

## ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

В пищевых производствах многие процессы приводят к образованию неоднородных смесей, которые в дальнейшем подлежат разделению /кристаллизация, сушка и др./.

Часто встречается задача противоположного характера: из веществ, находящихся в различных агрегатных состояниях, оказывается необходимым получить смесь /смешение, перемешивание/.

Решение как первой, так и второй задачи относится к области гидромеханических процессов.

### Классификация

В гидромеханических процессах применяются неоднородные системы. Последние по меньшей мере состоят из двух фаз:

а/ внутренней или дисперсной фазы, находящейся в тонко раздробленном состоянии;  
б/ внешней фазы или дисперсионной среды, окружающей частицы внутренней дисперсной фазы.

Различают системы.

1. Газ – твердое тело: а/ пыль, диаметр частиц 5-50 мкм,  
б/ дым, 0,3-0,5 мкм.  
/Для сравнения: размер космической пыли 0,1–1 мкм/.
2. Газ – жидкость: а/ туман 0,3–3 мкм; б/ пена.
3. Жидкость – твердое тело: а/ грубые суспензии, > 100 мкм,  
б/ тонкие суспензии, 100-0,1 мкм,  
в/ коллоидные растворы, < 0,1 мкм.
4. Жидкость – жидкость; а/ эмульсии.

По классификации гидромеханических процессов не существует единого мнения. Однако большинство авторов склоняется к следующей классификации.

- 1/ Разделение газовых неоднородных систем.
- 2/ Разделение жидких неоднородных систем.
- 3/ Псевдооживление.
- 4/ Перемешивание.

Во всех гидромеханических процессах имеет место движение частиц в газовой или жидкой среде. Изучение закономерностей этого движения составляет важную задачу гидродинамики. Некоторые общие понятия и закономерности движения частиц рассматриваются ниже.

## Движение тел в жидкостях

### Определяющий размер

За определяющий размер твердой частицы произвольной формы принимается эквивалентный диаметр шаровой частицы, имеющей ту же массу  $M$  и объем  $V$ .

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \cdot V} = 1,24 \cdot \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_T}} \quad /12/$$

где  $\rho_T$  – плотность твердой частицы,  $\text{кг/м}^3$ .

### Режимы обтекания

Для оценки режима обтекания твердой частицы внешним потоком применяют число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{W \cdot d_3 \cdot \rho_c}{\mu_c} \quad /13/$$

где  $\rho_c, \mu_c$  – плотность и вязкость среды.

Различают области.

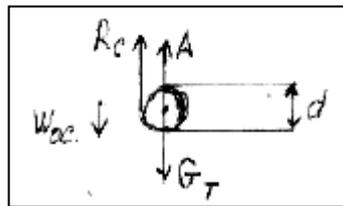
1. Ламинарное обтекание,  $\text{Re} < 2 / 0,1$  по другим данным/.
2. Переходная область,  $2 / 0,1 / < \text{Re} < 500$ .
3. Турбулентное обтекание,  $\text{Re} > 500$ .

### Осаждение частиц в поле силы тяжести

При осаждении частицы в неподвижной среде через короткий промежуток времени /от секунды до долей секунды/ устанавливается равновесие сил и движение частицы становится равномерным.

– Скорость равномерного движения частицы при балансе сил, действующих на нее, называется скоростью осаждения.

В идеальном случае действие сил на одиночную частицу шаровой формы при осаждении в неподвижной среде представлено на рис. 1.



**Рис. 1.** Силы, действующие на частицу при осаждении в поле силы тяжести.

Силы:  $G_T$  – тяжести,  $A$  – Архимеда,  $R_c$  – сопротивления.

Баланс сил:

$$G_T - A = R_c \quad /14/$$

Или

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g(\rho_T - \rho_C) = \xi \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho_C \cdot W_{oc}^2}{2} \quad /14a/$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления.

Откуда скорость осаждения

$$W_{oc} = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d \cdot (\rho_T - \rho_C)}{3 \cdot \xi \cdot \rho_C}} \quad /15/$$

Для ламинарного режима:  $\xi = \frac{24}{Re}$ ,  $d = 2 \cdot r$ , тогда

$$W_{oc} = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot r^2 (\rho_T - \rho_C)}{\mu_C} \quad /15a/$$

Уравнение /15a/ представляет собой закон Стокса.

Другая обработка. Умножим обе части уравнения /14a/ на

$\frac{\rho_C}{\mu_C^2}$ , левую часть – еще на  $\frac{\rho_C}{\rho_C}$ ,

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g(\rho_T - \rho_C) \cdot \frac{\rho_C}{\rho_C} \cdot \frac{\rho_C}{\mu_C^2} = \xi \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_C \cdot W_{oc}^2}{2} \cdot \frac{\rho_C}{\mu_C^2}$$

Или

$$\frac{g \cdot d^3}{\nu_C^2} \cdot \frac{\rho_T - \rho_C}{\rho_C} = \frac{3}{4} \cdot \xi \cdot Re^2; \quad \nu_C = \frac{\mu_C}{\rho_C};$$

Обозначим  $Ar = \frac{g \cdot d^3}{\nu_C^2} \cdot \frac{\rho_T - \rho_C}{\rho_C}$  – критерий Архимеда, учитывает влияние выталкивающей силы /силы Архимеда/.

Тогда получим уравнение в общей форме:

$$Re = f(Ar) \quad /16/$$

Уравнение /16/ для идеальных условий осаждения шаровой частицы принимает вид:

1. Ламинарный режим,  $Ar < 36 / 3,6/$

$$Re = \frac{1}{18} \cdot Ar \quad /16a/$$

2. Переходный режим,  $36 < Ar < 83000$

$$Re = 0,152 \cdot Ar^{0,715} \quad /16б/$$

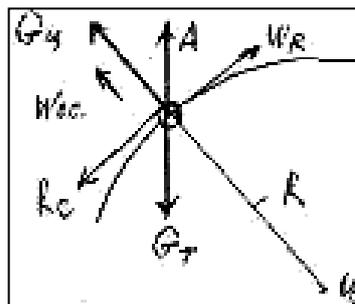
3. Турбулентный режим,  $Ar > 83000$

$$Re = 1,74 \cdot Ar^{0,5} \quad /16в/$$

Для реальных условий осаждения учитывает пристеночный эффект, коллективное осаждение и фактор формы частиц.

## Осаждение частиц в поле центробежных сил

В поле центробежных сил на частицу массой "m", будет дополнительно действовать центробежная сила, как это показано на рис 2.



