

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов

**ПРОЦЕССЫ РАЗДЕЛЕНИЯ**

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ  
по процессам и аппаратам пищевых производств  
для студентов направления (специальности)  
655800 (260600) (260601 (170600))

Курган 2005

Кафедра: "Теоретическая механика и сопротивление материалов"

Дисциплина "Процессы и аппараты пищевых производств"  
(направление 655800 (260600), специальность 260601  
(170600))

Составил доцент, канд. техн. наук Тютрин С.Г.

Утверждены на заседании кафедры 30 сентября 2004 г.

Рекомендованы методическим советом  
университета

" \_ " \_\_\_\_\_ 2005 г.

# 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ ОТСТАИВАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ

## Цель работы

1. Ознакомиться с основными положениями теории осаждения частиц.
2. Определить константы критериального уравнения отстаивания и коэффициент сопротивления среды для пластинчатых квадратных частиц.

**Применяемые материалы и оборудование:** стеклянный цилиндр с водой, секундомер, термометр, линейка, пинцет, набор пластинок из фольги.

## Основные теоретические положения

В пищевых производствах часто образуются неоднородные системы, которые необходимо разделить на фазы. Одним из методов разделения неоднородных систем является отстаивание под действием силы тяжести. Именно этим методом пользуются, например, при мойке корнеплодов (свеклы, картофеля и т.п.), когда необходимо отделить (очистить) дисперсионную среду (жидкость) от частиц дисперсной фазы (грязи). Этот же метод применяют в домашнем хозяйстве для получения сливок.

Для математического описания процесса отстаивания обычно применяют критериальные уравнения, что позволяет широко использовать закон подобия Рейнольдса [4] и, тем самым, распространять полученные опытные результаты на частицы других размеров и материалов, а также на другие среды.

Если поместить частицу в жидкую среду, то на нее будут действовать сила тяжести  $G$ , равная весу частицы, и силы гидростатического давления среды. Равнодействующая сил гидростатического давления направлена вверх и обычно называется подъемной (выталкивающей, архимедовой) силой  $A$ .

Сила тяжести  $G$  направлена к центру Земли. Эту силу определяют по формуле

$$G = gV\rho, \quad (1)$$

где  $V$  – объем частицы;

$\rho$  – плотность частицы;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Подъемная сила равна весу жидкости, вытесненной телом:

$$A = \rho_c V G, \quad (2)$$

где  $\rho_c$  – плотность среды, в которой находится частица.

Если плотность частицы меньше плотности среды, то подъемная сила будет больше силы тяжести частицы. В этом случае равнодействующая сил направлена вверх, поэтому частица будет перемещаться вверх – всплывать. Если же плотность частицы больше плотности среды, то частица будет перемещаться вниз – осаждаться.

При движении частицы возникает со стороны среды сила сопротивления  $R$ , которая приложена к частице и направлена в сторону, противоположную движению. Величина этой силы пропорциональна скорости движения частицы и зависит от формы и размеров частицы и физических свойств среды.

Сила сопротивления  $R$  возникает в основном в результате трех причин: лобового давления среды на частицу, трения поверхности о среду, появления некоторого разряжения за частицей, приводящего к возникновению вихрей:

$$R = R_d + R_{тр} + R_p, \quad (3)$$

где  $R_d$  – сила динамического сопротивления (сила лобового давления);

$R_{тр}$  – сила трения;

$R_p$  – сила сопротивления, образующаяся за счет разряжения за частицей.

Силу трения и, особенно, силу сопротивления за счет разряжения определить очень сложно, так как на величины этих сил влияют очень много факторов: свойства среды, форма частицы, размеры частицы, скорость движения и др. Поэтому обычно силу сопротивления среды определяют через динамическую силу, умноженную на поправочный коэффициент, учитывающий влияние силы трения и разряжения за частицей:

$$R = \zeta R_d, \quad (4)$$

где  $\zeta$  – коэффициент сопротивления.

Сила динамического сопротивления появляется в результате того, что движущаяся частица вытесняет перед собой часть среды, сообщая ей энергию, при этом скорость вытесняемой среды увеличивается от некоторой начальной величины до конечной, равной скорости движения частицы. За некоторый промежуток времени частица пройдет путь  $H$ , вытесняя столбик среды длиной  $H$  и сечением, равным сечению частицы. При этом скорость столбика среды увеличивается от начального значения до скорости частицы.

Из теоретической механики известно, что изменение кинетической энергии равно работе действующей силы. Этот закон применим для вытесненного столба жидкости, считая, что начальная скорость среды в вертикальном направлении равна нулю:

$$\frac{mU^2}{2} = R_d H ,$$

где  $m$  – масса вытесненного столба среды;

$U$  – конечная скорость вытесняемой среды (равная скорости осаждения частицы);

$R_d$  – сила динамического сопротивления;

$H$  – путь, пройденный частицей.

Массу вытесненной среды определим по формуле

$$m = \rho_c S H , \tag{6}$$

где  $\rho_c$  – плотность среды;

$S$  – площадь поперечного сечения столбика среды, равная площади сечения частицы;

$H$  – длина столбика среды.

Из формул (5) и (6) получаем:

$$R_d = \rho_c S \frac{U^2}{2} .$$

В итоге выражение (4) для определения общей силы сопротивления примет вид:

$$R = \zeta \rho_c S \frac{U^2}{2} .$$

Для частиц в виде квадратных пластин (рис. 1) формула для определения силы сопротивления среды будет иметь вид:

$$R = \zeta \rho_c C^2 \frac{U^2}{2} .$$

Коэффициент сопротивления  $\zeta$  с достаточно высокой точностью может быть представлен в виде

$$\zeta = \frac{B}{Re^z},$$

где  $B, z$  – коэффициенты, определяемые из опытных данных (значения их меняются в зависимости от скорости осаждения);

$Re$  - критерий Рейнольдса.

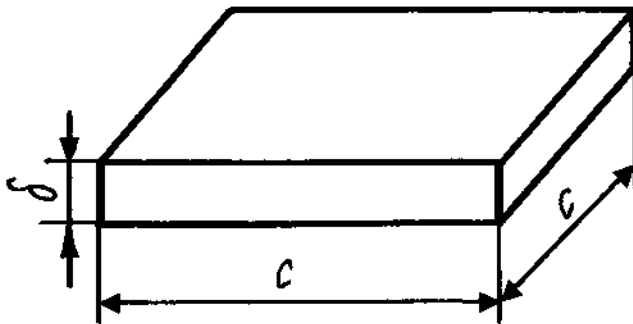


Рис. 1. Вид исследуемых частиц

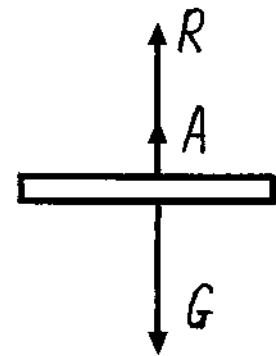


Рис. 2. Силы, действующие на частицу

Для случая обтекания пластины квадратного сечения критерий Рейнольдса имеет следующее выражение:

$$Re = \frac{v C \rho_c}{\mu_c},$$

где  $v$  – скорость обтекания (равна скорости осаждения частицы);

$c$  – сторона квадратного сечения частицы (ее характерный размер);

$\mu_c$  – коэффициент динамической вязкости среды.

Средние значения коэффициента сопротивления приведены в таблице 1. Отметим, что все изложенное выше справедливо и при движении тела в газообразной среде.

Таблица 1

Коэффициент сопротивления  $\zeta$  [4]

Тонкая плоская пластина, перпендикулярная потоку	1,11
Открытая полусфера, отверстие обращено навстречу потоку	1,33
Открытая полусфера, отверстие обращено по потоку	0,35
Шар	0,1...0,4
Тело обтекаемой формы	0,05
Автомобиль	$\approx 0,4$

Определение скорости осаждения частицы также производится с помощью критериальных уравнений, позволяющих получать результаты в широком диапазоне параметров при условии равенства критериев Рейнольдса.

Частица, помещенная в среду, сначала движется ускоренно, но с увеличением скорости движения возрастает сопротивление среды, что приводит к уменьшению равнодействующей силы, приложенной к частице. Обычно период ускоренного движения мал. И с некоторого момента времени равнодействующая сил станет равной нулю, а частица будет двигаться равномерно с постоянной скоростью, равной максимальной. Для этого случая уравнение равновесия примет вид (рис. 2):

$$G = A + R, \quad (12)$$

где  $G$  – сила тяжести;

$A$  – подъемная сила;

$R$  – сила сопротивления.

Для квадратной пластины:

$$G = \delta c^2 \rho g; \quad A = \delta c^2 \rho_c g; \quad R = \zeta \rho_c c^2 v^2 / 2,$$

и уравнение равновесия (12) примет вид:

$$\delta c^2 g (\rho - \rho_c) = \zeta \rho_c c^2 v^2 / 2. \quad (13)$$

Для исключения скорости из выражения (13) разделим его на

$$\text{Re}^2 = \left( \frac{v c \rho_c}{\mu_c} \right)^2.$$

Получаем:

$$\frac{\delta c^2 g (\rho - \rho_c)}{Re^2} = \frac{\zeta \mu_c^2}{2 \rho_c},$$

откуда

$$Re^2 = \frac{2 \delta c^2 g (\rho - \rho_c) \rho_c}{\zeta \mu_c^2},$$

или, в окончательном виде,

$$Re^2 = \frac{2}{\zeta} \psi \cdot Ar.$$

Здесь

$$Ar = c^3 g (\rho - \rho_c) \rho_c / \mu_c^2 - \quad (15)$$

критерий Архимеда (зависит от характерного размера частицы, ее материала, свойств среды, но не зависит от скорости);

$\psi = \delta / c$  – коэффициент формы квадратной частицы.

