

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**В.А. Пронин, В.О. Мамченко, О.В. Долговская,
В.А. Цветков**

ОЧИСТКА И ДЕЗОДОРАЦИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлению подготовки (специальности)

**16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения в
качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2022

УДК 66.074.5

Пронин В.А., Мамченко В.О., Долговская О.В., Цветков В.А. Очистка и дезодорация газоздушных выбросов. – СПб: Университет ИТМО, 2022. – 156 с.

Рецензент: Цыганков Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор, ординарный профессор факультета энергетики и экотехнологий

В издании изложены основные теоретические материалы способов очистки и дезодорации газоздушных выбросов, таких как сухое обеспыливание, мокрое обеспыливание, адсорбция, абсорбция, специальные методы очистки газов и дезодорация газоздушных выбросов. Приведен порядок расчета таких элементов газоочистных систем как фильтры и вентиляторы, даны рекомендации по расчету систем очистки газов. Даны общие требования к проектам установок и правила эксплуатации систем очистки воздуха.

Издание может быть использовано в качестве учебного пособия для магистрантов направления подготовки 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения по учебной дисциплине «Системы и технологии очистки воздуха».

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию: ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

ISBN 978-5-7577-0668-9

© Университет ИТМО, 2022

© В.А. Пронин, В.О. Мамченко, О.В. Долговская, В.А. Цветков, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1.КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ. МЕТОДЫ ОЧИСТКИ	7
2.МЕХАНИЧЕСКОЕ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ	11
3.СУХИЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ	13
3.1. Виды сухих пылеуловителей	13
3.2. Расчет скорости осаждения.....	14
3.3. Расчет камеры пылеотделения.....	16
3.4. Циклоны	18
3.5. Расчет циклонов	20
3.6. Оценка эффективности циклонов.....	25
4.МОКРЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ.....	30
4.1. Типы мокрых пылеуловителей	30
4.2. Скрубберы Вентури	33
4.3. Расчет скруббера Вентури.....	35
5.ФИЛЬТРЫ.....	38
3.1. Виды фильтров	38
5.2. Характеристики некоторых фильтров и фильтрующих материалов..	48
5.2. Ячейковые фильтры.....	50
5.3. Рулонные фильтры.....	53
5.4. Рукавные фильтры	54
5.5. Гидравлическое сопротивление тканевых фильтров	58
5.6. Электрофильтры.....	60
5.7. Расчет электрофильтров	64
6. АДСОРБЦИЯ.....	69
6.1. Общие сведения.....	69
6.1. Теория процесса и методика расчета адсорберов.....	73
6.2. Расчет адсорберов с неподвижным слоем адсорбента.....	79
6.3. Капиллярная конденсация.....	84
7.АБСОРБЕРЫ.....	86
7.1. Общие сведения.....	86
7.2. Конструкции и принцип действия абсорберов	88
7.3. Виды насадочных элементов и их особенности	96
7.4. Основные гидродинамические режимы работы насадочных абсорберов	102
7.5. Расчет насадочных абсорберов.....	106
7.6. Расчет тарельчатых колонн.....	114
7.7. Особенности расчета абсорберов с псевдоожиженной насадкой	117
7.5. Расчет пленочных абсорберов	119
8.СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВ.....	122
8.1. Хемосорбция.....	122
8.2. Термокаталитическая очистка газовых выбросов	122
8.3. Термические методы очистки газов.....	123
8.4. Каталитический метод очистки газов	126

8.5. Методы конденсации и компримирования	127
9. ДЕЗОДОРАЦИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ	128
9.1. Способы дезодорации воздушных потоков в системах жизнеобеспечения.....	128
9.2. Особенности применения абсорбционных методов газоочистки и дезодорации газо-воздушных смесей	129
9.3. Перспективные разработки систем дезодорации газовых смесей.....	130
10. ВЕНТИЛЯТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ГАЗООЧИСТКИ	135
10.1. Подбор вентиляторов по аэродинамическим Характеристикам.....	138
10.2. Расчет мощности привода вентилятора.....	141
11. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТАМ УСТАНОВОК И ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА.....	143
11.1. Общие требования.....	143
11.2. Оценка надежности систем очистки воздуха.....	145
11.2. Требования к эксплуатации и обслуживанию сухих механических Пылеуловителей	146
11.3. Требования к эксплуатации и обслуживанию мокрых механических пылеуловителей.....	146
11.4. Требования к эксплуатации и обслуживанию промышленных фильтров.....	147
11.5. Требования к эксплуатации и обслуживанию электрических пылеуловителей.....	148
11.6. Требования к эксплуатации и обслуживанию аппаратов сорбционной очистки газа	148
11.7. Требования к эксплуатации и обслуживанию аппаратов термической и термокаталитической очистки газа	149
12. ОБЩАЯ ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ОЧИСТКИ	150
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	172

ВВЕДЕНИЕ

Производственная деятельность человека практически всегда связана с загрязнением водной и воздушной сред. К основным источникам загрязнений атмосферного воздуха можно отнести ТЭЦ, сжигающие уголь высокой зольности, горнодобывающую промышленность, металлургические предприятия, сельскохозяйственное производство, цементные заводы, транспорт и другие отрасли хозяйственной деятельности. К примеру, тепловые станции ежегодно выбрасывают в атмосферу до 30% всех вредных отходов промышленности – углекислого газа CO_2 , оксидов азота NO_2 , NO_3 , серы SO_2 , SO_3 и др. В процессе выплавки чугуна выброс пыли составляет более 20 млн т в год, при производстве цемента – более 50 млн. т, при сжигании каменного угля – более 90 млн. т. После взрыва средней мощности при разработке полезных ископаемых в карьерах в атмосферу выбрасывается более 150 т пыли и около 2000 м³ условного оксида углерода. Аэрозольные частицы в своем составе могут содержать соединения углерода, кальция, кремния, азота, фтора, серы. Так, в атмосферу Санкт-Петербурга ежегодно поступает 74 тыс. т оксида серы, 47 тыс. т оксида азота, 41 тыс. тонн оксида углерода. Взаимодействуя с кислородом и азотом атмосферы, они способствуют образованию кислотных осадков, негативно влияющих на здоровье населения, растительный и животный мир, здания и сооружения.

Весомый вклад в загрязнение воздушного бассейна вносит транспорт. В ряде курортных городов России выбросы в воздух вредных веществ от автотранспорта составляют 80–85% от их общего объема. В целом на долю автотранспорта приходится свыше 30% угарного газа CO , оксидов азота, обладающих токсическими свойствами. В сумме это составляет около 7 млн. т в год. На диаграмме (рис. 1.1) представлен состав выхлопных газов автомобиля.

Ежегодно в атмосферу Земли выбрасывается (в млн. т): пыли – 250; оксида углерода – 200; диоксида серы – 150; диоксида углерода – 20 000, а также целый ряд и другие загрязнения.

Известно, что в настоящее время загрязнение воздуха в сельской местности примерно в 10 раз, а на селитебной территории – в 150 раз выше, чем в атмосфере открытого океана.

Предприятия химической промышленности, животноводческие фермы, птицефабрики, заводы костной муки, рыбокомбинаты, объекты городской инфраструктуры, работа которых направлена на очистку сточных вод и бытовых отходов, а также иные предприятия являются источниками дурнопахнущих летучих соединений, которые представляют собой спектр различных веществ неорганического и органического происхождения. К данным веществам следует отнести сероводород, азотосодержащие органические вещества, легкие меркаптаны, аммиак, ароматические углеводороды, органические кислоты, и др. Наличие этих веществ в окружающем воздухе вызывает острую реакцию человеческого организма и последующий дискомфорт.

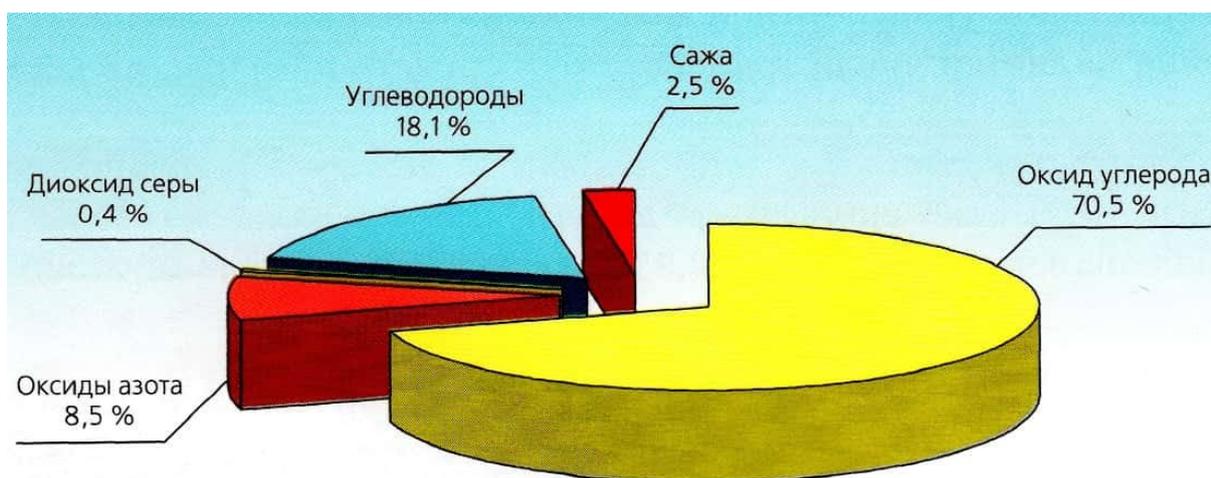


Рис. 1.1. Содержание вредностей в выхлопных газах автомобилей

Особое внимание следует уделить как безопасности воздушной среды, так и наличию в ней веществ, вызывающих неприятный запах (одорантов), ввиду повышенных требований к комфортности проживания в современных населенных пунктах [1].

Загрязнение окружающей среды крайне негативно отражается на энергетическом балансе планеты, нарушая природное равновесие и угрожая здоровью населения. Так, в 40-х годах прошлого столетия академик В.И. Вернадский подчеркивал, что производственная деятельность человека приобрела такие масштабы, которые можно сравнить с геологическими преобразованиями. Свидетельством тому служат такие явления, как парниковый эффект, глобальное изменение климата на планете, наблюдаемое в последнее время, и др.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ. МЕТОДЫ ОЧИСТКИ

Все выбросы в соответствии с ГОСТ 17.2.1.01-76 (действует по настоящее время) классифицируются по следующим признакам.

1. По организации отвода и контроля:

– организованные (линейные или точечные), поступающие в атмосферу через специально сооруженные каналы (трубы, шахты, воздухопроводы, газоходы). В свою очередь, они могут быть либо технологическими, либо вентиляционными (общеобменными или локальными);

– неорганизованные, поступающие в окружающую среду ненаправленными потоками через неплотности оборудования, при погрузо-разгрузочных работах и т.п.

2. По агрегатному состоянию вредностей:

– газо- и парообразные (оксид углерода, оксиды азота и др.);

– твердые (органическая и неорганическая пыль, дым, сажа, смолистые соединения и др.);

3. По температуре:

– нагретые (с температурой выше температуры окружающей среды);

– холодные;

4. По признакам очистки:

– выбрасываемые без очистки;

– выбрасываемые после очистки.

5. По степени измельчения (дисперсности) частиц (рис. 2):

I – очень крупнодисперсные частицы с характерным медианным размером $d > 150$ мкм (где размер d определяется при условии, что количество частиц крупнее или мельче указанного размера составляет 50%);

II – крупнодисперсные частицы с $d = 40–150$ мкм (такие частицы падают ускоренно);

III – среднедисперсные частицы с $d = 10–40$ мкм;

IV – мелкодисперсные частицы с $d = 1–10$ мкм (такие частицы падают с постоянной скоростью);

V – очень мелкодисперсные частицы с $d < 1$ мкм (эти частицы находятся в воздухе в непрерывном хаотичном движении).

6. По характеру воздействия на человека химических веществ, содержащихся в газоздушных выбросах, согласно ГОСТ 12.0.003–2015, подразделяются на:

– общетоксические (диоксид углерода, свинец, ртуть и др.);

– раздражающие (аммиак, ацетон, сернистый ангидрид и др.);

– сенсibiliзирующие вещества, т.е. вызывающие повышенную чувствительность организма после относительно кратковременного действия (ацетон, лаки, растворители и др.);

– канцерогенные, вызывающие образование опухолей (сажа, асбест в пылевидном состоянии и др.);

– мутагенные (радиационные вещества, свинец, марганец и др.);

– влияющие на репродуктивную функцию человека (ртуть, свинец, марганец и др.

Санитарными нормами установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных примесей в приземном атмосферном воздухе. ПДК – максимальная концентрация примеси в атмосфере, отнесенная к определенному времени, которая при периодическом воздействии или на протяжении всей жизни не оказывает на человека и окружающую среду в целом вредного воздействия, включая отдаленные последствия [2]. По времени различают максимально разовую ПДК и среднесуточную ПДК. Количество выбросов смеси газов с пылью в атмосферу должно соответствовать определенным ПДК пыли на выбросе (ПДВ), которые регламентируются стандартами. Рассчитывая ПДВ придерживаются значений допустимых норм загрязнения приземного слоя атмосферы (ПДК).

Количество пыли, содержащееся в воздухе производственных помещений, не должно превышать ПДК, установленных нормами ГОСТ 12.1.005–88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [3].

Для соблюдения норм ПДВ и ПДК и обеспечения безопасной жизнедеятельности человека требуется снижение уровня загрязненности воздушного бассейна, т.е. его очистка от вредностей, выбрасываемых промышленными предприятиями.

Базовым физическим показателем содержания примесей вредных веществ в атмосфере является концентрация, которая представляет собой количество вещества в единице объема воздуха при нормальных условиях, обычно в мг/м³.

Основными направлениями защиты атмосферы являются:

1. Совершенствование технологических процессов производства, заключающееся в создании замкнутых непрерывных технологических процессов и позволяющее сократить количественный и улучшить качественный состав выбросов (экологизация);
2. Очистка технологических и вентиляционных выбросов. Под очисткой подразумевается отделение промышленных предприятий выбросов от загрязняющих веществ или их нейтрализация;
3. Озеленение территории предприятий, создание санитарно-защитных зон.

Наиболее эффективными мероприятиями среди перечисленных является газоочистка выбросов промышленных предприятий.

Основные способы очистки выбросов представлены на схеме, приведенной на рис. 1.2.

Рассмотрим некоторые особенности очищаемых сред.

Пыли – это аэродисперсные системы с размерами частиц 10^{-3} – 10^3 мкм, имеющими малую скорость осаждения под действием гравитационных сил, образующиеся при сжигании топлива, добыче полезных ископаемых или в результате химических реакций [4].



Рис. 1.2. Классификация способов очистки вредных выбросов

Пыль различного состава и происхождения постоянно присутствует в атмосфере. Она загрязняет рабочую и жилую зоны, приводит к повреждению приборов и механизмов. Для человека опасность представляют тонкодисперсные пыли с размером частиц 0.5–10 мкм, легко проникающие в органы дыхания. Пыль может оказывать различное воздействие на организм – раздражающее, аллергическое, фиброгенное, токсическое. Степень вредности воздействия пыли на организм человека зависит от количества вдыхаемой пыли, от степени дисперсности, от формы частиц, от степени твердости, электрического заряда, растворимости и от химического состава пыли.

Основным показателем, характеризующим работу аппаратов очистки воздуха от пыли, является коэффициент (степень) очистки (эффективность обеспыливания), %:

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{H}} - M_{\text{K}}}{M_{\text{H}}} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

где M_{H} , M_{K} – масса частиц пыли, содержащихся в газах соответственно на входе в аппарат (т. е. до очистки) и на выходе из аппарата после очистки [5].

Иногда используется термин «проскок» – отношение массовой концентрации частиц пыли в очищаемом воздухе на выходе из фильтра к концентрации на входе, т.е. $K = C_{\text{ВЫХ}}/C_{\text{ВХ}}$. Связь между проскоком и эффективностью очистки выражается формулой $K = 1 - \varepsilon$.

В случае последовательной установки нескольких аппаратов (каскадная, или многоступенчатая очистка, которая используется для более тщательного

обеспыливание воздуха) суммарная эффективность очистки определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon = [1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot \dots \cdot (1 - \varepsilon_n)] \cdot 100\% , \quad (1.2)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ – эффективность очистки каждого из аппаратов, входящих в каскад (в долях единицы).

Эффективность очистки является самой важной характеристикой аппарата. Она служит ориентиром при выборе пылеулавливающего оборудования по допустимым остаточным содержаниям пыли в очищаемом воздухе [5].

2. МЕХАНИЧЕСКОЕ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ

Термин «механическое пылеулавливание» употребляется применительно к типам устройств, при работе которых частицы осаждаются под действием сил тяжести или инерции, либо и тех и других одновременно.

Применение сухих, мокрых и электрических методов осуществляется при необходимости очистки аэрозолей (пылей и туманов). В основе функционирования аппаратов сухого типа положены гравитационные, инерционные и центробежные принципы осаждения или фильтрация [6]. При влажности пыли не более 3–5% применяется сухое обеспыливание. При больших значениях влажности происходит слипание частиц между собой, что ведет к резкому снижению эффективности процесса очистки.

В мокрых пылеуловителях при контакте запыленных газовых смесей с жидкой фазой происходит осаждение аэрозолей на поверхность жидкости.

В электрофильтрах заряженные частицы аэрозоля оседают на специальных электродах.

Выбор того или иного способа и типа аппарата сухой очистки зависит, прежде всего, от концентрации аэрозолей в удаляемой газовой смеси и ее дисперсного состава (рис. 2.1, табл. 2.1). Существенное значение имеют также плотность, заряд, адгезионные свойства, смачиваемость и др.

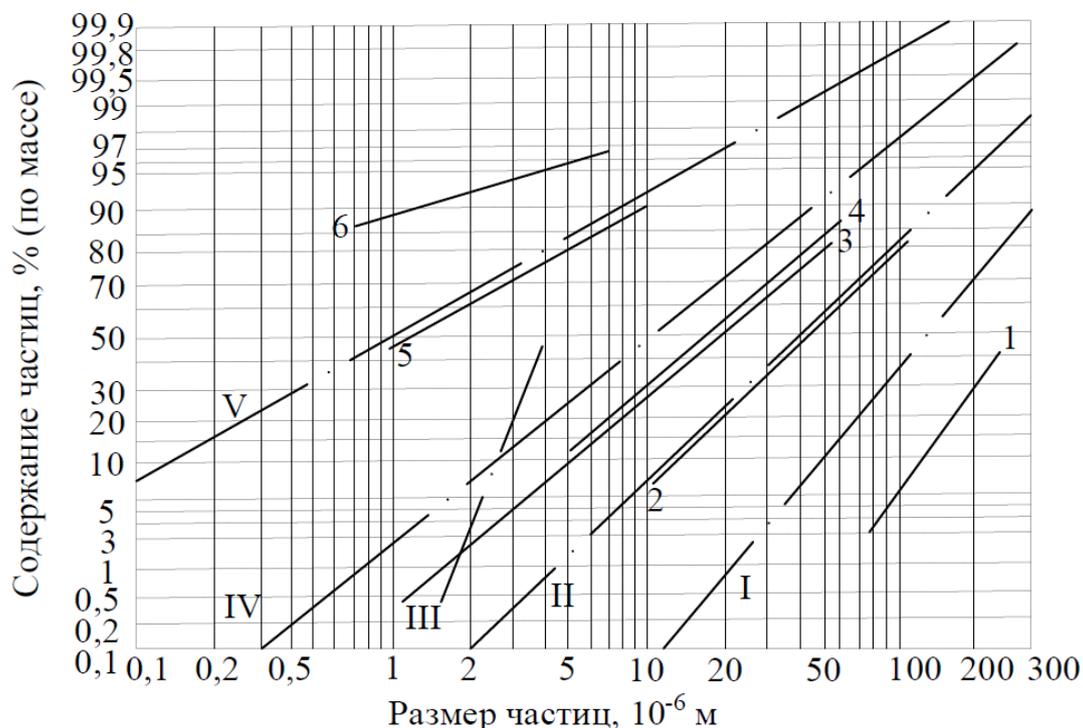


Рис. 2.1. Классификационная номограмма пылей по их дисперсности.

I–V – классификационные группы пылей по их дисперсности:

1 – измельченный уголь; 2 – мелкозернистый кварцевый песок;

3 – пылевидный кварц; 4 – цемент; 5 – дымы мартеновских печей;

6 – атмосферная пыль

Таблица 2.1. Выбор типа аппарата очистки в зависимости от размера загрязняющих частиц

Размер частиц, мкм	Тип аппарата
40 – 1000	Пылеосадительные камеры Циклоны диаметром 1 – 2 м
5 – 1000	Циклоны диаметром 1 м
20 – 100	Скрубберы
0,9 – 100	Тканевые фильтры
0,05 – 100	Волокнистые фильтры
0,01 – 10	Электрофильтры

Физический смысл гравитационного метода очистки состоит в осаждения взвешенных частиц под действием силы тяжести, например, при движении запыленного газа с малой скоростью и неизменным направлением потока.

При инерционном осаждении используется стремление взвешенных частиц поддерживать первоначальное направление движения при изменении направления газового потока. Из разнообразия инерционных аппаратов нашли широкое применение жалюзийные пылеуловители с большим числом щелей (жалюзи). Процесс обеспыливания газов заключается в выходе через щели и изменении при этом направления движения. Частицы пыли с $d < 20$ мкм в жалюзийных аппаратах улавливаются не могут. В данном методе степень очистки в зависимости от дисперсности частиц равна 20–70%. Инерционный и гравитационный методы используются для низкой степени очистки газа.

В основе центробежных методов очистки газов лежит принцип действия центробежной силы, которая возникает при вращательном движении очищаемого газового потока в аппарате очистки или при вращении элементов самого аппарата. Наиболее распространенными аппаратами пылеочистки центробежного типа являются циклоны различных конфигураций [7].

В фильтрующих аппаратах при осаждении частиц на соответствующих поверхностях, помимо действия инерционных и гравитационных сил, важную роль играют эффекты диффузии и зацепления. Фильтрующие аппараты в зависимости от материала поверхности осаждения можно подразделить на три типа – тканевые, волокнистые и зернистые.

В тканевых фильтрах (гибкие пористые перегородки) поверхность осаждения состоит из нитей различных шерстяных, хлопчатобумажных и синтетических тканей. В тканевых фильтрах частицы пыли выделяются из газового потока, когда поток проходит через слой пыли, образующийся на внешней стороне ткани в начальный период работы фильтра. В волокнистых фильтрах (полужестких пористых перегородках) поверхностью осаждения для частиц служат волокна различных волокнистых материалов. В зернистых фильтрах (жесткие пористые перегородки) газовый поток фильтруется через песок, пористую керамику, металлы и пластмассу.

Особенности расчета отдельных типов пылеуловителей рассматриваются в последующих разделах.

3. СУХИЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

3.1. Виды сухих пылеуловителей

Пылеосадительные камеры являются одними из простейших аппаратов, которые используют поле гравитации для осаждения пыли (рис. 3.1), а с установленными перегородками используют инерционное поле (рис. 3.2).

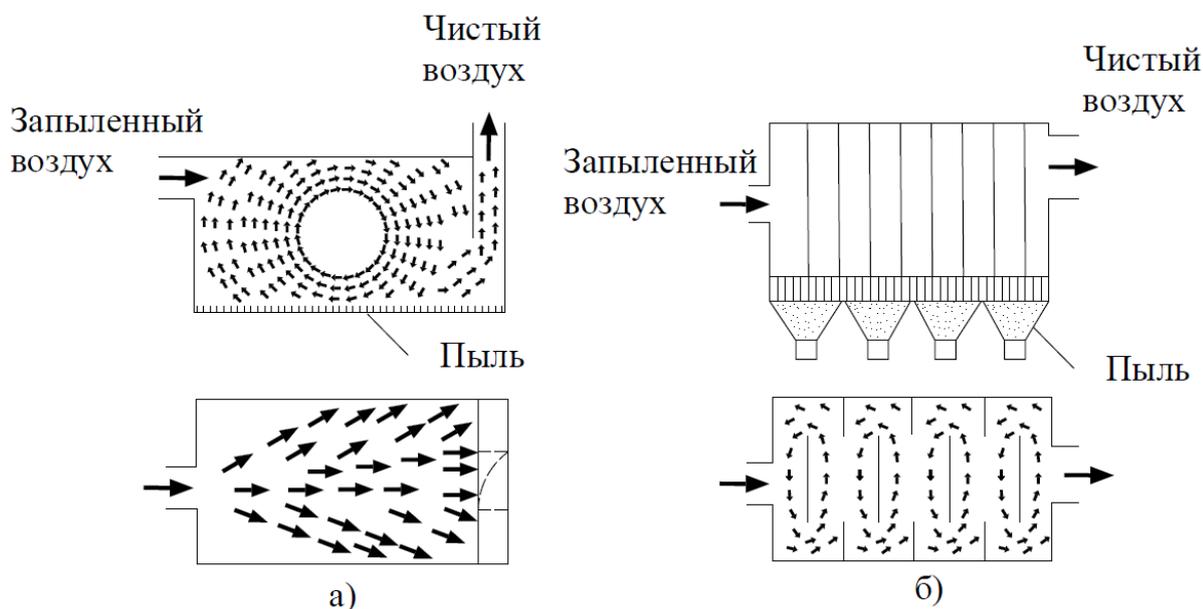


Рис. 3.1. Пылеосадочные камеры: а – простая; б – лабиринтная

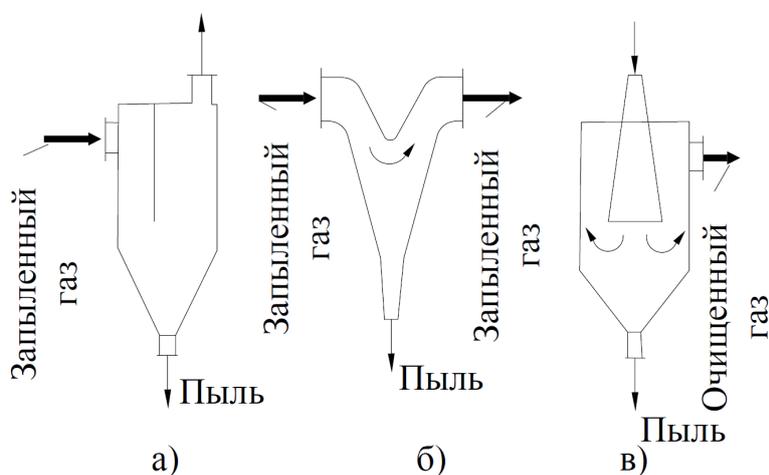


Рис. 3.2. Инерционные пылеуловители: а – с перегородкой; б – с плавным поворотом газового потока; в – с расширяющимся конусом

Загрязненный пылью газ пропускается через камеру со скоростью 0,2–0,5 м/с. Частицы пыли размером более 30–40 мкм оседают под действием силы тяжести в нижней части аппарата. Степень улавливания пыли в камерах не превышает 40–50%. Газ, прошедший процесс обеспыливания, удаляется из камеры и далее либо выбрасывается в атмосферу, либо подается в последующие аппараты для прохождения более тщательной очистки. Для нужд

промышленности пылеосадительные камеры применяют в качестве устройств предварительной обработки газов, при этом крупные частицы отделяются и происходит разгрузка аппаратов последующих ступеней очистки. По этой причине данное оборудование предназначено для установки на первых ступенях систем газоочистки [5, 8].

Для очистки газоздушных сред с частицами пыли, размер которых превышает 20 мкм, используются также жалюзийные пылеотделители (рис. 3.3). В таких аппаратах процесс отделения пыли от основного потока газа происходит под действием инерционных сил, которые возникают за счет резкого поворота очищаемого газового потока в момент его прохождения через жалюзи решетки. Степень эффективности очистки запыленного газового потока в жалюзийном аппарате зависит от таких факторов, как конструкция решетки, плотность и размер частиц пыли, плотность и вязкость газа, скорость движения газовых масс в области подхода к пластинам решетки.

При очистке в жалюзийных аппаратах достигаются следующие показатели работы: при наличии пылевых частиц размером 30 мкм эффективность составляет около 75%, а для частиц размером 40 мкм – 85%. При работе аппарата скорость газа на входе поддерживают около 12–15 м/сек. Гидравлическое сопротивление жалюзийного аппарата составляет 30–40 мм вод. ст. в зависимости от скорости газового потока [5, 9].

3.2. Расчет скорости осаждения

Целью расчета пылеосадительных камер является определение их габаритных размеров и степени очистки.

Расчет процесса осаждения пыли основан на соотношении сил, действующих на частицу. В соответствии с законом Ньютона ускорение вертикального движения частицы определяется результирующим действием силы тяжести, плавучести и сопротивления среды [5]:

$$m \frac{dV}{dt} = gm - \xi \frac{\rho_c V^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3.1)$$

где m – масса частицы, d – диаметр частицы шаровой формы, ρ_c – плотность среды; V – средняя скорость движения среды; t – время; g – ускорение свободного падения, ξ – коэффициент сопротивления.

Силу сопротивления выражают через коэффициент сопротивления ζ , который является функцией числа Рейнольдса пылегазового потока:

$$\xi = f(Re) = f\left(\frac{Vd\rho_c}{\mu}\right), \quad (3.2)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости среды. При $Re < 0,5$ он может быть рассчитан по формуле Стокса:

$$\xi = \frac{24}{Re}, \quad (3.3)$$

а при $05 < Re < 800$ – по эмпирической формуле Клячко:

$$\xi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{0,5}}. \quad (3.4)$$

При небольшой скорости пылегазового потока в пылесадительной камере эффектом плавучести можно пренебречь. В этом случае на частицу пыли действуют только силы гравитации и сопротивления среды. Если данные силы равны, то частицы пыли соответствующего размера не выносятся из потока и не осаждаются, а продолжают свое движение в воздухе.

Скоростью витания называют ту скорость потока, при которой частицы витают в окружающем воздухе. Если размер частиц пыли меньше предельного, происходит их отделение от более крупных, и они выносятся потоком. Из условия равенства действующих на частицы во взаимно противоположных направлениях сил тяжести и динамического давления потока можно определить скорость витания частиц в восходящем потоке.

В соответствии с законом Архимеда сила тяжести шаровой частицы в среде составляет [10]

$$F = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_n - \rho_c) g, \quad (3.5)$$

где d – диаметр частицы, м; ρ_n – плотность частицы, кг/м³; ρ_c – плотность среды, кг/м³.

В случае малых скоростей и малых размеров частиц (менее 60 мкм) сопротивление среды считается по закону Стокса [10]:

$$R = 3\pi\mu d V_K, \quad (3.6)$$

где V_K – конечная скорость падения частицы, м/с; μ – коэффициент динамической вязкости среды, Па·с. Из условия равенства F и R получим [10]:

$$V_K = \frac{d^2 (\rho_n - \rho_c) g}{18\mu}. \quad (3.7)$$

При падении частиц в воздухе, приняв значение $\rho_c = 1,23$ кг/м³ и $\mu = 0,000018$ Н·сек/м², получаем:

$$V_K = 3027 d^2 (\rho_n - \rho_c). \quad (3.8)$$

Формула (3.8) справедлива при определении скорости падения условно шаровых частиц, диаметр которых попадает в диапазон 1–70 мкм. Для более крупных частиц с диаметром 0,12–0,85 мм скорость конечного падения определяется по эмпирической формуле (значение числа Рейнольдса в пределах $10 < Re_{п} < 1000$):

$$V_K = 40,6 \sqrt[3]{(\rho_{II} - 1,23)} \cdot d. \quad (3.9)$$

В начальный момент падения крупные частицы двигаются вниз с ускорением силы тяжести. Далее, с возрастанием скорости и сопротивления среды, ускорение принимает значение, близкое к нулю, и частицы пыли продолжают падать с равномерной скоростью. Соответствующую скорость называют конечной или стационарной скоростью падения V_K [10].

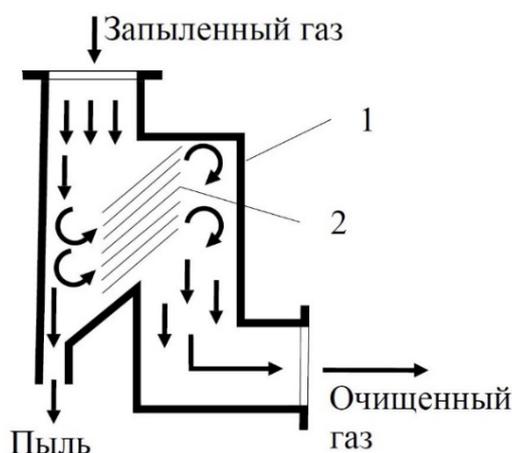


Рис. 3.3. Жалюзийный пылеуловитель: 1 – корпус; 2 – решетка

Отсутствие ускорения позволяет приравнять левую часть уравнения (3.1) нулю. Тогда совместное решение уравнений (3.1, 3.2 и 3.5) дает:

$$4g \cdot d^3 \cdot \rho(\rho - \rho) / 3\mu^2 = \xi Re^2. \quad (3.10)$$

Левая часть уравнения (3.10) есть число Галилея – соотношение между силами гравитации и вязкости в среде. Условием достижения стационарной скорости осаждения является равенство $Ga = \xi Re$.

3.3. Расчет камеры пылеотделения

Расчет начинают с задания минимальных размеров частиц пыли, которые должны быть уловлены в камере. Далее по уравнению (3.11) или номограмме (рис. 3.4) находят скорость витания частиц пыли.

Для осаждения пылевых частиц их скорость V_K должна быть менее скорости витания. Для крупных частиц скорость осаждения определяется по уравнению (3.11).

Зная объемный расход очищаемого воздуха Q ($m^3/ч$), определяют размеры поперечного сечения пылеосадочной камеры – ее ширину B (рис. 3.5) и высоту H (м). При этом для обеспечения ламинарного режима движения частиц и осаждения их в объеме камеры скорость пылегазовой смеси в камере V должна удовлетворять условию

$$V \leq \frac{L}{H} V_{\text{к}}. \quad (3.11)$$

где L – длина камеры.

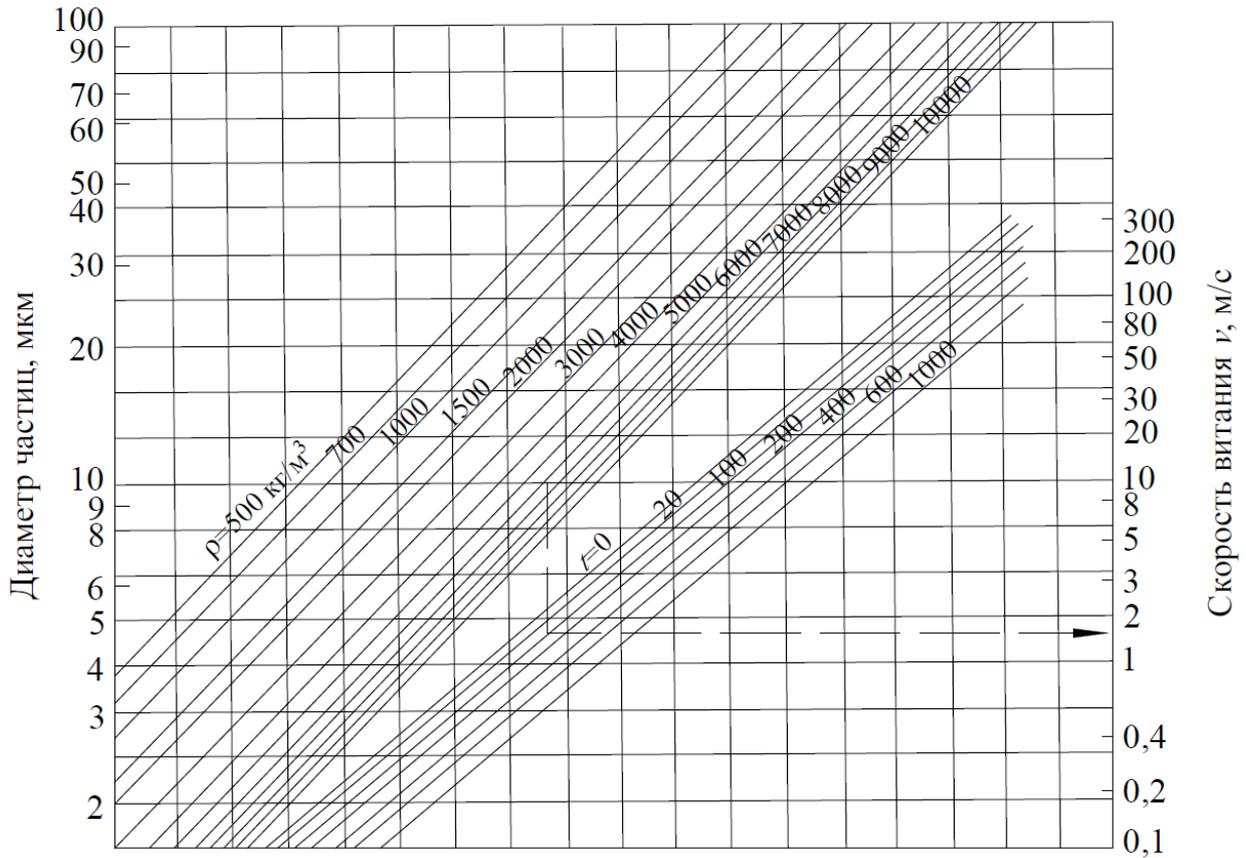


Рис. 3.4. Номограмма для определения скорости витания частиц пыли:
 ρ – плотность частиц пыли, кг/м^3 ; t – температура газа, $^{\circ}\text{C}$

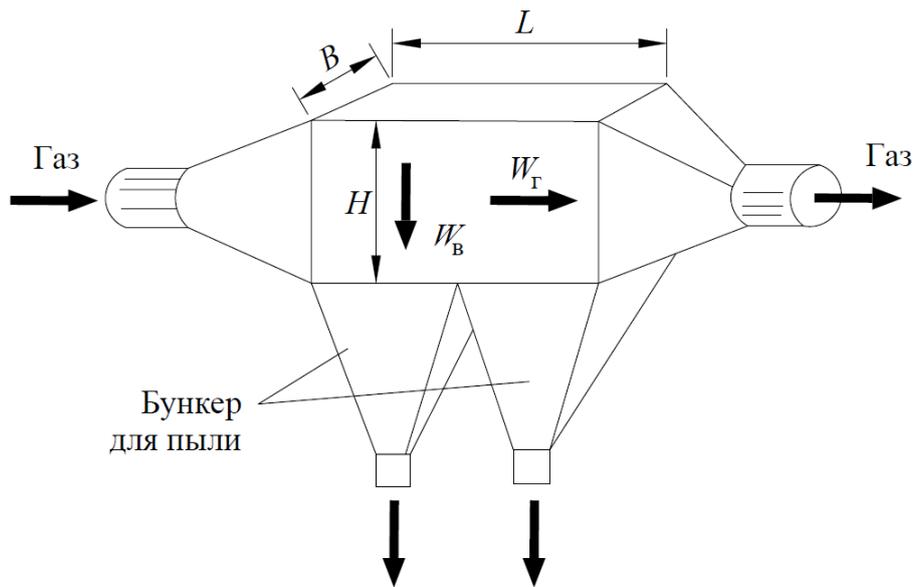


Рис. 3.5. К расчету пылеосадительной камеры

Обычно принимают скорость потока в камере в пределах $V_k=0,2-0,5$ м/с. Чем меньше скорость, тем эффективнее очистка, однако при этом растут габариты камеры. Площадь поперечного сечения камеры определяется из соотношения

$$B \cdot H = \frac{Q}{3600V} .$$

Задаваясь высотой камеры H , рассчитывают ее ширину B . Минимальная длина камеры определится из (3.10):

$$L = \frac{HV}{V_k} .$$

Гидравлическое сопротивление камеры определяется соотношением скоростей пылевоздушного потока во входном и выходном воздуховодах и в пылеосадочной камере. Сопротивлением в самой камере, как правило, пренебрегают ввиду малости.

3.4. Циклоны

Циклоны – основной вид аппаратов для очистки воздуха от пыли, использующие для ее осаждения центробежные силы. Схема работы циклона для сухой очистки воздуха приведена на рис. 3.6.

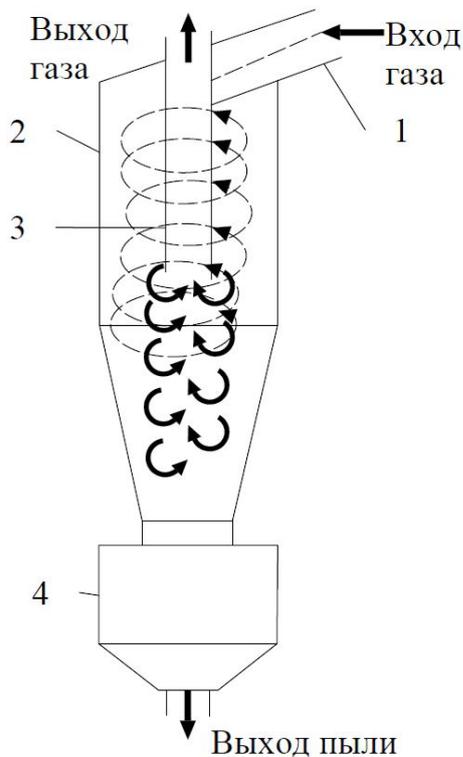


Рис. 3.6. Циклон для сухой очистки воздуха от пыли:

- 1 – патрубок для входа пылегазовой смеси; 2 – корпус циклона;
- 3 – выходной патрубок; 4 – бункер для сбора пыли

Пылегазовый поток входит в корпус тангенциально по касательной и, совершая вращательно-поступательное движение, перемещается вдоль корпуса вниз к бункеру по нисходящей спирали. Частицы пыли под действием центробежных сил осаждаются на стенке корпуса циклона. Эффективность циклона определяется соотношением центробежных сил и сил гравитации. При тангенциальной скорости пылегазового потока $V_T = 20$ м/с в циклоне радиусом $r = 0,5$ м центробежная сила, действующая на частицу пыли, составит

$$mV^2/r = m \cdot 20^2/0,5.$$

Сила тяжести при этом оказывается в 80 раз меньше. Это способствует интенсивному осаждению пыли на стенке корпуса циклона.

Вторичный поток имеет направление по длине конической стенки и захватывает отброшенный к стенке слой пыли, направляя его вниз к бункеру. Пыль из бункера 4 периодически удаляется. Очищенный газовый поток покидает циклон через патрубок 3.

Циклоны достаточно просты в изготовлении и надежны в эксплуатации. Эффективность их достигает 95 % при осаждении частиц пыли размером более 10 мкм, что в ряде случаев обеспечивает возможность выброса очищенного воздуха непосредственно в атмосферу. Качество очистки пылегазовой смеси определяется ее дисперсным составом, плотностью частиц и вязкостью, которая зависит от температуры потока.

Циклоны используются в основном для улавливания сухих, неслипающихся пылевых частиц II, III, и IV групп дисперсности. Для более тонкой очистки рекомендуется использовать циклоны перед более эффективными тканевыми или электрофильтрами.



Рис. 3.7. Батарея циклонов

Согласно ГОСТ 9617-98, в нашей стране принят стандартизованный ряд диаметров циклонов НИИОГаза D : 200–1000 мм (кратные 100 мм), 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 и 3000 мм. Циклоны больших диаметров менее эффективны, поэтому для обеспечения нужной степени очистки и требуемого объемного расхода очищаемой смеси циклоны диаметром до 500 мм объединяют в группы или батареи с параллельным подводом пылегазовой смеси (рис. 3.7). В промышленных условиях при больших расходах газа рекомендуется устанавливать группы из 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 циклонов.

3.5. Расчет циклонов

При расчете циклона предварительно выбирают его типоразмер, фракционную эффективность, перепад давления и потребляемую для каждого циклона мощность. Исходными данными для расчета являются объемный расход пылегазовой смеси, состав, температура, давление, концентрация пыли и ее дисперсный состав.

Выбор циклонов производится из ряда серийных моделей, в соответствии с производительностью по газовому потоку и гидравлическому сопротивлению циклона $\Delta P_{\text{ц}}$. Далее определяют минимальный диаметр частиц $d_{\text{мин}}$, для которых циклон обеспечивает полную улавливаемость, а также эффективность улавливания пыли ϵ [5].

Центробежное ускорение в циклонах значительно превышает ускорение свободного падения, из-за чего мелкие частицы пыли не соответствуют направлению линий тока газа, а ввиду влияния центробежной силы эти частицы выносятся из кривой движения газа в направлении стенки корпуса циклона и оседают на ней. Пренебрегая плотностью воздуха в сравнении с плотностью пыли, центробежную силу, действующую на частицу, можно рассчитать как

$$F = mV_T^2/R, \quad (3.12)$$

где m – масса частицы; V_T – тангенциальная составляющая скорости, практически равная скорости вращения пылегазового потока; R – расстояние от частицы до оси циклона.

Движение частицы пыли в радиальном направлении к стенке циклона и обуславливается действием данной силы. При этом частица испытывает сопротивление радиальному движению за счет сил вязкости [9]. Силу этого сопротивления можно определить по формуле Стокса (3.4), полагая, что обтекание частиц – ламинарное:

$$F = 3\pi V_R d \mu, \quad (3.13)$$

где V_R – скорость движения частицы в радиальном направлении; d – диаметр частицы; μ – динамическая вязкость газа.

Из условия баланса сил имеем:

$$\frac{mV_T^2}{R} = 3\pi V_R d \mu. \quad (3.14)$$

Отсюда получают величину скорости радиального движения частицы сферической формы:

$$V_R = \frac{mV_T^2}{3\pi R d \mu} = \frac{V_T^2 d^2 \rho}{18R\mu}. \quad (3.15)$$

Из всего множества частиц, которые движутся в потоке, частица, находившаяся при входе в циклон в области выхлопной трубы, пройдет наибольший путь. Этот путь, очевидно, равен $R_2 - R_1$, где R_1 – радиус выхлопной трубы циклона; R_2 – радиус цилиндрической части циклона. Время, затрачиваемое частицей на прохождение указанного пути, будет равно [11]

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{V_R}. \quad (3.16)$$

В формуле (3.15) величина R имеет переменное значение, которое изменяется в пределах $R_2 > R > R_1$. Ее среднее значение составляет, очевидно,

$$R = \frac{R_2 + R_1}{2}. \quad (3.17)$$

Подставляя (3.17) в (3.15) и (3.16), имеем соответственно:

$$V_R = \frac{V_T^2 d^2 \rho}{9(R_2 + R_1)\mu}$$

и

$$\tau = \frac{9\mu(R_2 - R_1)(R_2 - R_1)}{V_T^2 d^2 \rho} = \frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{V_T^2 d^2 \rho}. \quad (3.18)$$

Из (3.18) можно найти минимальный размер частиц, улавливаемых циклоном. Полагая, что улавливаются все частицы, осевшие на стенках циклона, то есть прошедшие путь $R_2 - R_1$ за время прохождения циклона потоком газа (за период времени, когда частица находится в циклоне), имеем:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{2\pi\rho V_T R n}}, \quad (3.19)$$

где n – совершаемое потоком газа число оборотов в циклоне, которое обычно принимается $n = 2$.

Полученные в формуле (3.19) расчетные данные зачастую расходятся с результатами экспериментальных наблюдений [11]. Результаты экспериментов показывают, что частицы с размером, большим d_{\min} , улавливаются в циклоне не полностью. Это объясняется отличием формы частиц от сферической, неравномерностью распределения частиц по сечению, а также влиянием турбулентности потока. В то же время имеет место улавливание частиц с диаметром меньшим, чем d_{\min} , что может быть объяснено коагуляцией частиц внутри циклона.

Точный расчет циклона достаточно сложен, поэтому, как правило, расчет ведется в упрощенной форме по величине его гидравлического сопротивления ΔP_{Π} [12]. Расчет начинается с принятия типа циклона и определения его диаметра D :

$$D = \sqrt{\frac{Q}{0,785V_{\text{опт}} \cdot n}}, \quad (3.20)$$

где Q – объемный расход очищаемого газа, м³/с; $V_{\text{опт}}$ – оптимальная усредненная скорость потока, м/с; n – число циклонов.

Полученное расчетное значение диаметра округляется до стандартного диаметра.

Рассчитывается скорость потока в циклоне стандартного диаметра $D_{\text{ст}}$:

$$V = \frac{Q}{0,785D_{\text{ст}} \cdot n}, \text{ м/с.} \quad (3.21)$$

Если полученное значение скорости более чем на 15% отличается от оптимального, принимается другой типоразмер циклона или, при необходимости, группа циклонов.

Гидравлическое сопротивление циклона определяется по следующей формуле:

$$\Delta P = \frac{\zeta \cdot \rho_{\text{г}} \cdot V^2}{2}, \quad (3.22)$$

где ζ – коэффициент сопротивления циклона; V – условная скорость газа, отнесенная к полному сечению циклона в плане, м/с; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа при условиях работы, кг/м³.

Коэффициент сопротивления циклона ζ определяется следующими факторами: диаметром циклона, концентрацией пыли, организацией выхода газа из выхлопной трубы и прочими. Данный коэффициент рассчитывается по следующему уравнению:

$$\zeta = K_1 \cdot K_2 \cdot \zeta_{500} + K_3, \quad (3.23)$$

где K_1 – поправочный коэффициент, который учитывает диаметр циклона; K_2 – поправочный коэффициент на влияние запыленности газа; ζ_{500} – коэффициент сопротивления циклона диаметром 500 мм; K_3 – поправочный коэффициент на влияние групповой компоновки циклонов, равный 35 при двухрядной компоновке и 60 при круговой компоновке.

Численные значения коэффициентов K_1 , K_2 , ζ_{500} (для циклона с выходом в сеть), ζ'_{500} (для циклона с выходом в атмосферу), а также расчетных параметров циклонов конструкции НИИОГаза (рис. 3.8) при скорости для циклонов всех типов $V = 3$ м/с представлены в таблицах 3.1–3.4.

При высоких скоростях движения газа в циклоне растет гидравлическое сопротивление, при меньших ухудшается эффективность очистки.

Для расчета потерь давления по уравнению (3.22) плотность газового потока должна быть приведена к рабочим условиям в соответствии с уравнением:

$$\rho = \rho_0 \frac{273(P_{\text{бар}} \pm P_{\text{г}})}{101,3 \cdot 10^3 (273 + t_{\text{г}})}, \quad (3.24)$$

где ρ_0 – плотность газов при нормальных условиях ($t_0 = 0^\circ\text{C}$, $P_0 = 101,3 \cdot 10^3$ Па); $t_{\text{г}}$ – температура газов на входе в циклон, $^\circ\text{C}$; $P_{\text{бар}}$ – барометрическое давление, Па; $P_{\text{г}}$ – избыточное давление (разрежение) газа при входе в циклон, Па.

Скорость газа в циклоне, м/с, определится как отношение заданного расхода газа при рабочих условиях Q к полному поперечному сечению циклона в плане $F_{\text{ц}}$:

$$V = \frac{Q}{F_{\text{ц}}} = \frac{101,3 \cdot 10^3 Q_0 (273 + t_{\text{г}})}{273 F_{\text{ц}} (P_{\text{бар}} \pm P_{\text{г}})}, \quad (3.25)$$

где Q_0 – расход газа, приведенный к нормальным условиям.

