

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



К.М. Федоров, Ю.Н. Гуляева, А.Б. Дужий

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ № 1–5

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2014

УДК 663.62

Федоров К.М., Гуляева Ю.Н., Дужий А.Б. Процессы и аппараты пищевых производств. Лабораторные работы № 1–5: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 57 с.

Приведены схемы экспериментальных установок с их подробным описанием, методики проведения экспериментальных исследований и порядок обработки полученных результатов, даны контрольные вопросы. Учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельной работы студентов направлений бакалавриата 220700, 151000, 240700, 260100, 260200 очной и заочной форм обучения.

Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.А. Арет

**Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Института холода и биотехнологий**



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, 2014

© Федоров К.М., Гуляева Ю.Н., Дужий А.Б., 2014

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), пропускать снизу вверх поток газа или жидкости (ожижающий агент), то состояние слоя будет зависеть от значения скорости ожижающего агента. При достижении некоторой скорости, называемой первой критической, частицы начинают перемещаться по объему слоя (псевдоожиженное состояние). При дальнейшем повышении скорости ожижающего агента объем слоя возрастает.

Все расчеты по определению параметров псевдоожиженного слоя построены на использовании скорости ожижающего агента (1), отнесенной к полному поперечному сечению аппарата (фиктивная скорость):

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

где: Q – объемный расход сжижающего агента, $\text{м}^3/\text{с}$; f_a – площадь поперечного сечения аппарата, м^2 .

Это связано с тем, что измерить действительную скорость воздуха в промежутках между твердыми частицами трудно, причем значение действительной скорости газа в промежутках между частицами слоя всегда будет больше фиктивной.

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

При достижении ожижающим агентом первой критической скорости $\omega_{\text{кр}}^1$ слой переходит в псевдоожиженное состояние (ПС).

При этом твердые частицы начинают перемещаться по слою. Дальнейшее увеличение скорости приводит к увеличению высоты слоя (слой расширяется).

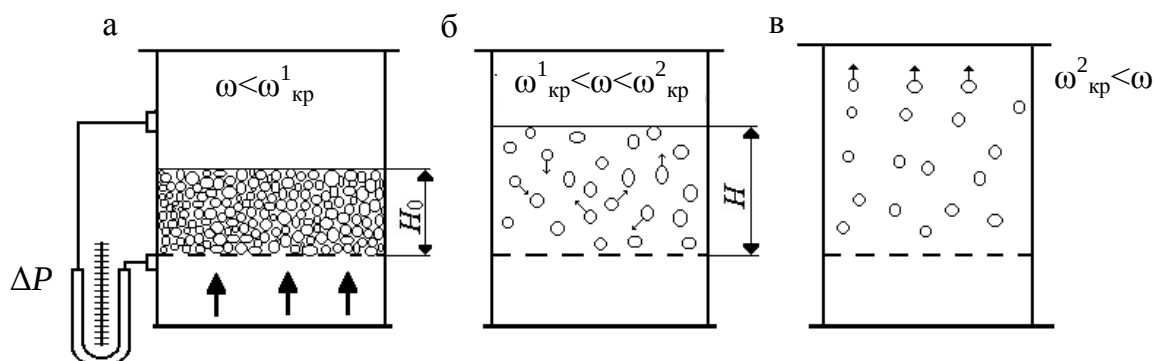


Рис. 1. Изменение структуры слоя в зависимости от скорости оживающего агента:
а – неподвижный слой; б – псевдооживенный слой; в – унос частиц из аппарата

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

Расширение ПС характеризуется порозностью ε , 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, м^3 ;
 $V_{сл} = f_a H$ – объем слоя (H – высота псевдооживенного слоя), м^3 .

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

$$V_{т} = f_a H_o (1 - \varepsilon), \quad (3)$$

где H_o – высота неподвижного слоя частиц.

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

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

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

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 ΔP и порозности ε .

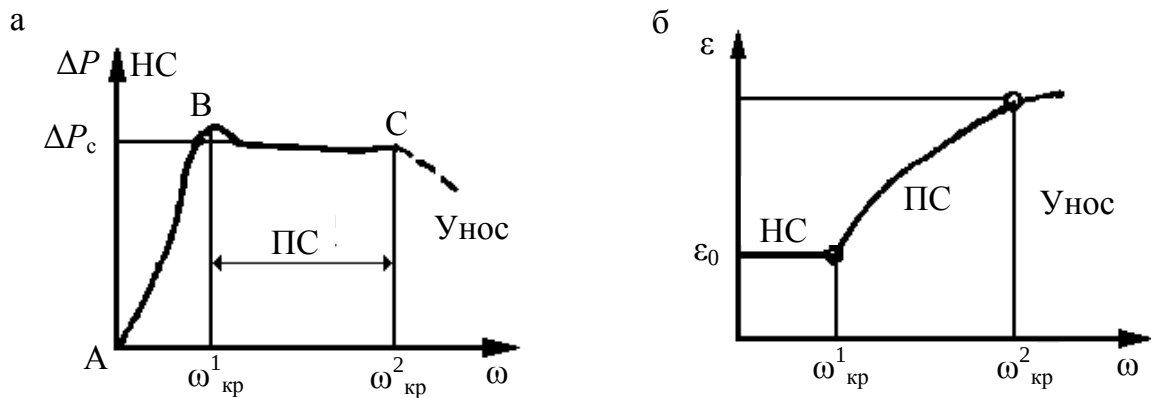


Рис. 2. Зависимости:
а – $\Delta P = f(\omega)$; б – $\varepsilon = f(\omega)$

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

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

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 ε

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

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

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

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

$$G = R + A, \quad (9)$$

где $R = \xi \frac{\rho_{\text{с}} \omega_0^2}{2} F$ – сила сопротивления твердой частицы, Н;

$G = mg = V_{\text{ч}}\rho_{\text{ч}}g$ – сила тяжести, Н; $A = V_{\text{ч}}\rho_{\text{с}}g$ – сила Архимеда, Н;

ξ – коэффициент сопротивления твердой частицы (зависит от режима обтекания); F – площадь поперечного сечения частицы, м²; m – масса частицы, кг; $\rho_{\text{с}}$ – плотность ожидающего агента, кг/м³; $V_{\text{ч}}$ – объем твердой частицы, м³; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность твердых частиц, кг/м³; $\omega_0 = \frac{\omega}{\varepsilon}$ – действительная скорость ожижающего агента в промежутках между частицами, м/с.

Таким образом

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

откуда

$$\xi \frac{\rho_{\text{с}} \omega_0^2}{2} F = V_{\text{ч}}g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}). \quad (11)$$

Поделив правую и левую части, уравнения (11) на F и подставив в него значение ω_0 , получим

$$\xi \frac{\rho_c \omega^2}{2\varepsilon^2} = \frac{V_{\text{ч}} g (\rho_{\text{ч}} - \rho_c)}{F}, \quad (12)$$

или при $\rho_{\text{ч}} \gg \rho_c$

$$\Delta P = \frac{V_{\text{ч}} g \rho_{\text{ч}}}{F} = \frac{mg}{F}. \quad (13)$$

Из формулы (13) следует, что перепад давления, возникающий при псевдоожиге твердой частицы, равен весу 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 псевдоожигенного слоя есть величина постоянная, независимая от скорости газа. Это постоянство для слоя объясняется тем, что при повышении расхода ожижающего агента происходит одновременное увеличение порозности слоя, а следовательно, действительная скорость ожижающего агента между частицами остается величиной постоянной (см. формулы (11) и (12)).

Расчет критических скоростей для псевдоожигенного слоя проводится с использованием зависимости между критериями Лященко Ly и Архимеда Ar (рис. 3), $Ly = f(Ar)$,

где критерий Лященко

$$Ly = \frac{\omega^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) g}, \quad (15)$$

критерий Архимеда

$$Ar = \frac{d_{\text{ч}}^3 \rho_c (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) g}{\mu_c^2}, \quad (16)$$

μ_c – динамический коэффициент вязкости, Па·с; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы, м.

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

$$Re = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61\sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}}, \quad (17)$$

где $Re = \frac{\omega d_{\text{ч}} \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}}$ – критерий Рейнольдса.

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

$$Re_{\text{кр}}^1 = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (18)$$

где $Re_{\text{кр}}^1 = \frac{\omega_{\text{кр}}^1 d_{\text{ч}} \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}}$.

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

$$Re_{\text{кр}}^2 = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}, \quad (19)$$

где $Re_{\text{кр}}^2 = \frac{\omega_{\text{кр}}^{\text{II}} d_{\text{ч}} \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}} = \frac{\omega_{\text{кр}}^{\text{II}} d_{\text{ч}}}{\nu}$; ν – коэффициент кинематической вяз-

кости, $\text{м}^2/\text{с}$, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.

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

$$d_{\text{э}} = d_{\text{ш}} \phi, \quad (20)$$

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

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

Для полидисперсного слоя, состоящего из частиц разного диаметра

$$d_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i / d_i)} \quad (21)$$

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.

Цель работы

1. Получить экспериментальные зависимости ΔP и ε от скорости ожижающего 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 $Lu = f(Ar)$ (рис. 3) значение второй критической скорости. Сравнить его с расчетом по формуле Тодеса.
5. По формуле Тодеса определить значение первой и второй критической скорости.
6. Сравнить экспериментальные значения первой критической скорости с расчетом по формуле Тодеса.
7. Рассчитать вес материала в слое.