**Рис. 2.** Силы, действующие на частицу при осаждении в поле центробежных сил.

$R$  – радиус вращения частицы,  $W_R$  – окружная скорость,  $G_{ц}$  – центробежная сила,  $W_{oc}$  – скорость осаждения,  $Ц$  – центр.

Поле центробежных сил создается при вращении частицы относительно центра "Ц" с радиусом "R". Частица движется по окружности с окружной скоростью " $W_R$ " и в то же время под действием центробежной силы отбрасывается к периферии /осаждается/ со скоростью " $W_{oc}$ " вдоль радиуса "R". Частица пойдет по спирали /R будет увеличиваться/.

Центробежная сила

$$G_{ц} = \frac{m \cdot W_R^2}{R} \quad /17/$$

Вводим понятие – фактор разделения – показывает, во сколько раз центробежная сила больше силы тяжести.

$$K_p = \frac{G_{ц}}{G_t} = \frac{m \cdot W_R^2}{R \cdot m \cdot g} = \frac{W_R^2}{g \cdot R} \quad /18/$$

Для определения скорости осаждения, входящей в критерий  $Re$ , применяется уравнение

$$Re = A \cdot (A_r \cdot K_p)^n \quad /19/$$

Значения констант "A" и "n" для уравнения /19/ принимаются такими же из уравнений /16а, б, в/.

Неоднородные системы в пищевой промышленности имеют очень малый /микронный/ размер частиц. Осаждение таких частиц в поле силы тяжести будет протекать очень медленно по уравнению /16/. Например, осветление вин в бочках может длиться годами /заодно и выдержка/. Поле центробежных сил явилось мощным средством для интенсификации процесса осаждения. Осветление /декантация/ вин /а также растительного масла, соков и др./ в сверхцентрифугах / $K_p = 60000$ / проводится за несколько секунд.

# 1/ РАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОВЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

## Классификация методов и аппаратуры

Классификация приводится по учебнику /Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с./ и сводится в таблицу 2.

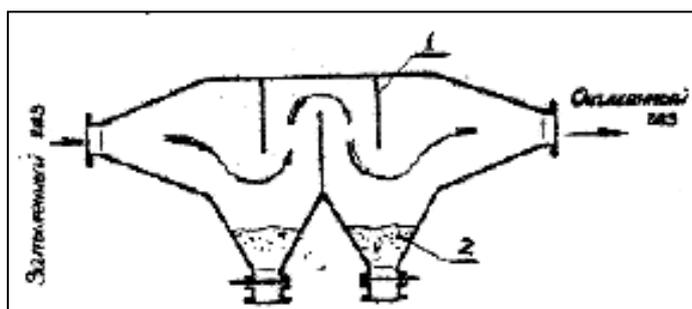
Таблица 2.

Классификация методов и аппаратуры по разделению газовых неоднородных систем

Метод очистки	Аппаратура
1. <u>Гравитационная</u> – осаждение частиц под действием силы тяжести.	Пылеосадительная камера
2. <u>Инерционная</u> – осаждение частиц под действием инерционных и центробежных сил.	1/ Инерционные пылеуловители 2/ Циклоны 3/ Ротационные пылеуловители
3. <u>Фильтрование</u> – пропускание потока газа через пористую перегородку, способную задерживать частицы пыли.	1/ Рукавные /тканевые/ фильтры 2/ Керамические фильтры 3/ Масляные /висциновые/ фильтры и другие.
4. <u>Мокрая очистка</u> – улавливание пыли путем ее столкновения с каплями или со свободной поверхностью жидкости.	1/ Скрубберы – полые и насадочные 2/ Струйный скруббер Вентури 3/ Инжекционные скрубберы 4/ Дезинтеграторы 5/ Пенные аппараты и другие.
5. <u>Электроочистка</u> – улавливание заряженных частиц в электрическом поле.	Электроосадители /электрофильтры/: а/ трубчатые, б/ пластинчатые.
6. <u>Акустическая</u> – укрупнение частиц пыли с помощью звуковых волн с дальнейшим улавливанием.	Акустические пылеуловители
7. <u>Комбинированная</u> – сочетание некоторых предыдущих методов очистки в одном аппарате.	Комбинированные пылеуловители

Конструкции некоторых пылеуловителей представлены на рис. 3-19 /данные МХТИ/. Подбор некоторых пылеуловителей /циклон, батарейный циклон, рукавный фильтр, полый скруббер/ не представляет собой сложности и выполняется студентами самостоятельно при курсовом проектировании по печатному пособию.

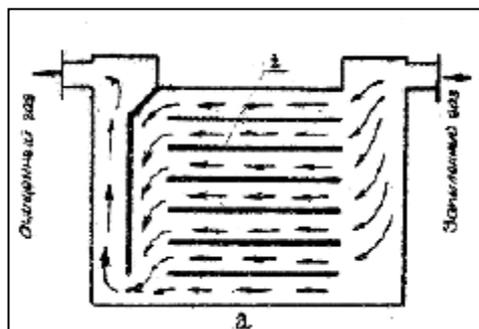
## РАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОВЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ



**Рис. 3**

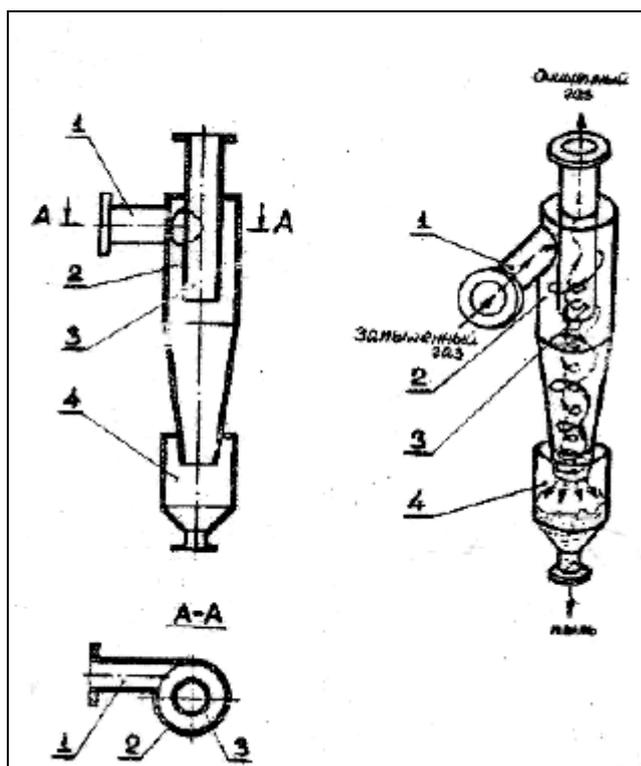
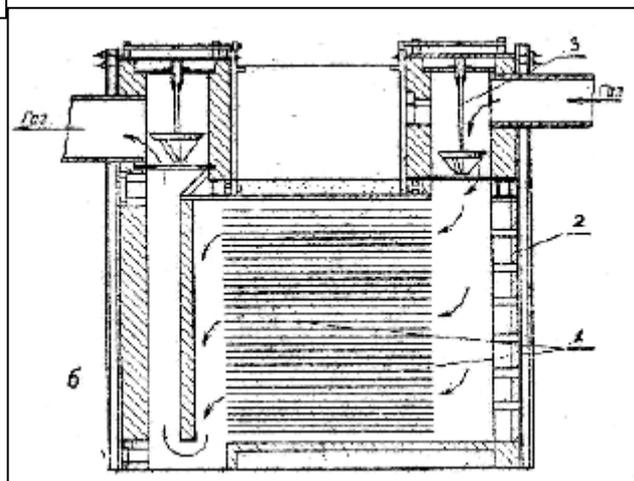
Пылеотстойный газоход

