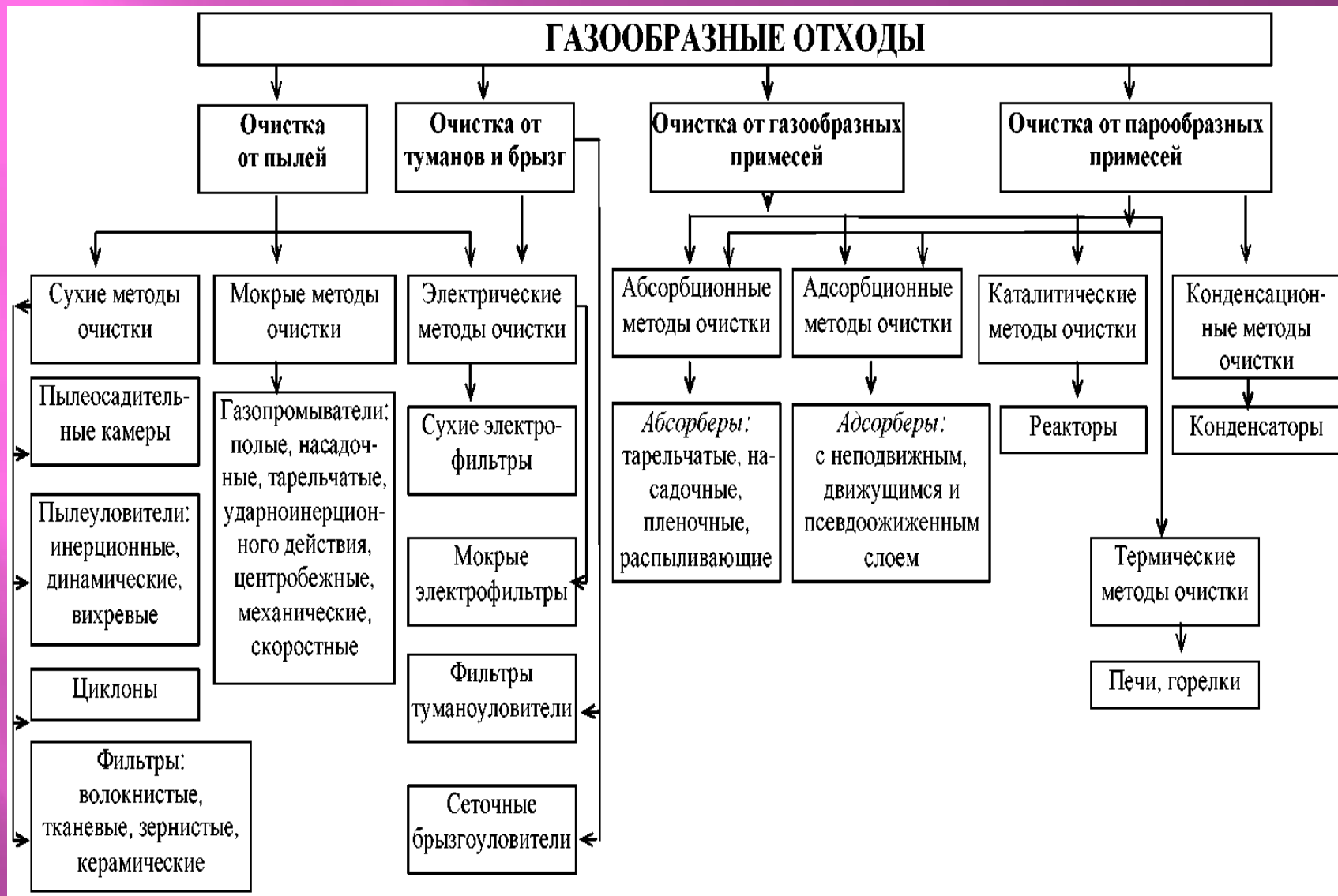


**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА**

**АППАРАТУРНОЕ  
ОФОРМЛЕНИЕ СИСТЕМ  
ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ  
ВЫБРОСОВ**

- ▣ ***Цель работы***

- ▣ *Ознакомление с аппаратами очистки газовых выбросов. Расчет аппарата на примере скруббера.*
- ▣ *Общая классификация аппаратов, применяемых для очистки газовых выбросов от взвешенных и газообразных загрязняющих веществ, приведена на рис. 1*



**Рис. 1 Классификация аппаратов для очистки газовых выбросов**

- Выделяют следующие группы аппаратов, применяемых для очистки газовых выбросов:
- – оборудование для улавливания пыли сухим способом, где осуществляется разделение газовых взвесей под действием внешней механической силы на частицу, через пористые перегородки. Это пылеосадительные камеры, циклоны, пылеуловители, фильтры;
- – оборудование для улавливания пыли мокрым способом, где осуществляется промывка загрязненного газа жидкостью (чаще водой), поглощающей взвешенные в газе частицы. Это скрубберы Вентури, пенные аппараты и др.
- - оборудование для поглощения компонентов из газовых или жидкостей жидкими или твердыми поглотителями. Это абсорберы, адсорберы.
- Рассмотрим по одному представителю из каждой группы аппаратов.