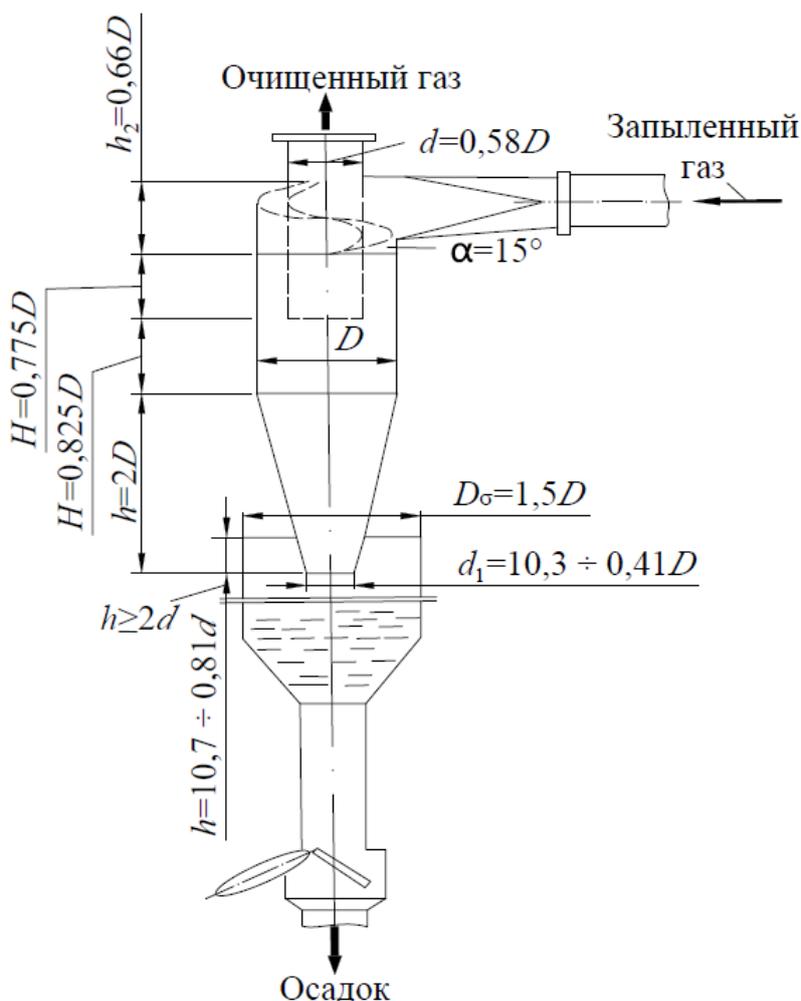


Рис. 3.8. Циклон конструкции НИИОГаза

Таблица 3.1. Значения коэффициента K_1 , учитывающего диаметр циклона

Тип циклона	D , мм				
	150	200	300	400	500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15 ЦН-15у	0,85	0,90	0,93	1,0	1,0
ЦН-24	0,95	0,93	0,97	0,90	0,87
СДК-ЦН-33	0,81	0,78	0,78	0,77	0,76
СК-ЦН-34	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91

Таблица 3.2. Поправочный коэффициент K_2 , учитывающий запыленность газа

Тип циклона	Запыленность газа, г/м ³						
	< 0,1	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,94	0,90	0,87	0,85
ЦН – 15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15у	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90

Таблица 3.3. Значения коэффициентов сопротивления

Параметры	Тип циклона					
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-22
d/D	0,58	0,58	0,58	0,33	0,34	0,22
ζ_{500}	245	155	155	520	1050	2000
ζ'_{500}	250	163	80	600	1150	—

Таблица 3.4. Скорости пылегазовой смеси в циклоне

Тип циклона	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-22
V , м/с	3,5	3,5	4,5	2,0	1,7	2,0

Расчет потери давления в циклоне производится по формуле (3.16). Если расчетная величина сопротивления оказалась приемлемой, т.е. обеспечивается напором принимаемого вентилятора в данной системе очистки, то переходят к расчету степени очистки.

3.5. Оценка эффективности циклонов

В основе расчета остаточной концентрации пыли в очищенном инерционным пылеуловителем воздухе лежит информация о дисперсном составе и плотности пыли, а также фракционной эффективности используемых пылеуловителей.

Одним из методов расчета эффективности циклонов является расчет с использованием элементов теории вероятности [13]. Данный метод зарекомендовал себя как обобщенный и надежный. Для аппроксимации (прямой линией) дисперсного состава пылей в вероятностно-логарифмических координатах используются следующие параметры: среднемедианный размер d_m и среднеквадратическое отклонение $lg\sigma_{\Pi}$ функции распределения. Среднемедианный размер d_m – это размер частицы, при котором суммарная масса всех частиц размером более d_m равна суммарной массе всех частиц размером менее d_m . Среднеквадратическое отклонение $lg\sigma_{\Pi}$ определяется из соотношения, которое представляет собой свойство интеграла вероятности:

$$lg\sigma_{\Pi} = lg\left(\frac{d_{84,1}}{d_m}\right) = lg\left(\frac{d_m}{d_{15,9}}\right), \quad (3.26)$$

где $d_{84,1}$ и $d_{15,9}$ – абсциссы точек, значения ординат которых равны 84,1 и 15,9 %. Эти абсциссы вычисляются в соответствии с заданным распределением пыли по размерам (рис. 3.9).

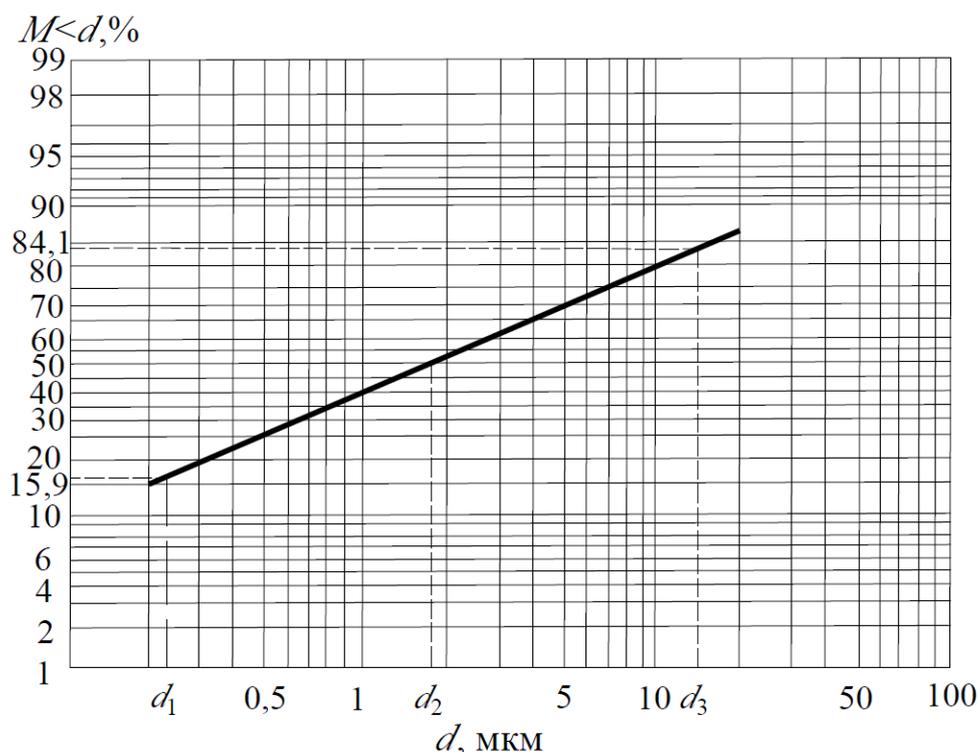


Рис. 3.9. График распределения частиц пыли по размерам

Кривые парциальной эффективности циклонов характеризуются двумя аналогичными параметрами d_{50}^T и $lg\sigma_{50}^T$. В численной форме эти значения для различных типов циклонов конструкции НИИОГаза принимаются в соответствии с табл. 3.5.

Таблица 3.5. Значения параметров d_{50}^T и $lg\sigma_{50}^T$

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15у	ЦН-15	ЦН-11	СКД-ЦН-33	СК-ЦН-34
d_{50}^T	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95
$lg\sigma_{50}^T$	0,308	0,2835	0,352	0,352	0,364	0,308

Математическая обработка уравнения для вероятностных функций определяет следующее выражение для полной очистки в циклоне:

$$\varepsilon = \Phi(x). \quad (3.27)$$

Величина x является параметром осаждения и в данном случае определяется по формуле

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_{\pi}}}. \quad (3.28)$$

Численное значение функции $\Phi(x)$ находят, исходя из величины x по табл. 3.6.

Таблица 3.6. Значения нормальной функции распределения

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
-2,70	0,0035	-1,62	0,0526	-1,08	0,1401	-0,56	0,2877
-2,60	0,0047	-1,60	0,0548	-1,06	0,144	-0,54	0,2946
-2,50	0,0062	-1,58	0,0571	-1,04	0,1492	-0,52	0,3015
-2,40	0,0082	-1,56	0,0594	-1,02	0,1539	-0,50	0,3085
-2,30	0,0107	-1,54	0,0618	-1,00	0,1587	-0,48	0,3156
-2,20	0,0139	-1,52	0,0643	-0,98	0,1635	-0,46	0,3228
-2,10	0,0179	-1,50	0,0668	-0,96	0,1685	-0,44	0,3300
-2,00	0,0228	-1,48	0,0694	-0,94	0,1736	-0,42	0,3372
-1,98	0,0239	-1,46	0,0721	-0,92	0,1788	-0,40	0,3446
-1,96	0,0250	-1,44	0,0749	-0,90	0,1841	-0,38	0,3520
-1,94	0,0262	-1,42	0,0778	-0,88	0,1894	-0,36	0,3594
-1,92	0,0274	-1,40	0,0808	-0,86	0,1949	-0,34	0,3669
-1,90	0,0288	-1,38	0,0838	-0,84	0,2005	-0,32	0,3745
-1,88	0,0301	-1,36	0,0869	-0,82	0,2061	-0,30	0,3821
-1,86	0,0314	-1,34	0,0901	-0,80	0,2119	-0,28	0,3897
-1,84	0,0329	-1,32	0,0934	-0,78	0,2177	-0,26	0,3974

Продолжение таблицы 3.6

-1,82	0,0344	-1,28	0,1003	-0,76	0,2236	-0,24	0,4052
-1,80	0,0359	-1,26	0,1038	-0,74	0,2297	-0,22	0,4129
-1,78	0,0375	-1,24	0,1075	-0,72	0,2358	-0,20	0,4207
-1,76	0,0392	-1,22	0,1112	-0,70	0,2420	-0,18	0,4286
-1,74	0,0409	-1,20	0,1151	-0,68	0,2483	-0,16	0,4364
-1,72	0,0427	-1,18	0,1190	-0,66	0,2546	-0,14	0,4443
-1,70	0,0446	-1,16	0,1230	-0,64	0,2611	-0,12	0,4522
-1,68	0,0465	-1,14	0,1271	-0,62	0,2676	-0,10	0,4602
-1,66	0,0485	-1,12	0,1314	-0,60	0,2743	-0,08	0,4681
-1,64	0,0505	-1,10	0,1357	-0,58	0,2810	-0,06	0,4761
-0,04	0,4840	0,50	0,6915	1,04	0,8508	1,60	0,9452
-0,02	0,4920	0,52	0,6985	1,08	0,8599	1,62	0,9474
0,00	0,5000	0,54	0,7054	1,10	0,8643	1,64	0,9495
0,02	0,5080	0,56	0,7123	1,12	0,8686	1,66	0,9515
0,04	0,5160	0,58	0,7190	1,14	0,8729	1,68	0,9535
0,06	0,5239	0,60	0,7257	1,16	0,8770	1,70	0,9554
0,08	0,5319	0,62	0,7324	1,18	0,8810	1,72	0,9573
0,10	0,5398	0,64	0,7389	1,20	0,8849	1,74	0,9591
0,12	0,5478	0,66	0,7454	1,22	0,8888	1,76	0,9608
0,14	0,5557	0,68	0,7517	1,24	0,8925	1,78	0,9625
0,16	0,5636	0,70	0,7580	1,26	0,8962	1,80	0,9641
0,18	0,5714	0,72	0,7642	1,28	0,8997	1,82	0,9656
0,20	0,5793	0,74	0,7703	1,30	0,9032	1,84	0,9671
0,22	0,5871	0,76	0,7764	1,32	0,9066	1,86	0,9686
0,24	0,5948	0,78	0,7823	1,34	0,9099	1,88	0,9699
0,26	0,6026	0,80	0,7881	1,36	0,9131	1,90	0,9713
0,28	0,6103	0,82	0,7939	1,38	0,9162	1,92	0,9726
0,30	0,6179	0,84	0,7995	1,40	0,9192	1,94	0,9738
0,32	0,6255	0,86	0,8051	1,42	0,9222	1,96	0,9750
0,34	0,6331	0,88	0,8106	1,44	0,9251	1,98	0,9761
0,36	0,6406	0,90	0,8159	1,46	0,9279	2,00	0,9772
0,38	0,6480	0,92	0,8212	1,48	0,9306	2,10	0,9821
0,40	0,6554	0,94	0,8264	1,50	0,9332	2,20	0,9861
0,42	0,6628	0,96	0,8315	1,52	0,9357	2,30	0,9893
0,44	0,6700	0,98	0,8365	1,54	0,9382	2,40	0,9918
0,46	0,6772	1,00	0,8413	1,56	0,9406	2,50	0,9938
0,48	0,6844	1,02	0,8461	1,58	0,9429	2,60	0,9953

Величина d_{50} из формулы (3.28) – это тот размер частиц, которые осадились при фактических условиях работы заданного циклона с эффективностью 50%; σ_{η} – дисперсия осаждаемых частиц (принимается по справочным данным); σ_{Π} – стандартное отклонение величины логарифма диаметра частицы пыли (дисперсия). Величина d_{50} для определенных условий находится по формуле

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D\rho_T\mu V_T}{D_T\rho\mu_T V}}, \quad (3.29)$$

где D_T , ρ_T , μ_T , V_T – параметры, которые соответствуют условиям получения табличных значений d_{50}^T и $lg\sigma_n$; D , ρ , μ , V – параметры, соответствующие условиям работы циклона по факту. Приведенные данные соответствуют следующим условиям работы циклонов (значения табличные): $V = 3,5$ м/с; $D_T = 0,6$ м; $\rho_T = 1930$ кг/м³; $\mu = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

В процессе очистки газов с высокой концентрацией пыли ($C > 10$ г/м³) наблюдается увеличение степени очистки газа в циклоне, которая определяется по нижеследующей эмпирической зависимости:

$$\varepsilon' = \varepsilon + (100 - \varepsilon) \cdot 0.12 \cdot C_1 \cdot lg\left(\frac{0.1C_1}{100}\right),$$

где C_1 – начальная концентрация пыли в газе, г/м³; ε – степень очистки газа в циклоне с начальной запыленностью 10 г/м³.

В случае недостаточной эффективности, полученной расчетным путем, уменьшают размеры циклона. Тем самым повышается скорость и гидравлическое сопротивление. Степень очистки газа при этом возрастает. Если данное решение будет недостаточным, то переходят на иной тип циклона с большей эффективностью. В таком случае расчет гидравлического сопротивления и эффективности циклона повторяется.

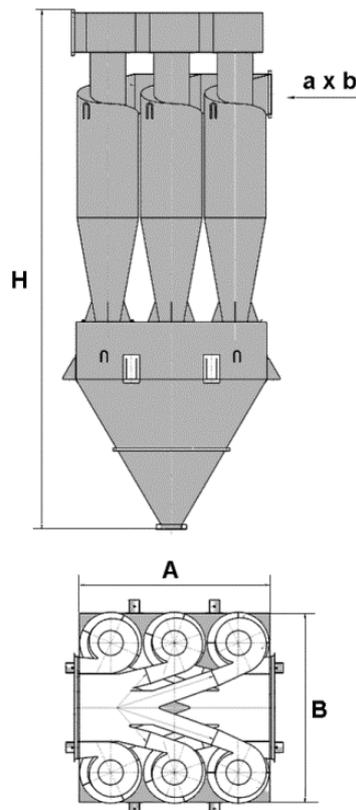


Рис. 3.10. Батарейный циклон

Для повышения эффективности газоочистки в ряде случаев используют батарейные циклоны (рис. 3.10). Батарейный циклон состоит из групп циклонов

малого диаметра ($d = 200\text{--}250$ мм; число их достигает несколько десятков), которые включаются в один корпус и имеют общий коллектор запыленного газа и общий пылевой бункер. Они работают параллельно.

Для закрученного потока газа элементы батарейного циклона имеют направляющие лопасти, типа «винт» или «розетка». Лопасти типа «винт» обеспечивают меньшую эффективность очистки, чем лопасти типа «розетка». Однако лопасти типа «винт» меньше забиваются пылью и обеспечивают меньшие потери давления в циклоне. Скорость газа на входе в батарейный циклон равна 11–23 м/с, средняя эффективность $\varepsilon = 0,75\text{--}0,85$. Батарейные мультициклоны обладают повышенной эффективностью при разделении пылегазовых смесей, содержащих частицы сравнительно большой степени дисперсности, т.е. размером до 5 мкм и менее. Однако ввиду повышенного гидравлического сопротивления при этом требуется использование вентиляторов высокого давления.

4. МОКРЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

Аппараты мокрой очистки газов называют скрубберами. Они нашли широкое применение при очистке от частиц мелкодисперсной пыли с размером более 0.3–1.0 мкм, а также от пыли горячих и взрывоопасных газов. Работа скруббера основана на осаждении частиц пыли на поверхности капель или пленки жидкости. В этих случаях применяется вода (очистка пыли) или химический раствор (очистка от вредных газообразных компонентов вместе с пылью) [14]. Важным фактором является смачиваемость частиц жидкостью.

4.1. Типы мокрых пылеуловителей

Мокрые пылеуловители подразделяются на группы [5] в зависимости от способа диспергирования жидкости:

1. Форсуночные скрубберы.
2. Барботажно-пенные пылеуловители.
3. Туманоуловители.
4. Скрубберы Вентури.
5. Динамические газопромыватели.

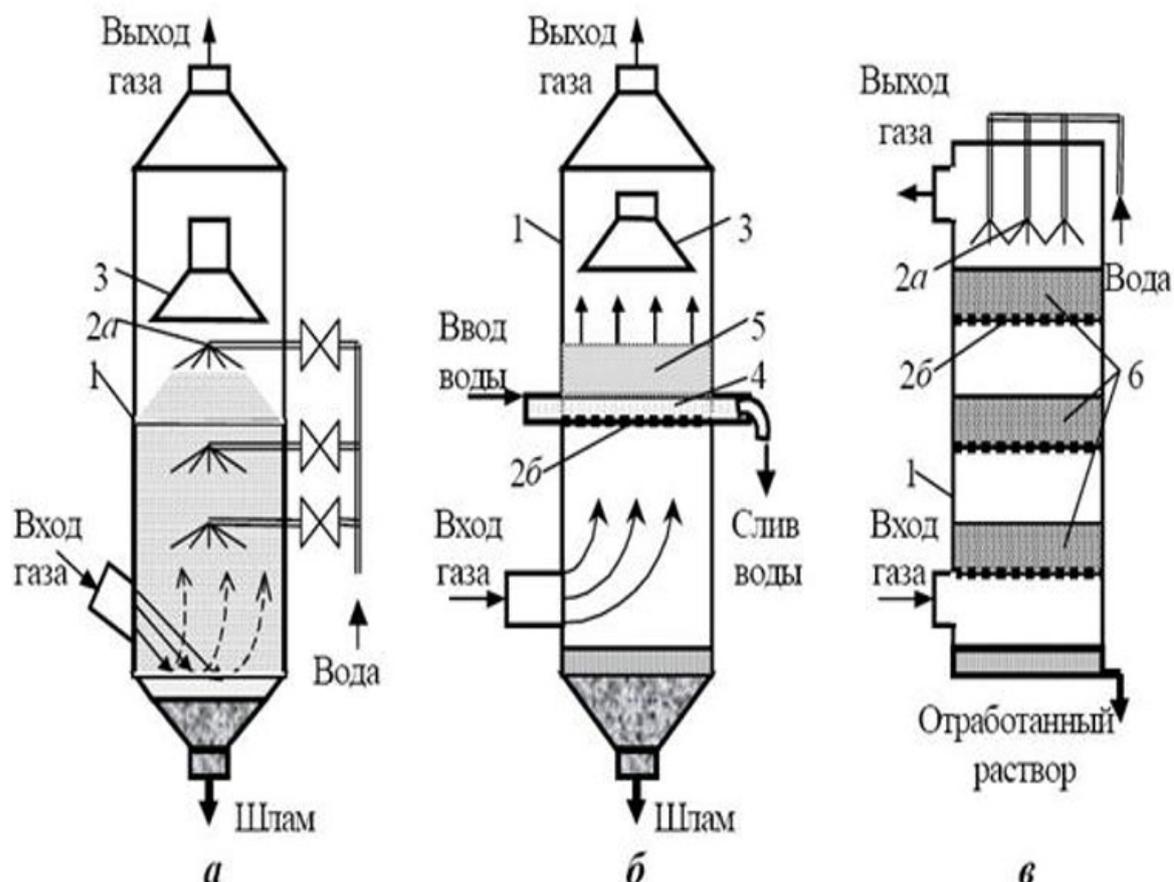


Рис. 4.1. Форсуночный скруббер (а), барботажно-пенный пылеуловитель(б), орошаемая противопоточная насадочная башня (в):

- 1 – корпус; 2а – форсунки; 2б – решетка; 3 – брызгоуловитель;
4 – вода; 5 – пена; 6 – насадка

Форсуночные и центробежные скрубберы работают эффективно при улавливании частиц размером более 10–20 мкм. В данных аппаратах поток газа направлен под углом на зеркало воды, выступающей над поверхностью шлама (рис. 4.1, а). Крупные частицы образуют осадок в воде, а мелкая пыль с газовым потоком устремляется вверх в сторону орошающего потока, который создается форсунками (рис. 4.1, а), или пленки воды, которая подается через сопла в центробежном скруббере.

Удельный расход воды в форсуночных скрубберах равен 3–6 л/м³, скорость движения газового потока – 0,7–1,5 м/с, эффективность очистки – 60–70%. В центробежных скрубберах при запыленности газа до 20 г/м³ удельный расход воды равен 0,09–0,18 л/м³, эффективность очистки при скорости газа 15–20 м/с составляет 80–98%.

В барботажно-пенных пылеуловителях (рис. 4.1, б) газ подается на очистку под горизонтальную решетку 2б, затем проходит через отверстия в решетке и слой жидкости 4 и пены 5. При скорости газа до 1 м/с происходит барботажный режим очистки. С возрастанием скорости до 2–2,5 м/с образуется слой из пены над жидкостью. Данное техническое решение приводит к повышению эффективности очистки, однако при этом наблюдается рост выноса брызг из аппарата. Эффективность очистки газа от мелкой пыли равняется 95–96% при удельном расходе воды 0,4–0,5 л/м³.

Для повышения эффективности форсуночных скрубберов используют различные насадки (рис. 4.1, в).

Туманоуловители применяются для очистки воздуха от туманов щелочей, масел, кислот и прочих жидкостей. Волокнистые фильтры улавливают туманы таким образом, что на поверхности пор фильтра осаждаются капли, после чего жидкость стекает естественным образом под действием сил гравитации. Материалом для таких фильтров служат стекловолокно с диаметром волокон от 7 до 30 мкм или полимерные волокна (лавсан, полипропилен) диаметром от 12 до 40 мкм. В основе функционирования низкоскоростных туманоуловителей (скорость движения газа менее 0,15 м/с) лежит механизм диффузионного осаждения капель, а в высокоскоростных (2–2,5 м/с) действуют инерционные силы.

В конструкции низкоскоростного туманоуловителя (рис. 4.2) применяются трубчатые фильтрующие элементы. Они выполняются из волокнистых материалов и помещаются в зазор шириной 0,05–0,15 м между двумя сетчатыми цилиндрами, диаметры которых отличаются на 0,10–0,30 м. С одной стороны, эти элементы закрепляются вертикально к отверстиям верхней перегородки цилиндрического аппарата, а нижняя часть крепится через трубчатые гидрозатворы, погружаясь в стаканы с конденсированной жидкостью. Такая конструкция позволяет задерживать капли при проходе тумана с наружной стороны цилиндра во внутреннюю полость. Образующаяся в результате жидкость стекает в стакан. Гидравлическое сопротивление сухих фильтроэлементов равно 200–1000 Па. Эффективность очистки частиц размером менее 3 мкм составляет $\varepsilon = 99,9\%$.

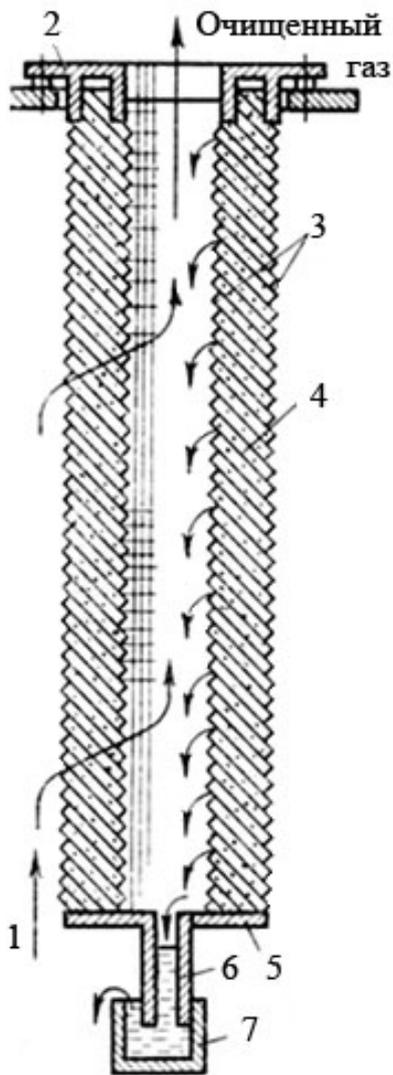


Рис. 4.2. Элемент низкоскоростного туманоуловителя: 1 – входной поток, 2 – верхний фланец, 3 – ограничительные сетки, 4 – наполнитель, 5 – нижний фланец, 6 – сливной патрубок, 7 – поддон

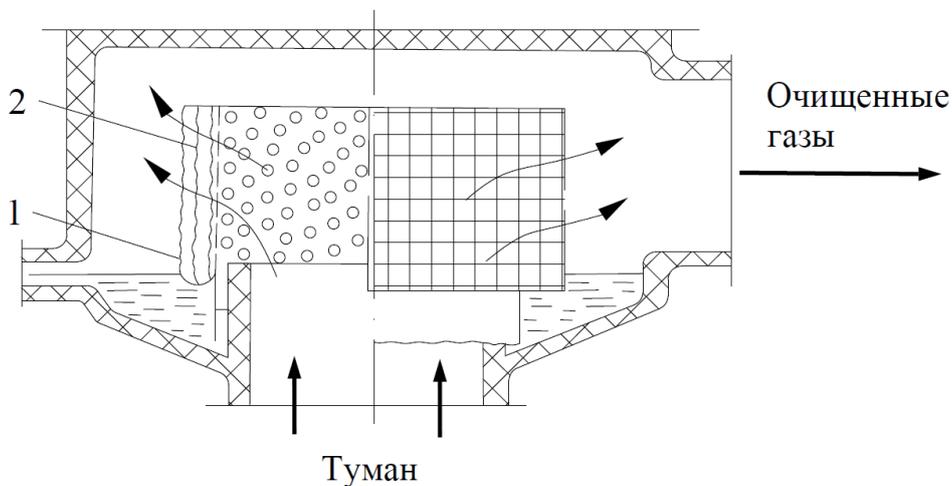


Рис. 4.3. Высокоскоростной туманоуловитель: 1 – ограничительная решетка, 2 – наполнитель

Высокоскоростные туманоуловители (рис. 4.3) имеют меньшие габаритные характеристики, а эффективность очистки составляет 90–98%. Для очистки воздушных масс от тумана создана конструкция фильтра с волокнами из полипропилена: ФВГ-Т. Его производительность – 3500–80000 м³/ч, эффективность очистки – 96–99%.

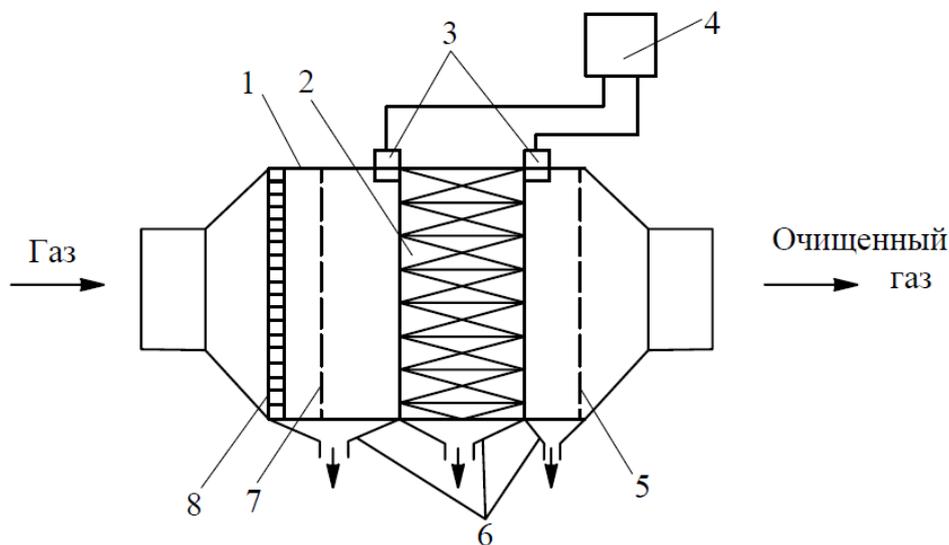


Рис. 4.4. Электрический туманоуловитель

Электрические туманоуловители (рис. 4.4) предназначены для очистки вентиляционных выбросов от пыли, туманов минеральных масел, пластификаторов. Для этого в ЦНИИпромзданий были разработаны электрические туманоуловители типа УПП. В корпусе 1 находится электрический туманоуловитель 2, источником питания которого является генератор 4 напряжением 13 кВ. Питание подводится к электродам через высоковольтные электроизоляторы с клеммами 3. Загрязненный воздух через входной патрубков, распределительную решетку 8 и сетку 7 поступает к туманоуловителю, тем самым очищаясь от примесей, а затем проходит в каплеуловитель 5 и подается на выход из УПП. Отделенная от воздуха жидкость накапливается в воронках 6, а затем удаляется из УПП через гидрозатворы. Пропускная способность УПП по воздуху составляет 5000–30000 м³/ч. УПП обеспечивают высокую эффективность очистки примесей с низким гидравлическим сопротивлением и предназначены для использования в системах с температурой газов до 70–80° С.

4.2. Скрубберы Вентури

Наиболее распространенными высокоэффективными аппаратами мокрой очистки от пылей, аэрозолей и газовых смесей являются скрубберы Вентури (рис. 4.5).

Конструкция трубы Вентури представляет собой сужающийся участок (конфузор), в который поступает очищаемый газ и жидкость, и расширяющийся

участок (диффузор) [14]. Входящий поток газа поступает в конфузор, и по мере того, как площадь поперечного сечения потока уменьшается, скорость газа, согласно уравнению Бернулли, возрастает до 30–40 м/с. При этом давление потока снижается, что обеспечивает дополнительный подсос жидкости, поступающей через форсунки в сужающуюся секцию. В режиме тонкой очистки от высокодисперсных пылей (вплоть до субмикронных размеров) скорость газов в горловине составляет 100–200 м/с [13]. Движущийся турбулентно поток газа разбивает поток жидкости на большое количество очень мелких капель. Пыль, содержащаяся в газе, оседает на поверхности этих капель. Далее поток перемещается в диффузор, где его скорость снижается до 15–20 м/с. Капли жидкости с адсорбированными на них частицами объединяются (коагулируют) в более крупные и отделяются от потока газа. Далее поток поступает в каплеуловитель, который представляет собой прямоточный циклон.

Эффективность очистки обуславливается суммарной поверхностью капель, скоростью движения частиц жидкости и пыли в диффузоре и равномерностью распределения капель жидкости по сечению конфузора [14].

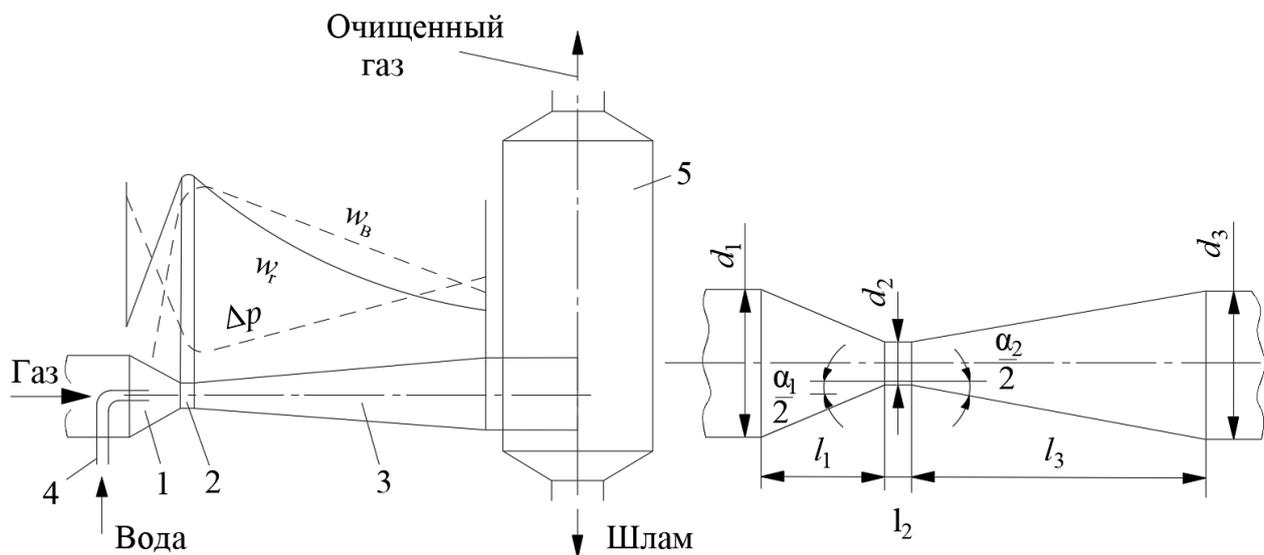


Рис. 4.5. Скруббер Вентури: а – общий вид; б – нормализованная труба Вентури. Пунктиром изображены диаграммы изменения скорости и давления по сечению скруббера; 1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор; 4 – подача воды; 5 – каплеуловитель

Работа скрубберов Вентури показывает высокую эффективность очистки аэрозолей (до 99%) со средним размером частиц 1–2 мкм при начальной концентрации примесей до 100 г/м³. Удельный расход воды – 0,5–1,2 л/м³. Аэродинамическое сопротивление пылегазового потока в скруббере достаточно велико – до $\Delta P = 10\text{--}20$ кПа, что при всех достоинствах скруббера является его существенным недостатком.

4.3. Расчет скруббера Вентури

Для расчета геометрических характеристик скруббера Вентури и его эффективности необходимы следующие исходные данные: плотность газа в горловине ρ_{Γ} , кг/м³; скорость газа в горловине V , м/с; массовый расход газа m_{Γ} , кг/с; массовый расход орошающей жидкости $m_{\text{ж}}$, кг/с; давление жидкости $P_{\text{ж}}$, кПа; плотность жидкости $\rho_{\text{ж}}$, кг/м³. Все параметры приводятся к условиям работы скруббера.

Расчет геометрических характеристик. Расчет размеров нормализованной трубы Вентури выполняют по методике НИИОГаза.

Диаметры входного сечения трубы Вентури (конфузора) d_1 (рис. 4.5, б), горловины d_2 и диффузора d_3 определяются по формуле [8]:

$$d = 1.88 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{Q_{\Gamma}}{V}}, \quad (4.1)$$

где d – диаметр соответствующего сечения, м, Q_{Γ} – объемный расход пылегазового потока, приведенный к условиям на входе, м³/ч; V – скорость потока в рассматриваемом сечении, м/с.

Длина конфузорной части трубы Вентури определится по следующей зависимости:

$$l_1 = \frac{(d_1 - d_2)}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}}, \quad (4.2)$$

где d_2 – диаметр горловины трубы, м; d_1 – диаметр входного сечения, м; α_1 – угол сужения конфузора, принимаемый 25–30°.

Длина горловины трубы l_2 , м, рассчитывается как

$$l_2 = 0.15 d_2, \quad (4.3)$$

а длина диффузора, м – как

$$l_3 = \frac{(d_3 - d_2)}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2}}, \quad (4.4)$$

где α_2 – угол раскрытия диффузора, принимаемый, по данным НИИОГаза, равным 7°.

Диаметр выходного сечения форсунки, м, составляет

$$d_{\phi} = \sqrt{\frac{4M_{\text{ж}}}{\mu \pi \sqrt{2g\rho_{\text{ж}}}}} \quad (4.5)$$

где $M_{\text{ж}}$ – секундный массовый расход жидкости, кг/с; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с, g – ускорение свободного падения, м/с².

Диаметр каплеуловителя (циклона с водяной пленкой) определяется по формуле:

$$d_{\kappa} = 0.0188 \sqrt{\frac{Q_{\Gamma}}{V_{\Pi}}}, \quad (4.6)$$

где Q_{Γ} – объемный расход газа на входе в аппарат, м³/ч, V_{Π} – скорость газа в цилиндрической части каплеуловителя, м/с.

Расчет эффективности. Расчет эффективности скруббера Вентури производится в соответствии со следующим алгоритмом [13].

Определяют гидравлическое сопротивление сухой трубы Вентури, Па, по формуле

$$\Delta P_{\Gamma} = \xi_{\Gamma} \rho_{\Gamma} V_{\Gamma}^2 / 2, \quad (4.7)$$

где ξ_{Γ} – коэффициент гидравлического сопротивления сухой трубы; V_{Γ} – скорость газа в горловине, м/с; ρ_{Γ} – плотность газа в горловине.

Рассчитывают гидравлическое сопротивление, обусловленное введением орошающей жидкости, Па, по формуле

$$\Delta P_{\text{ж}} = \xi_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}^2 / 2, \quad (4.8)$$

где $\xi_{\text{ж}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления трубы, обусловленный вводом жидкости; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³.

Величина $\xi_{\text{ж}}$ находится из соотношения

$$\xi_{\text{ж}} / \xi_{\Gamma} = 0,63 \left(\frac{M_{\text{ж}} \cdot \rho_{\Gamma}}{M_{\Gamma} \cdot \rho_{\text{ж}}} \right)^{-0,3}, \quad (4.9)$$

где $M_{\text{ж}}$ и M_{Γ} – массовые расходы жидкости и газа соответственно, кг/с.

Гидравлическое сопротивление трубы Вентури, Па, находят по формуле

$$\Delta P = \Delta P_{\Gamma} + \Delta P_{\text{ж}}. \quad (4.10)$$

Рассчитывают суммарную энергию сопротивления K_{Γ} , Па, по формуле

$$K_{\Gamma} = \Delta P + P_{\text{ж}} \cdot \frac{Q_{\text{ж}}}{Q_{\Gamma}}, \quad (4.11)$$

где $P_{\text{ж}}$ – давление распыляемой жидкости на входе в пылеуловитель, Па; $Q_{\text{ж}}$ и Q_{Γ} – объемные расходы жидкости и газа, м³/с, соответственно:

$$Q_{\text{ж}} = \frac{M_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}; \quad (4.12)$$

$$Q_{\Gamma} = \frac{M_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}}, \quad (4.13)$$

где $M_{\text{ж}}$ – расход орошаемой жидкости, кг/с; $M_{\text{г}}$ – массовый расход газа, кг/с; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³.

Определяют эффективность скруббера Вентури:

$$\varepsilon = 1 - e - B \cdot K_{\text{T}} \cdot n, \quad (4.14)$$

где B и n – константы, зависящие от физико-химических свойств пыли и ее дисперсного состава (табл. 4.1); K_{T} – суммарная энергия сопротивления, Па.

Таблица 4.1. Значения B и n для различных загрязнений

Загрязнитель	B	n
Конверторная пыль	$9,88 \cdot 10^{-2}$	0,4663
Ваграночная пыль	$1,355 \cdot 10^{-2}$	0,6210
Мартеновская пыль	$1,915 \cdot 10^{-2}$	
Сажа	10^{-5}	1,36
Туман фосфорной кислоты	$1,34 \cdot 10^{-2}$	0,6312

5. ФИЛЬТРЫ

5.1. Виды фильтров

Фильтром очистки воздуха является устройство, которое отделяет аэрозольные частицы от фильтруемого воздуха посредством фильтрующего материала или иными методами [15].

Фильтры нашли широкое применение во многих отраслях промышленности для тонкой очистки воздушных масс от примесей в процессе вентиляции и при очистке газовых выбросов. Преимущества очистки методом фильтрации заключаются в относительно низких финансовых затратах на оборудование (кроме фильтров из металлокерамики) и высокой эффективности при тонкой очистке. Очевидными недостатками данного функционального элемента являются высокое гидравлическое сопротивление и быстрый процесс загрязнения фильтрующего материала пылью [7], что обуславливает потребность в частой очистке или замене фильтра.

По материалам [15], фильтры, применяемые во всех типах систем вентиляции и кондиционирования воздуха, можно классифицировать в следующем порядке (таблица 5.1).

Таблица 5.1. Классификация фильтров общепромышленного применения

Группа фильтров	Класс фильтра	Средняя эффективность, %	
		ε_C	ε_A
Фильтры грубой очистки	G1	$\varepsilon_C < 65$	–
	G2	$65 \leq \varepsilon_C \leq 80$	–
	G3	$80 \leq \varepsilon_C \leq 90$	–
	G4	$90 \leq \varepsilon_C$	–
Фильтры тонкой очистки	F5	–	$40 \leq \varepsilon_A \leq 60$
	F6	–	$60 \leq \varepsilon_A \leq 80$
	F7	–	$80 \leq \varepsilon_A \leq 90$
	F8	–	$90 \leq \varepsilon_A \leq 95$
	F9	–	$95 \leq \varepsilon_A$

Обозначения:
 ε_C – эффективность, определяемая по синтетической пыли весовым методом (по разности массовой концентрации частиц до и после фильтра);
 ε_A – эффективность, определяемая по атмосферной пыли.

Классификация фильтров, которые обеспечивают ряд специальных требований к параметрам чистоты воздуха, в том числе чистых помещений, представлена в таблице 5.2.

Назначением фильтров тонкой очистки является улавливание с очень высокой степенью эффективности (более 99%) преимущественно субмикронных частиц из промышленных газов с небольшой входной концентрацией (менее 1 мг/м^3) и скоростью фильтрования менее $0,10 \text{ м/с}$. Данный тип фильтров

используется для улавливания особо токсичных частиц, а также для ультратонкой очистки воздуха в ряде медицинских технологических процессах. Эти фильтры не подвергаются регенерации [16].

Таблица 5.2. Классификация фильтров специального назначения

Группа фильтра	Класс фильтра	Интегральное значение		Локальное значение	
		эффективности, %	коэффициента проскока, %	эффективности, %	коэффициента проскока, %
Фильтры высокой эффективности	H10	85	15	–	–
	H11	95	5	–	–
	H12	99,5	0,5	97,5	2,5
	H13	99,95	0,05	99,75	0,25
	H14	99,995	0,005	99,975	0,025
Фильтры сверх-высокой эффективности	U15	99,9995	0,0005	99,9975	0,0025
	U16	99,99995	0,00005	99,99975	0,00025
	U17	99,999995	0,000005	99,9999	0,0001

Воздушные фильтры применяются в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха. Область их применения соответствует уровню концентрации пыли менее 50 мг/м^3 , при высокой скорости фильтрации – до $2,5\text{--}3 \text{ м/с}$. Фильтры могут быть как нерегенерируемыми, так и регенерируемыми.

Промышленные фильтры (тканевые, зернистые, грубоволокнистые) применяются для очистки промышленных газов концентрацией до 60 г/м^3 . Фильтры регенерируются.

В процессе фильтрования происходит задержание частиц примесей на пористых перегородках материала при движении через них дисперсных сред. Принципиальная схема фильтрования в пористой перегородке представлена на рис. 5.1. Фильтр состоит из корпуса 1, который разделен пористой перегородкой (фильтроэлементом) 2 на два объема. В фильтр попадают загрязненные газы, подвергаемые очистке при прохождении фильтроэлемента. Частицы примесей остаются на входной части пористой перегородки, а также задерживаются в порах.

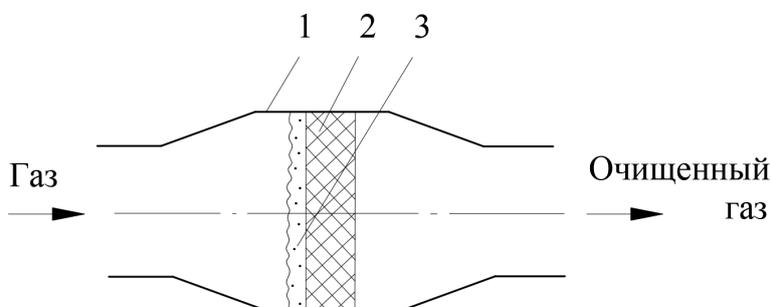


Рис. 5.1. Схема процесса фильтрования: 1 – корпус; 2 – фильтрующий элемент; 3 – слой осевших примесей

Примеси создают на поверхности перегородки слой 3, который становится для вновь поступающих частиц частью фильтрующей перегородки. Данное обстоятельство повышает эффективность очистки фильтра, но в то же время увеличивает перепад давления на фильтроэлементе.

Чаще всего для фильтрации используются специально изготовленные волокнистые материалы – стекловолокно, шерсть или хлопок с асбестом, асбоцеллюлозу. В зависимости от фильтрующего материала фильтры подразделяются на тканевые фильтры (в том числе рукавные), волокнистые, из зернистых материалов (керамика, металлокерамика, пористые пластмассы).

По типу фильтрующей перегородки фильтры классифицируются следующим образом [17]:

- с зернистыми неподвижными слоями, состоящими из свободно насыпанных зернистых материалов, зачастую применяют фильтры из гравия. Нашли свое применение для очистки газов от крупнодисперсных частиц загрязнений механического происхождения (от дробилок, сушилок, мельниц).
- с зернистыми псевдооживленным слоями и с гибкими пористыми перегородками – тканевые материалы, произведенные из природных синтетических или минеральных волокон, нетканые волокнистые материалы (войлоки, иглопробивные материалы, бумага, картон, волокнистые маты); ячеистые листы (губчатая резина, мембранные фильтры пенополиуретан);
- с полужесткими пористыми перегородками – слои волокон, стружка, вязаные и тканые сетки, положенные на опорные устройства или зажатые между ними;
- с жесткими пористыми перегородками – зернистые материалы (пористая керамика или пластмасса, спеченные или спрессованные порошки металлов, пористые стекла, углеграфитовые материалы и др.); волокнистые материалы (сформированные слои из стеклянных и металлических волокон); металлические сетки и перфорированные листы.

Для тонкой очистки газов от аэрозолей и мелкодисперсной пыли применяют тканевые фильтры, которые имеют фильтрующие материалы двух типов – обычные ткани и войлоки из синтетических волокон (лавсана, ПВХ, капрона), которые изготавливаются методом сволачивания или механического перепутывания волокон иглопробивным способом. В базовых фильтровальных тканях размер сквозных пор между нитями лежит в интервале 100–200 мкм [16].

Хлопчатобумажные и шерстяные ткани обладают подходящими свойствами фильтрования, но имеют меньшие прочные характеристики и химическую стойкость, чем синтетические. Проволочные сетки изготавливаются из специальных марок сталей, меди, латуни, бронзы, никеля и могут функционировать в широком диапазоне температур (0–800 °С), в химически агрессивных средах. Фильтрующим элементам из пористой керамики, пористых металлов присущи высокая прочность, а также коррозионная и термостойкость [8].

Фильтрующие материалы выбирают, ориентируясь на определенные условия очистки.

Хлопчатобумажные ткани обладают хорошими фильтрующими свойствами и имеют низкую финансовую стоимость, но обладают малой химической и термической стойкостью, высокой горючестью и влагоемкостью.

Шерстяные ткани имеют повышенную воздухопроницаемость, обеспечивают необходимый уровень очистки и регенерации, однако обладают низкой стойкостью к кислым газам и туману серной кислоты и являются более дорогостоящими, чем хлопчатобумажные. При длительном воздействии высокой температуры волокна становятся хрупкими, поэтому применяются при температуре газов не выше 90 °С.

Синтетические ткани конкурируют с остальными материалами из хлопка и шерсти, так как обладают более высокой прочностью, стойкостью к повышенным температурам и агрессивным воздействиям, более низкой стоимостью. Из разнообразия синтетических материалов выделяют нитроновые ткани, применяемые при температуре 120–130°С в химической промышленности и цветной металлургии. Лавсановые ткани, которые нашли применение для очистки горячих сухих газов в цементной, металлургической и химической промышленности, в кислых средах имеют высокую стойкость, однако в щелочных их стойкость резко снижается. Стекланые ткани приемлемы для использования при 150–350°С [17].

Принцип действия пористых фильтров всех разновидностей состоит в фильтрации газа через пористую перегородку, из-за чего твердые частицы осаждаются, а газ всем своим объемом перетекает через нее.

При течении потока сквозь фильтровальный материал газ огибает волокна, более крупные частицы пыли под воздействием инерционных сил сохраняют прежнее прямолинейное направление движения и при соприкосновении с цилиндрическими волокнами фильтра остаются на их поверхности благодаря силам межмолекулярного взаимодействия. Данный процесс характерен для захвата именно крупных частиц и проявляется более интенсивно при увеличении скорости фильтрования газа.

На рис. 5.2 представлены отдельные процессы улавливания загрязняющих частиц фильтрующим материалом. Остановка частиц на поверхности пор фильтроэлемента осуществляется в результате совместного действия эффекта касания, а также процессов диффузионного, инерционного и гравитационного осаждения частиц. Наиболее важными механизмами являются касание, диффузия и инерция. Гравитация и термофорез (осаждение за счет разности температур газа и частицы) обычно незначительны, а электрические силы могут играть существенную роль только при наличии электрического поля. Ситовой эффект не используется. (Ситовой эффект наблюдается, когда диаметр частиц превышает размер пор и процесс отсеивания частиц начинается на входной поверхности фильтра с образованием слоя осадка).

Действие фильтрования в наиболее распространенных волокнистых фильтрах представляется как обтекание частицами изолированного цилиндра (из волокнистого материала), который установлен поперек потока [11]. Полагают, что частицы имеют сферическую форму (рис. 5.3). Расстояния между цилиндрическими волокнами фильтра весьма значительны и в 5–10 раз

превышают размеры частиц. Протекая сквозь фильтрующую перегородку, поток газа разделяется на тонкие непрерывно разъединяющиеся и смыкающиеся струи.