- I. Перегородка
- II. Бункеры – сборники пыли.



**Рис. 4.** Пылеосадительная камера: устройство /а/ и разрез аппарата /б/.

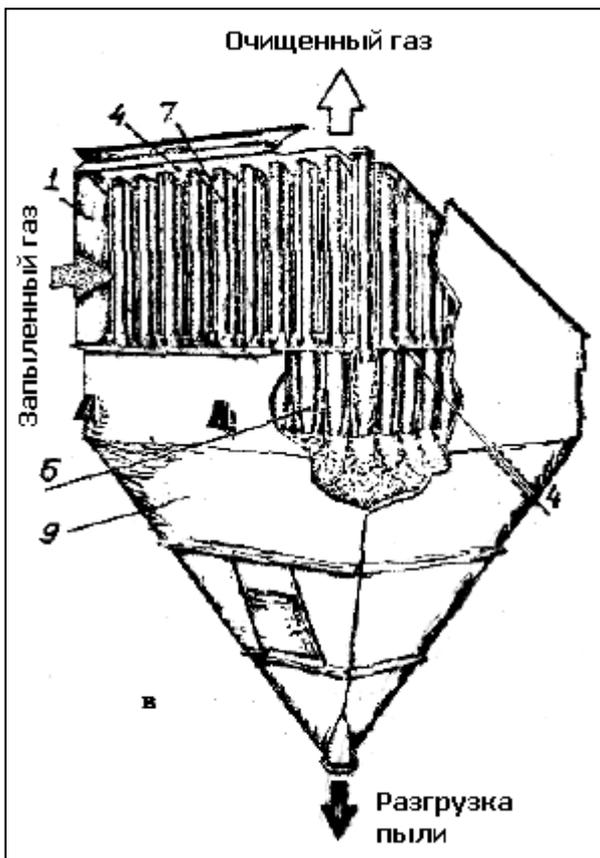
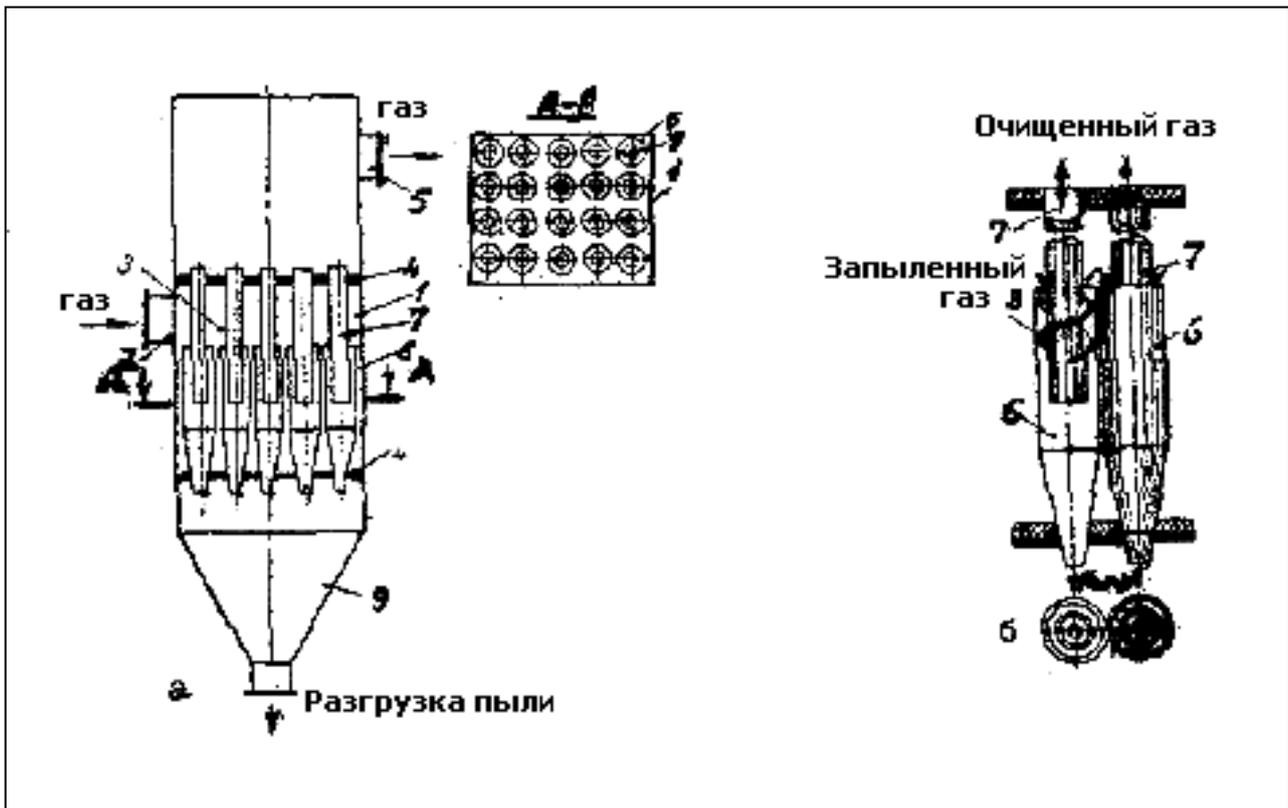
- 1. Горизонтальные полки.
- 2. Люки для удаления пыли.
- 3. Колокольные затворы.