- ▣ Циклонные аппараты (циклоны). Принцип работы циклона показан на рис. 2. Газ вращается внутри циклона, двигаясь сверху вниз, а затем движется вверх. Частицы пыли отбрасываются центробежной силой к стенке. Обычно в циклонах центробежное ускорение в 100–1000 раз больше ускорения силы тяжести, поэтому даже весьма маленькие частицы пыли не в состоянии следовать за газом и под влиянием центробежной силы движутся к стенке.

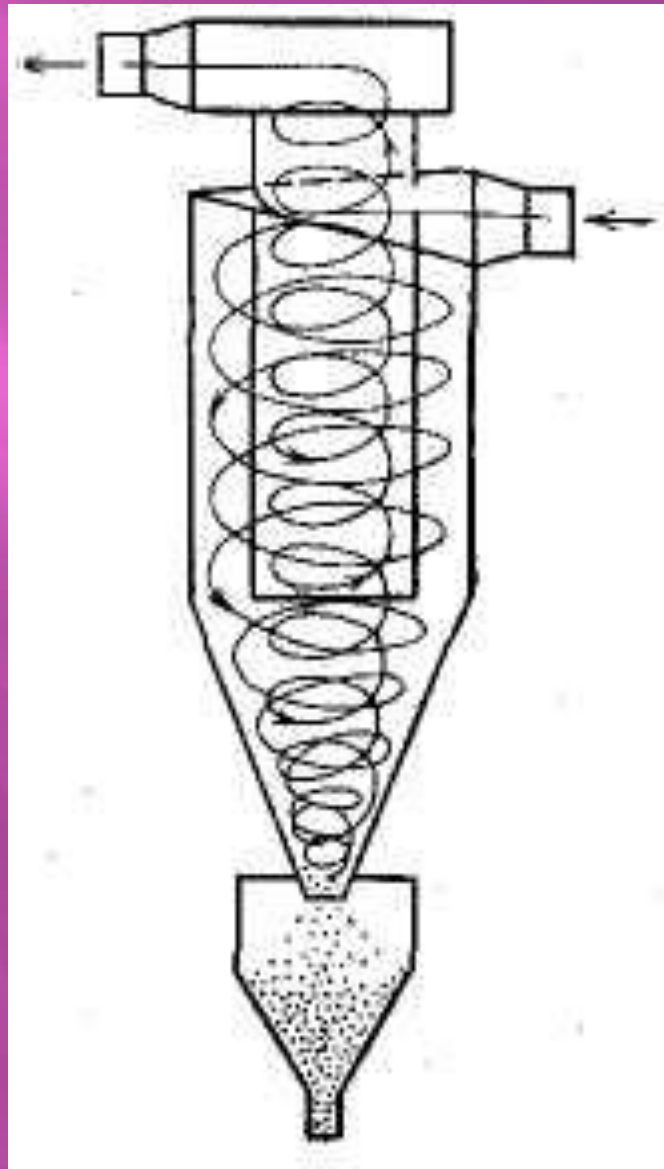


Рис. 2. Схема работы циклона

- ▣ **Достоинства:** 1) отсутствие движущихся частей в аппарате; 2) надежность работы при температурах газов вплоть до 500 °С (для работы при более высоких температурах циклоны изготавливают из специальных материалов); 3) возможность улавливания абразивных материалов при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями; 4) улавливание пыли в сухом виде; 5) почти постоянное гидравлическое сопротивление аппарата; 6) успешная работа при высоких давлениях газов; 7) простота изготовления; 8) сохранение высокой фракционной эффективности очистки при увеличении запыленности газов.
- ▣ **Недостатки:** 1) высокое гидравлическое сопротивление — 1250–1500 Па; 2) плохое улавливание частиц размером менее 5 мкм; 3) невозможность использования для очистки газов от липких загрязнений.

- ▣ Скрубберы. Мокрые газоочистные аппараты (скрубберы) употребляют для предварительной очистки и соответствующей подготовки (кондиционирования) газов, поступающих в газоочистные аппараты других типов, в том числе и сухие (например, в электрофильтры, рукавные фильтры). В качестве орошающей жидкости в мокрых газоочистных аппаратах чаще всего применяется вода.
- ▣ Существуют следующие группы аппаратов мокрой очистки: полые и тарельчатые газопромыватели (например, пенные аппараты (рис. 3)), мокрые аппараты ударно-инерционного действия (ротоклоны) и центробежного действия, скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури).