Уравнение (14) является критериальным уравнением для осаждающихся частиц. Решение этого уравнения осложняется тем, что коэффициент сопротивления  $\zeta$  также зависит от критерия Рейнольдса. Но именно поэтому коэффициент  $\zeta$  можно исключить и записать критериальное уравнение в следующем виде:

$$Re = k (\psi Ar)^m, \quad (16)$$

где  $k, m$  – константы отстаивания (определяются экспериментально).

Уравнение (16) позволяет по физическим характеристикам среды и частицы (т.е. по критерию Архимеда) определить критерий Рейнольдса, по величине которого (11) можно определить скорость осаждения частицы, а из уравнения (14) найти величину коэффициента сопротивления  $\zeta$ .

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 3. Она состоит из прозрачного цилиндра 1, заполненного водой. На цилиндре имеются метки 2, ограничивающие длину  $H$  контрольного участка. Верхняя метка расположена на некотором расстоянии от поверхности воды с тем, чтобы к началу контрольного участка движение частицы стало равномерным.



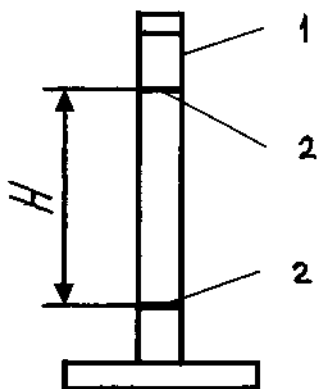


Рис. 3. Схема лабораторной установки

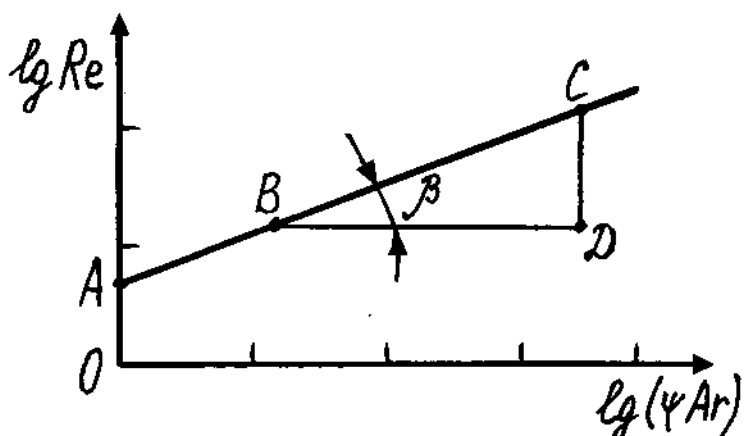


Рис. 4. График зависимости  $lg Re = f( lg \psi Ar)$

### Порядок выполнения работы

1. Измерить температуру воды в цилиндре. По таблицам 3 и 4 определить ее плотность и вязкость. Замерить длину  $H$  контрольного участка цилиндра.

2. Пинцетом взять обезжиренную алюминиевую пластинку, записать ее размеры, плотность, погрузить в воду, стряхнуть с пластинки возможные воздушные пузырьки и отпустить ее. Наблюдать за осаждением пластинки и замерить время прохождения ею контрольного участка (при помощи секундомера или по часам с секундной стрелкой). Результат испытания занести в таблицу 2.

Испытание провести для трех-пяти разных пластин, повторяя их по 2-3 раза для каждого типоразмера.

3. Для определения констант отстаивания  $k$  и  $m$  уравнение (16) логарифмируют (таблица 5) и приводят к виду:

$$lg Re = lg k + m lg (\psi Ar). \quad (17)$$

По полученным результатам строят график (рис. 4), из которого определяют  $k$  и  $m$ :

$$m = tg \beta = \frac{CD}{BD}; \quad (18)$$

$$lg k = OA, \quad \text{откуда} \quad k = 10^{OA}. \quad (19)$$

## Контрольные вопросы

1. За счет какой силы осуществляется отстаивание ?
2. В каком случае частица будет подниматься вверх (вниз) ?
3. Когда невозможно разделить неоднородную систему отстаиванием ?
4. Почему считают, что осаждение частицы происходит с постоянной скоростью ?
5. На каком основании применяется уравнение равновесия для осаждающейся частицы ?
6. Зачем уравнения, описывающие процесс осаждения, приводят к критериальному виду ?
7. Влияние каких факторов учитывает коэффициент сопротивления  $\zeta$  ?
8. Приведите пример применения процесса осаждения.

## Отчет о работе

1. Название и цель работы.
2. Схема установки и эскиз пластинки (рисунки 3 и 1).
3. Длина участка осаждения  $H = \underline{\hspace{2cm}}$
4. Температура воды  $t = \underline{\hspace{2cm}}$   
 Плотность воды (таблица 3)  $\rho_c = \underline{\hspace{2cm}}$   
 Динамическая вязкость воды (таблица 4)  $\mu_c = \underline{\hspace{2cm}}$   
 Плотность пластинки (для алюминия  $\rho = 2710 \text{ кг/м}^3$ )  $\underline{\hspace{2cm}}$

Таблица 2

Результаты опыта

№	$\delta$ , мм	$c$ , мм	$\psi$	$\tau$ , с	$v=H/\tau$ , м/с	$\psi Ar$ (15)	lg( $\psi Ar$ )	Re (11)	lg (Re)	$\zeta$ (20)

5. График зависимости  $lg Re = f(lg \psi Ar)$  (рис. 4) и расчеты констант отстаивания  $k$ ,  $m$  по формулам (18) и (19).
6. Расчеты значений коэффициента сопротивления (из выражения (14)):

$$\zeta = \frac{2\psi Ar}{Re^2}. \quad (20)$$

Таблица 3

Плотность дистиллированной воды  $\rho_c$  (кг/м<sup>3</sup>) [4]

t, °C	$\rho_c$	t, °C	$\rho_c$	t, °C	$\rho_c$
1	999,900	11	999,606	21	997,994
2	999,941	12	999,498	22	997,772
3	999,965	13	999,377	23	997,540
4	999,973	14	999,244	24	997,299
5	999,965	15	999,099	25	997,047
6	999,941	16	998,943	26	996,785
7	999,902	17	998,775	27	996,515
8	999,849	18	998,596	28	996,235
9	999,782	19	998,406	29	995,946
10	999,701	20	998,205	30	995,649

Таблица 4

Динамическая вязкость воды  $\mu_c$  (мкПа·с) [3]

t, °C	0	5	10	15	20	25	30
$\mu_c$	1797	1518	1307	1140	1004	895	803

Таблица 5

Основные свойства логарифмов [1]

$\log_a N = A$	$a^A = N$
$\log (N_1 \cdot N_2) = \log N_1 + \log N_2$	$\log N_1 / N_2 = \log N_1 - \log N_2$
$\log (N^n) = n \cdot \log N$	$\log \sqrt[n]{N} = \frac{1}{n} \log N$

## Список литературы

- 1.Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов.- М.: Физматгиз, 1962.- 608 с.
- 2.Кавецкий Г.Д., Васильев Б.В. Процессы и аппараты пищевой технологии.- М.: Колос, 2000.- 551 с.
- 3.Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике.- М.: Наука, 1980.- 208 с.
- 4.Кухлинг Х. Справочник по физике/Пер. с нем.- М.: Мир, 1982.- 520 с.
- 5.Лабораторный практикум по процессам и аппаратам пищевых производств/ Под ред. С.М.Гребенюка.- М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981.- 151 с.

## 2. ФИЛЬТРОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Цель работы

1. Ознакомиться с сущностью, назначением и разновидностями процесса фильтрации в пищевом производстве.

2. Изучить устройство и принцип действия основных видов фильтров и фильтровальных машин, применяемых в пищевом производстве.

3. Опытным путем получить зависимость объема фильтрата от продолжительности фильтрации.

**Применяемые материалы и оборудование:** лабораторная установка "Микрофильтр" с вакуумным насосом, меловая суспензия (1 л), вода (2 л).

### Основные теоретические положения

*Фильтрацией* называется процесс разделения суспензий, пылей и туманов при помощи пористой перегородки, способной пропускать жидкость или газ, но задерживать взвешенные в них частицы. Такую перегородку называют фильтровальной перегородкой. А движение самой жидкости или газа сквозь пористую среду называют *фильтрацией*.

В качестве фильтрующих материалов применяют зернистые материалы (песок, гравий), ткани, картон, сетки, пористые полимерные материалы, керамику и др.

По целевому назначению процесс фильтрации может быть *очистным* (когда требуется очистить фильтрат: осветление вина, пива) или *продуктивным* (когда требуется выделить осадок: производство дрожжей).

В зависимости от вида фильтровальной перегородки и свойств самой суспензии фильтрация может происходить: 1) с образованием осадка на поверхности перегородки; 2) с закупориванием пор фильтрующих перегородок; 3) и с тем и с другим явлениями одновременно.

*Фильтрация с образованием осадка на поверхности фильтрующей перегородки* имеет место, когда диаметр твердых частиц больше диаметра пор перегородки (рис. 5). Этот способ также осуществляется при больших концентрациях твердой фазы в суспензии и при больших скоростях осаждения: твердые частицы образуют своды над входами в поры фильтровальной перегородки (рис. 6).