**Рис. 5.**

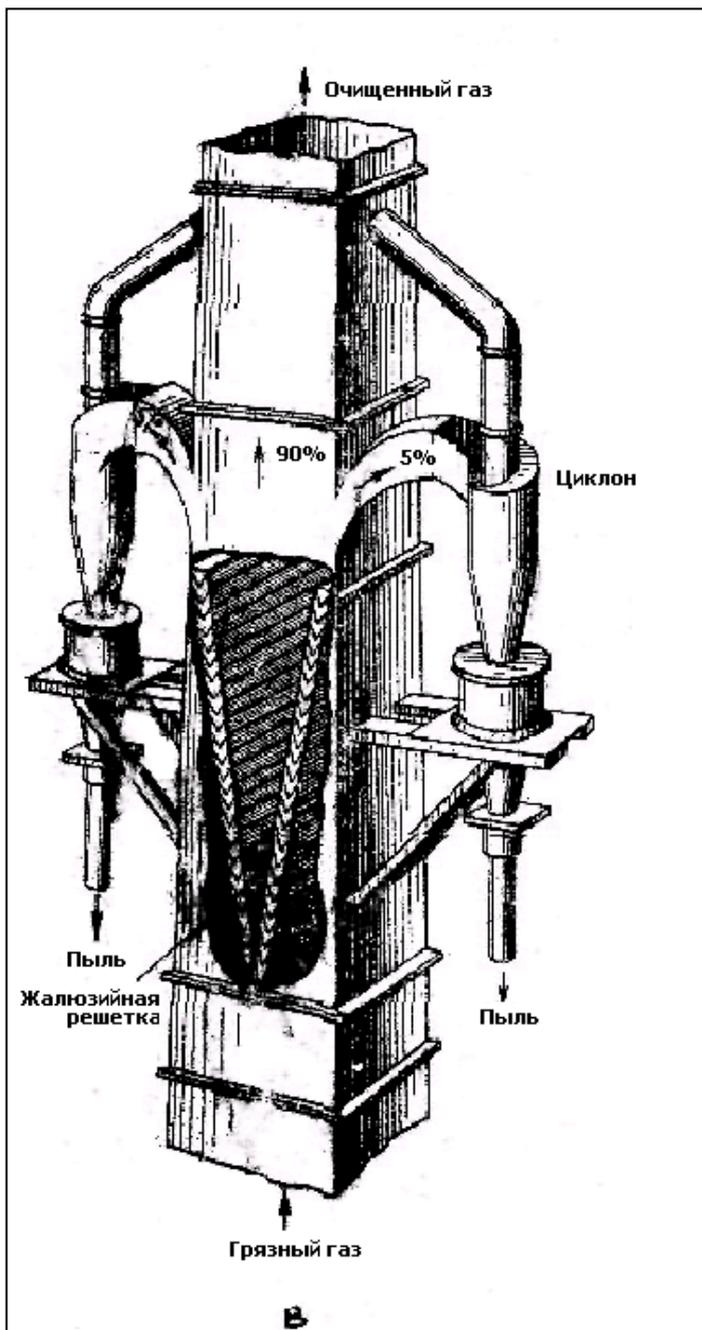
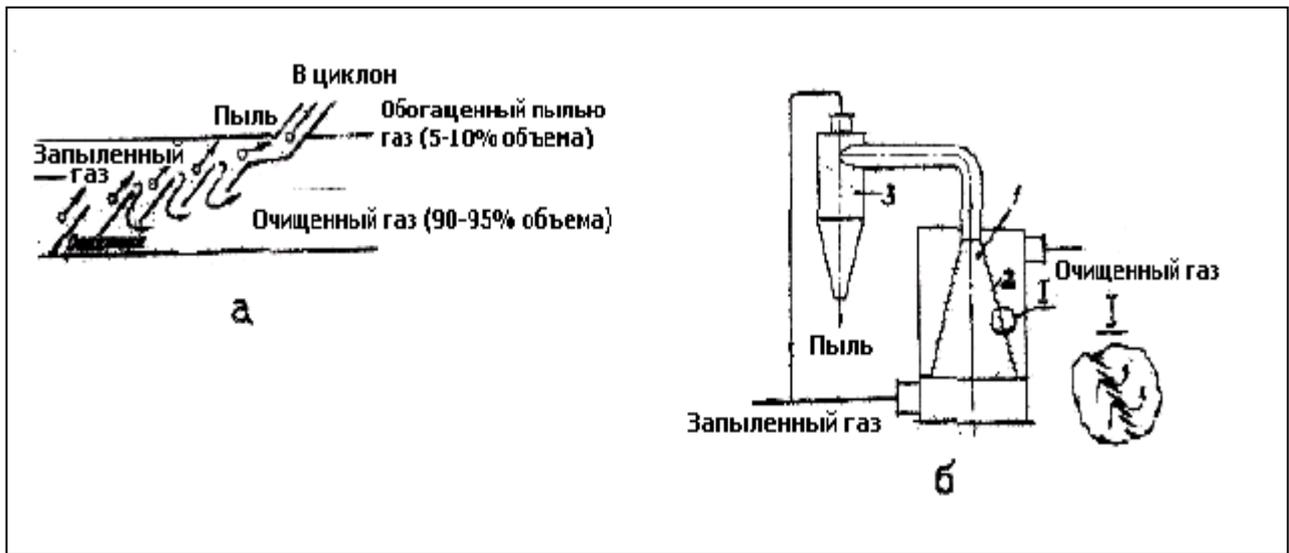
Центробежный пылеуловитель – циклон.

- 1. Штуцер для тангенциального ввода запыленного газа.
- 2. Цилиндрический корпус с коническим днищем.
- 3. Патрубок для вывода очищенного газа.
- 4. Разгрузочный бункер для пыли.



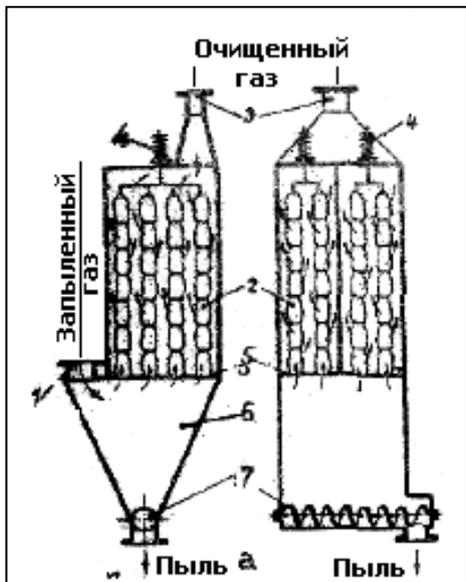
**Рис. 6.** Батарейный циклон /а/, его элементы /б/ и наглядное изображение /в/.