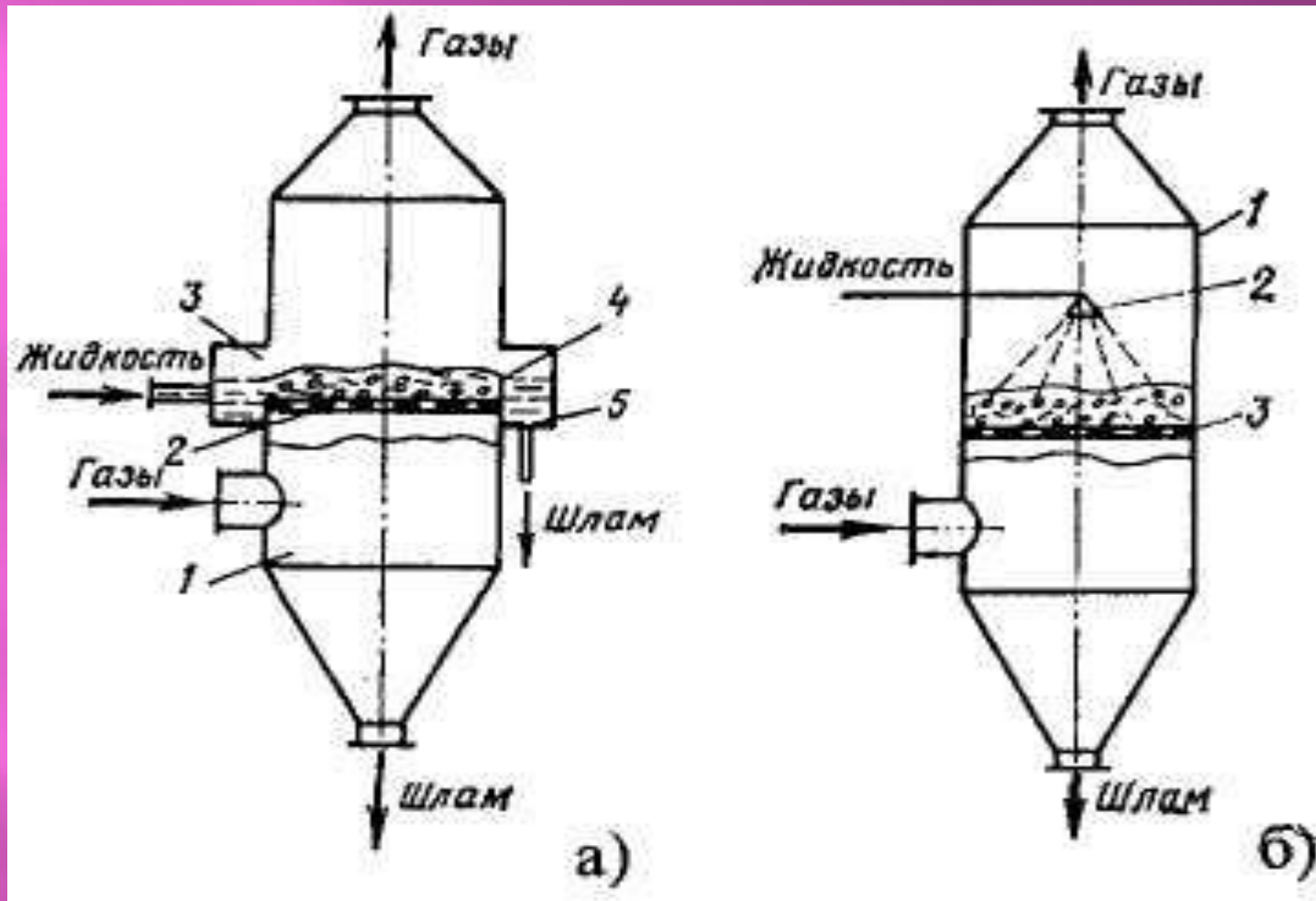


Рис. 3. Пенный пылеуловитель с переливной тарелкой (а, где 1 – корпус; 2 – тарелка; 3 – приемная коробка; 4 – порог; 5 – сливная коробка) и с провальной тарелкой (б, где 1 – корпус; 2 – оросительное устройство; 3 – тарелка)

- ▣ В полых газопромывателях запыленные газы пропускаются через завесу распыленной жидкости. При этом частицы пыли захватываются каплями жидкости и осаждаются.
- ▣ В тарельчатых газопромывателях газы очищаются при прохождении пузырьков их через слой жидкости.
- ▣ Удаление пыли в аппаратах мокрой очистки происходит благодаря смачиванию частичек пыли жидкостью. Процесс протекает тем эффективнее, чем больше поверхность контакта фаз между газом и жидкостью, что достигается, например, диспергированием жидкости на капли или газа на множество пузырей, формирующих пену.

- ▣ Среди аппаратов мокрой очистки газов широкое распространение получили пенные газоочистители ЛТИ. Они бывают однополочные и двухполочные, с отводом воды через сливное устройство над решеткой (рис. 3а) и с полным протеканием воды через отверстия решетки (провальные) (рис. 3б). Аппараты со сливными устройствами позволяют работать при больших колебаниях нагрузки по газу и жидкости. Выбор числа полок зависит главным образом от степени запыленности газа. При содержании пыли в газе не более  $0,02 \text{ кг/м}^3$  следует применять однополочные аппараты.

В табл. 1 приведены основные размеры однополочных аппаратов для очистки газов с отводом воды через сливное устройство. При их расчете определяют площадь поперечного сечения аппарата; расход воды, который требуется для очистки газа; высоты слоя пены и сливного порога, обеспечивающие нормальную работу аппарата.

