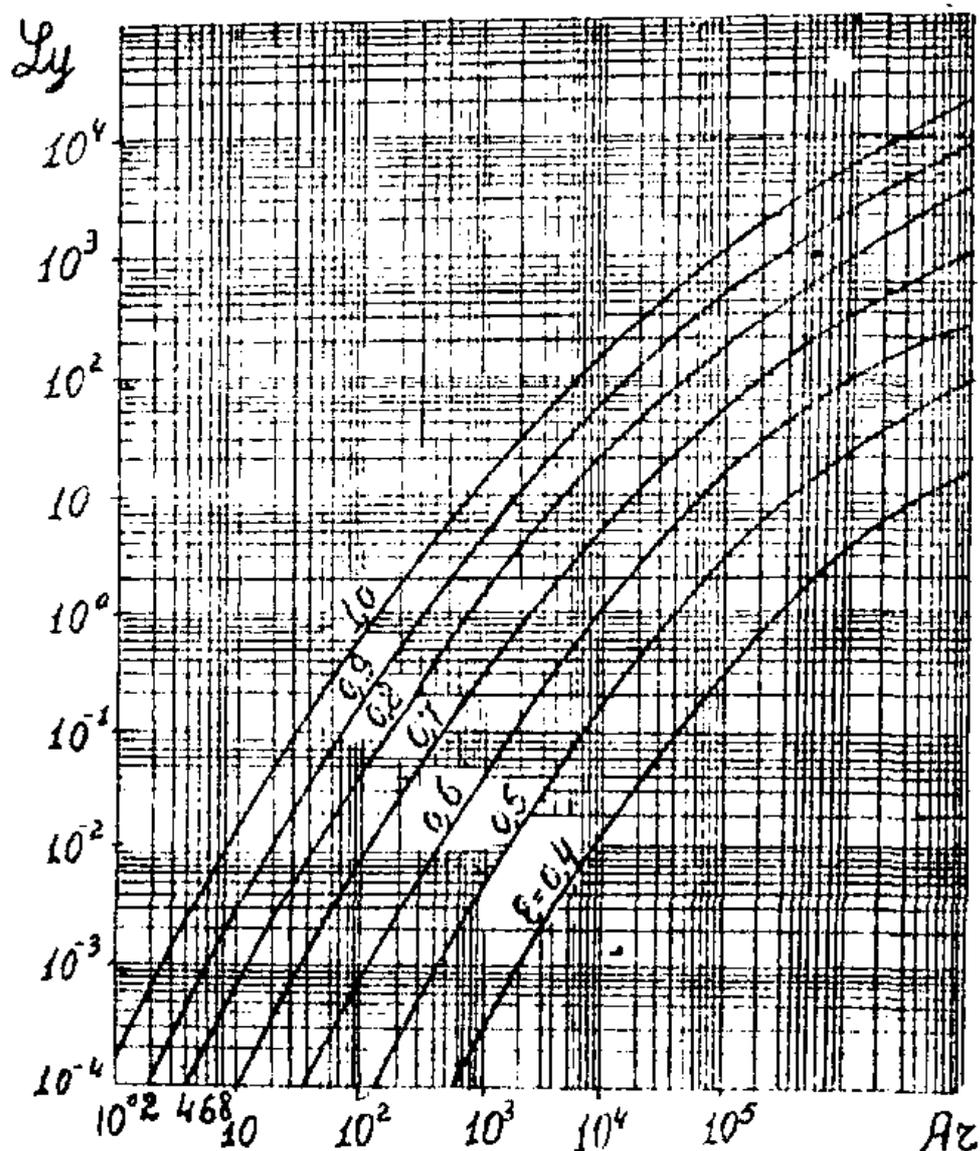


Рис. 3. Зависимость критерия  $Lu$  от критерия  $Ar$  и порозности слоя  $\varepsilon$

### Цель работы

1. Получить экспериментальные зависимости  $\Delta P$  и  $\varepsilon$  от скорости оживающего агента.
2. Определить по экспериментальным данным значение первой критической скорости.
3. Определить диаметр частиц слоя или эквивалентный диаметр и фактор формы для частиц неправильной формы.

4. Определить по зависимости  $Lu = f(Ar)$  значение второй критической скорости. Сравнить его с расчетом по формуле Тодеса.
5. Рассчитать вес материала в слое.

### Описание экспериментальной установки

Установка (рис. 4) состоит из двух смонтированных на щите стеклянных цилиндрических колонок 1 и 2. В каждой колонке имеются три металлические сетки, являющиеся газораспределителями. На двух сетках – слои из твердых частиц. Ожижающий агент (воздух) с помощью вентилятора 3 поступает в объемный счетчик 4, а затем через вентили 5 и 6 поступает соответственно либо в колонку 1, либо 2. Расход воздуха регулируется путем изменения напряжения, подводимого к электродвигателю 7 от регулятора напряжения 8, который через выключатель 9 соединяется с сетью. Перепад давления, возникающий при движении воздуха через колонки, измеряется дифференциальными манометрами 10 и 11, которые с помощью переключателей 12 и 13 могут быть подключены к любой из точек. Переключатели каждой колонки имеют три положения – а, б, в.

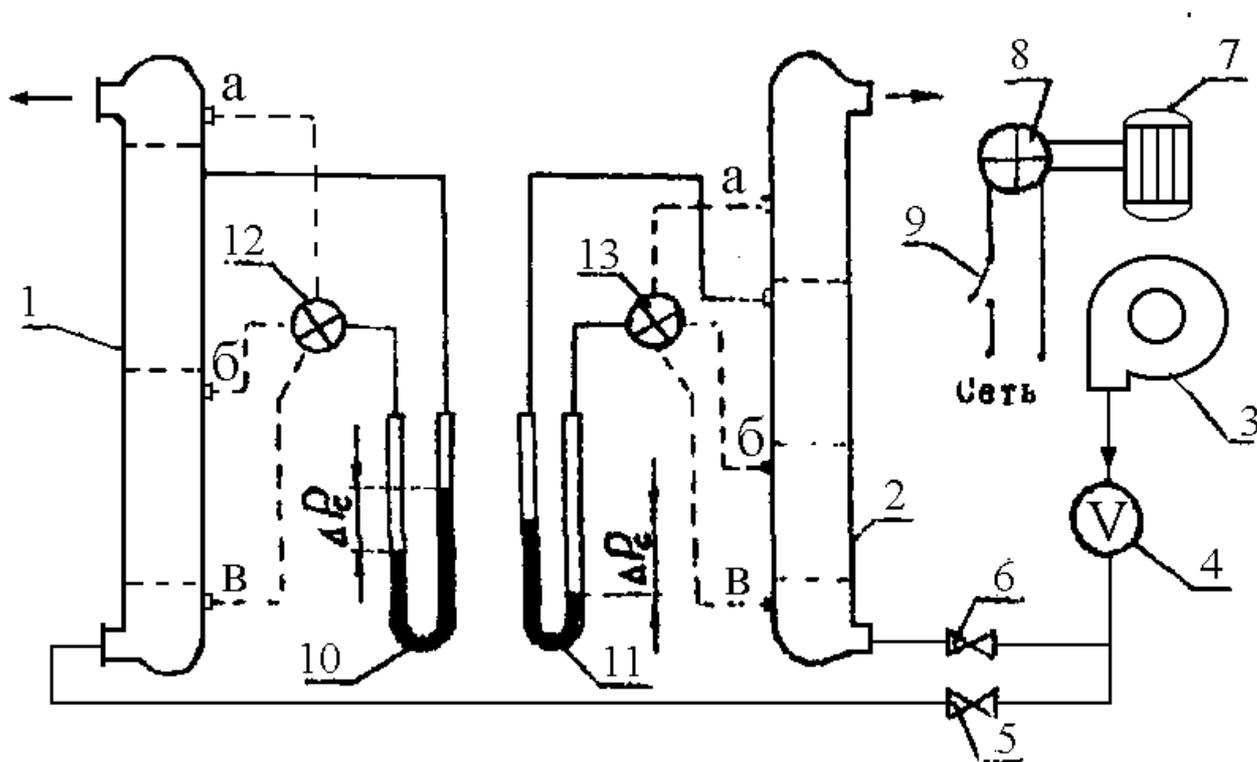


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

## Методика выполнения работы

Перед пуском установки следует ознакомиться с содержанием работы, установкой и получить задание у преподавателя.

1. В соответствии с заданием открыть один из вентиляей 5 или 6 (второй должен быть закрыт).

2. Ручку регулятора напряжения вывести на нуль, а выключатель 9 поставить в положение "сеть".

3. Установив регулятором напряжения расход воздуха через колонку, с помощью соответствующего переключателя последовательно замеряют по дифманометру перепады давления (формулы для дальнейших расчетов приведены в табл. 1).

Таблица 1

Положение переключателя	Измеряемая величина
а	$\Delta P_a = \Delta P_p$
б	$\Delta P_b = \Delta P_p + \Delta P_1$
в	$\Delta P_v = 2\Delta P_a + \Delta P_1 + \Delta P_2$

Здесь  $\Delta P_p$  – перепад давления, возникающий при движении сжижающего агента через сетку;  $\Delta P_1, \Delta P_2$  – соответственно перепад давления на первом и втором слоях.

В каждом опыте необходимо измерить высоты исследуемых слоев твердых частиц.

Расход воздуха измерить с помощью объемного счетчика. Результаты измерений занести в отчетную табл. 2.

4. Последовательно изменяя расход воздуха, провести измерение указанных выше величин.

Измерения должны охватывать диапазон изменения скорости воздуха от нуля до наибольшей, которую обеспечивает вентилятор. Измерения следует организовать так, чтобы обеспечить определение первой критической скорости с максимально возможной точностью.

После окончания работы выключатель 9 поставить в положение "выкл" и ручку регулятора напряжения вывести на ноль.

## Обработка опытных данных и составление отчета

1. Определить скорость воздуха  $\omega$ , м/с, по формуле (1)

$$\omega = \frac{V}{f_a} = \frac{V_k - V_n}{\tau} \frac{4}{\pi d^2}.$$

2. Рассчитать гидравлические сопротивления слоев твердых частиц  $\Delta P_i$ , переводя при этом показания дифференциального манометра из миллиметров водяного столба в Паскали. Если сопротивление  $\Delta P_p \ll \Delta P_i$ , то сопротивлением сетки при расчетах можно пренебречь.

3. Построить график зависимости  $\Delta P_i = f(\omega)$ , на который нанести данные для каждого из слоев. Из графика определить значение  $\omega_{кр}^1$ .