*Фильтрация с закупориванием пор* происходит, когда твердые частицы проникают в поры фильтровальной перегородки. Закупоривание пор твердыми частицами наблюдается уже в начальный период процесса фильтрации, что снижает производительность фильтра.

Для поддержания производительности процесса на должном уровне проводят *регенерацию* фильтра: его промывают обратным током жидкости. Также для повышения скорости фильтрации (для предотвращения закупор-

ривания) на перегородку наносят слой вспомогательного вещества: тонкодисперсные угли, перлит, асбест, кизельгур, фиброфлом и др.

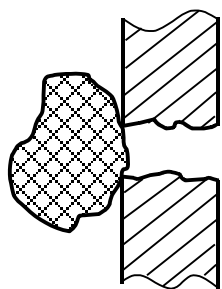


Рис. 5. Образование осадка большой частицей

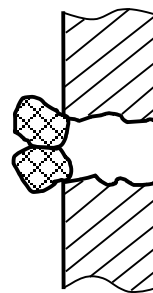


Рис. 6. Образование осадка малыми частицами

*Движущей силой* процесса фильтрования является разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки. Разность давлений можно получить или созданием избыточного давления над фильтровальной перегородкой, или подсоединением пространства под фильтровальной перегородкой к вакуумной линии.

Для расчетов процесса фильтрования и фильтров необходимо знать зависимость объема  $V$  получаемого фильтрата от площади  $F$  фильтровальной перегородки и продолжительности фильтрования  $\tau$ . Эта связь устанавливается *основным уравнением процесса фильтрования*, которое составляется для единичной площади фильтровальной перегородки и имеет следующий вид:

$$V^2 + 2V_1V = 2K\tau, \quad (21)$$

где  $V_1$  и  $K$  – постоянные фильтрования.

Постоянная фильтрования  $V_1$  характеризует гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки. А постоянная  $K$  зависит от режима фильтрования и физико-химических свойств осадка.

Постоянные фильтрования определяются экспериментально при помощи так называемых микрофильтров (элементов фильтра). И только после проведения опытов на микрофильтрах конструируют и рассчитывают фильтры требуемой производительности и степени очистки.

Фильтры, используемые для разделения суспензий, работают как под вакуумом, так и под избыточным давлением. К фильтрам, работающим под давлением, предъявляют повышенные требования к механической прочности. Их изготавливают согласно нормам Гостехнадзора, а если фильтр предназначен для работы при избыточном давлении более 0,7 атм, то он должен быть зарегистрирован и поставлен на учет в местном представительстве Гостехнадзора.

Фильтры бывают периодического и непрерывного действия. В фильтрах периодического действия осадок удаляют после прекращения процесса фильтрования, в фильтрах непрерывного действия – по мере необходимости без остановки процесса.

*Нутч-фильтр* – аппарат периодического действия, он работает как под вакуумом, так и под избыточным давлением. Нутч-фильтр (рис. 7) состоит из камеры 1, в которую через верхний патрубок подают суспензию. Осадок образуется на фильтровальной перегородке 2, фильтрат выводится через нижний патрубок. Удаление осадка с фильтровальной перегородки 2 производится по окончании фильтрования. Для этого имеется однолопастная мешалка 3, которая, вращаясь, вытесняет осадок через боковой патрубок камеры 1.

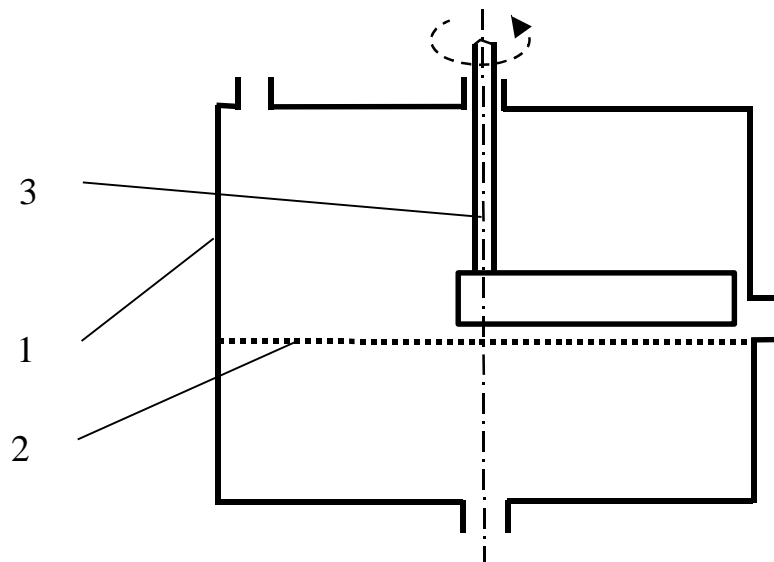


Рис. 7. Нутч-фильтр

*Рамный фильтр-пресс* (рис. 8) представляет собой сборную конструкцию, в которой чередуются рамка 1, фильтровальная перегородка, плита 2, фильтровальная перегородка, затем снова рамка 1 и т.д. Все это монтируется на станине 3 и зажимается винтами 4 через боковые отверстия плит и рам. В процессе фильтрования суспензия подается под давлением через каналы (они условно показаны белыми кружками в верхней части рам и плит) в полости всех рам 1 одновременно. Осадок отлагается на фильтровальных перегородках, а фильтрат попадает в каналы плит 2 и выводится. Для регенерации фильтровальной ткани используют промывную жидкость:

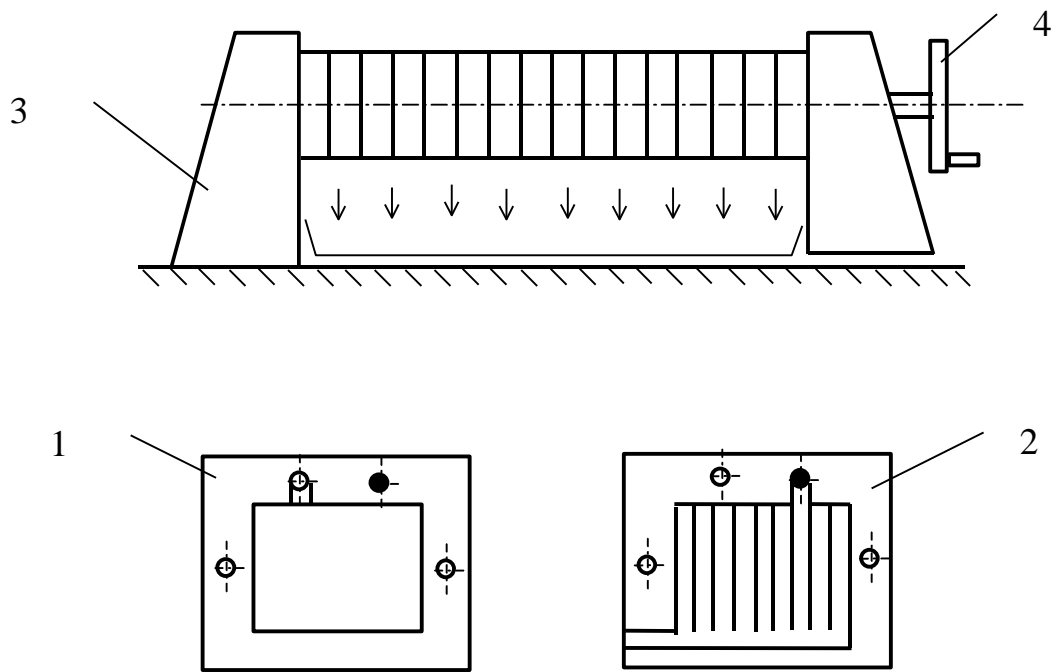


Рис. 8. Рамный фильтр-пресс

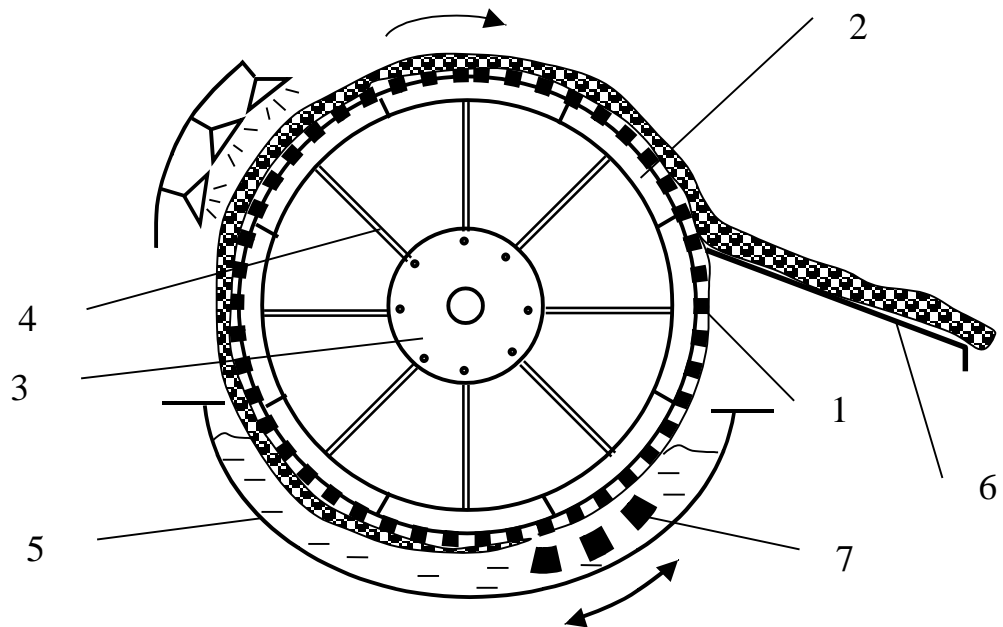


Рис. 9. Барабанный вакуум-фильтр

закрывают отводные каналы и прокачивают жидкость обратным ходом (через каналы, условно показанные темными кружками). Рамные фильтр-прессы используются для осветления виноматериалов и пива.