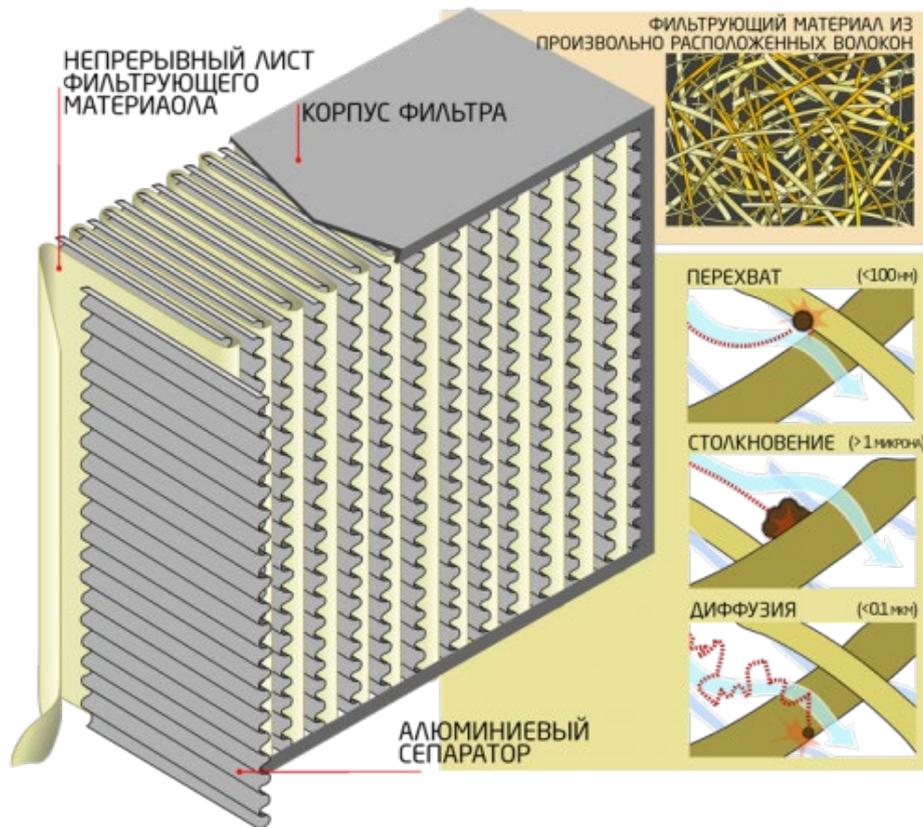


Рис. 5.2. Механизмы улавливания пыли в волокнистом фильтре

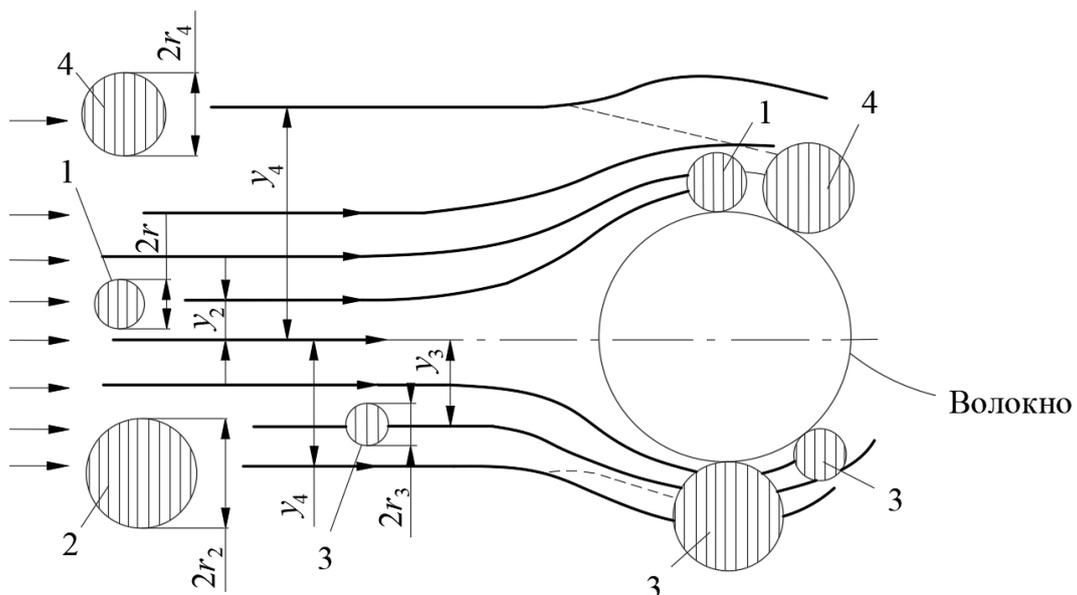


Рис. 5.3. Схема движения частиц аэрозоля при обтекании одиночного волокна:
 1 – механизм касания; 2 – инерционный механизм;
 3 – диффузионный механизм; 4 – электростатический механизм

В случае тканевых фильтров большая часть процесса улавливания происходит в слое осадка частиц на лобовой поверхности фильтра. Уже известные нам механизмы – касание, инерция и диффузия – оказывают действие лишь в начале процесса фильтрации. Сразу после очистки фильтра возникают новые наслоения осадка, основным механизмом становится ситовой эффект.

Эффект касания (зацепления) появляется во время соприкосновения частиц примесей с поверхностью фильтрующего материала, который образует поверхность пор. В процессе зацепления и захвата частиц за счет касания ими поверхности обтекаемого тела важен размер частиц. Соприкосновение происходит в том случае, если траектории частиц проходят на расстоянии, равном или меньшем радиуса самой частицы. Процесс происходит во всем пространстве порового объема [11].

Расчет фильтров общего назначения для систем вентиляции производят преимущественно на основе опытной информации, но примерную оценку эффективности их работы можно получить при помощи приводимых ниже теоретических зависимостей. Эффект зацепления характеризуется параметром R , который представляет собой отношение диаметров частицы и обтекаемого тела $R = d_q/d_T$ (рис. 5.4) [4].

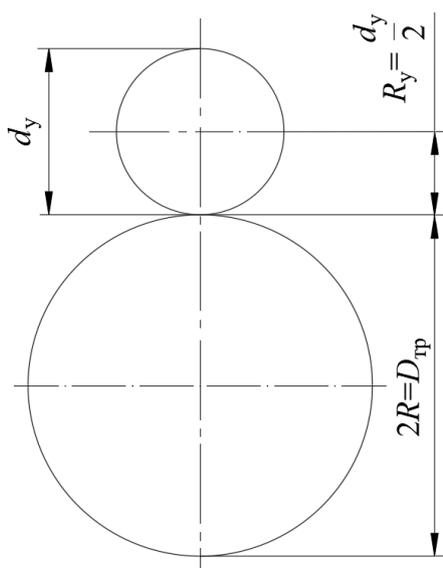


Рис. 5.4. К расчету эффекта осаждения

Если величина R столь мала, что можно пренебречь инерционными эффектами, то эффективность зацепления для шара составляет

$$\varepsilon_R = (1 + R^2) - \frac{1}{1 + R} \approx 3R. \quad (5.1)$$

В этом же случае для цилиндра верно соотношение

$$\varepsilon_R = (1 + R) - \frac{1}{1 + R} \approx 2R. \quad (5.2)$$

Если за счет большого значения инерционных эффектов траектории осаждающихся частиц прямолинейны, то справедливы следующие

соотношения: для шара $\varepsilon_R \approx 2R$, для цилиндра $\varepsilon_R = R$. Тогда при потенциальном обтекании шара эффективность механизма зацепления находится в диапазоне $2R-3R$, а при потенциальном обтекании цилиндра – $R-2R$.

Чтобы определить эффективность осаждения частиц за счет касания при вязком обтекании цилиндра, воспользуемся следующими уравнениями:

$$\varepsilon_R = \frac{R^2}{1 - \ln Re_T}; \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_R = R^2 Re_T^{0,0625}, \quad (5.4)$$

где $Re_T = \frac{d_T \cdot V_T \cdot \rho_T}{\mu_T}$ – критерий Рейнольдса для газа, обтекающего тело.

Из представленных выше уравнений можно сделать вывод, что эффективность зацепления возрастает при осаждении частиц на сферах с малым диаметром. Также они показывают, что осаждение частиц за счет эффекта зацепления не зависит от скорости газов, но в значительной степени определяется режимом течения потока газа.

Процесс осаждения частиц на поверхность пор за счет броуновской диффузии объясняется хаотическим тепловым движением молекул газа, которые все время соударяются с частицами примесей. В результате этих соударений частицы сдвигаются с линии тока и осаждаются на поверхности пор. Чем меньше размер частиц и меньше скорость их движения, тем более эффективно происходит процесс захвата частиц, обусловленный броуновской диффузией. Экспериментальные исследования показали, что процесс захвата частиц за счет броуновской диффузии становится выраженным при размере частиц $d_{ч} < 0,1$ мкм и скорости их движения меньше 1 м/с.

Эффективность осаждения ε_8 частиц одиночными волокнами при броуновском движении (температура потока ниже 100°C) определяется по формуле [19]:

$$\varepsilon_8 = 1,35 \cdot 10^{-2} / (V_T \cdot d_{ч} \cdot d_{в})^{0,5}, \quad (5.5)$$

где V_T – скорость газового потока, м/с; $d_{ч}$ – диаметр частиц пыли, мкм; $d_{в}$ – диаметр волокна, м. Так как на пути движения запыленного потока имеется несколько рядов волокон, то общая эффективность осаждения повышается в значительной мере [18].

Осаждаясь на волокнистом материале, частицы уменьшают размер пор и постепенно образуют слой пыли с порами значительно меньшего размера, чем в незапыленном фильтровальном материале. Непосредственно рабочим слоем при фильтрации является именно фильтровальный материал с осажденными на нем пылевыми частицами. В процессе отложения пыли возрастает гидравлическое сопротивление и тем самым уменьшается производительность фильтра. Именно из-за этого при достижении некоторого значения сопротивления возникает необходимость регенерации фильтра, т.е. удаления пыли.

Гидравлическое сопротивление слоя осевшей пыли определяют по формуле Козени–Кармана [4]:

$$\Delta P = k_c \cdot \mu_r \cdot V_r \cdot G(1 - m_{\text{п}}) / (d_{\text{п}}^2 \cdot m_{\text{п}}^3 \rho_{\text{ч}}) [\text{Па}], \quad (5.6)$$

где k_c – коэффициент, принимаемый для пылей с диаметром частиц $d_{\text{ч}} < 6$ мкм равным 240; G – масса пыли, содержащейся в порах фильтровального материала, отнесенная к единице площади фильтра, кг/м²; $m_{\text{п}}$ – пористость слоя пыли, равная $m_{\text{п}} = (\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ч}}) / \rho_{\text{ч}}$, $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц, кг/м³; $\rho_{\text{м}}$ – плотность материала фильтра, кг/м³; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частиц пыли, м.

Процесс инерционного осаждения частиц примесей на поверхности пор фильтроэлемента обусловлен воздействием на частицы инерционных сил, которые возникают из-за отклонения линии тока от прямолинейного движения. Механизм инерционного осаждения аналогичен механизму, который был рассмотрен ранее в разделе 3.3. Циклоны. Огибая в потоке криволинейную поверхность пор и стремясь при этом сохранить свое прямолинейное движение, частицы переходят с одной линии тока на другую и касаются поверхности пор. Эффективность инерционного осаждения частиц зависит от величины критерия Стокса и критерия Рейнольдса:

$$\varepsilon = f(St, Re), \quad (5.7)$$

где $St = \frac{d_{\text{ч}}^2 \cdot V_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot K_{\text{к}}}{18d_{\text{ч}} \cdot \mu_r}$ – критерий Стокса, численно равный отношению

расстояния, проходимому частицей с начальной скоростью $V_{\text{ф}}$ до остановки, к характерному размеру (диаметру сферы); $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц; $K_{\text{к}}$ – поправка Кенингема-Милликена на увеличение подвижности (скольжения) частиц, размер которых сравним со средней длиной свободного пробега газовых молекул $L_{\text{м}}$,

$$L_{\text{м}} = \mu \frac{\sqrt{\frac{\pi M}{2R_{\text{г}} T}}}{P_{\text{г}}}. \quad (5.8)$$

где M – масса 1 моля газа; $R_{\text{г}}$ – газовая постоянная; T – температура газа, К. Для воздуха при температуре $T = 293\text{К}$ и давлении $P = 760$ мм. рт. ст. $L_{\text{м}} = 6,5 \cdot 10^8 \text{м}$.

$$K_{\text{к}} = 1 + \left(1,257 + 0,4 \cdot \frac{\exp(-55d_{\text{ч}})}{l_{\text{м}}} \right) \cdot \frac{2l_{\text{м}}}{d_{\text{ч}}} \quad (5.9)$$

Значения поправки $K_{\text{к}}$ на скольжение приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Зависимость коэффициента $K_{\text{к}}$ от размера частиц

$d_{\text{ч}}$, мкм	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0	10,0
$K_{\text{к}}$	90	24,5	7,9	2,9	1,57	1,16	1,03	1,00

Зависимость эффективности очистки газов за счет инерционного эффекта $\varepsilon_{и}$ от числа Стокса, полученная экспериментальным путем для волокнистых фильтров, представлена на рис. 5.5. Инерционный эффект осаждения частиц практически отсутствует при движении частиц размером менее 1 мкм со скоростью менее 1 м/с. Эффективность инерционного осаждения увеличивается с возрастанием размера волокон, уменьшением скорости газового потока и снижением размера частиц.

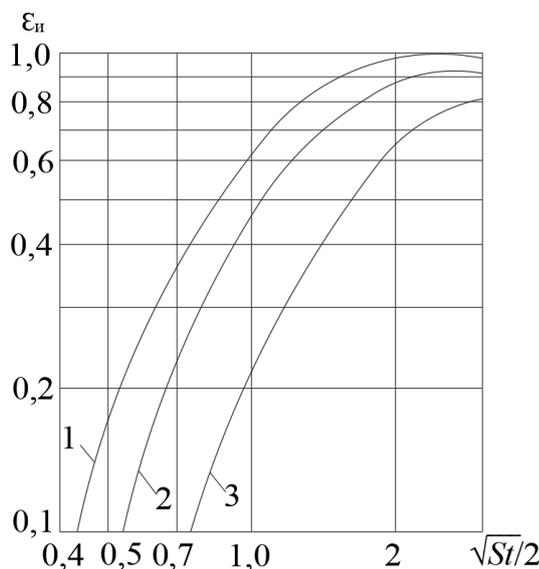


Рис. 5.5. Зависимость эффективности инерционного осаждения от числа Стокса: 1 – $Re = 150$; 2 – $Re = 30$; 3 – $Re \leq 2$.

Образование режима инерционного осаждения частиц на поверхности пор фильтроэлемента характеризуется критическим числом $St_{кр}$; при $St < St_{кр}$ $\varepsilon_{и} = 0$. Для условий вязкого обтекания цилиндра при $Re = 0,1$ критическое число Стокса равно $4,3 \pm 0,1$. Рост числа Рейнольдса потока газа приводит к уменьшению значений $St_{кр}$ до 0,1–0,2.

Процесс гравитационного осаждения частиц на поверхность пор происходит из-за их оседания со скоростью витания. В действительности в фильтрах ввиду малых скоростей витания частиц по сравнению со скоростью фильтрации гравитационный механизм осаждения частиц имеет малое значение. Данный эффект обретает значимость лишь при фильтрации аэрозоля с частицами диаметром порядка 1 мкм со скоростью менее 0,05 см/с.

Общая эффективность очистки газового потока ε с учетом всех рассмотренных процессов осаждения частиц на поверхности пор определяется по формуле

$$E = 1 - (1 - \varepsilon_{к}) \cdot (1 - \varepsilon_{д}) \cdot (1 - \varepsilon_{и}) \cdot (1 - \varepsilon_{г}). \quad (5.10)$$

Как было отмечено ранее, процессы осаждения частиц на поверхности пор по большей части зависят от размера частиц примесей, скорости фильтрации, размеров пор фильтроэлемента, состояния поверхности пор, параметров газового

потока и др. Экспериментальные исследования, которые были выполнены на фильтроэлементе из стеклянных волокон размером 1,5 мкм (рис. 5.6), демонстрируют экстремальный характер зависимости коэффициента проскока K частиц от их размера и скорости фильтрации. Восходящие ветви левой части кривых относятся к области преобладающего значения диффузного процесса осаждения, нисходящие ветви относятся к частицам, в осаждении которых значительную роль начинает играть эффект инерционного осаждения [20].

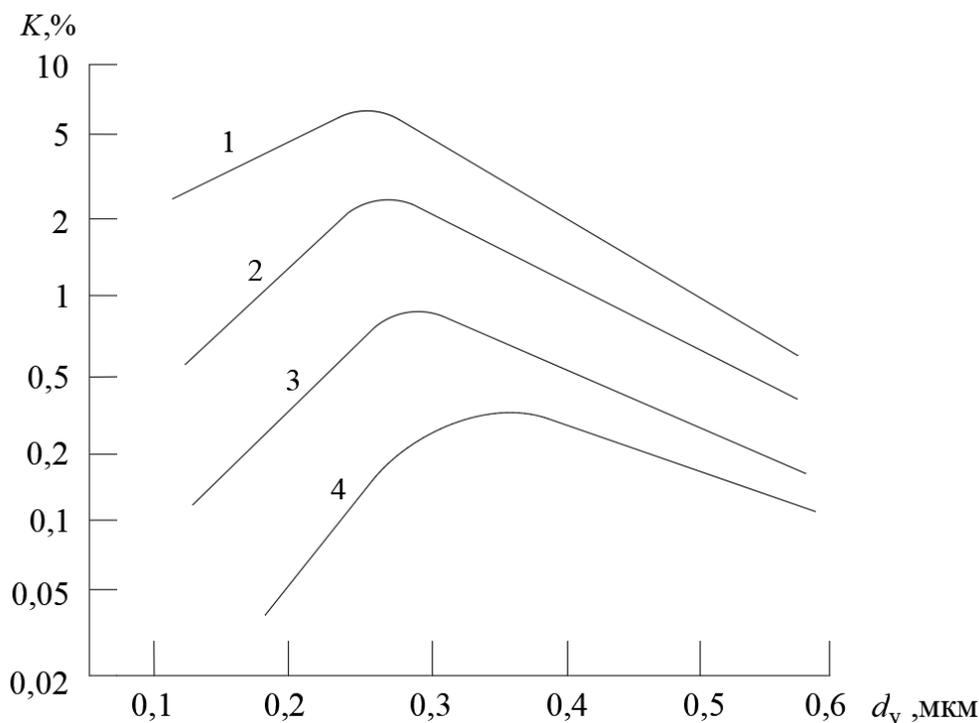


Рис. 5.6. Зависимость коэффициента проскока K от размеров частиц и скорости фильтрации, см/с: 1 – 0,94; 2 – 0,42; 3 – 0,21; 4 – 0,094

Результаты экспериментов показали, что повышение скорости фильтрации смещает максимум проскока в сторону частиц с меньшим диаметром. Это хорошо согласуется с теоретическими представлениями о влиянии скорости. Имеющиеся максимумы на кривых указывают на неблагоприятное сочетание параметров процесса фильтрования, свойств фильтроэлемента и примесей, при котором возможно снижение эффективности процесса очистки [20].

Следует отметить, что в фильтроэлементах из диэлектрических материалов на процессы фильтрования существенное влияние оказывает наличие зарядов на поверхности пор. Ставшие популярными фильтры Петрянова (ФП) из ультратонких перхлорвиниловых волокон (ФПП) обычно несут на поверхности волокон заряды, ввиду чего в начальной стадии процесса фильтрования на них достигается высокая эффективность очистки аэрозолей от примесей. Таким образом, при фильтровании запыленного газа ($d_q = 0,34$ мкм) через свежий материал ФПП при скорости фильтрации 0,01 м/с коэффициент проскока достигает 0,0001%, а после снятия заряда в тех же условиях коэффициент проскока становится равным 10%. Данное обстоятельство

затрудняет определение теоретической эффективности фильтроэлементов, и их эффективность на практике определяют экспериментально.

5.2. Характеристики некоторых фильтров и фильтрующих материалов

Эксплуатационный опыт показывает, что хорошо себя зарекомендовавшие в качестве фильтрующих материалов хлопчатобумажные и шерстяные ткани заменяются синтетическими тканями, обладающими повышенной прочностью, тепловой и химической стойкостью [21]. В стоимостном выражении синтетические ткани обычно дешевле натуральных тканей. Основные свойства некоторых тканей для фильтрования представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4. Основные свойства фильтрующих тканей

Ткань	Толщина, мм	Воздухопроницаемость, при $\Delta P = 49$ Па, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$	Термостойкость, °С		Химическая стойкость в среде		
			при длительном воздействии	при кратковременном воздействии	кислот	щелочей	растворителей
Сукно №2	1,5	3	65–85	90–95	ОП	ОП	Х
Нитрон	1,6	7,5	120	150	Х–У	У	Х
Лавсан	1,4	4,0	130	160	Х	У–П	Х
Хлорин №5231	1,32	7,6	65–70	80–90	ОХ	О–Х	У–Х
Стеклоткань	0,22	2,7	240	315	Х	У–П	ОХ

Обозначения: ОХ – очень хорошая; Х – хорошая; У – удовлетворительная; П – плохая; ОП – очень плохая

Для тонкой очистки газов от примесей практикуется применение нетканого материала, состоящего из волокнистого слоя с произвольным расположением волокон. Такими материалами являются войлоки, изготовленные специализированными иглопробивными машинами. Тонкость и эффективность очистки войлоков выше, чем у тканых фильтрующих элементов, изготовленных из нитей того же диаметра.

Ультратонкая очистка газов выполняется с применением материалов типа ФП. Конструктивно это нанесенные на марлевую подложку слои волокон из синтетических материалов диаметром 1–2 мкм. Полимерами для ФП выступают перхлорвинил (ФПП), фторполимеры (ФПФ) и др. Материалам ФП свойственны высокие фильтрующие качества и малая толщина (от 0,2 до 1 мм). Данный

материал используется для очистки агрессивных газов, заменяя при этом марлевую подложку, которая не гарантирует требуемую стойкость в данной среде. Широко распространены перхлорвиниловые волокна, имеющие высокую степень влагостойкости и химической стойкости в кислотах, щелочах, растворах солей, органических растворителях, но эти волокна имеют низкую термостойкость (60–70° С). Ацетатные волокна имеют низкую стойкость во влажных, кислотных и щелочных средах, однако их термостойкость достигает 150° С. Пылеемкость материалов типа ФП равна 50–100 г/м². Основным недостатком этих материалов является низкая прочность [17, 20].

Коэффициент проскока через ткань зависит от плотности и толщины фильтрующего материала, диаметра волокон, скорости фильтрования и размеров частиц аэрозоля. При скорости фильтрования 10 м/с и воздушной нагрузке до 360 м³/час на 1 м² коэффициент проскока определяется по формуле

$$\lg K = -\frac{\alpha \Delta P_{\text{ст}}}{\sqrt{V_{\phi}}}, \quad (5.11)$$

где α – коэффициент фильтрующего действия для данной марки ткани, зависящий от наличия или отсутствия электрического заряда частицы. Он приводится в специальной литературе, величина его изменяется в пределах 1–3. Скорость фильтрования, см/с, при заданном сопротивлении фильтра ΔP , Па, определяется по формуле

$$V_{\phi} = \left[\frac{\alpha \Delta P}{-2(\lg K - 0,7)} \right]^{2/3}. \quad (5.12)$$

Сопротивление загрязненного фильтра рекомендуется принимать в 2 раза больше сопротивления чистого, но не более 400–600 Па.

Еще одним наиболее применяемым фильтрующим материалом являются проволочные сетки, которые производятся из низкоуглеродистых или высоколегированных сталей, меди, латуни, бронзы, никеля и др. Сетки производят в соответствии с ГОСТ 3187-76 (с изменениями 1983-1992 гг.), ГОСТ 6613-86. Фильтрующие элементы, изготовленные из таких сеток, эксплуатируются в широком диапазоне температур, от 0 до 1000 К, в разнообразных по агрессивности средах. Тонкость очистки определяется размером ячейки сетки. Уменьшение размеров ячейки увеличивает степень тонкости очистки, но приводит к повышению ее гидравлического сопротивления. Применяемые в настоящее время сетчатые фильтрующие элементы обеспечивают абсолютную тонкость очистки 15–20 мкм, но при возникновении значительных перепадов давления на полотне сетки фильтра возникают деформации, ячейки теряют первоначальную форму, что ведет к местному увеличению размеров проходных отверстий. Эффект увеличения размеров проходных сечений устраняется спеканием узлов сетки после переплетения. Сетки со спеченными узлами прокатываются для обеспечения однородности размеров пор. Использование синтерированных сеток (сетки со

спеченными узлами) не приводит к деформации проходных отверстий, но в большой степени усложняет технологический процесс изготовления сеток.

В основном сетчатые фильтрующие элементы изготавливаются из нескольких слоев, это ведет к увеличению тонкости и эффективности очистки, однако становится причиной роста гидравлического сопротивления фильтрующего элемента пропорционально количеству слоев сеток. Фильтрующие элементы из сеток имеют определенные преимущества по сравнению с фильтрующими элементами из тканей и войлока, но уступают им по тонкости очистки.

На сегодняшний день созданы новые фильтрующие элементы из пористой керамики и пористых металлов различных типов. Особенности пористых металлических фильтрующих элементов являются высокая прочность и пластичность. Марка используемого материала обеспечивает необходимую коррозионную стойкость, жаростойкость и окислительную стойкость. Металлические фильтроэлементы оказывают хорошее сопротивление резким перепадам температур и являются технологичными: свариваются, допускают пайку и механическую обработку на металлорежущих станках. Также эти материалы нашли широкое применение для очистки газов от примесей в технологических процессах и успешно используются для очистки от примесей горячих дымовых выбросов, туманов.

Таблица 5.5. Данные для расчета гидравлического сопротивления сеток

Номер сетки по ГОСТ 3584-73	Число слоев	Критериальная зависимость	Диапазон измерения чисел Re
004	1	$\zeta = 4,5 + 107/Re$	4–600
0056	1	$\zeta = 3,5 + 100/Re$	10–600
0071	1	$\zeta = 3,6 + 105/Re$	10–600
0800	1	$\zeta = 3,0 + 100/Re$	10–600
025	1	$\zeta = 3,0 + 105/Re$	10–500
004	2	$\zeta = 12,9 + 55/Re$	50–500
0056	2	$\zeta = 7,5 + 178/Re$	50–500
0071	2	$\zeta = 7,6 + 215/Re$	30–500

5.2. Ячейковые фильтры

Конструктивно воздушные фильтры классифицируются на ячейковые (рамочные и каркасные), рулонные и рукавные. Широкое применение нашли ячейковые фильтры, так как они просты и надежны в эксплуатации, а также эффективны при улавливании грубой атмосферной пыли.

Ячейковый фильтр типа ФЯР изображен на рис. 5.7. Конструкция фильтра состоит из гофрированных стальных промасленных сеток Рекка.

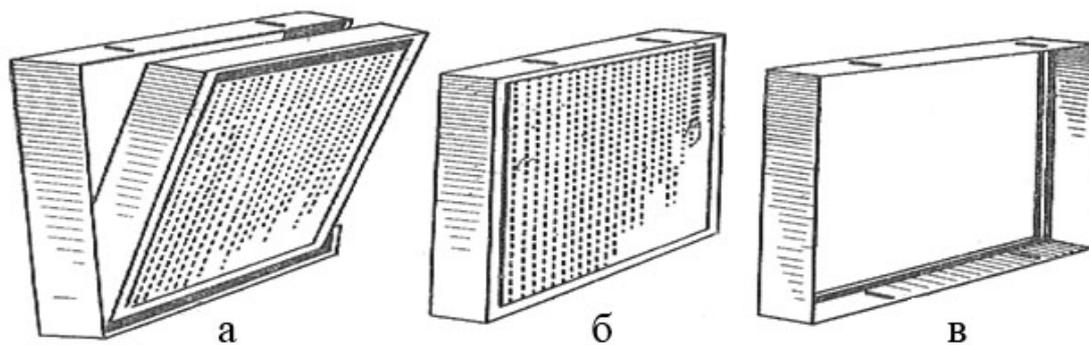


Рис. 5.7. Ячейка фильтра Рекка типа ФяР: а – ячейка, не закрепленная в рамке; б – ячейка, закрепленная в установочной рамке; в – установочная рамка

Ячейка состоит из металлической коробки, снаряженной сетками, которая зафиксирована защелками в установочной рамке. В процессе сборки панели установочные рамки соединяются друг с другом и образуют прочный каркас.

Назначением фильтра является очистка воздуха с уровнем запыленности не более 5 мг/м^3 . В таком случае фильтры Рекка должны подвергаться регенерации через каждые 250–2000 ч работы; очевидным недостатком данного элемента является короткий срок использования, так как операция регенерации – трудоемкий процесс [20].

Существует несколько типов ячейковых фильтров (Фя) различных модификаций в зависимости от наполнителя:

- ФяВ – с наполнением из 12 винипластовых «сеток» (по СТУ 30-124-23–62);
- ФяУ – с наполнением из упругого ультратонкого стекловолоконистого материала ФСВУ (по ТУ 21-01-369–70);
- ФяП – с наполнением из модифицированного пенополиуретана по МРТУ 6-06-1150-68.

В табл. 5.6 представлены технические показатели фильтров типа Фя.

Таблица 5.6. Технические показатели фильтров типа Фя

Показатели	ФяВ	ФяП	ФяУ
Номинальная производительность, $\text{м}^3/\text{ч}$	1540	1540	1540
Удельная нагрузка, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	7000	7000	7000
Начальное/конечное сопротивление, Па	50/300	60/300	40/300
Пылеемкость, г/м^2 , при $\Delta P = 2\Delta P_{\text{нач}}$	1500	200	400

(Для фильтров ФяУ пылеемкость соответствует условию $\Delta P = 5\Delta P_{\text{нач}}$, а перепад давления в начале работы отнесен к производительности $2200 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Монтаж фильтров типа производят в плоские или V-образные панели с пропускной способностью до $40 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ с числом ячеек до 25–27.

Пластмассовые сетки не корродируют и эксплуатируются без замасливателя, не уступая по эффективности фильтрам типа ФяР.

Ячейки фильтров ФяУ снабжены упругим, слегка промасленным стеклянным волокном диаметром 20–35 мкм. Большая упругость слоя, которая приобретается при изготовлении, обеспечивает их транспортировку и хранение в сжатом состоянии. Ширина слоя – 1150 мм, толщина – 50 мм.

Такие функциональные качества, как простота конструкции, дешевизна и доступность стекловолнистых матов, привели к широкому использованию фильтров этого типа. Фильтры со сменными фильтрующими волокнистыми материалами обычно применяются в малых кондиционерах. Они также используются и в более крупных, но одиночных установках, когда не требуется постоянное обслуживание ввиду того, что регулярная замена насадки не занимает много времени.

Еще одним из популярных типов фильтров являются объемные фильтрующие маты из проклеенных синтетических волокон, уложенных в слой с упорядоченной структурой. В качестве связующих применяют поливинилацетатную эмульсию или латексы и термопластовые порошки или специальные волокна, у которых температура плавления имеет более низкие значения [20]. Эффективность очистки фильтров ФяП составляет 70–85%. Регенерация его проводится путем промывки в воде с мылом.

Для всех фильтров: размеры 514×514×55 мм; площадь рабочего сечения 0,22 м²; эффективность очистки до 80 %; перепад давления в начале работы, при производительности 1540 м³/ч – 40 Па.

Расчет ячеек фильтров начинают с определения допустимой концентрации пыли в приточном воздухе, мг/м³:

$$C_{\text{пр}} = 0,3C_{\text{пдк}}, \quad (5.13)$$

где $C_{\text{пдк}}$ – предельно допустимая концентрация пыли в воздухе рабочей зоны, мг/м³.

Требуемая эффективность очистки воздуха от пыли, %, рассчитывается по формуле

$$E = 100 \cdot \frac{C_0 - C_{\text{пр}}}{C_0}, \quad (5.14)$$

где C_0 – концентрация пыли в очищаемом воздухе, мг/м³. Затем подбирают по каталогу ячейковый фильтр, обеспечивающий требуемую степень очистки воздуха. Зная пропускную способность одного фильтра, подсчитывают необходимое число фильтров:

$$n = \frac{Q}{q}, \quad (5.15)$$

где Q – расход очищаемого воздуха, м³/ч; q – пропускная способность (воздушная загрузка) одного ячейкового фильтра, м³/ч.

Суммарная площадь фильтрующей поверхности, м²,

$$S = a \cdot b \cdot n, \quad (5.16)$$

где a, b – размеры поперечного сечения фильтра, м.

Суммарная пылеемкость фильтров, г,

$$\Pi = p \cdot S, \quad (5.17)$$

где p – удельная пылеемкость фильтра, г/м².

Продолжительность эксплуатации фильтров без замены или регенерации фильтрующего материала, ч,

$$\tau = \frac{1000 \cdot \Pi}{(C_0 - C_{\text{пр}}) \cdot Q}. \quad (5.18)$$

Если продолжительность эксплуатации фильтров оказывается неудовлетворительной, то ее увеличивают, устанавливая большее число ячейковых фильтров.

5.3. Рулонные фильтры

Основным отрицательным качеством ячейковых фильтров является их ограниченный срок службы ввиду интенсивного загрязнения ячеек фильтрующего элемента и появления слоя осадка на его входной части. При этом возникает необходимость в частой замене фильтрующих элементов или их постоянной регенерации.

Данный недостаток в некоторой степени устраняется применением рулонных фильтров (рис. 5.8, а). Они используются для очистки воздуха с концентрацией примесей не более 10 мг/м³. В корпусе 1 рассматриваемого фильтра помещен подающий 2 барабан (с намотанным на нее чистым фильтрующим материалом 4), приемный 3 барабан, на который наматывается запыленная ткань и направляющие ролики 5.

На фильтре устанавливается датчик дифференциального манометра. С достижением заданного перепада давления (обычно $\Delta P = (2-3)\Delta P_{\text{нач}}$) прибор в автоматическом режиме включает электродвигатель, и материал перематывается на определенную длину. С целью уменьшения габаритов рулонных фильтров или повышения их производительности по газу используют компактные фильтры (рис. 5.8, б), в которых фильтрующая ткань по зигзагообразной траектории поступает через направляющие ролики 5 от подающего к приемному барабану.

Для изготовления рулонных фильтров используют различные ткани, которые обычно не регенерируют. Характеристики некоторых рулонных фильтров представлены в табл. 5.7.

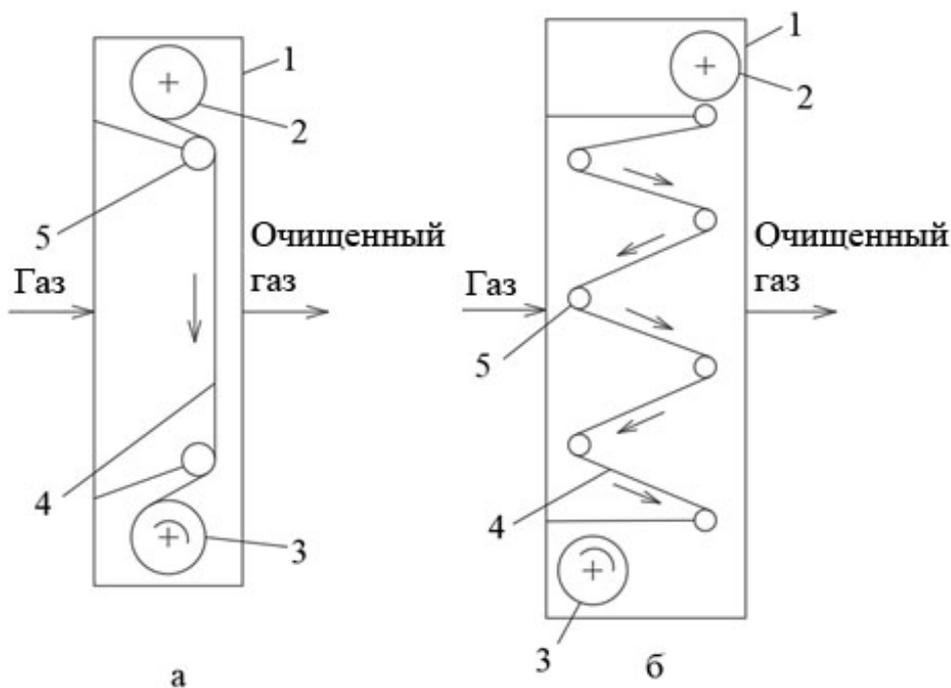


Рис. 5.8. Рулонные фильтры: а – обычного типа; б – компактный

Таблица 5.7. Характеристики рулонных фильтров

Тип фильтра	Материал фильтро-элемента	$\Delta p_{нач}$, Па	$\Delta p_{кон}$, Па	Пыле-емкость, г/м ²	Длина фильтро-элемента, м	Эффек-тивность очистки	Допустимая концентрация загрязнений, мг/м ³
ФРП	Нетканый материал	100	200	130	100	$\leq 0,8$	≤ 10
	ФВН	120	240				
ФРУ	Упругое стекло-волокно	40 – 50	140	300	25	0,8-0,9	≤ 1

В ряде ячейковых и рулонных фильтров применяют масляное покрытие фильтрующей перегородки. Это снижает вероятность проскока частиц через фильтр. Но в то же время могут возникнуть определенные трудности, которые выражаются в уносе масла из фильтра и последующем его осаждении на элементах конструкций за фильтром [21].

Расчет рулонных фильтров заключается в определении необходимой поверхности фильтрующего материала и потерь давления в фильтре.

5.4. Рукавные фильтры

Рукавные фильтры (рис. 5.9, 5.10) в основном используются для сухой очистки газовых выбросов. В цилиндрическом корпусе с конусным дном рукава из ткани или войлока крепятся к отверстиям нижней перегородки и к заглушкам верхней перегородки. Запыленный газ, который поступает через отверстия

нижней перегородки, попадает в рукава, фильтруется и через межрукавное пространство и отверстия верхней перегородки уходит из аппарата [6].

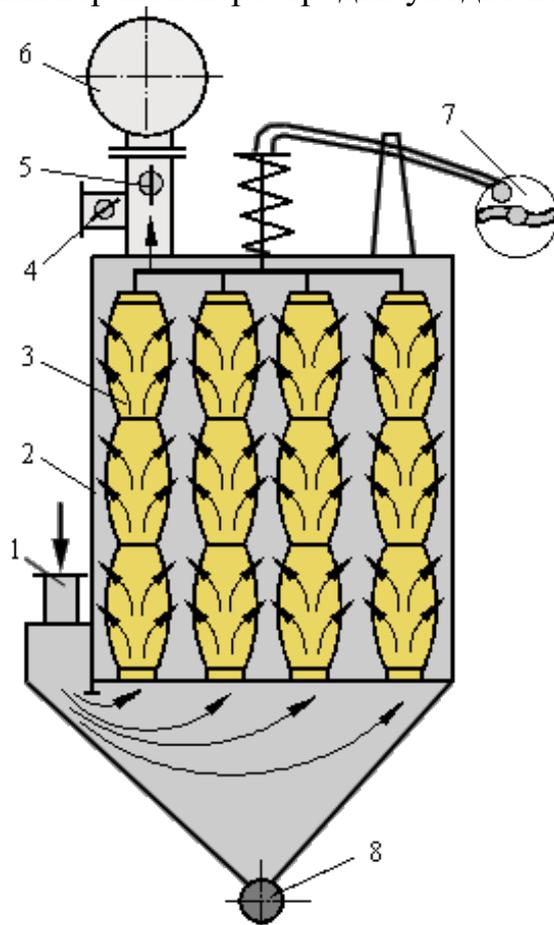


Рис. 5.9. Конструкция рукавного фильтра с механическим встряхиванием:
1 – входной патрубок; 2 – корпус фильтра; 3 – матерчатый рукав;
4 – продувочный клапан; 5 – выпускной клапан; 6 – коллектор очищенного газа; 7 – вал механизма встряхивания; 8 – пылевыгрузочное устройство

Пыль оседает на матерчатых фильтрах, а чистый воздух выходит наружу. Регенерация фильтра производится после того, как он отключается от системы очистки, встряхиванием рукавов специальным устройством (пыль собирается в конусном дне) и обратной продувкой их сжатым газом. Для стряхивания пыли в полость шнека используется механический (рис. 5.9) или пневматический удар (рис. 5.10). В каждый из рукавов фильтра направлена трубка, в которую специальным устройством через заданное время импульсно подается сжатый воздух. Фильтруясь через рукав в обратном направлении, воздух разрушает образовавшийся на внутренней поверхности рукава слой пыли, которая падает в бункер, откуда удаляется при помощи шнека или другого устройства. Отработавший продувочный воздух через подводящий газ патрубок поступает в газопровод неочищенного газа.

В целях повышения эффективности регенерации одновременно с обратной продувкой осуществляется встряхивание рукавов, для этого используется специальный встряхивающий механизм, перемещающий вверх и вниз крышку, к которой крепится рукав.

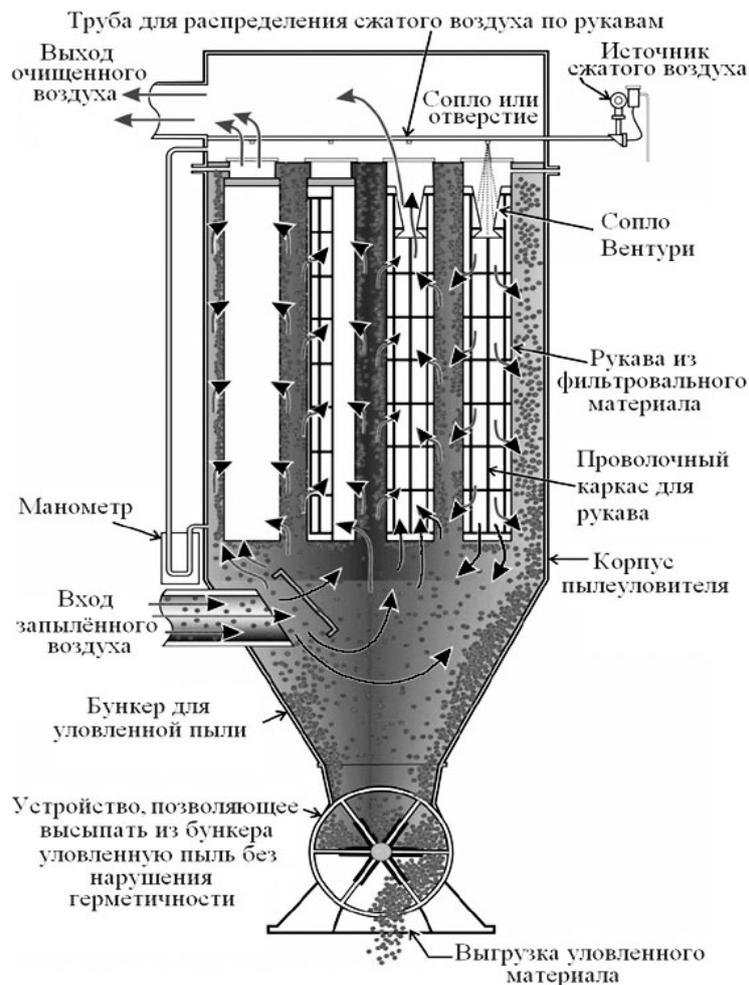


Рис. 5.10. Типичная конструкция рукавного фильтра с импульсной продувкой

Камеры фильтра переводят на регенерацию по очереди, и, следовательно, если в составе фильтра n камер, часть камер все время находится в работе.

Рукавные фильтры компактны и неприхотливы в обслуживании. Обслуживание в основном заключается только в периодической замене износившихся рукавов.

Допустимый уровень концентрации пыли на входе в рукавный фильтр – 20 г/м^3 , наибольшая температура газов: 130°C – для рукавов из лавсана и 230°C – для стеклоткани; производительность фильтра – до $50 \text{ м}^3/\text{ч}$; эффективность очистки – около 98% [6].

Расчет рукавных фильтров состоит в определении суммарной площади поверхности фильтровальных элементов, их гидравлического сопротивления и сопротивления корпуса фильтра, а также продолжительности работы фильтра до регенерации.

Исходные данные для расчета: объемный расход очищаемого газа $Q_{\text{оч}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$; концентрация пыли на входе в фильтр, $C_{\text{вх}}$, г/м^3 ; дисперсность пыли d , м; характеристика материала фильтрующей перегородки – воздухопроницаемость, $W_{\text{пр}}$, $\text{м}^3/\text{мин}$; температура газа, t_r , $^\circ\text{C}$; рекомендуемая нагрузка, q_p , $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{мин})$.

Удельная газовая нагрузка для фильтров определяется по выражению [6]:

$$q_p = q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5. \quad (5.19)$$

Здесь:

- q_n – нормативная удельная нагрузка, зависящая от вида пыли и ее склонности к агломерации;
- C_1 – коэффициент, характеризующий особенность регенерации фильтровальных элементов; для фильтров с импульсной продувкой $C_1 = 0,55–0,7$ при одновременной продувке и встряхивании $C_1 = 0,7–0,85$;
- C_2 – коэффициент, учитывающий влияние концентрации пыли на удельную газовую нагрузку, который определяется по графику (рис. 5.11).

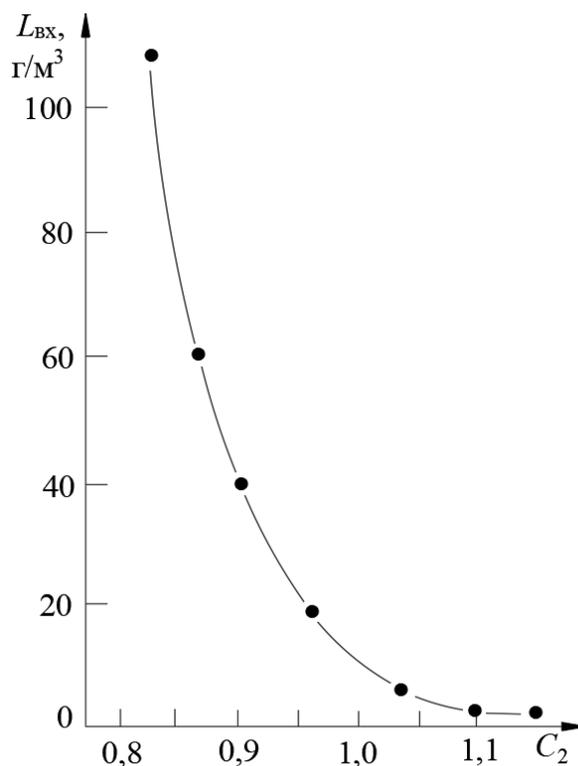


Рис. 5.11. Зависимость коэффициента C_2 от концентрации пыли на входе

- C_3 – коэффициент, учитывающий влияние дисперсного актива пыли в газе, который определяется по таблице 5.8.

Таблица 5.8. Зависимость коэффициента C_3 от размера частиц пыли

Медианный размер частиц пыли, мкм	Коэффициент C_3
Более 100	1,2–1,4
50–100	1,1
10–50	1,0
3–10	0,9
Менее 3	0,7–0,9

- C_4 – коэффициент, учитывающий влияние температуры газа, который определяется по таблице 5.9.

Таблица 5.9. Зависимость коэффициента C_4 от температуры газа

$t, ^\circ C$	20	40	60	80	100	120	140
C_4	1,0	0,9	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72

– C_5 – коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки, $C_5 = 0,95$.

Поверхность фильтрования определяется как

$$F_{\phi} = \frac{(Q_{\text{оч}} + Q_{\text{оп}})}{q_p} + F_p, \quad (5.20)$$

где $Q_{\text{оп}}$ – объем газа или воздуха, расходуемого на обратную продувку; F_p – фильтрующая поверхность, отключаемая на регенерации в течение 1 ч. Величина F_p не рассчитывается, так как дополнительная площадь фильтрующей поверхности, учитывающая регенерацию элементов, предусмотрена при расчете q_p и F_{ϕ} . Тогда

$$F_{\phi} = \frac{(Q_{\text{оч}} + Q_{\text{оп}})}{q_p}. \quad (5.21)$$

В соответствии с каталогом для приведенных условий определяют нужный фильтр с импульсной продувкой с фактической поверхностью фильтрования.

Число рукавов определяется из выражения

$$N = \frac{F_{\phi}}{F_{\text{э}}}, \quad (5.22)$$

где $F_{\text{э}}$ – площадь поверхности одного рукава:

$$F_{\text{э}} = \pi \cdot d_{\text{э}} \cdot l_{\text{э}},$$

а диаметр рукава $d_{\text{э}}$ и длина рукава $l_{\text{э}}$ выбираются по каталогу.

Полученное значение n округляют в сторону увеличения с учетом компоновки элементов в корпусе фильтра секциями.

5.5. Гидравлическое сопротивление тканевых фильтров

Характеристикой гидравлического сопротивления чистой фильтровальной ткани является воздухопроницаемость, то есть расход воздуха при определенном перепаде давления, который, как правило, принимается равным 49 Па [20].

Единица измерения воздухопроницаемости – $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$, численно равная скорости фильтрации при $\Delta P = 49$ Па. Сопротивление незапыленных тканей ΔP_T колеблется в диапазоне 5–40 Па. Гидравлическое сопротивление запыленного фильтровального материала функционирующего фильтра составляет не менее 250 Па.

Даже после обратной продувки тканевого фильтра начальное сопротивление ткани не достигается, оно растет из-за попадания мелких частиц в поры ткани, которые не выдуваются в обратном направлении в процессе

регенерации. Тем не менее, по окончании определенного периода работы фильтра с чередованием циклов фильтрации и регенерации остаточное количество пыли в ткани стабилизируется; оно соответствует равновесному пылесодержанию ткани G (г/м²) и остаточному сопротивлению равновесия запыленной ткани ΔP_p .

Гидравлическое сопротивление тканевых фильтров ΔP определяется как сумма сопротивлений фильтровальной ткани ΔP_1 и сопротивления корпуса фильтра ΔP_2 . Гидравлическое сопротивление фильтровальной ткани составляет

$$\Delta P_1 = \Delta P_1' + \Delta P_1'' \quad (5.23)$$

Здесь:

– $\Delta P_1'$ – постоянная величина, зависящая от типа ткани и ее толщины:

$$\Delta P_1' = K_\phi \cdot \mu \cdot q_p' \quad [\text{Па}], \quad (5.24)$$

где K_ϕ – коэффициент, характеризующий сопротивление фильтрующей перегородки (рукава); K_ϕ зависит от дисперсности пыли, размеров пор фильтроткани и размера частиц и изменяется в пределах $1 \cdot 10^9 - 3,5 \cdot 10^9$ [м⁻¹]; μ – динамическая вязкость воздуха при рабочей температуре, Па·с, выбираемая по номограмме; $q_p' = q_p / 60$ – удельная газовая нагрузка, м³/(м²·с).

– $\Delta P_1''$ – переменная величина, зависящая от режима фильтрования, массы и свойств осевшей на ткань пыли:

$$\Delta P_1'' = \frac{\tau \cdot \mu \cdot C_{\text{вх}} \cdot q_p^2 \cdot K_{\text{пс}}}{2d_{50}^2 \cdot \rho} \quad [\text{Па}], \quad (5.25)$$

где τ – время рабочего цикла фильтрации (между циклами регенерации, принимается в зависимости от запыленности), $C_{\text{вх}}$ – концентрация пыли на входе в фильтр, г/м³; $K_{\text{пс}}$ – коэффициент, характеризующий сопротивление пылевого слоя, $K_{\text{пс}} = 2,76 \cdot 10^9$; d_{50} – медианный размер частиц пыли (м); ρ – плотность газа при рабочей температуре, кг/м³.

Сопротивление корпуса фильтра ΔP_2 равно

$$\Delta P = \frac{\xi \cdot \rho \cdot V_{\text{вх}}^2}{2}, \quad (5.26)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; при наиболее рациональных конструкциях корпусов $\xi = 1,5 - 2$; $V_{\text{вх}}$ – скорость газа на входе в корпус, предварительно принимается $V_{\text{вх}} = 5$ м/с.

Гидравлическое сопротивление слоя пыли с диаметром частиц $d_{\text{ч}} < 10$ мкм на практике принимают равным 500–800 Па, а для более крупных частиц – 250–400 Па. С точки зрения практичности и экономии сопротивление фильтров не должно превышать значений 0,75–1,5 кПа, но иногда может достигать 2–2,5 кПа. В случае высоких значений сопротивления резко увеличивается величина проскока, что приведет к срыву рукавов или их разрушению по шву ввиду аэродинамических ударов при переключении секций на регенерацию [20].

5.6. Электрофильтры

Электрофильтром называют пылеуловитель, в котором отделение взвешенных частиц от газа происходит в результате действия электрических сил посредством сообщения частицам электрического заряда в зоне коронного разряда с последующим осаждением заряженных частиц в электрическом поле на поверхности электродов [6].

Применение электростатических фильтров является одним из самых совершенных способов очистки воздуха от самой мелкой пыли, туманов, дыма, жидких и биологических аэрозолей. Электрофильтрация находит все большее применение для очистки воздуха от пыли. К преимуществам этого вида очистки относятся:

- возможность получения высокой степени очистки (до 99% и более);
- обширный диапазон производительности (10^2 – 10^6 м³/ч);
- небольшое гидравлическое сопротивление (не более 0,3 кПа), поэтому эксплуатационные расходы невелики;
- возможность очистки при различных давлениях, температурах и агрессивности газов;
- малый расход электроэнергии (0,1–0,8 кВт·ч на 1000 м³ газа, что в 1,5–2 раза меньше, чем у иных типов пылеуловителей);
- широкий диапазон концентрации пыли (от долей грамма на 1 м³ до 50 г/м³) и размеров частиц (от 0,01 мкм до десятков микрон);
- возможность автоматизации процесса очистки.

