

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**А.Г. Новосёлов, Ю.Н. Гуляева, А.Б. Дужий**

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ  
ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

**Часть 1  
Гидромеханические процессы  
разделения**

**Учебно-методическое пособие**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**  
**Санкт-Петербург**

**2016**

УДК 664

**Новосёлов А.Г., Гуляева Ю.Н., Дужий А.Б.** Процессы и аппараты пищевых производств. Ч. 1. Гидромеханические процессы разделения: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО. – 67 с.

Рассмотрены теоретические основы гидромеханических методов разделения гетерогенных систем и описаны конструкции типовых аппаратов.

Предназначено для бакалавров и магистрантов направления 15.04.02 Технологические машины и оборудование при изучении дисциплины «Процессы и аппараты пищевых производств» всех форм обучения.

**Рецензент: кандидат техн. наук С.Ф. Демидов**

**Рекомендовано к печати Советом факультета пищевых биотехнологий и инженерии, протокол № 10 от 30.06.2016 г.**



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Новосёлов А.Г., Гуляева Ю.Н., Дужий А.Б., 2016

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## 1.1. Классификация основных процессов

Дисциплина «Процессы и аппараты пищевых производств» является промежуточным курсом от базового курса общеинженерных дисциплин бакалавриата к специальному (профессиональному) циклу бакалавриата и магистратуры. Основной задачей этой дисциплины является разработка методов расчета аппаратурного оформления типовых технологических процессов, являющихся составными частями всех пищевых производств.

Любое промышленное производство пищевых продуктов состоит из ряда последовательно проводимых технологических процессов, в каждом из которых вещества претерпевают физические и (или) химические изменения. В соответствии с этим все процессы разделяются на химические и физические.

*Химические процессы* – это процессы, при которых вещества подвергаются химическим превращениям под воздействием различных видов энергии с образованием новых веществ.

*Физические процессы* – это процессы, при проведении которых происходит изменение физических свойств обрабатываемого вещества (в том числе его формы и размеров) без изменения их химической природы. К физическим процессам относятся растворение, нагрев, измельчение и др.

Физические процессы, в которых происходит только изменение формы или размеров обрабатываемого вещества (резание, гранулирование, дробление, помол, фасовка) без изменения их природы и физических свойств выделяют в отдельную группу и называют *механическими процессами*.

Традиционно в курсе «Процессы и аппараты пищевых производств» рассматриваются физические процессы, которые делятся на четыре основные группы:

1. *Механические процессы* – заключаются в механической обработке твердых веществ под воздействием внешней силы. Изучение этих процессов основано на законах механики твердых тел. Данная группа процессов включает в себя процессы измельчения твердых материалов, прессования, сортировки, смешения твердых веществ, гранулирования и др.

**2. Гидромеханические процессы** – протекают в подвижных веществах (жидкостях и газах, также в их смесях с твердыми веществами). К их числу относятся транспортировка жидкостей и газов, а также процессы получения и (или) разделения неоднородных систем. Изучение этих процессов основывается на законах гидродинамики.

**3. Тепловые процессы** – процессы, связанные с переносом тепловой энергии (теплоты) как внутри вещества, так и от одного вещества к другому. Изучение этих процессов основывается на законах термодинамики и теплопередачи. К числу тепловых процессов относятся охлаждение, нагревание, пастеризация (стерилизация), выпаривание, конденсация, замораживание и др.

**4. Массообменные процессы** – процессы, связанные с переносом целевых компонентов во взаимодействующих между собой веществах и через границу раздела между ними. Изучение этих процессов основывается на законах диффузии и гидродинамики. К этой группе процессов относятся процессы разделения однородных систем на молекулярном уровне, физическая абсорбция, кристаллизация, экстракция, десорбция, сушка, адсорбция, ректификация и др.

Отдельной группой в дисциплину «Процессы и аппараты пищевых производств» входят химические и биохимические процессы.

**Химические процессы** – это процессы, связанные с изменением химического состава и свойств исходного вещества в результате возникающих химических реакций. Эти процессы направлены на получение вещества с новой химической формулой, а следовательно, и новыми теплофизическими свойствами.

**Биохимические процессы** – это процессы, связанные с изменением химического состава и свойств исходного вещества в результате жизнедеятельности (метаболизма) микроорганизмов.

В ряде технологических процессов наряду с переносом массы вещества происходит перенос тепловой энергии (теплоты); например, при сушке твердых веществ, при теплообмене между газом и жидкостью при их непосредственном контакте. Такие совмещенные процессы рассматриваются как **тепло- и массообменные** процессы.

При определении основных размеров аппарата особое значение имеет знание кинетических (скоростных) закономерностей

процессов, протекающих в этих аппаратах, т. е. зависимостей, связывающих скорости протекания процессов с движущими силами.

Единство кинетических закономерностей основных групп процессов позволяет сформулировать общий закон, описывающий процессы массо- и энергопереноса: **скорость процесса переноса  $I$  пропорциональна движущей силе  $\Delta$  и обратно пропорциональна сопротивлению переноса  $R$ :**

$$I = \frac{\Delta}{R} = \Delta K. \quad (1.1)$$

Величину, обратную сопротивлению,  $K = \frac{I}{R}$  называют коэффициентом скорости процесса.

Для переноса тепловой энергии уравнение (1.1) запишется в виде

$$\frac{dQ}{S d\tau} = \frac{\Delta t}{R_1} = K_t \Delta t,$$

где  $Q$  – количество переданной теплоты, кДж;  $S$  – поверхность теплообмена,  $m^2$ ;  $\tau$  – время, с;  $\Delta t$  – движущая сила процесса теплопередачи,  $^{\circ}C$ ;  $R_1 = 1/K_t$  – термическое сопротивление;  $K_t$  – коэффициент скорости процесса (для случая теплоотдачи – это коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ ; для теплопередачи – это коэффициент теплопередачи  $K$ ).

Для движения жидкости или газа через слой зернистого материала

$$\frac{dV}{S d\tau} = \frac{\Delta P}{R_2} = K_i \Delta P,$$

где  $V$  – объем протекающей жидкости,  $m^3$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения слоя,  $m^2$ ;  $R_2 = 1/K_i$  – гидравлическое сопротивление слоя;  $K_i$  – коэффициент скорости;  $\Delta P$  – движущая сила процесса,  $N/m^2$ .

Для случая переноса вещества в массообменном процессе

$$\frac{dM}{S dt} = \frac{\Delta C}{R_3} = K_m \Delta C,$$

где  $M$  – масса вещества, переносимого из одной фазы в другую, кг;  $S$  – поверхность контакта фаз (поверхность массопереноса), м<sup>2</sup>;  $\Delta C$  – движущая сила процесса;  $R_3 = 1/ K_m$  – диффузионное сопротивление;  $K_m$  – коэффициент скорости процесса (для случая массоотдачи – это коэффициент массоотдачи  $\beta$ , для массопередачи – коэффициент массопередачи  $K$ ).

Зависимость (1.1) является следствием единства законов переноса в материальном мире. Все приведенные выше уравнения изоморфны, т. е. имеют одинаковую по форме математическую запись.

Из уравнения (1.1) вытекает основной принцип интенсификации процессов переноса, который заключается в увеличении движущей силы и снижении сопротивления переносу.

В данном учебно-методическом пособии рассматриваются только гидромеханические процессы, которые широко используются при производстве пищевых продуктов.

## 1.2. Общие принципы расчета аппаратов

Основными целями расчета аппаратов являются:

- определение массовых потоков обрабатываемых материалов;
- определение энергетических затрат на процесс;
- вычисление основных размеров аппарата.

Рассмотрим общую последовательность расчета, которой рекомендуется придерживаться при проектировании нового аппарата.

Расчету предшествует анализ кинетических закономерностей процессов, что позволяет найти рациональные условия для их проведения.

1. Исходя из законов гидродинамики или термодинамики, выявляют условия равновесия и определяют направление течения процесса и его движущую силу  $\Delta$ . Например, если температуры двух сред равны, то переноса теплоты между ними через разделяющую их стенку не будет. Если же температуры не равны, то возникает поток теплоты, причем, чем больше разность температур (система больше удалена от состояния равновесия), тем выше скорость переноса теплоты.

2. На основании закона сохранения материи составляют уравнение материального баланса.

Для установившегося процесса

Например, на вход в аппарат поступают компоненты  $A$ ,  $B$  и  $C$ , а на выходе из аппарата имеем компоненты  $D$  и  $F$ . Для этого аппарата уравнение материального баланса можно записать

$$G_A + G_B + G_C = G_D + G_F;$$

$$\sum_{i=1}^n G_i = \sum_{j=1}^m G_j.$$

3. На основании закона сохранения энергии составляют уравнение теплового баланса. Запишем уравнение для аппарата (рис. 1.1):

$$Q_A + Q_B + Q_C + Q = Q_D + Q_F + Q_n,$$

или

$$\sum_{i=1}^n Q_{\text{вх}i} + Q = \sum_{j=1}^m Q_{\text{вых}j} + Q_n,$$

где  $\sum Q_{\text{вх}}$  – теплота, поступающая в аппарат с исходными компонентами;  $Q$  – дополнительная теплота, подводимая к аппарату от внешних источников (например с помощью встроенного калорифера);  $\sum Q_{\text{вых}}$  – теплота, уходящая из аппарата;  $Q_n$  – тепловые потери.

4. По теоретическим или экспериментальным зависимостям находят коэффициент скорости процесса  $K_i$ .

5. На основании полученных выше величин определяют основной размер аппарата (например, поверхность теплопередачи или контакта фаз в диффузионном процессе, площадь поперечного сечения аппарата и т. д.).

Расчет выполняется с использованием соотношения (1.1):

$$S = \frac{M}{I} = \frac{M}{\Delta K}, \quad (1.2)$$

где  $S$  – основной размер аппарата;  $M$  – производительность (мощность) аппарата.

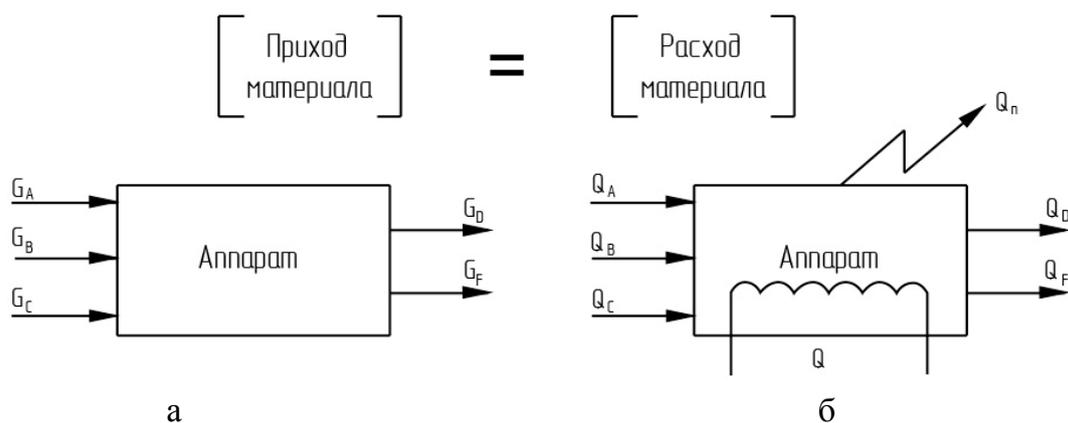


Рис. 1.1. К составлению уравнений материального (а) и теплового (б) балансов

Соотношение (1.2) показывает, что  $\Delta$  и  $K$  являются основными величинами, определяющими размеры аппаратов. Причем получение их численных значений является наиболее сложной частью расчета аппарата.

## 2. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

### 2.1. Классификация неоднородных систем

Неоднородными системами (дисперсиями) называются смеси двух или более веществ, находящихся в различных агрегатных состояниях. В неоднородных системах частицы образуют дисперсную фазу, а среда, в которой они распределены, называется дисперсионной.

Неоднородные системы являются либо следствием технологической необходимости – увеличения поверхности межфазного контакта в целях интенсификации процессов тепло- и массообмена, либо следствием несовершенства технологии и оборудования (запыленность помещений, очистка промышленных стоков и т. д.).

В табл. 2.1 приведена одна из возможных классификаций дисперсий, причем разделение по размеру весьма условно.

### Классификация дисперсий

Дисперсионная фаза	Размер частиц дисперсной фазы,		
	Твердая, мкм	Жидкая, мкм	Газообразная
Жидкость	Суспензии: грубые – $d > 100$ тонкие – $0,5 < d < 100$ мути – $0,1 < d < 0,5$ коллоидные растворы $d < 0,1$	Эмульсии	Газожидкостные смеси. Пены – системы с высоким содержанием газа
Газ	Пыль – $5 \leq d \leq 50$ Дым – $0,3 < d < 5$	Туман $0,3 < d < 5$	Однофазная система

### Классификация методов разделения

Различают два основных метода разделения – осаждение и фильтрование, которые, в свою очередь, можно разделить в зависимости от движущей силы процесса:

Сила тяжести .....	Осаждение, отстаивание
Центробежная сила .....	Центрифугирование, циклонный процесс
Разность давлений .....	Фильтрование
Электрические силы .....	Осаждение в электрическом поле
Сила поверхностного натяжения .....	Мокрая очистка

Эффективность процесса разделения характеризуется «эффектом разделения» или степенью очистки  $\eta$ , %

$$\eta = \frac{C_{\text{н}} - C_{\text{к}}}{C_{\text{н}}} 100 \%,$$

где  $C_{\text{н}}$ ,  $C_{\text{к}}$  – начальная и конечная концентрации дисперсной фазы.

Образующийся осадок должен иметь минимальную влажность ( $U$ , %):

$$U = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{ос}}} 100 \%,$$

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

## 2.2. Осаждение в гравитационном поле (отстаивание)

### 2.2.1. Методы расчета скорости осаждения

Осаждение (отстаивание) является простейшим из гидромеханических методов разделения неоднородных систем и характеризуется использованием простых аппаратов, низкой себестоимостью процесса. Существенным недостатком метода является низкая скорость процесса, что приводит к увеличению габаритов аппаратов и малому эффекту разделения.

Осаждение применяется для грубого разделения суспензий, эмульсий, пыли, дымов.

Рассмотрим движение одиночной частицы массой  $m$  в неподвижной вязкой жидкости.

Уравнение движения для частицы (второй закон Ньютона)

$$m \frac{d\bar{w}}{d\tau} = \sum_{i=1}^n \bar{F}_i, \quad (2.1)$$

где  $\bar{w}$  – скорость движения, м/с;  $\bar{F}_i$  – сила, действующая на частицу, Н;  $\tau$  – время, с.

Основными действующими силами (рис. 2.1) являются сила тяжести  $\bar{F}_T$ , выталкивающая (архимедова) сила  $\bar{F}_a$  и сила сопротивления  $\bar{F}_c$ .

Учитывая, что силы и вектор скорости коллинеарны, уравнение (2.1) запишем в проекции на ось  $OX$ :

$$m \frac{dw}{d\tau} = F_T - F_a - F_c, \quad (2.2)$$

где  $F_T = mg = V_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} g$ ;  $F_a = V_{\text{ч}} \rho_{\text{с}} g$ ;  $F_c = \xi S \frac{\rho_{\text{с}} w_0^2}{2}$ , здесь  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_{\text{ч}}$  и  $\rho_{\text{с}}$  – плотность среды и частицы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $V_{\text{ч}} = m/\rho_{\text{ч}}$  – объем частицы,  $\text{м}^3$ ;  $\xi$  – коэффициент сопротивления частицы (зависит от режима движения);  $S$  – площадь поперечного сечения частицы,  $\text{м}^2$ ;  $w_0$  – действительная скорость в промежутках между частицами.

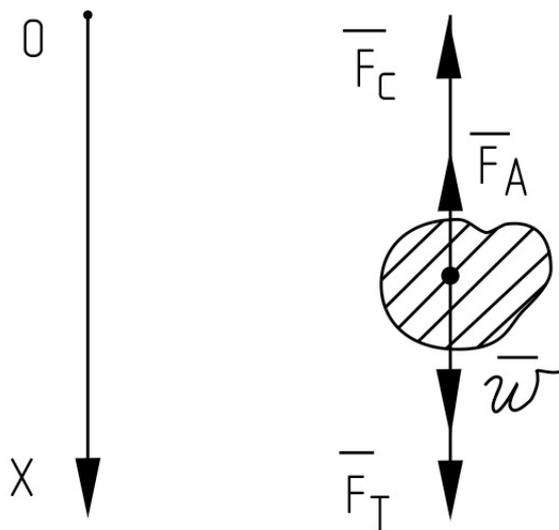


Рис. 2.1. Силы, действующие на частицу

Подставим выражения для сил в уравнение (2.2) и поделим правую и левую части уравнения (2.2) на  $m$ :

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{V_{\text{ч}} g}{m} \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}}{\rho_{\text{ч}}} - \xi S \frac{\rho_{\text{с}} w^2}{2m} = g \left( 1 - \frac{\rho_{\text{с}}}{\rho_{\text{ч}}} \right) - \xi S \frac{\rho_{\text{с}} w^2}{2m}. \quad (2.3)$$

Для решения уравнения (2.3) необходимо знать закон сопротивления. Так как  $\xi = f(\text{Re})$ ,

$$\text{Re} = \frac{w d_{\text{ч}} \rho_{\text{с}}}{\mu},$$

где  $d$  – размер частицы,  $\text{м}$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости среды,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ .

Зависимости для обтекания потоком сферы  $\xi = f(\text{Re})$  для различных режимов [1]:

– для ламинарного режима

$$\xi = \frac{24}{\text{Re}}, \text{Re} \leq 2;$$

– для переходной области

$$\xi = \frac{18,5}{\text{Re}^{0,6}}, 2 < \text{Re} < 500;$$

– для турбулентного режима

$$\xi = 0,44, \text{Re} \geq 500.$$

Решим уравнение (2.3) для сферической частицы  $d$  при ламинарном режиме движения, так как при небольших скоростях движения частицы относительно среды слои жидкости плавно набегают на частицу, огибая ее, и плавно смыкаются за ней. При этом сами слои не смешиваются между собой. С учетом того, что  $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{ч}}$ ,

$m = V_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}}$ ,  $V = \frac{\pi d^3}{6}$ , а  $F = \frac{\pi d^2}{4}$ , уравнение (2.3) можно записать так:

$$\frac{dw}{d\tau} = g \left( 1 - \frac{\rho_{\text{с}}}{\rho_{\text{ч}}} \right) - \frac{24}{\text{Re}} \frac{\rho_{\text{с}} w^2}{2} \frac{6}{\pi d^3 \rho_{\text{ч}}} \frac{\pi d^2}{4},$$

откуда

$$\frac{dw}{d\tau} + \frac{18\mu}{d^2 \rho_{\text{ч}}} w = g \left( 1 - \frac{\rho_{\text{с}}}{\rho_{\text{ч}}} \right). \quad (2.4)$$

Проинтегрируем дифференциальное уравнение первого порядка (2.4) при начальном условии  $\tau = 0, w = 0$ :

$$w = \frac{d^2 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) g}{18\mu} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{18\mu}{d^2 \rho_{\text{ч}}} \tau \right) \right]. \quad (2.5)$$

Выражение, стоящее в скобках, с увеличением времени процесса стремится к единице, а следовательно, скорость частицы стремится к постоянной величине (рис. 2.2).

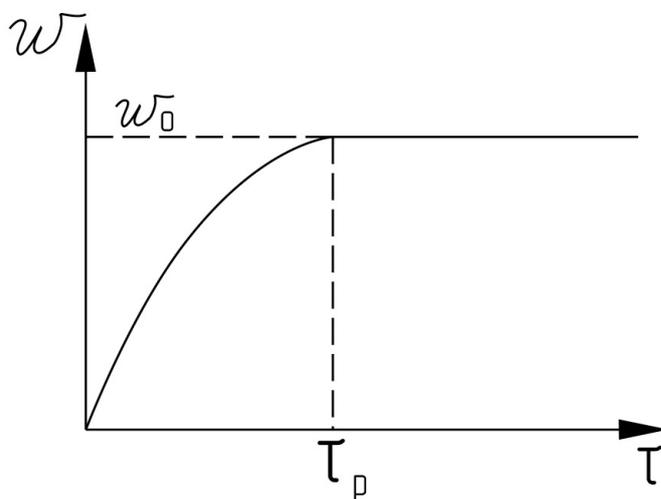


Рис. 2.2. Изменение скорости частицы во времени.

Для большинства процессов временем движения  $\tau_p$  с переменной скоростью (время релаксации) можно пренебречь, так как оно намного меньше времени процесса. Время, по истечении которого значение скорости  $w_0 = \text{const}$ , называется временем релаксации. Например, время релаксации скорости для частицы кварцевого песка диаметром 200 мкм при ее движении в воде оценивается 0,01 с. Отсюда скорость установившегося движения называется скоростью осаждения  $w_0$  частицы.

Таким образом, из (2.5) следует, что скорость осаждения твердых частиц, при ламинарном режиме их движения (формула Стокса,  $Re \leq 2$ )

$$w_0 = \frac{d_{\text{ч}}^2 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) g}{18\mu}. \quad (2.6)$$

### Общий метод расчета скорости осаждения

Рассмотрим общий метод расчета скорости осаждения, применимый для всех режимов движения частицы.

Уравнение движения частицы для участка установившегося движения можно получить из второго закона Ньютона [см. уравнение (2.2)], приняв допущение, что скорость частиц является постоянной (так как для микрочастиц  $d \approx 0,1 \cdot 10^{-3}$  м, движение мгновенно из равнозамедленного переходит в равномерное; таким образом,

$$\sum_{i=1}^n \bar{F}_i = m \frac{d\bar{w}}{d\tau} = 0;$$

$$0 = F_T + F_a + F_c.$$

Подставим в (2.6) выражения для сил и решим относительно  $\xi$ , приведя его к безразмерному виду:

$$\xi = \frac{4}{3} \frac{d g (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}{w_0^2 \rho_{\text{с}}}. \quad (2.7)$$

Умножим правую и левую части уравнения (2.7) на  $\text{Re}^2$ , для того чтобы исключить из последнего значение скорости, и после преобразований получим

$$\text{Re} = \frac{w d_{\text{ч}} \rho_{\text{с}}}{\mu}; \quad \xi \text{Re}^2 = \frac{4}{3} \frac{d^3 g (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}^2},$$

или

$$\xi \text{Re}^2 = \frac{4}{3} \text{Ar}, \quad (2.8)$$

где  $\text{Ar} = \frac{d^3 \rho_{\text{с}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) g}{\mu^2}$  – критерий Архимеда.

Зная  $\xi = f(\text{Re})$ , из уравнения (2.8) можно получить зависимость  $\text{Re} = f(\text{Ar})$  (рис. 2.3, кривая I), которая позволит определять скорость осаждения частицы, если известны ее размер, плотность и свойства среды. К сожалению, размер частицы по известной скорости осаждения определить нельзя. С этой целью исключаем из расчета значение  $d$ , разделив уравнение (2.7) на критерий  $\text{Re}$ .

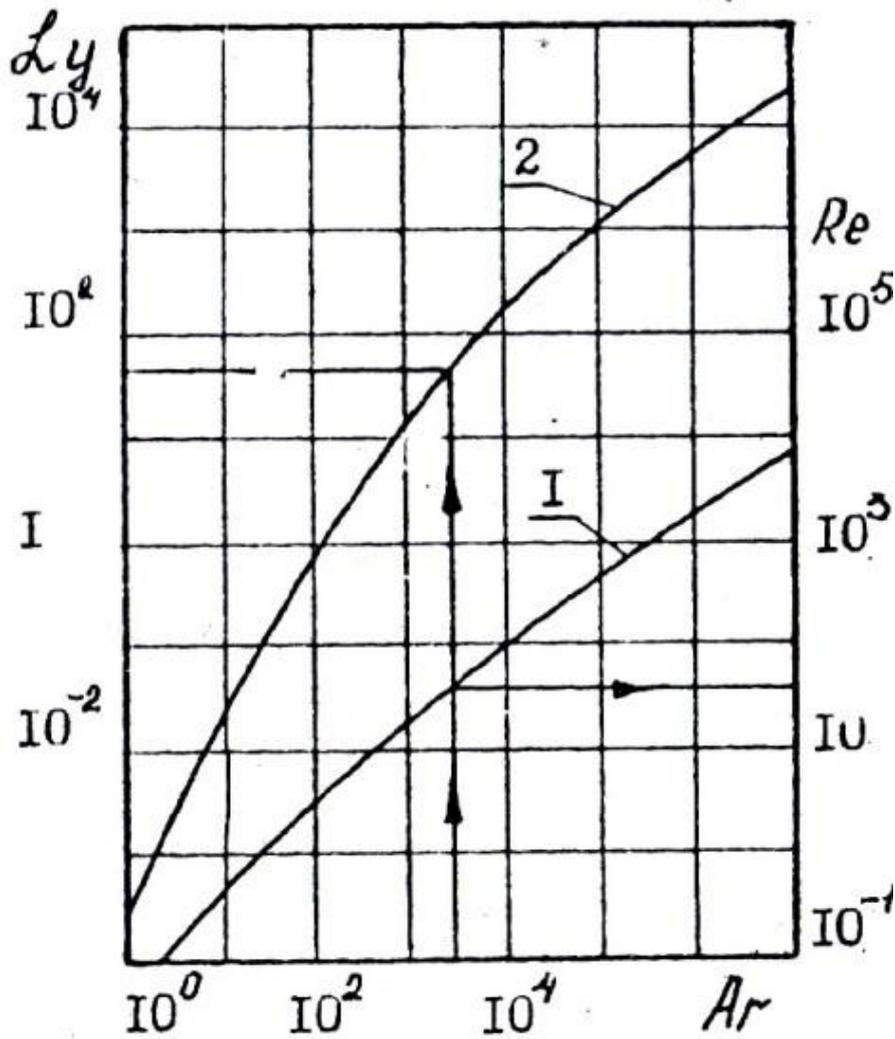


Рис. 2.3. Зависимости для шарообразных частиц:  
 1 –  $Re = f(Ar)$ ; 2 –  $Ly = f(Ar)$

Умножим (2.7) на  $1/Re$  и после преобразования получим

$$\frac{\xi}{Re} = \frac{4}{3} \frac{1}{Ly}, \quad (2.9)$$

где  $Ly = \frac{\rho_c^2 w_0^3}{(\rho_c - \rho_c) g \mu} = \frac{Re^3}{Ar}$  – критерий Лященко.

Используя соотношения (2.8) и (2.9), можно построить зависимость  $Ly = f(Ar)$ , которая представлена в графическом виде на рис. 2.3.

## Последовательность расчета скорости осаждения

Согласно закону линейности, если существует две однозначные функции между двумя независимыми переменными, то должна существовать также однозначная третья функция между этими двумя независимыми переменными. Таким образом,

$$\xi Re = f(Ar);$$

$$\xi Re = f'(Ly);$$

$$Ly = f''(Ar).$$

По графической зависимости можно решить как прямую задачу:

1. Известны  $d$ ,  $\rho_{\text{ч}}$ ,  $\mu$ ,  $\rho_{\text{с}}$ .
2. Расчет критерия  $Ar$ .
3. По графику определяется  $Ly$ .
4. Решается  $Ly$  относительно  $w_0$ :

$$w_0 = \left( Ly \frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) g \mu}{\rho_{\text{с}}^2} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Можно решить также обратную задачу: по известной скорости осаждения определить диаметр частицы (расчет ведется в обратной последовательности).

Для частиц, форма которых отличается от сферической, в расчетные уравнения вместо  $d$  подставляется эквивалентный диаметр

$$d_{\text{э}} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} V_{\text{ч}}},$$

где  $V_{\text{ч}}$  – объем реальной частицы,  $\text{м}^3$ .

Полученное значение  $w_0$  необходимо умножить на коэффициент формы, тогда получим действительную скорость осаждения  $w_0^{\text{д}}$ :

$$w_0^{\text{д}} = \varphi w_0,$$

где  $\varphi < 1$  – фактор формы (для частиц округленной формы  $\varphi \approx 0,77$ ; для угловатых  $\varphi \approx 0,66$ ; для пластинчатых  $\varphi \approx 0,43$ ).

Наконец, при стесненном осаждении частиц (объемная концентрация частиц  $\varepsilon > 5\%$ ) необходимо учитывать фактор стеснения, так как скорость осаждения будет меньше скорости свободного осаждения:

$$(w_0^d)_{\text{стесн}} = \varphi w_0 \lambda(\varepsilon),$$

где  $\lambda(\varepsilon)$  – функция, учитывающая стесненность осаждения (например, [1]),

$$\lambda(\varepsilon) = \frac{(1 - \varepsilon)^2}{1 + 2,5\varepsilon + 7,35\varepsilon^2}.$$

### 2.2.2. Разделение пылегазовых систем

Разделение пылегазовых систем в поле действия сил тяжести осуществляют в пылеосадительных камерах, которые являются аппаратами периодического действия (рис. 2.4). Запыленный газовый поток поступает в камеру 1, внутри которой установлены горизонтальные перегородки 2 (длина  $L$ , ширина  $B$ , расстояние между перегородками  $h$ ). Под действием силы тяжести на перегородки осаждаются твердые частицы, а газовый поток, обогнув перегородку 3, выводится из корпуса. Осевшие частицы периодически удаляются из аппарата через люки 4. Эффект разделения  $\eta = 30 \div 50\%$  (в зависимости от дисперсного состава пыли и условий работы).

Установим связь между производительностью аппарата по запыленному газу  $V$  и его размерами.

Для выделения частицы (см. рис. 2.4) из потока необходимо, чтобы время ее пребывания  $\tau_{\text{пр}}$  в аппарате было равно или больше времени осаждения  $\tau_{\text{ос}}$ :

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{L}{w}; \quad \tau_{\text{ос}} = \frac{h}{w_0^d},$$

где  $w$  – скорость газа;  $w_0^d$  – скорость осаждения частиц минимального диаметра, которые необходимо выделить из потока.

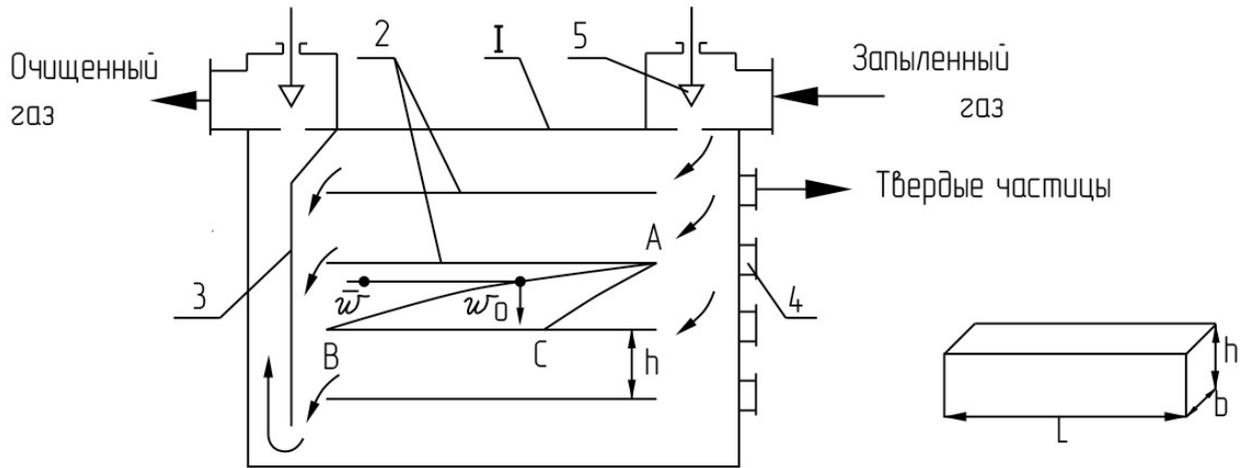


Рис. 2.4. Пылеосадительная камера:

1 – корпус; 2 – горизонтальные перегородки; 3 – отражательная перегородка;  
4 – люки для очистки; 5 – клапаны

Предельным случаем выделения частицы из потока является

$\tau_{пр} = \tau_{ос}$  (траектория  $AB$ ) или  $\frac{L}{w} = \frac{h}{w_0^д}$ . Если выразить

$$w = \frac{V}{Bh(n+1)},$$

где  $n$  – число полок;  $L$  – днище, то условие выделения частицы из потока можно записать так:

$$\left[ \frac{L}{\frac{V}{Bh(n+1)}} \right] = \frac{h}{w_0^д}. \quad (2.10)$$

Решив (2.10) относительно  $V$ :

$$V = BL(n+1)w_0^д, \quad (2.11)$$

окончательно получим

$$V = f_{ос} w_0^д,$$

где  $f_{ос} = BL(n+1)$  – поверхность осаждения,  $m^2$ .

Таким образом, производительность аппарата определяется поверхностью осаждения. Формулой (2.14) можно пользоваться и для расчета отстойников, отстойных центрифуг.

### 2.2.3. Разделение жидких систем

Разделение суспензий и эмульсий осуществляют в отстойниках периодического или непрерывного действия (рис. 2.5).

Суспензия по трубе 1 подается в центральную часть аппарата, осветленная жидкость выводится через кольцевой желоб 2, осадок собирается в нижней части аппарата. Гребок 3 (частота вращения 0,02–0,5 об/мин) непрерывно перемещает осадок по дну к разгрузочному штуцеру 4. Недостатком отстойников является высокое содержание влаги в осадке (более 60 %). Подробно конструкции отстойников приведены в работе [2].

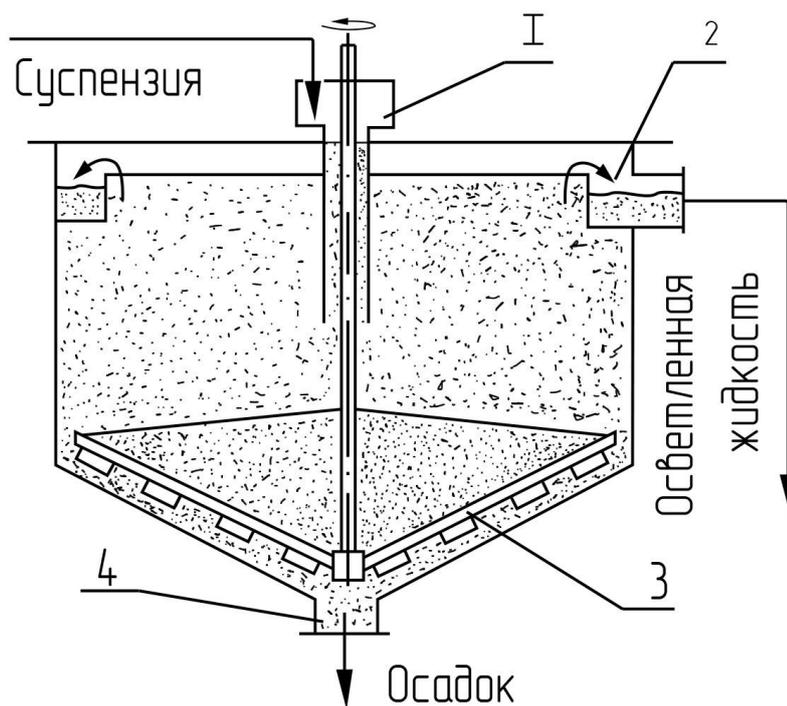


Рис. 2.5. Отстойник непрерывного действия с гребковой мешалкой для разделения суспензий:

1 – труба; 2 – желоб; 3 – гребок; 4 – штуцер

Расчет отстойника сводится к определению поверхности осаждения  $f_{oc}$ .

Составим уравнения материального баланса:

– по всему материалу

$$G_c = G_{oc} + G_{ож};$$

– по сухому веществу

$$G_c x_c = G_{oc} x_{oc} + G_{ож} x_{ож},$$

где  $G_c$ ,  $G_{oc}$ ,  $G_{ож}$  – производительность отстойника по исходной суспензии, осадку, осветленной жидкости, кг/с;  $x_c$ ,  $x_{oc}$ ,  $x_{ож}$  – концентрация дисперсной фазы в исходной суспензии, осадке и осветленной жидкости.