*Однополочные пенные газоочистители ЛТИ-ПГС (с отводом воды через сливное устройство)*

Таблица 1

Обозначение аппарата	Размеры аппарата			Обозначение аппарата	Размеры аппарата		
	Длина решетки, м	Ширина решетки, м	высота аппарата, м		длина решетки, м	ширина решетки, м	Высота аппарата, м
3	0,55	0,77	2,195	23	1,41	2,38	4,490
5,5	0,74	1,04	2,640	30	1,62	2,72	4,950
10	1,00	1,40	2,920	40	1,87	3,12	5,750
16	1,26	1,76	3,420	50	2,10	3,48	6,030

- ▣ Абсорберы. Рассмотрим насадочные абсорберы. Представляют собой колонны (рис. 4), заполненные насадкой – твердыми телами различной формы, которая служит для увеличения поверхности контакта соприкасающихся фаз – газа и жидкости.
- ▣ В насадочных колоннах обеспечивается хороший контакт обрабатываемых газов с поглотителем, благодаря чему интенсифицируется процесс массопереноса и уменьшаются габариты очистных устройств.

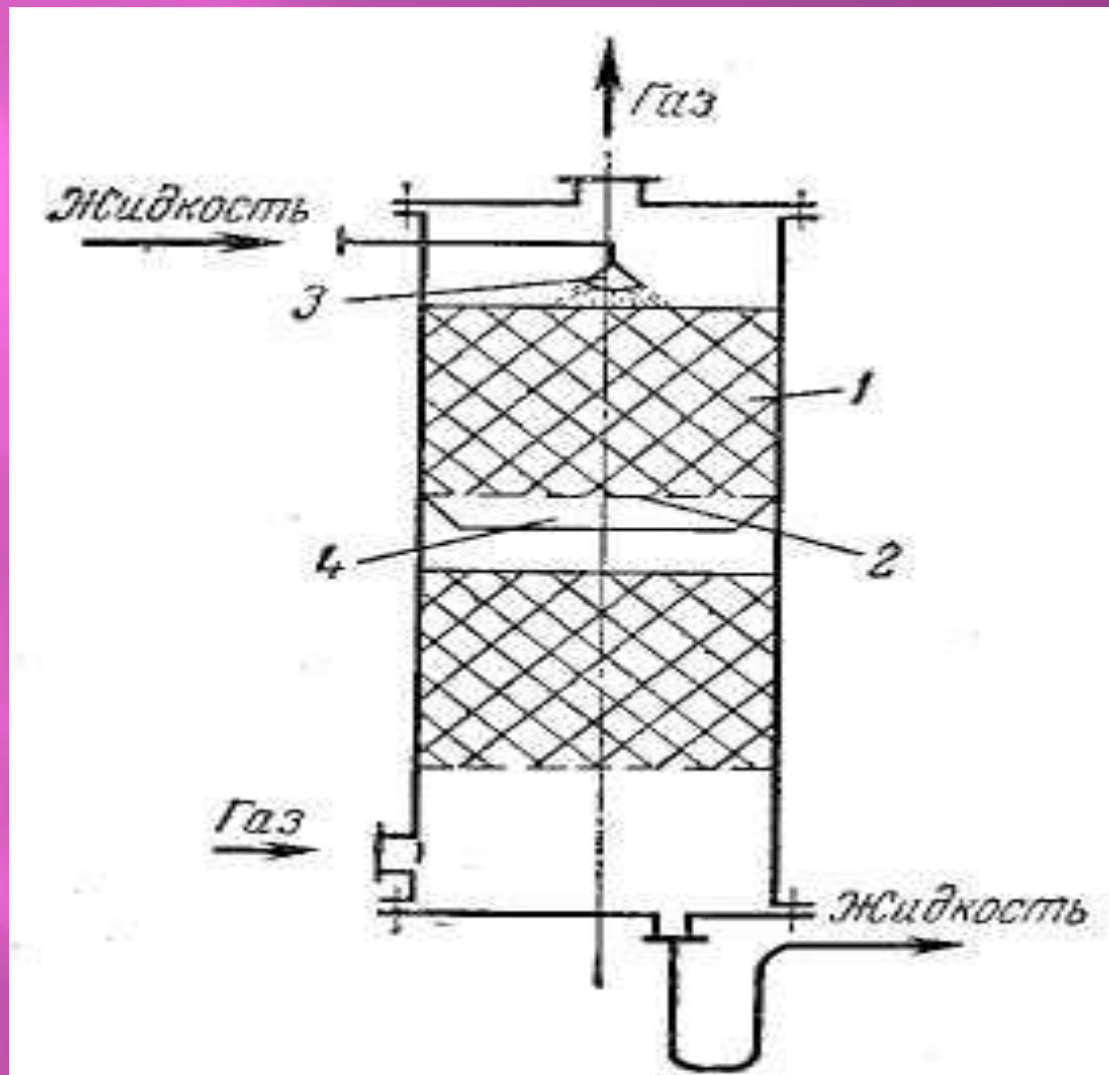


Рис. 4. Насадочный абсорбер:  
1 – насадка; 2 – опорная решетка; 3 – распределитель жидкости; 4 – перераспределитель жидкости