Технические характеристики современных электрофильтров можно найти в специальной литературе.

Загрязненные газовые массы, которые поступают в электрофильтр, всегда подвержены частичной ионизации за счет различных внешних воздействий (рентгеновских лучей, радиоактивных излучений, космических лучей, нагрева газа, трения при движении в воздуховоде и др.). Из-за этого они проводят ток, попадая в пространство между двумя электродами. Величина силы тока зависит от числа ионов и напряжения между электродами. При повышении напряжения в движение между электродами вовлекается все большее число ионов, и величина тока растет до вовлечения в движение всех ионов, которые имеются в объеме газа. В этот момент величина силы тока становится постоянной (ток насыщения) и не зависит от дальнейшего роста напряжения. При определенном, достаточно большом напряжении движущиеся по силовым линиям ионы и электроны ускоряются интенсивно и сталкиваются с молекулами газа, тем самым ионизируя их и превращая нейтральные молекулы в положительные ионы и электроны. Образовавшиеся новые ионы и электроны ускоряются электрическим полем и ионизируют новые молекулы газа. Этот процесс получил название ударной ионизации газа. Заполняя пространство между электродами, ионы и электроны создают условия коронного разряда. У коронирующего электрода создается наибольшая напряженность поля, вызывающая разряд и свечение в виде короны.

После приобретения заряда частицы начинают перемещаться под действием электрического поля (рис. 5.12). Большинство частиц движется по направлению к осадительному электроду. Малая их часть, которая находится в зоне короны и в прилегающей к ней области, заряжается ионами противоположной по отношению к короне полярности и осаждается на коронирующем элементе. Процесс зарядки частиц зависит от подвижности ионов, траектории движения и времени пребывания частиц в зоне коронирующего заряда. Время зарядки аэрозольных частиц невелико и измеряется долями секунды [20, 21].

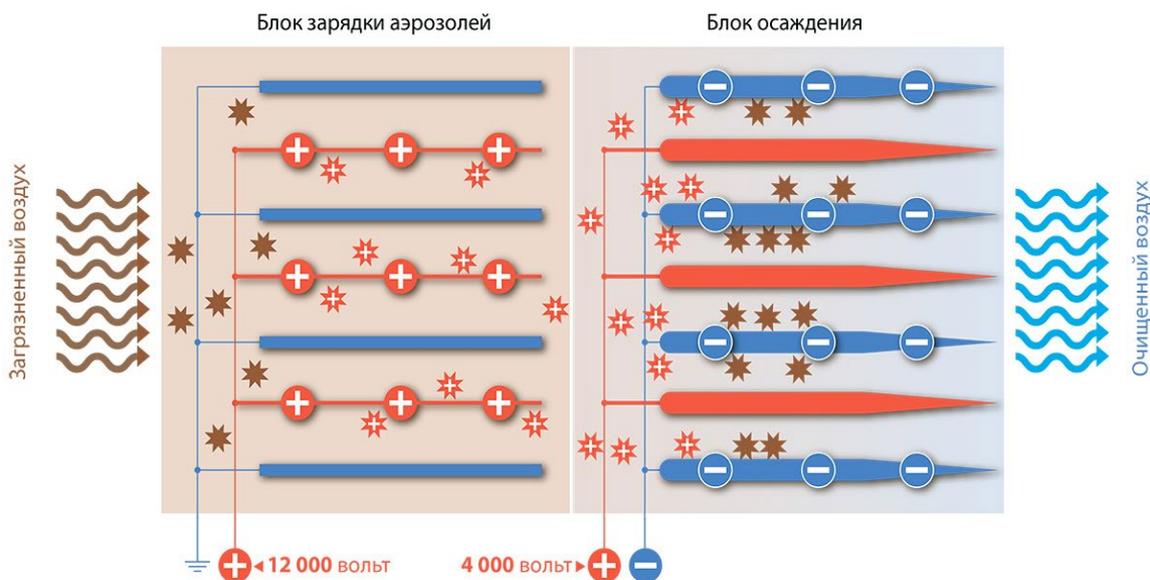


Рис. 5.12. Схема работы электрофильтра

Коронирующий электрод представляет собой прутки или узкую полосу с иглами. Он изолирован от корпуса и земли, к нему подводятся от источника питания (выпрямителя) заряд высокого напряжения. Коронный разряд не достигает другого (осадительного) электрода потому, что в зазоре между коронирующим и осадительным электродами образуется электрическое поле убывающей напряженности и снижается скорость ионов и электронов.

Аэрозольные частицы, которые поступают в область между коронирующим и осадительным электродами, адсорбируют на своей поверхности ионы, приобретая электрический заряд, и получают тем самым ускорение, направленное в сторону электрода с зарядом противоположного знака [21]. После этого заряженные частицы пыли направляются к электроду с противоположным по знаку зарядом и осаждаются на поверхности этого электрода. Осадительный электрод выполняется в виде пластинки тонколистового материала, сетки или трубы, которые заземляются (рис. 5.13). Очищенный газ таким образом выводится из фильтра. На поверхности осадительного электрода образуется слой пыли, который регулярно удаляют сухим (вибрация) или мокрым (отмывка) способом. В виде сухого порошка или пульпы пыль поступает в бункер в нижней части аппарата [6, 21].

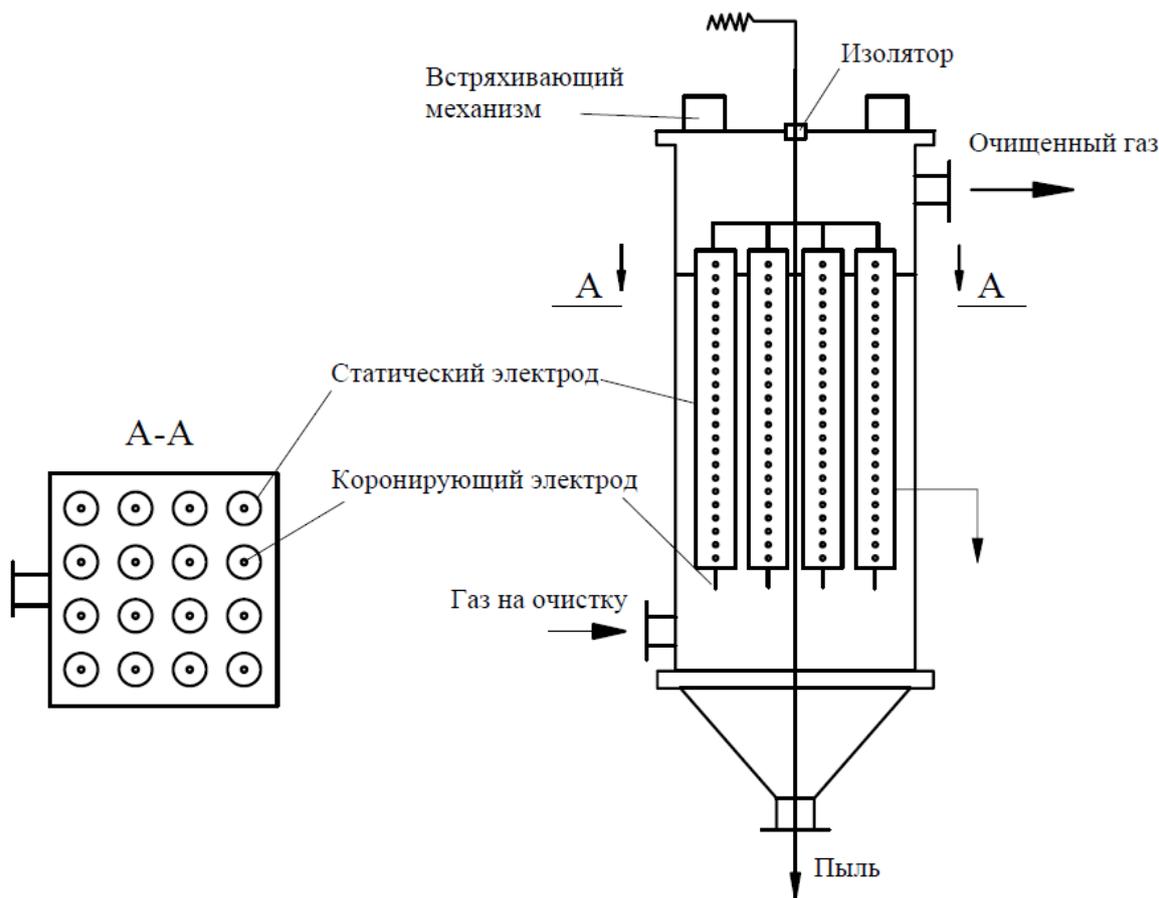


Рис. 5.13. Трубчатый электрофильтр

Заряженные частицы устремляются к осадительному электроду противоположного знака под действием аэродинамических сил, силы взаимодействия электрического поля и заряда частицы, силы тяжести и силы давления электрического ветра.

Под действием аэродинамических сил частица увлекается потоком газа со скоростью V_T , близкой к скорости газа, равной 0,5–2 м/с.

Сила, которая приводит заряженные частицы в движение к осадительному электроду, называется силой взаимодействия между электрическим полем и зарядом частицы. Скорость движения частиц не превышает 0,6 м/с и в основном зависит от размеров частиц и напряженности электрического поля.

Время пребывания частиц в фильтре невелико и составляет 10–15 с, поэтому силами гравитации в расчетах пренебрегают.

Понятие электрического ветра объясняется механическим воздействием движущихся ионов на молекулы газа и частицы пыли. Электрический ветер возникает в местах генерации ионов, т.е. у коронирующих электродов, и обуславливает циркуляцию газа в межэлектродном промежутке со скоростью в пределах 0,5–1,0 м/с. Электрический ветер влияет на перемешивание ионов и взвешенных частиц только в межэлектродном пространстве, поэтому его влиянием можно пренебречь.

Таким образом, отрицательно заряженные аэрозольные частицы движутся к осадительному электроду под действием аэродинамических и электрических сил, а положительно заряженные частицы оседают на отрицательном коронирующем электроде.

При осаждении пыли на электродах основное значение имеет электрическое сопротивление слоев пыли, по которому пыли классифицируются следующим образом:

- пыли с малым удельным сопротивлением (менее 10 Ом·м), которые, соприкасаясь с электродом, теряют свой заряд и приобретают заряд, соответствующий знаку электрода. В результате создается сила отталкивания между частицей и электродом, под действием которой частица стремится вернуться в поток газа;
- пыли с удельным электрическим сопротивлением от 10 до 10 Ом·м. Данный вид хорошо осаждаются на электродах и легко удаляется путем встряхивания;
- пыли с удельным электрическим сопротивлением более 10 Ом·м. Сложно улавливаемы электрофильтрами ввиду того, что на электродах частицы таких пылей разряжаются медленно. Это сильно препятствует осаждению новых частиц. В действительности удельное сопротивление пыли снижают увлажнением или химическим кондиционированием газа.

Обеспечение бесперебойной работы электрофильтра достигается применением системы удаления осажденной пыли из аппарата. В сухих электрофильтрах для очистки поверхности электродов от пыли применяются механизмы встряхивания ударно-молоткового типа. Пыль собирается в бункерах и удаляется в сухом виде или в виде пульпы. В мокрых электрофильтрах пыль с поверхностей электродов смывается водой вместе с уловленными каплями. Шлам выносят из нижней части аппарата.

Электрический способ пылеулавливания имеет следующие преимущества:

- возможность работы при высоких температурах (до 425°С);
- возможность работы электрофильтра в агрессивных средах;
- возможность продолжительной работы установки за пределами номинальных режимов работы;
- низкое гидравлическое сопротивление установки (~200 Па);
- малые расходы на эксплуатацию;
- простота в обслуживании;
- высокая надежность узлов и механизмов.

Следует обозначить определенные недостатки электрофильтров:

- высокая себестоимость очистки газов по сравнению с другими способами очистки;
- повышенные массогабаритные характеристики и сложность монтажа из-за наличия вспомогательных операций (трансформации напряжения, выпрямление тока и др.);
- высокие требования к квалификации работников, занимающихся обслуживанием и сервисом данных аппаратов;

- низкая эффективность улавливания некоторых веществ, (например, сажи, которая быстро получает электрический заряд и также быстро отдает его электроду, от которого опять отталкивается). Кроме того, некоторые частицы, обладающие большим электрическим сопротивлением, осаждаются на электроде, гасят коронный разряд, уменьшая эффективность работы фильтра;
- возможность возникновения взрыва при улавливании горючей пыли.

5.7. Расчет электрофильтров

Эффективность электрофильтров зависит от скорости газового потока, скорости дрейфа (осаждения) частиц пыли, типа и габаритных размеров фильтра [22].

Исходными данными расчета являются:

- состав газов, поступающих в электрофильтр (в объемных %);
- температура газов;
- давление (разрежение) в системе – p_r , кПа (мм водяного столба);
- содержание пыли в газах – z , г/м³ (при нормальных условиях);
- фракционный состав пыли: средний радиус частиц (мкм), содержание (в массовых %);
- скорость газов в электрофильтре V_r , м/с;
- радиус коронирующего электрода R , м;
- расстояние между коронирующими электродами в ряду – d_k ;
- суммарная активная длина коронирующих электродов – L_k , м;
- количество осадительных электродов – n ;
- площадь осадительных электродов – S , м²;
- расстояние между плоскостями осадительных и коронирующих электродов – H , м;
- длина активной зоны электрофильтра – L , м;
- напряжение (среднее значение) – U_{cp} , кВ;
- активная площадь сечения электрофильтра – S_A , м².

Формула для определения эффективности очистки газа электрофильтром была выведена Дейчем в 1922 г. [22]:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(-\frac{\omega L}{H_\phi V_r}\right), \quad (5.27)$$

где ω – скорость дрейфа частиц; L – длина активной зоны электрофильтра; H_ϕ – межэлектродное расстояние; V_r – скорость газов в электрофильтре.

При выводе этой формулы были приняты следующие допущения:

- профиль концентрации пыли равномерный;
- унос пыли отсутствует;
- скорость дрейфа частиц по длине фильтра постоянна; частицы пыли монодисперсны;
- течение газа ламинарное;

– скорость газового потока по сечению постоянна;

Впоследствии это уравнение было уточнено Роузом и Вудом и может быть записано следующим образом [22]:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(\omega \frac{S}{Q}\right), \quad (5.28)$$

где S – площадь осаждения электрофильтра; Q – объемный расход очищаемых газов.

Движение частиц в электрофильтре происходит под совместным действием сил, возникающих в электрическом и аэродинамических полях

$$x \cdot \sum F = F_{\kappa} + F_g + F_e + F_c + F_b, \quad (5.29)$$

где $F_{\kappa} = q \cdot E$ – электростатическая (кулоновская) сила, действующая на частицу в поле напряженностью E ; $F_g = m \cdot g$ – сила тяжести; F_e – сила, обусловленная поляризацией частиц в неравномерном электрическом поле; F_c – сила сопротивления среды; F_b – сила гидродинамического и электродинамического взаимодействия частиц.

Под действием потока газа частицы приобретают скорость V_{Γ} . При расчете скорости дрейфа учитывают, как правило, только кулоновскую силу. В этом случае картина движения частицы в межэлектродном промежутке электрофильтра имеет вид (рис. 5.14).

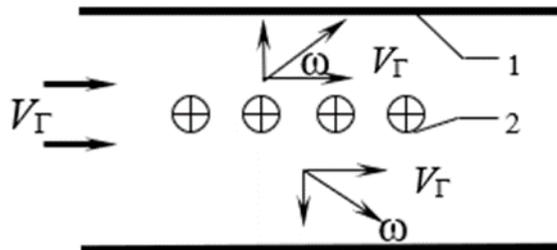


Рис. 5.14. Схема движения частиц в межэлектродном промежутке электрофильтра: ω – скорость дрейфа; V_{Γ} – скорость газа; 1 – осадительный электрод; 2 – коронирующий электрод

Кулоновскую силу при расчетах скорости дрейфа определяют по формуле

$$F_{\kappa} = q \cdot E = 4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E_3 \cdot E_{oc} \cdot r^2 \cdot \delta, \quad (5.30)$$

где E_3 и E_{oc} – напряженности электрических полей соответственно при зарядке и осаждении частиц, В/м; ε_0 – электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ кг/(Н·м²); r – радиус частицы.

Сила F направлена к осадительному электроду всюду, кроме области чехла короны, в которой крупные частицы получают положительный заряд и осаждаются на коронирующих электродах. В направлении к осадительному

электроду частица испытывает сопротивление со стороны газа, зависящее от ее размеров, формы, скорости движения и вязкости среды.

Принимая форму частицы шарообразной (что допустимо для большинства пылей), считают, что частица имеет максимальный заряд

$$q_{max} = 4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2. \quad (5.31)$$

Используя закон Стокса, справедливый для частиц диаметром 2–50 мкм, получают выражение для силы сопротивления движению частицы

$$F_c = 6\pi \cdot \mu \cdot r \cdot \omega_{\text{ч}}, \quad (5.32)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; r – радиус частицы, м; $\omega_{\text{ч}}$ – скорость частицы, м/с.

При движении частицы кулоновская сила F_K уравновешивается силой сопротивления F_c :

$$4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E_3 \cdot E_{oc} \cdot r^2 \cdot \delta = 6\pi \cdot \mu \cdot r \cdot \omega_{\text{ч}}, \quad (5.33)$$

где δ – показатель диэлектрических свойств частицы,

$$\delta = 1 + 2 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}, \quad (5.34)$$

ε – относительная диэлектрическая проницаемость вещества частицы.

Величина относительной диэлектрической проницаемости может быть принята для газов – 1; кварца, серы – 4; гипса – 5; окислов металлов – 12–18. Для проводящей частицы $\delta = 3$, а для диэлектрической частицы

$$\delta = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2}. \quad (5.35)$$

Скорость дрейфа частиц равна

$$\omega_{\text{ч}} = \frac{2\varepsilon_0 \cdot E_3 \cdot E_{oc} \cdot \delta}{3\mu}. \quad (5.36)$$

В электрофильтре наблюдается интенсивное турбулентное перемешивание газового потока из-за высокого значения числа Re и в результате действия электрического ветра. Ввиду этого скорость дрейфа заряженных частиц быстро достигает предельной величины. С учетом закона Стокса она определяется по следующей формуле:

$$\omega_{\text{ч}} = \frac{p \cdot d \cdot E^2}{36 \cdot 10^7 \cdot \pi \cdot \mu} \cdot \left(1 + \frac{\psi \cdot d}{\lambda} \right), \quad (5.37)$$

где $p = 3\varepsilon_0/(\varepsilon_0 + 2)$; d – диаметр частицы (для частиц с $d > 1$ мкм); μ – вязкость газа,

$$\psi = 1,746 + 0,562 \exp\left(-0,785 \frac{d}{\lambda}\right), \quad (5.38)$$

λ – средняя длина пути свободного пробега молекул, м; для газов $\lambda = 10^{-7}$.

Используя уравнения (5.3), (5.4) и (5.1), определяют эффективность осаждения частиц разных диаметров. Эффективность очистки газа в электрофилт্রে рассчитывается по формуле

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{w_{\text{ч}} \cdot F_{\text{ос}}}{Q_{\text{г}}}\right), \quad (5.39)$$

где $F_{\text{ос}}$ – поверхность осаждения филтра, м²; $w_{\text{ч}}$ – скорость дрейфа частиц, м/с; $Q_{\text{г}}$ – объемный расход газа, м³/с.

Сравнивая расчетные и экспериментальные данные, Стейерменд [22] (рис. 5.15) выяснил, что данные уравнения подходят исключительно для учета изменений в работе данной установки, однако не могут быть применены в расчетах новых конструкций.

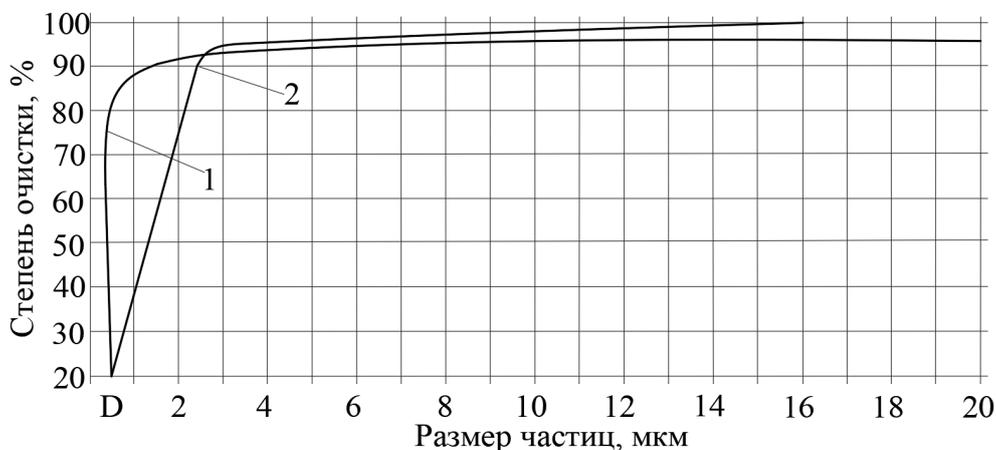


Рис. 5.15. Кривые фракционной эффективности электрофилтра: 1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая

Практический опыт проектирования установок электрогазоочистки говорит о том, что прогнозирование эффективности электрофилтра на основании теоретических предпосылок или механического копирования аппаратов, которые работают в предполагаемых идентичных условиях, приводит к существенным ошибкам. Из-за этого выработаны рекомендации, предписывающие проводить предварительное испытание опытного электрофилтра, если проблематично получить требуемые результаты на функционирующей установке.

Расчет электрофилтра по скорости осаждения частиц в электрическом поле сложен из-за необходимости учета множества влияющих на осаждение и режим работы электрофилтра факторов – дисперсного состава пыли, диэлектрической проницаемости ее частиц, свойств газа и пыли. Конструкцию электрофилтра выбирают также по данным эксплуатационного опыта; она должна обеспечивать необходимую степень улавливания пыли из газового потока и надежность в работе.

При расчете электрофилтров определяются площадь сечения, длина электродов, количество электрофилтров, скорость осаждения частиц пыли,

скорость движения газов в электрофильтрах, крупность осаждаемых частиц и расстояния между электродами. Упрощенный расчет состоит из определения сечения фильтров и их количества по заданной производительности и скорости газов.

Количество фильтров определится по формуле

$$n = \left(\frac{Q}{3600 \cdot V_r \cdot f} \right), \quad (5.40)$$

где Q – производительность электрофильтра, м³/ч; f – сечение одного электрофильтра, м²; V_r – скорость газа, м/с.

При конструировании электрофильтров требуется определить длину электродов, скорость осаждения и другие параметры. При этом задаются производительностью Q , определяют диэлектрическую проницаемость ϵ пыли, размер улавливаемых пылинок d , необходимую разность потенциалов E , принимают расстояние между электродами b .

Напряженность поля E_n , В/см, равна

$$E_n = \frac{E}{b}. \quad (5.41)$$

Определив ω_c , рассчитывают время осаждения τ_1 , с:

$$\tau_1 = \frac{b}{\omega_c}. \quad (5.42)$$

Время для получения заряда принимают $\tau_2 = 0.5–1.0$ с. Тогда общее время пребывания газа между электродами составляет

$$T = \tau_1 + \tau_2. \quad (5.43)$$

При длине электродов L скорость газов в электрофильтре равна

$$V_r = \frac{L}{\tau}. \quad (5.44)$$

Дальнейший расчет сводится к определению активной и общей длин коронирующих электродов L_k . Принимают величину тока на 1 м, i_y , после чего определяется общий ток $I = i_y \cdot L_k$. По этой величине тока подбирают тип электроагрегатов и их количество.

6. АДСОРБЦИЯ

6.1. Общие сведения

Для очистки выбросов от газопарообразных вредных веществ используют адсорбцию, абсорбцию, хемосорбцию, термические и каталитические методы, а также капиллярную конденсацию.

Сорбцией (от латинского *sorbeo* – поглощаю, втягиваю) называют любой процесс поглощения вещества в газовой фазе, способного к адсорбции (адсорбтива) другим твердым телом (адсорбентом), независимо от механизма поглощения. Адсорбат – вещество, адсорбированное поверхностью адсорбента.

Адсорбцией называют самопроизвольный процесс накопления одного вещества на твердой поверхности другого. В общем случае адсорбцией называют изменение концентрации вещества на границе раздела фаз.

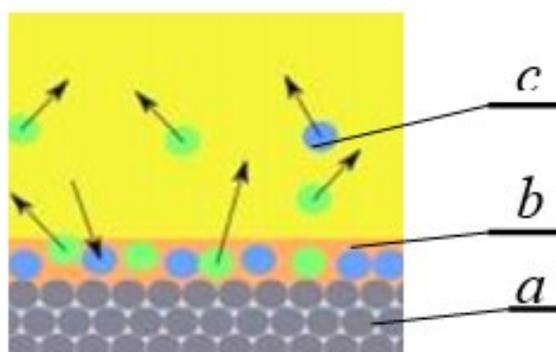


Рис. 6.1. Схема механизма адсорбции: *a* – адсорбент; *b* – адсорбат;
c – адсорбтивы (газовая фаза)

С термодинамической точки зрения адсорбция – самопроизвольный процесс выравнивания химических потенциалов компонента в объеме системы и поверхностном слое. Этот процесс происходит вследствие стремления системы к минимуму поверхностной энергии или энергии Гиббса.

Адсорбция часто применяется в химических технологических процессах для осушки газов и их очистки с выделением ценных компонентов; для извлечения (регенерации) растворителей из газовых (паровых) или жидких смесей; для очистки газовых выбросов [23]; при производстве кислорода, в пищевой промышленности и в ряде других случаях. Целесообразным считается применение данного метода при удалении паров ядовитых веществ и предполагаемых канцерогенов в тех случаях, когда содержание примесей подлежит снижению до нескольких миллионных долей или ниже [6].

В основе процесса адсорбции заложено избирательное (селективное) поглощение газообразных и парообразных примесей поверхностью твердых пористых материалов – адсорбентов. Метод адсорбции актуален в случае незначительного содержания паро- и газообразных загрязняющих компонентов в очищаемом газе [24].

Требования, предъявляемые к промышленным адсорбентам [23]:

- наличие высокой адсорбционной способности (поглощение значительного количества адсорбтива при малой концентрации в газовой или жидкой фазах);
- высокая селективность;
- химическая инертность по отношению к компонентам различной смеси;
- высокая механическая прочность;
- способность к регенерации; малые финансовые затраты.

В качестве адсорбентов используются твердые пористые вещества с высокой удельной поверхностью (поверхность на единицу массы) (порядка 10^6 м²/кг). Адсорбенты имеют поры со средним радиусом 5–2000 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$) и удельную поверхность 200–1600 м²/г. Ввиду большой удельной поверхности адсорбентов при адсорбции могут возникать очень большие скорости поглощения и полное поглощение компонентов, выделение которых прочими методами не представляется возможным по причине малой концентрации их в смеси. Поэтому адсорбция – это эффективный способ разделения «бедных» смесей, которые содержат небольшое количество поглощаемых веществ, а также смесей, состоящих из компонентов, идентичных по химическим и физическим свойствам.

В адсорберах поглощающие вещества применяют либо в виде таблеток или гранул от 2 до 8 мм, либо в виде порошков от 50 до 200 мкм. Наибольшее распространение среди адсорбентов нашли силикагель и активированный уголь. Активированный уголь используется для очистки газов от паров органических веществ, дурнопахнущих веществ и иных газов. Таким образом, свежепрокаленный буковый уголь поглощает 35 объемов диоксида углерода и 90 объемов аммиака. Он достаточно часто применяется для дезодорации дурнопахнущих газов. Прочими адсорбентами являются синтетические и природные цеолиты (алюмосиликаты), активированный глинозем (Al_2O_3).

В промышленной практике наибольшее распространение получили цилиндрические адсорберы с неподвижным слоем адсорбента вертикального, горизонтального и, реже, кольцевого типа. Конструкция адсорберов с неподвижным зернистым адсорбентом имеет полые вертикальные (рис. 6.2, а) или горизонтальные (рис. 6.2, б) сосуды, наполненные слоем зернистого адсорбента. В ряде случаев используются адсорберы с кольцевым слоем адсорбента (рис. 6.2, в).

Газовая смесь поступает в корпус адсорбера, проходит через находящийся на решетке слой адсорбента (на рисунке заштрихован), затем выходит через выхлопной штуцер. После процесса адсорбции для удаления поглощенного вещества из адсорбента в аппарат подается перегретый водяной пар (или другой вытесняющий агент), который движется в направлении, обратном движению газа. Паровая смесь (смесь паров воды и извлекаемого компонента) удаляется из аппарата и для разделения поступает в отстойник непрерывного действия или в ректификационную колонну. По окончании десорбции через слой адсорбента для его сушки пропускают горячий воздух, удаляемый через паровой штуцер

аналогично паровой смеси. Высушенный адсорбент подвергается охлаждению холодным воздухом, который движется по пути водяного пара, после чего цикл поглощения повторяется снова [23]. Охлаждение адсорбента необходимо, поскольку с повышением температуры его адсорбционная способность резко снижается.

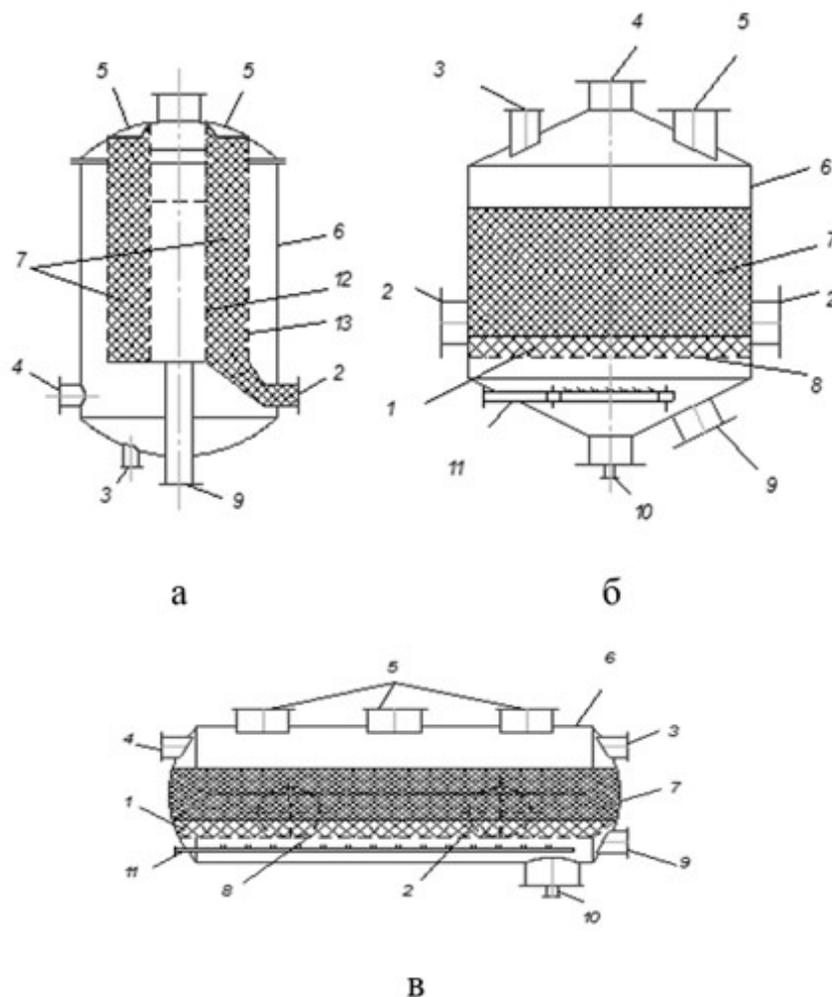


Рис. 6.2. Адсорберы периодического действия с неподвижным слоем поглотителя: а – кольцевой; б – вертикальный; в – горизонтальный; 1 – засыпка; 2 – люк для выгрузки поглотителя; 3 – штуцер для отвода паров при десорбции; 4 – штуцер для подачи парогазовой смеси (при адсорбции) и воздуха (при сушке и охлаждении); 5 – люки для загрузки поглотителя; 6 – корпус; 7 – адсорбент; 8 – опорная колосниковая плита; 9 – штуцер для отвода отработанного газа (при адсорбции) и воздуха (при сушке и охлаждении); 10 – штуцер для отвода конденсата; 11 – барботер для подачи острого пара при десорбции; 12, 13 – внутренняя и внешняя цилиндрические решетки

Регенерация абсорберов (десорбция) является важной стадией всего абсорбционно-десорбционного процесса, определяющей экономические показатели разделения и очистки. На долю процесса десорбции приходится до 70% всех затрат. После регенерации свойства абсорбента восстанавливаются до исходных. Регенерация адсорберов производится следующими основными способами:

- испарение адсорбированных компонентов при нагреве слоя адсорбента (путем пропускания через него насыщенного или перегретого пара) или при понижении общего давления в системе либо парциального давления адсорбированных компонентов; продувка инертным газом (азотом), в результате чего происходит выделение поглощенного компонента;
- вытеснение адсорбированных компонентов веществом, обладающим меньшей адсорбируемостью (неполярные растворители);
- химическая регенерация кислотами, щелочами или окислителями;
- окислительная регенерация, при которой адсорбированные компоненты удаляют из адсорбента путем их сжигания.

На рис. 6.3 представлена схема работы адсорбера с псевдооживленным слоем адсорбента.

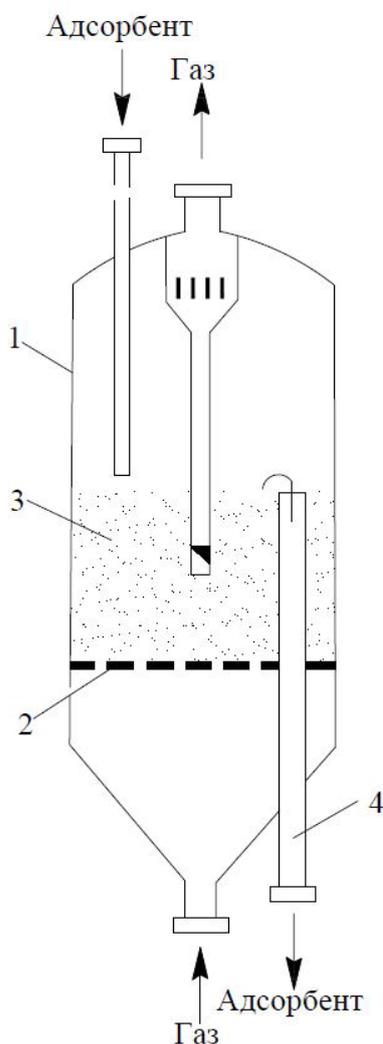


Рис. 6.3. Адсорбер с кипящим (псевдооживленным) слоем: 1 – корпус; 2 – распределительная решетка; 3 – кипящий слой адсорбента; 4 – патрубок для выхода адсорбента

Гидравлическое сопротивление слоя в адсорбере с кипящим (псевдооживленным) слоем адсорбента является сравнительно небольшим, что позволяет создавать более высокие скорости газового потока, чем в

неподвижном слое адсорбента. Ввиду сочетания высоких скоростей газа с очень развитой поверхностью фазового контакта интенсификация процесса адсорбции может быть значительной. При бурном перемешивании частиц в кипящем слое в нем происходит быстрое выравнивание температуры и предотвращается опасная вероятность перегрева адсорбента [23].

Стоит сказать, что газ, соприкасаясь на выходе из кипящего слоя с отработанными насыщенными частицами адсорбента, может повлечь частичную десорбцию поглощенного вещества из адсорбента. К тому же при интенсивном перемешивании в кипящем слое наблюдается сильное истирание твердых частиц адсорбента, из-за чего для проведения данного процесса следует использовать адсорбенты, которые обладают необходимой механической прочностью [23].

Достоинствами адсорбционного метода очистки являются высокая степень очистки небольших объемов газа, рекуперации летучих растворителей, когда требуется достичь практически полного извлечения адсорбтива из газового потока и удалить неприятные запахи; простое аппаратное оформление; экономичность, связанная с возможностью многократного использования сорбента; возможность сочетания глубокой очистки с глубокой осушкой (до 200 К).

К недостаткам следует отнести: повышенные энергетические затраты на преодоление гидравлического сопротивления адсорбента в аппарате; низкие показатели производительности установки по газу и жидкости, обусловленные малыми допустимыми скоростями потоков в адсорберах ($V_T = 0,1-0,5$ м/с); неполную отработку адсорбционной емкости адсорбента в слое и недостаточное использование объема аппарата; постепенный износ адсорбентов; значительные производственные площади, занимаемые рядом адсорберов и вспомогательным оборудованием; трудности автоматизации, проводимых процессов; невозможность очистки влажных и запыленных газов [23].

6.2. Теория процесса и методика расчета адсорберов

В зависимости от природы сил взаимного притяжения различают физическую и химическую адсорбции. Физическая адсорбция определяется действием сил Ван-дер-Ваальса. При химической адсорбции протекают химические реакции на поверхности адсорбента. Роль тех и других при разных случаях адсорбции различна. Так, в самом начале адсорбции большинства газов, когда их давление мало, наблюдается химическая адсорбция. С увеличением давления она уступает место физической, которая в основном и определяет адсорбцию газов.

Адсорбция на твёрдых телах может быть объяснена наличием силовых полей притяжения, возникающих за счёт неуравновешенных связей в кристаллической решётке.

Молекулы (атомы, ионы, радикалы) адсорбтива соприкасаются с поверхностью адсорбента и удерживаются на его поверхности. Ввиду этого концентрация молекул на поверхности становится больше, чем в объеме соприкасающегося с ним газа. Часть молекул с поверхности может перейти

обратно в объем [25]. Процесс адсорбционного разделения прекращается, когда активная поверхность адсорбента оказывается заполненной молекулами адсорбата (состояние насыщения). Истощение адсорбционной способности (проскок) определяет время защитного действия адсорбента по отношению к данному компоненту.

Поверхность адсорбента энергетически неоднородна: адсорбция происходит не на всей свободной поверхности, а на активных центрах, где силы молекулярного взаимодействия наименее скомпенсированы (пики, выступы, ребра трещин и т.д.) (рис. 6.4). К примеру, интенсивность осаждения молекул кислорода на выступах частицы угля более чем в 4 раза выше, чем в углублениях поверхности.

Физическая адсорбция является экзотермическим процессом, т.е. сопровождается выделением теплоты. Для газов и паров теплота адсорбции примерно равна теплоте их конденсации.

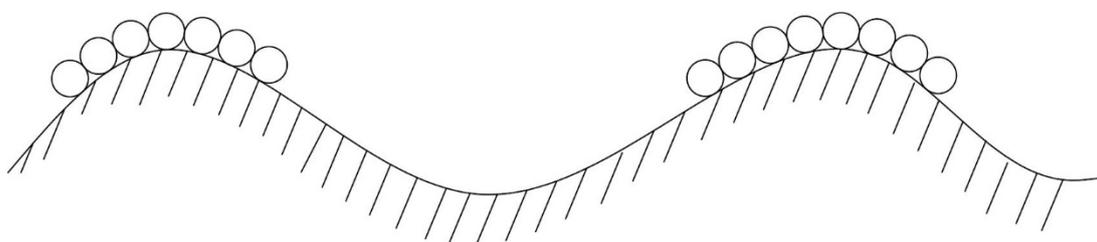


Рис. 6.4. Схема размещения адсорбата на поверхности адсорбента

Независимо от природы сорбционных сил процесс сорбции может быть охарактеризован количеством вещества адсорбированного сорбента. Количество вещества (моль) в поверхностном слое, приходящееся на единицу площади или массы адсорбента (моль/м² или моль/г), именуется абсолютной адсорбцией (A):

$$A = \frac{n_s}{S} = \frac{C_s \cdot V_s}{S} = C_s \cdot h, \quad (6.1)$$

где C_s – концентрация компонента в поверхностном слое объемом V_s ; S – площадь поверхности адсорбента; h – толщина поверхностного слоя.

Чрезмерное количество адсорбата в поверхностном слое по сравнению с его первоначальным количеством в этом слое обуславливает избыточную, или так называемую гиббсовскую адсорбцию (Γ). Она демонстрирует увеличение концентрации адсорбата в результате адсорбции:

$$\Gamma(A) = \frac{V(C_0 - C_V)}{S}, \quad (6.2)$$

где V – объем фазы; C_0 – исходная концентрация адсорбтива; C_V – равновесная объемная концентрация адсорбтива.

При невозможности определить общую поверхность твердого пористого тела адсорбцию Γ относят к единице массы адсорбента (моль/г).

Активными центрами на твердой поверхности являются группы химически активных атомов, катионы, не скомпенсированные соответствующим числом анионов и имеющие высокое сродство с электронами. После адсорбции появляется один слой (монослой) адсорбированных молекул, взаимодействием между молекулами в котором обычно пренебрегают. Мономолекулярная адсорбция наблюдается из-за физической адсорбции газов при небольших давлениях и температурах, а также в результате хемосорбции.

Теория мономолекулярной адсорбции, разработанная Лэнгмюром [25], говорит о том, что:

- процесс адсорбции протекает не на всей поверхности, а лишь в отдельных ее точках (активных центрах), где имеются участки с наиболее некомпенсированными силовыми полями;
- адсорбированные молекулы не взаимодействуют со свободными молекулами, что приводит к образованию мономолекулярного слоя поглощаемого вещества;
- адсорбированные молекулы удерживаются адсорбционными центрами только в течение определенного промежутка времени, после чего происходит десорбция этих молекул и адсорбция такого же числа новых молекул.

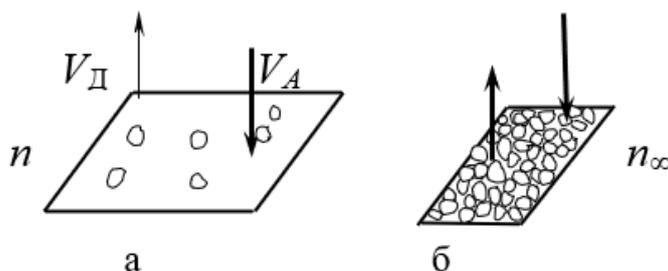


Рис. 6.5. Картина насыщения поверхностного слоя: а – ненасыщенный слой; б – насыщенный слой

Ненасыщенный адсорбционный слой, в отличие от насыщенного, занят молекулами адсорбата частично (рис. 6.5). Степень насыщения θ адсорбционного слоя представляется в виде

$$\Theta = \frac{n}{n_{\infty}}. \quad (6.3)$$

В процессе адсорбции степень насыщения изменяется в диапазоне $0 < \theta \leq 1$.

Число молекул в ненасыщенном n и насыщенном n_{∞} адсорбционных слоях выражается через адсорбцию $\Gamma(A)$:

$$N = \Gamma(A) \cdot N_a; \quad (6.4)$$

$$n_{\infty} = \Gamma_{\infty} \cdot (A_{\infty}) \cdot N_a, \quad (6.5)$$

где N_a – число Авогадро.

И. Лэнгмюр [22] предложил уравнение адсорбции в виде

$$\Gamma(A) = \Gamma_{\infty}(A) \frac{K \cdot C}{1 + K \cdot C}, \quad (6.6)$$

где Γ_{∞} – значение предельной адсорбции; C – равновесная концентрация адсорбента в системе; K – константа адсорбционного равновесия. Учитывая, что концентрация молекул газа (в молях на миллилитр) может быть заменена пропорциональной ей величиной давления P , уравнение Лэнгмюра можно переписать в виде

$$\Gamma = \Gamma_{\infty} \frac{K \cdot P}{1 + K \cdot P}. \quad (6.7)$$

Графическая интерпретация изотермы мономолекулярной адсорбции Лэнгмюра представлена на рис. 6.6.

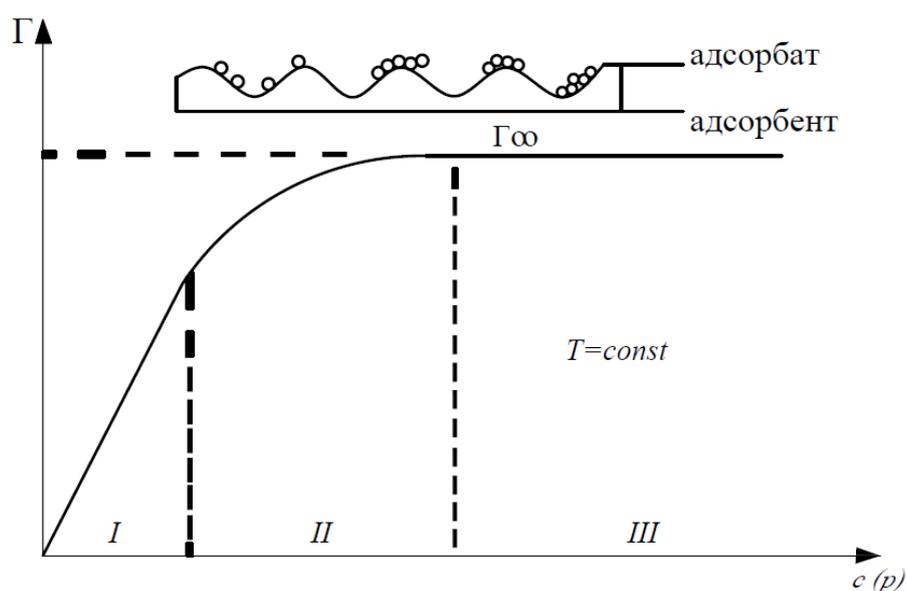


Рис. 6.6. Зависимость адсорбции от концентрации (давления)

На кривой отчетливо видны три участка.

Первый участок – прямая линия, выходящая из начала координат. При малых концентрациях, $(1 + K \cdot C) \approx 1$, уравнение принимает вид

$$\Gamma = \Gamma_{\infty} \cdot K \cdot C, \quad (6.8)$$

т.е. величина адсорбции прямо пропорциональна концентрации или давлению адсорбата.

Второй участок соответствует криволинейной части графика и описывается полным уравнением Лэнгмюра (6.7).

Третий участок – прямая, параллельная оси абсцисс – означает, что адсорбция достигла своего предельного значения. При этом $K \cdot C \gg 1$ и $(1 + K \cdot C) \approx K \cdot C$, тогда $\Gamma = \Gamma_{\infty}$ ($\theta = 1$), т.е. произошло насыщение поверхности адсорбента молекулами адсорбата и сформировался мономолекулярный слой.

Характер изотермы сорбции зависит от природы взаимодействия между адсорбентом и адсорбтивом, от температуры, структуры адсорбента и других

факторов. Повышение температуры понижает физическую адсорбцию, так как при этом усиливается движение молекул в адсорбционном слое, нарушается ориентация адсорбированных молекул, т.е. равновесие сдвигается в сторону десорбции. В то же время увеличение температуры увеличивает энергию адсорбированных частиц, что усиливает химическую адсорбцию.

Следовательно, в одних случаях повышение температуры усиливает десорбцию, в других – увеличивает адсорбцию.

Процесс адсорбции – экзотермический, т.е. происходит с выделением теплоты. Кроме того, в ходе адсорбции уменьшается концентрация целевого компонента в газе, а следовательно, и его парциальное давление. Поэтому в соответствии с принципом Ле-Шателье процесс адсорбции выгодно проводить при пониженной температуре и повышенном давлении. На этом явлении основан процесс регенерации адсорбента и необходимость охлаждения адсорбера после десорбции. С повышением давления паров адсорбтива интенсивность адсорбции возрастает.

Для селективного выделения из смеси веществ какого-либо одного сорбент должен обладать свойством его преимущественного поглощения.

Уравнение изотермы адсорбции Лэнгмюра для многокомпонентной смеси имеет следующий вид:

$$\theta_i = \frac{b_i \cdot C_i^{1/n}}{1 + \sum b_i \cdot C_i^{1/n}} = \frac{b_i \cdot p_i^{1/n}}{1 + \sum b_i \cdot p_i^{1/n}}. \quad (6.9)$$

Теория и уравнение Лэнгмюра на ее основе позволяют получать приближенные, однако приемлемые для ряда практических и теоретических нужд решения. Уравнение Лэнгмюра можно использовать только при адсорбции в мономолекулярном слое. Это условие выполняется при физической адсорбции газов при меньшем давлении и температуре выше критической.

На практике часто для аналитического описания зависимости адсорбции на твердом адсорбенте от концентрации адсорбтива применяется эмпирическое уравнение Г. Фрейндлиха [25], в соответствии с которым активность (емкость) адсорбента определяется выражением

$$A = \beta \cdot C^{1/n}, \quad (6.10)$$

где A – активность (емкость) адсорбента; C – равновесная концентрация или парциальное давление адсорбируемого компонента; β и n – коэффициент и показатель степени, определяемые опытным путем (рис. 6.8).

По физическому смыслу β – значение адсорбции при равновесной составляющей адсорбтива, равной единице (при $C = 1$, $A = 1$). Для различных адсорбционных систем $\beta = 2-2,5$. Показатель степени характеризует степень отклонения изотермы адсорбции от прямой линии $1/n \approx 0,2-0,7$. Постоянные уравнения Фрейндлиха определяются на основе опытных данных. Для этого уравнение Фрейндлиха приводят к линейному виду (логарифмируют). Пример определения экспериментальных величин β и n приведен на рис. 6.8.

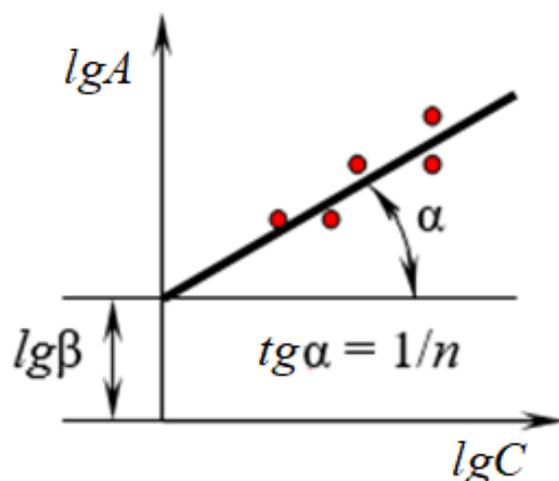


Рис. 6.8. График для определения констант в уравнении Фрейндлиха;
 • – экспериментальные данные

Уравнение Фрейндлиха можно применять для расчета величины адсорбции в том диапазоне равновесных концентраций, для которого найдены значения констант β и n . Его преимущество – простота в использовании, поэтому оно часто применяется в инженерных расчетах.

Реальные изотермы адсорбции отклоняются от изотермы Лэнгмюра. Наиболее удачной попыткой уточнить теорию Лэнгмюра является так называемая полимолекулярная теория БЭТ (теория Брунауэра–Эммета–Теллера) [26]. Ее основные предпосылки:

- поверхность адсорбента имеет определенное число активных центров;
- взаимодействием адсорбированных молекул в первом и последующих слоях можно пренебречь;
- каждая молекула первого слоя может стать активным центром для адсорбции образования последующих слоев;
- имеется предположение, что во втором и последующих слоях все молекулы имеют такую же сумму статистических состояний, как и в первом [26].

Если обозначить через S_1 , S_2 и т.д. площади поверхности адсорбента, покрытые первым, вторым и последующими слоями адсорбированных молекул, то вся площадь адсорбента будет равна сумме площадей с разным числом слоев:

$$S_{\text{общ}} = \sum S_i. \quad (6.11)$$

Составив уравнения адсорбционного равновесия для каждого слоя и просуммировав их, авторы теории БЭТ получили уравнение для полимерной (полислойной) адсорбции:

$$\frac{p/p_0}{\Gamma \cdot (1 - p/p_0)} = \frac{1}{\Gamma_\infty \cdot C} + \frac{C-1}{\Gamma_\infty \cdot C} \cdot \frac{p}{p_0}, \quad (6.12)$$

где p_0 – давление насыщенного пара при данной температуре; p/p_0 – относительное давление пара. Отсюда, согласно теории БЭТ,

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{\infty} \cdot C}{(1 - p/p_0) \cdot (1 + (C-1) \cdot p/p_0)}, \quad (6.13)$$

При малых относительных давлениях, когда $p \ll p_0$, уравнение преобразуется в уравнение Лэнгмюра.