1. Корпус аппарата.
2. Штуцер для ввода запыленного газа.
3. Газораспределительная камера.
4. Верхняя и нижняя трубные решетки.
5. Штуцер для вывода очищенного газа.
6. Корпуса отдельных циклонных элементов.
7. Патрубки циклонных элементов для вывода из последних очищенного газа.
8. Устройства на внешних поверхностях патрубков 7 для закрутки газа внутри элементов.
9. Разгрузочный бункер для пыли.



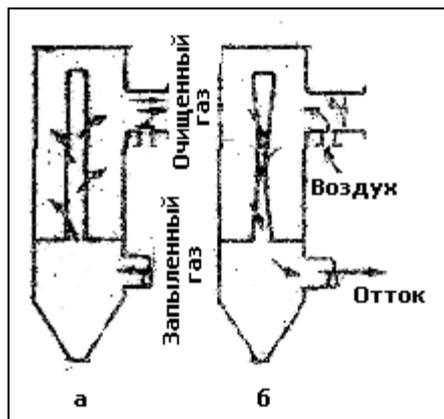
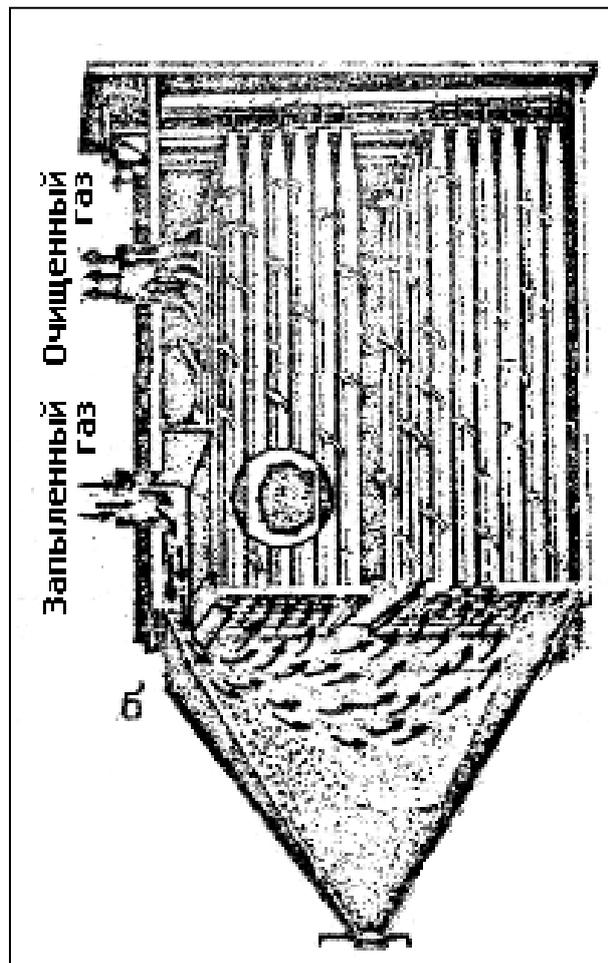
**Рис. 7.** Инерционные жалюзийные пылеуловители: принцип действия /а/, устройство /б/ и золоуловитель ВТИ /в/.

1. Первичный жалюзийный отбойник пыли /сквозь него проходит большая часть газа/. 2. Жалюзи в виде набора наклонных колец или пластин, установленных с зазором 2-3 мм и немного перекрывающих друг друга. 3. Вторичный пылеуловитель - циклон, в который поступает небольшая часть газа с повышенным содержанием пыли.

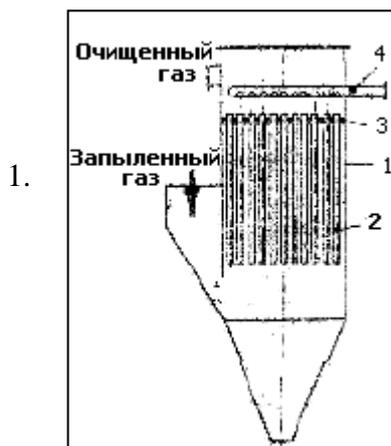


**Рис. 8.** Рукавный фильтр /а/ и его наглядное изображение /б/.

1 и 3. Штуцера для ввода и вывода газа. 2. Матерчатые рукава /мешки/ с кольцами жесткости. 4. Встряхивающие устройства. 5. Трубная решетка для крепления рукавов снизу. 6. Разгрузочный бункер. 7. Шнек для удаления пыли.

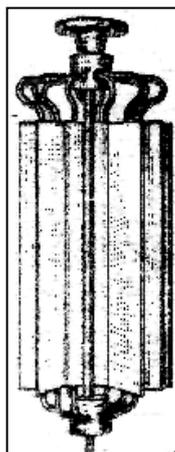


**Рис. 9.** Схема работы рукавного фильтра с удалением пыли из рукавов обратной продувкой атмосферным воздухом. а – период фильтрации; б – период регенерации.



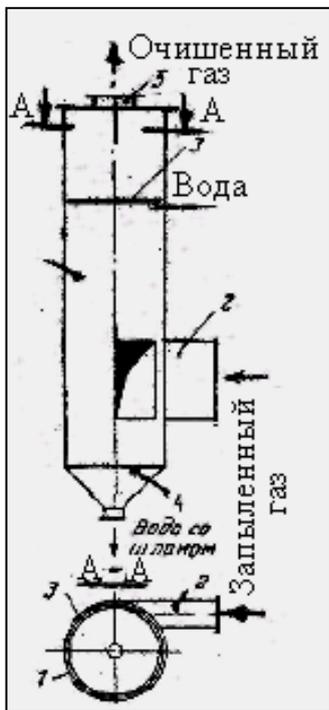
**Рис. 10.** Фильтр с пористыми металлокерамическими патронами.

1. Корпус. 2. Фильтрующие элементы. 3. Трубная решетка. 4. Подвод сжатого воздуха или небольшого количества очищенного газа для регенерации фильтрующих элементов.