- В насадочной колонне 1 насадка 1 укладывается на опорные решетки 2, имеющие отверстия или щели для прохождения газа и стока жидкости, которая достаточно равномерно орошает насадку с помощью распределителя 3 и стекает по поверхности насадочных тел в виде тонкой пленки вниз. Однако равномерное распределение жидкости по всей высоте насадки по сечению колонны обычно не достигается, что объясняется пристеночным эффектом. Вследствие этого жидкость имеет тенденцию растекаться от центральной части колонны к ее стенкам и практически полностью оттесняется от места ввода абсорбента к периферии колонны на расстоянии, равном четверем-пяти ее диаметрам. Поэтому часто насадку в колонну загружают секциями высотой в четыре-пять диаметров (но не более 3...4 метров в каждой секции), а между секциями (слоями насадки) устанавливают перераспределители жидкости 4, назначение которых состоит в направлении жидкости от периферии колонны к ее оси.

- ▣ Адсорберы. Наибольшее распространение в промышленности нашли адсорберы периодического действия. К аппаратам периодического действия относятся вертикальные, горизонтальные, кольцевые адсорберы, а также выполненные в виде трубчатого теплообменника. Единичная производительность вертикальных однослойных адсорберов обычно не превышает 10000 м<sup>3</sup>/ч. Адсорберы периодического действия могут быть с неподвижным слоем и с кипящим слоем адсорбента.
- ▣ Основным положительным фактором адсорбционных установок периодического действия с неподвижным слоем адсорбента является отсутствие в них истирания частиц сорбента в результате трения одна о другую и о стенки аппарата, трубопровода и т.п. В адсорберах периодического действия достигается достаточно высокая степень очистки и осушки газов, подаваемых в аппарат.



- ▣ Основными недостатками адсорберов периодического действия являются небольшие скорости газового потока в шихте и относительно малая доля сорбента, активно участвующего в процессе (зона массопередачи, как правило, значительно меньше общей толщины слоя). Кроме того, большое сечение горизонтальных адсорберов не обеспечивает равномерности распределения парогазовых потоков по сечению и, следовательно, и полноты использования адсорбционной емкости сорбента.
- ▣ Поэтому вертикальные адсорберы по сравнению с горизонтальными более рациональны в использовании. Адсорберы горизонтальной конструкции целесообразно применять при очистке больших количеств газа от хорошо сорбирующихся примесей.