6.3. Расчет адсорберов периодического действия с неподвижным слоем адсорбента

В аппаратах периодического действия поток газа проходит через неподвижный слой адсорбента высотой H , и процесс собственно сорбции протекает в две стадии. Первая стадия считается с момента начала пропускания газовой смеси через слой адсорбента до полного насыщения начальных слоев адсорбента. В течение этой стадии на некоторой высоте (толщине) слоя адсорбента H , называемой работающей высотой, происходит полный переход распределяемого между фазами вещества из газовой фазы в адсорбент, и газовая смесь выходит из адсорбера полностью освобожденной от поглощаемого адсорбентом вещества. Зависимость от высоты слоя изображается графически плавной кривой в период формирования фронта и прямой линией в период параллельного переноса фронта (рис. 6.8).

При дальнейшей работе адсорбера адсорбент постепенно насыщается поглощаемым веществом, и, наконец, наступает момент, когда адсорбент перестает поглощать распределяемый между фазами компонент и начинается «проскок» поглощаемого вещества за слоем адсорбента. Время процесса от начала контакта до «проскока» называют временем защитного действия адсорбента.

Н.А. Шиловым [12] было получено эмпирическое уравнение для расчета времени защитного действия для режима послойного параллельного переноса фронта адсорбции с постоянной скоростью U :

$$\tau_{зд} = \frac{H_k}{U} - \tau_0 = K \cdot H_k - \tau_0, \quad (6.14)$$

где H_k – протяженность слоя; U – скорость движения фронта адсорбции; τ_0 – потеря времени защитного действия слоя, обусловленная тем, что формирование фронта происходит не мгновенно; $K = 1/U$ – коэффициент защитного действия слоя.

Зависимость времени защитного действия $\tau_{зд}$ от высоты слоя адсорбента H в период формирования фронта адсорбции выражается плавной кривой. Затем эта зависимость в период параллельного переноса фронта адсорбции переходит в прямую линию.

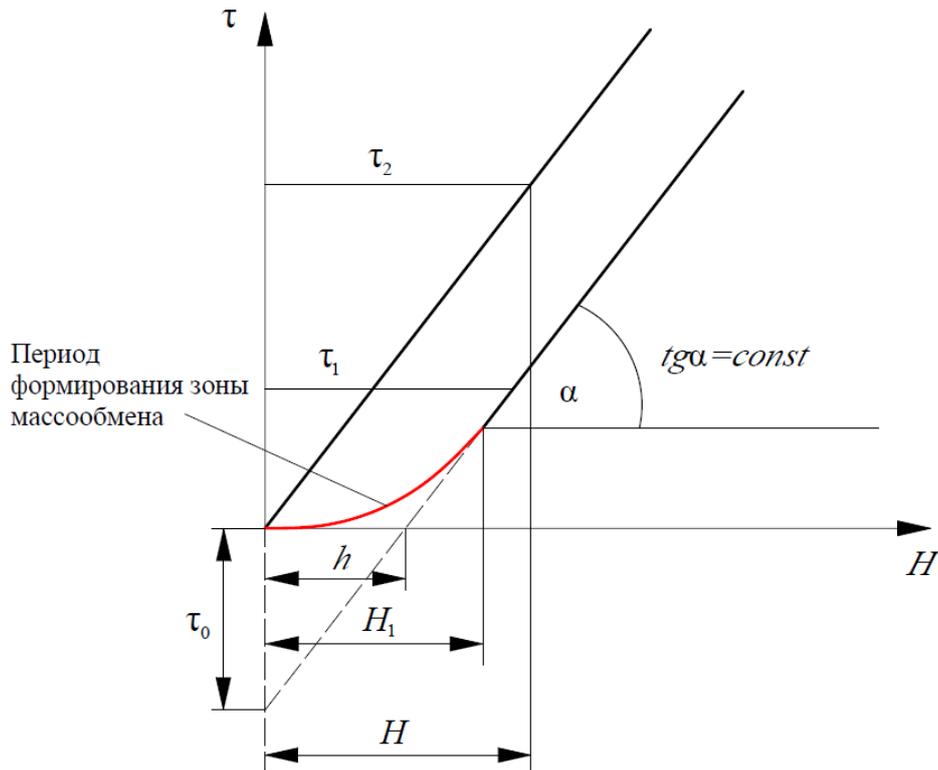


Рис. 6.8. Зависимость времени защитного действия от высоты слоя поглотителя

Отдельные величины, входящие в уравнение (6.9), можно определить из графика, построенного на основании опытных данных. Тангенс угла наклона прямолинейной части кривой на этом рисунке $\operatorname{tg}\alpha = K$, т. е. равен коэффициенту защитного действия слоя, а отрезок, который отсекается прямой от оси ординат, соответствует величине τ_0 – потере времени защитного действия слоя [12]. Отрезок h , отсекаемый на оси абсцисс, называют «мертвым» слоем. Действительно, если количество поглощенного распределенного компонента слоем высотой H условно отнести к предельно насыщенному слою, то высота последнего выразится разностью $H - h$, участок слоя h остается неиспользованным. С учетом этого уравнение (6.14) можно написать в следующем виде:

$$\tau_{зд} = K \cdot (H - h). \quad (6.15)$$

Уравнения (6.14) и (6.15) позволяют определить длительность времени защитного действия неподвижного слоя адсорбента высотой H . Очевидно, что, исходя из технологических соображений, время адсорбции $\tau_{ад}$ не должно превышать времени защитного действия, т.е. $\tau_{ад} < \tau_{зд}$.

Продолжительность T полного цикла в адсорбере периодического действия состоит из времени самой адсорбции $\tau_{ад}$ и времени вспомогательных операций $\tau_{всп}$. Вспомогательными операциями являются процессы десорбции, сушки и охлаждения адсорбента. Продолжительность вспомогательных процессов определяется практическим методом:

$$T = \tau_{ад} + \tau_{всп}. \quad (6.16)$$

Время адсорбции определяется в соответствии с анализом работы неподвижного слоя адсорбента. При поступлении потока газовой смеси на вход с постоянной начальной концентрацией адсорбируемого компонента в слой Y_n свежего адсорбента $X_n = 0$ адсорбтив поглощается первым слоем адсорбента, затем вторым, третьим и т.д. Через определенный промежуток времени вовлекаются в работу последующие слои частиц адсорбента, но при этом каждый последующий слой омывается потоком с концентрацией распределяемого компонента $Y < Y_n$, ввиду того, что он уже частично поглощен предыдущими слоями. После предельного насыщения частицы адсорбента первого слоя как бы исключаются из массообмена, и газ с концентрацией Y_n приступает к омыванию частицы второго слоя, третьего и т.д. Таким образом, через определенный промежуток времени по высоте слоя адсорбента H (или протяженности L) возникают три зоны (рис. 6.9): первая зона отработанного адсорбента (высота H_1), в которой достигается предельная емкость адсорбента X^* (соответствует равновесной концентрации по отношению к Y_n); вторая работающая зона (высота H_2), в которой предельная емкость адсорбента не достигнута и процесс адсорбции продолжается; третья зона, в которой адсорбент еще не начал свою работу (высота H_3) [27].

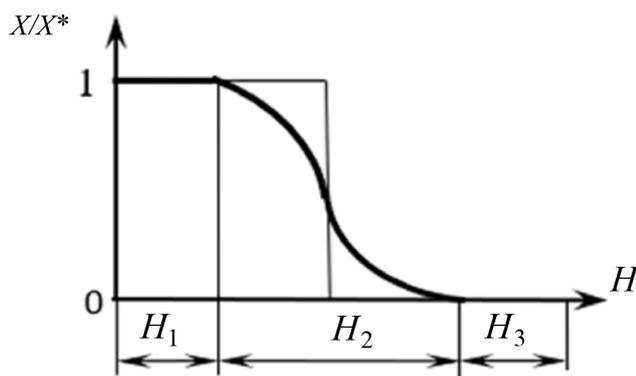


Рис. 6.9. Кривая распределения концентрации адсорбата по высоте слоя

Насыщение первого слоя частиц адсорбента наблюдается с уменьшением скорости, так как по мере приближения к предельному значению X^* уменьшается движущая сила процесса. Отрезок времени τ_0 , в течение которого достигается предельное насыщение первого слоя частиц адсорбента, именуется периодом формирования фронта адсорбции. Начиная с момента $\tau = \tau_0$ (с высоты H_1), в работающей зоне слоя адсорбента создается определенное распределение концентрации в обеих фазах, и эта зона (фронт адсорбции) далее перемещается с постоянной скоростью U , оставляя позади себя нарастающую зону насыщенного адсорбента. На рис. 6.10 представлены кривые, характеризующие процесс послойного изменения концентрации адсорбента во времени.

Очевидно, что при высоте слоя адсорбента $H > H_1 + H_2$ концентрация распределяемого компонента в потоке разделенной смеси на выходе из слоя адсорбента будет $Y_k = 0$. Если $H < H_1 + H_2$, то $Y_k > 0$, т.е. в потоке газа (или жидкости) наблюдается «проскок» поглощаемого компонента.

Средняя концентрация адсорбтива во всем слое адсорбента данной протяженности, достигнутая к моменту прорыва адсорбтива, получила условное название динамической активности слоя адсорбента. Эта величина, характеризующая емкость адсорбента в динамических условиях, может измеряться не только количеством поглощенного вещества, но и промежутком времени от начала поглощения до момента прорыва. Эта величина часто используется в практике расчетов процессов адсорбции.

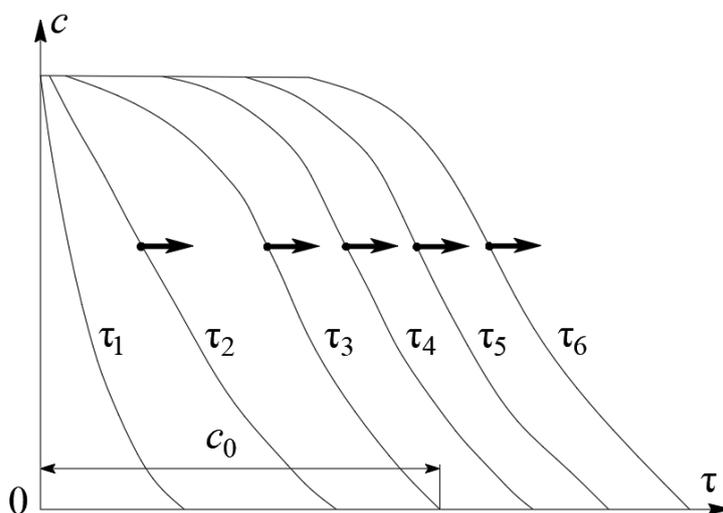


Рис. 6.10. Изменение фронта адсорбции от времени (выходная кривая)

Целью расчета адсорбера является получение базовых габаритных размеров (диаметра и высоты слоя сорбента), продолжительности стадий адсорбции и регенерации, количества адсорберов, при котором обеспечивается циклично-непрерывное функционирование установки целиком [8].

Зная время адсорбции и время вспомогательных процессов, можно рассчитать время полного цикла и определить параметры адсорберов, обеспечивающих необходимую производительность.

В процессе проектирования аппарата цилиндрической формы поперечное сечение адсорбера (его диаметр) определяется путем выбора фиктивной скорости газа (или жидкости). Граничным пределом скорости является скорость начала псевдооживления частиц сорбента. При возрастании скорости растет коэффициент массопередачи (скорость адсорбции), однако растет и гидравлическое сопротивление на перемещение потока газа сквозь слой адсорбента [8]. Допустимую фиктивную скорость потока газа в адсорбере (скорость, отнесенную ко всему сечению слоя) можно рассчитать по формуле, которая выведена на основе технико-экономического анализа работы адсорберов:

$$\omega_0 = \sqrt{0,0167 \frac{\rho_n \cdot d_s \cdot g}{\rho_r}}, \quad (6.17)$$

где d_3 – эквивалентный диаметр гранулы сорбента, м; ρ_n – насыпная плотность сорбента, кг/м³; ρ_r – плотность газа (жидкости), кг/м³. Рабочая скорость потока в адсорбере принимается на 25% меньше допустимой. Обычно, исходя из условий обеспечения необходимого времени контакта газа с сорбентом и минимального гидравлического сопротивления, значение ω_0 выбирают в пределах 0,1–0,25 м/с.

Эквивалентный диаметр зерна сорбента для цилиндрических зерен длиной l_3 и диаметром d_3 определяется по формуле

$$d_3 = \frac{\Pi_n \cdot d_3 \cdot l_3}{(1 - \Pi_n) \cdot (0,5d_3 + l_3)}, \quad (6.18)$$

где $\Pi_n = (\rho_k - \rho_n) / \rho_k$ – пористость слоя сорбента, определяемая через кажущуюся ρ_k и насыпную ρ_n плотности сорбента;

Ориентировочно продолжительность собственно процесса адсорбции вычисляется на основании средней емкости адсорбента:

$$\tau = \frac{M_{сл} \cdot m}{\omega_0 \cdot S \cdot \rho_{см} \cdot (c_1 - c_2)}, \quad (6.19)$$

где $M_{сл}$ – масса адсорбента в слое; ω_0 – фиктивная скорость смеси, м/с; S – площадь сечения адсорбера, м²; $\rho_{см}$ – плотность смеси, кг/м³; c_1 и c_2 – начальная и конечная концентрации адсорбтива в смеси.

Масса сорбента, кг, определяется как

$$m = K \cdot G \cdot C_0 \frac{\tau}{a_0}, \quad (6.20)$$

где $K = 1,1–1,2$ – коэффициент запаса; τ – продолжительность процесса сорбции, с; G – весовое количество очищаемого газа, кг/с; C_0 – концентрация поглощаемого вещества на входе в адсорбер, кг/м³; a_0 – статическая емкость адсорбера, кг/м³.

По известной фиктивной скорости ω_0 из уравнения расхода находят геометрические размеры адсорбера:

– диаметр аппарата

$$D = \sqrt{\frac{V_{см}}{0,785\omega_0}}, \quad (6.21)$$

где $V_{см}$ – объемный расход парогазовой смеси, м³/с:

– длина L слоя адсорбента

$$L = \frac{m \cdot C_0 \cdot \omega_0}{G}. \quad (6.22)$$

Гидравлическое сопротивление, оказываемое слоем зернистого поглотителя при прохождении через него потока очищаемого газа ΔP , Па, определяют по формуле

$$\Delta P = \frac{3\lambda}{4} \cdot \frac{L \cdot \rho_r \cdot (1 - \Pi) \cdot W^2}{\Phi \cdot d_3 \cdot \Pi^3}, \quad (6.23)$$

где $\Phi = 0,9$ – коэффициент формы.

Коэффициент трения λ находят в зависимости от характера движения:

$$\text{при } Re < 50 \quad \lambda = \frac{220}{Re}; \quad (6.24)$$

$$\text{при } Re \geq 50 \quad \lambda = \frac{11,6}{Re^{0,25}}, \quad (6.25)$$

где $Re = (W_r \cdot d_3)/\nu$ – критерий Рейнольдса; ν – кинематическая вязкость газа, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для обеспечения непрерывной работы по очистке газов методом адсорбции устанавливают несколько аппаратов периодического действия. В данных аппаратах поочередно протекают адсорбция или вспомогательные операции (десорбции, сушка, охлаждение). Количество адсорберов должно быть равным или кратным двум. Для работы подобных установок требуется соблюдение условия $\tau_{\text{ад}} \geq \tau_{\text{всп}}$.

6.4. Капиллярная конденсация

Для адсорбентов, содержащих капилляры и поры с размерами от 2 до 200 нм, соизмеримыми с молекулами газов, процесс взаимодействия адсорбентов с газом осложняется процессом капиллярной конденсации. Капиллярная конденсация – это процесс конденсации парогазообразного потока на пористых твердых телах при давлениях, меньших давления насыщенного пара этого вещества над плоской поверхностью P_s . Конденсация начинается со дна конусообразных пор, где кривизна наибольшая. Сконденсировавшаяся в капиллярах жидкость образует вогнутый мениск, над которым пар становится насыщенным при $P < P_s$. Сконденсировавшаяся жидкость продвигается в более широкую часть поры. Это приводит к увеличению радиуса кривизны и увеличению давления P_s . Конденсация возможна при повышении внешнего давления. Участки гладкой поверхности и поверхность пор покрываются тонким слоем молекул вещества при совместном действии сил поверхностного натяжения и смачивания. Происходит процесс слияния псевдооживленных адсорбционных слоёв на стенках пор и капилляров с последующим заполнением пор продолжающимся конденсироваться адсорбентом. Наличие конденсата в капиллярах адсорбента создает препятствие для процесса адсорбции. Наиболее важной в практическом отношении является капиллярная конденсация водяного пара, всегда в том или ином количестве присутствующего в воздухе.

Освобождение пор от адсорбата при десорбции требует создания намного более низкого давления, чем для их заполнения.

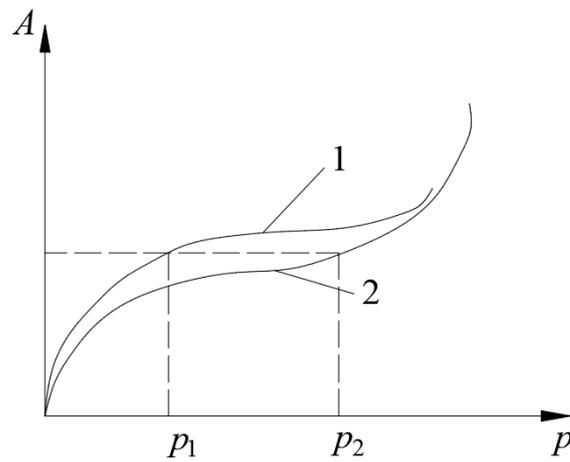


Рис. 6.11. Капиллярно-конденсационный гистерезис; 1 – изотерма адсорбции с конденсацией (заполнение пор); 2 – десорбция (опорожнение пор)

На рис. 6.11 приведены изотермы адсорбции с заполнением пор конденсатом и десорбции с опорожнением пор (капиллярно-конденсационный гистерезис), наглядно демонстрирующие эти процессы.

Явление капиллярно-конденсационного гистерезиса при адсорбции-десорбции связано с образованием внутри пор и капилляров вогнутого мениска жидкости, смачивающей твёрдый адсорбент, и пониженным давлением над мениском.

7. АБСОРБЕРЫ

7.1. Общие сведения

Абсорбция – процесс поглощения газов и паров жидким поглотителем, в котором они достаточно хорошо растворимы. Это один из видов массопереноса, который протекает при условии, что парциальное давление в газовой фазе превышает равновесное давление над раствором. Обратный процесс выделения растворенного газа из раствора называется десорбцией. Существуют физическая и химическая (хемосорбция) абсорбции. В процессе физической абсорбции растворение газа не сопровождается химической реакцией. При этом протекает растворение абсорбируемого компонента в растворителе. При хемосорбции абсорбируемый компонент химически взаимодействует с абсорбентом, в результате чего образуются новые химические соединения в жидкой фазе [18].

Абсорбционные способы очистки газозводушных смесей разделяются по следующим признакам:

- по абсорбируемому компоненту и типу абсорбента;
- по конструктивному оформлению абсорбционной аппаратуры;
- по схемам движения газозводушной смеси;
- по использованию абсорбента и улавливаемых компонентов;
- по организации процесса.

Метод абсорбционной очистки особенно эффективен при высоких концентрациях загрязнителей в парогазовых выбросах промышленных предприятий. Однако его широко используют и при весьма низких концентрациях, если растворимость газа в жидкости достаточно высока (например, в одном объеме воды при нормальном давлении растворяется до 600 объемов аммиака).

Процесс абсорбции является избирательным и обратимым. Это позволяет применять его как для разделения газовых или парогазовых смесей, так и для получения растворов газов в жидкостях и последующей десорбции [24].

Одновременная абсорбция и десорбция позволяют многократно практически без потерь использовать жидкий поглотитель (абсорбент) в замкнутом контуре аппаратов в виде кругового процесса абсорбер–десорбер–абсорбер и выделять поглощенный компонент в чистом виде [23].

Во многих случаях проводить десорбцию не обязательно, так как абсорбент и абсорбтив представляют собой дешевые или отбросные продукты, которые после абсорбции можно вновь не использовать (например, при очистке газов).

В промышленности абсорбционную очистку выбросов в атмосферу практикуют для извлечения ценного компонента из газовых смесей и для санитарной очистки газа от вредных примесей. Правильным считается применение абсорбции в случае концентрации данного компонента в газовом потоке более 1 % [23].

На практике в качестве абсорбентов для очистки выбросов применяют только капельные жидкости. В принципе абсорбентом может служить

практически любая жидкость. Вместе с тем для масштабного промышленного применения абсорбенты должны отвечать следующим требованиям:

- доступность и невысокая стоимость;
- высокая способность поглощать вредности из парогазовой смеси;
- повышенная селективность (избирательность) применительно к поглощаемому компоненту;
- малая вязкость, плотность и летучесть, давление;
- способность к регенерации;
- термохимическая стойкость, нетоксичность, огне- и взрывобезопасность.

Чаще всего при физической абсорбции в качестве растворителя используется вода как дешевый и доступный абсорбент при очистке значительных объемах газовых выбросов. Для абсорбции газов, плохо растворимых в воде, используют слаболетучие растворители с низким давлением пара, к примеру, углеводороды.

Уровень растворимости газа в абсорбенте в большей степени зависит от температуры и давления в процессе. Согласно закону Генри [23], растворимость газа при постоянной температуре пропорциональна давлению газа над раствором, т.е. с ростом давления абсорбция происходит интенсивнее. При повышении температуры процесса интенсивность абсорбции снижается, поскольку, согласно принципу Ле-Шателье [23], с ростом температуры растворимость газа в жидкости уменьшается.

Абсорбционные процессы нашли широкое применение в химической технологии и являются основной технологической стадией ряда важнейших производств. Основной сферой применения абсорбции является удаление водорастворимых газообразных загрязнений из отходящих газов многих технологических процессов. Такими процессами являются абсорбция HCl с получением соляной кислоты; абсорбция SO_3 в производстве серной кислоты; абсорбция окислов азота водой в производстве азотной кислоты; абсорбция NH_3 , паров C_6H_6 , и других компонентов из коксового газа; абсорбция паров различных углеводородов из газов переработки нефти и т. п.). К тому же абсорбционные процессы являются основополагающими при санитарной очистке выпускаемых в атмосферу отходящих газов от вредных примесей (например, очистка топочных газов от SO_2 ; очистка от фтористых соединений газов, выделяющихся в производстве минеральных удобрений, дезодорация газовоздушных выбросов и т. д.) [28].

Эффективность процесса массопереноса при абсорбции зависит от направления относительного движения фаз и структуры потоков. По направлению взаимного перемещения жидкой и пылегазовой фаз выделяется прямоточное, противоточное и перекрестноточное движение. В промышленной очистке воздуха от примесей чаще всего используется противоточная схема движения фаз.

Абсорбционный метод широко применяется в практике газоочистки, так как он позволяет улавливать, наряду с газами, и твердые частицы, а также

отличается простотой оборудования и открывает возможности для утилизации улавливаемых примесей.

Вместе с тем данный метод не лишен и недостатков. К ним можно отнести следующие:

- серьезные эксплуатационные издержки и трудность в регулировке;
- образование твердых осадков на поверхности оборудования, что затрудняет его эксплуатацию;
- коррозионная активность многих жидких сред.

7.2. Конструкции и принцип действия абсорберов

Абсорберы предназначены для осуществления процессов абсорбции. Аналогично иным процессам массопередачи, она протекает на развитой поверхности раздела фаз (абсорбент – газозодушная смесь). По способу образования этой поверхности и диспергации абсорбента они выделяются в следующие группы [24]:

- пленочные;
- насадочные;
- барботажные (тарельчатые);
- распылительные (брызгальные).

Практически все типы аппаратов функционируют по одному и тому же принципу, отличаясь только формой и поверхностью контакта, а также организацией движения потоков абсорбента и газозодушной смеси.

В пленочных абсорберах жидкость, контактирующая с газовой фазой, движется по твердой, плоской, трубчатой или гофрированной вертикальной стенке. Типичные конструкции пленочных абсорберов представлены на рис. 7.1.

Насадочные абсорберы конструктивно состоят из колонн, заполненных насадкой – твердыми телами различной формы, которые служат для увеличения поверхности контакта соприкасающихся фаз.

В барботажных абсорберах (ситчатых или колпачковых) осуществляется непрерывный или ступенчатый (на тарелках) контакт газовой фазы с барботажным слоем.

В брызгальных абсорберах жидкость подается навстречу газовому потоку под давлением, распыляясь с помощью форсунок.

По способу организации массообмена абсорбционные устройства подразделяются на аппараты с непрерывным и ступенчатым контактом фаз. Устройствами с непрерывным контактом являются насадочные колонны, распылительные аппараты (полые скрубберы, скрубберы Вентури, ротоклоны и др.), однополочные барботажные и пенные устройства. К типу устройств со ступенчатым контактом относят тарельчатые колонны, многополочные барботажные и пенные устройства. Определенное количество данных устройств используются для мокрой пылеочистки. Серийно производимые мокрые пылеуловители применяются исключительно в целях предварительной

обработки для освобождения газового потока от дисперсных примесей перед абсорбционной обработкой.

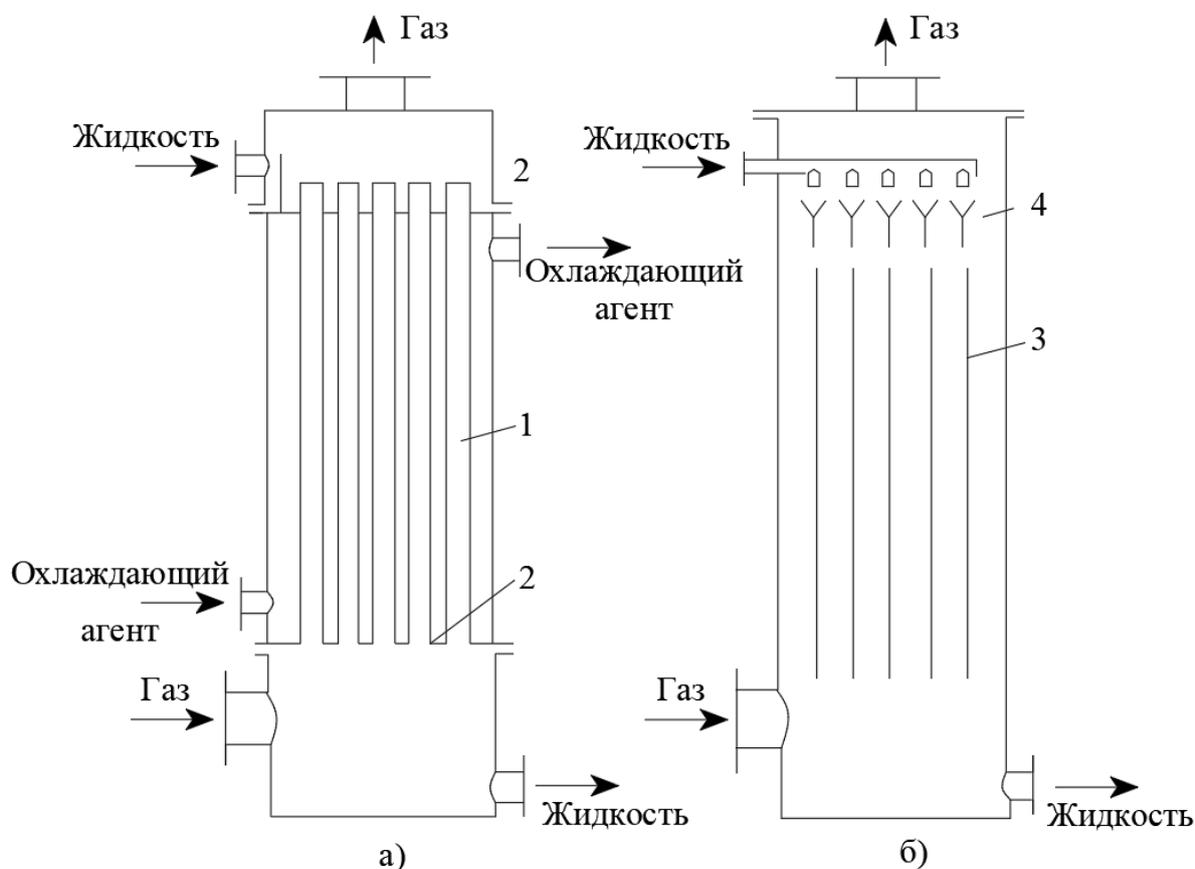


Рис. 7.1. Плёночные абсорберы: а – трубчатый; б – с листовой насадкой;
 1 – трубы; 2 – трубные решётки; 3 – пластины;
 4 – распределительное устройство

Наибольшее распространение для очистки получили барботажные (тарельчатые) и насадочные абсорберы [5, 24].

Барботажные абсорберы тарельчатого типа (рис. 7.2) в настоящее время весьма популярны. Они изготавливаются из колонн круглого (иногда прямоугольного) сечения, по высоте которых установлены тарелки различных конструкций, при этом на каждой тарелке осуществляется одна ступень контакта. Так, в данных абсорберах происходит многократный ступенчатый контакт с соединением ступеней противотоком: газ подается в нижнюю часть колонны и удаляется сверху, а жидкость подводится сверху и выходит снизу. На всех тарелках, в зависимости от ее конструкции, осуществляются разные типы движения фаз, в большинстве случаев перекрестный ток или полное перемешивание жидкости [24].

В барботажных абсорберах поверхность контакта между жидкостью и газом образована дроблением газа на струи и пузырьки, барботирующие через слой жидкости (рис. 7.2). Данные режимы осуществляются в тарельчатых колоннах с колпачковыми, ситчатыми и провальными тарелками. В нижней части абсорбера расположена пористая перегородка или плита с отверстиями, под которую подводится газ. Над плитой при прохождении газа через жидкость

образуется барботажный слой, представляющий собой дисперсную систему (пену), в которой жидкость является сплошной, а газ – дисперсной фазой [4]. Функциональным принципом тарельчатых колонн (рис. 7.2, а) является ступенчатый характер осуществляемых в них процессов, так как газ и жидкость постепенно вступают в контакт на отдельных стадиях (тарелках) аппарата [29].

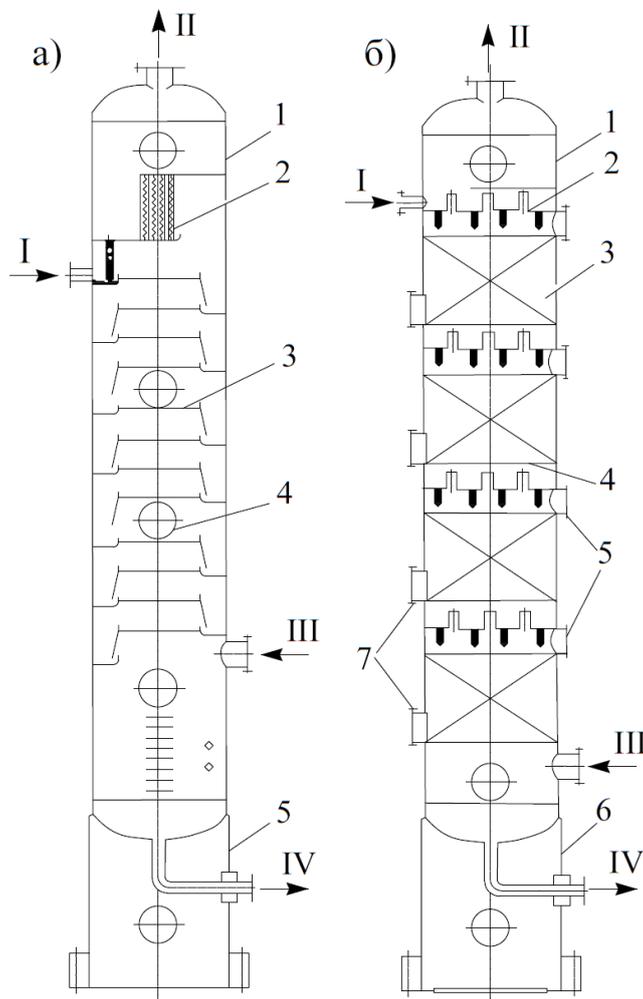


Рис. 7.2. Конструкции абсорберов: а – тарельчатый: 1 – корпус; 2 – каплеотбойник; 3 – тарелка; 4 – люк; 5 – опорная обечайка; б – насадочный: 1 – корпус; 2 – распределительная тарелка; 3 – насадка; 4 – опорная решетка; 5 – загрузочные люки; 6 – опора; 7 – люки выгрузки насадки. Поток: *I* – ненасыщенный абсорбент; *II* – сухой газ; *III* – сырой газ; *IV* – насыщенный абсорбент

На рис. 7.3 представлена схема барботажного абсорбера, наглядно демонстрирующая принцип его действия. При отводе жидкости снизу ее выводят через переливное устройство, благодаря чему в аппарате поддерживается определенная высота барботажного слоя h , которая определяется из условий гидростатики:

$$h = \frac{\rho_{ж}}{\rho_{п}} \cdot h_0, \quad (7.1)$$

где $\rho_{ж}$ и $\rho_{п}$ – плотности чистой жидкости и пены соответственно; h_0 – высота жидкости. Аппараты такого типа в промышленности обычно работают при невысоких скоростях газа (до 0,3–0,4 м/с).

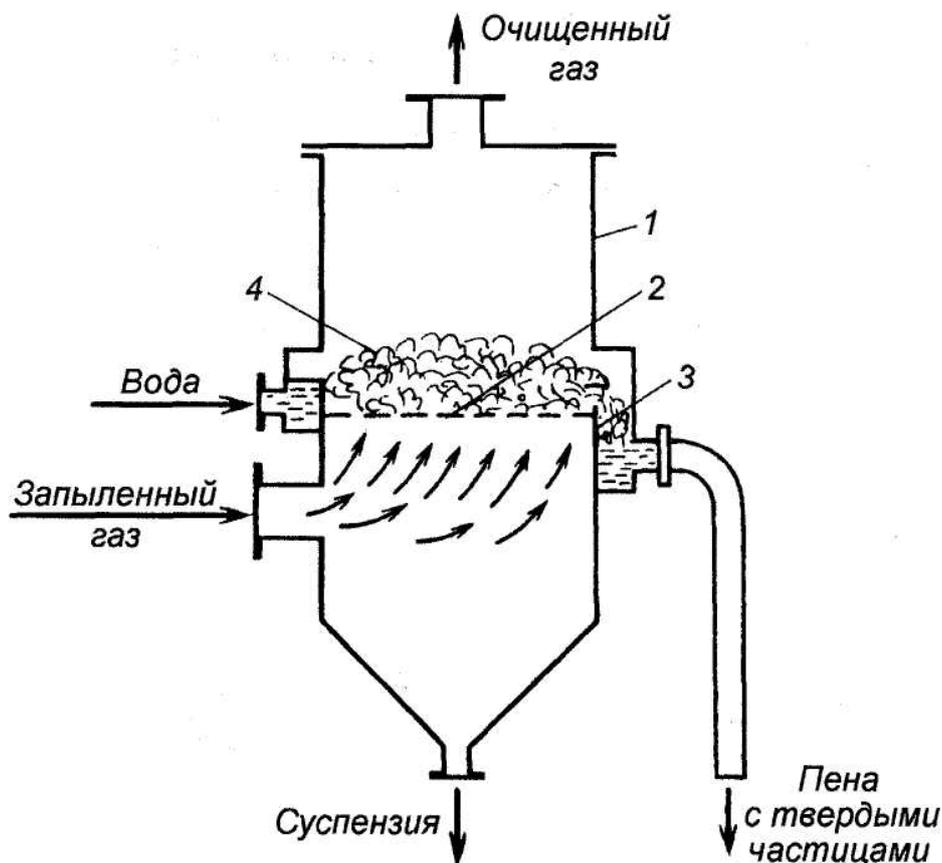


Рис. 7.3. Схема работы барботажного абсорбера: 1 – корпус; 2 – решетка; 3 – переливное устройство; 4 – пена с поглощенными примесями

В абсорберах с подвижной насадкой (рис. 7.4) легкие насадочные тела поддерживаются током газа во взвешенном (псевдооживленном) состоянии. В качестве насадочных тел для образования плавающего слоя обычно используют полые или сплошные шары диаметром 7–76 мм и плотностью 20–400 кг/м³ из полиэтилена, полипропилена, пенополистирола и других пластических масс, а также из пористой резины.

Абсорберы с подвижной насадкой рекомендуются для процессов пылеулавливания и при обработке загрязненных газов и жидкостей, так как при интенсивном движении насадочных тел отсутствует забивание насадки твердыми частицами. Они могут работать при больших в сравнении со статической насадкой скоростях газа без наступления захлебывания и имеют высокий коэффициент массопередачи.

Основными недостатками такой конструкции аппарата является высокое гидравлическое сопротивление, значительный (по сравнению с неподвижной насадкой) брызгоунос и износ шаров при работе.

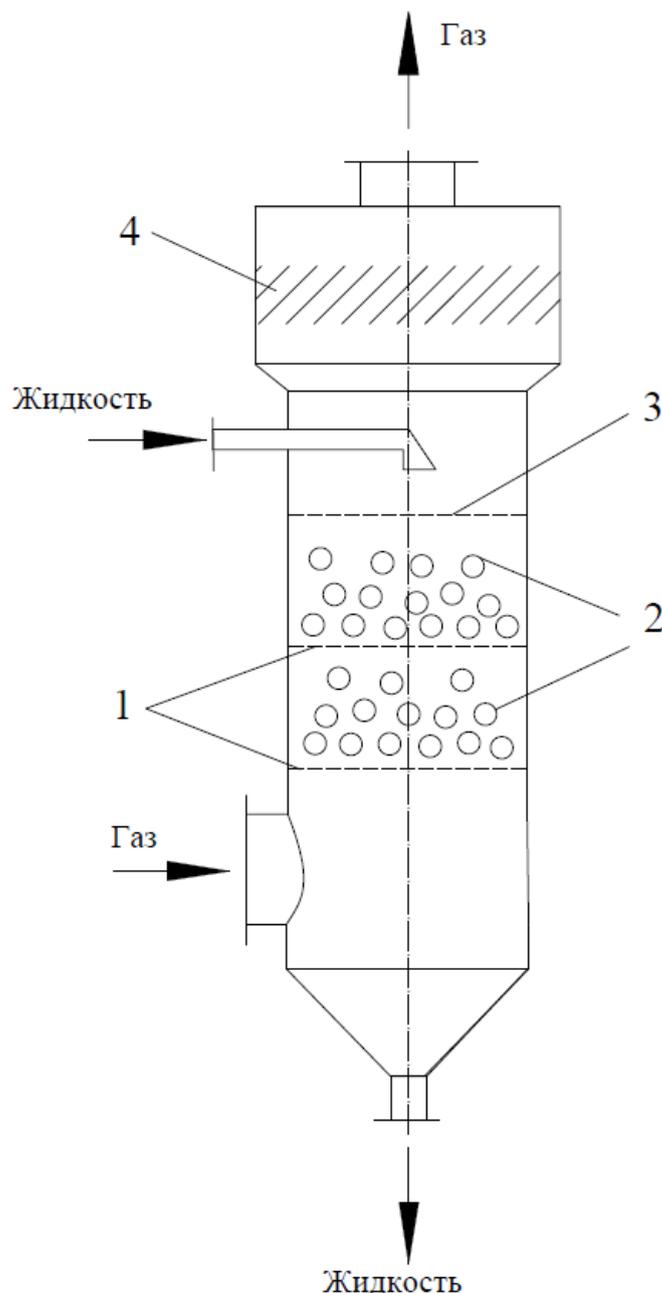


Рис. 7.4. Абсорбер с псевдооживленной насадкой:
 1 – опорно-распределительные решетки; 2 – шаровая насадка;
 3 – ограничительная решетка; 4 – брызгоуловитель

Нижняя решетка предназначена для удержания насадки, верхняя – для удержания насадки в аппарате. Живое сечение опорных решеток принимают 0,35–0,45, а ограничительных – 0,8–0,9. Статическая высота слоя насадки (в неподвижном состоянии) равняется 0,2–0,3 м, а расстояние между решетками 1–1,5 м, что допускает 3–4-кратное расширение слоя. Скорость газа в свободном сечении принимают 2,5–5 м/с при плотностях орошения 25–100 м³/(м²·ч). Гидравлическое сопротивление односекционного абсорбера при плотности орошения 60 м/ч составляет примерно 1,3 кПа. В промышленном исполнении абсорберы имеют диаметр до 5 м и высоту до 12 м.

В колпачковых тарелках (рис. 7.5) газ барботирует через жидкость и выходит из прорезей колпачков, которые находятся на каждой тарелке. В прорезях газ дробится на маленькие струи, которые, выходя из прорези, устремляются вверх, затем проходят сквозь слой жидкости на тарелке, сливаются между собой.

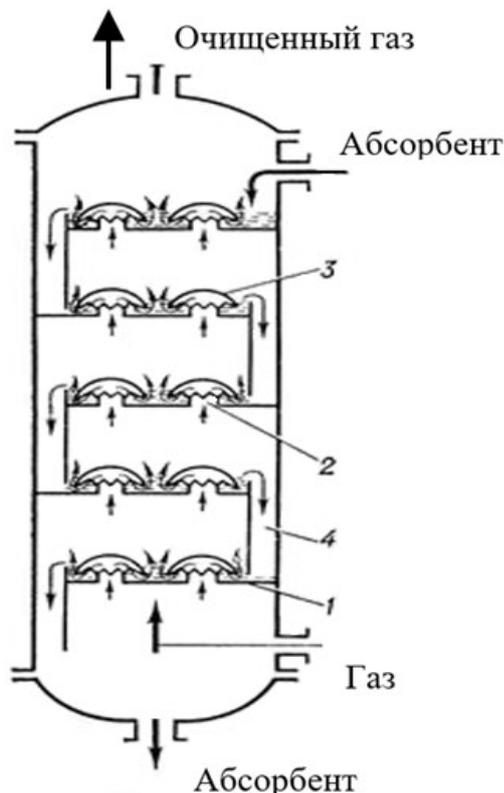


Рис. 7.5. Конструкция тарельчатого абсорбера

В колоннах (рис. 7.6) располагаются тарелки 1 с патрубками 2, которые сверху закрыты колпачками 3. Нижние края колпачков имеют зубцы или прорези, которые представляют собой узкие вертикальные щели. Жидкость перетекает с тарелки на тарелку через переливные трубы 4. Уровень жидкости на тарелке соответствует такой высоте, на которую верхние концы переливных труб выступают над тарелкой. Для того, чтобы жидкость перетекала исключительно по переливным трубам, а не через патрубки 2, верхние концы патрубков должны находиться выше уровня жидкости. Нижние края колпачков находятся в жидкости таким образом, что уровень жидкости соответствует отметке выше верха прорезей. В верхней части корпуса абсорбера располагается каплеотбойник, который препятствует уносу абсорбента потоком газа [30].

Конструкции некоторых типов колпачков представлены на рис. 7.7.

Барботажные абсорберы с колпачковыми тарелками являются более адаптивными для эксплуатации в загрязненных средах. Они в меньшей степени чувствительны к загрязнениям и устойчивы к работе на более долгих промежутках времени. Колпачковые тарелки эффективно функционируют при значительных изменениях нагрузок по газу и жидкости.

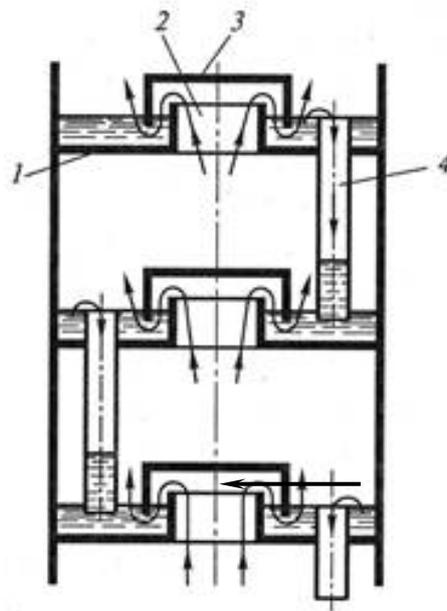


Рис. 7.6. Схема колонны с колпачковыми тарелками: 1 – тарелка; 2 – патрубок; 3 – колпачок; 4 – переливная трубка

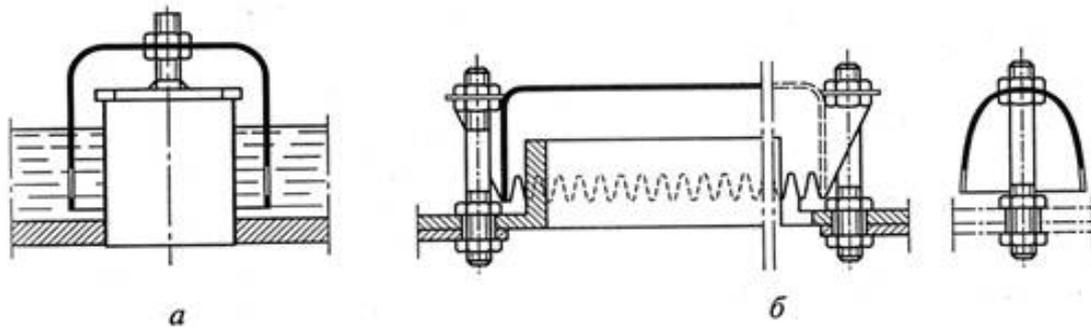


Рис. 7.7. Конструкции колпачков: а – круглого; б – прямоугольного

Недостатками рассматриваемых аппаратов являются: сложное конструктивное исполнение, большие финансовые затраты, низкие предельные нагрузки по газу, относительно высокое гидравлическое сопротивление, которое связано с пропусканьем значительных объемов газа с большими затратами энергии на перемещение газовых масс через аппарат, возникающие сложности при очистке. В соответствии с вышеперечисленным, барботажные абсорберы используются в основном в тех случаях, при которых абсорбция производится под повышенным давлением, так как высокое гидравлическое сопротивление при этом крайне мало [26].

В насадочной колонне (рис. 7.8, а) жидкость движется по элементу насадки в основном в виде тонкой пленки, поэтому поверхностью контакта фаз является, главным образом, смоченная поверхность насадки, и насадочные аппараты могут быть рассмотрены в качестве вида пленочных. Стоит отметить, что в последних пленочное течение жидкости наблюдается по всей высоте аппарата, а в насадочных колоннах жидкость течет исключительно по высоте элемента насадки. В процессе перетекания жидкости с одного элемента насадки на другой

пленка жидкости разрушается, и на нижележащем элементе появляется новая пленка. В таком случае часть жидкости протекает через расположенные ниже слои насадки в виде струек, капель и брызг. Часть поверхности насадки может быть смоченной неподвижной (застойной) жидкостью.

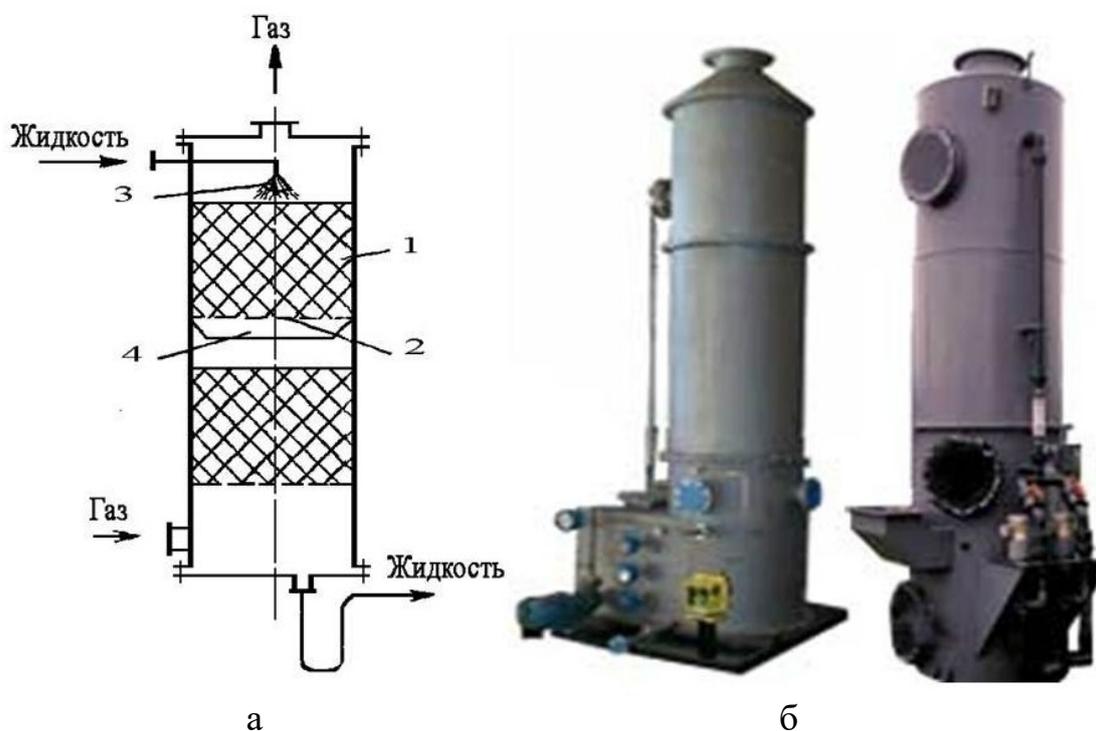


Рис. 7.8. Насадочный абсорбер: а) схема работы абсорбера: 1 – насадка; 2 – опорная решетка; 3 – распределитель жидкости; 4 – перераспределитель жидкости; б) общий вид промышленного абсорбера

Насадка 1 установлена на опорные решетки 2, в которых проделаны отверстия или щели для протекания газа и стока жидкости, которая благодаря распределителю (разбрызгивателю) 3 равномерно орошает насадочные тела и устремляется вниз. По всей высоте слоя равномерность распределения жидкости по сечению колонны, как правило, не достигается, так как из-за разных значений гидравлического сопротивления насадки и влияния пристеночных эффектов она растекается от центральной части колонны к ее стенкам. По этой причине для улучшения смачивания насадки в колоннах большого диаметра насадка может быть уложена слоями (секциями) высотой (2–3) диаметра, а под каждой секцией, за исключением нижней, монтируют перераспределители жидкости 4 [31].

В абсорберах распылительного типа (рис. 7.9) поверхность соприкосновения фаз образуется распылением или разбрызгиванием жидкости в потоке газа. Они имеют вид колонн, в которых жидкость распыляется сверху, а газ течет снизу вверх. Свое основное применение они нашли при поглощении хорошо растворимых газов [12].

Такие абсорберы классифицируются следующим образом [35]:

- форсуночные распылительные абсорберы (рис. 7.9, а). В них жидкость распыляется на капли форсунками;

- скоростные прямоточные распылительные абсорберы (рис. 7.9, б). В них жидкость распыляется за счет кинетической энергии газового потока;
- механические распылительные абсорберы (рис. 7.9, в). В них жидкость распыляется вращающимися деталями.