*Барабанный вакуум-фильтр* является устройством непрерывного действия (рис. 9). Он снабжен вращающимся горизонтальным перфорированным барабаном 1, который перегородками разделен на несколько секций 2 одинаковой формы. За один оборот барабана каждая секция проходит несколько рабочих зон: фильтрования, обезвоживания, промывки, удаления осадка и регенерации фильтровальной ткани. Устройство, управляющим работой фильтра, является распределительная головка 3, при помощи которой секции барабана через трубы 4 в определенной последовательности подсоединяют к магистралям вакуума, сжатого воздуха и промывной жидкости.

В стадии фильтрования зона фильтра под фильтрующей тканью соединяется с вакуумом, и суспензия, находящаяся в корыте 5, проходит через фильтровальную ткань. Осадок откладывается на ее поверхности. Промытый и подсушенный осадок непрерывно срезается ножом 6. А чтобы взвешенные частицы не отстаивались в корыте 5, оно снабжено качающейся мешалкой 7.

*Дисковый вакуумный фильтр* применяют для разделения тонкодисперсных суспензий. Перед фильтрованием на фильтровальную ткань намыывают слой вспомогательного вещества. Устройство содержит корпус 1, в

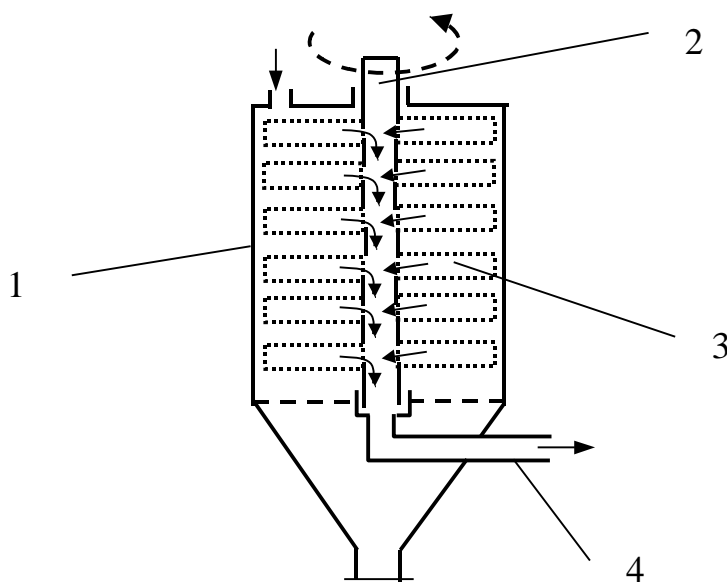


Рис. 10. Дисковый вакуумный фильтр

котором установлен полый вал 2 с закрепленными на нем дисками 3 (рис. 10). Эти диски также выполнены пустотелыми, имеют перфорированные



стенки и обтянуты фильтровальной тканью. Суспензия на очистку подается через верхний патрубок корпуса 1, а фильтрат откачивается через трубу 4. Удаление осадка производится периодически. Для этого прекращают подачу суспензии, откачивают весь фильтрат и при помощи специального привода производят быстрое вращение вала 2 с дисками 3. Возникающие при этом центробежные силы сбрасывают осадок на внутреннюю поверхность стенок корпуса 1, по которым осадок стекает вниз и выводится из аппарата через нижний люк.

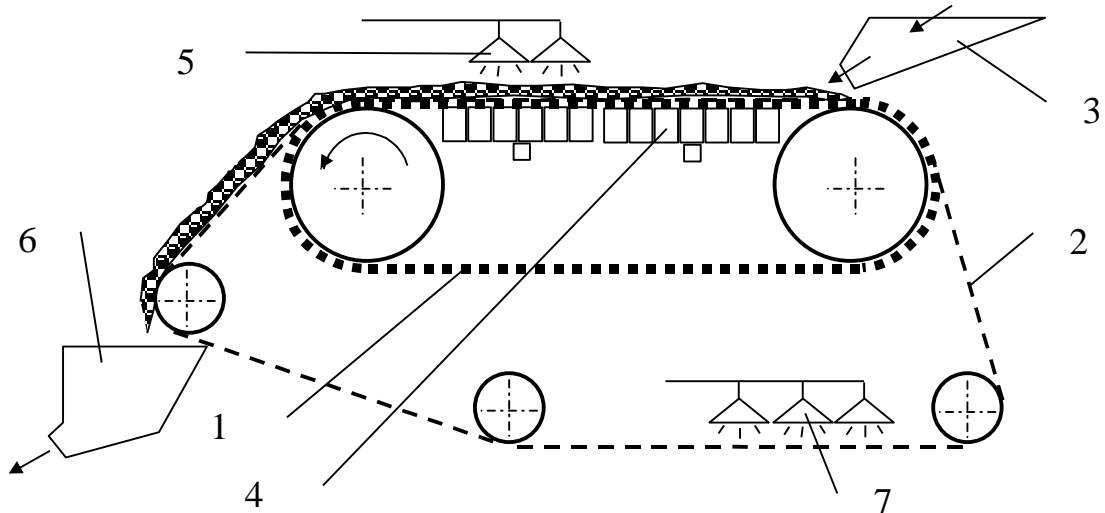


Рис. 11. Ленточный фильтр

На рис. 11 представлена схема *ленточного фильтра*. Между его приводным и натяжным барабанами натянута бесконечная перфорированная резиновая лента 1. К ней натяжными роликами прижимается фильтровальная ткань 2, выполненная также в виде бесконечной ленты. Суспензия подается на фильтровальную ткань из лотка 3, а фильтрат под вакуумом откачивается в камеры 4 и отводится в сборник. При помощи душирующих устройств 5 производится промывка осадка, который в итоге собирается приемником 6. При помощи душирующих устройств 7 производится промывка фильтровальной ткани (регенерация).

Если в качестве фильтровальной перегородки установить полупроницаемую мембрану (с размером отверстий менее размеров молекул частиц), появляется возможность разделения не только суспензий, но и растворов. Известно, что, если полупроницаемой мембраной разделить концентрированный раствор и слабый раствор того же вещества в том же растворителе, то растворитель будет самопроизвольно перемещаться из малоconцентрированного раствора в высокоconцентрированный. Это явление широко распространено в растительном и животном мире и называется *осмосом*. Способ разделения растворов путем их фильтрования под давлением через полупро-

ницаемые мембраны, пропускающие растворитель и задерживающие молекулы или ионы растворенных веществ, называется *обратным осмосом*. Процесс разделения, фракционирования и концентрирования растворов с помощью полупроницаемых мембран, называется *ультрафильтрацией*.

В ультрафильтровальном аппарате для опреснения соленой воды (рис. 12) пористая мембрана уложена на внутренней стенке перфорированной трубы 1. В трубу 1 насосом 2 под давлением до 10 МПа (100 атм) подается соленая вода. Опресненная вода проходит через поры мембраны и собирается в сборнике 4. Для снижения затрат энергии на выходе из трубы 1 устанавливается турбина 3, которая вращается выходящим под давлением рассолом.

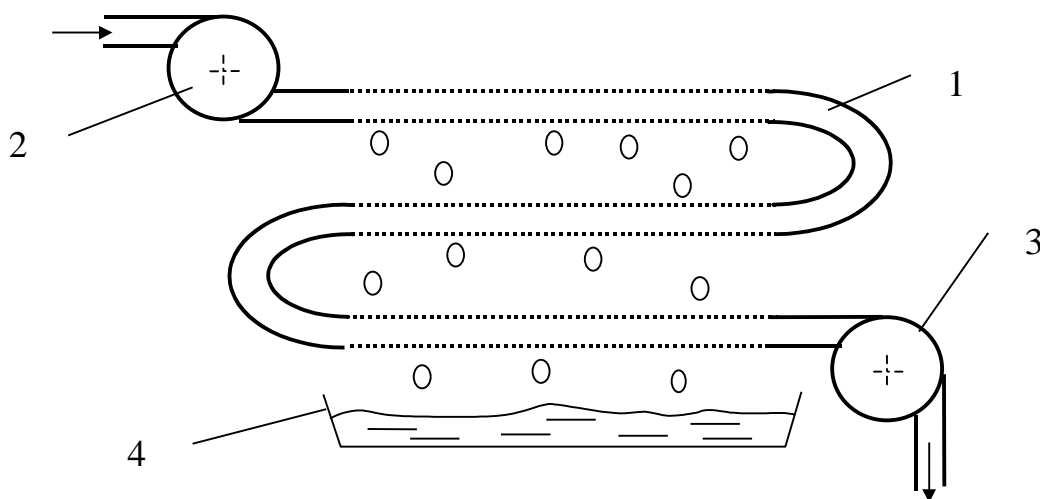


Рис. 12. Ультрафильтровальный аппарат для опреснения соленой воды

Лабораторная работа выполняется на установке, состоящей из вакуумного насоса 1, приемного мерного стакана 2, заборной воронки 3 с фильтровальной перегородкой, емкости 4 с суспензией, соединительных трубок 5 (рис. 13). Лабораторная установка моделирует условия работы барабанного вакуумного фильтра. В качестве рабочей жидкости может быть использована меловая суспензия.