Ly

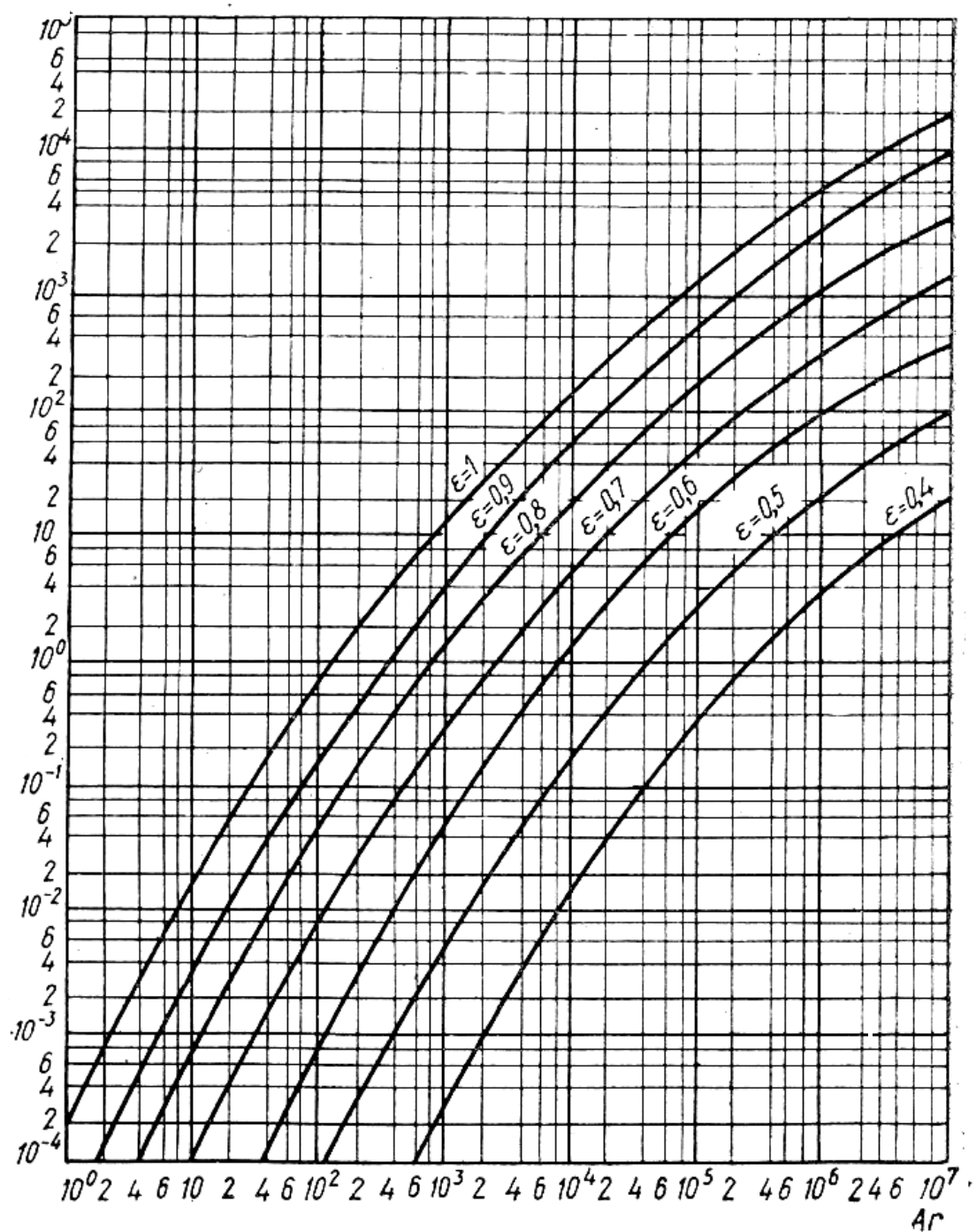


Рис. 3. Зависимость критерия Ly от критерия Ar и порозности слоя ϵ .

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 в колонку 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.

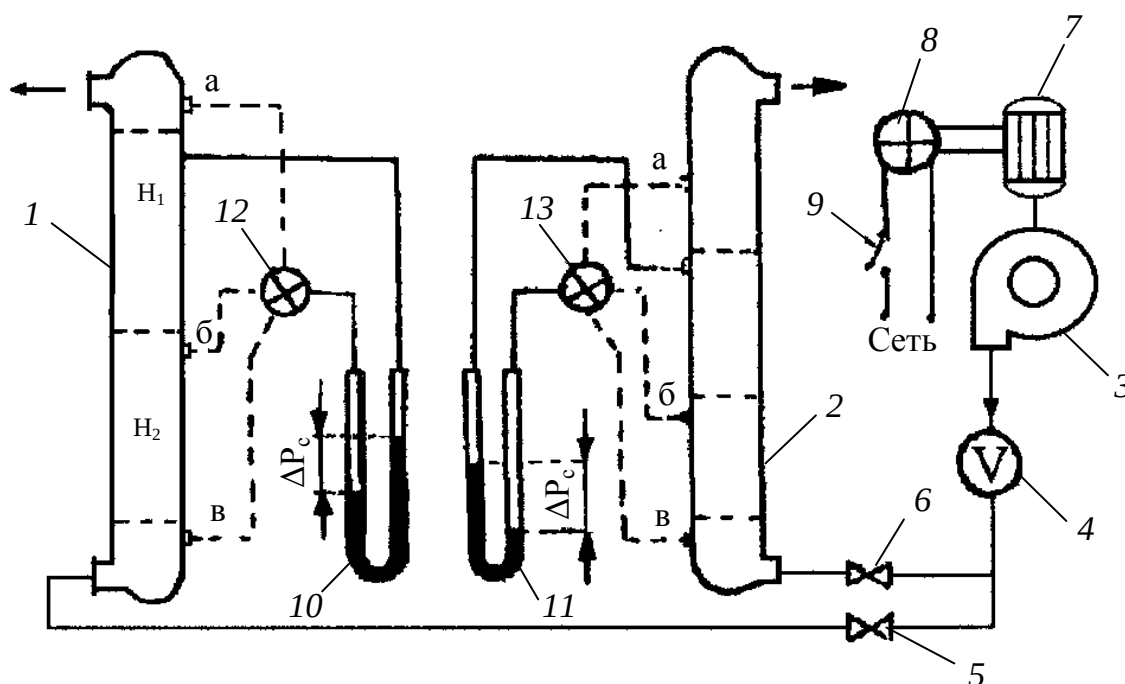


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

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 вентилях 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	$\Delta P_6 = \Delta P_p + \Delta P_1$
в	$\Delta P_v = 2\Delta P_a + \Delta P_1 + \Delta P_2$

ΔP_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 замерить 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 измерения 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. Рассчитать для каждого опыта скорость воздуха ω , м/с, по формуле (1)

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

2. Рассчитать гидравлические сопротивления слоев твердых частиц ΔP_i , переводя при этом показания дифференциального манометра из миллиметров водяного столба в Па. 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 котором нанести данные для каждого из слоев. Из графика определить значение $\omega_{кр}^1$.

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

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

$$\rho_c = \rho_0 \frac{273}{T};$$

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

где $\rho_0 = 1,293$ – плотность воздуха при 0 °С, кг/м³; $\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6}$ – динамический коэффициент вязкости при 0 °С, Па·с; $T = 273 + t$ °С – абсолютная температура, К; C – постоянная Сатерленда (для воздуха $C = 124$).

6. По значению $\omega_{кр}^1$ рассчитать критерий Лященко.

7. Определить средний диаметр частиц в слое d_3 . Так как $\rho_{ч} \gg \rho_c$, то в формуле (15) и (16) принять $\rho_{ч} - \rho_c \approx \rho_{ч}$. Затем по графику (рис. 3) найти соответствующее значение критерия Архимеда при $\varepsilon = 0,4$ и определить диаметр частиц d_3 .

8. Рассчитать по известному d_0 значение $\omega_{кр}^1$ и $\omega_{кр}^2$, исходя из формулы Тодеса.

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

Отчет о работе должен содержать: задание; схему установки со спецификацией; отчетную таблицу; графики $\Delta P_i = f(\omega)$ и $\varepsilon_i = f(\omega)$; расчет среднего диаметра частиц; расчет веса материала в каждом слое; экспериментальное определение $\omega_{кр}^1$; расчет $\omega_{кр}^1$ и $\omega_{кр}^2$ по формуле Тодеса.

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 твердых частиц $\rho_{\text{ч}} = \dots$ кг/м³

Номер колонны ...

Порозность неподвижного слоя $\varepsilon_0 = \dots$

Температура воздуха $t = \dots$

Таблица 2

№ п/п	Опытные данные							Расчетные данные					
	Объем ожи- жающего агента V, м³	Время изме- рения объёма τ, с	Расход ожижающего агента, Q, м³/с	Показания дифференци- ального манометра, мм вод. ст.			Высота слоя H, м		Скорость воз- духа ω, м/с	Гидравлическое сопротивление слоёв, Па		Порозность слоя, ε	
				$\Delta P_a = \Delta P_p$ гидравлическое со- противление сети	$\Delta P_6 = \Delta P_p + \Delta P_1$	$\Delta P_b = 2\Delta P_p + \Delta P_1 + \Delta P_2$	H_1 пер- вого слоя	H_2 вто- рого слоя		ΔP_1 пер- вого слоя	ΔP_2 вто- рого слоя	ε_1 пер- вого слоя	ε_2 вто- рого слоя
1 2 3 и т.д													

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Определение расхода мощности при перемешивании

Введение

Перемешивание – это процесс многократного перемещения 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

$$Eu_m = f(Re_m, Fr_m, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_i), (22)$$

где $Eu_m = \frac{N_3}{\rho n^3 d^5}$ – 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); ρ – плотность перемешиваемой среды, кг/м³; μ – коэффициент динамической вязкости среды, Па·с; g – ускорение свободного падения, м/с²; d – диаметр рабочего элемента мешалки, м; n – частота вращения мешалки, об/с; N_3 – полезная 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 аппарата, м.

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

$$Eu_m = c Re_m^k Fr_m^m, (23)$$

где c, k, m – экспериментально определяемые величины.

В случаях, когда на поверхности среды не образуется воронка (например, при установке отрагательных перегородок или при погружении рабочего элемента мешалки на достаточную глубину), влиянием силы тяжести можно пренебречь и из уравнения (23) исключить критерий Фруда. Тогда обобщенное уравнение для определения мощности, потребляемой мешалкой, примет вид

$$Eu_m = c Re_m^k, (24)$$

откуда

$$N = (\rho n^3 d^5) c Re_m^k. (25)$$

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. 5. 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 осевого усилия, 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 ноль.

4. В соответствии с заданием заполнить таблицу исходных данных (табл. 3). Необходимые геометрические размеры измерять штангенциркулем.