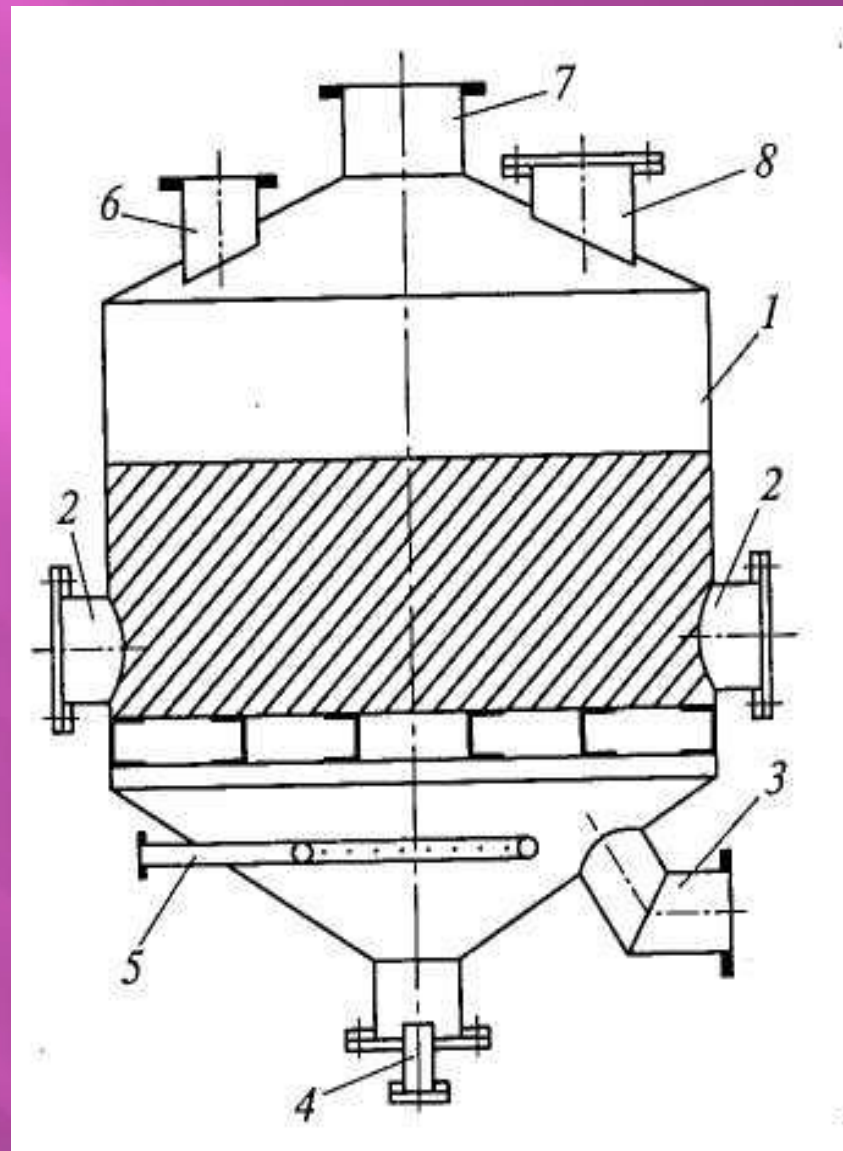


Рис. 5. Схема адсорбера периодического действия с неподвижным слоем поглотителя: 1 – емкость; 2 – люк; 3, 4, 5 – патрубки; 6, 7, 8 – штуцеры

- ▣ Адсорберы периодического действия чаще всего представляют собой вертикально установленную цилиндрическую емкость 1, заполненную адсорбентом, подаваемым через штуцер 8 и выгружаемым после окончания срока службы через люки 2 (рис. 5)
- ▣ Такие аппараты работают периодически, причем полный цикл их работы сводится обычно к четырем стадиям.

- ▣ 1. **Собственно адсорбция** – насыщение поглотителя адсорбируемым компонентом. Исходная смесь подается через штуцер 7 и отводится через патрубок 3.
- ▣ 2. **Десорбция** – выделение поглощенного компонента из адсорбента, осуществляемое путем подачи через патрубок 5 регенерирующего пара. Отвод паров при десорбции и конденсата осуществляется через штуцер 6 и патрубок 4.
- ▣ 3. **Сушка адсорбента** – удаление остатка конденсата (образовавшегося на стадии десорбции за счет воздействия регенерирующего пара) из адсорбента горячим воздухом, подаваемым через штуцер 7.
- ▣ 4. **Охлаждение адсорбента** – поскольку активность адсорбента повышается с уменьшением его температуры, после сушки он обрабатывается холодным воздухом, который также подается через штуцер 7.

# Методика расчета скрубберов

Расчеты скрубберов рекомендуется проводить в следующем порядке:

- ▣ *Выбор расчетной скорости газа.* Скорость газа в аппарате – один из важнейших факторов, определяющих эффективность работы аппарата. Допустимый диапазон фиктивных скоростей составляет 0,5 – 3,5 м/с. Однако при скоростях выше 2 м/с начинается сильный брызгоунос и требуется установка специальных брызгоуловителей.
- ▣ При скоростях меньше 1 м/с возможно сильное протекание жидкости через отверстия решетки, вследствие чего высота слоя пены снижается, а жидкость может не полностью покрывать поверхность решетки. Для обычных условий рекомендуемая скорость  $\omega = 2$  м/с.

## Определение формы и площади сечения аппарата.

- ▣ Площадь сечения  $S$ ,  $\text{м}^2$ , равна:
- ▣  $S = Q_{\text{H}}/\omega$ , (1)
- ▣ где  $Q_{\text{H}}$  – расход газа, поступающего в аппарат при рабочих условиях,  $\text{м}^3/\text{с}$ .
- ▣ Газоочиститель может быть круглого или прямоугольного сечения. В первом случае обеспечивается более равномерное распределение газа, во втором – жидкости. При выборе аппарата прямоугольного сечения длину и ширину решетки находят с помощью табличных данных.

## *Определение расхода поступающей воды.*

- ▣ Для холодных и сильно запыленных газов расход определяется из материального баланса пылеулавливания, для горячих газов – из теплового баланса. В сомнительных случаях выполняют оба расчета и выбирают наибольший из полученных значений расход. Обычно газ можно рассматривать как холодный, если его температура ниже  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- ▣ Расход поступающей воды  $L$ , кг/с, рассчитывают, исходя из материального баланса пылеулавливания:
- ▣  $L = L_y + L_{сл}, \quad (2)$
- ▣ где  $L_y$  – расход воды, стекающей через отверстия в решетке (утечка), кг/с;
- ▣  $L_{сл}$  – расход воды, стекающей через сливной порог, кг/с.



▣ Величина  $L_y$  (кг/с), определяется массовым расходом уловленной пыли  $G_{п}$ , (кг/с), концентрацией пыли в утечке  $X_y$ , (кг) пыли на кг воды, коэффициентом распределения пыли между утечкой и сливной водой  $K_p$ , выраженным отношением расхода пыли, попадающей в утечку, к общему расходу уловленной пыли:

▣ 
$$L_y = G_{п} \cdot K_p / X_y. \quad (3)$$

▣ Расход уловленной пыли  $G_{п}$ , кг/с, может быть определен по соотношению:

▣ 
$$G_{п} = Q_n \cdot C_n \cdot \eta, \quad (4)$$

▣ где  $C_n$  – начальная концентрация пыли в газе, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – заданная степень пылеулавливания, доли единицы.