### Порядок проведения работы

1. Измерить диаметр и определить площадь фильтровальной перегородки. Собрать установку, согласно рисунку 13, соединив приемный стакан 2 со штуцером "всасывание", а к штуцеру "нагнетание" присоединить шланг с небольшой емкостью (на случай переполнения приемного стакана). Через верхнюю горловину залить воду в камеру насоса (около 2 л), перемешать

суспензию в емкости 4 и, не погружая заборную воронку 3 в суспензию, включить насос 1.

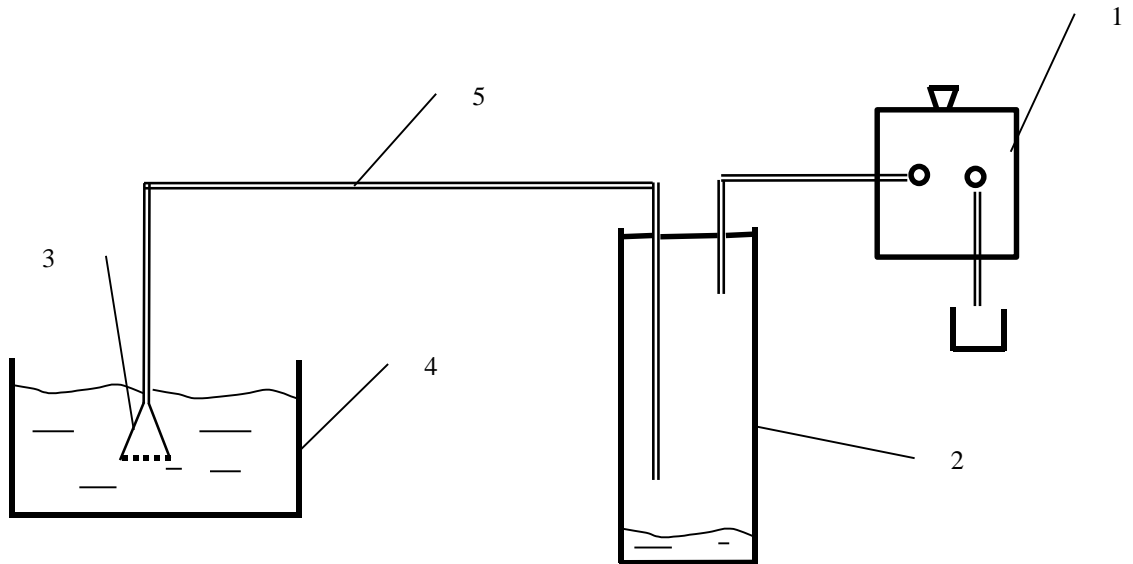


Рис. 13. Схема лабораторной установки

2. После того, как насос выйдет на устойчивый режим работы, погрузить заборную воронку 3 в суспензию и с этого момента начать отсчет времени  $\tau$  и объема фильтрата  $V$ .

Через каждые 30 с производить замер объема фильтрата (по делениям на мерном стакане 2), результаты заносить в таблицу 6. Опыт продолжать до момента заполнения приемного стакана.

Если процесс идет медленно, можно увеличить интервал между замерами до 1...3 мин. Если, наоборот, опыт не удался из-за быстротечности процесса, опыт следует повторить, производя замеры при меньших интервалах времени.

3. По полученным результатам построить график зависимости количества фильтрата  $V$  от продолжительности процесса  $\tau$ .

### Контрольные вопросы

1. Что называется фильтрованием и фильтрацией?
2. Чем отличается продуктивное фильтрование от очистного?
3. При каких условиях происходит фильтрование с образованием осадка на поверхности фильтрующей перегородки и фильтрование с закупориванием пор?

4. Что является движущей силой процесса фильтрования и зачем нужна регенерация?
5. Напишите основное уравнение процесса фильтрования и поясните значения входящих в него величин.
6. Поясните устройство и принцип действия нутч-фильтра.
7. Поясните устройство и принцип действия рамного фильтр-пресса.
8. Поясните устройство и принцип действия барабанного вакуум-фильтра.
9. Поясните устройство и принцип действия дискового вакуумного фильтра.
10. Поясните устройство и принцип действия ленточного фильтра.
11. Что такое осмос и обратный осмос?
12. Поясните устройство и принцип действия ультрафильтровального аппарата для опреснения соленой воды.
13. Поясните порядок проведения опытов и полученные результаты.

### Отчет по работе

1. Название и цель работы.
2. Схема лабораторной установки (рис. 13).
3. Характеристики:  
 суспензии – \_\_\_\_\_  
 фильтровальной перегородки - \_\_\_\_\_  $d=$  \_\_\_\_\_  $F=$  \_\_\_\_\_

Таблица 6

Результаты опыта

№	Продолжительность фильтрования $\tau$ , с	Объем фильтрата	
		V, мл	V/F

4. График зависимости  $V/F = f(\tau)$ .

### Список литературы

1. Кавецкий Г.Д., Васильев Б.В. Процессы и аппараты пищевой технологии.- М.: Колос, 2000.- 551 с.
2. Малахов Н.Н., Плаксин Ю.М., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств: Учебник.- Орел: Изд-во Орловского гос. технического ун-та, 2001.- 687 с.
3. Перри Дж. Справочник инженера-химика: В 2 т. - Л., 1969. - Т.2.- С. 180-181.

### 3. ОЧИСТКА ВОЗДУХА И ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВ

#### Цель работы

1. Изучить устройство и принцип действия основных видов аппаратов для очистки воздуха и промышленных газов, применяемых в пищевом производстве.

2. Ознакомиться с существующими конструкциями циклонов, применяемых в пищевом производстве.

3. Опытным путем определить к.п.д. циклона и установить зависимость этого коэффициента от длины конической части циклона, величины и направления угла конусности.

**Применяемые материалы и оборудование:** циклонная установка с набором сменных конусов, устройство для нагнетания воздуха "Уралец", мука (до 200 см<sup>3</sup>), мензурка (20 мл).

#### Основные теоретические положения

Очистку воздуха и промышленных газов от взвешенных твердых и жидких частиц в пищевом производстве проводят в целях улавливания из отходящих газов ценных продуктов, уменьшения загрязненности атмосферы и снижения степени взрыво- и пожароопасности производства.

В промышленных условиях пыль может образовываться в результате проведения таких технологических процессов, как сушка пищевых продуктов, транспортировка сыпучих материалов, измельчение твердых тел. Размер твердых частиц в пыли, как правило, составляет 3...100 мкм.

Эффективность аппаратов для очистки газов оценивается степенью очистки, т.е. его коэффициентом полезного действия:

$$\eta = \frac{x_1 - x_2}{x_1} \cdot 100\%, \quad (22)$$

где  $x_1$  - концентрация взвешенных частиц в запыленном газе;

$x_2$  - концентрация взвешенных частиц в очищенном газе.

Для очистки газовых потоков от взвешенных частиц используют следующие способы: гравитационное осаждение, осаждение под действием инерционных и центробежных сил, фильтрование, мокрая очистка, осаждение в электрическом поле. При этом наблюдаются те же закономерности, что и для процесса очистки жидкостей. Конструкции аппаратов для очистки воздуха и газов довольно разнообразны. Рассмотрим наиболее распространенные из них.

*Пылеосадительная камера* представляет собой прямоугольный аппарат 1 с расположенными внутри горизонтальными полками 2 (рис. 14). Расстояние между полками составляет 100...400 мм. Суммарное проходное сечение между полками достаточно велико, вследствие чего воздух между полками движется медленно, и пыль оседает на полках. Ее периодически удаляют (скребками или смывают водой). Такие устройства используются для грубой, предварительной очистки газов от частиц, размеры которых 100 мкм и более.

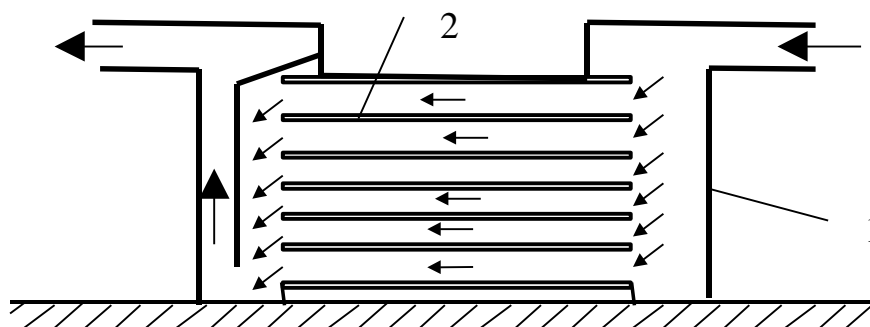


Рис. 14. Пылеосадительная камера

*Отстойный газоход с отбойными перегородками* схематично изображен на рис. 15. Перегородки 1 служат для завихрения газового потока. Вследствие этих завихрений твердые частицы, как более инертные, выделяются из потока газа и скапливаются в сборниках 2. В таких устройствах улавливаются частицы размером 25 мкм и более.