Если предположить, что  $x_{ож} = 0$ , то, решая совместно уравнения материального баланса, получим

$$G_{ож} = G_c \left( 1 - \frac{x_c}{x_{oc}} \right). \quad (2.12)$$

Считая, что

$$V = \frac{G_{ож}}{\rho_{ож}},$$

где  $\rho_{ож}$  – плотность осветленной жидкости, из формулы (2.11) с учетом (2.12) получим

$$f_{oc} = \frac{V}{(w_0^d)_{стесн}} = \frac{G_c \left( 1 - \frac{x_c}{x_{oc}} \right) 1,3}{\rho_c (w_0^d)_{стесн}}, \quad (2.13)$$

здесь 1,3 – коэффициент, учитывающий неравномерность подачи суспензии и возмущающее воздействие скребков.

## 2.3. Разделение гетерогенных систем в поле действия центробежных сил

### 2.3.1. Основные положения

Осаждение под действием центробежной силы применяется для разделения пыли, суспензий и эмульсий. В этом случае гетерогенная система вводится в поле действия центробежных сил, которое можно создать двумя способами:

- гетерогенная система вращается в неподвижном аппарате – циклонный процесс;
- гетерогенная система помещается во вращающийся аппарат – центрифугирование.

Разделение происходит под действием центробежной силы

$$G_{\text{ц}} = ma = m\omega^2 r = m \frac{w_r^2}{r},$$

где  $m$  – масса частицы, кг;  $a = \omega^2 r$  – центробежное ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $w_r$  – окружная скорость частицы, м/с;  $r$  – радиус вращения частицы, м;  $\omega$  – угловая скорость вращения частицы, рад/с.

Эффективность процесса осаждения в поле действия центробежных сил оценивается фактором разделения (иногда его называют критерием Фруда  $Fr_{\text{ц}}$ )  $K_p = Fr_{\text{ц}}$ :

$$K_p = \frac{G_y}{G} = \frac{m\omega^2 r}{mg} = \frac{\omega^2 r}{g} = \frac{w_r^2}{rg}.$$

В аппаратах  $K > 100$ , т. е. центробежная сила превышает силу тяжести не менее чем на два порядка.

Рассмотрим движение частицы в кольцевом зазоре (рис. 2.6). Считаем, что частица увлекается потоком и ее окружная скорость равна  $w_r$ . Во вращающемся потоке на частицу действует центробежная сила, под действием которой она движется по радиусу к периферии со скоростью, равной скорости осаждения  $w_o$ .

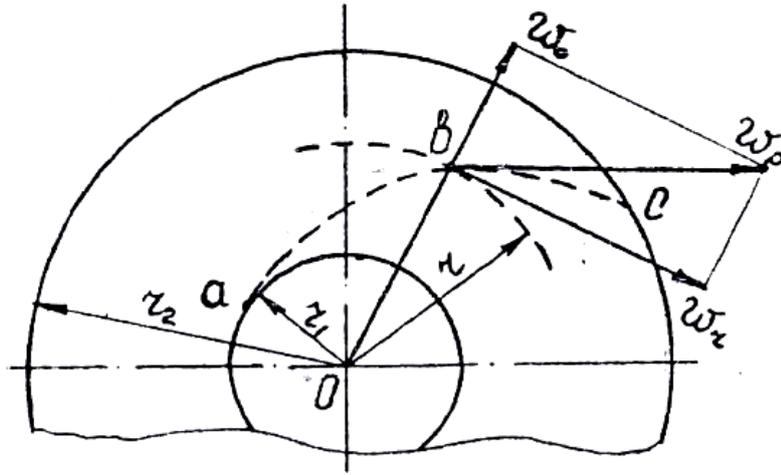


Рис. 2.6. Движение частицы в поле действия центробежных сил

Таким образом, частица движется по траектории  $abc$  с результирующей скоростью  $w_p$  и оседает на стенке аппарата. Скорость осаждения

$$w_o = \frac{dr}{d\tau}, \quad (2.14)$$

где  $r$  – радиус вращения частицы;  $\tau$  – время.

Очевидно, что время осаждения можно определить из выражения (2.14):

$$\tau_o = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{w_o}, \quad (2.15)$$

где скорость  $w_o$  – величина переменная, зависит от радиуса вращения.

Рассмотрим силы, действующие на частицу при ее движении в поле действия центробежных сил (рис. 2.7). Движение частицы в вязкой жидкости происходит аналогично движению в поле действия сил тяжести.

Запишем уравнение движения частицы в проекции на ось  $Oy$  (силой тяжести  $G$  пренебрегаем):

$$m \frac{dw}{d\tau} = F_{ц} - F_{a_{ц}} - F_c = 0, \quad (2.16)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;  $F_c = \xi \frac{\rho w^2}{2} S$  – сила сопротивления;  $F_{a_{\text{ц}}} = V_{\text{ч}} \rho_c \omega^2 r$  – выталкивающая сила;  $F_{\text{ц}} = V_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} \omega^2 r$  – центробежная сила.

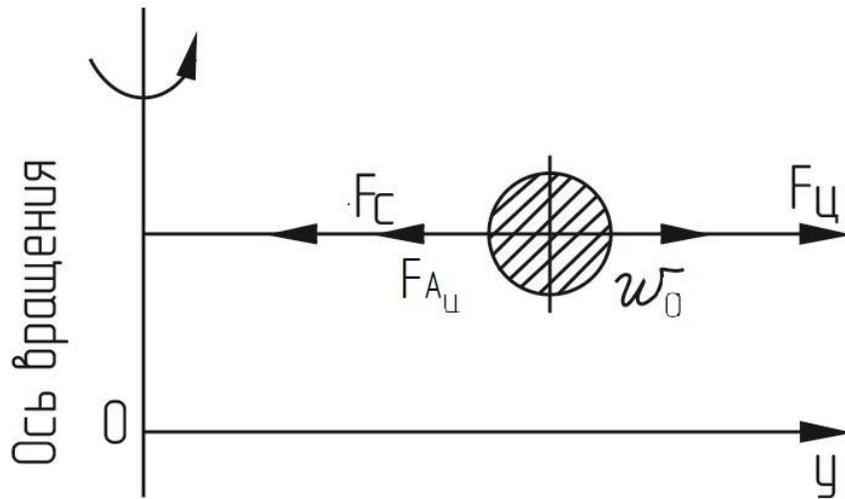


Рис. 2.7. Силы, действующие на частицу

Если считать, что сферическая частица диаметром  $d$  движется в ламинарном режиме, а движение в любой момент можно считать квазистационарным  $\left(\frac{dw}{dt} = 0\right)$ , то из уравнения (2.16) можно получить

$$0 = V_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} \omega^2 r - \xi \frac{\rho w_0^2}{2} S - V_{\text{ч}} \rho_c \omega^2 r,$$

откуда следует

$$0 = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{ч}} \omega^2 r - \frac{24}{\text{Re}} \frac{\rho w_0^2}{2} \frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi d^3}{6} \rho_c \omega^2 r. \quad (2.17)$$

Решим (2.17) относительно скорости осаждения:

$$w_0 = \frac{d^2 (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) \omega^2 r}{18 \mu}. \quad (2.18)$$

Подставим (2.18) в (2.14) и определим время осаждения частицы при ламинарном режиме:

$$\tau_0 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{\frac{d^2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})\omega^2 r}{18\mu}} = \frac{18\mu}{d^2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})\omega^2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}.$$

Окончательно имеем

$$\tau_0 = \frac{18\mu}{d^2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})\omega^2} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (2.19)$$

Формула (2.19) показывает, какие основные параметры определяют время процесса разделения в поле действия центробежных сил.

### 2.3.2. Циклонный процесс

Циклоны предназначены преимущественно для разделения запыленных газов, реже – для разделения суспензий (тогда аппараты называются гидроциклонами).

*Циклоны газовые* (рис. 2.8). Запыленный газ вводится в циклон через патрубок 1, установленный тангенциально по отношению к корпусу 2, со скоростью 10–40 м/с. Благодаря такому подводу и центральной выводной трубе 3 поток движется по спирали вниз. Частицы, как более тяжелые, под действием центробежной силы отбрасываются к стенке корпуса и сползают в его коническое днище 5. Через патрубок 4 пыль поступает в пылесборник либо через секторный затвор выводится из аппарата. Очищенный газ по трубе 3 выводится из циклона.

Несмотря на то, что циклоны применяются в промышленности давно, процессы разделения в них исследованы недостаточно, поэтому выбор циклонов чаще производится по опытным данным. Основные размеры циклонов обычно определяются в зависимости от диаметра цилиндрической части  $D$  корпуса:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} w_y \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4V}{\pi w_y}},$$

где  $w_y$  – условная скорость частицы (2,1–3,5 м/с).

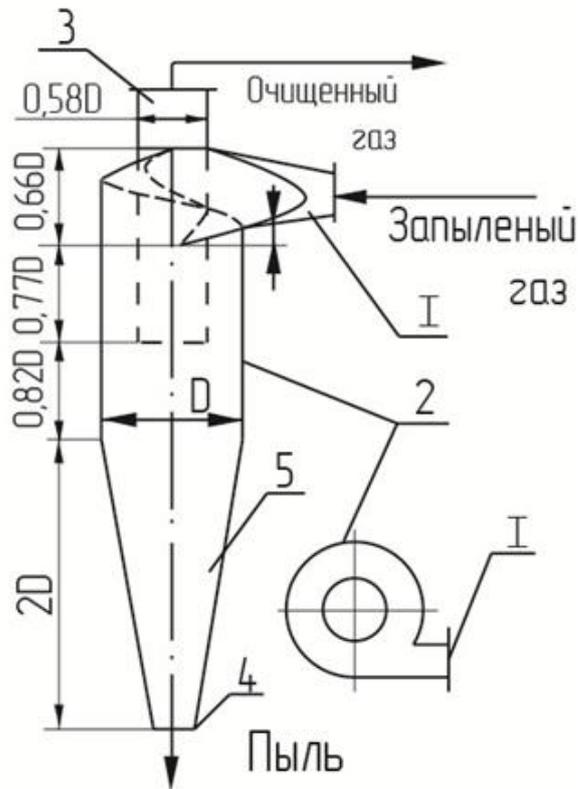


Рис. 2.8. Схема циклона конструкции НИИОГАЗ (тип ЦН-15):  
1 – входной патрубок; 2 – корпус; 3 – центральная выводная труба;  
4 – патрубок; 5 – коническое днище

На степень очистки циклона будет оказывать влияние угол наклона входного патрубка: чем меньше угол наклона, тем выше степень очистки, так как увеличивается время пребывания частицы в аппарате. Однако при этом увеличивается его гидравлическое сопротивление, что приводит к увеличению мощности вентилятора, подающего воздух в циклон. Стандартные углы наклона входного патрубка циклона 11, 15, 17 (24)°.

*Батарейные циклоны.* Производительность циклона повышается с увеличением угловой скорости вращения потока и уменьшением радиуса  $r_2$  (см. формулу (2.19)) (уменьшается время разделения). В связи с этим оказалось целесообразным выполнять циклоны диаметром  $D = 150 \div 250$  мм.

Аппарат для заданной производительности выполняется в виде батареи из параллельно работающих циклонов малого диаметра (рис. 2.9 и рис. 2.10). Запыленный газ (см. рис. 2.10) вводится в корпус  $I$  аппарата через патрубок  $2$  и распределяется по элементам  $3$ , закрепленным в перегородках  $4$ .

Внутри элементов (см. рис. 2.9) установлены винтовые лопасти, за счет которых запыленный газ закручивается. Очищенный газ по выводным трубам поступает в верхнюю часть аппарата и удаляется, а осевшая пыль удаляется из нижней части аппарата.

Батарейные циклоны могут работать при переменной нагрузке по газу, так как можно изменять число работающих элементов в батарее.

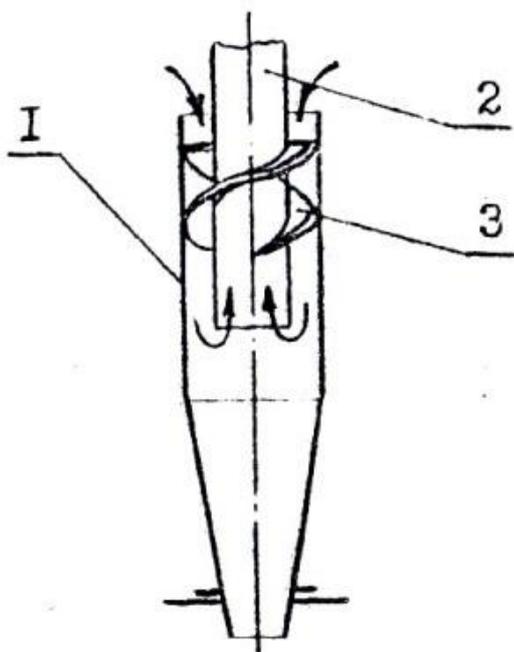


Рис. 2.9. Схема элемента батарейного циклона:  
 $I$  – корпус;  $2$  – выводная труба;  
 $3$  – винтовые лопасти

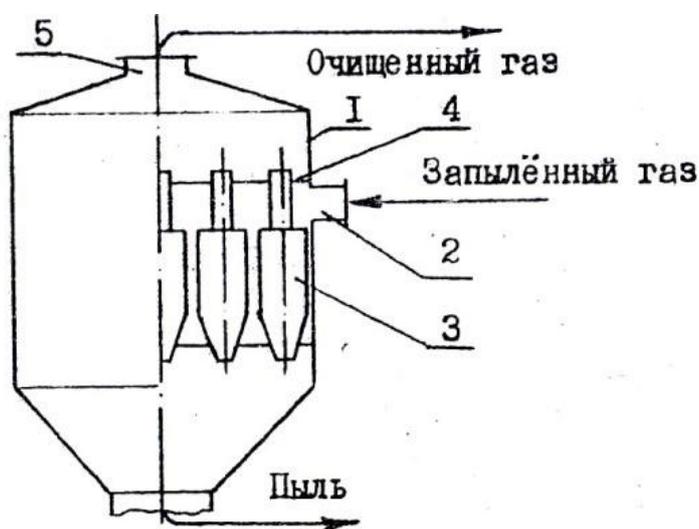


Рис. 2.10. Схема батарейного циклона:  
 $I$  – корпус;  $2$  – входной патрубок;  
 $3$  – элементы;  $4$  – перегородка;  $5$  – выходной патрубок

Степень очистки для циклонов и батарейных циклонов зависит от свойств материала, дисперсного состава, концентрации пыли в газе и изменяется в широких пределах  $\eta = 50\div 99\%$ . При этом минимальный диаметр выделяемых частиц может достигать 1 мкм.

*Гидроциклоны* (см. подробно [2]). Принципиально конструкции гидроциклонов ничем не отличаются от газовых циклонов, но степень очистки  $\eta = 30\div 40\%$ . Это связано с тем, что нельзя обеспечить больших скоростей движения жидкостей без турбулизации потока, ухудшающей процесс разделения.

Гидроциклоны применяют в основном для предварительной очистки жидкости, для классификации твердых частиц по степени крупности. Диаметры гидроциклонов в зависимости от назначения изменяются чаще всего в пределах от 10–15 до 350 мм.

### 2.3.3. Центрифугирование

Разделение суспензий и эмульсий в поле действия центробежных сил осуществляется во вращающихся аппаратах – центрифугах.

По фактору разделения  $K_p$ , все центробежные машины делятся на два класса:

- нормальные центрифуги  $K_p < 3000$ ;
- сверхцентрифуги  $K_p \geq 3000$ .

По принципу действия выделяют центрифуги периодического и непрерывного действия.

*Отстойная центрифуга.* Основным элементом отстойной центрифуги – сплошной барабан 1, насаженный на вращающийся вал 2 (рис. 2.11).

Суспензия по трубе 3 вводится в нижнюю часть барабана и под действием центробежной силы отбрасывается к стенкам. Непосредственно на стенке барабана твердые частицы образуют слой осадка, а жидкость образует внутренний слой и вытесняется из барабана поступающей на разделение суспензией. Осветленная жидкость переливается через край барабана в корпус 4, а затем удаляется из аппарата. По окончании процесса (слой осадка достиг определенной величины) центрифугу останавливают и вручную выгружают слой осадка.

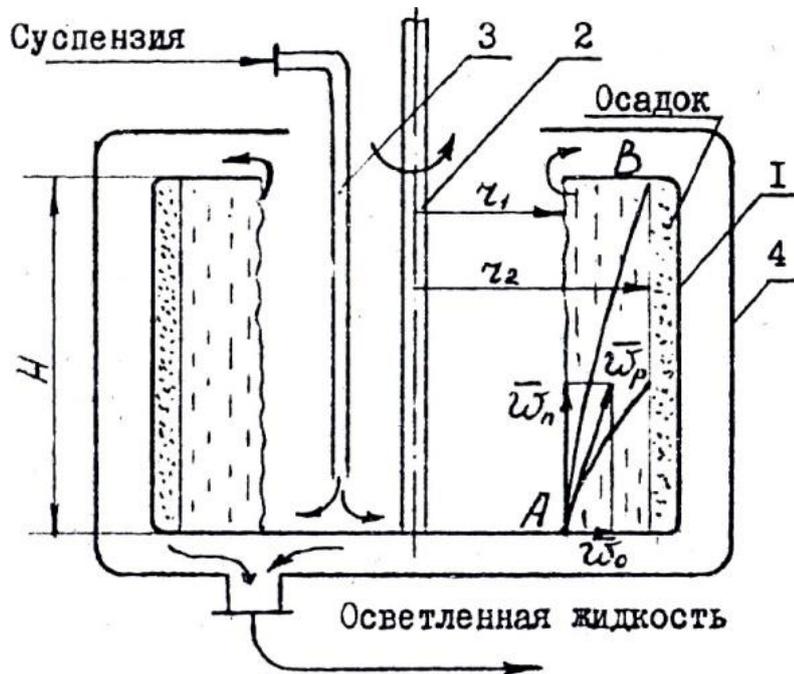


Рис. 2.11. Схема отстойной центрифуги периодического действия с ручной выгрузкой осадка:  
 1 – барабан; 2 – вал; 3 – труба; 4 – корпус

Разработаны непрерывно действующие центрифуги с механизированной выгрузкой осадка (см. подробно [2]).