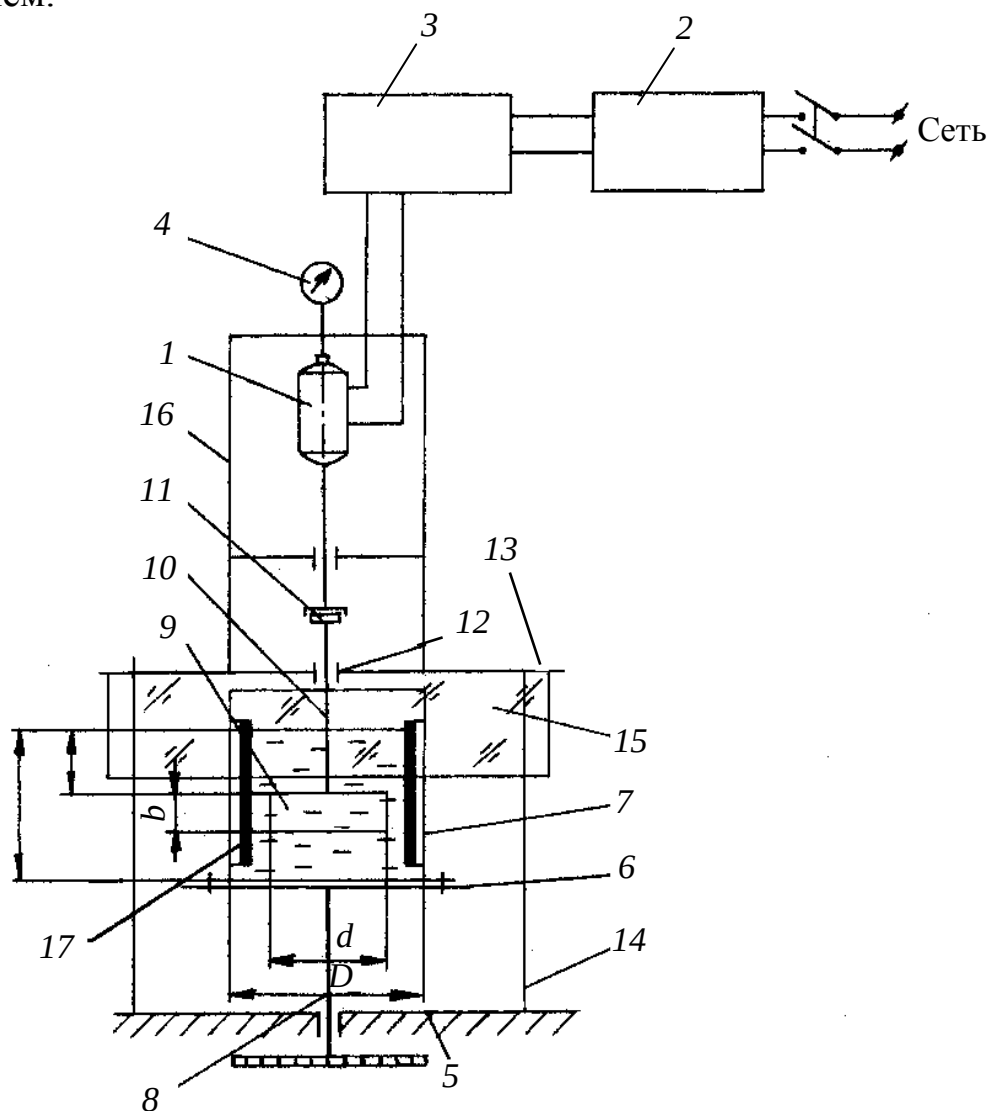


Рис. 5. Схема установки для исследования процесса перемешивания:
1 – электродвигатель; 2 – ЛАТР; 3 – ваттметр; 4 – тахометр; 5 – станина;
6 – подъемный стол; 7 – корпус мешалки; 8 – ходовой винт; 9 – рабочий
элемент мешалки; 10 – вал; 11 – муфта; 12 – подшипники; 13 – плита;
14 – стойки; 15 – защитный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

Таблица 3

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	°C	
Плотность среды	ρ	кг/м ³	
Коэффициент динамической вязкости среды	μ	Н·с/м ²	

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. Произвести замеры частоты вращения мешалки на холостом ходу при заданной потребляемой мощности и заполнить табл.4. Измерения проводить не менее трёх раз, каждый раз, последовательно, изменяя частоту вращения.

Таблица 4

№ опыта	Мощность, N_{xx} , Вт	Частота вращения, об/мин			Среднее значение n , об/с
		1	2	3	
1					
2					
3					

7. Провести рандомизацию опытов (см. 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. Для рандомизации из таблицы случайных чисел выбирается из любого столбца или строки последовательность случайных чисел и записывается в соответствующий столбец табл. 5. Замеры проводятся в порядке возрастания или убывания случайных чисел.

8. Залить в корпус мешалки заданный объём исследуемой системы и замерить 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.

Таблица 5

№ опыта	Мощность, потребляемая мешалкой 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

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_j^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

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

Для каждой серии затем вычислить оценку дисперсии

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

Для проверки воспроизводимости опытов найти 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 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

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

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_{xx} от частоты вращения мешалки: $N_{xx}=f(n)$.

3. Рассчитать полезную мощность, потребляемую мешалкой при перемешивании жидкости по заданной частоте вращения рабочего элемента (табл. 6). $N_p = N_n - N_{xx}$, где N_{xx} – определить из графика.

4. Для каждого опыта рассчитать 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 (24). Прологарифмировав уравнение (24), получить уравнение прямой линии в логарифмических координатах

$$\lg(Eu_M) = K \cdot \lg(Re_M) + \lg(C) \quad (26)$$

Показатель степени определяется как тангенс угла наклона φ к оси абсцисс (рис. 6). Так как угол находится во второй четверти, то тангенс этого угла – отрицательная величина, а, следовательно, и K – отрицательная величина.

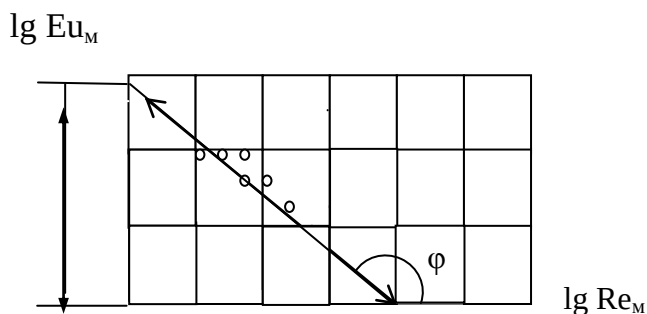


Рис. 6. Зависимость $\lg Eu_M = f(\lg Re_M)$

Постоянная C находится как отрезок, отсекаемый прямой на оси координат, или из уравнения (24) при известном K . Если C определяется с использованием уравнения (24), то необходимо рассчитать 3–5 значений C и найти из них среднее.

Примечание

При построении графика по рис. 6. 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

№ опы-та	Частота вращения n , об/с	Мощность холостого хода N_x , Вт	Потребляемая мощность N , Вт	Полезная мощность N_p , Вт	Eu_M	$\lg Eu_M$	Re_M	$\lg Re_M$	$N_{рас}$, Вт	Δ
1										
⋮										
i										

6. Записать полученное критериальное уравнение, подставив в него экспериментально определённые величины C и K (24).

Рассчитать по формуле (25) 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)

$$\Delta = \left(\frac{N_{рас} - N}{N_{рас}} \right) 100 .$$

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

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 № 3

Изучение процесса фильтрования суспензий

Введение

Фильтрованием называют процесс разделения суспензий через пористую (фильтровальную) перегородку, которая задерживает твердую (дисперсную) фазу и пропускает жидкую (дисперсную) среду (рис.7).

Процесс фильтрования подразделяют на два вида: поверхностное фильтрование (с образованием слоя осадка) и глубинное фильтрование (с закупориванием пор фильтровальной перегородки). Возможен также промежуточный вид фильтрования – поверхностно-глубинный. Вид фильтрования определяется взаимосвязью между свойствами суспензии и фильтровальной перегородки.

При разделении маловязких суспензий с концентрацией твердой фазы более 1 %, через фильтровальную перегородку с размерами пор меньше размеров частиц имеет место поверхностное фильтрование. Твердые частицы накапливаются на поверхности фильтровальной перегородки и образует осадок. При дальнейшем разделении суспензий слой осадка начинает играть роль фильтрующего элемента, задерживая частицы твердой фазы и предотвращая закупоривание пор фильтровальной перегородки. При этом над входами в поры перегородки образуются "сводики" из твердых частиц, пропускающие жидкую фазу суспензии, но задерживающие другие твердые частицы. Разделение суспензий поверхностным фильтрованием наиболее целесообразно, так как закупоривание пор фильтровальной перегородки твердыми частицами с соответствующим увеличением ее сопротивления почти не происходит.

При разделении вязких суспензий с небольшой концентрацией мелкодисперсных фракций через фильтровальную перегородку с размерами пор больше размеров частиц имеет место глубинное фильтрование. Твердые частицы проникают в поры фильтровальной перегородки и задерживаются в них, не образуя осадка. Закупоривание пор твердыми частицами наблюдается уже в начальный период процесса разделения суспензий, что снижает производительность фильтра. Глубинное фильтрование используют только в фильтрах

периодического действия. При этом необходима периодическая регенерация или замена фильтровальной перегородки.

С целью интенсификации производственного процесса фильтрации суспензий с концентрацией твердой фазы менее 1 % в фильтрах используют вспомогательные вещества, которые наносят на фильтровальную перегородку. Фильтровальные вспомогательные вещества образуют слой осадка, который препятствует проникновению твердых веществ в поры фильтровальной перегородки.

В качестве фильтрующих материалов применяют зернистые материалы – песок, гравий, хлопчатобумажные и шерстяные ткани, ткани из синтетических волокон, а также картон, пористые полимерные материалы, керамику и т. д. В фильтрах с намывным слоем применяют различные порошкообразные инертные материалы (диатомит, кедельгур, мел, гашеная известь), а также волокнистые материалы (целлюлоза).