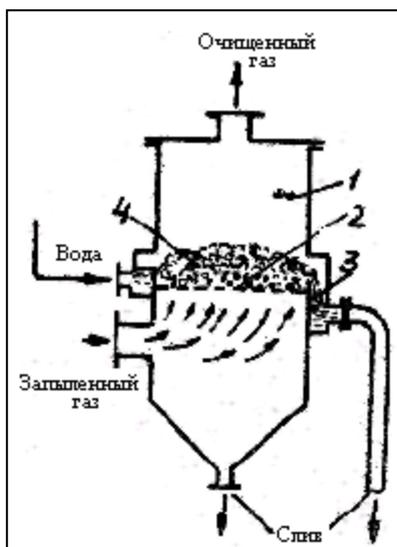


фильтр, имеющий форму звездочки и используемый для очистки от пыли газов, содержащих фтористый водород и имеющих температуру 450-500 °С. /В звездочку входит 8-12 элементов, представляющих собой плоские коробки из листовой пористой металлокерамики/.

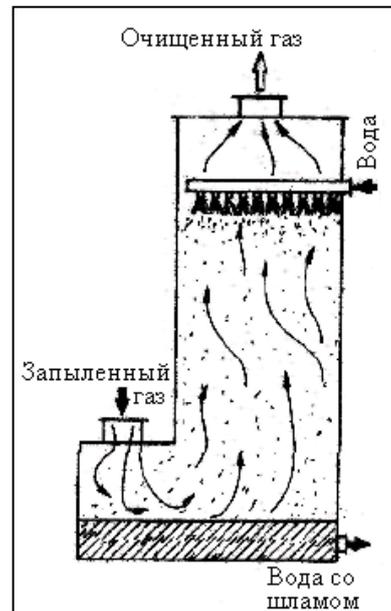
**Рис. 12.** Полюй скруббер для мокрой очистки газа от пыли /В верхней части аппарата устанавливается брызгоуловитель, не показанный на рисунке/.



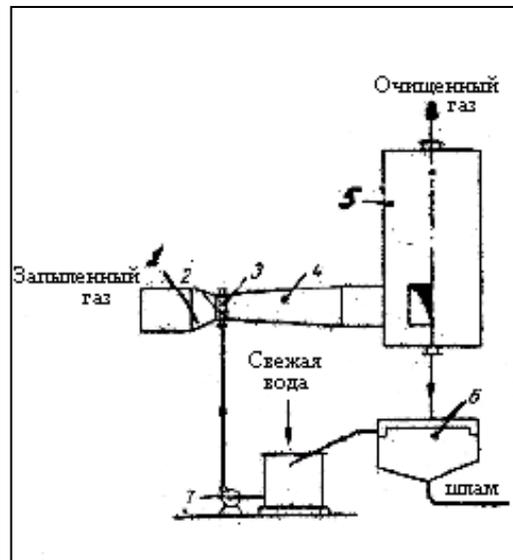
**Рис. 14.** Схема установки скруббера Вентури для мокрого пылеулавливания.  
 1. Конфузор. 2. Горловина. 3. Отверстия для ввода воды. 4. Диффузор. 5. Циклонный брызгоуловитель. 6. Отстойник для осветления воды. 7. Насос для воды.



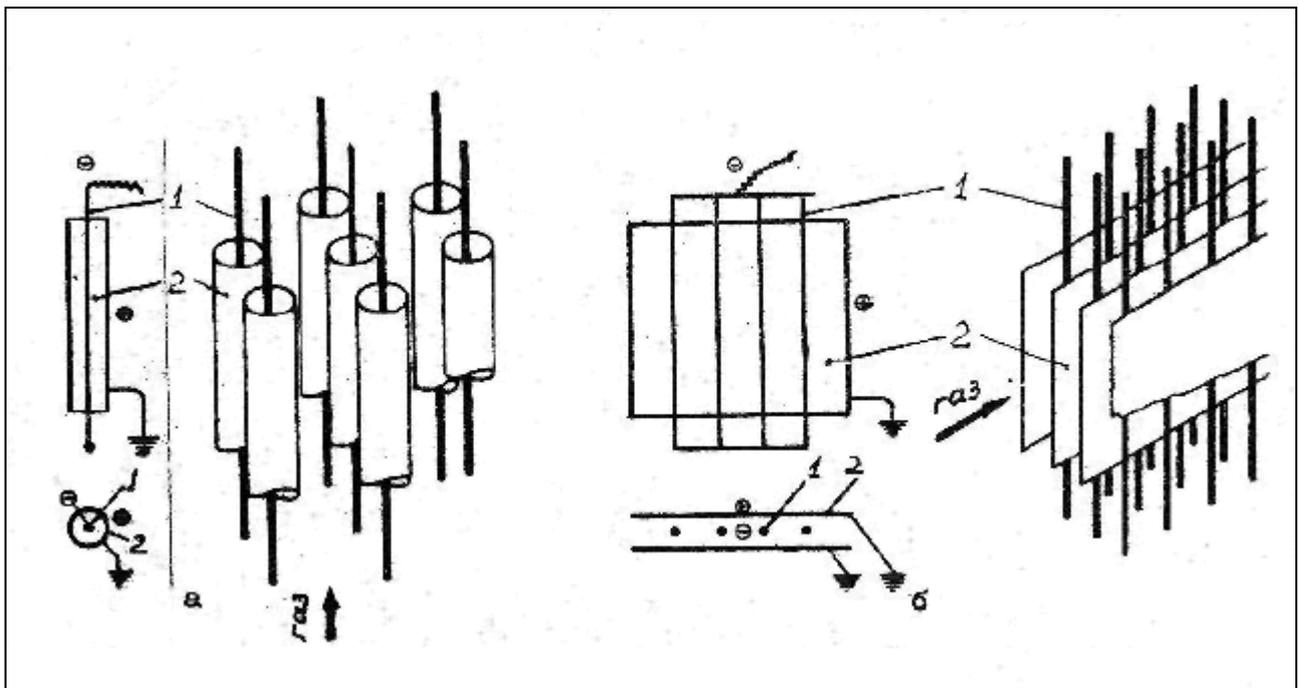
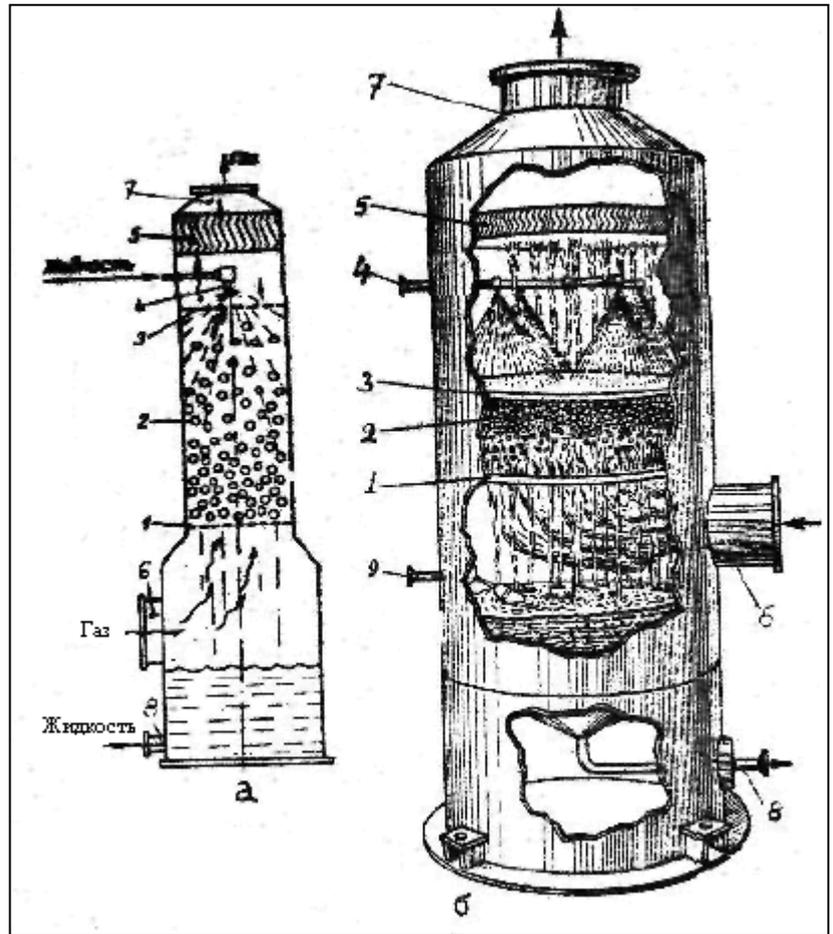
**Рис. 15.** Тарельчатый /пенный/ пылеуловитель.  
 1. Цилиндрический или прямоугольный корпус. 2. Перфорированная тарелка /металлический лист с отверстиями/. 3. Переточный порог. 4. Слой газожидкостной дисперсии /пены/ на тарелке.