4. По формуле (4) рассчитать порозность и построить график зависимости  $\varepsilon_1 = f(\omega)$ , на который нанести данные для каждого из слоев.

5. Расчет значений плотности и динамической вязкости воздуха можно проводить по следующим формулам:

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{T};$$
$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2},$$

где  $\rho_0 = 1,293$  – плотность воздуха при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6}$  – динамический коэффициент вязкости при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $T = 273 + t^\circ\text{C}$  – абсолютная температура,  $\text{K}$ ;  $C$  – постоянная Сатерленда (для воздуха  $C = 124$ ).

6. Определить средний диаметр частиц в слое  $d_3$ . По значению  $\omega_{кр}^1$  рассчитать критерий Лященко.

Так как  $\rho_q \gg \rho_c$ , то в формуле (15) принять  $\rho_q - \rho_c \approx \rho_q$ . Затем по графику (рис. 3) найти соответствующее значение критерия Архимеда при  $\varepsilon = 0,4$  и определить диаметр частиц  $d_3$ .

7. Рассчитать по известному  $d_3$  значение  $\omega_{кр}^1$  и  $\omega_{кр}^2$ , исходя из формулы Тодеса.

8. Рассчитать вес твердых частиц, находящихся в каждом слое, по формуле (14).

Отчет о работе должен содержать: задание; схему установки со спецификацией; расчетные данные; отчетную таблицу (табл. 2); графики

$\Delta P_i = f(\omega)$  и  $\varepsilon_i = f(\omega)$ ; расчет среднего диаметра частиц; расчет веса материала в каждом слое; расчет  $\omega_{кр}^2$ ; расчет  $\omega_{кр}^1$  и  $\omega_{кр}^2$  по формуле Годеса.

### Контрольные вопросы

1. Как рассчитываются характерные скорости оживающего агента для псевдооживленного слоя?
2. Как определяется по экспериментальным данным скорость начала псевдооживления?
3. Как рассчитать средний диаметр частиц, находящихся в слое?
4. Что такое порозность и какой характер имеет зависимость порозности слоя от скорости оживающего агента?
5. От чего зависят скорость начала псевдооживления и скорость уноса?
6. Почему с увеличением скорости оживающего агента гидравлическое сопротивление неподвижного слоя растет, а псевдооживленного остается постоянным?
7. Как рассчитать эквивалентный диаметр для частиц неправильной формы?
8. Как пользоваться графиком зависимости  $Lu = f(Ar)$ ?
9. Как рассчитать гидравлическое сопротивление псевдооживленного слоя, зная вес неподвижного слоя?

### Расчетные данные

Диаметр аппарата  $D = \dots$  м

Материал ...

Плотность твёрдых частиц  $\rho_{ч} = \dots$  кг/м<sup>3</sup>

Номер колонны ...

Порозность неподвижного слоя  $\varepsilon_0 = \dots$

Температура воздуха  $t = \dots$

Таблица 2

№ п/п	Опытные данные						Расчетные данные						
	Показания объемного счетчика, м <sup>3</sup>		Время изме- рения объема (V <sub>к</sub> -V <sub>н</sub> ) τ, с	Показания дифферен- циального манометра, мм вод. ст.			Высота слоя H, м		Скорость воздуха ω, м/с	Гидравлическое сопротивление слоев, Па		Порозность слоя ε	
	V <sub>н</sub> исход- ное	V <sub>к</sub> конеч- ное		$\Delta P_a = \Delta P_p$ гидрав-лическое сопротивление сетки	$\Delta P_6 = \Delta P_p + \Delta P_1$	$\Delta P_b = 2\Delta P_p +$ $+\Delta P_1 + \Delta P_2$	H <sub>1</sub> пер- вого слоя	H <sub>2</sub> вто- рого слоя		$\Delta P_1$ пер- вого слоя	$\Delta P_2$ вто- рого слоя	ε <sub>1</sub> пер- вого слоя	ε <sub>2</sub> вто- рого слоя
1													
2													
3													
и													
т.д													
.													

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### Исследование работы распылительной сушильной установки

#### Введение

Сушкой называют процесс удаления влаги из влажных материалов путём её испарения и отвода образующихся паров. Наиболее распространённым способом проведения этого процесса в пищевой промышленности является конвективная сушка, которая ведётся при непосредственном контакте сушильного агента (нагретого воздуха) с влажным материалом. Таким образом, сушильный агент является теплоносителем и средой, в которую переходит влага из материала в виде паров. Свойство влажного воздуха как сушильного агента определяется содержанием в нём паров воды и его температурой. Содержание водяного пара в сушильном агенте выражают через влагосодержание.

Влагосодержание – это масса водяного пара, приходящегося на 1 кг абсолютно сухого воздуха

$$x = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}},$$

где  $x$  – влагосодержание сушильного агента, кг/кг;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность водяного пара, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность абсолютно сухого воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Степень насыщения воздуха парами воды можно определить по относительной влажности воздуха

$$\varphi = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{н}}},$$

где  $\varphi$  – относительная влажность воздуха;  $P_{\text{п}}$  – парциальное давление паров воды в воздухе при данной температуре  $t$ , Па;  $P_{\text{н}}$  – давление насыщенного пара при той же температуре  $t$ , Па.

При температуре воздуха выше 100 °С давление насыщенного пара равно барометрическому давлению ( $P_{\text{н}} = P$ ).

Если  $\varphi = 0$ , то воздух абсолютно сухой. Если  $\varphi = 1$ , то воздух полностью насыщен парами воды и не может использоваться как сушильный агент.

Энтальпия (теплосодержание) влажного воздуха определяется количеством теплоты, приходящейся на 1 кг абсолютно сухого воздуха, и выражается в виде суммы энтальпий абсолютно сухого воздуха и водяного пара

$$i = C_{\text{св}}t + x (r_0 + C_{\text{п}}t),$$

где  $i$  – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг;  $C_{\text{св}}$  – удельная теплоёмкость сухого воздуха  $\left( C_{\text{св}} = 1,01 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \right)$ ;  $C_{\text{п}}$  – удельная теплоёмкость пара  $\left( C_{\text{п}} = 1,97 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \right)$ ;  $r_0$  – удельная теплота парообразования воздуха при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\left( r_0 = 2493 \text{ кДж}/\text{кг} \right)$ .

После преобразований и подстановки численных значений формула для расчёта энтальпии влажного воздуха будет иметь вид

$$i = (1,01 + 1,97x) t + 2493 x.$$

Таким образом, приведённые выше формулы и знание свойств насыщенного водяного пара (табл. 1 приложения) позволяют рассчитать основные параметры сушильного агента. С целью упрощения технических расчётов процесса сушки профессор Л.К. Рамзин в 1918 г. предложил диаграмму состояния влажного воздуха, которая построена с использованием приведенных выше формул (диаграмма построена для барометрического давления  $P = 9,94 \cdot 10^4 \text{ Па} = 99,4 \text{ кПа}$ ).

На диаграмме (рис. 5) нанесены линии постоянных значений  $i$ ,  $x$ ,  $t$ ,  $\varphi$ . По диаграмме можно определять парциальное давление паров воды в воздухе, а также еще две характерные температуры для сушильного агента:

а) температуру мокрого термометра  $t_{\text{м}}$ , при которой влажный воздух, охлаждаясь при  $i = \text{const}$ , достигнет состояния насыщения ( $\varphi = 1$ );

б) температуру точки росы  $t_{\text{р}}$ , при которой воздух, охлаждаясь при  $x = \text{const}$ , достигнет состояния насыщения ( $\varphi = 1$ ).

Для нахождения параметров влажного воздуха необходимо знать две любые величины (координаты точки  $M$ ). Пример определения основных параметров воздуха для точки  $M_2$  с координатами  $t_2 = 72 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\varphi = 60 \text{ \%}$  приведен на рис. 5 ( $i = 130 \text{ кДж}/\text{кг}$ ,  $x = 0,022 \text{ кг}/\text{кг}$ ,  $P_{\text{п}} = 3,33 \text{ кПа}$ ,  $t_{\text{р}} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{м}} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