Фильтровальные перегородки должны обладать необходимой задерживающей способностью, обеспечивать заданную чистоту фильтрата, не создавать значительного гидравлического сопротивления потоку и иметь высокую механическую прочность.

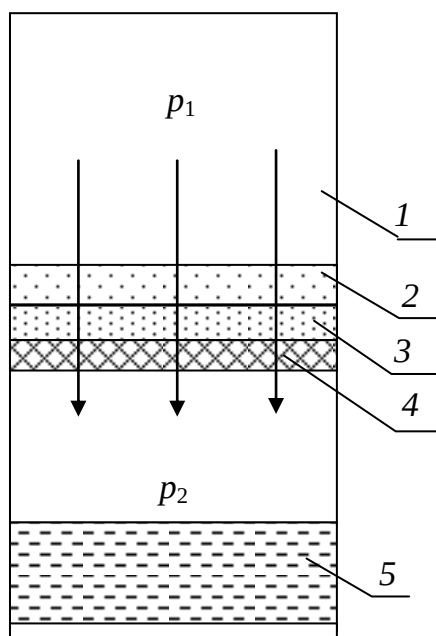


Рис. 7. Схема фильтра для разделения суспензий:

1 – корпус; 2 – суспензия; 3 – осадок;
4 – фильтровальная перегородка; 5 – фильтрат

По целевому назначению процесс фильтрования может быть очистным или продуктовым. Очистное фильтрование применяют для разделения суспензий и очистки растворов от различного рода включений. Целевым продуктом является фильтрат. В пищевой промышленности очистное фильтрование используют при осветлении вина, виноматериалов, молока, пива и других продуктов.

Назначение продуктового фильтрования – выделение из суспензий, диспергированных в них продуктов в виде осадка. Целевым продуктом является осадок. Примером такого фильтрования является разделение дрожжевых суспензий.

Движущая сила процесса фильтрования – разность давлений по абсолютной стороне фильтровальной перегородки.

$$\Delta p = p_1 - p_2 \text{ при } p_1 > p_2. \quad (27)$$

Эта разность создается с помощью насоса, компрессора или вакуум насоса. Условия протекания процесса фильтрования зависят от способа создания разности давлений.

Существует фильтрование:

- при постоянной разности давлений $\Delta p = \text{const}$;
- при постоянной скорости $W = \text{const}$;
- при переменных разностях давлений и скорости $\Delta p = \text{var}$ и $W = \text{var}$.

При фильтровании под давлением движущая сила процесса

$$\Delta p = p_{\text{изб}} - p_{\text{атм}}; p_1 = p_{\text{изб}}; p_2 = p_{\text{атм}}. \quad (28)$$

Величина избыточного давления ограничена мощностью насоса и прочностью аппарата

$$\lim_{p_{\text{изб}} \rightarrow \infty} (\Delta p) = p_{\text{изб}} - p_{\text{атм}}.$$

При $p_{\text{атм}} = 10^5$; $\lim \Delta p = \infty$.

При фильтровании под вакуумом движущая сила процесса

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}}; p_1 = p_{\text{атм}}; p_2 = p_{\text{вак}}, \\ \lim(\Delta p) &= p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} \approx 10^5 \text{ Па}. \end{aligned} \quad (29)$$

Движущая сила процесса фильтрования под избыточным давлением выше, чем при фильтровании под вакуумом. Несмотря на это фильтрование под вакуумом получило более широкое распространение в промышленности. Это объясняется возможностью создания непрерывного процесса, так как слой осадка формируется со стороны атмосферного давления и может беспрепятственно удаляться.

Непрерывное удаление осадка при фильтровании под давлением значительно усложняет конструкцию фильтра. Фильтрование при постоянной скорости осуществляется, если суспензию подают на фильтр поршневым насосом с постоянной производительностью (при данном числе оборотов электродвигателя).

Если суспензию подают на фильтр центробежным насосом с уменьшающейся (при данном числе оборотов электродвигателя) производительностью при возрастании сопротивления осадка, то процесс фильтрования осуществляется при переменных разности давлений и скорости.

Эффективность процесса разделения суспензий характеризуется "эффектом разделения" или степенью очистки η (в %)

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100, \quad (30)$$

где C_1 и C_2 – концентрации дисперсной фазы соответственно в суспензии и фильтрате.

Образующийся в процессе фильтрования осадок должен иметь минимальную влажность. Влажность осадка U (в %) определяют по формуле

$$U = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{ос}}} \cdot 100, \quad (31)$$

где $m_{\text{ж}}$ – масса жидкой фазы в осадке; $m_{\text{ос}}$ – масса влажного осадка.

Интенсивность процесса фильтрования оценивают скоростью или удельной производительностью W , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. W – это объем фильтрата (в м^3), полученный с 1 м^2 фильтрующей поверхности за 1с.

$$W = \frac{dQ}{F \cdot d\tau} = \frac{dV}{d\tau}. \quad (32)$$

Среднюю скорость процесса определяют по последнему значению по формуле

$$W_{\text{ср}} = \frac{Q}{F\tau} = \frac{V}{\tau}, \quad (33)$$

где $V = \frac{Q}{F}$ – удельный объем фильтрата, м³/м², Q – суммарный объем полученного фильтрата, м³, τ – суммарное время фильтрования, с.

Скорость фильтрования может быть определена по закону Дарси

$$W = k\Delta p, \quad (34)$$

где k – коэффициент сопротивления, м/Па с.

При фильтровании с образованием слоя осадка общее сопротивление фильтрованию R определяют как сумму сопротивлений фильтровальной перегородки $R_{\text{ф}}$ и слоя осадка $R_{\text{ос}}$

$$R = R_{\text{ф}} + R_{\text{ос}}. \quad (35)$$

Коэффициент сопротивления (фильтрования) имеет вид

$$k = \frac{1}{\mu(R_{\text{ос}} + R_{\text{ф}})}. \quad (36)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости жидкой фазы суспензии, Па с.

В каждый момент времени скорость фильтрования прямо пропорциональна разности давлений Δp и обратно пропорциональна сопротивлению R и вязкости жидкости μ

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu(R_{\text{ос}} + R_{\text{ф}})}. \quad (37)$$

Сопротивление слоя осадка определяют равенством

$$R_{\text{ос}} = r_{\text{ос}} h, \quad (38)$$

где $r_{\text{ос}}$ – удельное сопротивление слоя осадка, м^{-2} ; h – толщина слоя осадка, м .

$$h = \frac{\chi Q}{F} = \chi V, \quad (39)$$

где χ – объемная концентрация твердой фазы в разделяемой суспензии.

Из уравнения (37) с учетом (38) и (39) можно получить основное уравнение фильтрования

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu(r_{\text{ос}}h + R_{\text{ф}})}. \quad (40)$$

Решим уравнение (40) для фильтрования с образованием слоя несжимаемого осадка при постоянном перепаде давления. В этом случае: $\Delta p = \text{const}$ – движущая сила постоянна; $r_{\text{ос}} = \text{const}$ – осадок несжимаемый; $h = \text{var}$ – высота слоя осадка увеличивается; $\chi = \text{const}$ – концентрация твердых частиц в суспензии постоянна; $R_{\text{ф}} = \text{const}$ – сопротивление фильтрующей перегородки не изменяется в процессе фильтрования.

После интегрирования (40) в пределах от 0 до V и от 0 до τ , получим

$$V^2 + 2 \frac{R_{\text{ф}}}{r_{\text{ос}}\chi} V = 2 \frac{\Delta p}{\mu r_{\text{ос}}\chi} \tau \quad (41)$$

или

$$V^2 + 2cV = k\tau, \quad (42)$$

где $c = \frac{R_{\text{ф}}}{r_{\text{ос}}\chi}$, и $k = \frac{2\Delta p}{\mu r_{\text{ос}}\chi}$, – c , k – константы фильтрования.

Если продифференцировать уравнение (42)

$$2VdV + 2cdV = k d\tau,$$

то можно получить формулу для расчета скорости фильтрования

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{k}{2(V + c)}. \quad (43)$$

Константы фильтрования c и k в каждом конкретном случае чаще всего определяются экспериментально.

Цель работы

1. Определение сопротивления фильтровальной перегородки.
2. Определение констант фильтрования.
3. Определение производительности фильтра по фильтрату и влажному осадку.

Описание установки

Подлежащая фильтрованию суспензия приготавливается в сосуде 9 (рис. 8). При открытом кране 10 суспензия поступает в фильтр 8, в котором на решетке 6 помещается фильтровальная перегородка 7. Фильтрат собирается и измеряется в сборнике 4. Фильтрование осуществляется за счет разрежения в сборнике 4, которое создается вакуум-насосом 1. С помощью вентиля 2 по вакуумметру 3 устанавливается заданное разрежение под фильтровальной перегородкой.

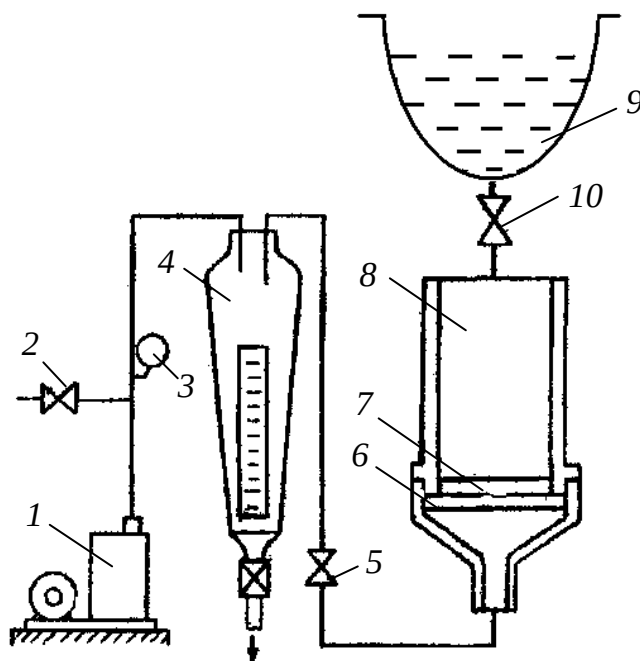


Рис. 8.Схема установки
(1–10 см. по тексту)

Методика проведения работы

Приготавливают суспензию с определенной концентрацией. Массовая концентрация дисперсной фазы (в процентах) в разделяемой суспензии равна

$$y_c = \frac{G_d}{G_c} \cdot 100,$$

где G_d – масса дисперсной фазы, кг; G_c – масса суспензии, кг.