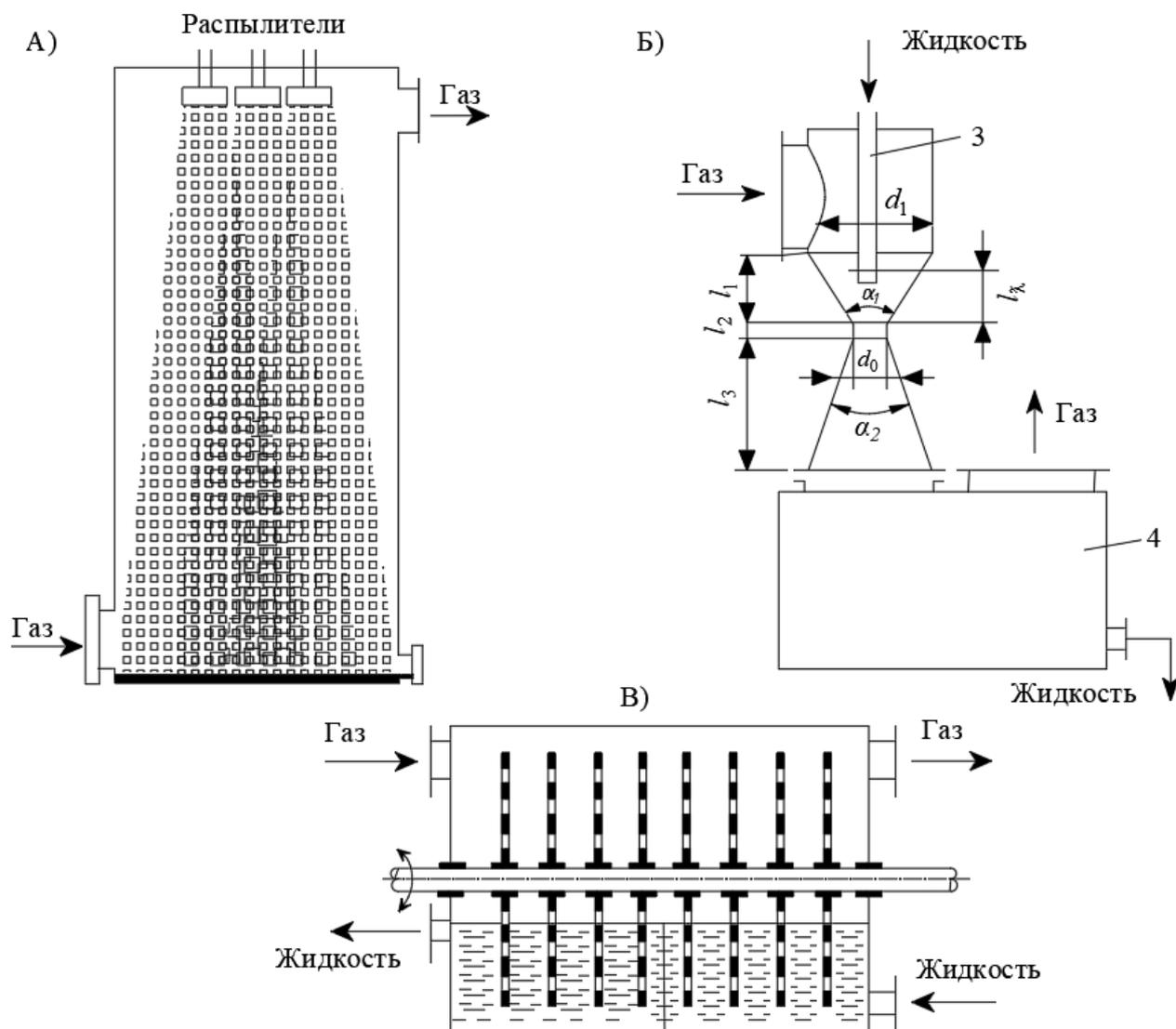


Рис. 7.9. Распылительные абсорберы: а – полый распылительный абсорбер; б – форсуночный абсорбер Вентури; в – механический распылительный абсорбер

7.3. Виды насадочных элементов и их особенности

Контакт газового потока с абсорбентом осуществляется в колоннах, заполненных насадкой различной формы (рис. 7.10).

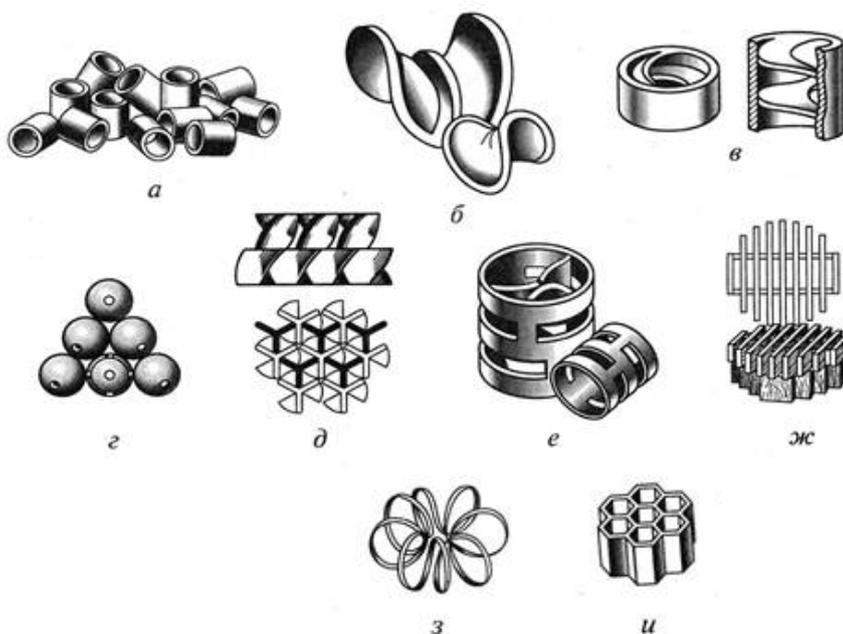


Рис. 7.10. Виды насадочных элементов: *а* – кольца Рашига; *б* – седла Берля; *в* – кольца с перегородками; *г* – шары; *д* – пропеллерная насадка; *е* – кольца Палля; *ж* – хордовая насадка; *з* – спирали; *и* – керамические блоки

Базовыми характеристиками насадки являются удельная поверхность a ($\text{м}^2/\text{м}^3$) и свободный объем ε ($\text{м}^3/\text{м}^3$). Удельной поверхностью насадки называют сумму всех поверхностей насадочных тел в единице занимаемого насадкой объема аппарата. Чем больше удельная поверхность насадки, тем выше эффективность колонны, однако при этом снижается пропускная способность, а гидравлическое сопротивление имеет тенденцию к возрастанию. Свободный объем насадки ε – это сумма объемов всех пустот между насадочными телами в единице объема, который занимает насадка. Чем больше свободный объем насадки, тем выше ее пропускная способность и меньше гидравлическое сопротивление, но при этом наблюдается уменьшение эффективности функционирования насадки.

Величина ε определяется путем заполнения объема насадки водой. Отношение объема воды к объему насадки образует величину ε . Следующая характеристика насадки – свободное сечение s ($\text{м}^2/\text{м}^2$). Принимают, что свободное сечение насадки s равно по величине ее свободному объему, т. е. $s = \varepsilon$. Эквивалентный диаметр насадки находится по формуле [5]:

$$d_3 = \frac{4S_{\text{св}}}{a}. \quad (7.2)$$

В зависимости от принимаемого для производства насадки материала они бывают металлическими, керамическими, пластмассовыми, стеклянными, стеклопластиковыми и иными.

В орошаемых колоннах используют два вида насадок – насыпные и хордовые.

Насыпные насадки. Данную насадку из колец укладывают на опорную решетку (колосник), имеющую наименьшее гидравлическое сопротивление и механическую прочность, достаточную для выдерживания веса насадки и удержания ею жидкости. Элементы насадки производятся из керамики, фарфора, полимерных пористых материалов, полученных методом пневмоэкструзии, или тонколистового металла. Насадка должна быть засыпана ровным слоем, так как образование пустот или щелей резко ухудшает работу колонны [32].

Наибольшее применение среди насыпных насадок нашли тонкостенные кольца Рашига, имеющие высоту, равную диаметру, который варьируется в пределах 15–150 мм (рис. 7.11).



Рис. 7.11. Кольца Рашига

Небольшие кольца засыпают в колонну навалом. Большие по габаритам кольца (от 50×50 мм и выше) укладывают в ряды, сдвинутые друг относительно друга. Этот метод заполнения называют загрузкой в укладку, а загруженную таким способом насадку – регулярной. Регулярная насадка отличается определенными преимуществами в сравнении с нерегулярной, навалом засыпанной в колонну: она имеет меньшее гидравлическое сопротивление и допускает большие скорости газа. Но регулярной насадке необходимы более сложные по конструктивному исполнению оросители, чем насадке, насыпанной методом навала [24].

Кольца Палля (рис. 7.12) – это усовершенствованные кольца Рашига. Они представляют собой цилиндры с теми же размерными соотношениями, но имеющие два ряда прямоугольных просечек в стенках и, соответственно, два ряда лепестков, отогнутых вокруг кольца.

Элементы насадок обоих типов изготавливаются из заготовок одинакового размера, но наличие второго ряда лепестков способствует значительному повышению эффективности пропускной способности насадки при одновременном снижении перепада давления. Кольца Палля предназначены для заполнения рабочих объёмов насадочных колонн и аппаратов с целью повышения интенсивности тепло- и массообменных процессов в оборудовании химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и др. отраслей

промышленности, систем канализации и водоснабжения, производства аммиака и минеральных удобрений.



Рис. 7.12. Металлические кольца Палля

Насадки кислотоупорные керамические ГОСТ 17612–89 (седловидные) (рис. 7.13) предназначены для заполнения насадочных колонн и другой тепло- и массообменной аппаратуры, работающей при температуре от 273°К (0°С) до 393°К (120°С) – для кислых сред, и от 273°К (0°С) до 303°К (30°С) – для щелочных.



Рис. 7.13. Седловидные насадки

Насадки кислотоупорные седловидные (сёдла Берля) предназначены для заполнения рабочих объёмов насадочных колонн и аппаратов с целью повышения интенсивности тепло- и массообменных процессов в оборудовании химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и др. отраслей промышленности, систем канализации и водоснабжения, производства аммиака и минеральных удобрений.

Седла Берля, в отличие от колец Рашига, имеют повышенную (до 30%) эффективность и увеличенный срок службы. Они относятся к нерегулярным

кислотоупорным насадкам. Седловидная насадка обладает меньшим гидравлическим сопротивлением и несколько большей эффективностью, чем кольца Рашига. Седла Берля лучше смачиваются, чем кольца Рашига, и обеспечивают большую беспорядочность насадки, не создавая предпочтительных путей (каналов) для протекания жидкости.

Хордовые насадки выполняются из крупных элементов: деревянных, пластмассовых или керамических брусьев, сеток и гофрированных листов. Хордовые насадки обеспечивают хороший контакт между жидкостью и газом и в то же время имеют малое гидравлическое сопротивление. Базовые типы хордовых насадок изображены на рис. 7.14.

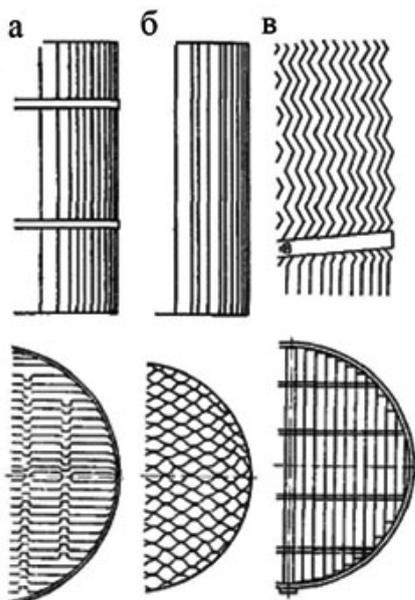


Рис. 7.14. Основные виды хордовых насадок: а – плоскопараллельная, б – сотовая, в – зигзагообразная

Пористые насадки (рис.7.15, 7.16), являются наиболее распространенными. Конструктивно это полимерные пористые кольца. В отличие от других материалов (металл, керамика), которые используются при изготовлении насадок в виде колец, они просты в изготовлении, требуют меньших финансовых затрат и легче своих аналогов по весу [33].

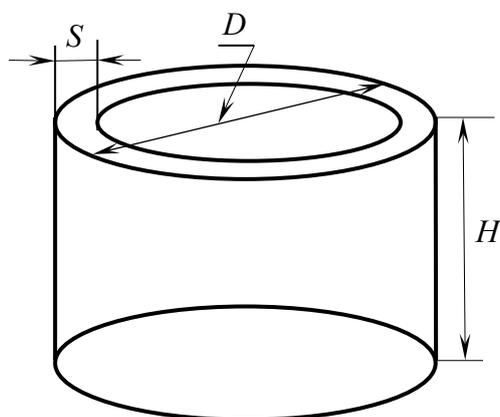


Рис. 7.15. Кольцо пористой насадки (чертеж)



Рис. 7.16. Кольца пористой насадки (внешний вид)

На рис. 7.15, 7.16 изображено кольцо, изготовленное из пористого материала, с размерами $D = 50$ мм; $H = 50$ мм; $S = 5$ мм. Средняя масса такого кольца – 30 г. Малая масса пористых колец является их главным преимуществом в сравнении с конкурирующим типом колец – кольцами Рашига, изготавливаемыми из керамики или фарфора: при идентичных размерах керамические кольца имеют массу а 80 г, т.е. почти в 3 раза выше [33].

Для расчета параметров пористой насадки используются следующие выражения:

- удельная поверхность контакта засыпки, a ,

$$a = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{M_i \cdot s_i}{m_i}}{W}; \quad (7.3)$$

- доля свободного объема засыпки, ε ,

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{M_i \cdot w_i}{m_i}}{W}, \quad (7.4)$$

где n – количество типоразмеров насадочных тел; S , W – площадь поперечного сечения и объем засыпки; M_i – масса засыпки телами i -го типоразмера; s_i , w_i , m_i – площадь поверхности, объем и масса отдельного насадочного i -го тела.

- поверхность единичного насадочного тела, $S_{\text{пов}}$,

$$S_{\text{пов}} = \pi \cdot H(D + d_{\text{внут}}); \quad (7.5)$$

- объем, занимаемый единичным цилиндром, m^3 ,

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4}; \quad (7.6)$$

- площадь поверхности слоя насадки в единице объёма, $S_{\text{пов}}^{\text{уд}}$

$$S_{\text{пов}}^{\text{уд}} = \frac{S_{\text{пов}}}{V}, \text{ м}^2/\text{м}^3. \quad (7.7)$$

Эффективная насадка должна удовлетворять следующим требованиям [6, 34]:

- хорошая смачиваемость орошающей жидкостью, т.е. материал насадки по отношению к орошающей жидкости должен быть лиофильным;
 - небольшое значение гидравлического сопротивления газовому потоку, т.е. возможно большее значение свободного объема или сечения насадки;
 - возможности для работы аппарата в режиме высоких нагрузок по жидкости и газу; для этого насадка должна также иметь большие значения ε или s ;
 - малая плотность;
 - возможность равномерного распределения орошающей жидкости;
 - стойкость к агрессивным средам;
 - механическая прочность;
 - экономическая эффективность.
- Выбирая размеры насадки, необходимо учитывать, что при увеличении размеров ее элементов увеличивается допустимая скорость газа, а гидравлическое сопротивление насадочного абсорбера уменьшается. При проведении абсорбции в условиях повышенного давления предпочтительна малая по размерам насадка, так как в данном случае потеря напора в абсорбере составит незначительную долю от общего давления газовой смеси [5].

7.4. Основные гидродинамические режимы работы насадочных абсорберов

В зависимости от скорости подаваемого в насадочную колонну газа (при постоянном расходе жидкости) существует ряд гидродинамических режимов ее работы. Данные режимы продемонстрированы гидравлическим сопротивлением в виде зависимости $\ln \Delta p = f(\ln w)$ для орошаемой насадки (рис. 7.17).

I – Пленочный режим работы – такой режим, при котором происходит стекание жидкости по поверхности насадки в виде пленки. Данный режим наблюдается при низких плотностях орошения и низких скоростях газа. Режим заканчивается в точке А.

II – Подвисяние характеризуется увеличением сил трения газа о жидкость на поверхности соприкосновения фаз. При этом происходит нарушение послойного течения пленки, образуются завихрения и брызги, что способствует увеличению поверхности контакта и интенсивности массообмена. Жидкость заполняет свободный объем насадки и образует газожидкостную смесь. Таким образом, поверхность контакта фаз и коэффициенты массопередачи повышаются в значительной мере [5]. Окончание режима соответствует точке В. Эффективное функционирование насадочных колонн обеспечивается при режимах подвисяния и эмульгирования, близкого к режиму захлебывания, т.е.

такого режима, при котором вес находящейся на насадке жидкости становится равным силе трения газового потока о жидкость.

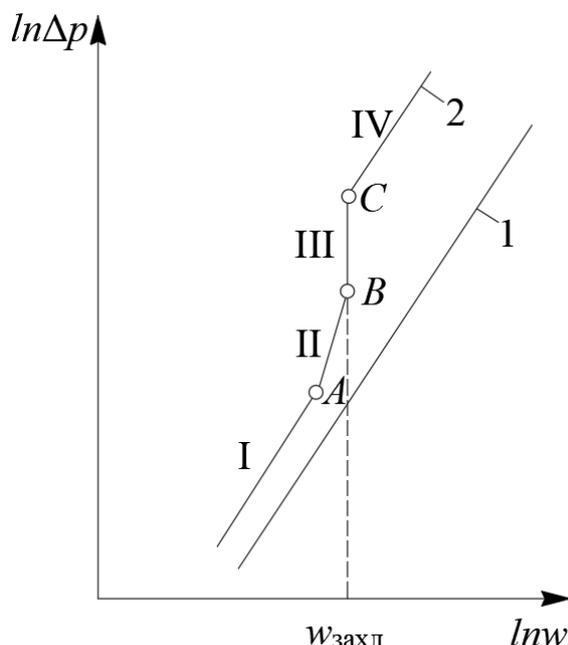


Рис. 7.17. Зависимость гидравлического сопротивления насадки от скорости газа в колонне: 1 – сухая насадка; 2 – орошаемая насадка; I – IV – гидродинамические режимы

III – Эмульгирование представляет собой накопление жидкости в свободном объеме насадки. Данный процесс длится до того момента, пока сила трения между стекающей жидкостью и поднимающимся по колонне газом не уравнивает силу тяжести жидкости, находящейся в насадке. Таким образом, наступает обращение (или инверсия) фаз (жидкость становится сплошной фазой, а газ – дисперсной). Последующее незначительное возрастание скорости газа способствует захлебыванию колонны [5].

Режим эмульгирования соответствует наибольшему значению эффективности насадочных колонн, в первую очередь из-за увеличения поверхности контакта фаз, определяемой не только геометрической поверхностью насадки, а суммой всех поверхностей пузырьков и струй газа в жидкости, заполняющей весь свободный объем насадки. Гидравлическое сопротивление колонны при рассматриваемом режиме резко повышается (отрезок BC). Данное явление обусловлено прекращением противоточного движения потоков и выносом жидкости из колонны. Оптимальный режим работы насадочного абсорбера соответствует таким скоростям газа, которые на 15–20% меньше скоростей, инициирующих захлебывание. Для колец Рашига ее можно принимать до 60–80%, для седлообразных насадок – до 60–85% [30].

Скорость газа, при которой наблюдается захлебывание $w_{захл}$, для колец Рашига, описывается уравнением, рекомендуемым А.Г. Касаткиным:

$$\lg \left(\frac{w_{закл}^2 \cdot \sigma}{g \cdot S_{св}^3} \cdot \frac{\rho_{г}}{\rho_{ж}} \cdot \mu_{ж}^{0,16} \right) = 0,076 - 1,75 \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_{г}}{\rho_{ж}} \right)^{0,125}, \quad (7.8)$$

где $S_{св}$ – свободное сечение насадки, m^2/m^2 ; σ – удельная поверхность насадки, m^2/m^3 ; L и G – массовые расходы жидкости и газа, kg/c ; $\rho_{г}$, $\rho_{ж}$ – плотность газа и жидкости, kg/m^3 ; $\mu = \mu_{ж}/\mu_{в}$ – отношение динамической вязкости жидкости к динамической вязкости воды.

Оптимальная скорость газа в колонне вычисляется по уравнению подобия:

$$Re = 0,045 Ar^{0,37} \left(\frac{G}{L} \right)^{0,45}; \quad (7.9)$$

$$Ar = \left(\frac{g \cdot d_{экр}^3 \cdot \rho_{г}}{\mu_{г}^2} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{ж} \cdot \rho_{г}}{\rho_{г}} \right). \quad (7.10)$$

Из уравнения (7.8) следует, что с повышением плотности орошения уменьшается предельная скорость газа. В точке инверсии фаз скорость газа уменьшается также с увеличением вязкости жидкости и снижением ее плотности. При одинаковых расходах газа и жидкости скорость газа, которая соответствует точке инверсии, выше для более крупной насадки [5].

IV – Унос жидкости газовым потоком. В эксплуатационной практике данный режим не используется.

В режимах подвисяния и эмульгирования следует работать в тех случаях, когда повышение гидравлического сопротивления несущественно (например, в процессах абсорбции, проводимых при повышенных давлениях). Для абсорберов, которые работают в условиях атмосферного давления, гидравлическое сопротивление может стать недопустимо большим, что может обусловить эксплуатацию в пленочном режиме [29].

Насадочные колонны имеют ряд недостатков. Они слабо пригодны для работы с загрязненными жидкостями; при малых количествах орошающей жидкости не достигается полной смачиваемости насадки. Кроме того, в насадочных колоннах крайне затруднен отвод теплоты, выделяющейся при поглощении газа.

Для обработки загрязненных жидкостей используются абсорберы с «плавающей» шаровой насадкой, изготовленной из легких полых или сплошных пластмассовых шаров. Данный тип насадок при определенной скорости газового потока переходит в псевдооживженное состояние. В подобных абсорберах наблюдаются более высокие скорости, чем в абсорберах с неподвижной насадкой. Увеличение скорости газового потока до 3–5 м/с способствует расширению слоя «плавающей» насадки, а это в конечном счете приводит к уменьшению скорости в слое насадки. Гидравлическое сопротивление слоя в данном случае этом увеличивается незначительно.

Эффективность работы абсорбера в определяющей степени характеризуется плотностью орошения и суммой всех поверхностей контактирующих фаз. Распыление жидкости в распылительных абсорберах

осуществляется за счет применения механических и пневматических форсунок или центробежными распылителями.

Определенные виды конструкции форсунок и распылителей, которые используются в распыливающих абсорберах, изображены на рис. 7.18 [29].

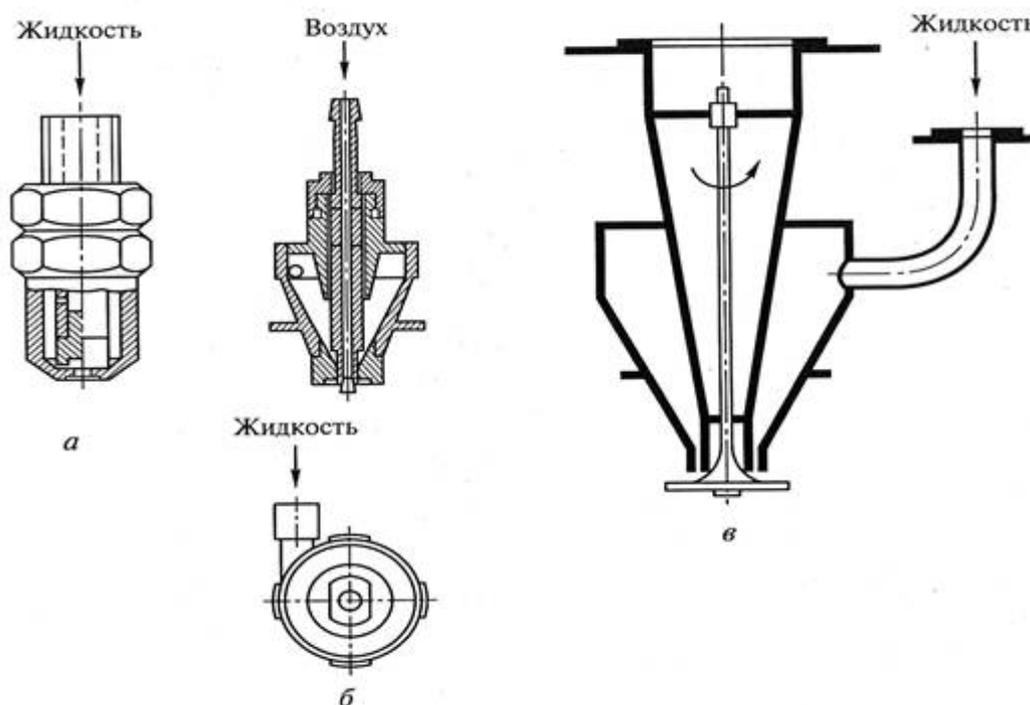


Рис. 7.18. Типы форсунок и распылителей, используемые в распылительных абсорберах: а – механическая форсунка; б – пневматическая форсунка; в – центробежный распылитель

Механические форсунки (рис. 7.18, а) осуществляют распыление жидкость при избыточном давлении 0,2–20,0 МПа и дают мелкий распыл (размер капель 50 мкм и менее). Однако они подвержены быстрому засорению и не предназначены для распыливания суспензий, загрязненных и вязких жидкостей.

Пневматические форсунки (рис. 7.18, б) работают под действием сжатого воздуха или пара под избыточным давлением до 0,5 МПа. Подходят исключительно для распыливания жидкостей с высокой вязкостью (например, масел). Расход воздуха составляет 0,3–0,75 м³/дм³ распыленной воды.

Центробежные распылители (рис. 7.18, в) конструктивно представляют собой турбинки или диски, вращающиеся с высокой частотой, на которые вблизи оси подается жидкость. Частота вращения дисков лежит в диапазоне 4000–50 000 об/мин. Диски, в отличие от форсунок, могут эксплуатироваться при работе с суспензиями и загрязненными жидкостями.

Положительными характеристиками распыливающих абсорберов являются их простая конструкция и эксплуатации, малая стоимость, низкие значения гидравлического сопротивления и возможность применения для абсорбции газов, которые загрязнены механическими примесями. К недостаткам следует отнести сложность при использовании загрязненных жидкостей в

качестве поглотителей, потребность в энергетических затратах на распыление жидкости и применение больших плотностей орошения, а также сложности в регулировке количества подаваемой жидкости [29].

7.5. Расчет насадочных абсорберов

Для очистки промышленных выбросов абсорбционным методом наибольшее распространение получили насадочные абсорберы, абсорберы с взвешенным слоем насадки и скрубберы Вентури.

Схема работы абсорбера изображена на рисунке 7.19 [36]. Очищаемая газовоздушная смесь поступает в нижнюю часть колонны (входной поток – G, Y_H), затем протекает сквозь слой насадки и удаляется через верхнее выпускное отверстие (выходной поток – G, Y_K). В течение всего технологического процесса насадка смачивается. Смачивающая жидкость поступает через верхнюю часть колонны (входной поток жидкости – L, X_H), отработанная жидкость выходит из нижней части колонны (выходной поток жидкости – L, X_K).

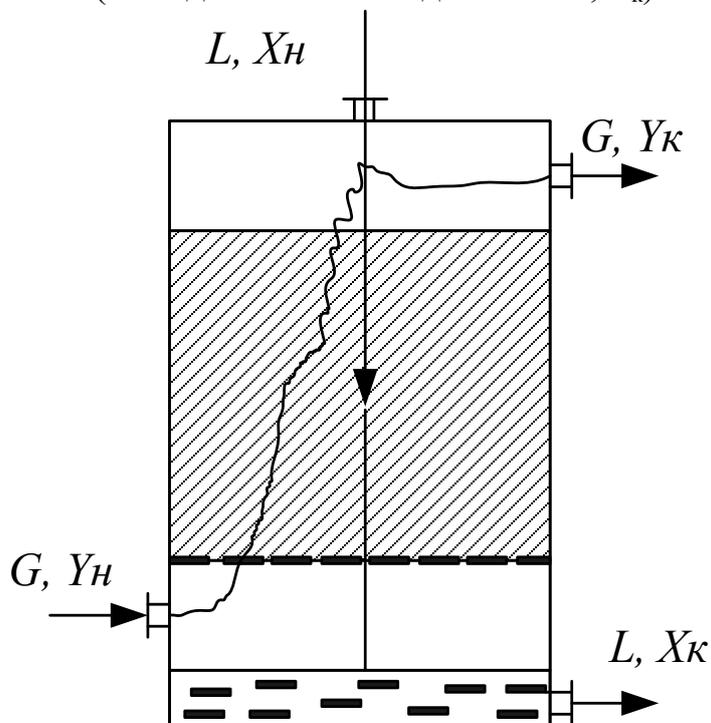


Рис. 7.19. Схема работы абсорбера [36]

Базовые габаритные размеры абсорбера (например, диаметр и высота) рассчитывают, имея информацию о заданных условиях работы (производительность, требуемая степень извлечения компонента и т. д.). Для расчета требуются сведения по статике и кинетике процесса. Данные по статике берут из справочных таблиц, рассчитывают при помощи термодинамических параметров или определяют при помощи постановки натурального эксперимента. Данные по кинетике в определяющей степени зависят от типа аппарата и режимных характеристик его работы. В определенных случаях необходимые данные отсутствуют, и приходится прибегать к расчету или опытам. Наиболее

надежны данные, полученные по результатам экспериментов, проведенных при идентичных условиях [37].

Целью расчета является определение основных размеров абсорбера, размеров внутренних устройств, материальных потоков, гидравлических сопротивлений.

Исходными данными для расчета абсорбера являются расход газа, его состав, начальная концентрация извлекаемого компонента в газовой фазе, вид абсорбента и его начальная концентрация. Кроме того, должна быть задана необходимая конечная концентрация извлекаемого компонента в газе.

Геометрические размеры колонного массообменного аппарата в большей степени зависят от поверхности массопередачи, которая требуется для протекания рассматриваемого процесса, и скоростями фаз.

Расчет диаметра колонны абсорбера начинается с выбора материала и типа насадки. Мелкая насадка имеет большую поверхность массообмена, но при очень большой удельной поверхности насадки, недостаточной плотности орошения или неудачной организации подачи жидкости может оказаться, что часть поверхности контакта останется не смоченной жидкостью, и эта поверхность практически выключается из процесса массопередачи. Это явление учитывается коэффициентом смачиваемости Ψ . Максимальное смачивание насадки ($\Psi = 1$) достигается при некоторой минимальной эффективной плотности орошения U_{min} , выше которой полная поверхность насадки считается смоченной. Для насадочных абсорберов ее находят по формуле [37]:

$$U_{min} = a \cdot \Gamma_{min} / \rho_{ж}, \quad (7.11)$$

где Γ_{min} — минимальная линейная плотность орошения, кг/(м·с);

$$\Gamma_{min} = 3,95 \cdot 10^{-8} \cdot \sigma^{3,6} \cdot \mu_{ж}^{0,49}, \quad (7.112)$$

σ — поверхностное натяжение, мН/м.

В случае последующего увеличения плотности орошения коэффициент смачиваемости будет постоянен и равен единице.

Минимальная плотность орошения ориентировочно определяется по зависимости $U_{мин} = q_{эф} \cdot a$, где $q_{эф}$ — коэффициент, зависящий от характера поглощаемого вещества, $q_{эф} = (0,08-0,12) \text{ м}^2/\text{ч}$, a — удельная поверхность насадки ($\text{м}^2/\text{м}^3$ или м^{-1}).

Для колец Рашига размером 75 мм и хордовых насадок более 50 мм $q_{эф} = 0,033 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, для остальных насадок $q_{эф} \cong 0,022 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$.

Насадочные абсорберы работают устойчиво при достаточно больших удельных расходах абсорбента ($l_0 = 5-15 \text{ л}/\text{м}^3$) и плотностях орошения насадки $U > 6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

Для обеспечения эффективного массообмена при относительно малом гидравлическом сопротивлении желательно, чтобы гидродинамический режим работы колонны был возможно ближе к режиму захлебывания, но не достигал его, т.е. рабочая скорость газа в колонне должна быть меньше, чем скорость захлебывания. Обычно принимают, что эти скорости связаны соотношением

$$w = (0,75 - 0,85)w_{\text{захл}} \quad (7.13)$$

Насадка занимает только часть объема колонны, поэтому скорость движения газа в каналах между элементами насадки выше, чем скорость, отнесенная к свободному сечению аппарата. Скорость движения газа в сухой насадке составляет $\omega_0 = \omega/\varepsilon$ [5].

Для конкретных условий абсорбции существует оптимальная приведенная (фиктивная) скорость газового потока, являющаяся функцией приведенных затрат на очистку. Ориентировочный выбор скорости можно сделать по данным табл.7.1. Значения коэффициентов A и B в зависимости от типа и размеров насадочного тела приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.1. Значения оптимальной скорости ($\omega_{\text{опт}}$) для различных насадок

Насадка	$\omega_{\text{опт}}$, м/с	
	Хорошо растворимый газ, $U = 15$ м/ч	Плохо растворимый газ, $l_0 = 10$ л/м ³
Кольца в укладку, мм:		
50	1,01	0,77
80	1,27	0,90
Кольца в навал, мм:		
25	0,40	0,36
50	0,63	0,52
Кольца Палля, мм:		
50	0,71	0,58
Седла, мм:		
20	0,46	0,40

Таблица 7.2. Значения коэффициентов A и B в зависимости от типа и размеров насадочного тела

Тип насадки	A	B
Трубчатая	$0,47 + 1,5lg \frac{d_{\text{экв}}}{0,025}$	1,75
Плоскопараллельная, хордовая	0	1,75
Пакетная	0,062	1,55
Кольца Рашига навалом	-0,073	1,75
Кольца Палля	-0,490	1,04
Седла размером 25 мм	-0,330	1,04
Седла размером 50 мм	-0,580	1,04

В инженерных расчетах приведенную скорость газа определяют по формуле

$$\lg\left(\frac{w_{\text{захл}}^2 \cdot \sigma}{g \cdot S_{\text{св}}^3} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot \mu_{\text{ж}}^{0,16}\right) = A - B \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}}\right)^{0,125} \quad (7.14)$$

а диаметр аппарата, м – по формуле

$$D = \sqrt{\frac{4V_{\text{сек}}}{\pi \cdot \omega_{\text{опт}}}}, \quad (7.15)$$

где $V_{\text{сек}}$ – секундный объемный расход газа, м³/с.

Нормальные ряды диаметров колонн, которые принимаются в химической и нефтеперерабатывающей промышленности России, м [38]:

- в химической промышленности – 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,2; 2,6; 3,0;
- в нефтеперерабатывающей промышленности – 1, 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0; 3,4; 3,6; 3,8; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,4; 7,0; 9,0.

По рассчитанному диаметру выбирается ближайший из выпускаемых $D_{\text{норм}}$ и уточняется значение скорости газа. Далее проверяется выполнение условия (7.13) и при необходимости уточняется диаметр колонны.

Определяется плотность орошения, м³/(м²·с):

$$U = \frac{L_{\text{ж}}}{0,785\rho_{\text{ж}} \cdot D_{\text{норм}}^2}. \quad (7.16)$$

Полученная величина сравнивается с минимально необходимой, и определяется коэффициент смачивания насадки Ψ . Если $\Psi \geq 1$ ($U > U_{\text{мин}}$), насадка полностью смочена. Коэффициент смачиваемости может быть также рассчитан по эмпирической зависимости:

$$\Psi = \frac{a_{\text{см}}}{a} = 1 - A \cdot e^{m_{\text{н}}}, \quad (7.17)$$

где A , $m_{\text{н}}$ – опытные коэффициенты; $A = 1,02$;

$$m_{\text{н}} = C \cdot \left(\frac{4 \cdot U \cdot \rho_{\text{ж}}}{a \cdot \mu_{\text{ж}}}\right) \quad (7.18)$$

C – опытный коэффициент; $C = 0,16$.

При расчете абсорбера с нелетучим жидким поглотителем массовые (или мольные) расходы поглотителя и инертного, не растворяющегося в жидкости газа будут постоянными по высоте абсорбера. Выразив концентрации поглощаемого компонента в газе и жидкости в относительных массовых (или мольных) единицах, имеем уравнение материального баланса (в массовых единицах):

$$M = G_y \cdot (\bar{Y}_{\text{н}} - \bar{Y}_{\text{к}}) = L \cdot (\bar{X}_{\text{к}} - \bar{X}_{\text{н}}), \quad (7.19)$$

где M – расход поглощаемого компонента, кг/с; G_y и L – расходы инертного газа и жидкого поглотителя, кг/с; Y_n, Y_k – концентрации поглощаемого компонента в газе внизу и наверху абсорбера, кг/кг инертного газа; X_k, X_n – концентрации поглощаемого компонента в жидкости наверху и внизу абсорбера, кг/кг жидкого поглотителя [37].

Удельный расход поглощаемого компонента составляет

$$m_n = \left(\frac{L}{G} \right) \min = \left(\frac{\rho_{ж} \cdot V_{ж}}{\rho_{г} \cdot V_{г}} \right). \quad (7.20)$$

Минимальный расход абсорбента равен

$$L_{\min} = m \cdot G. \quad (7.21)$$

Коэффициент избытка абсорбента $K_a = 1,1-1,3$, тогда

$$L = L_{\min} \cdot K_a. \quad (7.22)$$

Коэффициент массопередачи K_y (кг/(м²·с)) определяется по уравнению аддитивности фазовых диффузионных сопротивлений [5, 39]:

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{ж}} + \frac{m}{\beta_{г}}}, \quad (7.23)$$

где $\beta_{ж}$ и $\beta_{г}$ – коэффициенты массоотдачи соответственно в жидкой и газовой фазах, кг/(м²·с); m – коэффициент распределения килограмма жидкого поглотителя на килограмм газа. Для колонн с неупорядоченной насадкой коэффициент массоотдачи в газовой фазе $\beta_{г}$ рассчитывают из уравнения

$$Nu_{г} = 0,407 \cdot Re_{г}^{0,655} \cdot Pr_{г}^{0,3}, \quad (7.24)$$

где $Nu_{г} = \beta_{г} \cdot d_{эКВ} / D_{г}$ – диффузионный критерий Нуссельта газовой фазы; $D_{г}$ – коэффициент диффузии вещества в газовой фазе, м²/с; $Re_{г} = \omega_{г} \cdot d_{эКВ} \cdot \rho_{г} / (\varepsilon \cdot \mu_{г})$ – критерий Рейнольдса для газовой фазы в насадке; $Pr_{г} = \mu_{г} / (\rho_{г} \cdot D_{г})$ – диффузионный критерий Прандтля для газовой фазы.

Коэффициент диффузии вещества в газе $D_{г}$ определяют по уравнению

$$D_{г} = \frac{4,3 \cdot 10^{-8} \cdot T^{3/2}}{P(v_A^{1/3} + v_B^{1/3})} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}, \quad (7.25)$$

где M_A, M_B – молярные массы соответственно компонента A и инертного газа B , кг/моль; v_A, v_B – молярные объемы компонента A и инертного газа B в жидком состоянии при нормальной температуре кипения, см³/моль.

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе $\beta_{ж}$ определяется обобщенным уравнением, которое подходит для нерегулярных и упорядоченных насадок:

$$Nu_{ж} = 0,021 \cdot Re_{ж}^{0,75} \cdot Pr_{ж}^{0,5}, \quad (7.26)$$

$Nu_{ж} = \frac{\beta_{ж} \cdot \delta_{пр}}{D_{ж}}$ — диффузионный критерий Нуссельта для жидкой фазы.

Таким образом, $\beta_{ж}$ (в м/с) равен

$$\beta_{ж} = 0,021 \cdot \frac{D_{ж}}{\delta_{ж}} \cdot Re_{ж}^{0,75} \cdot Pr_{ж}^{0,5} . \quad (7.27)$$

Здесь:

$D_{ж}$ — коэффициент диффузии компонента A в жидком поглотителе, м²/с;

$\delta_{ж} = \left(\frac{\mu_{ж}^2 \cdot \rho_{ж}^2}{g} \right)^{1/3}$ — приведенная толщина стекающей пленки жидкости, м;

$Re_{ж} = \frac{4 \cdot U \cdot \rho_{ж}}{\alpha \cdot \mu_{ж}}$ — модифицированный критерий Рейнольдса для стекающей по насадке пленки жидкости;

$Pr_{ж} = \frac{\mu_{ж}}{\rho_{ж} \cdot D_{ж}}$ — диффузионный критерий Прандтля для жидкости.

Коэффициент диффузии определяется по уравнению

$$D_{ж} = 7,4 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{(\beta \cdot M)^{0,5} \cdot T}{\mu_{ж} \cdot v_A^{0,6}}, \quad (7.28)$$

где M — молярная масса вещества жидкого поглотителя, кг/кмоль; T — температура жидкости, К; $\mu_{ж}$ — вязкость жидкого поглотителя, мПа·с; v_A — молярный объем поглощаемого компонента A , см³/моль; β — эмпирический параметр, который учитывает ассоциацию молекул.

Величина поверхности массопереноса может быть определена из уравнения массопередачи:

$$F = \frac{M}{K_y \cdot \Delta Y_{ср}}, \quad (7.29)$$

где M — расход поглощаемого компонента (абсорбтива), кг/с; $M = G(Y_H - Y_K)$; K_y — коэффициент массопередачи; $\Delta Y_{ср}$ — движущая сила процесса абсорбции:

$$\Delta Y_{ср} = \frac{\Delta Y_H - \Delta Y_K}{\ln \left(\frac{\Delta Y_H}{\Delta Y_K} \right)} \quad (7.30)$$

где ΔY_H и ΔY_K — движущие силы процесса массопередачи на концах аппарата.

Высота насадки определяется по уравнению

$$H = \frac{F}{0,785 \cdot a \cdot D^2 \cdot \psi_a} . \quad (7.31)$$

Доля активной поверхности насадки ψ_a определяется по формуле

$$\psi_a = \frac{3600 \cdot U}{a \cdot (p + 3600 \cdot q \cdot U)}, \quad (7.32)$$

где p и q – коэффициенты, зависящие от типа насадки.

Общую высоту абсорбционной колонны вычисляют по уравнению

$$H_k = Z \cdot n + (n - 1) \cdot h_{\text{п}} + Z_{\text{в}} + Z_{\text{н}}, \quad (7.33)$$

где Z – высота насадки в одной секции, м; n – число секций; $h_{\text{п}}$ – высота промежутков между секциями насадки, в которых находятся распределители жидкости, м; $Z_{\text{в}}$ и $Z_{\text{н}}$ – соответственно высота сепарационного пространства над насадкой и расстояние между днищем колонны и насадкой, м.

Расстояние между днищем абсорбера и насадкой обусловлено требованием равномерного распределения газа по поперечному сечению колонны. Данное расстояние принимают равным $1-1,5d$. Расстояние от верха насадки до крышки абсорбера зависит от размеров распределительного устройства для орошения насадки и от высоты сепарационного пространства, в котором обычно находятся каплеотбойные устройства, предотвращающие брызгоунос из колонны. Значения $Z_{\text{в}}$ и $Z_{\text{н}}$ определяют по таблице 7.3. Обычно высота колонн не превышает 40–50 м.

Таблица 7.3. Основные соотношения линейных размеров рабочей части колонны

Диаметр колонны, мм	$Z_{\text{в}}$, мм	$Z_{\text{н}}$, мм
400–1000	600	1500
1200–2200	1000	2000
2400 и более	1400	2500

Далее рассчитывается гидравлическое сопротивление [5, 39]. Значение гидравлического сопротивления ΔP определяет мощность вентиляторов и энергозатраты на перемещение потока газа через абсорбер.

Между элементами насадки для движения газового потока возникают длинные узкие каналы сложной конфигурации, поэтому величину гидравлического сопротивления сухой насадки рассчитывают по известному уравнению гидравлики, в котором за длину канала принимается высота насадочного слоя. Значение диаметра канала определяют при помощи эквивалентного диаметра канала насадки.

Коэффициент сопротивления λ для насадки из колец навалом:

$$\lambda = \frac{16}{\text{Re}_r^{0,2}} \text{ при } \text{Re}_r > 40; \quad (7.34)$$

$$\lambda = \frac{140}{\text{Re}_r^{0,2}} \text{ при } \text{Re}_r < 40. \quad (7.35)$$

Коэффициент сопротивления беспорядочных насадок шарообразной и седлообразной формы определяется по уравнению

$$\lambda = \frac{133}{\text{Re}} + 2,34, \quad (7.36)$$

а коэффициент сопротивления регулярных насадок – по уравнению:

$$\lambda = \lambda_{\text{тр}} + \zeta \cdot \frac{d_{\text{экв}}}{l}, \quad (7.37)$$

где $\lambda_{\text{тр}}$ – коэффициент сопротивления трению; ζ – коэффициент местного сопротивления:

$$\zeta = \frac{4,2}{\varepsilon^2} - \frac{8,1}{\varepsilon} + 3,9. \quad (7.38)$$

Сопротивление орошаемой насадки про плотности орошения менее $50 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ приближенно можно найти по формуле

$$\Delta p = \Delta p_{\text{сух}} \cdot (1 + k \cdot U), \quad (7.39)$$

где k – опытный коэффициент (для нерегулярной насадки и хордовой насадки $k = 0.06$; для регулярных насадок $k = 0,04$).

Сопротивление смоченной насадки можно также определить по формуле

$$\Delta p = \Delta p_{\text{сух}} \cdot 10^{b \cdot U}, \quad (7.40)$$

где U – плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; b – коэффициент, приводимый в таблице 7.4.

Таблица 7.4. Значения коэффициента b для различных типов насадки

Насадка	b
Кольца Рашига в укладку, мм	
50	173
80	144
100	119
Кольца Рашига навалом, мм	
25	184
50	169
Кольца Палля	126
Блоки керамические	151
Седла Берля, мм	
25	30
Седла «Инталлокс», мм	
25	33
50	28

7.6. Расчет тарельчатых колонн

Суть расчета заключается в определении гидравлического сопротивления, диаметра колонны, числа тарелок, высоты абсорбера [40].

Выбрав тип тарелки (ситчатая или колпачковая), затем находят предельно допустимую скорость пара или газа. Для ее определения применяется уравнение Киршбаума [22]:

$$v_{\text{пр}} = 0,05 \cdot \sqrt{\rho_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{г}}} . \quad (7.41)$$

Скорость газа в свободном сечении колонны принимается равной $0,8-0,9 v_{\text{пр}}$.

Наименьшее значение расстояния между тарелками, которое обеспечивает требуемый гидравлический затвор, находят по соотношению (рис. 7.20)

$$h_{\text{т}} = h_{\text{д}} + h_{\text{з}} + h_{\text{о}} , \quad (7.42)$$

где $h_{\text{д}}$ – высота столба жидкости в сливном патрубке, требуемая для создания скорости жидкости, м; $h_{\text{з}}$ – высота столба жидкости в сливном патрубке (м), которая обеспечивает гидравлический затвор за счет перепада давления между тарелками.

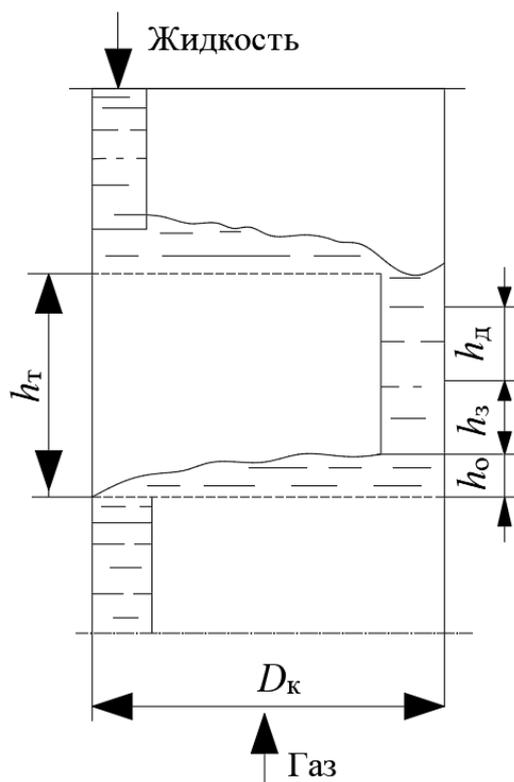


Рис. 7.20. К расчету минимального расстояния между тарелками

Из (7.42) следует условие

$$\Delta p \leq \rho_{\text{п}} \cdot h_{\text{з}} \cdot g , \quad (7.43)$$

где $\rho_{\text{п}}$ – плотность пены в сливном патрубке, принимаемая приближенно $0,5 \rho_{\text{ж}}$; $h_{\text{о}}$ – расстояние от тарелки до нижнего края сливного патрубка, м.

Высота столба жидкости в сливном патрубке равна

$$h_{\text{сп}} \frac{v_c^2}{2 \cdot g} \cdot (1 + \xi_1 + \xi_2), \quad (7.44)$$

где v_c – скорость жидкости в сливном патрубке, ее значения принимаются равным 0,02–0,06 м/с; ξ_1 – коэффициент сопротивления выхода; ξ_2 – коэффициент сопротивления сливного патрубка.

$$\xi_2 = \frac{\lambda \cdot l_c}{d_c}, \quad (7.45)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; l_c – рабочая длина сливного патрубка ($h_d + h_3$), м; d_c – диаметр сливного патрубка.

Сопротивление ситчатой тарелки (в Па) можно рассчитать по уравнению

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_0 + \Delta p_{\text{ж}}, \quad (7.46)$$

где Δp_c – сопротивление «сухой» тарелки; Δp_0 – перепад давления, необходимый для преодоления сил поверхностного натяжения; $\Delta p_{\text{ж}}$ – сопротивление столба жидкости на тарелке.

Величина Δp_0 рассчитывается по величине поверхностного натяжения жидкости:

$$\Delta p_0 = \frac{4 \cdot \sigma}{d_0}, \quad (7.47)$$

где σ – поверхностное натяжение на границе фаз, Н/м; d_0 – диаметр отверстия в тарелке, м.

Сопротивления Δp_c и $\Delta p_{\text{ж}}$ можно определить по уравнениям, рекомендуемым А.Н. Плановским [30]:

$$\Delta p_c = 1,83 \cdot \frac{v_0^2}{2} \cdot \rho_r; \quad (7.48)$$

$$\Delta p_{\text{ж}} = 1,3 \cdot h + \sqrt[3]{k \cdot \Delta h}, \quad (7.49)$$

где v_0 – скорость газового (парового) потока в отверстиях тарелки, м/с; $k = 0,5$ – отношение плотности пены на тарелке к плотности жидкости; h – высота сливного порога, м; Δh – высота слоя небарботируемой жидкости у сливного порога, м.

$$\Delta h = \sqrt{\frac{L \cdot b}{\varphi}}, \quad (7.50)$$

где L – массовый расход жидкости, кг/ч; φ – коэффициент расхода жидкости через сливную перегородку ($\varphi = 6400$ – 10000); b – ширина сливной перегородки, м.

Гидродинамические соотношения, которые определяют работу колонн с колпачковыми тарелками, соответствуют соотношениям для колонн со

ситчатыми тарелками. Гидравлическое сопротивление колпачковой тарелки определяется из следующего равенства:

$$\Delta p = \Delta p_{\kappa} + \Delta p_{\text{пр}} + \Delta p_{\text{ж}}, \quad (7.51)$$

где Δp_{κ} – потери давления газового (парового) потока при проходе через колпачок, Па; $\Delta p_{\text{пр}}$ – потери давления при проходе газа (пара) через прорези, Па; $\Delta p_{\text{ж}}$ – сопротивление столба жидкости на тарелке, Па.

Сопротивление колпачка Δp_{κ} определяется как сумма потерь давления на преодоление местных сопротивлений, возникающих из-за сужения газовой струи и ее поворота внутри колпачка. Наименьшие значения гидравлических сопротивлений чаще всего соответствуют равенству скоростей газового потока во всех сечениях колпачка:

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{\kappa}^2 - d_{\text{п}}^2), \quad (7.52)$$

где $d_{\text{п}}$ – диаметр патрубка, м; d_{κ} – диаметр колпачка, м.

Предпочтительными гидродинамическими характеристиками обладают колпачки, у которых диаметр равен 40–60 мм и площадь всех сечений паровых патрубков составляет 10–15% площади поперечного сечения колонны.