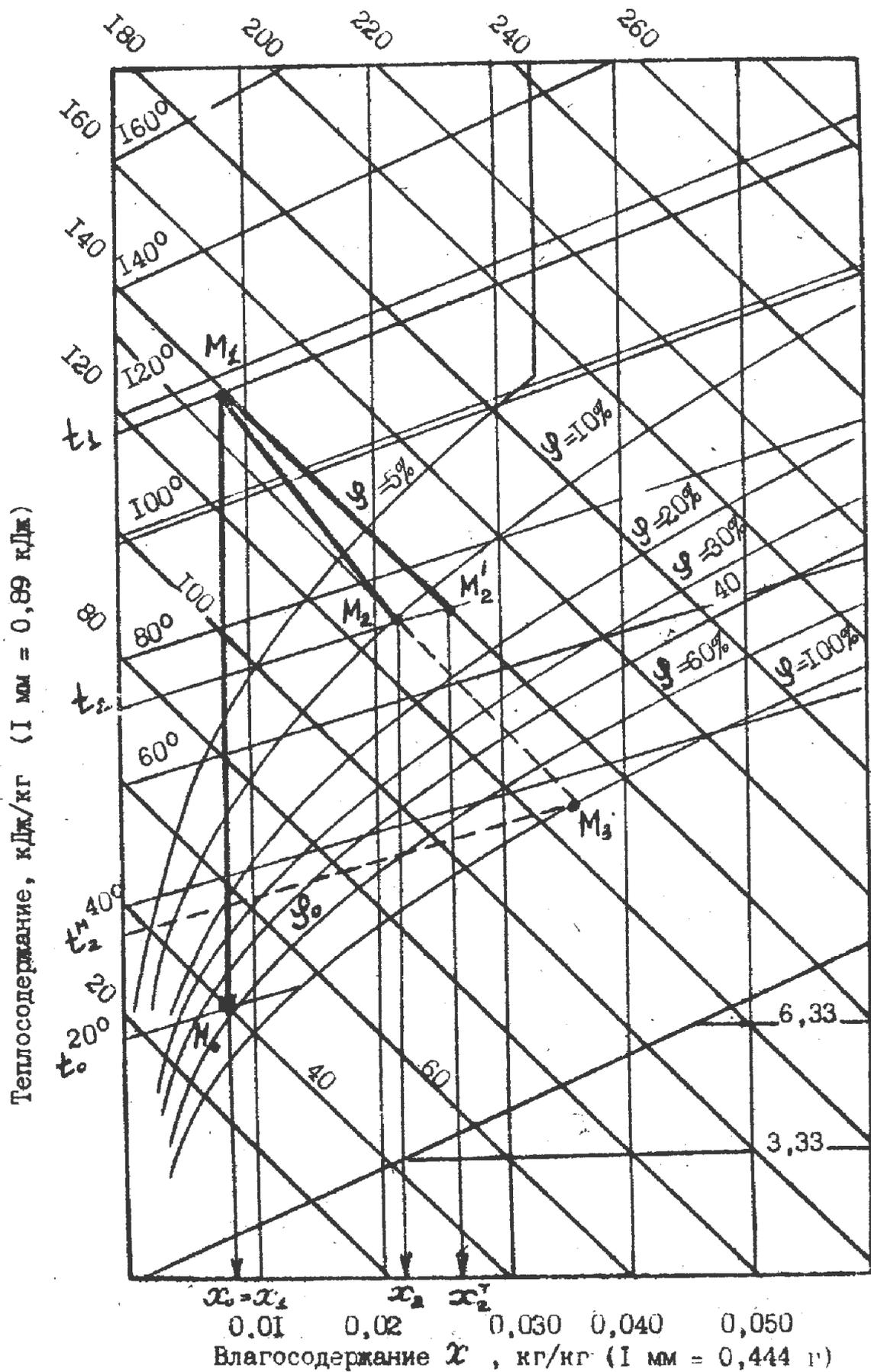


Рис. 5. Диаграмма Рамзина

Распылительные сушилки являются конвективными сушилками и применяются в пищевой промышленности для сушки высоковлажных продуктов, например, молока, сыворотки, заменителей цельного молока, кофе, фруктовых и овощных соков. Благодаря развитой поверхности испарения и высокой скорости удаления влаги время сушки мало. В этих условиях продукт не перегревается, что обеспечивает его высокое качество. Схема сушилки приведена на рис. 6.

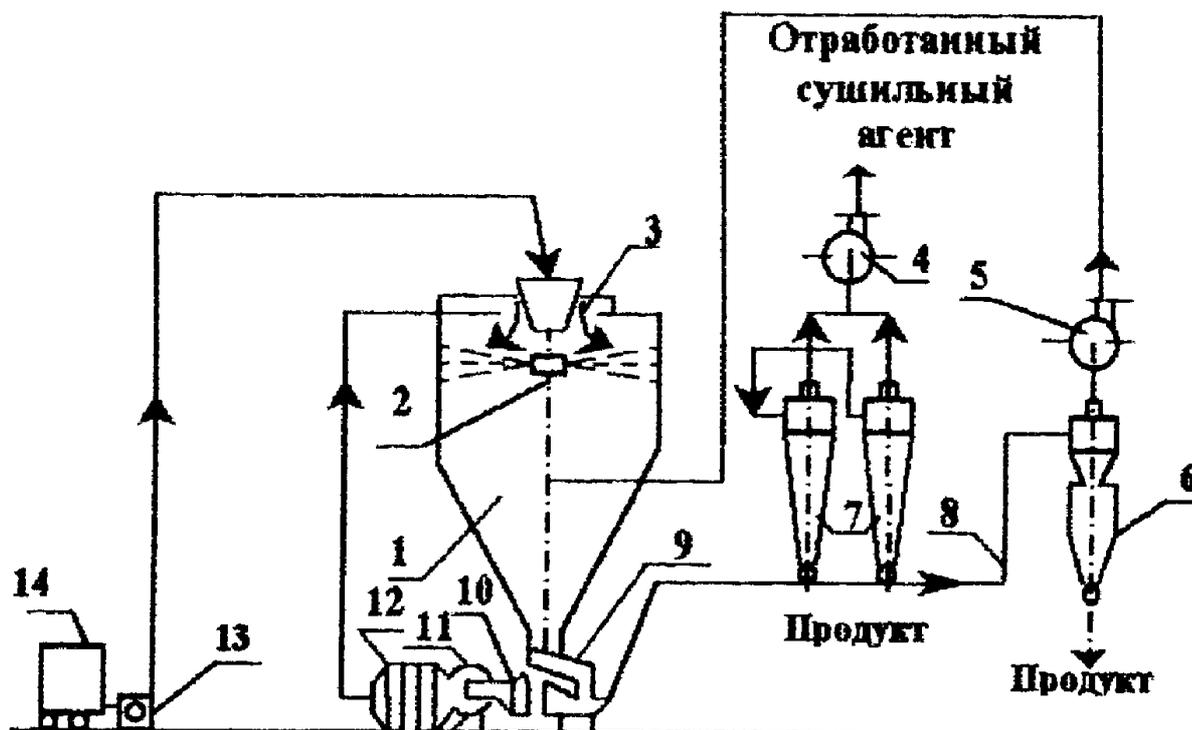


Рис. 6. Схема промышленной распылительной сушилки с центробежным (дисковым) распылителем:

- 1 – сушильная камера; 2 – распылитель; 3 – воздухораспределительное устройство;  
 4 – вытяжной вентилятор; 5 – дополнительный вентилятор; 6 – разгрузочный циклон;  
 7 – циклоны; 8 – пневмотранспортная линия; 9 – вибрлоток;  
 10 – фильтр; 11 – нагнетательный вентилятор; 12 – паровой калорифер;  
 13 – насос; 14 – бак

В сушильной камере 1, выполненной в виде вертикального цилиндра с коническим днищем, непрерывно поступающий жидкий продукт быстро вращающимся диском распылителя 2 диспергируется на мельчайшие капельки (до размера  $10^{-4}$  м и меньше). С помощью воздухораспределительного устройства 3 в зону распыления подается сушильный агент, который предварительно очищается от пыли фильтром 10 и нагревается в калорифере 12. За счет теплоты, передаваемой от сушильного агента к капелькам, последние теряют влагу и падают на днище камеры в виде мелких твердых ча-

стиц. Твердые частицы по коническому днищу сушильной камеры ссыпаются в вибролоток 9, откуда попадают в пневмотранспортную линию 8, где перемещаются потоком холодного воздуха. В процессе транспортировки продукт охлаждается. В пневмотранспортную линию поступает продукт из батареи циклонов 7, в которых осуществляется очистка отработанного сушильного агента, а также воздуха из пневмотранспортной линии. Выгрузка готового продукта производится с помощью разгрузочного циклона 6.

Цилиндрические башни сушилок бывают двух видов: с плоским (порошок удаляется из башни с помощью специальных уборочных механизмов) или с коническим дном (порошок перемещается к центральному разгрузочному отверстию под действием силы тяжести).

По способу распыления продукта сушилки бывают форсуночными и дисковыми (центробежными).

Распылительные сушилки в зависимости от движения воздуха и частиц молока можно подразделить на три основных типа.

1. Прямоточные – направления движения сушильного агента и частиц материала совпадают.

2. Противоточные – направления движения сушильного агента и частиц противоположны.

3. Со смешанным потоком.

В зависимости от свойств высушиваемого материала выбирают температуру сушильного агента, а также схему направления движения сушильного агента и высушиваемого материала. Например, применение противоточных сушилок для молока нецелесообразно, так как сухие частицы молока на выходе из сушильной камеры встречаются со входящим сушильным агентом, что может вызвать перегрев, а следовательно, порчу продукта. В этом случае целесообразно использовать прямоточные сушилки или сушилки со смешанным потоком.

### **Определение эффективности работы сушильной установки**

Эффективность работы сушильной установки можно оценить следующими параметрами.

1. Удельный расход сушильного агента (в килограммах сухого воздуха на килограмм испаренной влаги)

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0}, \quad (21)$$

где  $x_0$  и  $x_2$  – влагосодержание сушильного агента на входе и выходе из сушильной установки соответственно (в килограммах влаги на килограмм сухого воздуха);  $L$  – расход сухого воздуха, кг/с;  $W$  – массовый расход испаренной влаги, кг/с.

2. Удельный расход теплоты (в килоджоулях на килограмм испаренной влаги)

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{i_1 - i_0}{x_2 - x_0}, \quad (22)$$

где  $i_0$  и  $i_1$  – соответственно энтальпии сушильного агента на входе в калорифер и в сушильную камеру (в килоджоулях на килограмм испаренной влаги).

3. Влагосъем с  $1 \text{ м}^3$  рабочего объема сушильной камеры (в килограммах испаренной влаги на  $1 \text{ м}^3$  сушильной камеры в час)

$$A = \frac{W}{V}, \quad (23)$$

где  $V$  – объем цилиндрической части сушильной камеры,  $\text{м}^3$ .

4. Тепловой кпд установки

$$\eta = \frac{r}{q}, \quad (24)$$

где  $r$  – теплота парообразования при температуре мокрого термометра (в килоджоулях на килограмм испаренной влаги).

### Цель работы

1. Практически ознакомиться с работой распылительной сушильной установки и определением основных величин, характеризующих ее эффективность.

2. Построить изображения процесса сушки на диаграмме Рамзина.

### Описание лабораторной установки

На рис. 7 представлена лабораторная установка. Жидкий продукт из бака 1 подается на дисковый распылитель 2 насосом 3. Распыление жидкого продукта осуществляется в сушильной камере 4 с коническим днищем. Внутренний диаметр сушильной камеры 1,2 м, а высота цилиндрической части камеры 1,0 м. Сушка производится воздухом, нагретым в калорифере 5.

Воздух подается в калорифер вентилятором 6, работающим на нагнетание. Сухие твердые частицы по воздуховоду 7 вместе с отработанным сушильным агентом поступают в циклон 8. Сухой продукт собирается в приемнике готового продукта 9.

Температуру поступающего в камеру сушильного агента измеряют термометром сопротивления 10, а сушильного агента, уходящего из камеры, термометром сопротивления 11. Расход сушильного агента измеряется диафрагмой 12, установленной на трубопроводе за циклоном 8. Очистка сушильного агента, подаваемого в камеру, осуществляется тканевым фильтром 13.

Влагосодержание атмосферного воздуха измеряется психрометром, установленным в помещении.

Производительность сушильной установки по жидкому продукту определяют объемным методом, для этого замеряют время истечения заданного объема жидкого продукта из бака 1.

Высушенный материал выгружают из приемника 9 и взвешивают.