Проверяют готовность установки к работе. Вентиль 2, краны 5 и 10 должны быть закрыты. На решетку 6 укладывают фильтровальную перегородку.

Для определения сопротивления фильтровальной перегородки включают вакуум-насос и медленно открывают вентиль 2, устанавливая такую же величину вакуума, как при фильтровании. Наливают фильтрат в фильтр, затем медленно открывают кран 5 и одновременно включают секундомер. Замеряют время τ_{ϕ} , за которое пройдет через фильтровальную перегородку объем фильтрата Q_{ϕ} (например 500 мл). По окончании этого опыта закрывают кран 10 и выключают вакуум-насос.

После определения времени фильтрования чистой воды через фильтровальную перегородку вновь включают вакуум-насос и медленно открывают вентиль 2, устанавливая заданную преподавателем величину вакуума по вакуумметру 3. Наливают суспензию в фильтр, затем медленно открывают кран 5 и одновременно включают секундомер. В ходе фильтрования поддерживают заданное значение вакуума.

С начала опыта записывают время τ (в секундах), за которое в мерном сборнике накапливаются заданные объемы фильтрата в мл. Результаты измерений заносят в табл. 9.

По окончании фильтрования закрывают кран 5, выключают вакуум-насос. Линейкой измеряют толщину слоя осадка и диаметр всего слоя. Из сборника фильтрат выливают в промежуточную емкость, разбирают фильтр, очищают фильтровальную перегородку от осадка, промывают ее водой, затем собирают фильтр.

Таблица 9

№ опыта	$\tau, \text{с}$	$Q, \text{м}^3$	$V = \frac{Q}{F}, \text{м}^3/\text{м}^2$	Интервалы		$d\tau/dV, \text{с} \cdot (\text{м}^2/\text{м}^3)$	Примечание
				$dV = V_n - V_{n-1}, \text{м}^3/\text{м}^2$	$d\tau = \tau_n - \tau_{n-1}, \text{с}$		
1 2 3							$\Delta p = \dots \text{Па}$ $h = \dots \text{м}$

Обработка опытных данных и составление отчета

1. По опытным данным подсчитывают сопротивление фильтровальной перегородки из уравнения

$$\frac{Q_{\phi}}{F\tau_{\phi}} = \frac{\Delta p}{\mu R_{\phi}}.$$

2. По данным последнего опыта (табл. 9) и из уравнений (37,38) подсчитывают удельное сопротивление осадка.

3. Константы фильтрования k и c определяют следующим путем. Из уравнения (43) получим выражение для расчета величин обратной скорости фильтрования

$$\frac{d\tau}{dV} = \frac{2V}{k} + \frac{2c}{k}.$$

В координатах $(d\tau/dV, V)$ эта зависимость отображается прямой линией, тангенс угла наклона которой равен $\text{tg } \alpha = 2/k$ и которая отсекает на оси ординат отрезок $b = 2c/k$ (рис. 9).

На оси абсцисс эта прямая отсекает отрезок a . Поскольку $\text{tg } \alpha = b/a$, имеем $b/a = 2/k$ или $a = k b/2 = k/2(2c/k) = c$. Следовательно, отрезок, отсекаемый прямой на оси абсцисс, численно равен константе c .

$$\frac{dV}{d\tau} \approx \frac{\Delta V}{\Delta \tau}$$

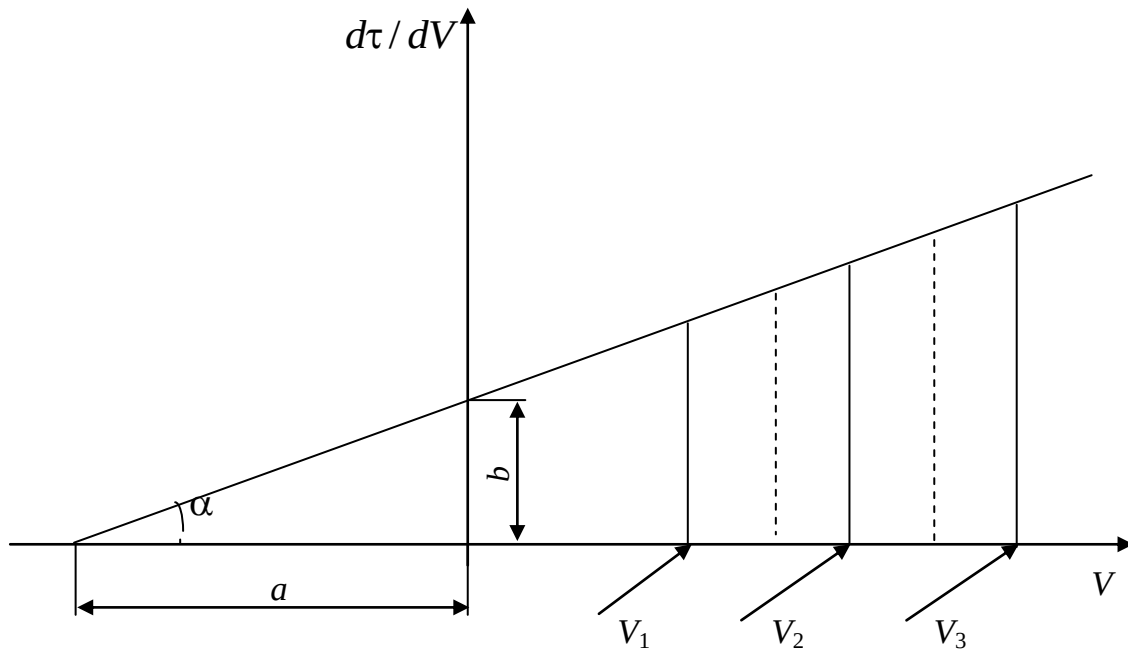


Рис. 9. График зависимости $d\tau/dV$ от V

Для упрощения задачи на оси ординат откладывают значения отношений $d\tau/dV$ (см. табл. 9), приближено считая их средними для соответствующих интервалов значения V . Поэтому значения $d\tau/dV$ откладывают по вертикали, проведенной из середины соответствующего участка (рис. 9).

4. Среднюю скорость фильтрования за время опытов определяют по уравнению (33). Скорость фильтрования в начальный и конечный моменты процесса подсчитывают по формулам

$$\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_1 = \frac{k}{2(V_1 + c)}, \quad \left(\frac{dV}{d\tau}\right)_n = \frac{k}{2(V_n + c)}.$$

5. Определяют часовую производительность фильтра по фильтрату и влажному осадку

$$Q_{\phi} = \frac{Q_n 3600}{F\tau_n}, \quad Q_{oc} = \frac{Fh3600}{F\tau_n} = \frac{h3600}{\tau_n}.$$

где Q_n – общее количество фильтрата, собранного за время опыта, м^3 ; τ_n – продолжительность опыта, с.

Контрольные вопросы

1. Как подразделяются процессы фильтрации по виду фильтрации?
2. Какие целевые продукты получают при очистном и продуктивном фильтровании?
3. Требования, предъявляемые к фильтровальным перегородкам. Какие материалы используют для изготовления фильтровальных перегородок?
4. Как происходит процесс фильтрации с использованием вспомогательных материалов?
5. Что является движущей силой процесса фильтрации? Способы создания движущей силы и их влияние на условия проведения процесса фильтрации.
6. Как определяется эффективность процесса разделения суспензии?
7. Как определяется удельная производительность процесса фильтрации?
8. Основные уравнения фильтрации.
9. Метод определения констант фильтрации.
10. Как определяют сопротивления фильтровальной перегородки и удельное сопротивление осадка?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Изучение процесса измельчения в молотковой дробилке

Введение

Эффективным способом измельчения твердых материалов является ударное разрушение. Машины ударного действия имеют лучшие технологические-экономические показатели по сравнению с машинами другого принципа действия. Из машин ударного действия наиболее перспективными являются молотковые дробилки, применяемые в тех случаях, когда на одной ступени измельчения необходимо получить высокодисперсную смесь измельченных частиц. Молотковые дробилки хорошо измельчают хрупкие материалы (зерно, соль, сахар и др.) и менее эффективны при измельчении влажных материалов и продуктов с высоким содержанием жира. Наибольшее распространение получили дробилки со свободно подвешенными молотками.

Молотки должны перемещаться с такой окружной скоростью, при которой обеспечивается первичное разрушение материала в момент ударов по нему молотков. Эту необходимую скорость можно определить приближенно исходя из закона количества движения

$$m(W_2 - W_1) = P\tau, \quad (44)$$

где m – масса измельчаемой частицы, кг; W_2 – скорость частицы после удара о молоток, м/с; W_1 – скорость частицы до удара о молоток, м/с; P – сила удара, необходимая для первичного разрушения частицы, Н; τ – продолжительность удара, которая может быть принята равной 10^{-5} м·с

Так как W_1 значительно меньше W_2 , то можно принять $mW_2 = P\tau$.

Процесс измельчения на молотковых дробилках оценивается по таким параметрам как степень измельчения, производительность, удельный расход энергии на проведении процесса.

Степенью измельчения i называется отношения среднего размера частиц исходного диаметра D к среднему размеру частиц измельченного продукта $d_{\text{ср}}$.

$$i = \frac{D}{d_{\text{cp}}} . \quad (45)$$

Для определения среднего размера частиц после измельчения выполняется ситовой анализ с использованием набора сит. Для этого навеску материала разделяют на фракции, просеив навеску, через набор сит с отверстиями разных размеров и получают несколько фракций. Число фракций не должно быть менее 5 и более 20. Размеры частиц получаемых фракций ограничены размерами отверстий сита. В случае использования сетки под размерами сита понимают длину стороны квадратной ячейки, образуемой переплетением сетки.