Сопротивление колпачка определяется по формуле

$$\Delta p = \sum \zeta \cdot \left(\frac{\rho \cdot v^2}{2} \right), \quad (7.53)$$

где v – скорость газа в патрубке, м/с; $\sum \zeta$ – сумма всех сопротивлений.

Сопротивление прорезей рассчитывается по уравнению

$$\Delta p_{\text{пр}} = \zeta_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{г}} \cdot v^2}{2} \right) + \Delta p_{\sigma}, \quad (7.54)$$

где $\zeta_{\text{пр}} = 1,5$ – коэффициент местного сопротивления при проходе газа через прорезь; $v_{\text{пр}}$ – скорость газа (пара) в прорези, м/с; Δp_{σ} – сопротивление, которое обуславливается силами поверхностного натяжения, Па.

Для ситчатой тарелки

$$\Delta p_{\text{пр}} = \frac{4 \cdot \sigma}{d_{\text{г}}}, \quad (7.55)$$

где $d_{\text{г}}$ – гидравлический диаметр открытого отверстия прорези.

Сопротивление столба жидкости на колпачковой тарелке также определяется по уравнению (7.55).

Высоту тарельчатых абсорберов можно определить, имея данные о количестве тарелок и расстоянии между тарелками:

$$H = h_{\text{т}} \cdot n + h_{\text{в}} \quad (7.56)$$

где h_T – расстояние между тарелками, м; n – число тарелок; h_B – расстояние от верхней тарелки до крышки абсорбера, м.

Число ступеней изменения концентрации (число тарелок) определяется итерацией с использованием уравнений массопередачи. Коэффициенты массопередачи высчитывают по уравнениям, приведенным выше.

Коэффициенты массоотдачи в газовой фазе в тарельчатых колоннах рассчитывают по уравнениям, которые были сформулированы Г. П. Саламахой:

– для колпачковых тарелок

$$Nu_{гк} = 0,265 \cdot Re_{г} \cdot Pr_{г}^{0,5} \cdot We^{-0,32}; \quad (7.57)$$

– для ситчатых тарелок с переливными устройствами:

$$Nu_{гс} = 2,5 \cdot Re_{г}^{0,72} \cdot Pr_{г}^{0,5} \cdot We^{-0,25} \quad (7.58)$$

– для ситчатых провальных тарелок:

$$Nu_{гсп} = 2,5 \cdot Re_{г}^{0,72} \cdot Pr_{г}^{0,5} \cdot We^{-0,25} \cdot Nu_{гсп} \quad (7.59)$$

где We – критерий Вебера,

$$We = \frac{\sigma}{\rho_{ж} \cdot g \cdot h_{ст}}, \quad (7.60)$$

σ – поверхностное натяжение, Н/м; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; $h_{ст}$ – высота статического слоя жидкости на тарелке, м.

Линейным размером в критериях $Nu_{г}$ и $Re_{г}$ является капиллярная константа x , которая определяется по формуле

$$x = \sqrt{\sigma \cdot \rho_{ж} \cdot g}. \quad (7.61)$$

Для определения коэффициента массоотдачи в жидкой фазе применяется следующее уравнение:

$$Nu_{ж} = 1,53 \cdot Re_{ж}^{0,35} \cdot Pr_{г}^{0,45} \quad (7.62)$$

В рассмотренном уравнении в критерий $Re_{ж}$ подставляется скорость газа (пара) в свободном сечении колонны.

7.7. Особенности расчета абсорберов с псевдооживленной насадкой

При выборе абсорбера с взвешенной насадкой величина линейной скорости газа принимается в диапазоне 2,0–4,5 м/с. Значение рабочей скорости газового потока для шаровой насадки находится в пределах между величинами минимальной ($\omega_{мин}$) и максимальной ($\omega_{макс}$) скоростями псевдооживления:

$$\omega_{мин} = \omega_{крит} - \frac{\omega_{крит} \cdot U^{0,9}}{(37,5 + U^{0,9})}, \quad (7.63)$$

где $\omega_{крит}$ – критическая скорость псевдооживления сухой насадки, м/с;

$$\omega_{\max} = 2,9 \cdot F_{\text{св}} \cdot \left(\frac{U}{V_{\Gamma}} \right)^{-0,15}, \quad (7.64)$$

где V_{Γ} – удельный объемный расход газовой фазы, $\text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Величина критической скорости определяется из выражения для критерия Re :

$$Re_{\text{кр}} = \frac{Ar}{(1400 \cdot 5,22 \cdot \sqrt{Ar})}, \quad (7.65)$$

где $Re_{\text{кр}} = (\omega_{\text{кр}} \cdot d_{\text{ш}} \cdot \rho_{\Gamma}) / \mu_{\Gamma}$; $d_{\text{ш}}$ – диаметр шара, м;

$$Ar = d_{\text{ш}}^3 \cdot (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\Gamma}) \cdot \rho_{\Gamma} \cdot \frac{g}{\mu_{\Gamma}^2}. \quad (7.66)$$

Плотность орошения абсорбера определяют из материального баланса процесса и с учетом растворимости загрязняющего вещества. Для абсорбции хорошо растворимых и среднерастворимых загрязняющих веществ плотность орошения составляет $10\text{--}25 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Для плохо растворимых веществ – чем выше значение U , тем интенсивнее проходит процесс очистки. В то же время U не должно превышать $100 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Динамическая высота слоя кольцевой насадки $H_{\text{дин}}$, мм может быть рассчитана по эмпирической зависимости:

$$H_{\text{дин}} = 1,95 \cdot \omega^{1,7} \cdot U^{0,6} \cdot H_{\text{ст}}^{0,52}. \quad (7.67)$$

Данная зависимость справедлива для доли свободного сечения аппарата $F_{\text{св}} = 50\%$.

Динамическая высота (м) слоя шаровой насадки может быть рассчитана по эмпирической зависимости

$$H_{\text{дин}} = 0,172 \cdot \omega^{0,88} \cdot U^{0,23} \cdot H_{\text{ст}}^{0,23} \cdot F_{\text{св}}^{-0,15}, \quad (7.68)$$

где для переменных приняты следующие единицы измерения: U – м/ч; ω – м/с; $H_{\text{ст}}$ – м.

Расстояние между ступенями (решетками) $H_{\text{ст}}$ принимается равным высоте $H_{\text{дин}}$, рассчитанной при $\omega = \omega_{\text{макс}}$. В качестве насадочного материала в абсорберах с псевдооживленной насадкой часто используют шаровую насадку из пористой резины диаметром $d_{\text{ш}} = 0,04$ м, плотностью 650 кг/м^3 . Статическая высота слоя насадки $H_{\text{ст}}$ составляет $0,2$ м при диаметре абсорбера не более 2 м и $0,3\text{--}0,4$ м при диаметре абсорбера более 2 м.

Для расчета объемных коэффициентов массоотдачи для одной ступени в абсорберах с шаровой насадкой рекомендуются следующие уравнения (для кислых, среднерастворимых в воде загрязняющих веществ):

$$\beta_{\Gamma} = 1,45 \cdot F^{-0,5} \cdot \omega^{1,05} \cdot U^{0,15} \cdot H_{\text{ст}}^{-0,77}; \quad (7.69)$$

$$\beta_{\text{ж}} = 1,45 \cdot \omega^{1,35} \cdot U^{0,75} \cdot H_{\text{ст}}^{-0,85} \cdot d_{\text{ш}}^{-0,15}, \quad (7.70)$$

где приняты следующие единицы измерения: ω – м/с; U – м/ч; $d_{\text{ш}}$, $H_{\text{ст}}$ – м; β – ч⁻¹.

Гидравлическое сопротивление орошаемого абсорбера (Па) рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{\text{ор}} = \Delta P_{\text{сух}} + 32,1 \cdot F^{-1,03} \cdot H_{\text{ст}}^{0,6} \cdot U^{0,56} \cdot \omega^{0,83}, \quad (7.71)$$

где F – доля живого сечения опорной решетки.

Сопротивление сухого абсорбера $\Delta P_{\text{сух}}$ рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{\text{сух}} = \Delta P_0 + g \cdot H_{\text{ст}} \cdot \rho_{\text{ш}} \cdot (1 - \varepsilon), \quad (7.72)$$

где $\rho_{\text{ш}}$ – плотность материала насадки, кг/м³. Здесь как и ранее, $H_{\text{ст}}$ выражается в м, U – в м/ч, ω – в м/с.

Общее гидравлическое сопротивление (Па) определяется с учетом числа решеток n :

$$\Delta P_{\text{общ}} = n \cdot \Delta P_{\text{ор}}. \quad (7.73)$$

7.8. Расчет пленочных абсорберов

Жидкость в абсорбере благодаря распределительному устройству распределяется по насадке и тем самым омывает листы (трубы) [40]. В зависимости от относительной скорости движения пленки и газа пленки стекают вниз или под действием захватываемого газового потока устремляются по направлению вверх. При повышении относительной скорости движения пленки и газа увеличиваются коэффициент массоотдачи и поверхность контакта фаз ввиду турбулизации пограничного слоя и образования вихрей.

Для трубчатых аппаратов предельную скорость газа (скорость захлебывания) v_3 определяют по следующему уравнению:

$$\lg \left[v_3 \cdot \rho_{\text{г}} / (g \cdot d_{\text{экв}} \cdot \rho_{\text{ж}}) \right] \mu_{\text{ж}}^{0,16} = A - 1,75 \left(\frac{L_{\text{ж}}}{G_{\text{г}}} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{г}}} \right)^{1/8}; \quad (7.74)$$

в этом уравнении

$$A = 0,47 + 1,51 \lg(d_{\text{экв}}/0,025). \quad (7.75)$$

По принятой величине скорости газа в трубах находят суммарную площадь их поперечного сечения:

$$S = \frac{G_{\text{г}}}{v_{\text{г}}}. \quad (7.76)$$

Задаваясь внутренним диаметром d труб (в пределах 0,02–0,05 м), определяют их число:

$$n = \frac{S}{0,785 \cdot d^2}. \quad (7.77)$$

Принимая шаг труб $t = (1,25-1,5)d_n$, где d_n – наружный диаметр труб, определяют диаметр абсорбера:

$$D = t \cdot (b - 1) + 4 \cdot d_n, \quad (7.78)$$

где $b = (2a_1 - 1)$ – число труб, размещенных на диагонали наибольшего шестиугольника при шахматном расположении труб; a_1 – число труб на стороне наибольшего шестиугольника.

Высота труб в трубчатом абсорбере равна

$$H = \frac{F_{\text{тр}}}{(n \cdot \pi \cdot d)}, \quad (7.79)$$

где $F_{\text{тр}}$ – внутренняя поверхность всех труб.

Средняя скорость стекающей пленки составляет

$$v_{\text{ср}} = \sqrt[3]{\frac{gL_{\text{уж}}^2}{3\rho_{\text{ж}}\mu_{\text{ж}}}}, \quad (7.80)$$

где $L_{\text{уж}}$ – удельная плотность орошения жидкостью периметра слива, кг/(м·с); $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; $\mu_{\text{ж}}$ – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Скорость движения жидкости у поверхности пленки равна

$$v_{\text{п}} = 1,5v_{\text{ср}}. \quad (7.81)$$

толщина пленки составляет

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot L_{\text{ж}} \cdot \mu_{\text{ж}}}{g \cdot \rho_{\text{ж}}^2}}. \quad (7.82)$$

Режим движения пленки характеризуется критерием Рейнольдса:

$$\text{Re} = v_{\text{ср}} \cdot d_{\text{экр}} \cdot \rho_{\text{ж}} / \mu_{\text{ж}}, \quad (7.83)$$

где $d_{\text{экр}}$ – эквивалентный диаметр пленки, м,

$$d_{\text{экр}} = \frac{4\delta \cdot \Pi}{\Pi} = 4\delta, \quad (7.84)$$

Π – периметр поверхности, по которой стекает жидкость, м.

Гидравлическое сопротивление рассчитывают по уравнению Дарси – Вейсбаха:

$$\Delta p = \lambda \frac{H}{d_{\text{экр}}} \cdot \frac{\rho_{\text{г}} \cdot v_{\text{отн}}^2}{2}, \quad (7.85)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; H – высота поверхности, по которой стекает пленка, м; $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр канала, по которому движется газ, м; $v_{\text{отн}}$ – относительная скорость газа, $v_{\text{отн}} = v + v_{\text{ср}}$, м/с; $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость течения пленки, м/с; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³.

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется величинами критериев Рейнольдса для газа и пленки и рассчитывается по уравнениям:

– при $Re_{\text{г}} < Re_{\text{г.кр}}$.

$$\lambda = \left[0,11 + 0,9(v \cdot \mu_{\text{г}} / \sigma)^{2/3} \right] / Re_{\text{г}}^{0,16}, \quad \lambda = 86 / Re_{\text{г}}; \quad (7.86)$$

– при $Re_{\text{г}} > Re_{\text{г.кр}}$.

$$\lambda = \left[0,11 + 0,9(v_{\text{ж} \times \text{ср}} \cdot \mu_{\text{ж}} / \sigma)^{2/3} \right] / Re_{\text{г}}^{0,16}, \quad (7.87)$$

где $Re_{\text{г}} = v_{\text{отн}} \cdot d_{\text{экв}} \cdot \rho_{\text{г}} / \mu_{\text{г}}$ – критерий Рейнольдса для газа; σ – поверхностное натяжение жидкости.

$Re_{\text{г.кр}}$ – критическое значение критерия Рейнольдса с учетом влияния на режимы движения газового потока скорости движения и физических свойств жидкой пленки; значение $Re_{\text{г.кр}}$ определяется зависимостью

$$Re_{\text{г.кр}} = \left[\frac{86}{0,11 + 0,9(v \cdot \mu_{\text{г}} / \sigma)^{2/3}} \right]^{1,19}. \quad (7.88)$$

Для определения коэффициента массоотдачи в газовой фазе для пленочных абсорберов предложена критериальная зависимость:

$$Nu = 0,023 Re_{\text{г}}^{0,8} Pr_{\text{г}}^{0,43}, \quad (7.89)$$

где $Re_{\text{г}}$ – критерий Рейнольдса для газового потока; $Pr_{\text{г}}$ – критерий Прандтля для газа. В качестве определяющего размера в этом уравнении используется эквивалентный диаметр канала, в котором движется газовый поток. В критерий $Re_{\text{г}}$ подставляется средняя скорость движения газового потока относительно пленки.

Для определения коэффициента массоотдачи в жидкой фазе для пленочных колонн используется уравнение

$$Nu_{\text{дж}} = 0,069 Re_{\text{ж}}^{0,35} \cdot Pr_{\text{дж}}^{0,5} \cdot Ga^{0,167} (h/d_{\text{экв}}) \quad (7.90)$$

где $Re_{\text{ж}}$ – критерий Рейнольдса для жидкой пленки; $Pr_{\text{дж}}$ – критерий Прандтля для жидкости; Ga – критерий Галилея; h – высота рабочей части аппарата, м; $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр пленки, м.

В критерий $Re_{\text{ж}}$ вводится средняя скорость стекания пленки.

8. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

8.1. Хемосорбция

Хемосорбция (химическая сорбция) – процесс поглощения жидкостью или твёрдым телом веществ из окружающей среды, сопровождающийся образованием химических соединений. В более узком смысле хемосорбцию рассматривают как химическое поглощение вещества поверхностью твёрдого тела, т.е. как химическую адсорбцию. Полностью разграничить адсорбцию и хемосорбцию нельзя. Обычно эти два процесса протекают совместно. Хемосорбция играет большую роль в гетерогенном катализе, очистке газов, вакуумной технике и др.

При хемосорбции выделяется значительное количество тепла: обычно теплоты хемосорбции лежат в пределах 84–126 кДж/моль (20–30 ккал/моль), а в некоторых случаях, например, при хемосорбции кислорода на металлах, могут превышать 420 кДж/моль (100 ккал/моль). Подобно химическим реакциям, хемосорбция требует, как правило, значительной энергии активации. Поэтому при повышении температуры хемосорбция ускоряется (так называемая активированная адсорбция).

Хемосорбция избирательна, т.е. зависит от химического средства адсорбируемого вещества к поверхности твёрдого тела.

Хемосорбция сопровождается химическими реакциями, например, $O_2 + 2Cu = 2CuO$, при этом адсорбируемый компонент связывается в жидкой фазе в виде химического соединения.

При необратимой реакции равновесное давление компонента над раствором мало, и возможно полное его поглощение. При обратимой реакции над раствором образуется значительное давление компонента, хотя и меньшее, чем при физической адсорбции [8].

Если вновь образующиеся при хемосорбции молекулы диффундируют в глубину вещества адсорбента, то достижение сорбционного равновесия наступает медленнее, так как оно зависит от скорости диффузии. Если же при хемосорбции на поверхности сорбента возникают недиффундирующие молекулы, т.е. образуется плёнка, то она тормозит и со временем останавливает процесс хемосорбции. Так, пластинка алюминия, сорбируя кислород, покрывается плёнкой из оксида алюминия, что быстро прекращает процесс хемосорбции: $4Al + 3O_2 = 2Al_2O_3$.

Для изучения процесса хемосорбции применяют физические методы: спектроскопию, электронный парамагнитный и ядерный магнитный резонанс, электронный и ионный проекторы, дифракцию медленных электронов и др.

8.2. Термокаталитическая очистка газовых выбросов

Термоокисление газообразных загрязнителей происходит как в объеме, так и на границе раздела фаз (на поверхности). Процесс в газовой фазе (в объеме) производится при непосредственной огневой обработке (сжиганием в пламени)

газовых выбросов при температурах выше температуры воспламенения горючих компонентов выбросов. Процесс окисления на границе раздела фаз проводят благодаря применению катализаторов – конденсированных веществ, которые за счет активности поверхностных частиц могут ускорять процесс окисления того или иного загрязнителя при температурах ниже температуры воспламенения. Каталитические способы очистки газов основаны на гетерогенном катализе и превращают примеси в безвредные или легко удаляемые из газа соединения. Процессы гетерогенного катализа протекают на поверхности твердых тел – катализаторов. Катализаторы должны обладать определенными свойствами: активностью, пористой структурой, стойкостью к ядам, механической прочностью, селективностью, стойкостью к высоким температурам, низким гидравлическим сопротивлениям, низкую стоимость.

Физико-химические основы термокаталитического окисления органических загрязнителей являются сложными и на сегодняшний день мало изучены. Инженеры и исследователи имеют представление об отдельных стадиях процесса и их последовательности: диффузия молекул загрязнителя и окислителя к поверхности катализатора и их сорбция протекают перед активацией исходных молекул на поверхности; активированные молекулы испытывают определенные изменения, превращаясь в радикалы, вступая в реакции и образуя новые соединения; последние переходят на поверхности из возбужденных состояний в стабильные, тем самым выбрасывая лишнюю энергию поверхностным частицам, после чего могут удалиться в газовую фазу, десорбируя с поверхности катализатора.

Практических методов расчета стадий термокаталитического окисления в совокупности или по отдельности нет, и аппараты обезвреживания для каждого вида выбросов проектируются предметно на основе экспериментальных данных [40].

8.3. Термические методы очистки газов

Данные методы используют способность горючих токсичных вредностей окисляться в присутствии свободного кислорода при высокой температуре до менее токсичных. Термические методы применяются для обезвреживания газов от легко окисляемых токсичных, а также дурнопахнущих примесей. Они эффективны при высоких концентрациях вредностей, содержащих органические соединения, но не содержащих серу, фосфор и галогены (последние при сжигании образуют соединения более токсичные, чем исходный выброс).

Их преимуществами являются простота применяемой аппаратуры и универсальность их использования. Однако следует выделить следующие недостатки: дополнительный расход топлива при сжигании низкоконцентрированных горючих газов, а также потребность в доочистке газов в адсорберах или абсорберах после сжигания.

На практике используют следующие схемы термической нейтрализации: прямое сжигание в пламени, термическое окисление и каталитическое сжигание. Первые две нашли применение при температуре 600–800°C, каталитическое сжигание – при 250–450°C [14]. Прямое сжигание экономически целесообразно,

если вклад теплоты сгорания отходящих газов составляет не менее 50 % суммарной теплоты процесса. В целях обеспечения безопасности концентрация горючих компонентов в смеси не должна превышать 25 % нижнего предела взрываемости. При выборе способа термической очистки и проектировании оборудования для его осуществления следует иметь в виду, что при длительном пребывании некоторых компонентов при высокой температуре пламени (до 1200–1300°C) в среде с избытком кислорода возможно образование загрязняющих веществ другого типа. Прямое сжигание углеводородов, которые имеют в своем составе токсичные газы (например, цианистый водород), может быть осуществлено непосредственно в факеле, т.е. в открытой горелке, ориентированной вертикально. Факельное сжигание применяется для горючих отходов, плохо поддающимся другим видам обработки [26].

Сжигание вредных примесей в закрытых камерах с открытым пламенем предполагает выполнение следующих основных требований: высокая турбулентности газового потока; время пребывания потока в камере сгорания в пределах 0,2–0,7 с. Турбулентный режим движения потока – необходимое условие для эффективного перемешивания горючих смесей с кислородом, минимальное время пребывания в камере необходимо для полного сгорания горючих компонентов. Эффективность таких систем высока и достигает 99%, если время пребывания вредностей в высокотемпературной зоне (в зависимости от вида вредностей 500–750°C) не менее 0,5 с. На практике камерные дожигатели с открытым пламенем применяются при дожигании газов для удаления органических отходов от лакокрасочных цехов.

На рис. 8.1 представлена установка очистки газовых выбросов лакокрасочного производства. Конструктивно она состоит из циклонной топки, которая смонтирована с газовой горелкой и камерой разбавления газов после их очистки. Воздух, который имеет в своем составе токсические примеси органических веществ, подается в вихревую двухзонную горелку 2 по каналу 6 прямо во внутреннюю полость печи 4 по тангенциальным каналам 5. Природный газ поступает в горелку по трубе 3. Период пребывания в полости не менее 0,5 с, и их контактирование с раскаленными стенками камеры способствует их полному сгоранию. Вход атмосферного воздуха осуществляется по центральной трубе 1 горелки только при обесвреживании выбросов, содержащих менее 15 % кислорода. Включение установки, осуществление вывода на рабочий режим и его поддержание производят с помощью блока автоматического управления и регулирования установки [42].

Термическое окисление осуществляется при наличии у отходящих газов высокой температуры и отсутствия достаточного количества кислорода или при малой концентрации горючих примесей, которая не обеспечит подвод тепла. При проектировании аппаратов для термического окисления следует также обеспечивать высокую турбулентность потока и минимальное время пребывания газа в камере. Рабочие температуры зависят от типа горючих примесей. Так, при окислении углеводородов рациональный интервал температур составляет 500–760°C, при окислении оксида углерода – 680–800°C, при устранении запаха посредством окисления – 480–680°C.

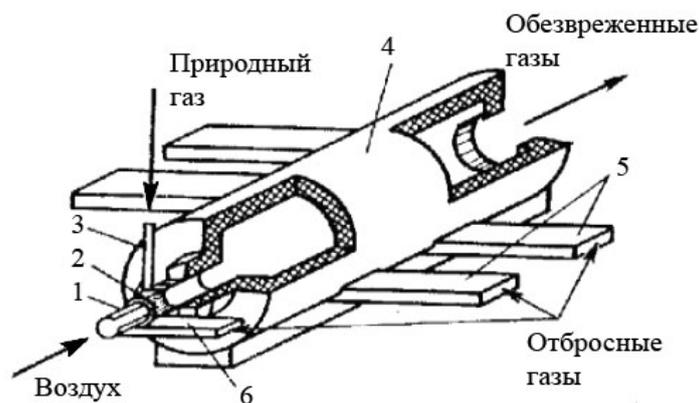


Рис. 8.1. Установка очистки газообразных выбросов:
 1 – подача атмосферного воздуха; 2 – вихревая горелка;
 3 – подача природного газа; 4 – корпус горелки;
 5, 6 – каналы для подачи загрязненного газа

При высоких температурах отходящих газов дожигание происходит в камере с подмешиванием свежего воздуха. [14].

При недостаточной для протекания процесса окисления температуре отходящих газов их поток подогревают в теплообменнике, после чего подают сквозь рабочую зону, в которой сжигают природный и иные высококалорийные газы. При этом горючие компоненты отходящих газов доводят до температур, превышающих точки их самовоспламенения, и они сгорают под действием кислорода, который находится в составе потока загрязненного газа. В случае недостатка кислорода его вводят в поток отходящих газов при помощи воздуходувки или вентилятора [17].

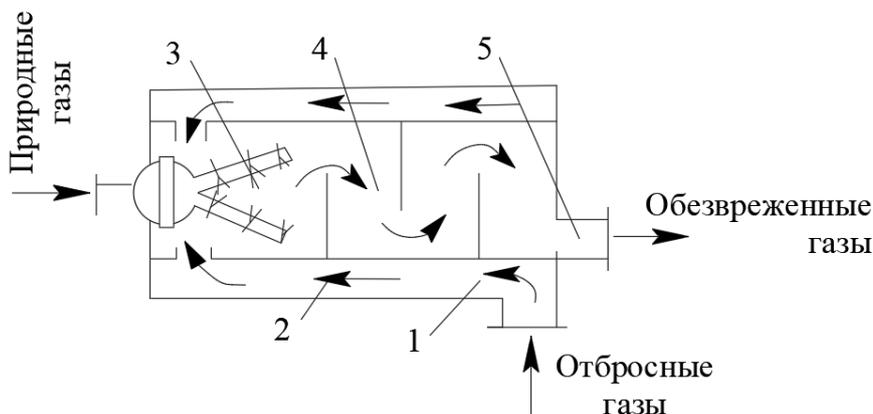


Рис. 8.2. Установка для огневого обезвреживания технологических и вентиляционных выбросов

Наиболее простое устройство, которое применяется для обезвреживания при помощи огня технологических и вентиляционных низкотемпературных выбросов, изображено на рис. 8.2. Загрязненный отходящий газ через входной патрубок и полость теплообменника-подогревателя 2 подается в *V*-образную полость коллектора горелки 3. В таком случае горючие компоненты отходящих газов доводят до требуемой температуры и сжигают в кислороде,

присутствующем в потоке загрязненного газа. Догорание ведется в камере смешения 4, где хвостовая часть факела контактирует с обезвреживаемыми выбросами. Перегородки камеры турбулизируют поток. Вывод газов из патрубка 5 осуществляется выбросом в атмосферу или путем пропуска через дополнительный теплообменник для рекуперации теплоты горячих газов [9].

Расчетную часть процессов термического окисления производят для определения количества дополнительного газообразного топлива, которое требуется для получения необходимой температуры обрабатываемых отходящих газов; объема газообразных продуктов сгорания и объема камеры сгорания.

Объемный расход дополнительного газообразного топлива зависит от количества теплоты, которое необходимо для увеличения температуры обрабатываемого газа от начальной до температуры сгорания (ориентировочно определяют из значений энтальпий для воздуха) и теплотворной способности топлива природного газа.

Суммарный расход газообразных продуктов в устройстве для дожигания вычисляется путем суммирования объемного расхода продуктов сгорания, который определяется по стехиометрии реакции окисления и объемного расхода обрабатываемого газа. Данная величина определяет диаметр сопла горелки. Оптимальная скорость газа, проходящего через сопло горелки, обеспечивающая наиболее эффективное перемешивание продуктов сгорания и загрязненного газа, варьируется в пределах 4,5–7,5 м/с.

Диаметр камеры сгорания определяют в целях обеспечения необходимого времени пребывания и интенсивности турбулентности. Для устройств термического окисления рациональное время пребывания газа в камере сгорания составляет 0,3–0,9 с [43].

8.4. Каталитический метод очистки газов

Каталитический метод применяют для превращения токсичных компонентов промышленных выбросов в вещества безвредные или в меньшей степени вредные для окружающей среды введением в систему дополнительных веществ – катализаторов. Каталитические методы базируются на взаимодействии удаляемых веществ с одним из компонентов, находящихся в очищаемом газе, или со специально добавленным в смесь веществом. Данный процесс проводят при температурах 300–400°С и высоких объемных скоростях газа (500–3000 ч⁻¹). Взаимодействие катализатора с одним из реагирующих соединений ведет к образованию промежуточного вещества, распадающегося с образованием продукта регенерированного катализатора [17, 43].

Каталитическое окисление преимущественно отличается от термического кратковременностью протекания процесса, что позволяет в разы сократить габаритные размеры реактора. Каталитические методы газоочистки обычно применяют для глубокой очистки технологических газов. Особенность процессов каталитической очистки газов состоит в их протекании при малых концентрациях удаляемых примесей.

Одним из главных достоинств рассматриваемого метода является то, что он дает высокую степень очистки, а недостатком – образование новых веществ, которые необходимо удалять из газа методом адсорбции или абсорбции. Термокатализ неприемлем для обработки газов (паров) высокомолекулярных и высококипящих соединений, которые, плохо испаряясь с катализатора, коксуются и загрязняют его, т.е. заполняют активную поверхность сажевыми продуктами неполного окисления [5].

Суть способа – вступление в реакцию различных веществ в присутствии катализатора. Для очистки газов в промышленности в качестве катализаторов преимущественно применяют металлы или оксиды металлов. Наиболее предпочтительные катализаторы разрабатываются на основе благородных металлов (платина, палладий). Активные катализаторы состоят из оксидов кобальта, хрома, железа, марганца, никеля и др. Но им свойственна меньшая активность, чем катализаторам из благородных металлов, а также низкая стойкость к термическим и химическим воздействиям. Рассмотренные вещества в процессе газоочистки наносятся на поверхность носителя катализатора, имеющего развитую поверхность, или на металлические материалы (нихромовую проволоку, сетку, ленту из легированной стали, титана, анодированного алюминия и т.п.) помещенного внутри аппарата-реактора [6]. Внешний слой катализатора не должен быть поврежден. В противном случае газоочистка не осуществляется в полном объеме, и концентрации вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу, превышают допустимые показатели. Процесс каталитической газоочистки проводят, как правило, в реакторе с неподвижным слоем катализатора. Для большинства катализаторов во избежание их забивки и дезактивации содержание инертных твердых примесей в газе не должно превышать $1,5 \text{ мг/м}^3$.

Примером использования каталитических методов газоочистки является окисление кислородсодержащих органических соединений (спиртов, эфиров) до CO_2 и H_2O , с применением O_2 .

8.5. Методы конденсации и компримирования

Методы конденсации и компримирования применяются для улавливания паров летучих растворителей, однако область их применения ограничена.

При этих способах смесь растворителя с воздухом охлаждается при атмосферном или повышенном давлении. Легкокипящий летучий компонент конденсируется и удаляется из смеси. Данные методы находят ограниченное применение из-за возможности образования взрывоопасных концентраций смесей, низкой эффективности очистки, высокого расхода электроэнергии и хладагента. Метод конденсации является эффективным в случае содержания паров растворителя в подвергнутом очищению потоке более 100 г/м^3 , метод компримирования, кроме того, сложен в аппаратурном оформлении, поскольку требует повышения давления смеси.

9. ДЕЗОДОРАЦИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ

Дезодорацией называется процесс химической, термической или иной деструкции дурнопахнущих веществ, которые имеются в испарениях. При этом концентрация дурнопахнущих веществ, как правило, оказывается значительно ниже их предельно допустимых значений. Так как концентрация дурнопахнущих веществ в рабочем объеме мала, расход дефектанта на их поглощение также оказывается невелик. При отсутствии возможности осуществления полной деструкции применяется маскировка на различных объектах городской инфраструктуры (производственных помещениях, жилых домах, систем отведения сточных вод и канализации и т.д.). Неприятные запахи удаляются системами вентиляции, озонированием воздуха, распылением дезодоранта, своевременной физической и химической обработкой отходов и нечистот.

Маскировка запаха является одним из способов дезодорации, подразумевающим использование различных аэрозолей и веществ, маскирующих запах. При этом необходимо проводить контроль концентрации веществ, до предельно допустимой концентрации.

Полное устранение неприятных запахов включают в себя комплекс мер, которые определяют источник неприятного запаха и впоследствии его удаляют. В случае невозможности удаления источника запаха (например, резервуары сточных вод), дурнопахнущие вещества отводятся в системы очистки используя приточно-вытяжные системы вентиляции [37].

9.1. Способы дезодорации воздушных потоков в системах жизнеобеспечения

На сегодняшний день для очистки газовых выбросов применяют разнообразные химические, физикомеханические, физикохимические и биологические способы, в определенной степени заменяющих и взаимодополняющих друг друга. Самые распространенные среди них перечислены ниже.

Адсорбционные методы. Самыми распространенными типами адсорбентов являются активированный уголь, силикагель, алюмогель, цеолиты. Активированный уголь может быть непропитанным либо импигрированным химикатами, в основном NaOH или KOH. Практика газоочистки демонстрирует, что непропитанный активированный уголь, который имеет более высокую способность к поглощению сероводорода, обладает пониженной способностью к поглощению органических загрязнений. Альтернативой является использование каталитического каменного активированного угля. Принципиальной особенностью этого угля является то, что после стадии традиционной первичной адсорбции он стимулирует реакцию окисления до серной кислоты (не до элементарной серы). Эта способность каталитического активированного угля является главной, так как серная кислота, в отличие от элементарной серы, хорошо адсорбируется и растворяется в воде. Таким образом, каталитический активированный уголь, истощенный в процессе

удаления сероводорода, может быть промыт водой, и его способности удалять сероводород восстановятся. Современная адсорбционная технология очистки популярна для малых и средних расходов выбросов.

Биологическая очистка. Во многих случаях основным методом биологической очистки воздуха от дурнопахнущих веществ является биохимическая деструкция органических и неорганических загрязняющих веществ микроорганизмами с образованием безвредных и не обладающих запахом веществ. Базовым устройством для биологической очистки газовых выбросов является биофильтр, который заполняется одним из природных носителей (торф, кора, компост). Применение биофильтров на капитальных очистных сооружениях нуждается в больших площадях, так как промежуток времени пребывания газов в фильтре составляет 30–40 сек. Эксплуатация биофильтров затруднена ввиду сурового климата большей части регионов России.

Абсорбционная очистка. Применяется для поглощения дурнопахнущих веществ жидким абсорбентом. Абсорбентами выступают растворы гипохлоритов (например, натрия). Данный метод осуществляется в безотходном замкнутом процессе. Принимая во внимание малую концентрацию дурнопахнущих веществ в рабочем объеме, расход дефектанта на их поглощение оказывается несущественен.

Хемосорбционная очистка. Сорбенты, которые используются для очистки воздуха от вредных газов в системах жизнеобеспечения, представляют собой твердые гранулированные или дробленые тела. В изолирующих системах для очистки газодыхательной смеси используют только хемосорбенты.

Ультрафиолетовая обработка. Используется в случае необходимости в стерилизации воздуха и воды. Ряд исследований показал, что ультрафиолет приемлем к использованию для нейтрализации дурнопахнущих веществ.

Кроме вышеперечисленных способов очистки, следует отметить такие способы, как озонирование, термический, термокаталитический, плазменный, газофазный, электрофильтрационный и прочие. Каждый из них имеет положительные и отрицательные характеристики, поэтому наилучший эффект может достигаться в комплексном использовании ряда методов, выбранных с учетом эксплуатационных, конструктивных и иных особенностей объекта, а также видов дурнопахнущих веществ, уровнем их концентрации и объемов подвергаемого очистке воздуха [37].

9.2. Особенности применения абсорбционных методов газоочистки для дезодорации газозвоздушных смесей

Газовоздушная смесь при мокром улавливании проявляет эффективность очистки от частиц размером не менее 3–5 микрон. Более мелкие частицы улавливаются гораздо хуже из-за следующих причин [32, 37]:

1. Мельчайшие частицы, перемещаясь в потоке газозвоздушной смеси, огибают поверхность жидкости, не соприкасаясь с ней.

2. В области мокрой поверхности существует газовый пограничный слой, для преодоления который у мельчайшей частицы недостаточно энергии.

3. Наличие гидрофобных частиц (не смачиваются жидкостью), что обуславливает необходимость дополнительной кинетической энергии, которая позволит преодолеть им силы поверхностного натяжения.

При необходимости очистки от гидрофобных частиц для улучшения их смачиваемости в жидкость вводятся специальные поверхностно-активные вещества. Однако при применении данного способа сточные воды, образующиеся при мокрой очистке, загрязнялись органическими веществами. На сегодняшний день данный способ очистки не соответствует установленным экологическим требованиям.

Мокрая очистка газозвудушных смесей является эффективной, если увлажнение и охлаждение очищаемой газозвудушной смеси допустимы, в то время как твердые частицы, выделяемые из смеси, не имеют особой значимости. Охлаждение очищаемой газозвудушной смеси до температуры, которая ниже температуры конденсации паров жидкости, содержащихся в этом газе, в определенной степени повышает массу частиц, служащих своего рода центрами конденсации, что в значительно облегчает их улавливание. Кроме того, водяные пары могут конденсироваться на поверхности аппарата в виде холодных капель. В таком случае возникает движение молекул пара, которое способствует перемещению частиц пыли к каплям. Мокрая очистка зачастую применяется для выделения из газа частиц, имеющих большую ценность.

9.3. Перспективные разработки систем дезодорации газовых смесей

Специалистами «Ленгипроинжпроект» совместно с учеными НИУ ИТМО были проведены мероприятия по проектированию, изготовлению и установке на предприятии по очистке сточных вод города Сочи системы очистки воздуха от вредных и дурнопахнущих веществ [37]. Базовым принципом работы этой системы является способ очистки газозвудушной смеси с помощью многоуровневой системы очистки.

В предпроектный период выполнена инвентаризация газовых выбросов, определены источники, выделения загрязняющих веществ, их характер (организованные или неорганизованные), исследован их газовый состав.

Как показал химический анализ, основными загрязняющими веществами явились: метан; аммиак; смесь природных меркаптанов; сероводород; диоксид серы; фенол; формальдегид; диоксид азота; углеводороды предельные $C_1 - C_5$ без метана; углеводороды предельные $C_6 - C_{10}$; масло минеральное нефтяное.

Обнаружены основные загрязненные вентиляционные газовые выбросы, подлежащие обработке методом дезодорации. Для преобразования неорганизованных выбросов в организованные в проекте газоочистки были предусмотрены мероприятия по локализации и отведению газовых выбросов в систему газоочистки. Для этого была предусмотрена герметизация сооружений и подводящих каналов, а из пространства между поверхностью сточных вод и перекрытием – принудительный отбор газовых выбросов на газоочистку.

Выделяющиеся от оборудования и сооружений вентиляционные газовые выбросы по вытяжным воздуховодам подаются на газоочистку.

Для снижения концентрации загрязнений в газовых выбросах очистных сооружений служит система газоочистки. Принимая во внимание расположение основных источников загрязнений, система газоочистки разделена на четыре газоочистных модуля. Состав модулей определен, исходя из газовой нагрузки ($\text{м}^3/\text{час}$), состава и концентрации загрязнений. Сбор и транспортировка газозвушной смеси на очистку осуществляется системой вытяжной вентиляции. Система вентиляции обеспечивает пятикратный в час воздухообмен в помещениях сооружений на предприятии и подачу отводимого воздуха на газоочистку.

Исходя из вышеперечисленного, концентрация загрязнений, поступающих на газоочистку, определяется по формуле

$$C_3 = \frac{MB_3}{5 \cdot (V_{\text{пов}} / 3600)}, \text{ г/м}^3, \quad (9.1)$$

где C_3 – концентрация вредных и дурнопахнущих веществ, г/м^3 ; MB_3 – мгновенные выделения загрязнений, г/сек ; 5 – кратность вентиляции, час^{-1} ; $V_{\text{пов}}$ – объем помещения, м^3 .

При компоновке газозвушных выбросов от разных источников концентрация загрязнений, поступающих на газоочистку, определяется по формуле

$$C_3 = \frac{\sum_{i=1}^n MB_{3i}}{\sum_{i=1}^n V_i}, \text{ г/м}^3, \quad (9.2)$$

где C_3 – концентрация загрязнений, г/м^3 ; MB_{3i} – мгновенные выделения загрязнений, г/сек ; V_i – объем газозвушной смеси, поступающей от каждого источника, $\text{м}^3/\text{сек}$.

На указанном объекте имеются два основных типа источников загрязнений, нуждающиеся в очистке: первый тип – выделения от объектов биологической очистки (насосной станции, помещение решеток, отделение песколовков, первичные горизонтальные отстойники, цех обработки осадка, илоуплотнители, бункер обезвоженного осадка); второй тип – выделения от установок сушки осадка.

Выделения от объектов биологической очистки очищаются на трех однотипных газоочистных модулях различной производительности (рис. 9.1).

Выделения от установок сушки осадка подвергаются очистке на газоочистном модуле № 4. Очистка газозвушной смеси в газоочистных модулях № 1–3 основывается на принципе растворения в щелочном орошающем растворе и окислении гипохлоритом натрия аммиака, формальдегида, фенола, окислов азота и серы, сероводорода и меркаптанов.

Ввиду необходимости уменьшения концентрации загрязнений до наинизшего возможного уровня процесс поглощения разделен на два последовательных этапа.

Первый этап очистки необходим для наибольшего снижения концентрации загрязнений. Его производят в газоочистных колоннах (насадочных скрубберах) на основании поглощения и окисления загрязнений в смешанном растворе гипохлорита натрия и кальцинированной соды. В непрерывно циркулирующей смеси растворов поддерживаются концентрации гипохлорита натрия 0,1–0,2 г/л и кальцинированной соды 0,1–0,2 г/л. Раствор состоит из технической воды, гипохлорита натрия, который получают методом электролиза и раствора кальцинированной соды. Раствор кальцинированной соды приготавливается из технической воды и кальцинированной соды.

Циркулирующий раствор с определенной периодичностью сбрасывается в приемный коллектор очистных сооружений. Необходимость в замене раствора возникает при превышении концентрации хлоридов до 5 г/л.

С целью повышения поверхности контакта колонны снабжаются насадками из волокнисто-пористого полиэтилена и системой каплеулавливания для уменьшения уноса раствора из колонны.

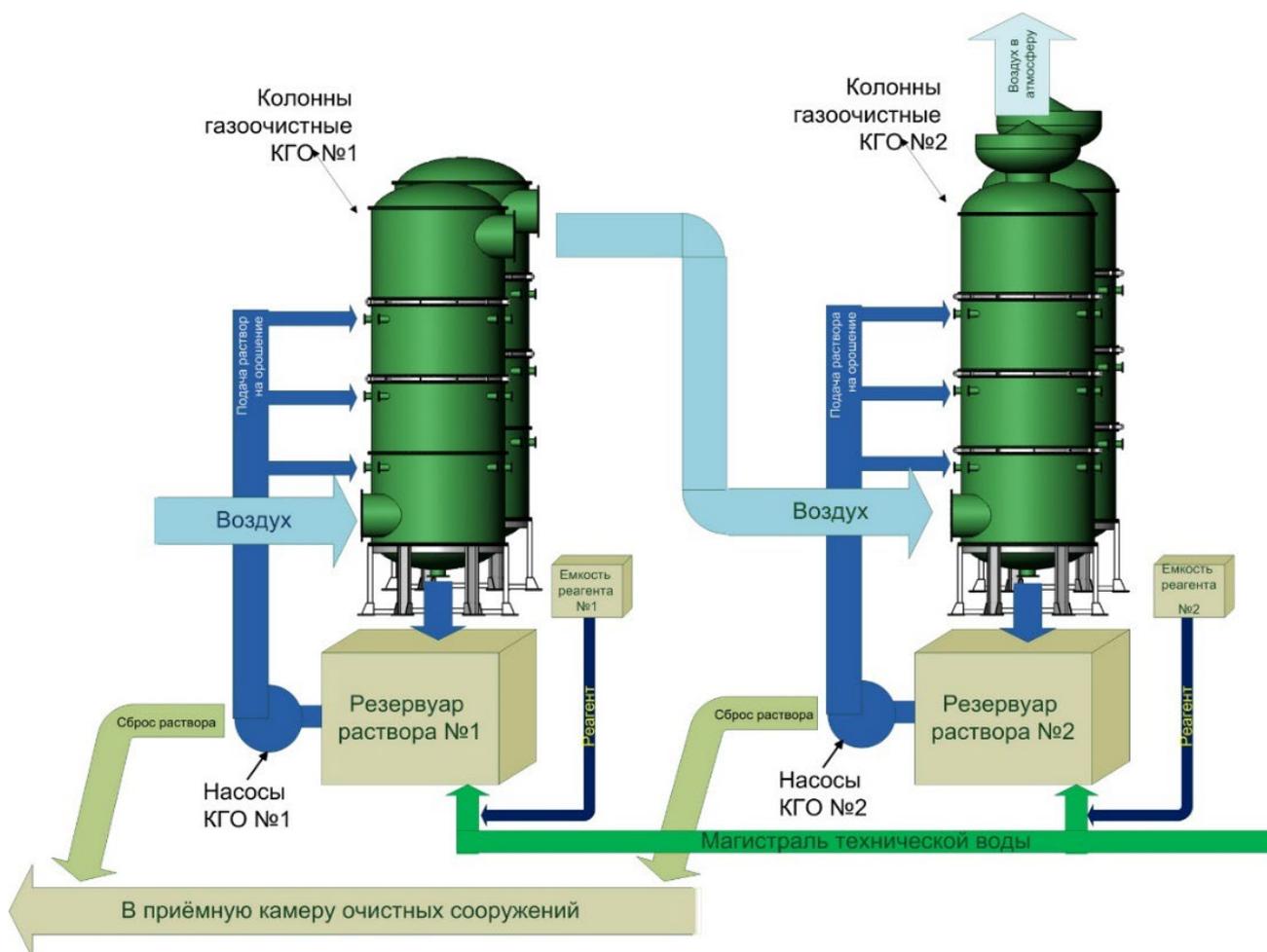


Рис. 9.1. Блок-схема газоочистных модулей 1–3

Модуль газоочистки № 4 является трехступенчатым. Первая ступень очистки выбросов от установок сушки осадка базируется на охлаждении газо-воздушной смеси, улавливании пыли и остальных загрязнений проточной технической водой в мокром скруббере при низких скоростях газового потока. Последнее обуславливает высокую степень очистки.

Отработанная техническая вода с взвешенными и растворёнными загрязнениями подается в приёмный коллектор очистных сооружений. Очищенная газо-воздушная смесь поступает на доочистку на вторую и третью газоочистные колонны модуля.

Вторая и третья колонны модуля являются насадочными. Орошение и доочистка воздуха во второй колонне осуществляется раствором гипохлорита натрия. Орошение и доочистка воздуха в третьей колонне производится смесью растворов гипохлорита натрия и кальцинированной соды. Процесс получения, применения и сброса растворов осуществляется аналогично модулям 1–3.

Кроме газоочистных колонн, каждый из газоочистных модулей включает:

- вентиляционное оборудование, обеспечивающее ток воздуха;
- емкости и резервуары для приготовления и хранения реагентов и растворов;
- насосное оборудование, обеспечивающее приготовление растворов, их подачу на колонны и сброс в приёмный коллектор очистных сооружений;
- воздухопроводы и трубопроводы с запорной и регулирующей арматурой.

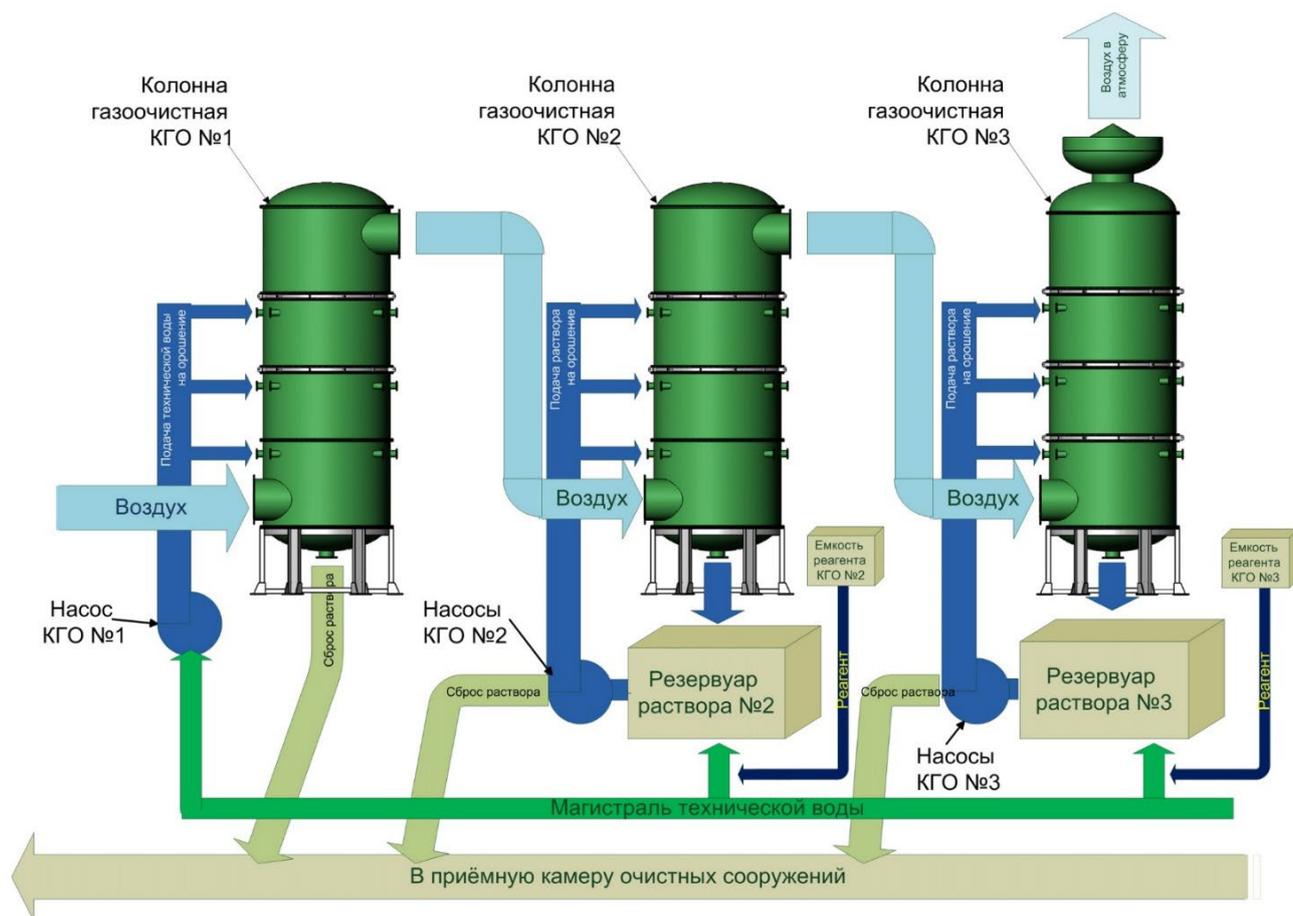


Рис. 9.2. Блок-схема газоочистного модуля № 4

Количество параллельно работающих ниток колонн обуславливается требуемым расходом воздуха и допустимой скоростью движения воздуха в колоннах, а количество и оборудование колонн в одной нитке – требованиями качества и технологией очистки.

Емкости реагента, резервуары растворов и насосное оборудование обеспечивают параллельно функционирующие колонны разных ниток.

Описанные системы показали высокую эффективность очистки воздуха по аммиаку и метилмеркаптану, которая составила 100%, и по формальдегиду – 20–80%. Содержание фенола, хлора, озона не превышало предельно допустимой концентрации этих веществ в рабочей зоне. Помимо этого, примененная пористая насадка из полимерных материалов позволила на 30% сократить вес насадки, ее стоимость, а также расходы на обустройство фундаментов под колонны.

10. ВЕНТИЛЯТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ГАЗООЧИСТКИ

10.1. Типы вентиляторов

Вентилятор – приводимое двигателем устройство для создания потока воздуха или пылегазовых смесей. Вентиляторы используются в системах кондиционирования, вентиляции, обогрева, пневмотранспорта, с их помощью организуется движение воздушных потоков в котлах, охлаждаются радиаторы двигателей внутреннего сгорания, создается тяга в пылесосах, системах охлаждения и сушки.