**Рис. 13.** Центробежный мокрый скруббер  
 1. Цилиндрический корпус. 2. Тангенциальный ввод газа. 3. Распределитель воды по внутренней стенке циклона. 4. Коническое днище со штуцером для стока воды со шламом. 5. Штуцер для выхода газа.

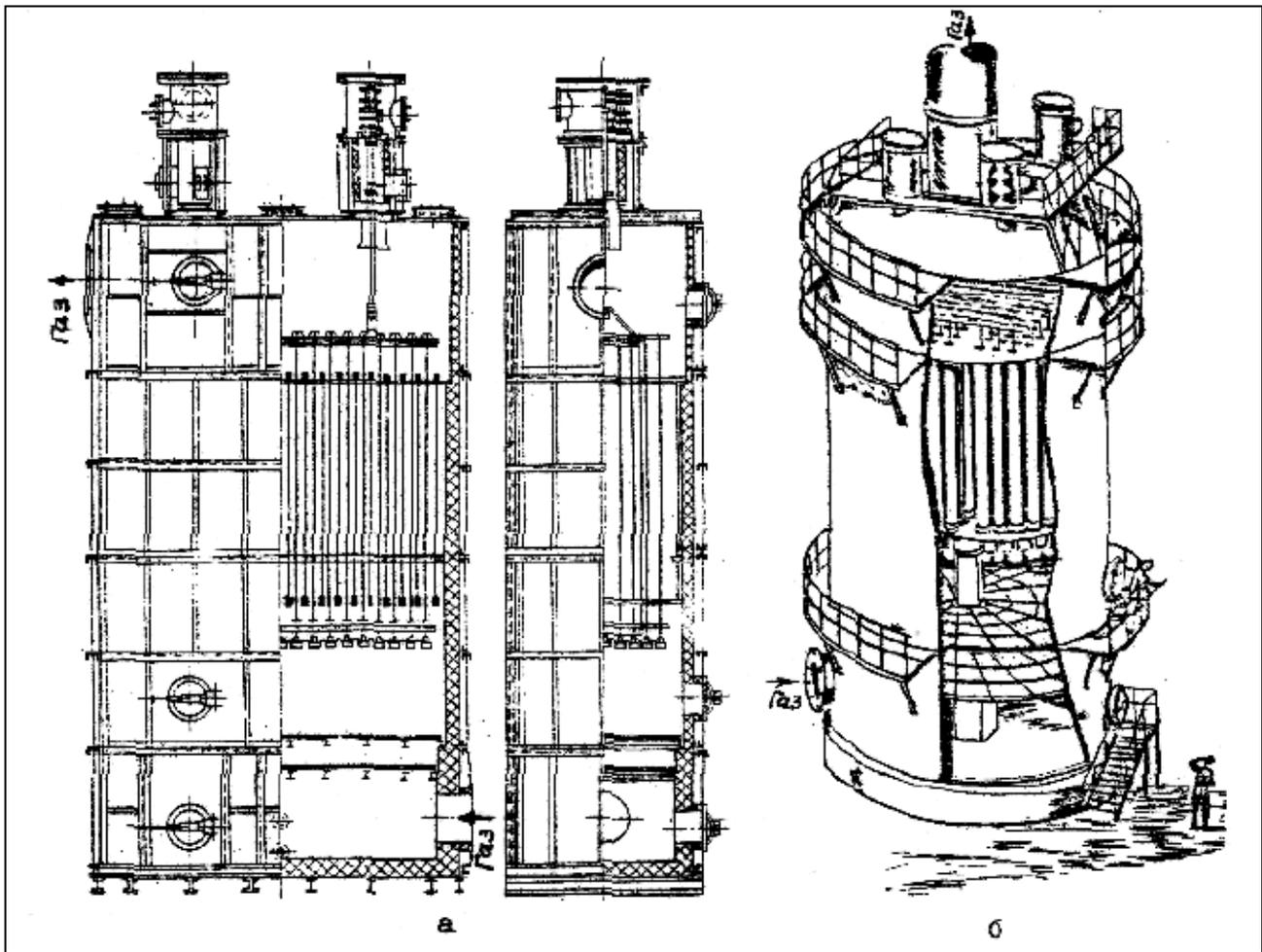
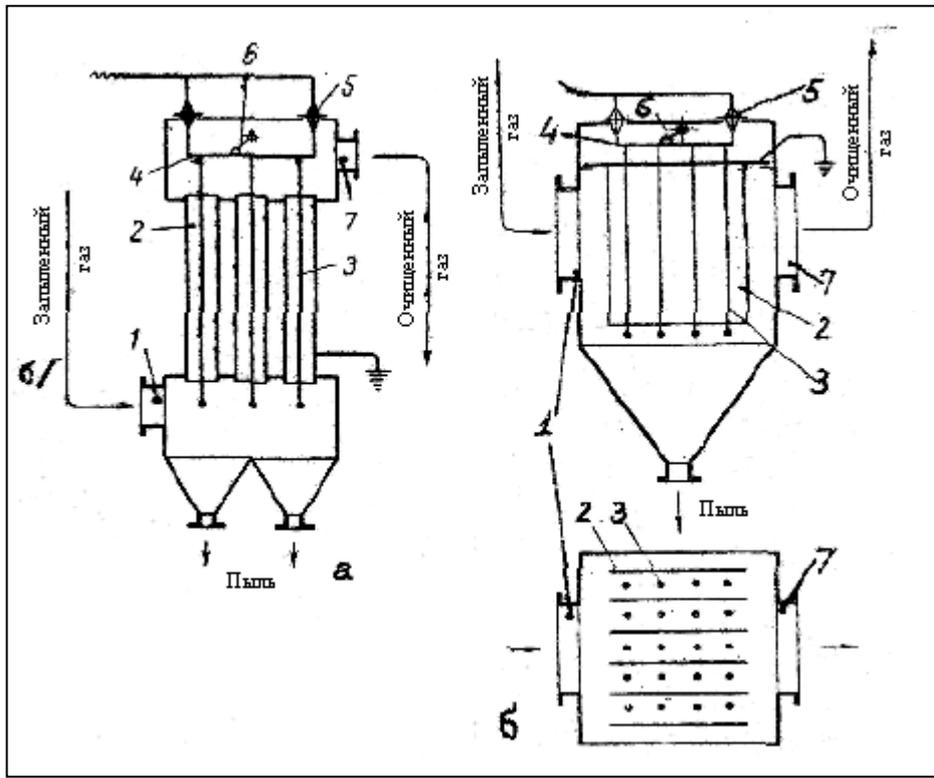