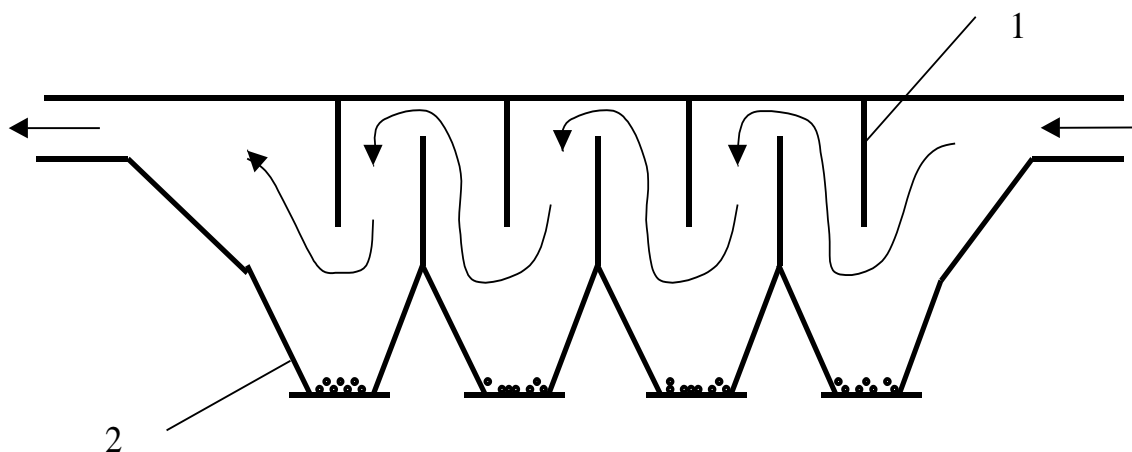


Рис. 15. Отстойный газоход с отбойными перегородками

*Трубчатый электрофильтр* (рис. 16) производит очистку газов под действием электрического поля. Запыленный газ или дым поступает в нижнюю часть фильтра, а затем проходит внутри труб 1 вверх. В трубах и про-

исходит очистка. Эти трубы являются анодами, т.е. положительно заряженными электродами. Внутри них расположены катоды 2, которые представляют собой проволоку, натянутую по оси труб и закрепленную на изоляторах.

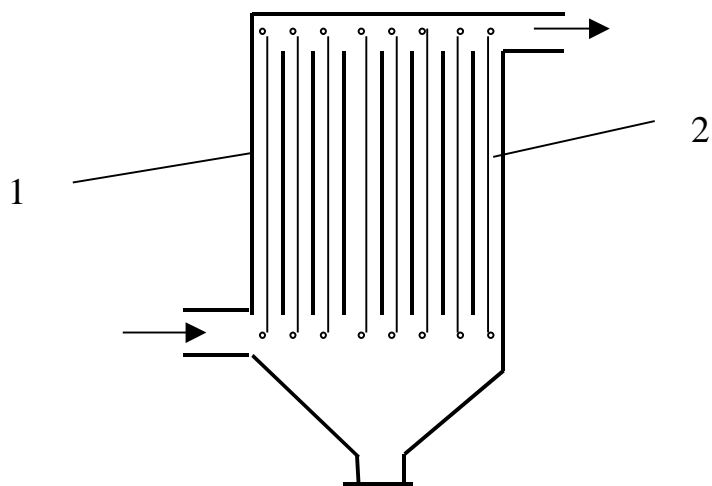


Рис. 16. Трубчатый электрофильтр

Под действием высокой разности потенциалов (4..6 кВ/см) от катода идет поток электронов к аноду. Электроны заряжают взвешенные в газе частицы, которые затем оседают на аноде. Скопившиеся на аноде частицы периодически стряхиваются ударным приспособлением и собираются в нижней части фильтра.

*Циклон* (рис. 17) позволяет очищать газы в поле центробежных сил. Корпус 1 циклона обычно имеет верхнюю цилиндрическую часть и нижнюю коническую часть. Вход запыленного газа осуществляется через патрубок 2, выход - через трубу 3. Через отверстие внизу конической части циклон соединяется с герметичным бункером 4. На рисунке также показана примерная траектория движения газовой струи в циклонах. Поступающая в циклон с некоторой скоростью газовая струя закручивается в кольцевом пространстве между корпусом 1 и выпускной трубой 3. Возникающие при этом центробежные силы отбрасывают находящиеся в газе твердые частицы к стенкам корпуса, где эти частицы тормозятся и падают вниз. Труба 3 расположена соосно с корпусом, поэтому отвод газа происходит из зоны, очищенной от твердых частиц.

Для повышения степени очистки в циклоне целесообразно уменьшение его диаметра, т.к. это увеличивает центростремительное ускорение  $a_n$ :

$$a_n = \frac{v^2}{r}, \quad (23)$$

где  $v$  - скорость движения газовой струи;

$r$  - радиус траектории движения газовой струи.

Однако, с уменьшением размеров циклона снижается и его производительность.

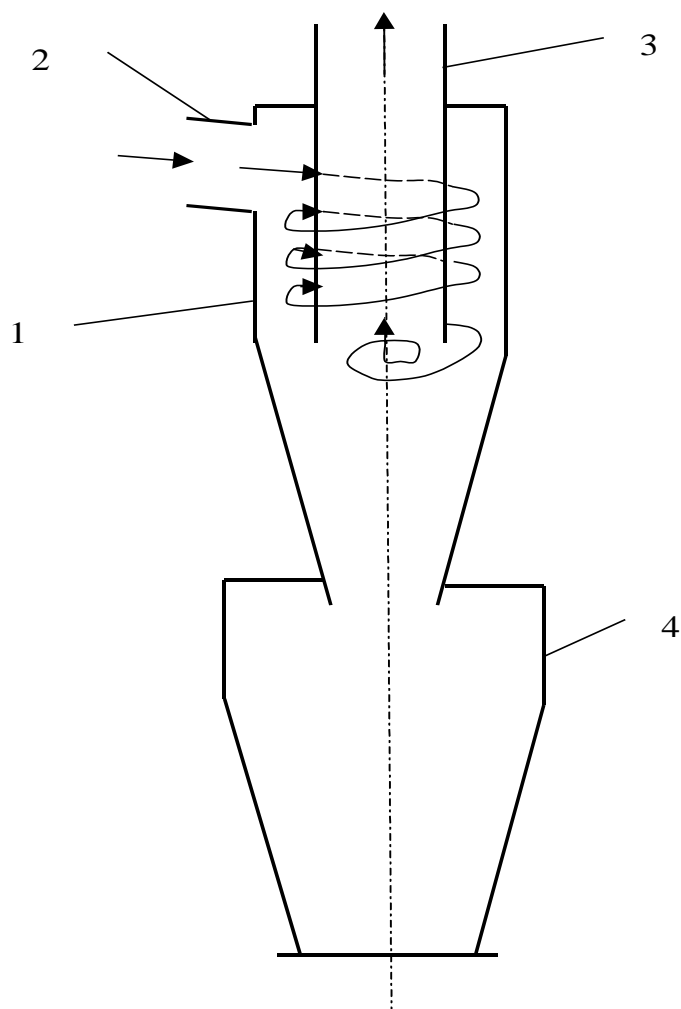


Рис. 17. Схема работы циклона

Для обеспечения высокой степени очистки при сохранении большой производительности увеличивают количество параллельно работающих циклонов, т.е. устанавливают их батареями. Схема *батареяного аэроциклона* представлена на рис. 18 а (бункер не показан). В данном варианте батареяный аэроциклон состоит из двенадцати циклонных элементов. В циклонный элемент (рис. 18 б) газ поступает не тангенциально, а сверху, и для придания потоку вращения предусмотрен направляющий шнек.

Циклоны ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24 Научно-исследовательского института очистки газа (НИИОГаз) распространены во многих отраслях промышленности, в том числе и в пищевой. Отличительной особенностью конструкций



этой серии является (рис. 19) наличие примерно одинаковых по высоте цилиндрической и конической частей, малый угол конусности, относительно