Сущность процесса отстаивания в центрифугах состоит в следующем. Пусть твердая частица находится в точке  $A$  (см. рис. 2.11). Если предположить, что частица мелкая и полностью увлекается потоком, то она со скоростью потока  $w_n$  движется в осевом направлении и в то же время под действием центробежной силы движется со скоростью  $w_o$  к стенке барабана. Следовательно, частица с результирующей скоростью  $w_p$  движется по криволинейной траектории, причем траектория  $AB$  является предельной, при движении по которой твердая частица выделяется из потока. В этом случае должно выполняться условие  $\tau_{пр} = \tau_o$  (см. подразд. 2.2.3).

Время пребывания можно оценить по формуле

$$\tau_{пр} = \frac{H}{w_n} = \frac{H}{V / \pi (r_2^2 - r_1^2)},$$

где  $H$  – высота барабана;  $V$  – объемный расход жидкости;  $r_1, r_2$  – радиусы вращения внутренней и наружной поверхностей слоя жидкости.

Учитывая, что время процесса осаждения в поле действия центробежных сил можно определить по формуле (2.19) (для ламинарного режима осаждения), для отстойной центрифуги можно записать

$$\frac{18\mu}{d^2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})\omega^2} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{H}{\frac{V}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}}. \quad (2.20)$$

Решив (2.20) относительно  $V$ , получим

$$V = \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}}{18\mu} \frac{d^2\omega^2 H \pi (r_2^2 - r_1^2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}},$$

или

$$V = \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}}{18\mu} \pi d^2 \omega^2 H r_1^2 \frac{\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 - 1}{\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}. \quad (2.21)$$

Если осаждение происходит в тонком слое, то  $\frac{r_1}{r_2} \rightarrow 1$ .

Следовательно, формула (2.21) в пределе даст

$$V = \frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) \omega^2 r_1}{18\mu} 2\pi r_1 H = w_0 f_{0c}. \quad (2.22)$$

Таким образом, формула (2.22) аналогична формуле (2.21), т. е. производительность отстойной центрифуги равна произведению скорости осаждения частицы в поле действия центробежных сил на



ренной поверхности имеются шипики (лапки) высотой около 0,4 мм. Пакет 3 собирается на тарелкодержателе 4 так, что отверстия образуют три вертикальных канала, доходящих до разделительной тарелки 5, в которой отверстий нет.

Наличие шипиков обеспечивает образование между тарелками зазоров. Молоко по вертикальным каналам поднимается вверх и распределяется в зазорах между тарелками. Под действием центробежной силы обезжиренное молоко (тяжелый компонент) отбрасывается к периферии, а сливки (легкий компонент) вытесняются к оси барабана. Обезжиренное молоко проходит над тарелкой 5 и отводится через отверстие в регулировочном винте 6, а сливки проходят под тарелкой 5, отводятся по каналу 7 и удаляются из барабана через отверстие в регулировочном винте 8.

Рассмотрим физическую сущность процесса разделения, происходящего в зазоре между тарелками (рис. 2.13) [1].

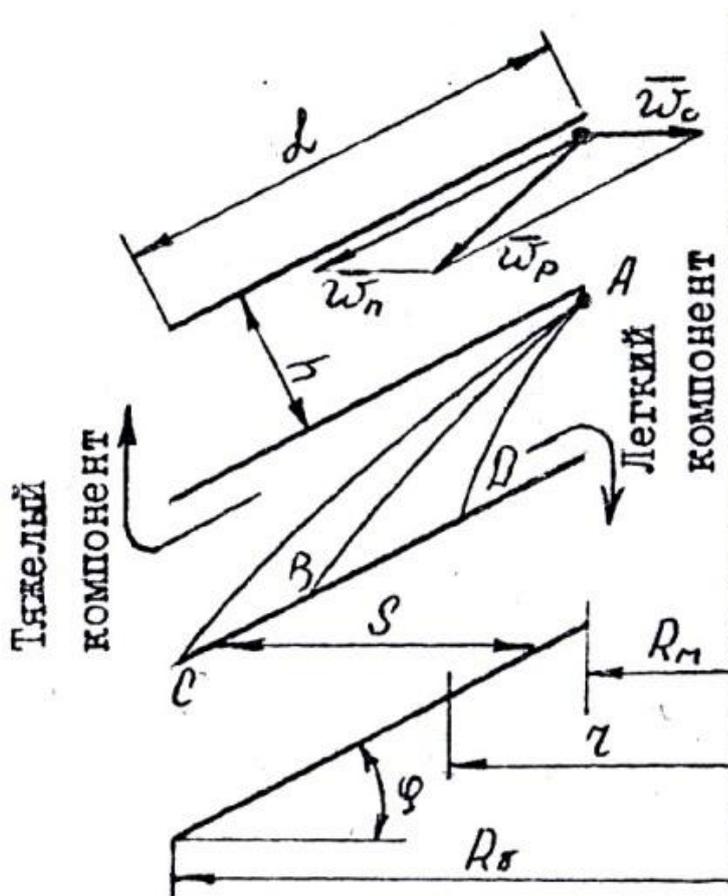


Рис. 2.13. К физической сущности процесса разделения в сепараторе

Влиянием вращения барабана на траекторию движения жирового шарика пренебрегаем. Предположим, что в начальный момент жировой шарик находится в точке  $A$  (см. рис. 2.13). Шарик с потоком молока будет переноситься вдоль зазора со скоростью  $w_{пр}$ , а под действием центробежной силы – пересекать поток в горизонтальном направлении со скоростью  $w_0$ . В результате этих двух движений шарик со скоростью  $w_p$  будет двигаться по криволинейной траектории к наружной поверхности нижерасположенной конической тарелки (например  $AB$ ,  $AD$ ,  $AC$ ). Следовательно, вдоль наружной поверхности тарелки будет двигаться легкий компонент, а вдоль внутренней поверхности к периферии – тяжелый компонент.

Процесс разделения считается законченным, если жировой шарик минимального диаметра попал на наружную поверхность тарелки правее точки  $C$ , либо в точке  $C$ . Это условие можно записать:  $\tau_{пр} = \tau_0$ , где  $\tau_{пр}$  – время пребывания шарика в аппарате;  $\tau_0$  – время осаждения).

Время осаждения

$$\tau_0 = \frac{S}{w_0},$$

где  $S$  – размер канала по горизонтали;  $\overline{w_0}$  – средняя скорость осаждения ( $w = f(r)$ ).

Время пребывания

$$\tau_{пр} = \frac{L}{w_{пр}},$$

где  $L$  – длина образующей тарелки;  $\overline{w_{пр}}$  – средняя скорость потока.

Таким образом, можно записать

$$\frac{S}{w_0} = \frac{L}{w_{пр}}. \quad (2.23)$$

Скорость осаждения зависит линейно от радиуса вращения частицы (2.18):

$$w_o = \frac{d^2 \rho_n - \rho_{ж} \omega^2 r}{18 \mu},$$

где  $\rho_n$  – плотность тяжелого компонента (обезжиренное молоко);  
 $\rho_{ж}$  – плотность легкого компонента (жирового шарика);  $r$  – текущий радиус.

Отсюда средняя скорость (рис. 2.14)

$$w_o = \frac{w_o^{R_\delta} + w_o^{R_M}}{2} = \frac{d^2 \rho_n - \rho_{ж} \omega^2}{18 \mu} \frac{R_\delta + R_M}{2}, \quad (2.24)$$

где  $R_\delta, R_M$  – наружный и внутренний радиусы пакета тарелок.

Скорость потока в каналах пакета для любого сечения

$$w_{\pi} = \frac{V}{fz} = \frac{V}{2\pi r h z}, \quad (2.25)$$

где  $V$  – объемный расход;  $h$  – высота канала (определяется размером шипика);  $z$  – число каналов.

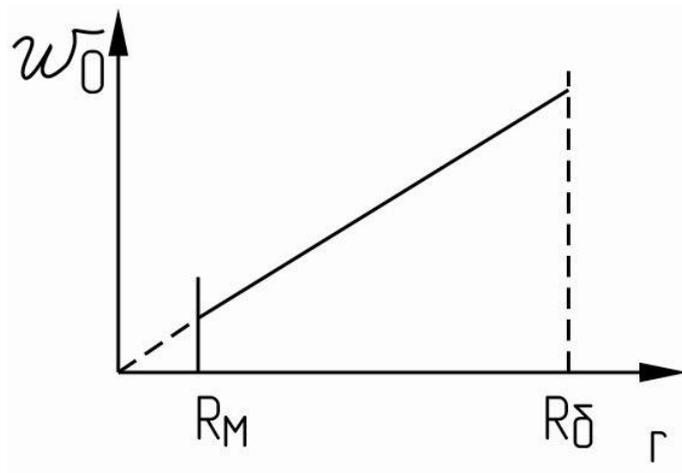


Рис. 2.14. Изменение скорости осаждения в барабане

Среднюю скорость потока (рис. 2.15) можно определить по формуле

$$\bar{w}_{\Pi} = \frac{1}{R_{\delta} - R_{\text{M}}} \int_{R_{\text{M}}}^{R_{\delta}} \frac{V}{2\pi h z} \frac{dr}{r} = \frac{V}{2\pi h z} \frac{1}{R_{\delta} - R_{\text{M}}} \ln \frac{R_{\delta}}{R_{\text{M}}}. \quad (2.26)$$

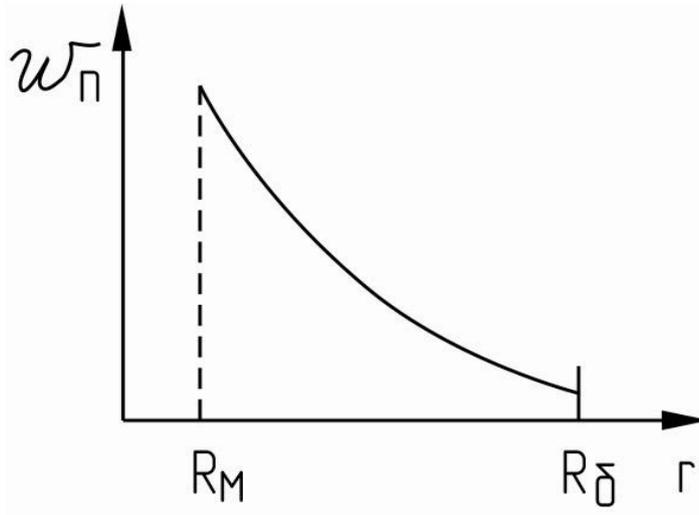


Рис. 2.15. Изменение скорости потока в зазоре между тарелками

Подставим (2.24) и (2.26) в соотношение (2.23), при этом учтем, что

$$L = \frac{R_{\delta} - R_{\text{M}}}{\cos \varphi}, \quad S = \frac{h}{\sin \varphi},$$

где  $\varphi$  – угол наклона пакета тарелок к горизонту:

$$\frac{d^2}{18\mu} \frac{\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}}}{\omega^2} \frac{R_{\delta} + R_{\text{M}}}{2} \sin \varphi = \frac{R_{\delta} - R_{\text{M}}}{\cos \varphi} \frac{V}{2\pi h z} \frac{1}{R_{\delta} - R_{\text{M}}} \ln \frac{R_{\delta}}{R_{\text{M}}}. \quad (2.27)$$

Решим (2.27) относительно  $V$ :

$$V = \frac{\pi d^2}{9\mu} \frac{\rho_n - \rho_{ж}}{\omega^2} z \operatorname{tg} \varphi \frac{R_6^2 - R_M^2}{\ln \frac{R_6}{R_M}} R_6 - R_M . \quad (2.28)$$

Формула (2.28) дает возможность оценить влияние различных параметров на производительность сепаратора.

## 2.4. Фильтрация

### 2.4.1. Основы теории

Процессом фильтрации называют разделение суспензий или пыли путем пропускания их через пористую перегородку, способную задерживать твердую фазу и пропускать жидкость или газ. Движущей силой процесса фильтрации является разность давлений над и под фильтрующей перегородкой. На рис. 2.16 представлена схема процесса фильтрации, где  $p_1 > p_2$  и движущая сила  $\Delta p = p_1 - p_2$ .

В качестве фильтрующих перегородок используют специальные ткани из волокон растительного, животного, минерального происхождения и из синтетических волокон. В последнее время все шире начинают применять пористые металлические, керамические и металлокерамические фильтрующие перегородки.

Осадки, получаемые при фильтрации, подразделяют на несжимаемые и сжимаемые. Под несжимаемыми понимают такие осадки, в которых пористость, т. е. отношение объема пор к объему осадка, не уменьшается при увеличении разности давлений. Пористость сжимаемых осадков уменьшается, а их гидравлическое сопротивление потоку жидкой фазы возрастает с увеличением разности давлений.

На рис. 2.17 изображена зависимость производительности фильтра от движущей силы процесса. Производительность фильтра характеризуется количеством фильтрата, проходящего через единицу поверхности фильтрующей перегородки в единицу времени. Для несжимаемых осадков производительность с увеличением  $\Delta P$  возрастает примерно по линейному закону, а для сжимаемых осадков сначала происходит увеличение производительности, а затем по мере уплотнения осадка производительность аппарата снижается. Таким

образом, для сжимаемых осадков существует оптимальное значение движущей силы, при котором производительность фильтра максимальна.

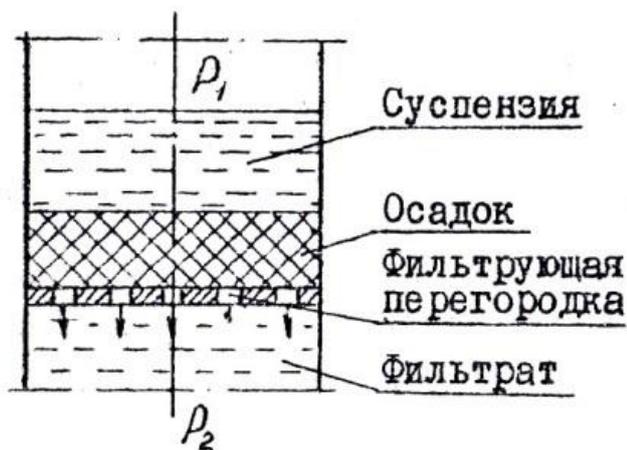


Рис. 2.16. Схема процесса фильтрации

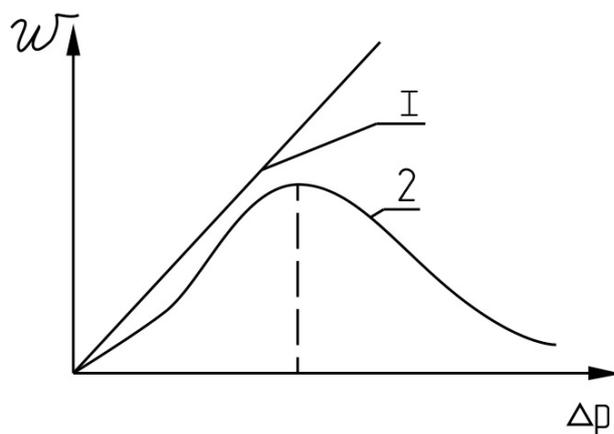


Рис. 2.17. Зависимость производительности фильтра от движущей силы фильтрации:  
1 — несжимаемые осадки;  
2 — сжимаемые осадки

Анализ условий фильтрации показал, что решающим при переходе от фильтрации с закупориванием пор к фильтрации с образованием осадка является соотношение между скоростью фильтрации и скоростью осаждения твердых частиц  $w/w_{oc}$ . Для фильтрации с образованием осадка должно соблюдаться условие  $w/w_{oc} < 100$ . Когда  $w/w_{oc} > 100$ , наблюдается переход к фильтрации с закупориванием пор и, как следствие, уменьшение производительности фильтра. Поэтому, для того чтобы обеспечить переход от фильтрации с закупориванием пор к фильтрации с образованием осадка, желательно перед фильтрацией в течение некоторого времени сконцентрированную суспензию выдержать над фильтровальной перегородкой.

Практически несжимаемыми являются осадки, состоящие из механически прочных твердых частиц размером более 100 мкм. Режим течения фильтрата в порах вследствие малого диаметра частиц и низкой скорости потока является ламинарным.

Следовательно, расход жидкости с вязкостью  $\mu$  через один капилляр радиусом  $r$  и длиной  $l$  при перепаде давлений  $\Delta P$  можно выразить уравнением Пуазейля

$$V_1 = \left( \frac{\pi \Delta P}{8 \mu l} \right) r^4.$$

Элементарный объем жидкости, прошедший за время  $d\tau$ , при наличии  $z$  капилляров на  $1 \text{ м}^2$  площади фильтра

$$dV = \left( \frac{\pi \Delta P r^4 z}{8 \mu l} \right) S d\tau,$$

где  $S$  – площадь фильтра.

Отсюда находим скорость фильтрования, выражающую объем фильтрата, проходящего через поры на  $1 \text{ м}^2$  поверхности фильтра в единицу времени:

$$w = \frac{1}{S} \frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{\mu \frac{8l}{\pi r^4 z}}. \quad (2.29)$$

Величины  $r$ ,  $l$  и  $z$ , будучи в среднем постоянными для каждого осадка и фильтровальной перегородки, не поддаются непосредственному измерению. Однако весь комплекс  $\frac{8l}{\pi r^4 z}$ , который выражает суммарное сопротивление слоя осадка  $R_o$  и фильтровальной перегородки  $R_{\Pi}$ , можно описать таким образом:

$$w = \frac{\Delta P}{\mu R_o + R_{\Pi}}.$$

Сопротивление слоя осадка пропорционально его толщине  $h_o$ :

$$R_o = r_o h_o,$$

где  $r_0$  – удельное сопротивление осадка, м, т. е. сопротивление, оказываемое потоку фильтрата слоем осадка толщиной 1 м;  $h_0 = xV / S$ , здесь  $x$  – объемная концентрация твердой фазы в разделяемой суспензии.