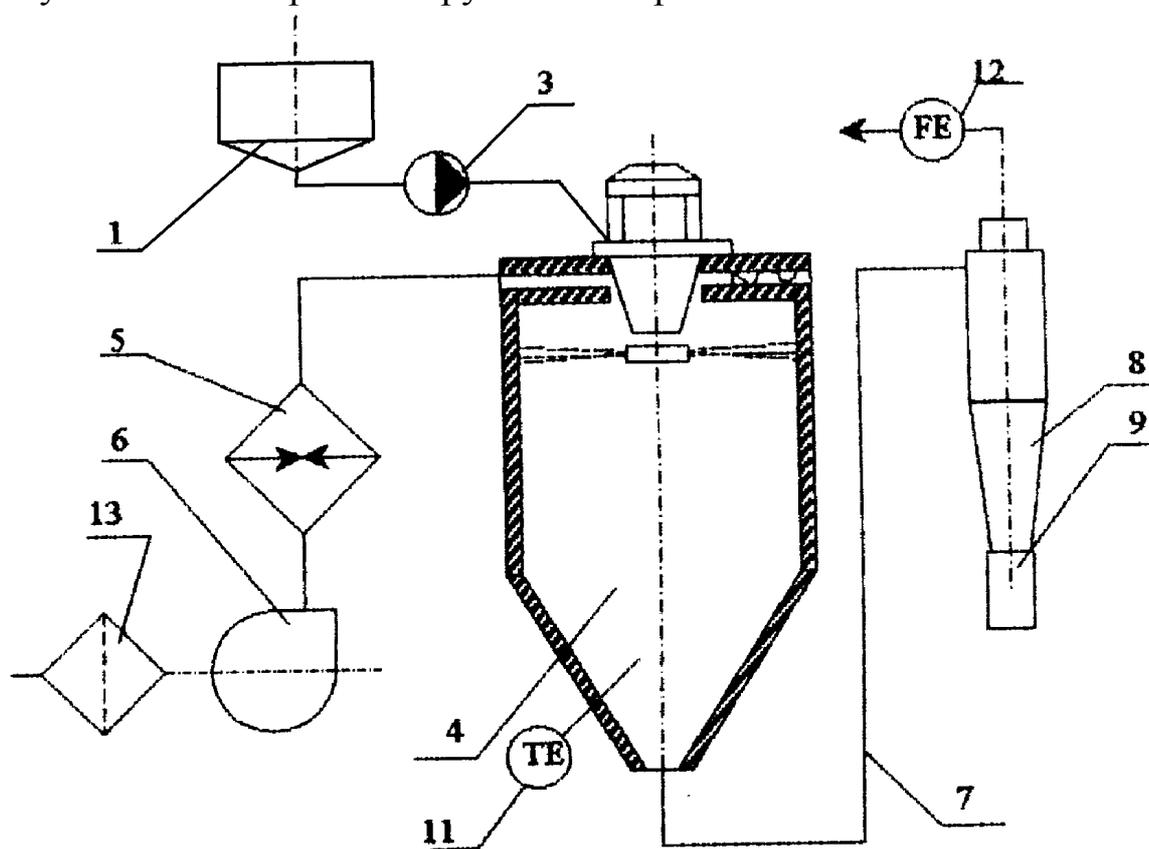


Рис. 7. Схема лабораторной распылительной установки:

- 1 – бак с исходным материалом; 2 – дисковый центробежный распылитель; 3 – насос; 4 – сушильная камера; 5 – калорифер; 6 – вентилятор; 7 – воздуховод; 8 – циклон разгрузитель; 9 – приёмник готового продукта; 10, 11 – термометры сопротивления; 12 – диафрагма; 13 – фильтр

## Методика выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией установки, принципом ее действия и только после собеседования с преподавателем приступить к выполнению работы.

2. Всю работу выполнять только под руководством преподавателя или лаборанта кафедры.

3. Подготовить раствор для сушки путем смешивания сухого материала с водой, предварительно определив массы сухого материала и воды. Определить влажность материала до сушки по формуле, указанной в разделе «Порядок расчета».

4. В бак *1* залить воду.

5. Включить вентилятор и, ступенчато включая нагреватели калорифера, довести температуру сушильного агента на входе в камеру до заданной (показания термометра *10*).

6. После установления заданной температуры на входе в камеру, регулируя расход воды насосом *3*, установить по термометру *11* необходимую температуру сушильного агента на выходе.

7. После удаления из бака *1* воды, залить в него подготовленный раствор и, если необходимо, провести корректировку режима в соответствии с показаниями термометра *11*. Отметить время начала сушки материала. Процесс подачи в сушилку раствора проводить после удаления воды без перерыва.

8. Регистрацию показаний контрольно-измерительных приборов производить каждые 5–10 мин и заносить в табл. 3 экспериментальных данных.

9. Взвесить сухой порошок, отделенный в циклоне и собранный в приемнике *9*, взять пробу для определения влажности продукта.

10. После окончания опыта необходимо промыть линию подачи раствора, для этой цели в бак *1* залить теплую воду. Промывку вести в течение 10–15 мин, после чего выключить насос *3*.

11. Отключить калорифер, оставив включенным вентилятор. Вентилятор отключить после охлаждения сушилки до 40–50 °С, но не ранее чем через 15 мин после выключения распылителя.

12. Сделать уборку рабочего места и чистку установки (по указанию преподавателя или лаборанта).

Таблица 3

№ замера	Время $t$ , мин	Температура воздуха на входе в сушильную камеру $t_1$ , °С	Температура воздуха на выходе из сушильной камеры $t_2$ , °С	Показания дифманометра $\Delta h$ , мм вод. ст.
1				
2				
3				

### Обработка опытных данных и составление отчета

Условия опыта:

1. Высушиваемый материал.
2. Частота вращения распыливающего диска  $n$ , об/с.
3. Масса исходного материала (порошка)  $M$ , кг.
4. Масса воды для приготовления суспензии  $M_B$ , кг.
5. Продолжительность опыта  $t$ , с.
6. Диаметр отверстия диафрагмы  $d_0$ , м.
7. Влажность исходного материала (порошка)  $U'_H$ , %.
8. Влажность суспензии  $U_H$ , %.
9. Влажность готового продукта  $U_K$ , %
10. Показания психрометра:
  - а) сухой термометр  $t_0$ , °С;
  - б) мокрый термометр  $t_0^M$ , °С.
11. Размеры цилиндрической части сушилки:
  - а) диаметр  $D$ , м;
  - б) высота  $H$ , м.

### Порядок расчетов

1. Определить влажность материала.

Для определения влажности материала необходимо взять навеску исходного материала массой  $m_H$  и поместить ее в сушильный шкаф при температуре 130 °С на 45 мин. Влажность материала в % рассчитать по формуле

$$U = \frac{(m_H - m_K)}{m_H} 100,$$

где  $m_H$ ,  $m_K$  – соответственно массы навески до и после сушки.

Затем рассчитать влажность материала до сушки

$$U_{\text{Н}} = \frac{M_{\text{В}} + M'}{M + M_{\text{В}}},$$

где  $M' = M \frac{U_{\text{Н}}'}{100}$ ;  $M$  – масса исходного порошка, кг;  $U_{\text{Н}}'$  – влажность исходного порошка, %;  $U_{\text{Н}}$  – влажность суспензии, поступающей на сушку, %;  $M_{\text{В}}$  – масса воды, в которой разводится исходный порошок, кг.

2. Рассчитать средние значения  $t_1$ ,  $t_2$  и  $\Delta h$  за время опыта и в дальнейших расчетах использовать именно эти значения (обозначения следует сохранить).

3. Рассчитать массовый расход сушильного агента (воздуха)

$$L' = \frac{\pi}{4} d_0^2 \rho \alpha \sqrt{2 \frac{\Delta h g}{\rho}},$$

где  $d_0$  – диаметр отверстия диафрагмы, м;  $\rho$  – плотность воздуха при  $t_2$ , кг/м<sup>3</sup>, здесь  $\rho = 1,293 \frac{273}{(273 + t \text{ } ^\circ\text{C})}$ ,  $\alpha$  – коэффициент расхода диафрагмы,  $\alpha = 0,8$ ;  $\Delta h$  – показания дифманометра у диафрагмы, мм вод. ст.;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с.

4. Рассчитать производительность сушилки  $G_{\text{Н}}$  по исходному влажному материалу, кг/с

$$G_{\text{Н}} = \frac{M + M_{\text{В}}}{\tau}.$$

5. Рассчитать производительность сушилки по испаренной влаге, кг/с

$$W = G_{\text{Н}} \frac{U_{\text{Н}} - U_{\text{К}}}{100 - U_{\text{К}}},$$

где  $U_{\text{Н}}$  – исходная влажность материала, %;  $U_{\text{К}}$  – конечная влажность материала, %.

Влажность готового продукта  $U_{\text{К}}$  рассчитать аналогично влажности материала до сушки.

6. Рассчитать производительность сушилки по сухому материалу, кг/с

$$G_{\text{К}} = G_{\text{Н}} - W.$$

7. Рассчитать влагосодержание воздуха на входе в калорифер  $x_0$  (в килограммах влаги на килограмм абсолютно сухого воздуха). По психрометру определить относительную влажность  $\varphi_0$  воздуха, поступающего в калорифер. Для этой цели измерить температуру воздуха  $t_0$  в точке  $M_0$ , сухим термометром и  $t_0^M$  – мокрым термометром. Вычислить  $(t_0 - t_0^M)$  и по табл. 1 приложения определить  $\varphi_0$ . Влагосодержание  $x_0$  определить из диаграммы Рамзина по известным значениям  $\varphi_0$  и  $t_0$  (рис. 5).

8. Рассчитать влагосодержание воздуха на выходе из аппарата (в килограммах влаги на килограмм абсолютно сухого воздуха)

$$x_2 = x_0 + \frac{W}{L},$$

где  $L = \frac{L'}{1 + x_0}$  – расход абсолютно сухого воздуха, кг/с.

9. Рассчитать удельный расход абсолютно сухого воздуха ( в килограммах сухого воздуха на 1 килограмм влаги)

$$l = \frac{L}{W}.$$

10. По известным значениям  $t_0$ ,  $x_0$ ,  $t_2$ ,  $x_2$  и  $t_1$  построить на диаграмме Рамзина изображение действительного и теоретического процессов сушки (рис. 5). Линия  $M_0M_1$  изображает процесс нагревания воздуха в калорифере,  $M_1M_2$  – действительный процесс сушки,  $M_1M_2'$  – процесс в теоретической сушилке. Наклонная линия  $M_1M_2'$  характеризует теоретический процесс в сушильной камере, который идет при постоянной энтальпии  $i_2' = \text{const}$ . Ее проводят из точки  $M_1$  по изоэнтальпе, которая проходит через эту точку, до пересечения с изотермой  $t_2$ .