Принято называть материал, прошедший через сито "проход", а материал оставшийся на сите – "сход" с сита.

При выполнении ситового анализа сита располагают друг над другом в порядке убывания размеров сверху вниз, на верхнее сито помещается навеска материала, и весь набор закрепляется, например, на вибростолике и производится встряхивание набора сит. После истечения заданного времени проводится анализ результатов разделения навески материала на фракции.

Для каждой i -ой фракции находят средний размер частиц фракции как полусумму размеров отверстий в ситах, через которое прошли частицы и на котором частицы остались

$$d_{\phi_i} = \frac{d_{i-1} + d_i}{2}, \quad (46.1)$$

для первой фракции средний размер определяется

$$d_{\phi_1} = \frac{d_1 + d_{\text{в}}}{2}, \quad (46.2)$$

где $d_{\text{в}}$ – размер верхнего сита, мм.

Размер верхнего сита $d_{\text{в}}$ подбирается в ходе опыта как **минимальный** размер сита, через которое проходят все частицы.

Средний размер частиц в смеси вычисляют по уравнению

$$d_{\text{cp}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i / d_{\phi_i})}, \quad (47)$$

где $d_{\phi i}$ – средний размер частиц каждой фракции; x_i – относительное массовое содержание каждой фракции в смеси.

$$x_i = \frac{G_i}{\sum_{i=1}^n G_i}, \quad (48)$$

где G_i – масса остатка на i -м сите.

Производительность молотковых дробилок зависит не только от вида и свойств материала, но и от числа оборотов вала, на котором крепятся молотки, от размеров дробилки, размеров решетки на выходе из дробилки.

Производительность Q молотковых дробилок

$$Q = K_1 \rho D_p L n. \quad (49)$$

где K_1 – эмпирический коэффициент, который зависит от типа и размеров отверстий решетки, физико-механических свойств сырья и конструктивных особенностей молотковых дробилок; ρ – плотность измельченного материала, кг/м³; D_p – диаметр ротора дробилки, м; L – длина ротора дробилки, м; n – частота вращения ротора, с⁻¹.

Потребляемая мощность N электродвигателя дробилки на процесс измельчения

$$N = K_1 K_2 D_p^2 n, \quad (50)$$

где K_2 – эмпирический коэффициент, который в основном зависит от получаемой степени измельчения и физико-механических свойств измельчаемого материала, кВтс/кг.

Значения эмпирических коэффициентов K_1, K_2 следующие: для сит с диаметром отверстий до 3 мм K_1 от $3,6 \cdot 10^{-5}$ до $4,7 \cdot 10^{-5}$; для чешуйчатых сит с диаметром отверстий от 4–5 до 10 мм K_1 от $6,0 \cdot 10^{-5}$ до $10,5 \cdot 10^{-5}$ (меньшее значение коэффициента K_1 принимают для сит с меньшим размером отверстий), K_2 от 2,0–4,0 (меньшее значение коэффициента K_2 принимают при крупном размоле, а большее – при мелком размоле).

Цель работы

1. Ознакомление с устройством и работой молотковой дробилки.
2. Измельчение в молотковой дробилке заданной порции материала.
3. Проведение ситовых анализов. Определение степени измельчения материала.
4. Установление зависимости производительности дробилки и степени измельчения от размеров решетки.
5. Построение кривых распределения измельченного материала по размерам частиц.

Описание установки

На рис. 10 показана схема молотковой дробилки. Дробилка работает от электродвигателя 9, на валу которого закреплены литые молотки 7, вращающиеся в литой рабочей камере 8, в которой происходит измельчение. Материал из бункера 6 поступает в рабочую камеру дробилки, где в результате ударного воздействия молотков и истирания материала при движении в кольцевом вращающемся слое о стенки рабочей камеры дробилки происходит интенсивное его разрушение.

Материал находится в зоне измельчения до тех пор, пока частицы его не пройдут через сменную решетку 5, установленную в нижней части дробилки. Измельченный материал собирается в сборнике 3. Выбором сменной решетки с заданным размером отверстий регулируют крупность дробленого продукта. Для выгрузки материала из сборника 3 отвинчивают пробку 1, и полученный продукт через патрубок 2 поступает в емкость для готового продукта.

При работе дробилки через бункер 6 в зону измельчения поступает воздух, и внутри дробилки создается избыточное давление. Для выравнивания давления воздуха внутри дробилки относительно окружающего воздуха имеется пылефильтрующий рукав 4.

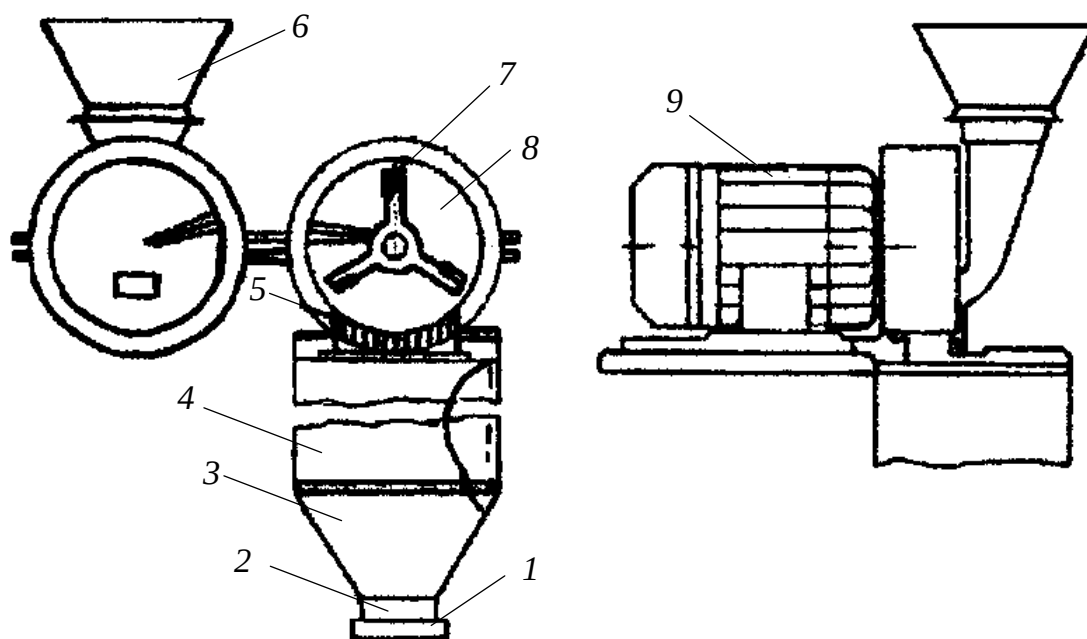


Рис. 10. Схема молотковой дробилки
(1–9 см. по тексту)

Методика проведения работы

Устанавливают сменную решетку 5 с заданным размером отверстий. Порцию зерна $G_{\text{нач}}$ по указанию преподавателя засыпают в бункер. Включают электродвигатель. Открывают задвижку под бункером и одновременно включают секундомер. По окончании измельчения останавливают секундомер, выключают электродвигатель. Взвешивают измельченный материал $G_{\text{кон}}$, затем проводят ситовой анализ. Сита располагают в порядке уменьшения размеров их отверстий сверху вниз.

$d_{\text{в}}$	$G_{\text{в}} = 0$	$x_{\text{в}} = 0$
d_1	G_1	x_1
d_2	G_2	x_2
d_3	G_3	x_3
d_4	G_4	x_4
d_5	G_5	x_5

Рис. 11. Набор сит с размерами ячеек d :
 $d_1 = 3\text{мм}$; $d_2 = 2\text{мм}$; $d_3 = 1\text{мм}$; $d_4 = 0,5\text{мм}$; $d_5 = 0$

Массу взвешенной сухой пробы, указанную преподавателем, помещают на верхнее наиболее грубое сито и затем его встряхивают вручную. По окончании рассева взвешивают остаток на каждом сите ($G_1, G_2, \dots, G_5$), включая также материал, попавший на дно сборника.

Данные измерений и результаты ситового анализа необходимо внести в табл. 10 и 11.

Опыты проводят при различных размерах решетки. Для определения среднего размера частиц материала до измельчения проводят ситовой анализ.

Таблица 10

№ опыта	Размер решетки D , мм	τ , с	$G_{\text{нач}}$, кг	$G_{\text{кон}}$, кг
1				
2				
3				

Таблица 11

№ опыта	Диаметр отверстий, мм						Остаток на сите, г				
	d_b	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
1											
2											
3											

Обработка опытных данных

1. Производительность молотковой дробилки Q определяют с использованием данных табл. 10 по формуле, кг/с

$$Q = \frac{G_{\text{нач}}}{\tau}.$$

2. По формулам 46, 47, 48 с использованием опытных данных ситового анализа (табл. 11) определяют средний размер частиц в смеси.

3. Степень изменения материала вычисляют по формуле 45.

4. Полученные расчетные данные заносят в табл. 12

Таблица 12

№ опы- та	Размер решетки, мм	Средний размер частиц каждой фракции, мм					Относительное массовое содержание каждой фракции в смеси					Средний размер частиц в смеси, мм $d_{\text{ср.}}$	Производительность, кг/с, G	Степень измельчения, i
		$d_{\text{ср.1}}$	$d_{\text{ср.2}}$	$d_{\text{ср.3}}$	$d_{\text{ср.4}}$	$d_{\text{ср.5}}$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5			
1														
2														
3														

5. По результатам ситового анализа представляют интегральную функцию распределения измельченного материала по диаметрам частиц $R(d_j)$ (рис. 12).

Функция $R(d_j)$ равна выраженному в процентах отношению массы всех частиц, диаметр которых больше d_j , к общей массе пробы измельченного материала. Величина d_j определяется по диаметру отверстий сита.