После подстановки значения  $R_0$  в уравнение (2.29) получаем основное уравнение процесса фильтрования:

$$w = \frac{1}{S} \frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{\mu (R_{II} + r_0) xV / S}. \quad (2.30)$$

Так как при фильтровании с образованием несжимаемого осадка  $r_0$  – величина постоянная, то, интегрируя последнее уравнение при изменении  $\tau$  и  $V$  в пределах от 0 до  $\tau$  и от 0 до  $V$ , получаем

$$V^2 + 2 \frac{R_{II} S}{r_0 x} V = 2 \frac{\Delta P S^2}{\mu r_0 x} \tau.$$

Этому уравнению придают другой вид:

$$V^2 = 2VC = k\tau,$$

где  $C = \frac{R_{II} S}{r_0 x}$  и  $k = \frac{2\Delta P S^2}{\mu r_0 x}$  – постоянные величины для несжимаемых осадков, определяются экспериментально.

#### 2.4.2. Устройство фильтров

Простейшим аппаратом периодического действия является нутч-фильтр, используемый обычно в производствах малой мощности. Он представляет собой (рис. 2.18) вертикальный цилиндрический корпус 1, разделенный фильтровальной перегородкой 2 на две камеры. Суспензия загружается в верхнюю, а фильтрат собирается в нижней камере. Необходимый перепад давлений создается либо вакуумированием нижней камеры (верхняя сообщается с атмосферной), либо подачей сжатого газа в верхнюю камеру (нижняя может быть сообщена с атмосферой).

Рамный фильтр-пресс (рис. 2.19) отличается простотой устройства, надежностью в работе и компактностью расположения фильтрующей поверхности. Он состоит из ряда чередующихся плит и рам, опирающихся боковыми лапами на два параллельных бруса станины. Между плитами и рамами прокладываются фильтровальные перегородки, после чего весь пакет стягивается между неподвижной и подвижной концевой плитой. Суспензия, нагнетаемая насосом, поступает в камеры фильтра-пресса, откуда фильтрат стекает по желобкам к выходным каналам, а осадок накапливается внутри камер.

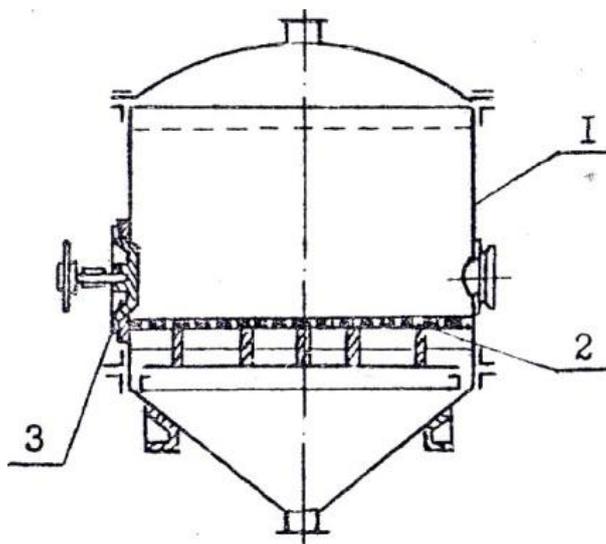


Рис. 2.18. Нутч-фильтр:

1 – корпус; 2 – фильтровальная перегородка; 3 – люк для выгрузки осадка

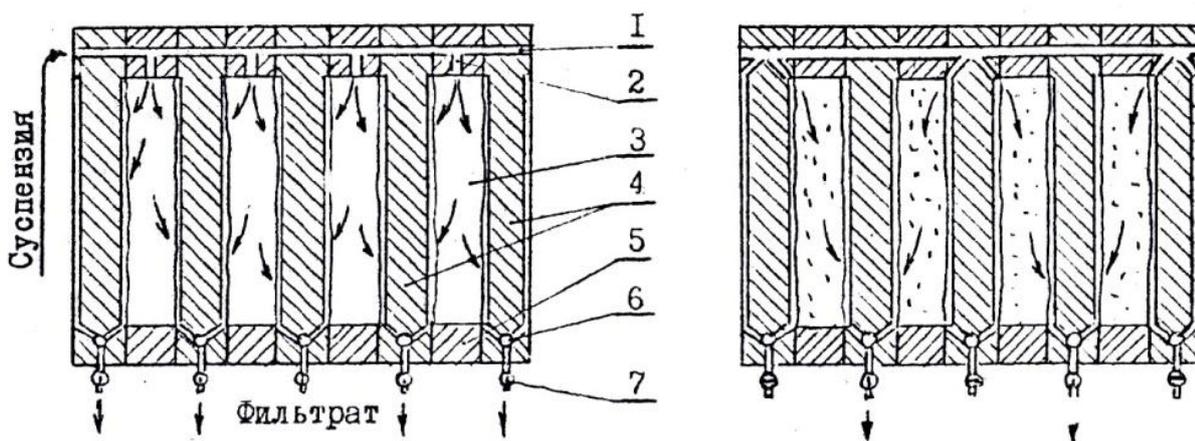


Рис. 2.19. Схема рамного фильтра-пресса:

1 – средний канал для суспензии;  
 2 – канал; 3 – межплиточное пространство; 4 – плиты; 5 – рамы;  
 6 – выход фильтрата и промывной жидкости; 7 – кран

Барабанный вакуум-фильтр (рис. 2.20) относится к аппаратам непрерывного действия. Он состоит из горизонтального барабана с перфорированной цилиндрической стенкой, покрытой металлической сеткой и фильтровальной тканью. Барабан, разделенный радиальными перегородками на 12 секций, медленно вращается (0,1–3 об/мин) на валу, один конец которого соединен с приводом, а другой, в виде полый цапфы, прижат к неподвижной распределительной головке. С последней сообщаются все ячейки барабана при помощи каналов в полый цапфе. Барабан погружен в корыто, наполненное суспензией. При вращении барабана часть его ячеек постоянно погружена в суспензию и сообщается через распределительную головку с приемником, находящимся под вакуумом, поэтому фильтрат отсасывается, а твердые частицы образуют осадок на поверхности фильтровальной ткани. Далее эти ячейки выходят из корыта, продолжая сообщаться с приемником, и слой осадка несколько обезвоживается. Осадок промывается. Затем через слой осадка в целях его подсушки снова просасывается воздух, после чего ячейки сообщаются с линией сжатого воздуха для «отрыва» осадка от фильтровальной ткани и его разрыхления. Подробнее устройство фильтров изложено в работе [2].

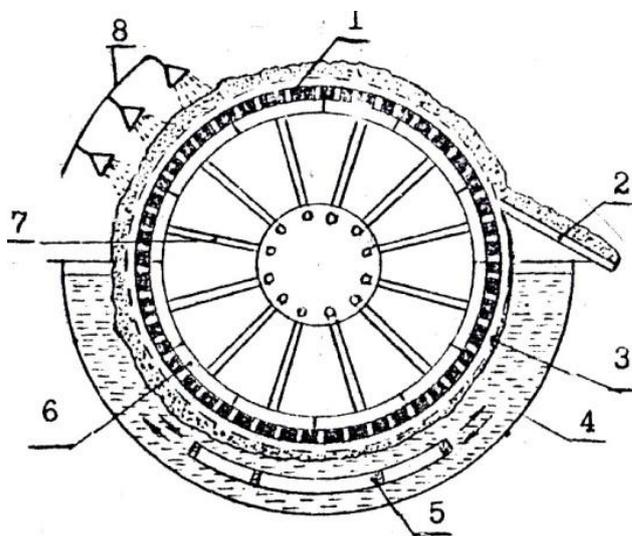


Рис. 2.20. Схема барабанного вакуум-фильтра:

- 1 – перфорированный барабан; 2 – нож; 3 – фильтрующая ткань;
- 4 – корыто; 5 – качающаяся мешалка; 6 – камеры; 7 – трубы;
- 8 – устройство для разбрызгивания промывающей жидкости

### 2.4.3. Фильтрование газов

Для очистки запыленных газов используют газовые фильтры. Запыленные газы проходят через пористые перегородки, которые пропускают газ и задерживают взвешенные в нем твердые частицы. Степень очистки газов в фильтрах достигает 99 %.

По конструкции различают фильтры с плоской фильтрующей перегородкой (рис. 2.21) и батарейные фильтры (рис. 2.22) [3].

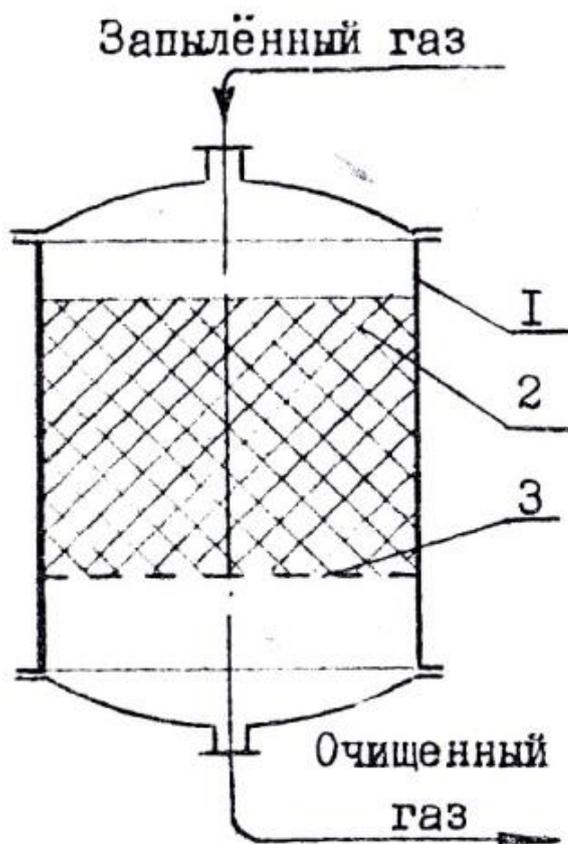


Рис. 2.21. Газовый фильтр с плоской фильтрующей перегородкой:  
1 – корпус; 2 – фильтрующая перегородка; 3 – опорная решетка

Фильтр с плоской фильтрующей перегородкой представляет собой корпус 1, заполненный мелкозернистым или спрессованным волокнистым фильтрующим материалом, через который проходит газовый поток и очищается от взвешенных в нем частиц. Через определенные промежутки времени подача газового потока прекращается, фильтрующий материал очищают или заменяют новым. Например,

в качестве фильтрующего материала можно использовать песок, кварц, вату и т. д.

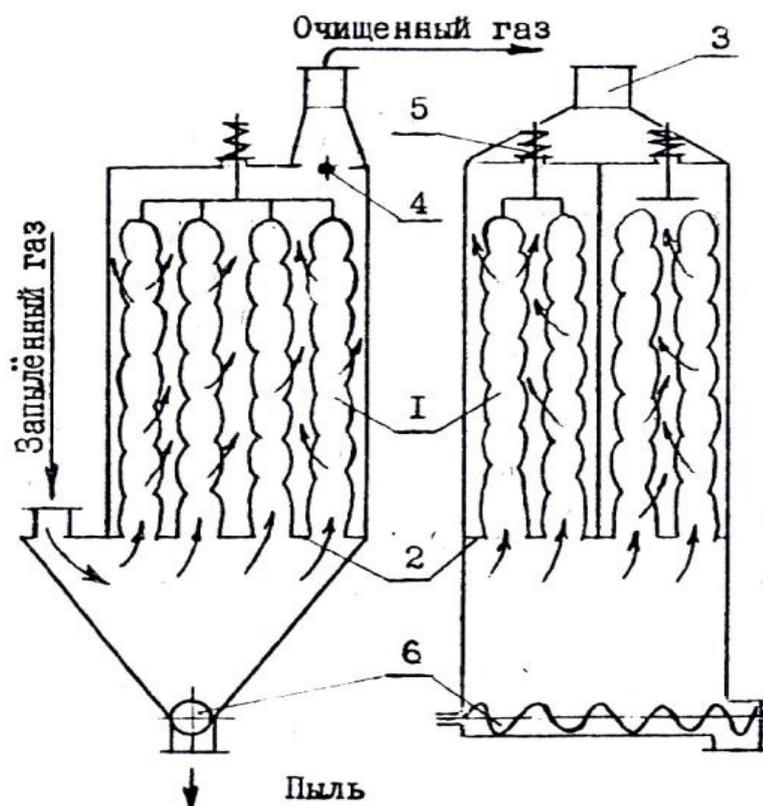


Рис. 2.22. Рукавный фильтр с механическим встряхиванием:  
 1 – рукава; 2 – распределительная решетка; 3 – газоход;  
 4 – дроссельная заслонка; 5 – встряхивающее устройство; 6 – шнек

Батарейный фильтр (см. рис. 2.22) чаще всего выполняется в виде рукавного фильтра, где используются тканевые фильтрующие элементы. Фильтр выполняется в виде параллельно работающих секций (от 2 до 12) с числом рукавов в каждой секции в среднем 8. Запыленный газ вводится в фильтр и распределяется по фильтрующим элементам – рукавам 1, нижние концы которых закреплены на трубках распределительной решетки 2. Очищенный газ удаляется через газоход 3, а взвешенные твердые частицы осаждаются на внутренней поверхности фильтрующих элементов. Для очистки ткани от твердых частиц через определенное время закрывается дроссель 4 и секция фильтра отключается. С помощью встряхивающего механизма 5 пыль сбрасывается в нижнюю часть фильтра и удаляется из аппарата шнеком 6. Последовательность и продолжительность

работы секций фильтра регулируются с помощью автоматических устройств.

Батарейные фильтры используются для очистки больших потоков запыленного газа.

Расчет газовых фильтров практически сводится к определению поверхности фильтрования  $S$  по наибольшему допускаемому для фильтрующего элемента перепаду давления:

$$S = \frac{V_0 r_{\phi}}{\Delta P},$$

где  $V_0$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с;  $r_{\phi}$  – максимальное сопротивление фильтра при фильтровании с заданной скоростью, Н · с/м<sup>3</sup>;  $\Delta P$  – максимальный допустимый перепад давления, Н/м<sup>2</sup>.

Рукавные фильтры нельзя использовать для фильтрования влажных газов (температура газа должна быть больше температуры точки росы приблизительно на 10 °С), а также горячих газов.

#### 2.4.4. Фильтрование под действием центробежной силы

Разделение суспензий можно проводить в фильтрующих центрифугах различных типов [4].

Фильтрующие центрифуги делятся на периодически действующие и непрерывно действующие. Большое значение при этом имеет способ выгрузки осадка. Различают центрифуги периодического действия с ручной выгрузкой осадка, гравитационной и автоматической, а среди непрерывно действующих различают центрифуги с пульсирующим поршнем и с центробежной выгрузкой.

В аппаратах этих типов разность давления, необходимая для процесса фильтрования, создается за счет центробежной силы. Рассмотрим вращение кольца жидкости вокруг оси О–О.

Рассмотрим элементарный кольцевой слой жидкости  $dr$ , находящийся на расстоянии  $r$  от оси вращения (рис. 2.23).

Центробежная сила  $df$ , возникающая при вращении кольца жидкости толщиной  $dr$  с угловой скоростью  $\omega$ ,

$$df = a_{\text{ц}} dm = \omega^2 r \rho 2\pi r H dr,$$

где  $a_{ц} = \omega^2 r$  – центробежное ускорение;  $dm = \rho 2\pi r H dr$  – масса элементарного кольца;  $\rho$  – плотность жидкости;  $H$  – высота кольца жидкости.

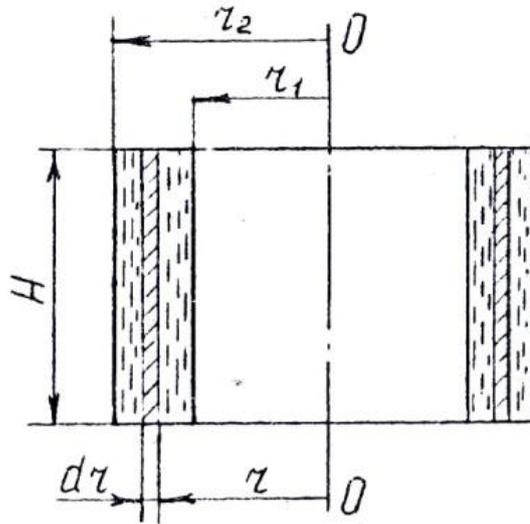


Рис. 2.23. К определению разности давления, возникающей в центрифуге

За счет вращения этого кольца жидкости  $dr$  возникает элементарный перепад давления

$$dp = \frac{df}{S} = \frac{\rho 2\pi r H dr \omega^2 r}{2\pi r H} = \rho \omega^2 r dr.$$

Если внутренний диаметр вращающегося кольца жидкости  $r_1$ , а наружный –  $r_2$ , то разность давления, создаваемая кольцом жидкости,

$$\Delta p = \int_{r_1}^{r_2} \rho \omega^2 r dr = \rho \omega^2 \int_{r_1}^{r_2} r dr = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r_2^2 - r_1^2). \quad (2.31)$$

Таким образом, формула (2.31) определяет перепад давления, под действием которого жидкость проходит через фильтрующую перегородку, находящуюся на расстоянии  $r_2$  от оси вращения, а над ней находится слой жидкости толщиной  $(r_2 - r_1)$ .

На рис. 2.24 приведена схема устройства фильтрующей центрифуги периодического действия с ручной выгрузкой осадка. Внутри кожуха 1 установлен барабан с перфорированными стенками (ротор) 2, который закреплен на валу 3. Внутри барабана размещается дренажная сетка 4, на которую укладывается фильтрующая ткань 5. Суспензия при снятой крышке 6 загружается в ротор, после чего крышка закрывается и ротор приводится во вращение. Жидкость (фильтрат) под действием возникающего перепада давления проходит через фильтрующую ткань, дренажную сетку и через отверстия в стенке ротора удаляется в кожух. Из кожуха по сливному патрубку направляется в сборник фильтрата. После окончания фильтрования осадок вручную удаляется из ротора.