11. По результатам построения определить удельный расход теплоты ( $q_T$ ) и коэффициент полезного действия ( $\eta_T$ ) теоретической сушилки, т. е. такой сушилки, в которой вся теплота, отданная воздуху, идет только на испарение влаги

$$q_T = \frac{i_2' - i_0}{x_2' - x_0} = \frac{i_1 - i_0}{x_2' - x_0},$$

$$\eta_T = \frac{r}{q_T},$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования (определяется по температуре мокрого термометра  $t_2^M$  для воздуха, выходящего из распылительной сушилки, точка  $M_2'$ , кДж/кг;  $i_2'$  – значение изоэнтальпы, проходящей через точку  $M_2'$ , кДж/кг.

Аналогично определить удельный расход теплоты  $q$  и коэффициент полезного действия  $\eta$  в действительной сушилке

$$q = \frac{i_1 - i_0}{x_2 - x_0},$$

$$\eta = \frac{r'}{q},$$

где  $i_1$  – значение изоэнтальпы, проходящей через точку  $M_1$ , кДж/кг;  $r'$  – удельная теплота парообразования (определяется по температуре мокрого термометра для воздуха, выходящего из реальной сушилки, точка  $M_2$ , кДж/кг (табл. 2 приложения).

Для определения температуры мокрого термометра необходимо, например, из точки  $M_2$  провести изоэнтальпу до пересечения с линией относительной влажности  $\varphi = 1$  (точка  $M_3$ ), а затем определить изотерму, проходящую через эту точку.

12. Рассчитать расход теплоты на процесс сушки, кДж/с

$$Q = q W.$$

13. Рассчитать потери теплоты в сушилке (в килоджоулях на 1 кг испаренной влаги)

$$\Delta = q - q_T$$

и общие потери, кДж/с

$$Q_{\text{пот}} = \Delta W.$$

14. Определить влагосъём с 1 м<sup>3</sup> рабочего объема сушильной камеры по формуле (23).

Отчет должен содержать: задание; схему экспериментальной установки (упрощенную) со спецификацией; таблицу экспериментальных данных;

все расчеты по пунктам 1–14; изображение действительного и теоретического процессов сушки на диаграмме Рамзина (на листах бумаги формата А 4).

### **Контрольные вопросы**

1. Какой технологический процесс называется сушкой?
2. Как определить влажность материала?
3. Что такое относительная влажность воздуха?
4. Как определить относительную влажность воздуха в помещении?
5. Как по диаграмме Рамзина определить основные параметры влажного воздуха?
6. Как осуществляется сушка жидких продуктов на распылительных сушилках?
7. Что такое удельный расход воздуха и удельный расход теплоты?
8. Чем теоретический процесс сушки отличается от действительного и как оба эти процесса изображаются на диаграмме Рамзина?
9. Каков физический смысл теплового КПД сушилки?

## Приложение к лабораторной работе № 2

Таблица 1

**Зависимость относительной влажности воздуха  $\varphi$  от температуры**

Температура воздуха °С	Психрометрическая разность $(t - t^M)$ , °С										
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Относительная влажность, %										
10	88	76	65	54	44	34	24	14	5	–	
11	88	77	66	56	46	36	26	17	8	–	
12	89	78	68	57	48	38	29	20	11	–	
13	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6	
14	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9	
15	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12	
16	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15	
17	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17	
18	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20	
19	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22	
20	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24	
21	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26	
22	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	
23	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30	
24	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	
25	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33	
30	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39	
Температура воздуха °С	Психрометрическая разность $(t - t^M)$ , °С										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
	Относительная влажность, %										
40	71,5	48	29	13	–	–	–	–	–	–	–
50	74	54	36,5	22	11,5	1,5	–	–	–	–	–
60	76,5	57,5	42	28,5	18	9,5	2,5	–	–	–	–
70	78,5	60,5	45,5	33,5	23,5	15,5	5	3	–	–	–
80	80	63	49	37,5	28	20	13,5	8	3	1	–
90	81,5	65,5	52,5	41	31,5	24	17,5	12	8	4,5	I
100	82,5	67,5	55	44	35	27	21	15,5	11	7,5	4

## Зависимость свойств насыщенного водяного пара от температуры

Температура $t$ , °С	Давление $P \cdot 10^{-5}$ , Н/м <sup>2</sup>	Удельная энтальпия пара $i \cdot 10^{-3}$ , Дж/кг	Удельная теплота парообра- зования $r \cdot 10^{-3}$ , Дж/кг	Тем- пера- ра- тура $t$ , °С	Давление $P \cdot 10^{-5}$ , Н/м <sup>2</sup>	Удельная энтальпия пара $i \cdot 10^{-3}$ , Дж/кг	Удельная теплота парообра- зования $r \cdot 10^{-3}$ , Дж/кг
0	0,0061	2493,1	2493,1	110	1,435	2696	2234
10	0,0123	2512,3	2470,4	120	1,99	2711	2207
20	0,0234	2532,0	2448,2	130	2,71	2726	2179
30	0,0425	2551,3	2425,0	140	3,64	2740	2150
40	0,074	2570,6	2403,6	150	4,77	2759	2120
50	0,123	2589,5	2380,0	160	6,23	2765	2089
60	0,200	2608,3	2356,3	170	7,95	2776	2056
70	0,312	2626,3	2333,0	180	10,4	2785	2021
80	0,474	2644,0	2310,0	190	12,6	2792	1984
90	0,704	2662,0	2235,0	200	15,5	2798	1945
100	1,01	2679,0	2260,0	–	–	–	–

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### Определение расхода мощности при перемешивании

#### Введение

Перемешивание – это процесс многократного перемешивания макрообъёмов текучей среды друг относительно друга во всём объёме аппарата, протекающий за счёт импульса, передаваемого среде механической мешалкой, струёй жидкости или газа.

Процесс перемешивания широко используется в пищевой промышленности при приготовлении суспензий, эмульсий, для интенсификации процессов нагрева и охлаждения обрабатываемых систем, а так же для интенсификации процессов массообмена в перемешиваемой среде.

Наибольшее распространение в настоящее время получили механические мешалки различных типов (лопастные, пропеллерные, турбинные, якорные, шнековые). При перемешивании такими мешалками возникает сложное трёхмерное движение перемешиваемой среды. Основным является тангенциальное движение, которое вызывает в объёме аппарата радиальные и аксиальные потоки. Сложный характер движения среды в аппарате не позволяет получить аналитического описания процесса, поэтому для описания процесса при установившемся режиме пользуются различными критериальными уравнениями, полученными методами теории подобия.

Важной характеристикой работы любой механической мешалки является расход энергии на вращение рабочего элемента мешалки при известных её размерах и заданных физических свойствах среды. Мощность, потребляемая мешалками, зависит от многих факторов. Методы и расчётные формулы, принятые в настоящее время для определения мощности, ещё не могут считаться достаточно полными. Это обстоятельство обуславливает необходимость проведения экспериментальных исследований, на основе которых затем получают необходимые критериальные уравнения.

Процесс перемешивания с гидродинамической точки зрения может быть рассмотрен как процесс внешнего обтекания тела потоком вязкой жидкости, следовательно, можно получить общее критериальное уравнение, описывающее процесс

$$Eu_m = f(Re_m, Fr_m, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_i), \quad (25)$$

где  $Eu_M = \frac{N}{\rho n^3 d^5}$  – критерий Эйлера для перемешивания (определяемый критерий);  $Re_M = \frac{\rho n d^2}{\mu}$  – критерий Рейнольдса для перемешивания (определяющий критерий);  $Fr_M = \frac{n^2 d}{g}$  – центробежный критерий Фруда (определяющий критерий);  $\rho$  – плотность перемешиваемой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости среды, Па·с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $d$  – диаметр рабочего элемента мешалки, м;  $n$  – частота вращения мешалки, об/с;  $N$  – мощность, потребляемая мешалкой при установившемся режиме, Вт;  $\Gamma_1 = H/d$  – симплекс геометрического подобия;  $\Gamma_2 = D/d$  – симплекс геометрического подобия;  $H$  – уровень среды в аппарате, м;  $D$  – диаметр  $\Gamma_1 = H/d$  аппарата, м.

Таким образом, обобщенная зависимость для определения мощности на валу мешалки при условии геометрического подобия будет иметь вид

$$Eu_M = c Re_M^k Fr_M^m \quad (26)$$

где  $c$ ,  $k$ ,  $m$  – экспериментально определяемые величины.

В случаях, когда на поверхности среды не образуется воронка (например, при установке отражательных перегородок или при погружении рабочего элемента мешалки на достаточную глубину), влиянием силы тяжести можно пренебречь и из уравнения (26) исключить критерий Фруда. Тогда обобщённое уравнение для определения мощности, потребляемой мешалкой, примет вид

$$Eu_M = c Re_M^k, \quad (27)$$

откуда

$$N = (\rho n^3 d^5) c Re_M^k. \quad (28)$$

### Цель работы

1. Изучить основные конструктивные элементы аппарата с мешалкой и измерительную схему.
2. Получить обобщённое критериальное уравнение, описывающее работу одного типа мешалки.
3. Провести расчёты мощности по полученному критериальному уравнению и сравнить их с измеренными.

## Описание установки

Схема установки для исследования процесса перемешивания приведена на рис. 8. Мешалка приводится в действие электродвигателем 1, изменение частоты вращения которого осуществляется путём изменения напряжения питания с помощью линейного автотрансформатора 2 (ЛАТР). Мощность, потребляемая электродвигателем, измеряется с помощью ваттметра 3.

Измеряют частоту вращения вала мешалки с помощью тахометра 4, который при измерениях устанавливается на торец вала электродвигателя и удерживается рукой. При измерениях к тахометру не прикладывается осевое усилие, так как в противном случае это может привести к искажению результатов измерения.

На станине 5 установлен подъёмный стол 6, на котором закрепляется корпус мешалки 7. С помощью винта 8 корпус мешалки может быть установлен на различном уровне по высоте относительно рабочего элемента. Уровень жидкости в корпусе мешалки  $H$ , а также расстояние от нижней кромки лопасти до дна корпуса определяют по шкале, нанесённой на боковой поверхности корпуса. Сменные рабочие элементы мешалки 9 крепятся к валу 10, который через муфту 11 соединён с электродвигателем 1. Вал 10 вращается в подшипниках 12, установленных в плите 13, которая стойками 14 соединена со станиной. К плите 13 крепится защитный экран 15, а также кожух 16 с электродвигателем.

## Методика проведения работы

1. Перед пуском установки следует ознакомиться с содержанием работы и устройством установки.
2. Сначала необходимо включить и подготовить к работе систему измерения мощности (включить питание).
3. Регулятор напряжения питания электродвигателя установить на нуль.
4. В соответствии с заданием заполнить таблицу исходных данных (табл. 4). Необходимые геометрические размеры измерять штангенциркулем.