▣ Коэффициент распределения  $K_p$  находится в диапазоне 0,6 – 0,8; в расчетах обычно принимают  $K_p = 0,7$ .

- ▣ Концентрация пыли в утечке изменяется от  $X_y = 0,2$  (для не склонных к слипанию минеральных пылей) до  $X_y = 0,05$  (для цементирующихся пылей).
- ▣ Поскольку в утечку попадает больше пыли, чем в воду, стекающую через сливной порог, то для уменьшения общего расхода воды целесообразно уменьшать величину  $L_{сл}$ . Однако слишком сильная утечка создает неравномерность высоты слоя воды на решетке. Поэтому в расчетах рекомендуется принимать  $L_{сл} = L_y$ . Исходя из этого, выражение (2) приводится к виду:
- ▣ 
$$L_y = 2 \cdot G_p \cdot K_p / X_y. \quad (5)$$

## Определение типа решетки

- В задачу этого этапа расчета входит выбор типа перфорации (круглые отверстия или щели), диаметра отверстия  $d_o$  или ширины щели  $b_{щ}$  и шага между ними  $t$ . Форму отверстий выбирают из конструктивных соображений, а их размер – исходя из вероятности забивки пылью. Обычно принимают  $b_{щ} = 2 - 4$  мм,  $d_o = 2 - 6$  мм. Затем выбирают такую скорость газа в отверстиях  $\omega_o$ , которая обеспечит необходимую величину утечки. При диаметрах отверстий  $d_o = 2 - 3$  мм скорость газа  $\omega_o$  должна составлять  $6 - 8$  м/с, а при  $d_o = 4 - 6$  мм  $\omega_o = 10 - 13$  м/с.

- ▣ Далее рассчитывают долю свободного сечения решетки  $S_0$ , отвечающую выбранной скорости:
- ▣  $S_0 = \omega / (\omega_0 \cdot \varphi), \quad (6)$
- ▣ где  $\varphi$  – отношение перфорированной площади решетки к площади сечения аппарата ( $\varphi = 0,9 - 0,95$ ).

- Исходя из величины  $S_0$  определяют шаг  $t$ , м, между отверстиями в зависимости от способа разбивки отверстий на решетке. При разбивке по равностороннему треугольнику:

- $$t = d_0 \cdot \sqrt{0,91 / S_0} \quad (7).$$

- Толщину решетки  $\delta$  выбирают по конструктивным соображениям. Минимальному гидравлическому сопротивлению отвечает  $\delta = 5$  мм.

## Определение высоты слоя пены и сливного порога

- ▣ Высоту порога на сливе с решетки устанавливают исходя из создания слоя пены такой высоты, которая обеспечила бы необходимую степень очистки газа.
- ▣ Первоначально определяют коэффициент скорости пылеулавливания  $K_{п}$ , м/с:
- ▣ 
$$K_{п} = 2 \cdot \eta \cdot \omega / (2 - \eta), \quad (8)$$
- ▣ где  $\eta$  – заданная степень очистки газа от пыли.

□ Связь между  $K_p$  и высотой слоя пены  $H$ , м, при улавливании водой гидрофильной пыли выражается следующим эмпирическим уравнением:

$$\square H = K_p - 1,95 \omega + 0,09, \quad (9)$$

□ где величины  $K_p$  и  $\omega$  имеют размерность м/с.

□ Далее определяют высоту исходного слоя воды на решетке  $h_0$ , м:

$$\square h_0 = 1,43 \cdot H^{1,67} \cdot \omega^{-0,83}. \quad (10)$$

- ▣ Высоту порога  $h_{\text{п}}$ , м, рассчитывают по эмпирической формуле:

- ▣ 
$$h_{\text{п}} = 2,5 \cdot h_0 - 0,0176 \cdot \sqrt[3]{i^2} \quad (11)$$

- ▣ где  $i$  – интенсивность потока на сливе с решетки, кг/(м·с), определяемая как:

- ▣ 
$$i = L_{\text{сл}}/b_c, \quad (12)$$

- ▣ где  $b_c$  – ширина сливного отверстия. При прямоугольном сечении аппарата  $b_c$  равна ширине решетки.



## Пример

- ▣ Рассчитать пенный аппарат для очистки газа  $Q_H = 48000 \text{ м}^3/\text{ч}$  от гидрофильной (не склонной к слипанию) пыли. Температура газа  $t = 60^\circ\text{C}$ . Запыленность газа на входе в аппарат  $C_H = 0,008 \text{ кг/м}^3$ , требуемая степень очистки  $\eta = 0,99$ . Очистка производится водой.
- ▣ Выбираем газоочиститель системы ЛТИ и принимаем рабочую скорость газа (на все сечение аппарата)  $\omega = 2 \text{ м/с}$ .