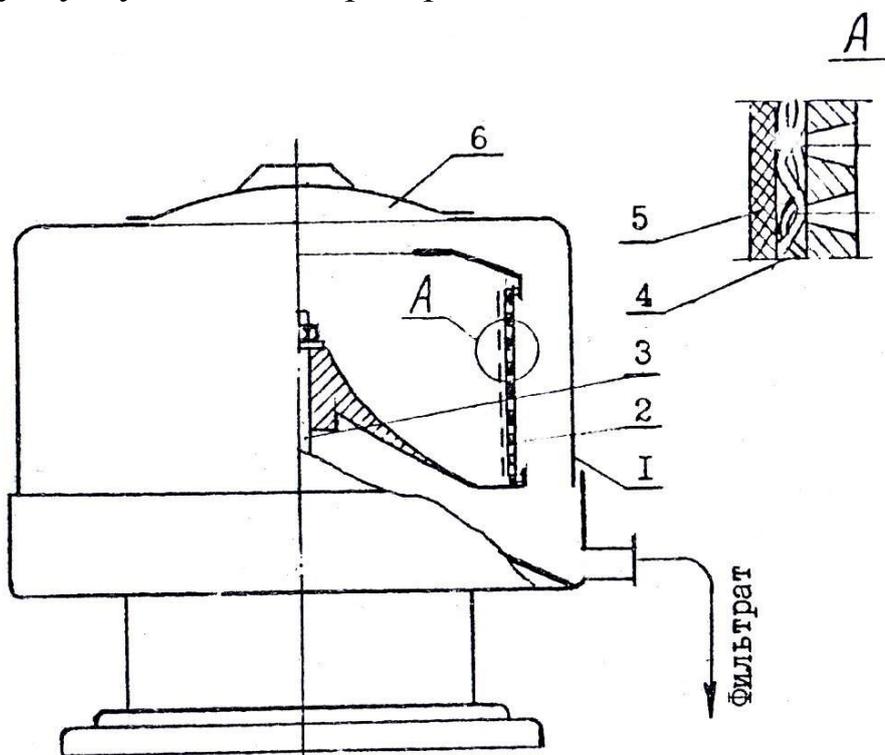


Рис. 2.24. Фильтрующая центрифуга периодического действия с ручной верхней выгрузкой осадка:

1 – кожух; 2 – ротор; 3 – вал;

A – дренажная сетка; 5 – фильтрующая ткань; 6 – крышка

В непрерывно действующей фильтрующей центрифуге с пульсирующим поршнем (рис. 2.25) подача суспензии производится непрерывно, а осадок периодически выгружается поршнем-толкателем из перфорированного ротора, который расположен горизонтально.

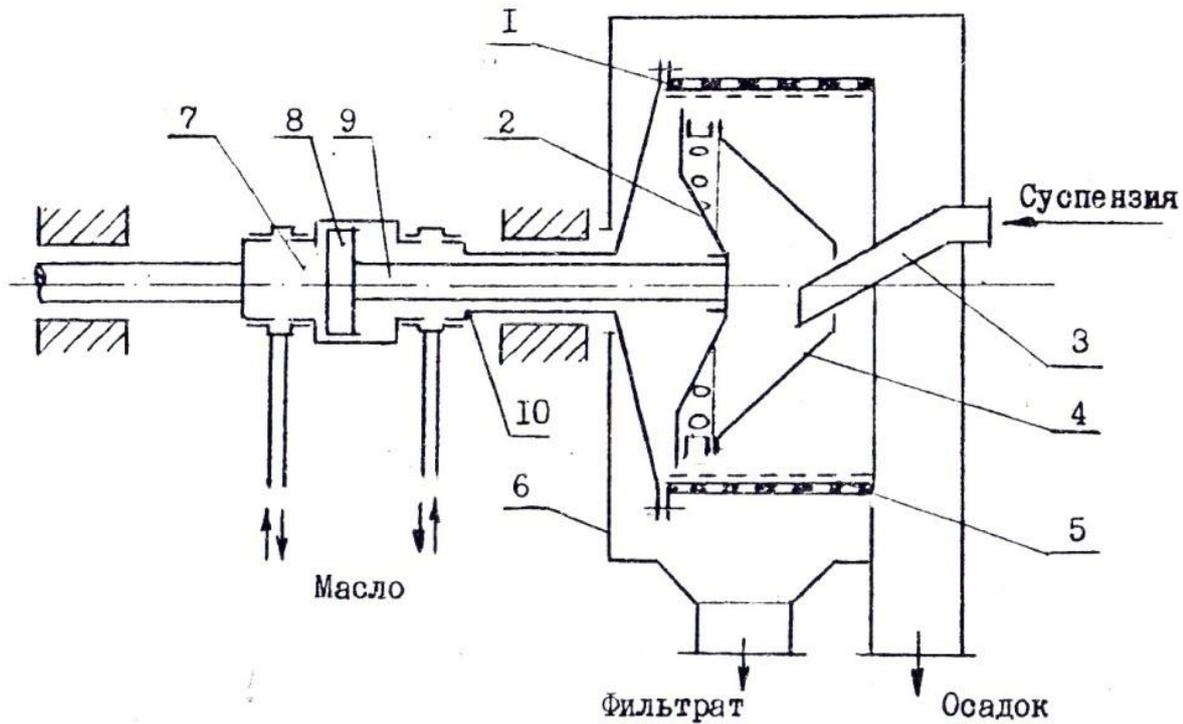


Рис. 2.25. Непрерывно действующая фильтрующая центрифуга с пульсирующим поршнем:

1 – ротор; 2 – поршень-толкатель; 3 – труба; 4 – приемная воронка; 5 – щелевое сито; 6 – кожух; 7 – цилиндр; 8 – поршень; 9 – шток; 10 – вал

Внутри перфорированного ротора 1 по его оси размещен поршень-толкатель 2. Суспензия по трубе 3 поступает в коническую воронку 4, вращающуюся синхронно с ротором, на внутренней поверхности которого находится металлическое щелевое сито 5. Через отверстие в воронке суспензия поступает в ротор. Под действием разности давления, возникающей за счет вращения ротора, жидкость проходит через сито и через отверстия в стенке ротора и удаляется из кожуха 6 через сливной патрубок. Твердые частицы, которые задерживаются на сите в виде осадка, периодически поршень-толкателем перемещаются к открытому концу барабана и выгружаются в кожух. Движение поршня-толкателя осуществляется за счет подачи масла в цилиндр 7, где находится поршень 8, который через шток 9, проходящий внутри полого вала 10, связан с поршень-толкателем. Попеременная подача масла в правую или левую полости цилиндра обеспечивает возвратно-поступательное движение поршня-толкателя.

## 2.5. Мембранные методы разделения жидких систем

### 2.5.1. Классификация методов

К традиционным методам разделения жидких систем на молекулярном уровне относятся такие, как адсорбция, экстракция, абсорбция, ректификация и т. д. В последнее десятилетие в различных отраслях промышленности внедряется один из более совершенных методов разделения, основанный на использовании полупроницаемых мембран. Их свойства были давно известны ученым, так как в основе жизнедеятельности живых клеток лежит использование полупроницаемых биологических мембран. Однако техническое применение стало возможным только после того, как удалось наладить производство синтетических полимерных мембран.

Принципиальное отличие мембранных методов заключается в том, что в отличие от обычной фильтрации, при которой на поверхности фильтра образуется слой осадка, при мембранных методах образуются два раствора.

К основным мембранным методам разделения относятся: обратный осмос, ультрафильтрация, диализ и электродиализ. В пищевой промышленности наиболее широко используются первые два метода, поэтому их и рассмотрим подробнее [5]. Области применения методов в зависимости от размера частиц приведены на рис. 2.26.

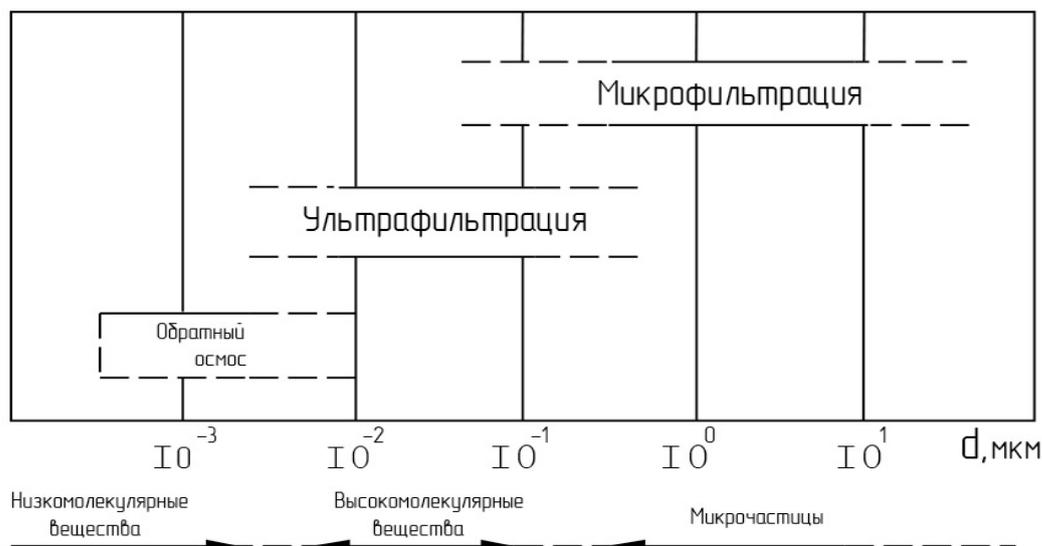


Рис. 2.26. Области применения мембранных методов разделения жидких веществ

Устройство аппаратов для реализации этих методов во многом сходно, отличие заключается только в использовании мембран с разными размерами пор.

## 2.5.2. Обратный осмос

Суть метода заключается в использовании полупроницаемой мембраны, которая при создании избыточного давления со стороны раствора пропускает растворитель и полностью или частично задерживает молекулы растворенных веществ. В основе метода лежит явление осмоса – самопроизвольного перехода растворителя через полупроницаемую мембрану в раствор.

Возьмем сосуд, разделенный полупроницаемой мембраной (рис. 2.27).

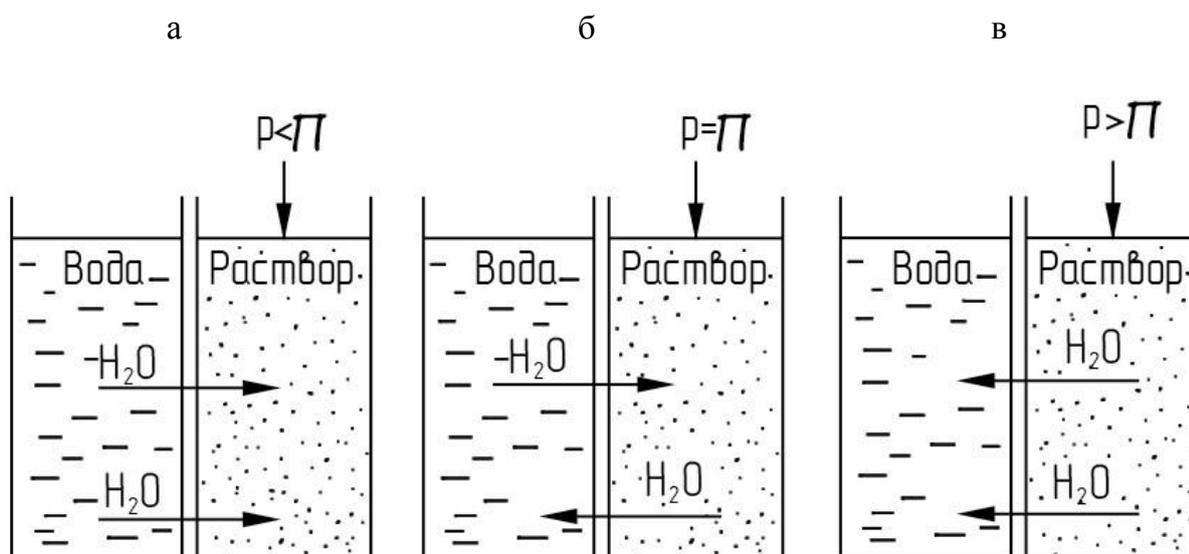


Рис. 2.27. Явление обратного осмоса:  
а – осмос; б – равновесие; в – обратный осмос

С одной стороны от мембраны нальем воду (растворитель), а с другой стороны – раствор, например, сахара. Наличие разности концентрации сахара по обе стороны мембраны приведет к переходу молекул воды через мембрану, так как система будет стремиться к равновесию (см. рис. 2.27, а). По мере перехода молекул воды в раствор его уровень будет увеличиваться. Это приведет к появлению избыточного давления со стороны раствора, которое будет про-

тивомодействовать переходу воды в раствор. Когда избыточное давление достигнет давления, равного осмотическому  $\pi$ , процесс перехода прекратится (см. рис. 2.27, б). Если же со стороны раствора приложить избыточное давление  $P > \pi$ , то молекулы воды из раствора начнут переходить в обратном направлении – возникнет обратный осмос (см. рис. 2.27, в). В этом случае начнется процесс концентрирования раствора. Движущая сила обратного осмоса.  $\Delta p = p - \pi$ .

Величину осмотического давления можно оценить по формуле Вант-Гоффа:

$$\pi = cRT,$$

где  $c$  – мольная доля растворенного вещества;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура раствора.

Закон справедлив для разбавленных растворов, а в концентрированных растворах и в растворах электролитов наблюдается значительное отклонение от него.

Оно может достигать значительных величин, поэтому и рабочее давление  $P$  в установках может быть весьма большим. Так, при работе опреснительных установок на морской воде с содержанием 3,5 % солей  $P = 7 \div 8$  МПа, так как  $\pi = 2,5$  МПа.

При обратном осмосе концентрируются не только высокомолекулярные соединения (ВМС), но и большая часть низкомолекулярных соединений (НМС).

### 2.5.3. Ультрафильтрация

Ультрафильтрация (УФ) в отличие от обратного осмоса используется для разделения жидких систем, у которых молекулярная масса растворенных веществ значительно больше молекулярной массы растворителя.

Обычно для ВМС  $\pi \ll P$ , поэтому при определении рабочего давления  $P$  величину  $\pi$  можно не учитывать. Рабочее давление в УФ лежит в диапазоне 0,3–1,0 МПа.

На рис. 2.28 приведена схема УФ-аппарата типа «фильтр-пресс», который применяется, когда не требуется большой производительности [5].

Основой аппарата является фильтрующий элемент (см. рис. 2.28, а). Фильтрующие элементы расположены на небольшом расстоянии друг от друга (0,5–5 мм), образуя межэлементное пространство для прохода разделяемого потока. Пакет фильтрующих элементов стягивается болтами. Разделяемый поток проходит последовательно вдоль всех фильтрующих элементов. При этом прошедший через мембрану фильтрат выводится из аппарата через дренажный каркас в радиальном направлении, а концентрат – через отверстие во фланце.

В настоящее время разработано много различных типов УФ-аппаратов [5], причем особое внимание привлекают аппараты, в которых в качестве фильтрующих элементов используются полые волокна. В этих аппаратах достигается удельная поверхность мембран  $20000\text{--}30000\text{ м}^2/\text{м}^3$ .

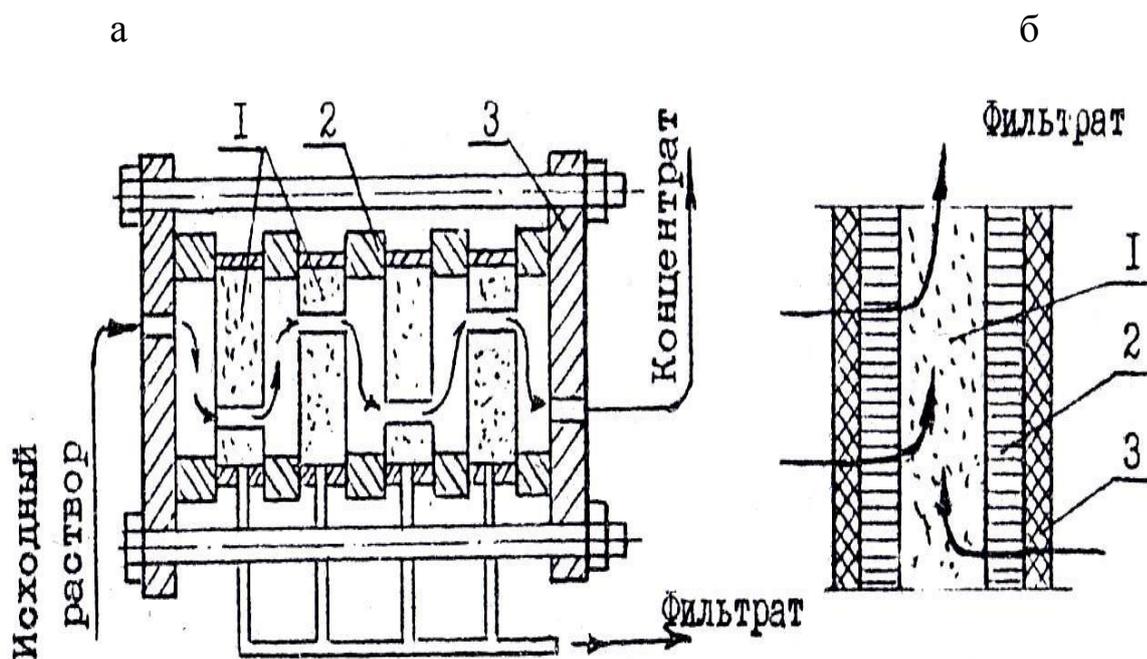


Рис. 2.28. Ультрафильтрационный аппарат с плоскокамерными фильтрующими элементами:

- а – аппарат: 1 – фильтрующий элемент; 2 – рама; 3 – фланец;  
 б – фильтрующий элемент: 1 – дренажный каркас; 2 – мелкопористая подложка;  
 3 – мембрана

#### 2.5.4. Использование мембранных методов в пищевой промышленности

Широкое применение мембранных методов разделения в пищевой промышленности позволит резко улучшить качество продуктов, подвергаемых концентрированию и обезвоживанию. Ведь в настоящее время здесь в основном используются методы, связанные с тепловой обработкой продуктов, что отрицательно сказывается на их качестве. УФ-методы проводятся при нормальных температурах. Кроме того, УФ-процессы экономичнее тепловых, так как разделение осуществляется без фазовых превращений. Так, расчеты показывают, что при продавливании  $1 \text{ м}^3$  воды под давлением 5 МПа совершаемая работа равна 4,90 МДж, в то время как на испарение этого же количества воды требуется 2270 МДж.