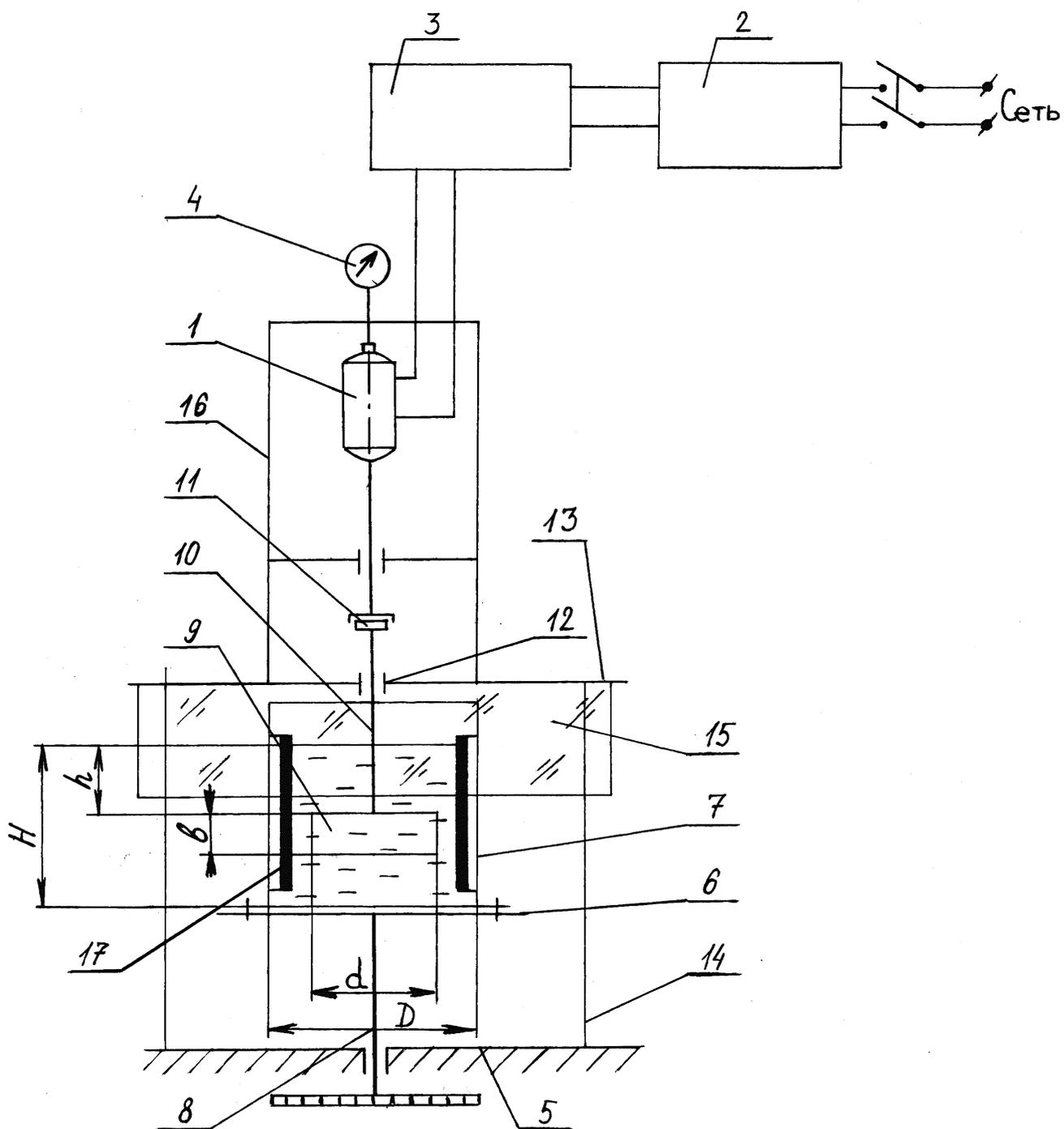


Рис.8. Схема установки для исследования процесса перемешивания:  
 1 – электродвигатель; 2 – ЛАТР; 3 – ваттметр; 4 – тахометр; 5 – станина; 6 – подъёмный стол; 7 – корпус мешалки; 8 – ходовой винт; 9 – рабочий элемент мешалки; 10 – вал; 11 – муфта; 12 – подшипники; 13 – плита; 14 – стойки; 15 – защитный экран; 16 – кожух; 17 – отражательные перегородки

Таблица 4

Показатель	Обозначение	Единица	Значение
Диаметр мешалки	$d$	м	
Диаметр корпуса мешалки	$D$	м	
Высота слоя среды	$H$	м	
Ширина лопасти	$b$	м	
Перегородки у корпуса	$z$	шт	
Глубина погружения рабочего элемента	$h$	м	
Температура среды	$t$	°С	
Плотность среды	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	
Коэффициент динамической вязкости среды	$\mu$	Н·с/м <sup>2</sup>	

Тип мешалки.....

Исследуемая среда.....

5. В соответствии с заданием закрепить рабочий элемент мешалки заданного типа и размера на валу, установить корпус мешалки указанного типа на подъёмном столе. Включить питание электродвигателя.

6. Провести рандомизацию опытов (табл. 5).

Для компенсации в известной степени систематической погрешности, а также для того, чтобы избежать некоторой неслучайной связи между результатами замеров в опытах, используется приём, называемой рандомизацией. Он заключается в том, что опыты проводятся в случайной последовательности, которая устанавливается с помощью таблицы случайных чисел (табл. 5). Для рандомизации из таблицы случайных чисел выбирается из любого столбца или строки последовательность случайных чисел и записывается в соответствующий столбец этой же таблицы. Замеры проводятся в порядке возрастания или убывания случайных чисел.

Таблица 5

№ опыта	Мощность, Вт	Частота вращения, об/мин			Среднее значение $n$ , об/мин	Рандомизация	
		1	2	3		Случайное число	Последовательность замера
1	$N_1$	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{13}$	$n_1$	70	7
2	$N_2$	$n_{21}$	$n_{22}$	$n_{23}$	$n_2$	69	6
3	$N_3$	...	...	...	$n_3$	7	1
4	$N_4$					34	2
5	$N_5$					59	4
6	$N_6$					61	5
7	$N_7$					46	3
8	$N_8$	$n_{81}$	$n_{82}$	$n_{83}$	$n_8$	75	8

7. Произвести замеры потребляемой мощности на холостом ходу при заданных частотах вращения мешалки и заполнить табл. 5. Измерения проводить не менее трёх раз, каждый раз последовательно изменяя частоту вращения.

8. Залить в корпус мешалки заданный объём исследуемой системы и измерить её температуру. С помощью ходового винта установить заданную глубину погружения рабочего элемента мешалки в жидкость.

9. В условиях установившегося режима работы мешалки провести замеры частоты вращения мешалки при заданных значениях мощности. Для получения надёжных результатов провести не менее трёх серий измерений, каждый раз последовательно изменяя частоту вращения. Результаты измерений занести в табл. 5.

10. После окончания измерений вывести регулятор напряжения на ноль и выключить питание электродвигателя, выключить систему измерения мощности мешалки, опустить подъёмный стол, снять корпус мешалки, слить исследуемую жидкость в сборник и промыть корпус, снять мешалку.

### Обработка опытных данных и составление отчёта

1. Прежде чем перейти к обработке экспериментальных данных, необходимо убедиться, что результаты измерений воспроизводимы, т. е. установить, не было ли на них влияния неучтённых величин. С этой целью следует обработать данные параллельных опытов по измерению частоты вращения на основе экспериментально-статистических методов исследования. Для этого необходимо записать измерения частоты вращения в табл. 6.

Таблица 6

№ опыта	Частота вращения			Среднее значение $n$ , об/мин	Дисперсия, $S_i^2$
	1	2	3		
1	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{13}$	$n_1$	$S_1^2$
2	$n_{21}$	$n_{22}$	$n_{23}$	$n_2$	$S_2^2$
·					
·					
$j$	$n_{j1}$	$n_{j2}$	$n_{j3}$	$n_j$	$S_j^2$
·					
·					
8	$n_{81}$	$n_{82}$	$n_{83}$	$n_8$	$S_8^2$

Таким образом, проведено  $e$  серий параллельных опытов ( $e = 8$ ), включающих  $U$  измерений частоты вращения ( $U = 3$ ).

Для каждой серии параллельных опытов вычислить среднее арифметическое значение измеренной частоты вращения

$$\bar{n}_j = \frac{1}{U} \sum_{i=1}^U n_{ji} \quad \left( j = 1, 2, \dots, e; i = 1, \dots, U \right).$$

Для каждой серии затем вычислить оценку дисперсии

$$S_j^2 = \frac{1}{(U-1)} \sum_{i=1}^U (n_{ji} - \bar{n}_j)^2.$$

Для проверки воспроизводимости опытов найти расчетный критерий Кохрена как отношение наибольшей из оценок дисперсий к сумме всех оценок дисперсий

$$G_p = \frac{\max S^2}{\sum_{j=1}^e S_j^2}$$

Значения теоретического критерия Кохрена  $G_T$  приведены в табл. 7. Они соответствуют доверительной вероятности ( $P = 0,95$ ), с которой принимается гипотеза о воспроизводимости опытов.

Таблица 7

Степень свободы $f_2 = e$	Степень свободы $f_1 = U-1$					
	1	2	3	4	5	6
2	0,9985	0,9750	0,9392	0,9057	0,8584	0,8534
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6771
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895	0,5598
5	0,8412	0,6838	0,5981	0,5440	0,5063	0,4783
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184
7	0,7271	0,5612	0,4800	0,4307	0,3907	0,3726
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362
9	0,6385	0,4775	0,4027	0,3584	0,3286	0,3067

Значения  $G_T$  определить, исходя из числа степени свободы  $f_2 = e$  и  $f_1 = (U-1)$  по табл. 7.

Если выполняется условие  $G_p \leq G_t$ , то опыты считаются воспроизводимыми. В этом случае можно рассчитать генеральную дисперсию воспроизводимости

$$S_{\text{воспр}}^2 = \sum_{j=1}^e S_j / e.$$

Если опыты невоспроизводимы, то можно попытаться достигнуть воспроизводимости выявлением и устранением источников нестабильности эксперимента, а также использованием более точных методов и средств.

В общем случае рассмотренная методика оценки воспроизводимости опыта имеет универсальный характер и может быть использована при любых экспериментальных исследованиях. При этом минимальные значения величин  $e$  и  $U$  берутся от 2 до 4.

2. По данным экспериментов построить график зависимости мощности холостого хода  $N_x$  от частоты вращения мешалки:  $N_x = f(n)$ .