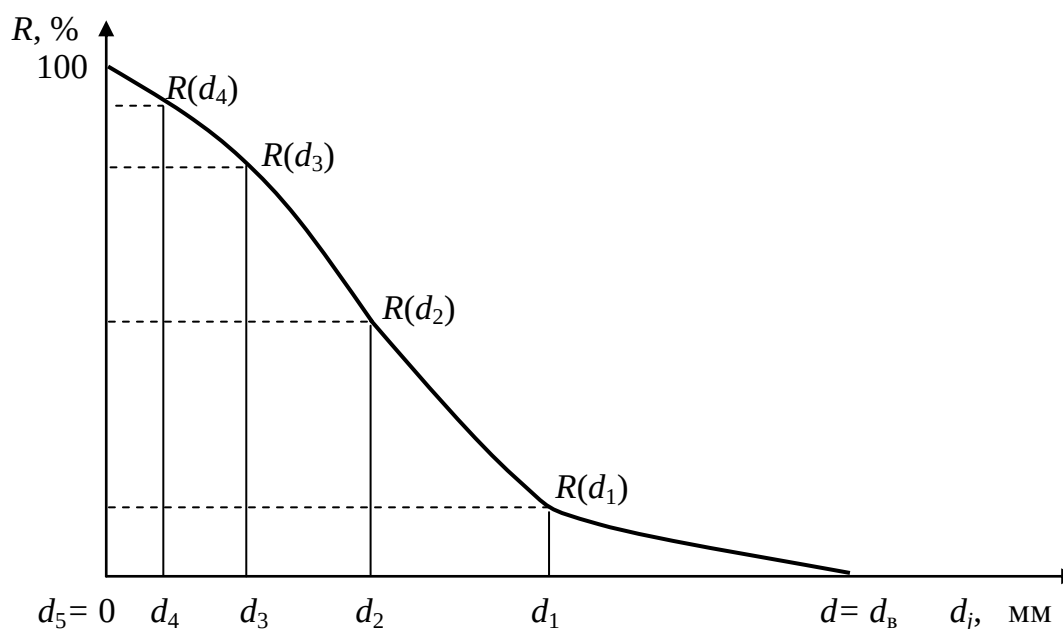


Рис. 12. Кривая распределения измельченного материала: $R(d_1) = x_1 100$; $R(d_2) = (x_1 + x_2) 100$; $R(d_3) = (x_1 + x_2 + x_3) 100$; $R(d_4) = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) 100$

6. По результатам опытов строятся зависимости $Q = f(i)$.

В заключение делают вывод о влиянии размера решетки в молотковой дробилке на степень измельчения и производительность.

Контрольные вопросы

1. Каким способом измельчается материал в молотковой дробилке?
2. Как оценивается эффективность измельчения?
3. Что такое степень измельчения?
4. Как определить средний размер частиц в смеси?
5. Какие факторы влияют на производительность молотковой дробилки?
6. Устройство и принцип действия молотковой дробилки.
7. Как построить кривую функции распределения измельченного материала?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Изучение процесса разделения эмульсии в центробежном поле

Введение

Эмульсии – неоднородные системы, состоящие из жидкости и распределенных в ней капель другой жидкости, не смешивающейся с первой.

В существующих теориях разделения эмульсий в центробежном поле (сепарирование) в качестве исходной предпосылки используют закон Стокса о скорости движения взвешенных частиц в жидкой среде. В соответствии с законом Стокса скорость движения частиц в сепараторе для ламинарного режима

$$Re = \frac{W_{oc} d \rho_c}{18 \mu_c} \leq 2, \quad (51)$$

где $W_{oc} = \frac{d^2(\rho - \rho_c)W^2 R}{18 \mu_c}$; d – диаметр частицы, м; ρ – плотность взвешенных частиц, кг/м³; ρ_c – плотность жидкой среды, кг/м³; μ_c – коэффициент динамической вязкости жидкой среды, Па·с; W – угловая скорость вращения, 1/с; R – радиус вращения, м.

Свойства эмульсии, влияющие на процесс разделения, определяются величиной $\frac{(\rho - \rho_c)}{\mu_c}$. С увеличением значения этой величины скорость движения частиц в сепараторе возрастает. На практике этого добиваются путем нагревания жидкости, в результате чего уменьшается ее вязкость.

Скорость осаждения частиц, находящихся в центробежном поле, в $\frac{W^2 R}{g}$ раз больше, чем при осаждении их только под действием силы тяжести. Величина $\frac{W^2 R}{g}$ – называется фактором разделения, который, по существу, является центробежным критерием Фруда

$$Fr = \frac{W^2 R}{g}.$$

Фактор разделения – один из основных параметров, определяющих условия осаждения частиц под действием центробежной силы.

Движение частиц легкой фракции в межтарелочном пространстве барабана показано на рис. 13.

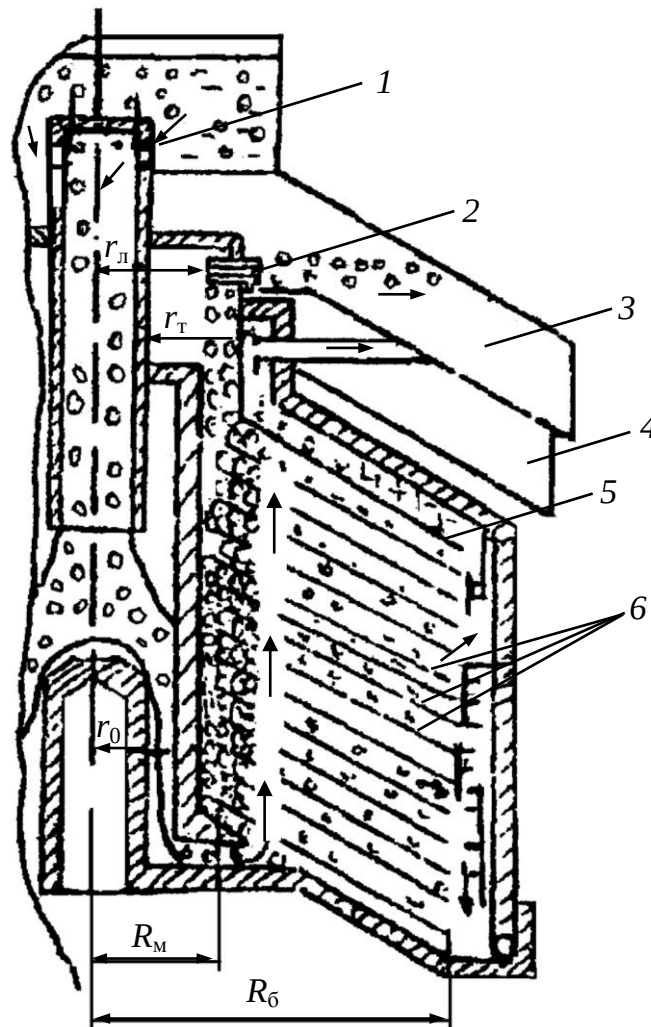


Рис. 13. Схема движения потоков в барабане сепаратора
 1 – вход эмульсии в барабан через кран; 2 – регулировочный винт;
 3 – приемник легкой фракции; 4 – приемник тяжелой фракции;
 5 – разделительная тарелка; 6 – тарелки

Диаметр выделяемых частиц в сепараторе зависит от производительности и определяется по формуле

$$d = \left(\frac{V \mu_c 10^6}{5.55 n^2 R_6^2 h^2 z (\rho - \rho_c) \cos \alpha_1} \right)^{0,5}, \quad (52)$$

где V – производительность, м³/с; n – частота вращения барабана; R_6 – максимальный радиус тарелки, м; h – расстояние между тарелками по нормам, м; z – число тарелок; α – угол наклона поверхности тарелки ($\alpha = 45^\circ - 40^\circ$).

Другой способ регулирования разделения эмульсии осуществляется при помощи регулировочного винта (рис. 13). От величины радиуса $r_{\text{л}}$ зависит плотность смеси в межтарелочном пространстве

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{т}} \frac{R_6^2 - r_{\text{т}}^2}{R_6^2 - r_{\text{л}}^2}, \quad (53)$$

где $\rho_{\text{т}}$ – плотность тяжелой фракции, кг/м³; R_6 – радиус разделительной тарелки, м; $r_{\text{т}}$ – радиус выходного отверстия тяжелой фракции, м; $r_{\text{л}}$ – радиус выходного отверстия легкой фракции, м.

Под действием напора вновь поступающих порций эмульсий в барабане поддерживается непрерывное движение эмульсии, легкой и тяжелой фракций. Чтобы обеспечить напор, необходимый для этого движения, выходные отверстия для легкой и тяжелой фракций расположены на большем расстоянии от оси вращения, чем открытая поверхность вращающейся эмульсии (радиус ее r_0). Соотношение этих радиусов следующее: $r_0 < r_{\text{л}} < r_{\text{т}}$.

Цель работы

1. Практическое ознакомление с работой сепаратора.
 2. Установление влияния температуры эмульсии и положения регулировочного винта на выход легкой фракций.
 3. Определение фактора разделения.
 4. Определение потерь эмульсий, легкой и тяжелой фракции.
- Описание установки.

Лабораторная работа выполняется на сепараторе "Сатурн-2", предназначенном для разделения цельного молока на сливки и обезжиренное молоко. Сепаратор состоит из следующих основных узлов: станины, электропривода, барабана и приемно-выводного устройства (рис. 14).

Процесс разделения молока на сливки и обрат осуществляется следующим образом. Молоко через кран приемника молока стекает в поплавковую камеру, из которой поступает в питающую трубку корпуса барабана. По вертикальным каналам пакета конических тарелок молоко распределяется в межтарелочных зазорах, где под действием центробежной силы разделяется на две фракции: сливки и обрат (обезжиренное молоко).

Сливки как более легкая фракция направляются к оси вращения барабана и под действием новых порций молока поднимаются вверх до верхней (разделительной) тарелки, где через отверстие регулировочного винта выводятся в приемную емкость.