К основным недостаткам УФ-методов следует отнести применение высоких рабочих давлений, что выдвигает жесткие требования к конструкции аппаратов. Кроме того, получение концентратов с высоким содержанием твердых веществ (свыше 20 %) связано с резким увеличением энергозатрат.

В пищевой промышленности мембранные методы разделения могут быть использованы для концентрирования овощных и фруктовых соков, экстрактов, молочных продуктов, обработки сточных вод, регулирования газовых сред, пастеризации пищевых продуктов и т. д.

В последнее время большое значение мембранные методы разделения приобретают в молочной промышленности, особенно в процессах переработки вторичного молочного сырья. Разработаны и используются в промышленности установки для концентрирования сыворотки производительностью до  $750 \text{ м}^3/\text{сут}$ , обезжиренного молока – производительностью до  $140 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Все это позволяет резко увеличить производство молочных продуктов.

#### 2.6. Мокрая очистка газов

Для очистки газов от пыли применяют аппараты, в которых газы промываются водой или другой жидкостью. В этом случае используются силы поверхностного натяжения, за счет которых твердые частицы прилипают к каплям или пленке жидкости (жидкость должна смачивать пыль).

Иногда мокрая очистка совмещается с процессом абсорбции вредных газообразных или паровых примесей, содержащихся в отходящих газах. Для эффективного обеспыливания требуется обеспечить максимальную поверхность контакта промывной жидкости с запыленным газом. С этой целью жидкость диспергируется с помощью специальных устройств или самим газовым потоком.

Мокрая очистка имеет ряд преимуществ перед «сухими» методами (высокая степень очистки, уменьшение взрывоопасности), однако большими недостатками являются: коррозия конструкций аппаратов, необходимость организации удаления и очистки жидких стоков в условиях оборотного водоснабжения, необходимость теплоизоляции аппаратов при работе в холодном климате.

*Башенные скрубберы.* Полые скрубберы (рис. 2.29) являются простейшими аппаратами для мокрой очистки газов и представляют собой башню 1 с разбрызгивающими устройствами 2, установленными по всей высоте башни. Запыленный газ движется через башню снизу вверх со скоростью 0,8–1,5 м/с, а капли жидкости, падая вниз со скоростью 0,6–1,2 м/с, взаимодействуют с ним. Промывная вода в виде суспензии выводится из аппарата через патрубок 3.

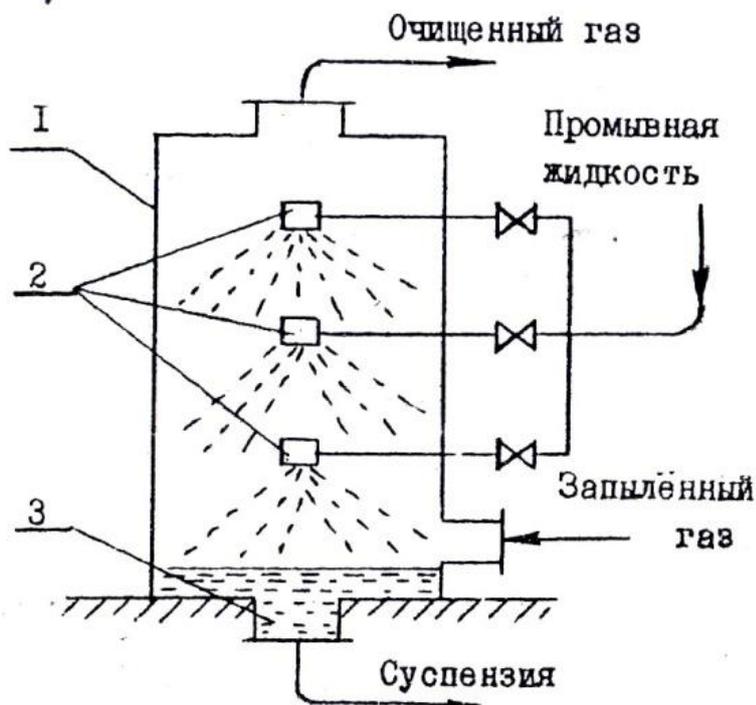


Рис. 2.29. Схема полого скруббера:  
1 – башня; 2 – разбрызгивающее устройство; 3 – патрубок

Практическое использование полых скрубберов показало, что разбрызгивающие устройства должны образовывать капли размером 0,8–1,0 мм.

Степень очистки зависит от многих факторов (диаметра твердых частиц, их концентрации в газовом потоке, и т. д.) и изменяется в пределах от 70 до 90 %. Удельный расход промывной жидкости зависит, прежде всего, от концентрации пыли и изменяется в пределах от 2 до 8 л/м<sup>3</sup>. Для уменьшения расходов на последующую очистку воды иногда часть ее можно подавать на циркуляцию. Гидравлическое сопротивление аппаратов невелико (150–200 Па).

Для повышения эффективности очистки используют насадочные скрубберы, в которых в нижнюю часть аппарата устанавливается опорная решетка; на решетке помещается насадка (разного типа – куски гравия, кольца Рашига и т. д.). Наличие насадки увеличивает поверхность контакта фаз, а следовательно, и эффективность очистки (см. подробно [6]). В аппаратах этого типа хорошо улавливаются частицы диаметром свыше 5 мкм.

*Центробежные скрубберы.* Эффективность очистки газов от частиц меньше 5 мкм может быть повышена за счет проведения мокрой очистки в поле действия центробежных сил (рис. 2.30).

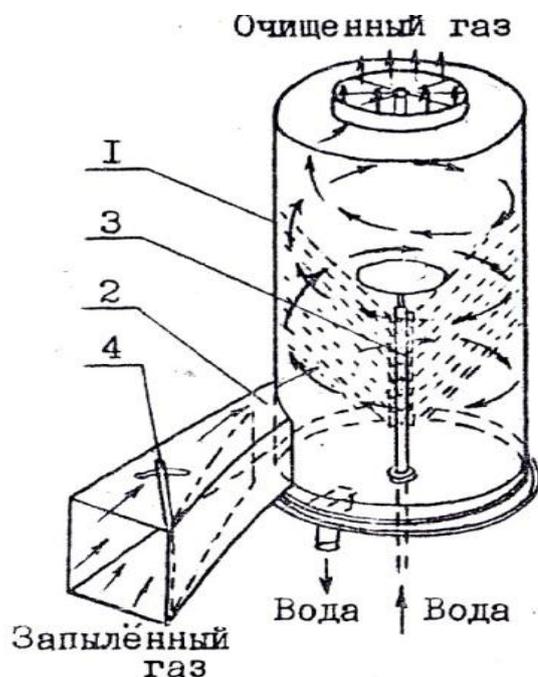


Рис. 2.30. Центробежный скруббер:  
1 – корпус; 2 – тангенциальный патрубок;  
3 – разбрызгивающее устройство; 4 – шибер

Запыленный газ со скоростью 15–60 м/с вводится в корпус 1 через тангенциально установленный патрубок 2. Внутри корпуса имеется разбрызгивающее устройство 3 (например, труба по оси корпуса с системой форсунок). Данные, имеющиеся в литературе, показывают, что оптимальный размер капель жидкости составляет около 100 мкм. Благодаря такому подводу газ при своем движении вверх совершает несколько оборотов вокруг оси камеры. При этом капли жидкости сталкиваются с твердыми частицами, укрупняются и под действием центробежной силы отбрасываются на стенки корпуса. Образующаяся суспензия в виде пленки стекает по стенкам аппарата на последующую обработку. Степень очистки в этих аппаратах для частиц диаметром 5–30 мкм превышает 95 %, а для частиц 2–5 мкм степень очистки доходит до 85–90 %.

*Скруббер Вентури* (струйный турбулентный газопромыватель). Скруббер Вентури (рис. 2.31) используется для улавливания частиц меньше 1 мкм [6]. Он представляет собой комбинацию центробежного скруббера и трубы Вентури. Запыленный газ поступает в конфузор 1, где ускоряется до 60–150 м/с.

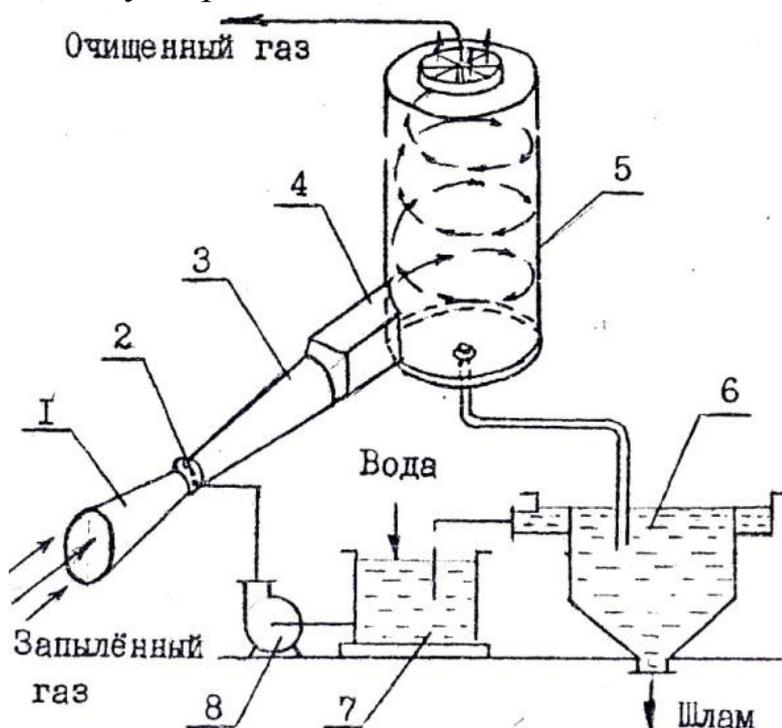


Рис. 2.31. Скруббер Вентури:  
 1 – конфузор; 2 – разбрызгиватель; 3 – диффузор; 4 – патрубок;  
 5 – корпус; 6 – отстойник; 7 – бак; 8 – насос

Промывная жидкость подается в аппарат через разбрызгиватель 2 и диспергируется высокоскоростным потоком газа.

При движении по диффузору 3 скорость потока снижается и он через тангенциальный патрубок 4 вводится в корпус 5. Здесь под действием центробежной силы капли жидкости с уловленными твердыми частицами отделяются от газа и поступают в отстойник 6. Из отстойника шлам отводится на дальнейшую переработку, а осветленная жидкость – в бак 7, откуда насосом 8 вновь подается в аппарат.

Большое влияние на работу скруббера оказывает конденсационный эффект. В зоне установки разбрызгивателя газ находится при пониженном давлении (скорость газа большая), следовательно, интенсивно идут процессы испарения жидкости и насыщения газа ее парами. При поступлении газа в корпус 5 давление увеличивается (скорость газа уменьшается), что приводит к конденсации паров жидкости, причем в качестве активных центров выступают твердые частицы. Частицы увеличиваются в размерах, агломерируют, что улучшает процесс их выделения из потока. Степень очистки для частиц до 0,5 мкм достигает 70 %, а более крупных – свыше 95 %.

По сравнению с другими аппаратами для мокрой очистки скруббер Вентури характеризуется не только высокой степенью очистки, но и расходом энергии.

*Барботажные (пенные) скрубберы.* Барботажный скруббер используется для очистки сильно запыленных газов (рис. 2.32). В этом аппарате поверхность контакта фаз вместо капельного разбрызгивания обеспечивается созданием слоя пены, в которой и осуществляется процесс очистки.

Корпус 1 скруббера разделен на две части перфорированной тарелкой 2. Промывная жидкость через штуцер 3 подается на тарелку 2, а запыленный газ входит через патрубок 5. Газ, проходя через слой жидкости, вспенивает ее, что обеспечивает большую поверхность контакта жидкости с газом, а следовательно, и относительно высокую степень очистки.

Основная часть (80 %) образующейся суспензии сливается через регулируемый порог 4, а 20 % суспензии сливается под тарелку через ее отверстия и отводится через патрубок 6.

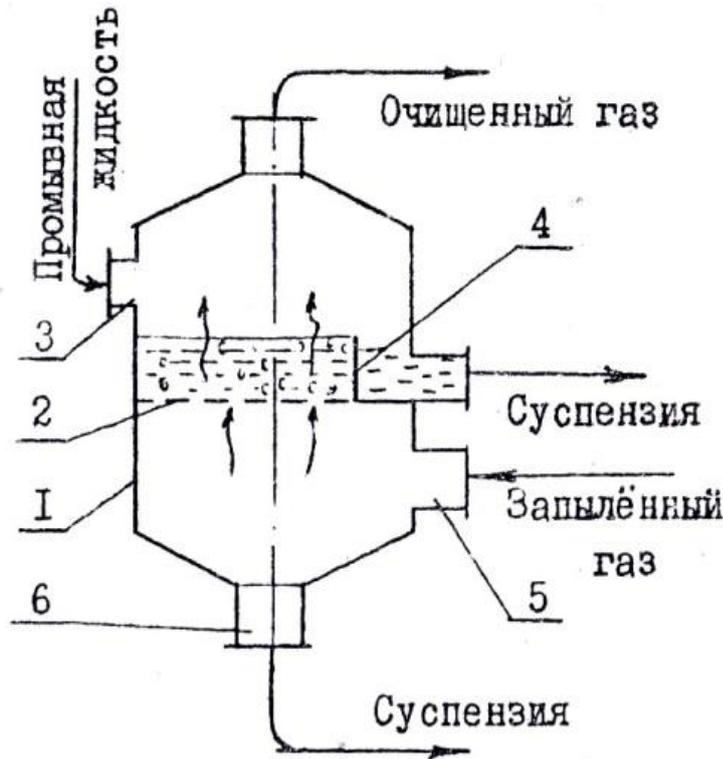


Рис. 2.32. Барботажный скруббер:

1 – корпус; 2 – перфорированная тарелка; 3 – штуцер; 4 – регулируемый порог;  
5 – патрубок; 6 – патрубок для слива суспензии

Степень очистки для частиц свыше 10 мкм может быть доведена до 95–99 %, а для частиц меньшего диаметра степень очистки ниже. Расход промывной жидкости составляет 0,1–0,3 л/м<sup>3</sup>. Высота слоя пены изменяется в диапазоне 60–200 мм. В целях повышения степени очистки в аппарате можно устанавливать последовательно несколько тарелок.

## 2.7. Осаждение под действием электрического поля

Если взвешенные в газе твердые или жидкие частицы невозможно выделить из потока другими способами, применяется осаждение в поле действия электрических сил. В этом случае частицам небольших размеров ( $d \gg 0,005$  мкм) удастся сообщить значительный электрический заряд, что обеспечивает высокую степень очистки  $\eta = 95 \div 99$  % [4]. Питание электрофильтров осуществляется постоянным электрическим током высокого напряжения ( $U = 35 \div 75$  кВ).

Физическая сущность процесса электроосаждения заключается в том, что газовый поток, содержащий взвешенные частицы, ионизируется самостоятельным электрическим разрядом, при этом выделяемые частицы приобретают электрический заряд. При прохождении ионизированного газового потока в электрическом поле между двумя электродами выделяемые частицы, заряженные отрицательно, перемещаются к положительно заряженному электроду (аноду) и оседают на нем.

Для исключения ионизации всего газа между электродами (пробой промежутка и короткое замыкание) конструкция электрофильтров должна обеспечивать создание неоднородного электрического поля, когда коронный разряд или свечение слоя газа происходит только вблизи отрицательного электрода (катода). При этом остальная часть межэлектродного пространства остается изолятором. Такая неоднородность электрического поля достигается тем, что катод выполняется в виде стержней диаметром около 10 мм (рис. 2.33 и 2.34).

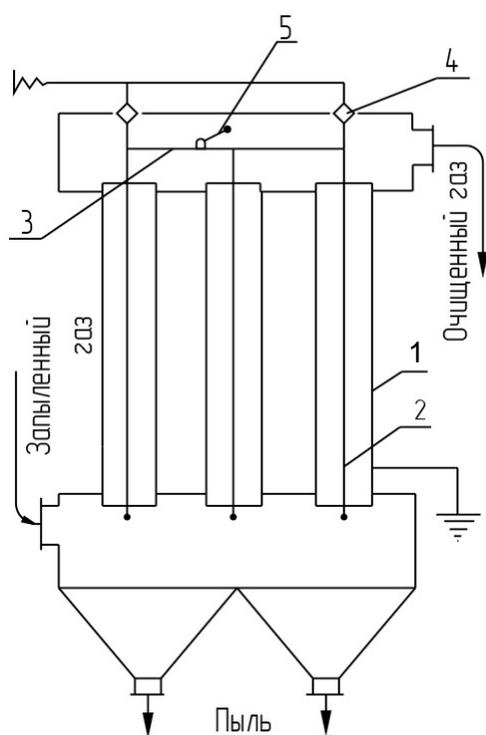


Рис. 2.33. Трубчатый электрофильтр:  
1 – осадительный электрод (трубчатый); 2 – коронирующий электрод; 3 – рама; 4 – изоляторы; 5 – встряхивающее приспособление

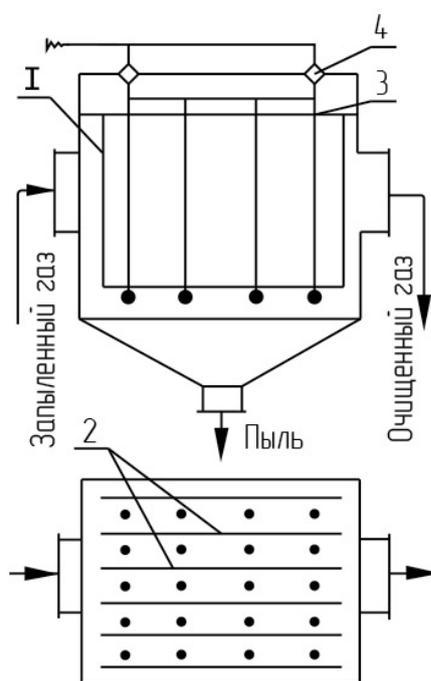


Рис. 2.34. Пластинчатый электрофильтр:  
1 – коронирующий электрод; 2 – осадительные (пластинчатые) электроды; 3 – рама; 4 – изоляторы

В зависимости от формы анода электрофильтры делятся на пластинчатые и трубчатые.