3. Рассчитать полезную мощность, потребляемую мешалкой при перемешивании жидкости по заданной частоте вращения рабочего элемента (табл. 5).  $N_x$  – определить из графика  $N = N_p - N_x$ .

4. Для каждого опыта рассчитать по формуле (27) значения критериев  $Eu_m$  и  $Re_m$ .

5. На основании вычисленных значений  $Eu_m$  и  $Re_m$  построить график зависимости  $\lg Eu_m$  от  $\lg Re_m$  и определить значение величин  $c$  и  $k$ , входящих в критериальное уравнение (27). Прологарифмировав уравнение (27), получить уравнение прямой линии в логарифмических координатах

$$\lg(Eu_m) = k \lg(Re_m) + \lg(c) \quad (29)$$

Показатель степени определяется как тангенс угла наклона  $\varphi$  к оси абсцисс (рис. 9.). Так как угол находится во второй четверти, то тангенс этого угла – отрицательная величина, а следовательно, и  $k$  – отрицательная величина.

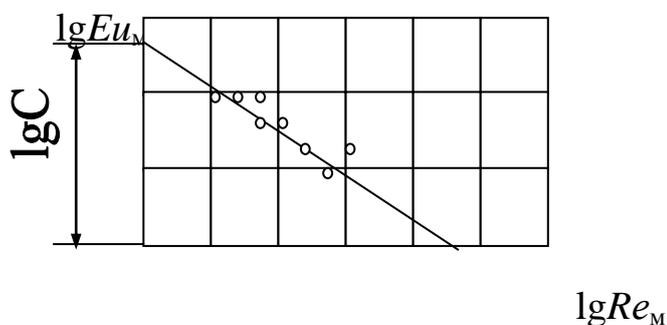


Рис. 9. Зависимость  $\lg Eu_m = f(\lg Re_m)$

Постоянная  $c$  находится как отрезок, отсекаемый прямой на оси координат, или из уравнения (27) при известном  $k$ . Если  $c$  определяется с использованием уравнения (27), то необходимо рассчитать 3–5 значений  $c$  и найти из них среднее.

### Примечание

При построении графика по рис. 9 необходимо выполнить следующие условия:

- оси координат должны начинаться от нуля;
- масштабы по осям должны быть одинаковые.

Данные расчётов внести в отчётную табл. 8

Таблица 8

№ опыта	Частота вращения $n$ , об/с	Мощность холостого хода $N_x$ , Вт	Потребляемая мощность $N$ , Вт	$Eu_m$	$\lg Eu_m$	$Re_m$	$\lg Re_m$	$N_{\text{рас}}$ , Вт	$\Delta$
1									
2									
3									

6. Записать полученное критериальное уравнение, подставив в него экспериментально определённые величины  $c$  и  $k$  (27). Рассчитать по формуле (28) мощность, потребляемую мешалкой при заданной частоте вращения, и сравнить с экспериментально полученными значениями (табл. 8).

7. Оценить адекватность полученного критериального уравнения. Рассчитать отношение, которое позволит оценить погрешность полученного критериального уравнения (в процентах)

$$\Delta = \frac{N_{\text{рас}} - N}{N_{\text{рас}}} 100.$$

Построить корреляционный график зависимости  $N_{\text{рас}} = f(N)$ .

### Контрольные вопросы

1. Промышленное значение процесса перемешивания.
2. Типы механических мешалок.

3. Какие параметры оказывают основное влияние на расход мощности при перемешивании?
4. Вид и практическое значение обобщённого критериального уравнения для процесса перемешивания.
5. Порядок выполнения работы.
6. Почему при обработке данных более рационально применять логарифмическую систему координат?
7. Порядок проверки воспроизводимости опытов и её значение при проведении экспериментальных исследований.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### Определение времени и коэффициента защитного действия слоя адсорбента

#### Введение

Адсорбция – процесс поглощения одного или нескольких компонентов из газовых и жидких смесей и концентрирования его (их) на поверхности или в объеме пор твердого тела (адсорбента).

Адсорбционное поглощение компонентов из смесей вызвано взаимодействием силовых полей адсорбента и адсорбируемых молекул. Поглощаемое вещество, находящееся в смеси в неадсорбированном состоянии, называется адсорбтивом, а после перехода вещества в адсорбированное состояние – адсорбатом. В зависимости от типа сил, обуславливающих адсорбцию, различают физическую и химическую адсорбции. Физическая адсорбция вызывается силами молекулярного взаимодействия, которые могут носить разнообразный характер, в зависимости от природы адсорбента и адсорбата. Поглощение адсорбата сопровождается выделением теплоты. В отличие от химической адсорбции, адсорбция физическая является обратимым процессом.

В качестве адсорбентов используют активные угли, силикагели, алюмогели, природные и синтетические цеолиты, пористые стекла, природные алюмосиликаты (отбельные глины) и другие вещества. Для увеличения их адсорбционной способности применяют специальные способы обработки, позволяющие значительно изменить микроструктуру и увеличить удельную поверхность адсорбентов (поверхность единицы массы или единицы объема адсорбента).

В зависимости от размеров поры адсорбентов подразделяются на три типа: микро-, мезо- и макропоры. Микропоры имеют диаметры порядка 1–3 нм ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ). Адсорбция в микропорах сводится к заполнению их пространства молекулами адсорбата. Диаметры мезопор значительно больше размеров поглощаемых молекул и находятся в пределах от 3 до 400 нм. В мезопорах концентрирование молекул адсорбата происходит не в объеме пор, а на поверхности, по механизму капиллярной конденсации. Макропоры имеют диаметры свыше 200 нм. Они незаметно влияют на суммарную величину адсорбции и играют роль транспортных пор в зернах адсорбента. Перечисленные адсорбенты, за исключением цеолитов, представлены всеми типами пор и применяются как в форме зерен диаметром 1–5 мм, так и в виде мелкодисперсных порошков.

Адсорбенты, применяемые в промышленных условиях, характеризуются следующими параметрами:

- статическая адсорбционная емкость по поглощаемым компонентам;
- избирательность – способность поглощать только определенные молекулы компонентов;
- механическая прочность;
- возможность регенерации без ухудшения адсорбционных свойств;
- химическая инертность к газовым и жидким смесям;
- термостойкость.

Адсорбционные процессы находят широкое применение в пищевой промышленности. Они используются при очистке растительных масел в масложировой промышленности, очистке диффузионного сока и сиропа в свеклосахарном производстве, осветлении фруктово-овощных соков в консервной промышленности, стабилизации пива в пивоваренной промышленности, осветлении вин и обработке спиртов в ликероводочном производстве. Перечисленные жидкие продукты представляют собой многокомпонентные смеси растворенных органических веществ и коллоидов. В ряде случаев адсорбцией можно извлечь из смеси определенные ее компоненты, но при этом следует учитывать возможное влияние на этот процесс сопутствующих органических веществ. В пищевой промышленности наиболее распространена адсорбция из растворов, поэтому ниже даны основы теории этого процесса.

В основе расчета процесса адсорбции, лежат закономерности статики, кинетики и динамики процесса. При равновесии в системе адсорбент–адсорбат количество адсорбированного вещества  $a_p$  есть функция концентрации компонента  $C$  и температуры  $T$

$$a_p = f(C, T).$$

Для характеристики адсорбционных свойств пористых тел используют изотерму адсорбции, показывающую адсорбционную способность в зависимости от концентрации при постоянной температуре процесса ( $T = \text{const}$ ),

$$a_p = f(C).$$

Анализ изотермы адсорбции дает представление только о практической пригодности адсорбента для извлечения конкретного компонента из смеси. Поэтому для расчета процесса адсорбции используют также кинетические кривые, показывающие степень приближения процесса к равновесному состоянию. Следует иметь в виду, что адсорбционные процессы протекают, как правило, в динамических условиях, при которых адсорбент и раствор движутся друг относительно друга. В связи с этим существует несколько моделей динамики адсорбции, адекватность которых реальному процессу необходимо проверять экспериментальными исследованиями. В

частности, для расчета динамики процесса в неподвижном слое применяют модель фронтальной (послойной) отработки слоя адсорбента, предложенную Н.А. Шиловым

$$\tau_{\text{пр}} = kL - \tau_0, \quad (30)$$

где  $\tau_{\text{пр}}$  – время защитного действия слоя адсорбента (интервал времени от начала адсорбции до появления на выходе из слоя минимально допустимой концентраций адсорбтива), с;  $k$  – коэффициент защитного действия (интервал времени, в течение которого слой адсорбента единичной высоты задерживает адсорбат в условиях стационарного режима), с/м;  $L$  – высота слоя адсорбента, м;  $\tau_0$  – потеря времени защитного действия, связанная с начальным периодом формирования кривой распределения адсорбата в слое, с.

Уравнение (30) позволяет определить время защитного действия слоя адсорбента любой высоты, если экспериментально установлены величины  $k$  и  $\tau_0$  для определенного режима адсорбции (определенная скорость движения раствора через слой, его концентрация и т. д.). Рис. 10 иллюстрирует общий вид зависимости времени защитного действия слоя  $\tau_{\text{пр}}$  от его высоты  $L$ . Как следует из уравнения (30),  $\tau_0$  равно отрезку, отсекаемому от оси ординат, а  $k$  равно тангенсу угла наклона  $\alpha$  к оси абсцисс прямолинейного участка данной кривой. Из рис. 10 видно, что высота слоя адсорбента меньше так называемой высоты работающего слоя  $L_0$ . Следовательно, в данном случае имеет место период формирования фронта адсорбции. При высоте слоя превышающей значение  $L_0$ , осуществляется режим параллельного переноса фронта сорбции, при котором движение данного фронта в слое адсорбента происходит с постоянной скоростью  $U$

$$U = \frac{\omega C_0}{a_p}, \quad (31)$$

где  $\omega$  – скорость раствора, рассчитанная на полное сечение колонны, заполненной адсорбентом, м/с;  $C_0$  – начальная концентрация раствора, моль/м<sup>3</sup>;  $a_p$  – равновесная адсорбционная способность адсорбента, моль/м<sup>3</sup>.

$$U = \frac{1}{k}. \quad (32)$$

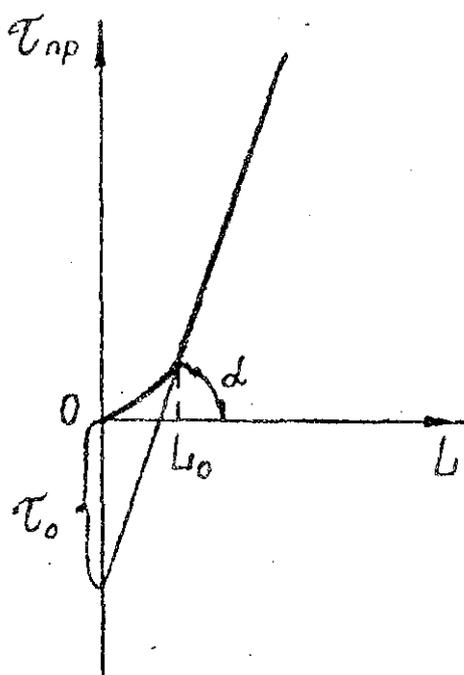


Рис.10 Зависимость времени защитного действия слоя от его высоты

Скорость распространения фронта сорбции  $U$  является величиной, обратной коэффициенту защитного действия слоя.