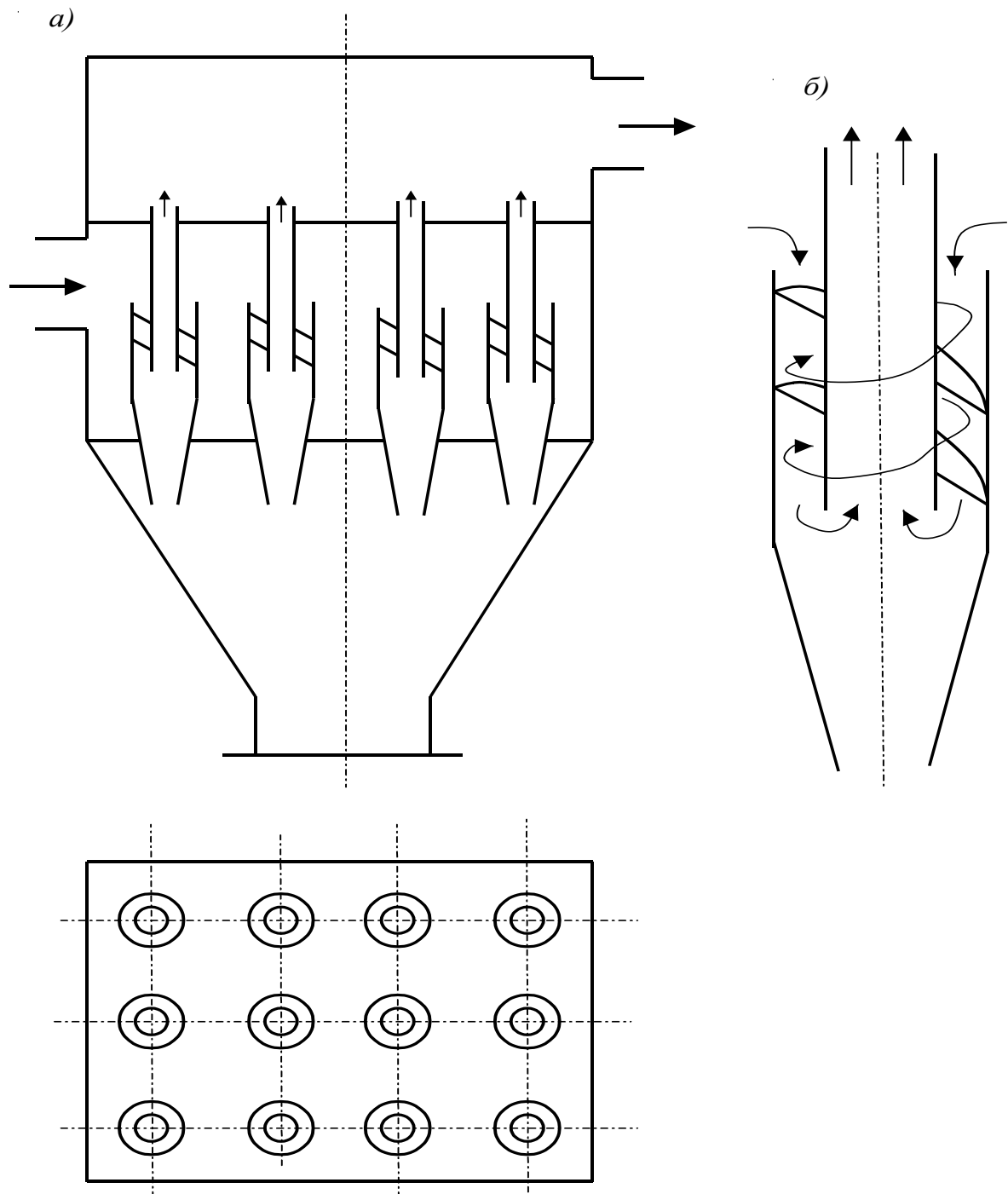


Рис. 18. Батарейный аэроциклон

большая высота: около  $4D$ , где  $D$  - внутренний диаметр цилиндрической части циклона. Цифровое обозначение циклона в серии соответствует углу

наклона входного патрубка (угол измеряется в градусах от линии, перпендикулярной продольной оси циклона). Циклон ЦН-11 утвержден в качестве унифицированного пылеуловителя циклонного типа.

Циклоны серии СК-ЦН и УЦ (рис. 20) отличаются наличием спирального входного патрубка, способствующего закручиванию газовой струи и повышению степени очистки. Они имеют уменьшенную цилиндрическую часть, а длина конической части составляет около  $3D$ .

Циклоны ВЦНИИОТ Всесоюзного центрального научно-исследовательского института охраны труда (рис. 21) отличаются тем, что они имеют так называемый обратный конус, т.е. конус, расширяющийся книзу.

Особенностью циклонов СИОТ Свердловского института охраны труда (рис. 22) является то, что они полностью лишены цилиндрической части. Кроме того, выходной канал выполнен винтовым и раскручивает газовую струю, что несколько снижает гидравлическое сопротивление циклона. При прочих равных условиях высота циклона СИОТ составляет 70% высоты циклона ЦН-11, а диаметр первого на 62% превышает диаметр второго.

Известны и другие конструкции циклонов. Их разнообразие вызвано не только большим диапазоном изменения свойств различных пылей, но и тем, что математическая модель процесса циклонной очистки воздуха является весьма сложной. Вследствие этого при отработке конструкций циклонов большая роль отводилась эксперименту. Цель - обеспечить требуемые показатели работы циклона при минимальных его габаритах, весе и стоимости.

Лабораторная установка содержит устройство подачи воздуха 1, вибропитатель 2 для запыления воздуха, циклон 3 и фильтр 4 для сбора неуловленной циклоном пыли (рис. 23). Нижняя часть циклона - сменная и крепится к корпусу при помощи пружин 5. Высыпное отверстие в нижней части циклона перекрыто, что соответствует случаю полного наполнения бункера. В качестве пыли может быть использована мука.

### Порядок проведения работы

1. Измерить длину  $l$  конической части циклона, ее верхний диаметр  $d_1$  и нижний диаметр  $d_2$ . Вычислить угол наклона образующей конуса  $\alpha$  по формуле:

$$\alpha = \arctg \frac{d_1 - d_2}{2l}.$$

2. При помощи мензурки отмерить около  $20 \text{ см}^3$  муки ( $x_1$ ), засыпать ее в вибропитатель. Собрать установку, согласно рисунку 23. Включить наддув и наблюдать за подачей муки в воздушную струю до полного освобождения вибропитателя.