Запыленный газ (см. рис. 2.33) поступает в нижнюю часть аппарата и распределяется по трубчатым электродам 1 (аноды), внутри которых расположены коронирующие электроды 2 (катоды) в виде стержней. Катоды подвешены на общей раме 3, которая опирается на изоляторы 4. Твердые частицы, которые осаждаются на аноде, периодически стряхиваются ударным приспособлением 5 и удаляются из нижней части аппарата.

Аналогично трубчатому электрофильтру работает пластинчатый электрофильтр (см. рис. 2.34). В этом аппарате катодами 1 также являются стержни, а анод выполнен из металлической сетки в виде пластин 2.

## 2.8. Очистка газов в псевдооживленном слое

### 2.8.1. Сущность принципа псевдооживления

В настоящее время для интенсификации процессов тепло- и массообмена, процессов смешения, агломерации и других в различных отраслях промышленности используют аппараты с псевдооживленным слоем (ПС) зернистого материала (взвешенный, кипящий слой). В последнее время аппараты с псевдооживленным слоем начали использоваться и для очистки газов.

Если через неподвижный слой материала, лежащего на решетке, пропускать снизу вверх поток оживающего агента (рис. 2.35) (жидкость или газ), то состояние слоя будет определяться скоростью потока

$$w = V / f_a,$$

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

При скоростях потока ниже критической  $w_{\text{кр}}^I$  (скорость начала псевдооживления) слой остается неподвижным (НС) и оживающий агент движется через слой в режиме фильтрации. При достижении  $w_{\text{кр}}^I$  слой становится псевдооживленным, при этом твердые части-

цы в нем начинают перемещаться. Дальнейшее увеличение скорости приводит к увеличению высоты слоя  $H$  (слой расширяется). При достижении второй критической скорости  $w_{кр}^{II}$  (скорость уноса) слой разрушается, а частицы в режиме пневмотранспорта уносятся из аппарата.

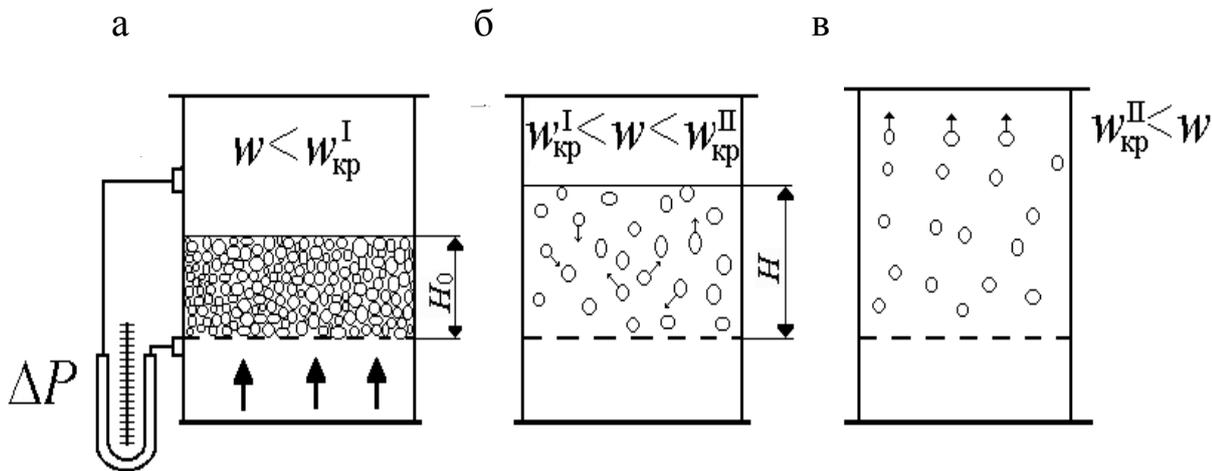


Рис. 2.35. Изменение структуры слоя в зависимости от скорости ожидающего агента:  
 а – неподвижный слой; б – псевдоожиженный слой;  
 в – унос частиц из аппарата

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

$$\varepsilon = \frac{V_{п}}{V_{сл}} = \frac{V_{сл} - V_{т}}{V_{сл}} = 1 - \frac{V_{т}}{V_{сл}},$$

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

Если считать, что  $V_{т}$  в ПС остается постоянным, то

$$\varepsilon = 1 - \frac{f_a H_0 (1 - \varepsilon_0)}{f_a H} = 1 - (1 - \varepsilon_0) \frac{H_0}{H}, \quad (2.32)$$

откуда

$$H = \frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon)} H_0,$$

где  $\varepsilon_0$  – порозность неподвижного слоя зернистого материала;  $H_0$  – высота неподвижного слоя.

На рис. 2.36 показаны типичные результаты изменения гидравлического сопротивления слоя  $\Delta P$  и высоты  $H$ , а также результаты расчета  $\varepsilon$  по формуле (2.32).

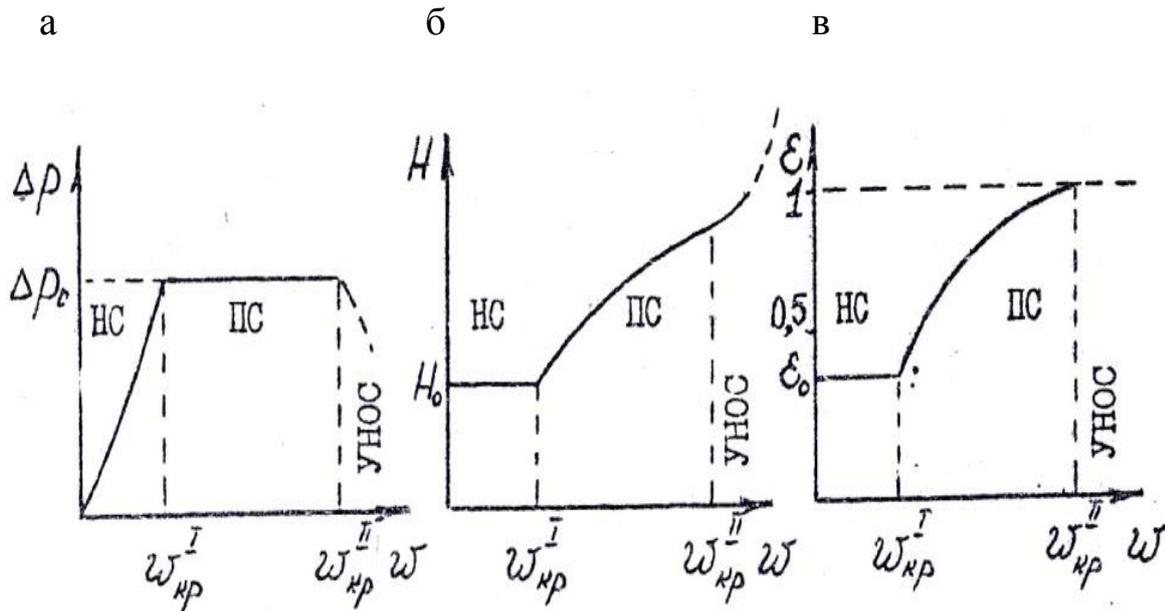


Рис. 2.36. Зависимости:  
а –  $\Delta P = f(w)$ ; б –  $H = f(w)$ ; в –  $\varepsilon = f(w)$

В момент начала псевдооживления вес зернистого материала, приходящийся на единицу площади поперечного сечения аппарата, уравновешивается силой гидравлического сопротивления слоя:

$$\Delta P_c = \frac{G_c}{f_a}, \quad (2.33)$$

где  $G_c$  – вес материала в слое, Н.

С учетом архимедовых сил (2.33) можно представить в виде

$$\Delta P_c = g H_0 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) (1 - \varepsilon_0). \quad (2.34)$$

Так как сопротивление ПС остается постоянным, то его можно определить из формулы

$$\Delta P_c = g H_0 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) (1 - \varepsilon_0) = g H (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) (1 - \varepsilon). \quad (2.35)$$

Если ожижающим агентом является воздух, то  $\rho_{\text{ч}} \gg \rho_{\text{с}}$ , следовательно, формулу (2.35) можно записать так:

$$\Delta P = g H \rho (1 - \varepsilon).$$

### 2.8.2. Расчет критических скоростей $w_{\text{кр}}^{\text{I}}$ и $w_{\text{кр}}^{\text{II}}$

*Расчет с использованием зависимости  $Ly = f(\text{Ar}, \varepsilon)$*

Зависимость  $Ly = f(\text{Ar}, \varepsilon)$  для ПС построена по экспериментальным данным (рис. 2.37) (подробно см. [3]). По значениям  $d$ ,  $\rho_{\text{ч}}$ ,  $\rho_{\text{с}}$ ,  $\mu$  рассчитывают критерий Архимеда [см. формулу (2.8)] и по графику (см. рис. 2.37) находят  $Ly_{\text{кр}}^{\text{I}}$  и  $Ly_{\text{кр}}^{\text{II}}$ , откуда определяют  $w_{\text{кр}}^{\text{I}}$  и  $w_{\text{кр}}^{\text{II}}$ . Например,

$$w_{\text{кр}}^{\text{I}} = \left( Ly_{\text{кр}}^{\text{I}} \frac{\mu (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) g}{\rho_0^2} \right)^{1/3}.$$

Аналогично определяют скорость ожижающего агента, обеспечивающего заданное расширение слоя ( $\varepsilon_i$ ).

*Расчет с использованием формулы О.М. Тодеса [7]*

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar} \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{\text{Ar} \varepsilon^{4,75}}}.$$

Если сюда подставить  $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0,4$ , что характерно для неподвижного слоя округлых частиц, то получим формулу для расчета скорости начала псевдоожижения:

$$\text{Re}_{\text{кр}}^{\text{I}} = \frac{\text{Ar}}{1400 + 5,22\sqrt{\text{Ar}}};$$

$$\text{Re}_{\text{кр}}^{\text{I}} = \frac{w_{\text{кр}}^{\text{I}} d_{\text{ч}} \rho_{\text{с}}}{\mu}.$$

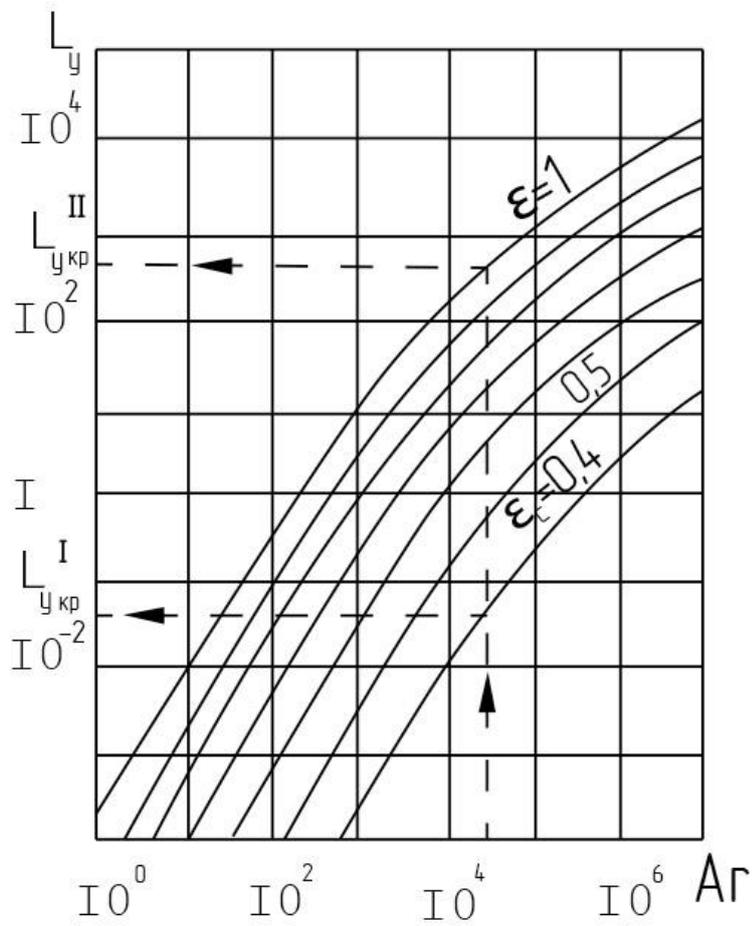


Рис. 2.37. Зависимость  $L_y = f(Ar)$  для ПС

Аналогично, если подставить  $\epsilon = 1$ , то получим формулу для расчета скорости уноса:

$$\text{Re}_{\text{кр}}^{\text{II}} = \frac{\text{Ar}}{18 + 0,61\sqrt{\text{Ar}}};$$

$$\text{Re}_{\text{кр}}^{\text{II}} = \frac{w_{\text{кр}}^{\text{II}} d_{\text{ч}} \rho_{\text{с}}}{\mu}.$$

Для частиц неправильной формы вместо  $d_{\text{ч}}$  используется эквивалентный диаметр  $d_{\text{э}}$ , а полученные значения скоростей умножаются на фактор формы.

### 2.8.3. Пример использования аппаратов с псевдооживленным слоем для очистки газов

Аппараты с псевдооживленным слоем можно применять для очистки газа от пыли и тумана, поскольку движение псевдооживленных частиц способствует турбулизации газового потока, а это приводит к интенсификации процессов агломерации и столкновения дисперсных частиц, находящихся в газе, с частицами слоя (насадки). В качестве насадки можно использовать, например, полые пластмассовые шарики.

Запыленный газ (рис. 2.38) поступает по патрубку в нижнюю часть корпуса 1. На газораспределительной решетке 2 находится слой насадки 3, которая псевдооживляется за счет восходящего движения газа. Высота псевдооживленного слоя ограничивается верхней решеткой 4.

С помощью системы распылителей жидкость подается в аппарат и распределяется по поверхности насадки. Дисперсные частицы, находящиеся в газе, за счет сил поверхностного натяжения связываются жидкостью, находящейся на поверхности насадки. Жидкость вместе с дисперсными частицами непрерывно стекает под газораспределительную решетку и отводится из нижней части корпуса аппарата. Расстояние между решетками выбирается обычно в 2–5 раз больше, чем высота неподвижного слоя насадки.

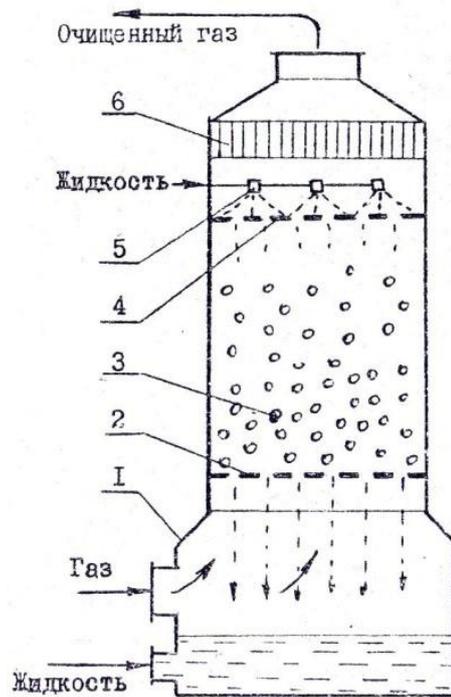


Рис. 2.38. Аппарат с псевдооживленным слоем для очистки газа:  
1 – корпус; 2 – газораспределительная решетка; 3 – насадка;  
4 – решетка; 5 – распылители жидкости; 6 – каплеотделитель

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кук Г.А.** Процессы и аппараты молочной промышленности. – М.: Пищ. пром-сть, 1973. – 766 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств / В.Н. Стабников, В.Д. Попов, В.М. Лысянский, Ф.А. Редько. – М.: Пищ. пром-сть, 1976. – 662 с.
3. **Плановский А.Н., Николаев П.И.** Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1972. – 492 с.
4. **Гельперин Н.И.** Основные процессы и аппараты химической технологии. Т. I. – М.: Химия, 1981. – 383 с.
5. **Дытнерский Ю.И.** Обратный осмос и ультрафильтрация. – М.: Химия, 1978. – 351 с.
6. **Страус З.** Промышленная очистка газов / Пер. с англ. – М.: Химия, 1981. – 614 с.
7. **Тодес О.М., Цитович О.Б.** Аппараты с кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1981.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	3
1.1. Классификация основных процессов .....	3
1.2. Общие принципы расчета аппаратов .....	6
2. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ .....	8
2.1. Классификация неоднородных систем .....	8
2.2. Осаждение в гравитационном поле (отстаивание) .....	10
2.3. Разделение гетерогенных систем в поле действия центробежных сил .....	21
2.4. Фильтрация .....	35
2.5. Мембранные методы разделения жидких систем .....	47
2.6. Мокрая очистка газов .....	51
2.7. Осаждение под действием электрического поля .....	56
2.8. Очистка газов в псевдооживленном слое .....	58
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	65

Новосёлов Александр Геннадьевич  
Гуляева Юлия Николаевна  
Дужий Алексей Борисович

# **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

## **Часть 1**

### **Гидромеханические процессы разделения**

#### **Учебно-методическое пособие**

*Ответственный редактор*  
Т.Г. Смирнова

*Титульный редактор*  
Е.О. Трусова

*Компьютерная верстка*  
Н.В. Гуральник

*Дизайн обложки*  
Н.А. Потехина

*Печатается  
в авторской редакции*

П

---

одписано в печать 26.08.2016. Формат 60×84 1/16  
Усл. печ. л. 3,96. Печ. л. 4,25. Уч.-изд. л. 4,0  
Тираж 50 экз. Заказ № С 39

---

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9