**Рис. 16.** Скруббер с подвижной шаровой насадкой /а/ и его наглядное изображение /б/.  
 1. Опорная тарелка. 2. Шаровая насадка. 3. Ограничительная тарелка. 4. Распределитель жидкости. 5. Брызгоотбойное устройство. 6 и 7. Ввод запыленного и вывод очищенного газа. 8. Вывод загрязненной жидкости. 9. Штуцер, через который вводится поплавковое устройство, обеспечивающее постоянство уровня жидкости в нижней части скруббера.



**Рис. 17.** Формы и расположение электродов электрофильтров –  
 а – трубчатые; б – пластинчатые.  
 1. Коронирующие электроды. 2. Осадительные электроды.

**Рис. 18.** Трубчатый /а/ и пластинчатый /б/ электрофильтры.  
 1 и 7. Штуцера для ввода запыленного и вывода очищенного газа соответственно.  
 2. Осадительные электроды – трубчатый /а/ и пластинчатый /б/.  
 3. Коронирующие электроды. 4. Рама. 5. Изоляторы. 6. Стрягивающее приспособление.



**Рис. 19.** Пластинчатый электрофильтр с прямоугольным корпусом /а/ и трубчатый электрофильтр с цилиндрическим корпусом /б/.

## Показатели работы пылеуловителя

Работу каждого пылеуловителя характеризуют показатели.

1. Характерный размер улавливаемых частиц,  $d_3$  мкм.
2. Потери напора,  $\Delta p$ , Па.
3. Степень очистки /эффект разделения/,  $\eta$  %.
4. Расход электроэнергии, пара, воды.
5. Стоимость аппарата.
6. Стоимость очистки  $1000 \text{ м}^3$  газа.
7. Экологический эффект.

### Степень очистки

Обозначим:

$G_{\text{вх}}$  – количество входящей пыли,

$G_{\text{ул}}$  – количество пыли, уловленной в аппарате,

$G_{\text{вых}}$  – количество пыли, выходящей из аппарата.

Материальный баланс пылеуловителя по пыли:

$$G_{\text{вх}} = G_{\text{ул}} + G_{\text{вых}} \quad /20/$$

Откуда

$$G_{\text{ул}} = G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}$$

Вводим понятие – степень очистки – отношение количества уловленной пыли к количеству входящей пыли:

$$\eta = \frac{G_{\text{ул}}}{G_{\text{вх}}} \cdot 100 = \frac{G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}}{G_{\text{вх}}} \cdot 100\% \quad /21/$$

Количество входящей и выходящей пыли за время  $\tau$ :

$$G_{\text{вх}} = C_{\text{н}} \cdot V_{\text{вх}}; \quad G_{\text{вых}} = C_{\text{к}} \cdot V_{\text{вых}} \quad /22/$$

где  $C$  – концентрация пыли,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Для изотермического процесса объемы входящих и выходящих газов

$$V_{\text{вх}} \approx V_{\text{вых}} \quad /23/$$

Тогда степень очистки

$$\eta = \frac{C_{\text{н}} - C_{\text{к}}}{C_{\text{н}}} \cdot 100\% \quad /24/$$

### Сравнительная оценка пылеуловителей

Гравитационная и инерционная очистки применяются для предварительного /частичного/ отделения пыли от газа. Остальные методы – для окончательной очистки. После окончательной очистки концентрация пыли в газе, который выбрасывается в атмосферу, не должна превышать ПДК. Например, ПДК для табачной и чайной пыли составляет  $3 \text{ мг}/\text{м}^3$ .

Показатели работы некоторых пылеуловителей сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Сравнительная оценка пылеуловителей

Пылеуловитель	$d_p$ мкм	$\Delta p_n$ Па	$\eta$ %
Пылеосадительная камера	70	100-400	40-60
Циклон	5	400-850	70-90
Рукавный фильтр	1	750-1500	94-99
Электрофильтр	0,005	60-250	90-99,9