- ▣ Рассчитываем по (1) площадь сечения аппарата:
- ▣  $S = 48000 / (3600 \cdot 2) = 6,67 \text{ м}^2$ .
- ▣ По табл.1 выбираем аппарат ЛТИ-ПГС-50, имеющий решетку длиной 2,1м, шириной 3,48м. Сечение аппарата:
- ▣  $S = 2,1 \cdot 3,48 = 7,3 \text{ м}^2$ .
- ▣ Фактическая скорость газа:
- ▣  $\omega = 48000 / (3600 \cdot 7,3) = 1,82 \text{ м/с}$ .
- ▣ Определяем по формуле (4) расход уловленной пыли:
- ▣  $G_{\text{п}} = 48000 \cdot 0,008 \cdot 0,99 / 3600 = 0,106 \text{ кг/с}$ .

- ▣ Принимаем коэффициент распределения  $K_p = 0,7$  и концентрацию пыли в утечке  $X_y = 0,15$  кг пыли/кг воды.
- ▣ Тогда расход поступающей воды по формуле (5) составит:
- ▣  $L = 2 \cdot 0,106 \cdot 0,7 / 0,15 = 0,989$  кг/с.
- ▣ Выберем решетку с круглыми отверстиями диаметром  $d_0 = 4$  мм. Тогда скорость газа в отверстиях должна быть равна  $\omega_0 = 10$  м/с. По выражению (6) доля свободного сечения решетки  $S_0$  при  $\varphi = 0,95$  равна:
- ▣  $S_0 = 1,82 / (10 \cdot 0,95) = 0,192$ .

- Если принять, что отверстия располагаются по равностороннему треугольнику, то шаг между отверстиями в соответствии с (7) составит (м) :

$$t = 0,004 \cdot \sqrt{0,91/0,192} = 0,0087$$

- Толщину решетки примем равной  $\delta = 5$  мм.
- Определим по уравнению (8) коэффициент скорости пылеулавливания:
- $K_p = 2 \cdot 0,99 \cdot 1,82 / (2-0,99) = 3,57$  м/с.
- Тогда высота слоя пены на решетке в соответствии с (9) равна:
- $H = 3,57 - 1,95 \cdot 1,82 + 0,09 = 0,11$  м.

- ▣ Высота исходного слоя воды на решетке по формуле (10):
- ▣  $h_0 = 1,43 \cdot 0,11^{1,67} \cdot 1,82^{-0,83} = 0,0218$  м.
- ▣ Интенсивность потока на сливе с решетки найдем по соотношению (12) с учетом того, что ширина сливного отверстия равна ширине решетки, а  $L_{сл} = L/2$ :
- ▣  $i = 0,989 / (2 \cdot 3,48) = 0,142$  кг/(м·с).
- ▣ Высота сливного порога по (11) будет равна:

$$h_{\Pi} = 2,5 \cdot 0,0218 - 0,0176 \cdot \sqrt[3]{0,142^2} = 0,05 \quad \text{▣} \quad \text{м.}$$

# Задание

- ▣ Рассчитать пенный аппарат для очистки газа от гидрофильной, не склонной к слипанию, пыли при следующих исходных данных в соответствии с вариантом индивидуального задания (табл. 2). Очистка производится водой.

# Исходные данные

## Таблица 2

№ варианта	Расход поступающего в аппарат газа $Q_{г}$ , м <sup>3</sup> /ч	Запыленность газа на входе в аппарат, $c_{г}$ , кг/м <sup>3</sup>	Требуемая степень очистки $\eta$
1	2	3	4
1	35000	0,006	0,985
2	38000	0,007	0,99
3	40000	0,008	0,995
4	43000	0,006	0,985
5	45000	0,007	0,99
6	48000	0,008	0,995
7	50000	0,006	0,985
8	44000	0,007	0,99
9	49000	0,008	0,995
10	49000	0,006	0,985
11	35000	0,007	0,99
12	38000	0,008	0,995
13	40000	0,006	0,985
14	43000	0,007	0,99
15	45000	0,008	0,995

16	48000	0,006	0,985
17	50000	0,007	0,99
18	41000	0,008	0,995
19	46000	0,006	0,985
20	39000	0,007	0,99
21	35000	0,008	0,995
22	38000	0,006	0,985
23	40000	0,007	0,99
24	43000	0,008	0,995
25	45000	0,006	0,985
26	48000	0,007	0,99
27	50000	0,008	0,995
28	42000	0,006	0,985
29	47000	0,007	0,99
30	36000	0,008	0,995



# Контрольные вопросы

- По какому принципу классифицируют аппараты, применяемые для очистки газовых выбросов? Приведите классификацию газоочистного оборудования.
- Опишите принцип действия циклонного аппарата.
- Опишите принцип действия скруббера.
- Опишите принцип действия насадочного абсорбера.
- Опишите принцип действия адсорбера периодического действия.
- Составьте материальный баланс газоочистного аппарата на примере скруббера.
- Какие балансы и в каких случаях используют при расчете скрубберов?
- Покажите связь между коэффициентом скорости пылеулавливания  $K_p$  и высотой слоя пены  $H$ .
- Какие основные геометрические параметры определяются при расчете скрубберов?
- Как площадь сечения скруббера  $S$  связана с расходом газа, поступающего в аппарат?