Под высотой работающего слоя понимают условную высоту слоя адсорбента, в котором концентрация адсорбата изменяется от нулевого до максимального значения, соответствующего величине начальной концентрации адсорбтива  $C_0$  (рис. 11). Высоте работающего слоя на рис. 11 соответствует изменение концентрации адсорбтива от практически нулевого значения до  $C_0$ . Линия изменения концентрации адсорбтива во времени ( $AB$ ) на выходе из слоя адсорбента называется выходной кривой. Выходные кривые получают по результатам экспериментальных исследований. Точка  $A$  на выходной кривой соответствует моменту проскока, который наступает при появлении минимальной концентрации адсорбтива в растворе на выходе из слоя адсорбента. Концентрация адсорбтива в точке  $B$  соответствует достижению равновесного состояния, при котором слой адсорбента полностью насыщен адсорбатом, поэтому концентрации адсорбтива в растворе перед слоем адсорбента и позади него одинаковы и для  $C_0$ .

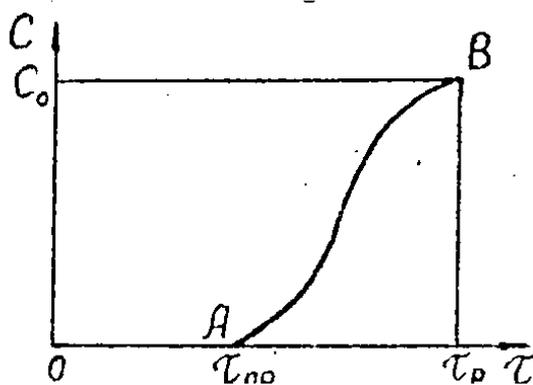


Рис. 11. Зависимость концентрации адсорбтива за слоем адсорбента от времени (выходная кривая)

### Цель работы

Определение времени защитного действия и коэффициента защитного действия слоя адсорбента.

### Описание установки

Схема установки представлена на рис. 12. Установка состоит из трех одинаковых адсорбционных колонок 1, 2, 3, установленных вертикально; напорного бака 4, имеющего шкалу делений; шлангов 5, соединяющих колонки с напорным баком; вентилях 6, 7, 8, 9. При выполнении лабораторной работы используется детектор для обнаружения минимальной концентрации адсорбтива, секундомер, линейка.

Высота слоя адсорбента в каждой из колонок 1, 2, 3 достаточна для создания режима параллельного переноса фронта сорбции. Наибольшая высота слоя адсорбента – в первой колонке, а наименьшая – в третьей, следовательно

$$L_1 > L_2 > L_3 > L_0, \quad (33)$$

где  $L_1, L_2, L_3$  – высота слоя адсорбента в соответствующей колонке, м;  $L_0$  – высота работающего слоя, м.

Колонки, выполнены из материала, имеющего высокую теплопроводность, что обеспечивает отвод теплоты из зоны процесса и приближает условия проведения лабораторной работы к изотермическим. Процесс адсорбции проводят на модельном растворе, приготовленном из воды и красителя. Напорный бак выполнен в виде сосуда Мариотта и обеспечивает постоянную величину гидростатического напора, а следовательно, и постоянный расход вытекающего раствора на всем протяжении опыта. Выбор типа

адсорбента и приготовление модельного раствора производится по указанию преподавателя.

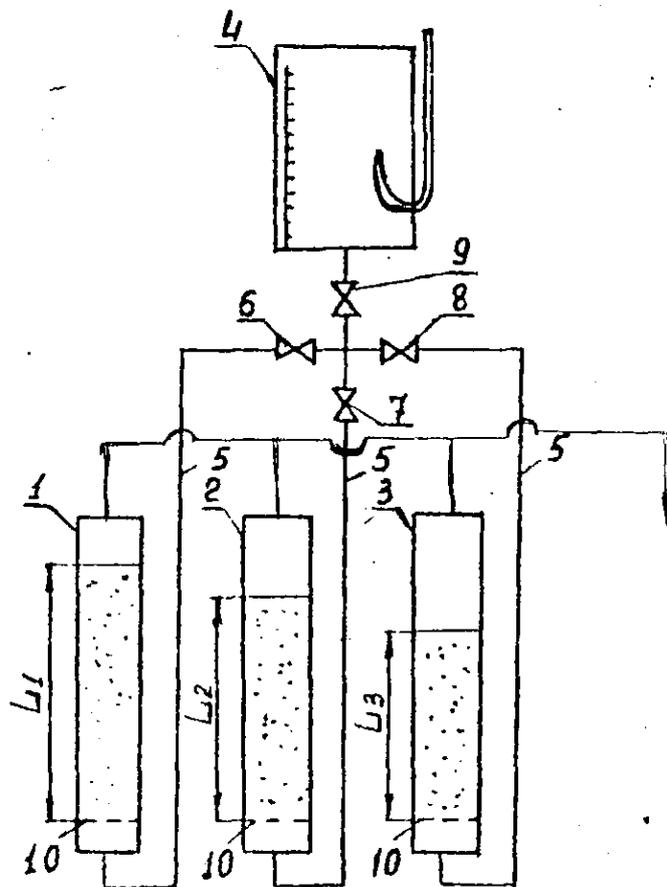


Рис. 12. Схема установки:

1, 2, 3 – адсорбционные колонки; 4 – напорный бак; 5 – шланги;  
6, 7, 8, 9 – вентили; 10 – решетки

### Методика проведения работы

1. Ознакомиться с содержанием работы и лабораторной установкой.
2. Закрывать вентиль 9 и залить приготовленный раствор в напорный бак.
3. Засыпать в колонки адсорбент по указанию преподавателя согласно условию (33) и уплотнить его легким постукиванием по стенкам колонок.
4. Значения высот слоя адсорбента ( $L_1, L_2, L_3$ ) в колонках занести в табл. 9.
5. Подать раствор в колонку 1, открыв вентили 9 и 6.
6. Включить секундомер в момент входа раствора в слой адсорбента и измерить интервал времени  $\tau_{пр}$  до появления за слоем минимальной концен-

трации красителя, фиксируемой детектором. Время  $\tau_{пр}$  равно времени защитного действия слоя.

7. Одновременно с этим измерить разницу уровней  $\Delta h$  в напорном баке за время опыта. Результаты измерений занести в табл. 9.

8. Закрывать вентили 9 и 6. Подать раствор в колонку 2, открыв вентили 9 и 7.

9. Измерить изменение уровня раствора в напорном баке за время опыта.

10. Закрывать вентили 9 и 7. Подать раствор в колонку 3, открыв вентили 9 и 8.

11. Провести в том же порядке изменения для слоя  $L_3$ .

12. Закрывать вентили 9 и 8, привести лабораторную установку в исходное состояние (слить раствор из напорного бака и колонок, предварительно отделив отработанный адсорбент).

Таблица 9

№ колонки	Длина слоя адсорбента $L$ , м	Время защитного действия слоя адсорбента $\tau_{пр}$ , с	Разница уровней раствора в напорном баке $\Delta h$ , м
1			
2			
3			

### Обработка опытных данных и составление отчета

1. Построить график зависимости времени защитного действия от высоты слоя адсорбента (рис. 10).

2. Определить из графика величины  $k$  и  $\tau_0$ .

3. Вычислить объем раствора, поданного из напорного бака в каждую колонку за время  $\tau_{пр}$

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \Delta h,$$

где  $d$  – диаметр напорного бака, м.

4. Рассчитать объемный расход раствора в каждой колонке

$$G = \frac{V}{\tau_{\text{пр}}}.$$

5. Определить скорость раствора на полное поперечное сечение пустой колонки

$$\omega = G/F_{\text{кол}} = G / \frac{\pi d^2}{4},$$

где  $d$  – диаметр адсорбционных колонок, м.

6. Вычислить скорость распространения фронта сорбции по формуле (31). Значения  $C_0$  и  $a_p$  задаются преподавателем.

7. Рассчитать коэффициент защитного действия слоя адсорбента по формуле (32).

8. Результаты расчетов для всех трех адсорбционных колонок занести в табл. 10.

9. Сравнить значения коэффициента защитного действия слоя, рассчитанные по формуле (32), с определенными по графику (рис. 10).

Таблица 10

№ колонки	$\tau_0$ , с	$k$ , с/м	$V$ , м <sup>3</sup>	$G$ , м <sup>3</sup> /с	$\omega$ , м/с	$U$ , м/с	$k$ , с/м
1							
2							
3							

### Контрольные вопросы

1. Что называется процессом адсорбции?
2. Какими силами обуславливается физическая адсорбция?
3. Что такое адсорбтив и адсорбат?
4. Какие вещества применяются в качестве адсорбентов?
5. Какими типами пор представлена пористая структура адсорбентов? Какова их роль в процессах адсорбции?
6. В чем заключаются требования предъявляемые к адсорбентам в промышленных условиях?

7. Какие вопросы изучает статика, кинетика и динамика процесса адсорбции?
8. Что определяет время защитного действия слоя адсорбента?
9. Как определяется высота работающего слоя адсорбента?
10. Назовите области применения процессов адсорбции в пищевой технологии.

## СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Исследование гидродинамики псевдооживленного слоя .....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Исследование работы распылительной сушильной установки .....	16
Приложение к лабораторной работе № 2 .....	28
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Определение расхода мощности при перемешивании .....	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Определение времени и коэффициента защитного действия слоя адсорбента .....	42

Константин Михайлович Федоров  
Николай Иванович Лукин  
Вячеслав Борисович Тишин  
Алексей Николаевич Жариков  
Алексей Борисович Дужий

## **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Методические указания  
к лабораторным работам 1–4  
для всех специальностей

Редактор Е.С. Лаврентьева  
Корректор Н.И. Михайлова

---

ЛР № 020414 от 12.02.97

Подписано в печать 27.12.2001. Формат 60×84 1/16. Бум. писчая

Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,79. Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,88

Тираж 500 экз. Заказ №

С 79

---

СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9  
ИПЦ СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9