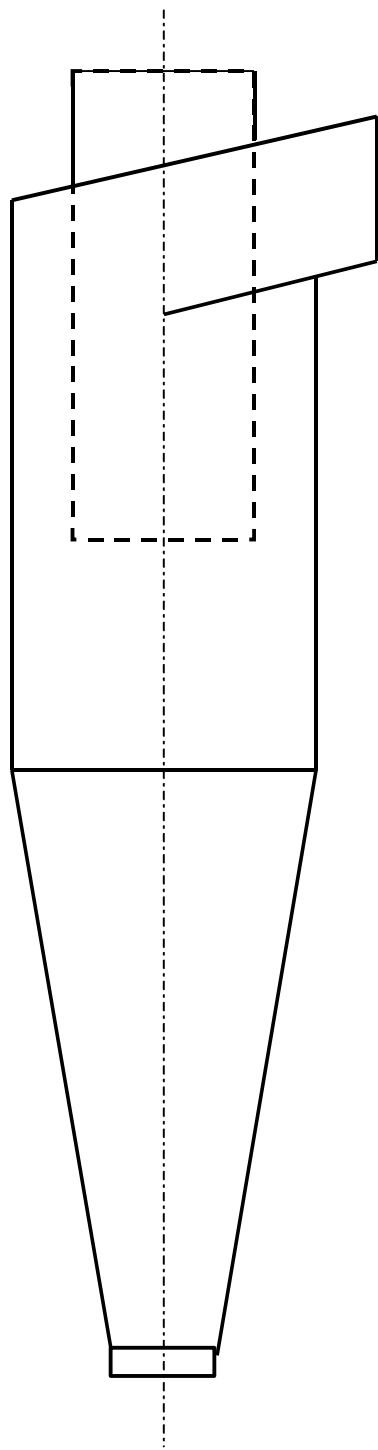


Рис. 19. Циклон ЦН

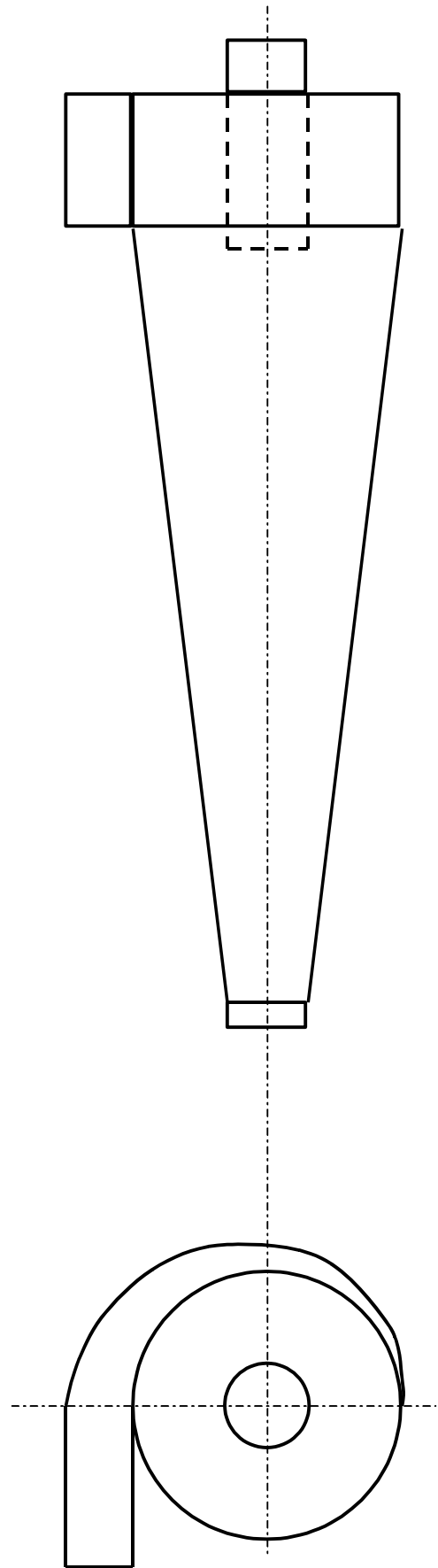


Рис. 20. Циклон УЦ

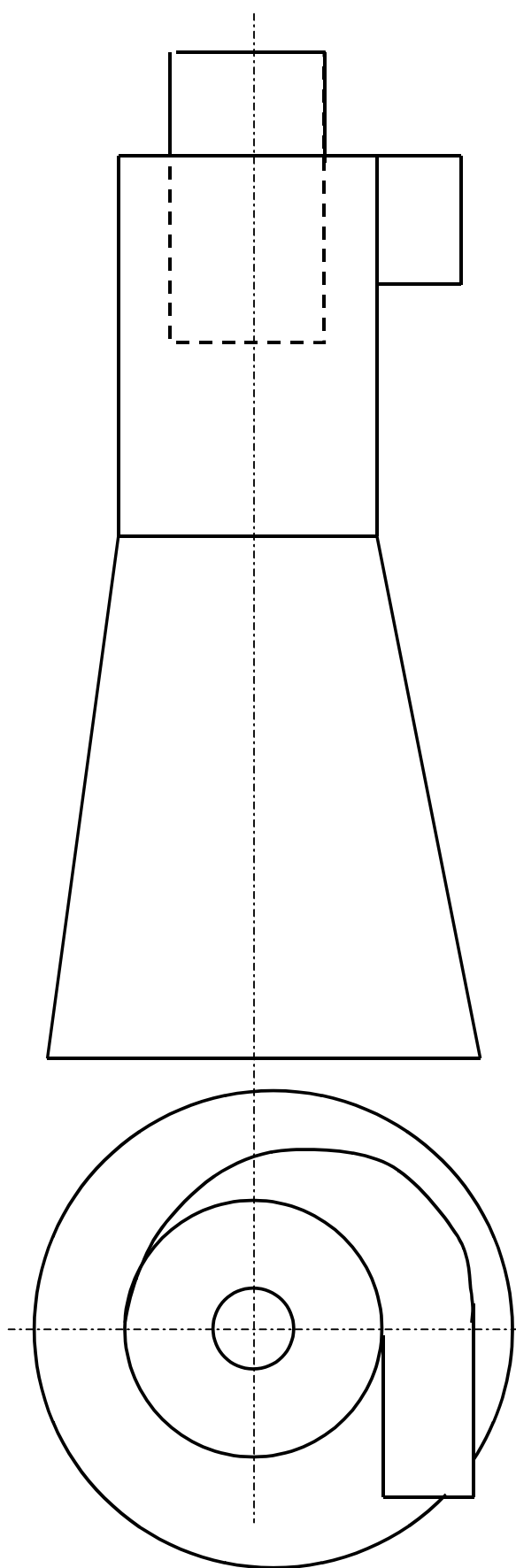


Рис. 21. Циклон ВЦНИИОТ

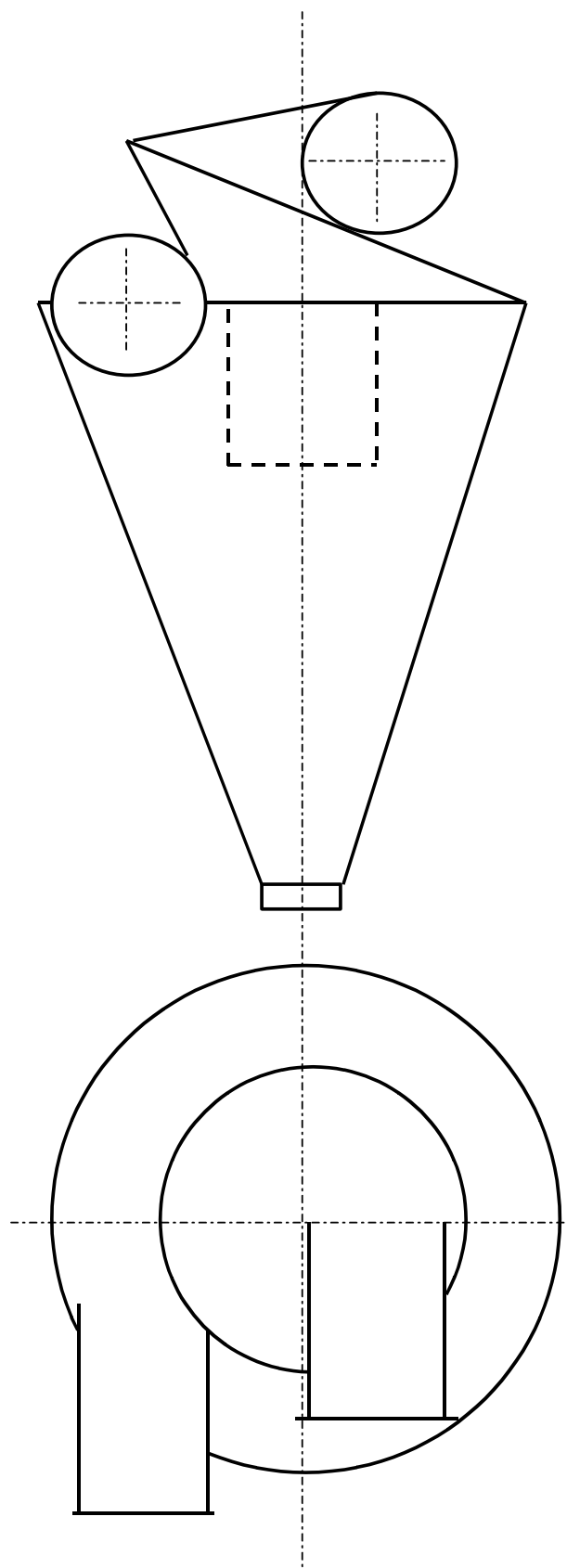


Рис. 22. Циклон СИОТ

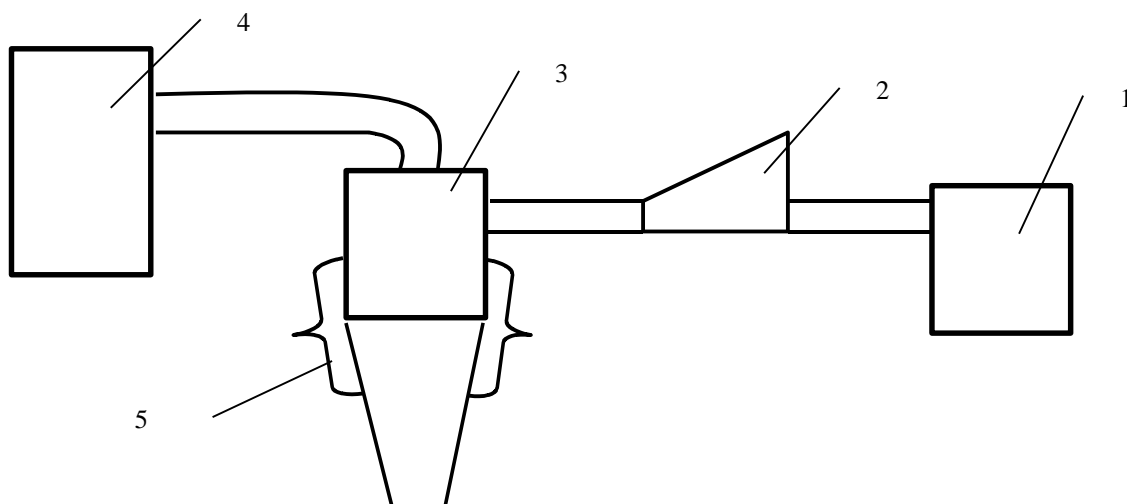


Рис. 23. Схема лабораторной установки

3. Выключить установку, отсоединить нижнюю часть циклона и высыпать ее содержимое в мензурку. Определить количество уловленной циклоном пыли  $x_u$  ( $\text{см}^3$ ). Вычислить к.п.д. циклона по формуле

$$\eta = \frac{x_u}{x_1} \cdot 100\%. \quad (25)$$

4. Повторить опыт по пунктам 1..3, используя разные конструкции конической части циклона.

### Контрольные вопросы

1. С какой целью проводят работы по очистке воздуха и промышленных газов в пищевом производстве?
2. Что является источником пыли в пищевом производстве?
3. Поясните устройство и принцип действия пылеосадительной камеры.
4. Поясните устройство и принцип действия отстойного газохода с отбойными перегородками.
5. Поясните устройство и принцип действия трубчатого электрофильтра.
6. Поясните устройство и принцип действия циклона.
7. Поясните устройство и принцип действия батарейного аэроциклона.
8. Чем отличаются циклоны серии ЦН конструкции НИИОГаз?

9. Каковы особенности конструкции циклонов СК-ЦН и УЦ?
10. Каковы особенности циклонов конструкции ВЦНИИОТ?
11. Каковы особенности циклонов конструкции СИОТ?
12. Поясните порядок проведения опытов и полученные результаты.

### Отчет по работе

1. Название и цель работы.
2. Схема лабораторной установки (рис. 23).
3. Результаты опыта.  
Характеристика пыли – \_\_\_\_\_

Таблица 7

Результаты опыта

№	Размеры конической части циклона				Количество пыли, см <sup>3</sup>		к.п.д. $\eta$ , %
	$l$ , мм	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$\alpha$ , град	$x_1$	$x_2$	

4. Графики зависимости к.п.д. циклона от длины нижней (конической) части и величины ее угла конусности.
5. Выводы.

### Список литературы

1. Кавецкий Г.Д., Васильев Б.В. Процессы и аппараты пищевой технологии.- М.: Колос, 2000.- 551 с.
2. Лабораторный практикум по процессам и аппаратам пищевых производств/ А.С.Гинзбург и др.- М.: Агропромиздат, 1990.- 256 с.
3. Малахов Н.Н., Плаксин Ю.М., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств: Учебник.- Орел: Изд-во Орловского гос. технического ун-та, 2001.- 687 с.
4. Штокман Е.А. Очистка воздуха от пыли на предприятиях пищевой промышленности.- М.: Агропромиздат, 1989.- 312 с.

Сергей Геннадьевич Тютрин

**ПРОЦЕССЫ РАЗДЕЛЕНИЯ**  
Методические указания  
к выполнению лабораторных работ  
по процессам и аппаратам пищевых производств  
для студентов направления (специальности)  
655800 (260600) (260601 (170600))

Редактор Н.Ш.Габайдуллина

---

Подписано к печати		Бумага тип. №1
Формат 60 <sup>x</sup> 84 1/16	Усл. печ.л. 2,0	Уч. изд. л. 2,0
Заказ	Тираж 30	Цена свободная

---

Редакционно-издательский центр КГУ.  
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.  
Курганский государственный университет.