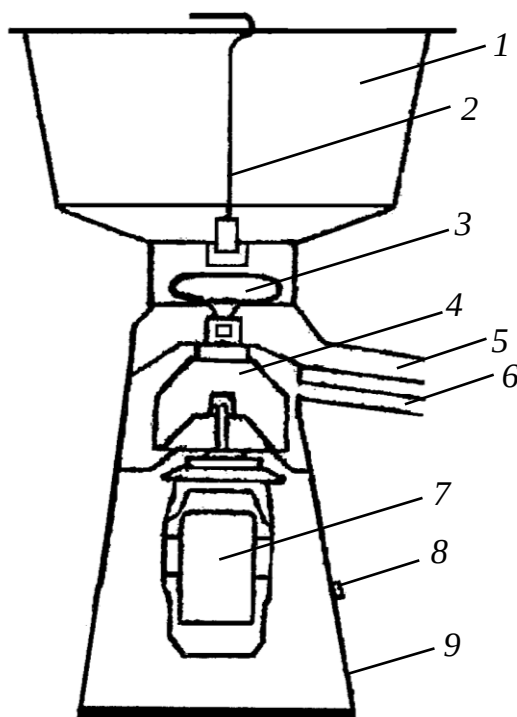


Рис. 14. Общий вид электросепаратора

- 1 – приемник молока; 2 – кран; 3 – поплавок; 4 – барабан; 5 – приемник сливок; 6 – приемник обезжиренного молока; 7 – электродвигатель; 8 – кнопка включения электродвигателя; 9 – станина

Обрат как тяжелая фракция под действием центробежной силы отбрасывается к периферии барабана. Под давлением новых порций он поднимается в горловину крышки барабана и через паз втекает в приемную емкость. Для регулирования частоты вращения барабана сепаратор включается в электросеть через ЛАТР.

Методика проведения работы

1. Подготовить к работе строботахометр. Для этого перед включением вилки шнура питания в розетку сети необходимо убедиться, что плавкий предохранитель вставлен в гнездо, соответствующее номинальному значению напряжений питающей сети, и левая ручка переключателя питания на лицевой панели находится в положении "выкл".

Включение прибора производится поворотом переключателя питания из положения "выкл" в положение "сеть", затем через 2–3 мин переключатель перевести в положение "лампа".

Для повышения точности измерений время прогрева увеличивается до 10–15 мин. Перед началом измерений следует проверить градуировку прибора. Для этого необходимо осветить окно вибратора на лицевой панели светом импульсной лампы и, с помощью отвёртки, поворотом соответствующих винтов на передней стенке шасси, добиться кажущейся неподвижности вибратора в следующих точках шкалы:

I диапазон – 1000 об/мин (видно одно неподвижное изображение вибратора),

II диапазон – 3000 об/мин (видно одно неподвижное изображение вибратора),

III диапазон – 12000 об/мин (видно два неподвижных изображения вибратора).

В тех случаях, когда нет каких-либо указаний о скорости изучаемого объекта, измерение следует начинать с самой высокой частоты вспышек.

Двойное изображение объекта, появляющееся в результате медленного снижения частоты вспышек свидетельствует о том, что основной синхронизм будет достигнут при вдвое меньшей частоте вспышек. При этом будет видно лишь одно неподвижное изображение объекта.

Следует иметь в виду, что при частоте вспышек $1/2$, $1/3$, $1/4$ от скорости движения объекта также будет видно одно неподвижное изображение.

Правильному отсчету соответствует наибольшая частота вспышек, при которой наблюдается одно неподвижное изображение объекта. При сепарировании частоту вращения барабана следует определять по неподвижному изображению лопаток вентилятора электродвигателя, которые видны в специально сделанном для этого окне в корпусе сепаратора.

2. Установить ЛАТРоМ по указанию преподавателя минимальное значение напряжения в сети. Включить электродвигатель и через 1–2 мин замерить частоту вращения барабана стробоскопом, после чего выключить электродвигатель.

3. При закрытом кране залить в молокоприемник порцию молока (1–2 л) при заданной преподавателем температуре, открыть кран и сепарировать молоко. Продолжительность сепарирования измерить секундомером. Количество сливок и обрат измерить с помощью мерных цилиндров.

4. Провести несколько опытов при разных частотах вращения барабана.

5. Для расчета потерь молока, сливок и обрат необходимо определить вес барабана до и после сепарирования (G_1 и G_2).

6. Для установления влияния температуры молока на процесс разделения опыты проводить при постоянной частоте вращения барабана, указанной преподавателем.

7. Для изучения влияния на разделение молока положения регулировочного винта провести несколько опытов при разных значениях радиуса r_d .

8. Чтобы установить зависимость качества обезжиривания от производительности сепараторов, необходимо менять подачу молока в барабан сепаратора при помощи крана.

9. Для определения жира в молоке и обрат необходимо в молочный жирометр (бутирометр), стараясь не смочить горлышко, налить автоматом 10 мл серной кислоты и осторожно, чтобы жидкости не смешивались, добавить пипеткой 10,77 мл молока и автоматом же 1 мл изоамилового спирта.

Жиросмер закрыть сухой резиновой пробкой, встряхнуть его до полного растворения белковых веществ и поставить пробкой вниз на 5 мин в водяную баню с температурой 65–70 °С.

Вынув из бани, вставить жиросмеры в патроны центрифуги пробками вниз, располагая их симметрично. В случае нечетного числа жиросмеров в центрифугу поместить жиросмер, наполненной водой. Центрифугировать 5 мин при 1000–1200 об/мин. После выдержки в течение 5 мин в бане (65–70 °С) сделать отсчет жира.

Содержание жира в молоке взять как среднее из показаний 2–3-х бутирометров. Данные измерения записать в табл. 13.

Таблица 13

№ опы- та	t, °С	V _{мол} , мл	τ, с	V _{ср} , мл	V _{об} , мл	η _{хол.ход} об/мин	η _{раб.ход} об/мин	r _л , мм	G ₁ , г	G ₂ , г	Ж, %

Категорически запрещается

1. Работать на неправильно собранном, установленном и не-прочно закрепленном сепараторе.
2. Включать сепаратор в электросеть без приемно-выводного устройства, а также производить снятие приемно-выводного устрой-ства и разборку сепаратора без полного отключения от электросети.
3. Работать на сепараторе при задавании барабаном приемно-выводного устройства.
4. Тормозить барабан рукой.

Обработка опытных данных и составление отчета

В опытах с переменной частотой вращения барабана подсчи-тать фактор разделения.

Опытные данные следует представить в виде графиков $V_{сл} = f(r_{л})$, $V_{сл} = f(t)$. Сделать выводы по графикам. Определить по-тери молока, сливок, обрат

$$V_{потерь} = V_{мол} - V_{сл} - V_{об}.$$

Контрольные вопросы

1. При каких значениях Re имеет место ламинарный режим осаждения?
2. Какие факторы влияют на скорость осаждения в центробежном поле?
3. Что называют фактором разделения?
4. Какова схема движения потоков в барабане сепаратора?
5. Какие способы регулирования разделения эмульсий в сепараторе?
6. Как определять частоту вращения барабана?
7. Техника безопасности при работе на сепараторе.
8. Как определить потери молока, сливок, обраты?
9. Методика определения жира в молоке.

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Исследование гидродинамики псевдооживленного слоя.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Определение расхода мощности при перемешивании.....	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Изучение процесса фильтрования суспензий.....	27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Изучение процесса измельчения в молотковой дробилке.....	38
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Изучение процесса разделения эмульсии в центробежном поле.....	46



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития **на 2009–2018 годы**. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



Институт холода и биотехнологий является преемником Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ), который в ходе реорганизации (приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 2209 от 17 августа 2011г.) в январе 2012 года был присоединен к Санкт-Петербургскому национальному исследовательскому университету информационных технологий, механики и оптики.

Созданный 31 мая 1931года институт стал крупнейшим образовательным и научным центром, одним из ведущих вузов страны в области холодильной, криогенной техники, технологий и в экономике пищевых производств.

В институте обучается более 6500 студентов и аспирантов. Коллектив преподавателей и сотрудников составляет около 900 человек, из них 82 доктора наук, профессора; реализуется более 40 образовательных программ.

Действуют 6 факультетов:

- холодильной техники;
- пищевой инженерии и автоматизации;
- пищевых технологий;
- криогенной техники и кондиционирования;

- экономики и экологического менеджмента;
- заочного обучения.

За годы существования вуза сформировались известные во всем мире научные и педагогические школы. В настоящее время фундаментальные и прикладные исследования проводятся по 20 основным научным направлениям: научные основы холодильных машин и термо-трансформаторов; повышение эффективности холодильных установок; газодинамика и компрессоростроение; совершенствование процессов, машин и аппаратов криогенной техники; теплофизика; теплофизическое приборостроение; машины, аппараты и системы кондиционирования; хладостойкие стали; проблемы прочности при низких температурах; твердотельные преобразователи энергии; холодильная обработка и хранение пищевых продуктов; тепломассоперенос в пищевой промышленности; технология молока и молочных продуктов; физико-химические, биохимические и микробиологические основы переработки пищевого сырья; пищевая технология продуктов из растительного сырья; физико-химическая механика и тепло-и массообмен; методы управления технологическими процессами; техника пищевых производств и торговли; промышленная экология; от экологической теории к практике инновационного управления предприятием.

В институте создан информационно-технологический комплекс, включающий в себя технопарк, инжиниринговый центр, проектно-конструкторское бюро, центр компетенции «Холодильщик», научно-образовательную лабораторию инновационных технологий. На предприятиях холодильной, пищевых отраслей реализовано около тысячи крупных проектов, разработанных учеными и преподавателями института.

Ежегодно проводятся международные научные конференции, семинары, конференции научно-технического творчества молодежи.

Издаются журнал «Вестник Международной академии холода» и электронные научные журналы «Холодильная техника и кондиционирование», «Процессы и аппараты пищевых производств», «Экономика и экологический менеджмент».

В вузе ведется подготовка кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре по 11 специальностям.

Действуют два диссертационных совета, которые принимают к защите докторские и кандидатские диссертации.

Вуз является активным участником мирового рынка образовательных и научных услуг.

www.ihbt.edu.ru

Константин Михайлович Федоров
Юлия Николаевна Гуляева
Алексей Борисович Дужий

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ № 1–5

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Р.А. Сафарова

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

*Печатается
в авторской редакции*

Подписано в печать 23.06.2014. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 3,49. Печ. л. 3,75. Уч.-изд. л. 3,38
Тираж 150 экз. Заказ № С 39

НИУ ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
ИИК ИХиБТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9