Для эффективной работы в среде сильно запыленного воздуха вентилятор должен иметь специальную конструкцию. Наиболее распространены центробежные (радиальные) вентиляторы.

Центробежный (или радиальный) вентилятор имеет расположенное в спиральном корпусе рабочее колесо, при вращении которого газ, поступающий через входное отверстие, попадает в каналы между лопатками, под действием возникающей центробежной силы перемещается в спиральный кожух и направляется в выпускное отверстие. Направление потока газов при этом изменяется на 90°.

Лопатки центробежных вентиляторов могут быть трех типов: радиальные (прямые), загнутые вперед и загнутые назад. Соответственно различаются и технические характеристики вентиляторов и, как следствие, их назначение:

- вентиляторы с радиальными лопатками часто применяются для перемещения запыленных газозвудушных сред.
- вентиляторы с загнутыми назад лопатками могут работать на более высоких скоростях вращения.
- вентиляторы с лопатками, загнутыми вперед, обеспечивают большую (по сравнению с другими типами) производительность и давление.

Принято разделять вентиляторы по следующим показателям:

- по величине создаваемого при перемещении воздуха полного давления:
 - вентиляторы низкого давления (до 1 кПа);
 - вентиляторы среднего давления (до 3 кПа);
 - вентиляторы высокого давления (до 12 кПа). Для создания более высоких давлений вместо вентиляторов используют воздуходувки и компрессоры;
 - коррозионностойкие – для агрессивных сред;
 - термостойкие – для воздуха с температурой 80÷200°С;
 - взрывобезопасные и искрозащищенные – для взрывоопасных сред;
 - пылевые – для запыленного воздуха (содержащего твердые примеси в количестве более 100 мг/м³).
- по месту установки:
 - обычные, устанавливаемые на специальной опоре (раме, фундаменте и т.д.);
 - канальные, устанавливаемые непосредственно в воздуховоде;
 - крышные, размещаемые на кровле.

Согласно ГОСТ 5976–90, радиальные вентиляторы (кроме канальных) выпускаются в семи исполнениях (рис. 10.1).

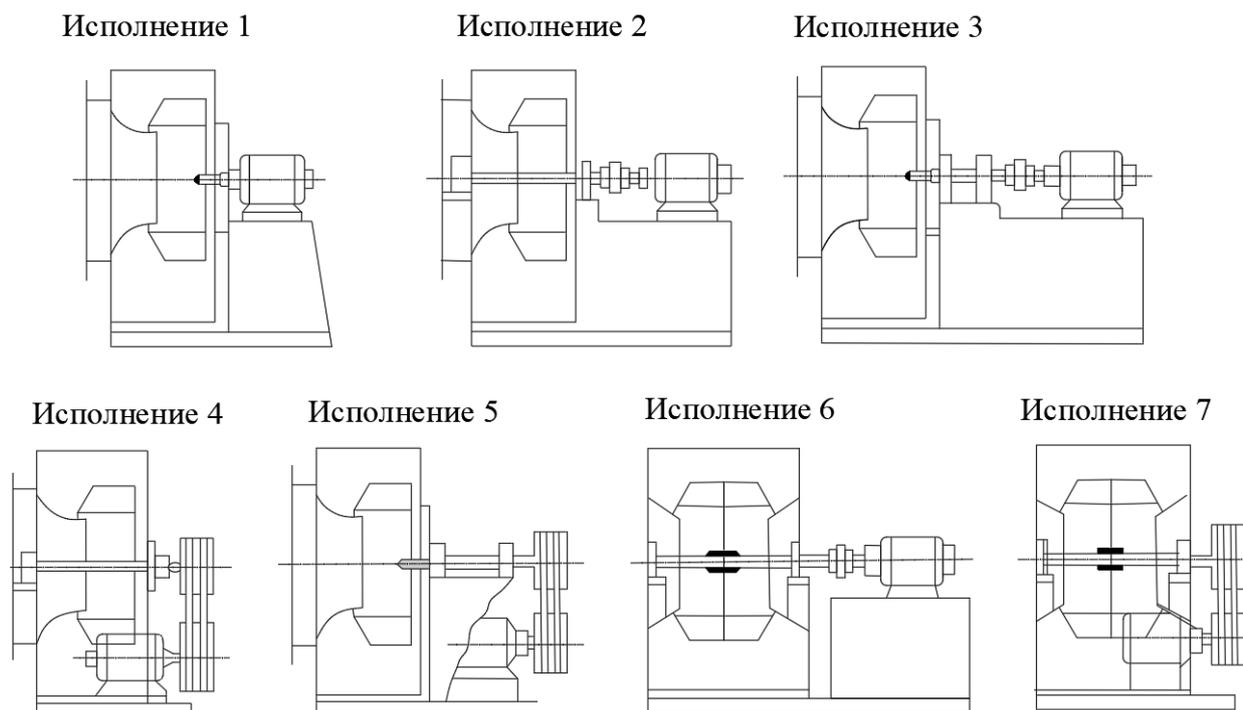


Рис. 10.1. Конструктивное исполнение центробежных вентиляторов

Наиболее распространены (в порядке убывания):

- исполнение 1 (рабочее колесо монтируется непосредственно на валу электродвигателя). Достоинства: минимум деталей, работы по сборке, компактность. Недостатки: рабочие колеса вентиляторов больших номеров (8 и выше) имеют достаточно большую массу, воздействующую на подшипники электродвигателя. Для профилактики двигателя нужно полностью разобрать (а затем вновь собрать) вентилятор;
- исполнение 5 (рабочее колесо расположено консольно на валу промежуточной опоры, привод – клиноременная передача). Такая конструкция широко распространена для привода пылевых вентиляторов, вентиляторов высокого давления, а также вентиляторов больших номеров (8 и выше). Достоинства: подшипники электродвигателя воспринимают меньшую радиальную нагрузку, возможность обеспечения работы двигателя в номинальном режиме подбором диаметров шкивов. Недостатки: увеличенные габариты и масса, повышенная трудоемкость обслуживания и стоимость.
- исполнение 3 (рабочее колесо расположено консольно на валу промежуточной опоры, передача через муфту). Применяется в основном для привода вентиляторов, работающих в специфических условиях (повышенные температуры, агрессивная среда и т.д.). Преимущества: радиальные нагрузки на двигатель не передаются, возможна организация защиты подшипников промежуточной опоры от воздействия перемещаемой

среды (температура, влажность, агрессивность). Недостатки примерно те же, что и в исполнении 5, однако узлов меньше (нет натяжного устройства, ремней, ограждения проще).

Радиальные пылевые вентиляторы (рис. 10.2) относятся к классу оборудования специального назначения. Они используются для перекачивания и транспортировки неагрессивных воздушных смесей с плотностью загрязнения не выше, чем 1 кг/м^3 .



Рис. 10.2. Общий вид пылевого вентилятора

Такие вентиляторы не предназначены для работы с липкими и волокнистыми материалами. Они могут использоваться в температурном диапазоне от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ и успешно применяются в системах аспирации и пневмотранспортировки пылегазовых смесей. Промышленностью выпускаются вентиляторы, предназначенные также для перекачивания взрывоопасных газов и воздушно-газовых смесей высокой температуры.

Пылевой центробежный вентилятор состоит из корпуса типа «спираль» или «улитка», который может производиться из различных марок стали, в зависимости от назначения и условий применения: оцинкованной, углеродистой, или легированной. В конструкции корпуса имеются заборный и выпускной патрубки, двигатель и рабочее колесо, изготовленное в соответствии назначением этого устройства.

Существует два варианта его крепления: либо вентилятор располагается непосредственно на валу электродвигателя, либо электродвигатель приводит в движение крыльчатку через муфту или посредством ременной передачи.

Быстроходность рабочих колес некоторых моделей позволяет развивать окружную скорость до 30 м/с .

Для того чтобы твердые частицы не задерживались между корпусом устройства и рабочим колесом, между ними оставляется сравнительно большой

зазор, поэтому такие устройства имеют коэффициент полезного действия меньший, чем у вентиляторов общего назначения.

Отечественной промышленностью серийно выпускается всего три вида пылевых вентиляторов:

- ВЦП7-40 – имеет колесо, выполненное в бездисковом исполнении, с шестью лопастями. Для уменьшения уровня создаваемого им шума лопасти колеса загнуты вперед. Некоторые конструктивные особенности этого аппарата позволяют собирать его как для правого, так и для левого вращения. Данные вентиляторы могут использоваться в системах кондиционирования воздуха, вентиляции и для других производственных целей, в частности, для работы в системах пылеочистных установок, пневмотранспорта, для удаления древесной пыли и стружки от деревообрабатывающих станков, металлической пыли от металлообрабатывающих станков, транспортирования зерна и его отходов, хлопка, шерсти и т. п.;
- ВЦП6-46 – имеет рабочее колесо, которое состоит из диска, с прикрепленными к нему шестью загнутыми назад лопастями. Вследствие некоторых конструктивных особенностей этот тип пылевого оборудования не может работать на больших скоростях, поэтому считается аппаратом низкого давления. Вентиляторы типа ВЦП 6-46 используются в системах пылеочистных установок, в системах пневматического транспорта, для удаления древесной пыли и стружки от деревообрабатывающих станков, для удаления металлической пыли и стружки от металлообрабатывающих станков, для других санитарно-производственных целей;
- ВЦП6-45 – конструктивно ничем не отличается от предыдущей модели, но имеет 8 радиальных лопаток. Сферы применения – удаление древесных стружек и опилок; системы пневмотранспорта зерна и при производстве круп; системы отбора запыленного воздуха при производстве цемента и железобетонных конструкций; другие производственные и санитарно-технические цели.

Для особых условий эксплуатации производят лопасти рабочего колеса из износостойких и антикоррозийных материалов, среди которых наиболее часто используемые – титан и его сплавы, винипласт, нержавеющая сталь. Аппарат с пластмассовым рабочим колесом имеет более высокие, чем у нержавеющей стали, показатели антикоррозийности, но по прочности им значительно уступает. При удалении абразивных частиц, особенно в агрессивных средах, следует выбирать вентилятор с лопастями исключительно из износостойчивых и твердых сплавов.

10.2. Подбор вентилятора по аэродинамическим характеристикам

Для любого типа вентиляционной системы, аспирационной или пневмотранспортной установки ведут подбор вентилятора в индивидуальном порядке, при этом обращаясь к графикам аэродинамических характеристик определенного количества вентиляторов [44]. По давлению и расходу воздуха на каждом графике находится рабочая точка, которая определяет КПД и частоту

вращения рабочего колеса вентилятора. Сравнивая положение рабочей точки на разных характеристиках, определяют тип вентилятора, который даёт наибольший КПД при требуемых значениях давления и расхода воздуха.

В качестве примера рассмотрим расчёт системы пылеудаления при общих потерях давления в системе $\Delta p_c = 2000$ Па и необходимом расходе воздуха $Q_c = 6000$ м³/час. Требуется выполнить подбор вентилятора, способного преодолеть заданное сопротивление сети и обеспечить необходимую производительность.

Для подбора вентилятора его расчётное давление принимается с коэффициентом запаса $K = 1,1$:

$$\Delta p_v = K \cdot \Delta p_c , \quad (10.1)$$

$$\Delta p_v = 1,1 \cdot 2000 = 2200 \text{ Па} .$$

Расход воздуха рассчитывается с учётом всех непродуктивных подсосов: $Q_v = Q_c = 6000$ (м³/час). Рассмотрим аэродинамические характеристики двух соседних номеров вентиляторов (рис. 10.3 и 10.4), в диапазон рабочих значений которых попадают значения расчётного давления и расхода воздуха проектируемой вентиляционной установки. (Номера вентиляторов и графики аэродинамических характеристик в примере подбора вентилятора приняты условно и не относятся к какой-либо конкретной марке и типоразмеру).

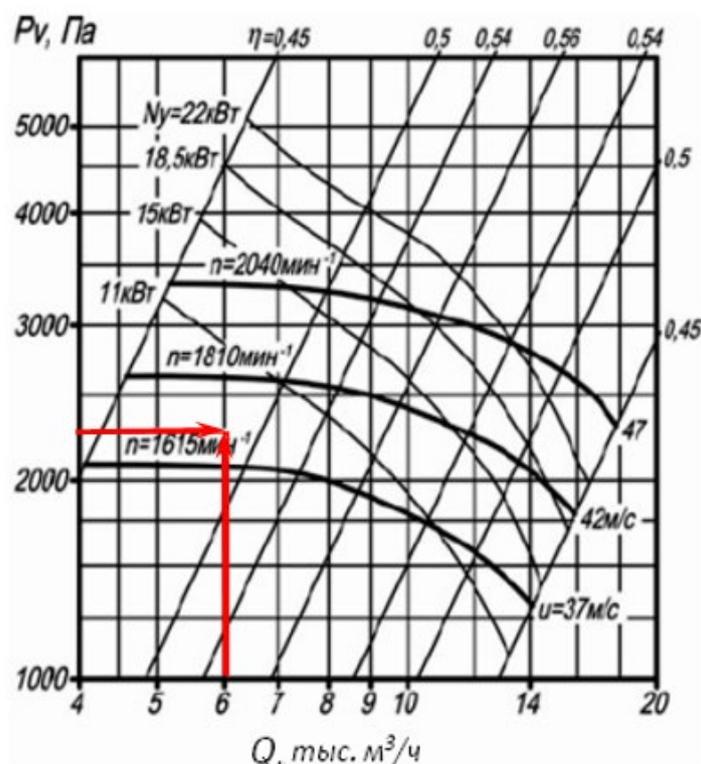


Рис. 10.3. Аэродинамическая характеристика вентилятора 1

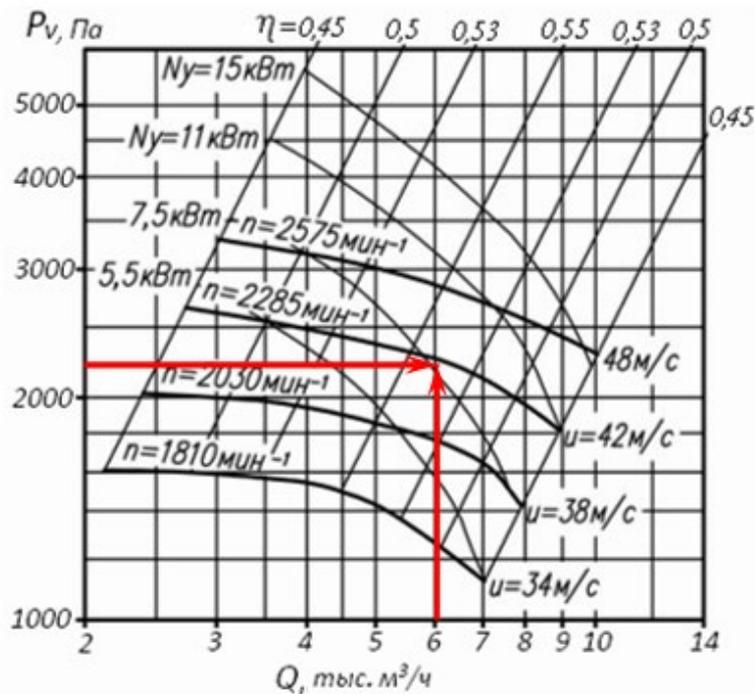


Рис. 10.4. Аэродинамическая характеристика вентилятора 2

На пересечении величин $P_v = 2200$ Па и $Q = 6000$ м³/час указывается рабочая точка. Максимальный КПД определяется на характеристике вентилятора 2: КПД $\eta = 0,54$; частота вращения рабочего колеса $n = 2280$ об/мин; окружная скорость края колеса $u \sim 42$ м/сек.

У вентилятора № 1 КПД ниже, однако в рабочем режиме он имеет меньшую окружную скорость ($u \sim 38$ м/сек), а, следовательно, и меньший шум, вибрацию и выше эксплуатационную надежность. Иногда предпочтение отдаётся более тихоходному вентилятору.

Рабочий КПД вентилятора принимается равным не ниже 0,9, а его максимального КПД, поэтому следует рассмотреть аэродинамические характеристики других близких по характеристикам вентиляторов. Сравним ещё две аэродинамические характеристики, которые подходят для выбора вентилятора к той же вентиляционной установке (рис. 10.5).

КПД вентилятора № 4 примерно равен максимальному (0,59). Частота вращения его рабочего колеса $n = 2250$ об/мин. КПД третьего вентилятора имеет более низкое значение (0,575), однако стоит отметить, что частота вращения рабочего колеса имеет значительно меньшее значение: $n = 1700$ об/мин. При незначительной разнице КПД третий вентилятор является более приемлемым. Если впоследствии результаты расчёта мощности привода и электродвигателя окажутся близкими для обоих вентиляторов, то целесообразным будет являться выбор вентилятора № 3.

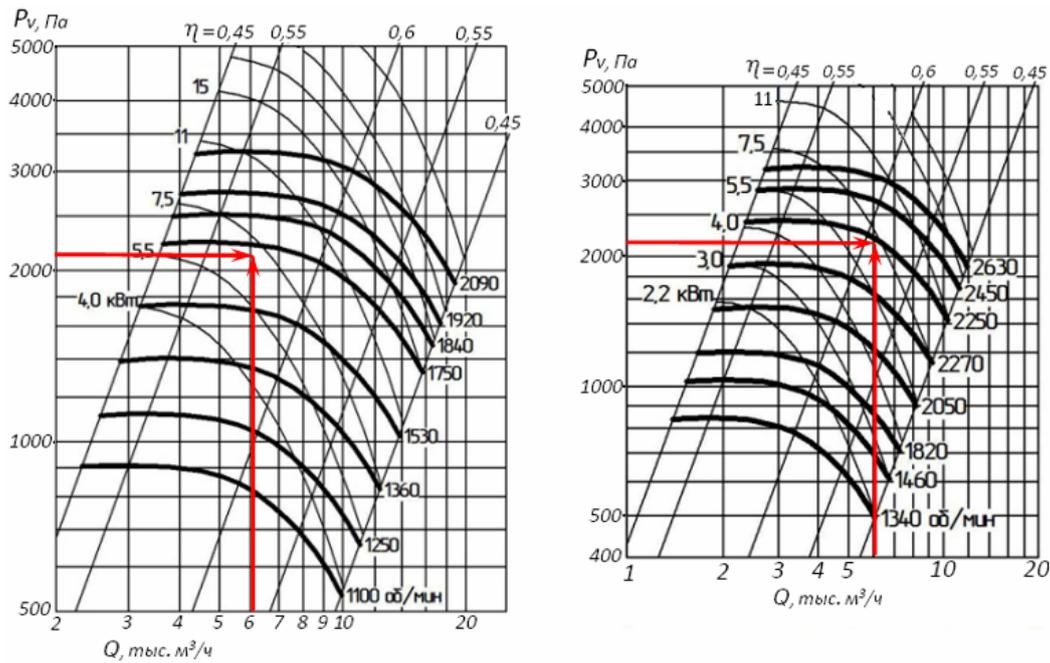


Рис. 10.5. Аэродинамические характеристики вентилятора 3 и вентилятора 4

10.3. Расчёт мощности привода вентилятора

Необходимая для привода вентилятора мощность определяется в зависимости от создаваемого им давления Δp_V (Па), перемещаемого объёма воздуха Q_B ($\text{м}^3/\text{сек}$) и коэффициента полезного действия КПД [47]:

$$N_B = \Delta p_V \cdot Q_B \cdot \eta / 1000 \text{ (кВт)}; \quad \Delta p_V = 2200 \text{ Па}; \quad Q_B = 6000/3600 = 1,67 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Коэффициенты полезного действия определенных по аэродинамическим характеристикам вентиляторов 1, 2, 3 и 4 составляют 0,49; 0,54; 0,575; 0,59 соответственно.

Подставляя величину давления, расхода и КПД в формулу расчёта, вычисляют значения мощности для привода каждого вентилятора: 7,48 кВт, 6,8 кВт, 6,37 кВт, 6,22 кВт.

Мощность электродвигателя зависит от вида ее передачи с вала двигателя на вал вентилятора и берется во внимание в расчете соответствующим коэффициентом ($K_{\text{пер}}$). Потери мощности отсутствуют при непосредственной посадке рабочего колеса вентилятора на вал электродвигателя, т.е. КПД подобной передачи равен 1. КПД соединения валов вентилятора и электродвигателя с помощью муфты равен 0,98. Для получения требуемой частоты вращения рабочего колеса вентилятора выбираем клиноременную передачу, коэффициент полезного действия которой равен 0,95. Потери в подшипниках учитываются коэффициентом $K_{\text{п}} = 0,98$. По формуле расчёта мощности электродвигателя

$$N_{\text{эл}} = \frac{N_B}{K_{\text{пер}} \cdot K_{\text{п}}} \quad (10.2)$$

получим соответствующие мощности: 8,0 кВт; 7,3 кВт; 6,8 кВт; 6,7 кВт.

Установочную мощность электродвигателя принимают с коэффициентом запаса, $K_3 = 1,15$ для двигателей мощностью менее 5 кВт и $K_3 = 1,1$ для двигателей более 5 кВт:

$$N_y = K_3 \cdot N_{эл}. \quad (10.3)$$

С учётом коэффициента запаса $K_3 = 1,1$ итоговая мощность электродвигателей для вентиляторов 1 и 2 составит соответственно 8,8 кВт и 8 кВт; для вентиляторов 3 и 4 – 7,5 кВт и 7,4 кВт. Первые два вентилятора потребовалось бы снабдить двигателем 11 кВт, для любого вентилятора из второй пары достаточно мощности электродвигателя 7,5 кВт. Выбираем вентилятор 3 как более энергоэффективный, чем типоразмеры 1 или 2, и как более тихходный и надёжный в эксплуатации по сравнению с вентилятором 4.

Клиноременная передача позволяет подобрать требуемую частоту вращения рабочего колеса при помощи установки на вал двигателя и приводной вал вентилятора шкивов разного диаметра. Определяется передаточное отношение частоты вращения вала электродвигателя к частоте вращения рабочего колеса вентилятора $n_э/n_в$.

Шкивы клиноременной передачи подбираются таким образом, чтобы отношение диаметра приводного шкива вентилятора к диаметру шкива на валу электродвигателя соответствовало отношению частот вращения:

$$\frac{D_в}{D_э} = \frac{n_э}{n_м}. \quad (10.4)$$

Напомним, что отношение диаметра ведомого шкива к диаметру ведущего шкива называется передаточным числом ремённой передачи.

Схемы клиноременной передачи вентилятора, повышающей и понижающей частоту вращения рабочего колеса, изображены на рис.10.6.

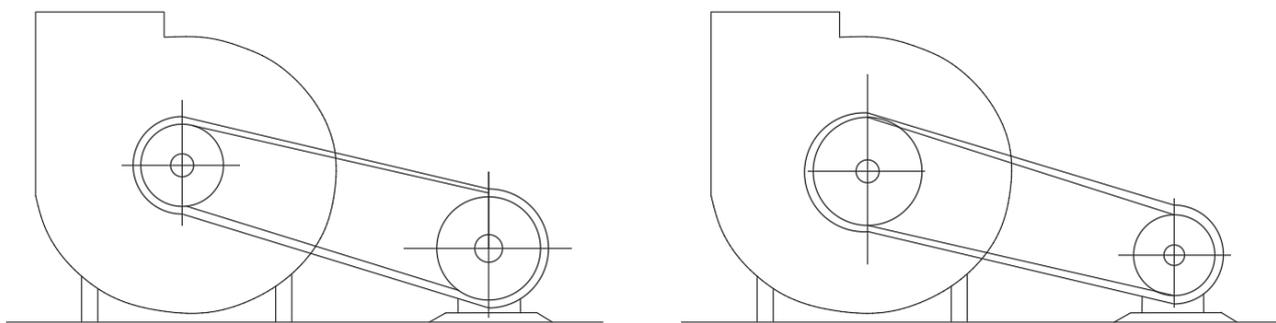


Рис. 10.6. Схемы подбора частоты вращения вентиляторов

11. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТАМ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА И ПРАВИЛА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

11.1. Общие требования

Обычно вентиляционные пылеуловители являются малоэффективным оборудованием. Из-за этого при проектировании требуется с особым вниманием планировать условия эксплуатации и ремонта пылеуловителей [45, 46].

Пылеуловители могут быть смонтированы на всасывание или на нагнетание в тех случаях, когда улавливаемая пыль не имеет абразивных свойств и не имеет взрывоопасных качеств.

При установке вентилятора перед пылеуловителем последней ступени многоступенчатой установки, при проведении очистки мокрым способом, установка в пылеуловителе каплеуловителя не всегда требуется, если небольшой вынос воды не образует эксплуатационных сложностей.

Скорость в каналах, подводящих воздух к пылеуловителям, должна быть назначена согласно справочным данным о скоростях, рекомендуемых для недопущения осаждения пыли в воздуховодах.

Необходимо избегать устройства поворотов и прочих местных сопротивлений на участках воздуховодов, по которым воздух подводится к инерционным пылеуловителям на расстоянии, равном не менее 10 диаметров воздуховодов. Перед сухими и мокро-пленочными циклонами возможно наличие поворотов воздуховодов в направлении вращения воздуха в циклонах.

При проектировании систем аспирации взрывоопасной пыли объемы отсоса воздуха необходимо назначать достаточно большими во избежание появления в пылеуловителях и воздуховодах взрывоопасных концентраций.

При проектировании систем аспирации диэлектрической пыли нужно с особым вниманием проводить заземление воздуховодов (отметим, что пыль является взрывоопасным материалом, поэтому заземление предотвращает возможность искробразования) и предупредить возможность оседания и накопления частиц в воздуховодах.

Отвод воздуха от циклонов всех видов производится без раскручивающих элементов. Необходимость монтажа на выхлопах защитных колпаков рекомендуется к рассмотрению для каждого случая индивидуально.

Выброс очищенного воздуха необходимо предусматривать на высоте не менее 1 м над высшей точкой кровли здания, удаляя его от приемных устройств для забора наружного воздуха систем приточной вентиляции на расстоянии не менее 20 м по горизонтали или на 6 м выше воздухоприемных устройств при горизонтальном расстоянии меньше 20 м (за пределами циркуляционных зон).

Выбросы в атмосферу воздуха, отводимого аспирационными системами и содержащего аэрозоли I и II класса опасности, горючие жидкие аэрозоли, а также дурнопахнущие аэрозоли, необходимо проектировать выше уровня циркуляционных зон, создаваемых зданиями, посредством высоких труб или высокоскоростными струями (факельный выброс).

Пыль, осаждаемая в сухих пылеуловителях, должна накапливаться в проектируемых для этого бункерах. Применять для этой цели имеющиеся в конструкции пылеуловителей бункера и емкости запрещается. Сборные бункера должны быть соединены с бункерами пылеуловителей герметично и снабжены герметическими пылевыгрузочными устройствами в виде барабанных лопастных затворов, мигалок и пр.

Угол наклона стенок сборных бункеров необходимо назначать согласно справочным данным о естественном откесе данного сыпучего материала. При отсутствии таких данных следует принимать угол в 60°. При необходимости должны проводиться мероприятия по предупреждению зависания пыли в бункерах.

Необходимый объем сборных бункеров должен соответствовать количеству улавливаемой пыли и установленному эксплуатационному режиму их разгрузки. Необходимо предусматривать приемлемую с точки зрения удобства и беспыльную разгрузку пыли в тару для дальнейшей транспортировки и удаление средствами механизации. Горючие и взрывоопасные пыли требуется удалять в непрерывном режиме, применяя для этого барабанные затворы и шнеки.

При проектировании сухих пылеуловителей для улавливания горючей и взрывоопасной пыли требуется вести работы в соответствии с указаниями, представленными в СП 60.13330.2020 [47].

Проекты мокрой очистки воздуха расходы воды и схемы водоснабжения пылеуловителей согласуются с соответствующими территориальными организациями.

Применение водопроводной питьевой воды в пылеуловителях проточного, а также других типов с непрерывным сливом воды можно предусматривать только в исключительных случаях.

Сточные воды мокрых пылеуловителей подвергаются очистке и возвращаются в пылеуловители или в общую систему оборотного водоснабжения предприятия.

Требования к очистке вод сточных проточных пылеуловителей, в которых распыление воды производится с помощью форсунок, сопел, отражательных дисков и других элементов, которые подвержены износу частицами, взвешенными в воде, определяются в соответствии с технической документацией на пылеуловители.

При использовании воздуха, очищенного в мокрых пылеуловителях для рециркуляции, заполнение пылеуловителей и их системы оборотного водоснабжения, а также последующее дополнение с целью компенсации потерь воды производятся водой питьевого качества. К эффективности очистки подаваемой в пылеуловители оборотной воды предъявляются достаточно жесткие требования во избежание гниения органических примесей и возникновения в окружающем воздухе неприятного запаха.

Во время проектирования устройств мокрых пылеуловителей для улавливания горючей и взрывоопасной пыли особых требований по их размещению в здании не предполагается.

11.2. Оценка надежности систем очистки воздуха

Основным показателем качества систем очистки воздуха является их надежность. Таким образом, будет целесообразным оценивать ее еще в период проектирования. Особую значимость этот показатель имеет для оценки качества функционирования систем, предназначенных для очистки рециркуляционного воздуха, возвращаемого обратно в помещения.

Под надежностью систем очистки воздуха понимается безотказность систем, т.е. их способность к непрерывному нахождению в состоянии работоспособности и выполнению необходимых функций в течение заданного промежутка времени, с сохранением значения регламентируемых эксплуатационных показателей в определенных пределах, соответствующих принятым режимам и условиям эксплуатации и сервисного обслуживания.

Отказом является нарушение работоспособности пылеуловителя или всей системы очистки, например, отказ вентилятора.

Надежность пылеуловителей и других видов оборудования систем можно в достаточной степени оценить по следующей формуле:

$$P(t) = \exp(-\lambda \cdot t), \quad (11.1)$$

где t – необходимая продолжительность работы оборудования, ч.

В системах с рециркуляцией воздуха t принимается не менее продолжительности отопительного периода. В системах для очистки воздуха от взрывоопасной пыли t принимается равной продолжительности непрерывной работы технологического оборудования; λ – интенсивность отказов:

$$\lambda = \frac{1}{T_0}, \quad (11.2)$$

где T_0 – наработка на отказ данного вида оборудования.

Значения λ или T_0 определяются в соответствии со стандартами или техническими условиями на данное оборудование.

Надежность многоступенчатой системы, состоящей из нескольких последовательных пылеуловителей, оценивается по формуле

$$P_{\text{ос}}(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (11.3)$$

где $P_1(t)$; $P_2(t)$ и т.д. – надежность каждого из пылеуловителей, n – число установленных последовательно пылеуловителей.

Расчетную надежность выбирают на уровне величин: 99 % – для предприятий, на которых прекращение очистки воздуха влечет за собой необходимость останавливать производство; 90% – в случаях, когда отказ пылеуловителей рециркуляционной системы значительным образом провоцирует снижение температуры, в том числе из-за забивания теплообменников; не ниже 80 % в прочих случаях в зависимости от последствий прекращения очистки воздуха.

Правилами эксплуатации установок очистки воздуха, утвержденными Главным государственным инспектором по контролю за работой газоочистных и пылеулавливающих установок, предусматриваются требования к эксплуатации и обслуживанию пылеочистного оборудования, которые рассматриваются в параграфах 11.3–11.8.

11.3. Требования к эксплуатации и обслуживанию сухих механических пылеуловителей

Перед началом эксплуатации пылеуловителей нужно убедиться в следующем:

а) корпус пылеуловителей, бункеры, люки, фланцевые соединения удовлетворяют требованиям герметичности;

б) уровень пыли в накопительных бункерах соответствует допустимым;

в) удаляющие пыль механические элементы и средства транспортировки являются исправными и готовы к работе;

г) завершены мероприятия по ремонту оборудования, пылеуловитель функционирует в исправном режиме и готов к эксплуатации (люки закрыты, леса демонтированы, отсутствуют посторонние предметы);

е) присутствуют в исправном состоянии приборы контроля и автоматики.

Действия, требуемые для выполнения во время эксплуатации:

а) проводить мониторинг герметичности пылеуловителей и коммуникаций, для предупреждения возникновения утечек газа (при работе под давлением) или недопустимых подсосов воздуха (при разрежении);

б) вовремя удалять из бункеров уловленную пыль и обеспечивать ее транспортировку;

в) принимать меры по предупреждению слеживания и цементации пыли в системах пыленакопления и пылеуборки, при этом используя предусмотренные методы, в том числе поддерживая температуру всех узлов установки выше «точки росы» газа;

г) при наличии устройств регулировки обеспечивать оптимальный режим работы пылеуловителей.

11.4. Требования к эксплуатации и обслуживанию мокрых механических пылеуловителей

Мокрые механические пылеуловители должны быть укомплектованы:

а) расходомерами и манометрами с целью контроля подачи орошающей жидкости;

б) гидрозатворами, устраняющими подсос воздуха в процессе удалении шлама.

Перед запуском мокрых механических пылеуловителей нужно выполнить и (или) проверить следующие пункты:

а) уровень воды или иного орошающего реагента в гидрозатворах аппаратов находится в допустимых пределах;

- б) системы орошения и шламоуборки исправны и готовы к эксплуатации;
 - в) орошающая жидкость подана в систему;
 - г) завершены мероприятия по ремонту и обслуживанию, сооружения, механизмы и аппаратура исправны и готовы к эксплуатации;
 - д) в исправном состоянии присутствуют приборы контроля и автоматики.
- Во время эксплуатации следует:

а) проводить мониторинг герметичности мокрых механических пылеуловителей и коммуникаций, при этом предупреждая утечки газа, орошающей жидкости или недопустимых подсосов воздуха;

б) обеспечивать оптимальный водный режим работы мокрых механических пылеуловителей и регулярное удаление из них шламовой пульпы и транспортировку ее в соответствующие зоны, предназначенные для временного хранения;

в) поддерживать необходимый оптимальный газовый режим работы;

г) поддерживать необходимый оптимальный режим работы имеющегося оборудования по регенерации орошающей жидкости (осветление, охлаждение, обработка реагентами и т.д.) и утилизации шлама;

д) не допускать накопления шлама в сооружениях или отложений его в трубопроводах и оборудовании оборотного водоснабжения, применяя при этом методы и средства согласно регламенту;

е) проводить мониторинг работы специальных каплеуловителей, смонтированных после мокрых механических пылеуловителей.

Остановка подачи орошающей жидкости производится исключительно по завершении подачи газа на очистку.

11.5. Требования к эксплуатации и обслуживанию промышленных фильтров

Перед запуском в эксплуатацию нужно убедиться в следующем:

а) фильтрующие элементы промышленных фильтров надежно уплотнены в местах монтажа, деформации и повреждения отсутствуют, соответствуют требованиям эксплуатации, чистота фильтрующей поверхности этих элементов соответствует предельным значениям;

б) система регенерации фильтрующих элементов и система пылеуборки являются исправными и подготовленными к эксплуатации;

в) завершены мероприятия по ремонту и обслуживанию, промышленный фильтр является исправным и подготовленным к работе;

г) в исправном состоянии присутствуют приборы контроля и автоматики.

В процессе эксплуатации следует:

а) проводить мониторинг гидравлического сопротивления промышленного фильтра;

б) поддерживать требуемую температуру очищаемого газа в пределах согласно регламенту;

в) обеспечивать необходимую периодичность и эффективность работы имеющихся устройств по регенерации фильтрующих поверхностей

промышленных фильтров и устройств по пылеудалению и транспортировке пыли.

11.6. Требования к эксплуатации и обслуживанию электрических пылеуловителей

Перед запуском в эксплуатацию электрических пылеуловителей необходимо убедиться в следующем:

а) отсутствует деформация на осадительных и коронирующих электродах, они правильно отрихтованы, отсутствуют отложения на поверхности уловленного продукта, межэлектродные расстояния соответствуют допустимым пределам;

б) отрегулирована и функционирует в правильном режиме работы система орошения мокрых или механизмы встряхивания сухих электрофильтров;

в) смазка узлов и механизмов электрофильтра проведена согласно карты смазки;

г) видимые трещины на изоляторах электрофильтра отсутствуют, в нормальном режиме работает обогрев изоляторных коробок (паровой или электрический);

д) сохранена целостность теплоизоляции корпуса;

е) в исправном состоянии находятся приборы контроля и автоматики;

ж) корпуса электрофильтров, бункеры, люки, фланцевые соединения соответствуют требованиям герметичности;

и) завершены мероприятия по ремонту и обслуживанию, электрофильтры, включая вспомогательные устройства и агрегаты электропитания, находятся в исправном состоянии и подготовлены к эксплуатации.

В процессе эксплуатации электрофильтра следует:

а) проводить мониторинг соответствия оптимальным пределам электрического режима (величина тока, напряжение), газовой и пылевой нагрузки (скорость газа в рабочей зоне, гидравлическое сопротивление, объем и концентрация пыли на входе в аппарат), температуры очищаемого газа;

б) вести регулярный осмотр наружных узлов электрофильтра и ликвидировать обнаруженные неисправности;

в) проводить мониторинг работы систем отряхивания пыли и пылевыгрузки, предупреждать возможность зависания пыли на электродах и течках бункеров (для сухих электрофильтров) или нарушения режима орошения и промывки электродов (для мокрых электрофильтров);

г) вовремя удалять уловленную пыль (пульпу) и транспортировать ее в специально отведенные для этого зоны.

11.7. Требования к эксплуатации и обслуживанию аппаратов сорбционной очистки газа

Перед началом запуска аппаратов (адсорбера или абсорбера) необходимо убедиться в следующем:

а) завершены мероприятия по ремонту и обслуживанию, аппараты находятся в исправном состоянии и подготовлены к эксплуатации;

б) системы подготовки, распределения, удаления и регенерации жидких или твердых поглотителей находятся в исправном состоянии и подготовлены к эксплуатации;

в) количество и качество применяемого поглотителя в системе соответствует нормам согласно регламенту;

г) в исправном состоянии присутствуют приборы контроля и автоматики;

д) в исправном состоянии присутствует химзащита.

Во время эксплуатации абсорбционных и адсорбционных аппаратов следует:

а) проводить мониторинг герметичности аппаратов и коммуникаций, при этом предупреждая утечки газа или поглощающей жидкости;

б) поддерживать необходимый гидравлический и газовый режим работы аппаратов, соблюдать установленный порядок регенерации и мониторинга качества поглотителя;

в) не допускать накопления шлама или пыли на рабочих поверхностях аппаратов, обеспечивая систематическое удаление и транспортировку уловленных продуктов в специально отведенные для этого зоны;

г) соблюдать требования технологических регламентов по эксплуатации оборудования.

11.8. Требования к эксплуатации и обслуживанию аппаратов термической и термокаталитической очистки газа

Перед началом запуска аппаратов в эксплуатацию нужно убедиться в следующем:

а) аппараты исправны и готовы к работе;

б) система газопроводов и установленное оборудование для подачи отопительного и очищаемого газа исправны и готовы к работе, произведена обкатка на воздухе всех узлов и установки в целом;

в) система трубопроводов и установленное оборудование для подвода к печам очищаемого газа исправны и готовы к работе;

г) качество и количество катализатора соответствует регламентным нормам;

д) горение отопительного газа в горелках протекает в устойчивом режиме, отвод дымовых газов обеспечивается приемлемо;

е) приборы контроля и автоматики в наличии и исправны.

В процессе эксплуатации необходимо:

а) обеспечивать оптимальный режим сжигания веществ, загрязняющих атмосферу, содержащихся в очищаемом газе, и условия взрывобезопасности в соответствии с технологическим регламентом по эксплуатации установки;

б) проводить мониторинг состояния применяемых катализаторов, обеспечивать своевременную их регенерацию или замену;

в) прогревать систему до рабочих параметров на воздухе.

12. ОБЩАЯ ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

Расчет экономических показателей системы (установки) производится с целью уточнения удельной годовой стоимости очистки (на единицу производительности системы по воздуху), а также количества энергозатрат и затрат воды на очистку воздуха по объекту [18]. Сведения о данных показателях обеспечивают более обоснованный выбор оптимального варианта устройства очистных сооружений, а также их эксплуатации, вследствие чего их необходимо определять во всех проектах.

В основном стоимость газоочистки зависит от капитальных затрат на оборудование, расходов на эксплуатацию и амортизацию. Капитальные затраты зависят от конструкции и установленных мощностей оборудования. Эксплуатационные расходы зависят в основном от расхода электрической энергии, которые определяются потребляемой мощностью системы пылегазоочистки.

К капитальным затратам относится стоимость пылеуловителей, вентиляторов и занимаемой ими площади или объема здания, причем в расчет включается тот из двух показателей, стоимость которого выше, а также стоимость проводимых строительного-монтажных работ.

В случае мокрых пылеуловителей в капитальные затраты включается стоимость оборудования для очистки сточных вод и системы оборотного водоснабжения, а также соответствующих помещений. Если сточные воды запроектированных пылеуловителей поступают на имеющуюся очистную станцию, в расчете учитывается часть ее стоимости, пропорциональная количеству сточных вод пылеуловителей.

Основным документом расчета капитальных затрат должна являться смета, составленная проектной организацией в соответствии с рабочими чертежами. В случае проведения расчета на стадии выбора технического решения допускается определять стоимость элементов по укрупненным показателям. Стоимость пылеуловителей, утвержденные сметные цены на которые отсутствуют, может рассчитываться по массе использованного металла и цене на единицу применительно к ближайшему аналогу, имеющемуся в ценниках.

К эксплуатационным затратам относится стоимость расходуемой электроэнергии, воды, сменных элементов пылеуловителей (например, фильтровальных рукавов), оплата труда обслуживающего персонала, расходы на транспорт и вывоз уловленного материала, а также прочие текущие расходы.

Стоимость водопроводной воды принимается по данным, соответствующим району, в котором базируется проектируемый объект. К стоимости водопроводной воды добавляется стоимость услуг канализационных сетей на полный объем расходуемой воды.

Стоимость воды в системах оборотного водоснабжения принимается в результате калькуляции себестоимости проектируемого или аналогичного объекта.

Затраты на электроэнергию, расходуемую в пылеуловителях, рассчитывают, обращаясь к справочным данным о ее себестоимости, относящимися к району расположения проектируемого объекта.

Затраты на сменные элементы пылеуловителей принимаются в соответствии с паспортными данными пылеуловителей.

Сменными являются элементы конструкции пылеуловителей, имеющие меньший срок амортизации, чем пылеуловителя в целом. К сменным элементам относятся, например, рукава тканевых пылеуловителей, волокнистые слои уловителей кислотных и щелочных туманов, коронирующие электроды и изоляторы электрических туманоуловителей и т.п.

В тех случаях, когда уловленный материал представляет некоторую ценность, его стоимость, с учетом транспортных и других расходов, связанных с его утилизацией, вычитается из суммы эксплуатационных затрат.

В тех случаях, когда в результате очистки воздуха оказывается возможным его возвращение на рециркуляцию, определяется достигаемая годовая экономия тепла (холода) и его стоимость вычитается из суммы эксплуатационных затрат. Одновременно с этим производится уменьшение капитальных затрат на величину затрат, требуемых для расширения мощности ТЭЦ, тепловых сетей и т.д.

Сравнение экономичности вариантов систем очистки основано на разности приведенных затрат. Экономический эффект рассчитывается по формуле

$$П = (C_1 - C_2) - 0,12(K_1 - K_2), \text{руб./год}, \quad (12.1)$$

где C_1 и C_2 – сумма эксплуатационных затрат по новому (НВ) и базовому (БВ) вариантам; K_1 и K_2 – сумма капитальных затрат для тех же вариантов; 0,12 – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Ориентировочный расход электроэнергии при одноступенчатой очистке находится в пределах от 0,35 до 1,0 кВт·ч на 1000 кубических метров воздуха.

Стоимость очистки воздуха разными аппаратами значительно отличается, причем более эффективная очистка обходится дороже. Если стоимость очистки определённого количества воздуха в циклоне большой производительности принять за 100%, то стоимость очистки такого же количества воздуха в батарейном циклоне составит 120%, в циклоне с водяной пленкой 130%, в электрофильтрах, в которых электроэнергия расходуется в основном на создание электростатического поля, стоимость очистки возрастает до 220%. Стоимость высокоэффективной двухступенчатой очистки по схеме батарейный циклон – электрофильтр составит 330%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Храменков, С.В., Пахомов, А.Н., Данилович, Д.А., Козлов, М.Н., Дорофеев, А.Г., Агевнин, А.Р. Методы предотвращения распространения неприятных запахов от сооружений канализации //Водоснабжение и санитарная техника. 2006. №. 11-1. С. 40-47.
- 2 РД 52.11.679–2006. Методические указания. Комплексная оценка возможных вредных уровней воздействия на окружающую среду при работах по активным воздействиям на гидрометеорологические и геофизические процессы.
- 3 ГОСТ 12.1.005–88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».
- 4 Барахнина В.Б., Ягафарова Г.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 280201 "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов". Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Уфимский гос. нефтяной технический ун-т". – Уфа: Уфимский гос. нефтяной технический ун-т, 2008. 143 с.: ил., табл.; 20 см.; ISBN 978-5-7831-0840-2.
- 5 Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: учебное пособие для вузов: Учеб. пособие для вузов / Москва: Абрис, 2012. – ISBN 978-5-4372-0032-2.
- 6 Ветошкин, А.Г. Инженерная защита окружающей среды от вредных выбросов: учебное пособие 2-е изд., испр. и доп. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 416 с. ISBN 978-5-9729-0249-1.
- 7 Ефимов В.И., Рыбак Л.В. Производство и окружающая среда. Учебное пособие. – М.: МГГУ, 2012. 336 с.
- 8 Хрусталёв, Б.М. Инженерная экология и очистка выбросов промышленных предприятий: учебное пособие / Москва: АСВ, 2019. 558 с. ISBN 978-5-4323-0172.
- 9 Аистов И.П. Защита атмосферы от промышленных выбросов. Учебное пособие. Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Омский гос. технический ун-т". – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. – 91 с.: ил., табл.; 20 см.; ISBN 978-5-8149-0785-1.
- 10 Папушин Ю.Л. Вспомогательные процессы обогащения. Конспект лекций. – Донецк, ДонНТУ, 2008. 92 с.
- 11 Ветошкин, А.Г. Основы инженерной защиты окружающей среды. Москва: Инфра-Инженерия, 2017. – 456 с. - ISBN 978-5-9729-0124-1.
- 12 Кавецкий, Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: КолосС, 2013. 591 с.
- 13 Расчет пылеуловителей. В 3 ч. Ч. 1 Расчет циклонов и рукавных фильтров. / А.Е. Замураев, В.Б. Пономарев. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 50 с.

- 14 Арустамов, Э.А. Безопасность жизнедеятельности: учебник для бакалавров / Под ред. проф. Э. А. Арустамова. – 19-е изд., перераб. и доп. – Москва: Дашков и К, 2016. – 448 с. – ISBN 978-5-394-02494-8.
- 15 ГОСТ Р ЕН 779–2014. Фильтры очистки воздуха общего назначения.
- 16 Принципы экологии и ресурсосбережения в масложировой промышленности [Текст]: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по профилю подготовки "Технология жиров, эфирных масел и парфюмерно-косметических продуктов" направления подготовки бакалавра техники и технологии 260100 "Производство продуктов питания из растительного сырья" / С.В. Макаров, Н.В. Степычева, Т.Е. Никифорова; Министерство образования и науки Российской Федерации, Ивановский государственный химико-технологический университет. – Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2011. – 238 с.; ISBN 978-5-9616-0404-4.
- 17 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 22–2016. "Очистка выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при производстве продукции (товаров), а также при проведении работ и оказании услуг на крупных предприятиях".
- 18 Юшин В.В. Техника и технология защиты воздушной среды М.: Высшая школа, 2005. – 391 с. – ISBN 5-06-004446-7.
- 19 Обезвреживание загрязненного воздуха промышленных предприятий и городов / В.И. Шарапов, А.В. Марченко; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Ульяновский гос. технический ун-т. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 333 с.: ил., табл.; 20 см.; ISBN 978-5-9795-0146-8.
- 20 Белов С.В., Бабинов Ф.А. и др. Охрана окружающей среды. Учебник. 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.
- 21 Электрофильтры: монтаж, наладка, испытание, эксплуатация / Ю.И. Санаев. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1984. – 25 с.
- 22 Ю.И.Санаев Обеспыливание газов электрофильтрами. Семибратово: «Кондор-Эко», 2009. – 163 с.
- 23 Гидравлика и теплотехника: учебное пособие / В.С. Калекин, С.Н. Михайлец; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Омский гос. технический ун-т". – Омск: Омский гос. технический ун-т, 2007. – 317 с.: ил.; 20 см.; ISBN 5-8149-0482-8.
- 24 Зубрев, Н.И. Системы защиты среды обитания: учебник / Зубрев Н.И., Крошечкина И.Ю., Устинова М.В. – Москва: КноРус, 2019. – 382 с. – ISBN 978-5-406-04944-0
- 25 Зимон А.Д., Лещенко Н.Ф. Коллоидная химия. 3-е изд., доп. и исправл. М. АГАР. 2001. 320 с.
- 26 Теоретические основы защиты окружающей среды [Текст]: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 280201 "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов" / В.Б. Барахнина, Г.Г. Ягафарова; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф.

- образования "Уфимский гос. нефтяной технический ун-т". – Уфа: Уфимский гос. нефтяной технический ун-т, 2008. – 143 с.: ил., табл.; 20 см.; ISBN 978-5-7831-0840-2.
- 27 Поверхностные явления и адсорбция [Текст]: учебное пособие / Ж.И. Беспалова, Н.В. Смирнова, И.А. Пятерко; М-во образования и науки Российской Федерации, Южно-Российский гос. политехнический ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик, 2014. – 92.
- 28 Патент RU 2491982 С1, 10.09.2013.
- 29 Баранов, Д.А. Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие / Д. А. Баранов. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 408 с. – ISBN 978-5-8114-4984-2.
- 30 Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии – Госхимиздат, 1962. – 848 с.
- 31 Шильникова Н.В., Чепегин И.В. Использование нестандартной абсорбционной колонны при аварийных выбросах хлора в водоподготовке //Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – №. 7.
- 32 Шпилин Д.И., Пронин В.А., Долговская О.В. Совершенствование насадочных абсорбционных систем газоочистки в системах жизнеобеспечения //Вестник Международной академии холода. – 2017. – №1.
- 33 Шпилин Д.И., Пронин В. А. Повышение эффективности очистки и дезодорации газовоздушных выбросов пищевых предприятий в орошаемых колоннах насадочного типа с полимерной насадкой //Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2014. – №. 4.
- 34 Пронин В.А., Долговская О.В., Татаренко Ю.В., Гармалыга Ю. Исследование насадок орошаемого скруббера в системах регенерации воздуха при поглощении CO₂ // Вестник Международной академии холода. – 2019. – № 2. – С.43–48
- 35 Кирюхина Н.В., Нагдалиева О.В., Сережкин Л.Н. Выбор и обоснование способа удаления неконденсирующейся примеси из парогазовой смеси в конденсационном устройстве энергоблока с сверхкритическими параметрами пара // Вестник Калужского университета. 2014. №. 3. С. 55–60.
- 36 Повышение эффективности систем регенерации воздуха для изолированных объектов ... кандидата технических наук: 05.04.03 / Долговская Ольга Владимировна; [Место защиты: С.-Петерб. нац. исслед. ун-т информац. технологий, механики и оптики]. – Санкт-Петербург, 2020. 240 с. : ил.
- 37 Дезодорация воздуха в системах жизнеобеспечения: диссертация ... кандидата технических наук: 05.04.03 / Шпилин Дмитрий Игоревич; [Место защиты: С.-Петерб. нац. исслед. ун-т информац. технологий, механики и оптики]. – Санкт-Петербург, 2017. 195 с. : ил.
- 38 Практикум по расчету процессов и оборудования химических и пищевых производств [Текст]: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150400.62 "Технологические машины и оборудование" и специальностям 240801.65 "Машины и аппараты химических производств", 260601.65 "Машины и аппараты пищевых

- производств" / И.Ю. Алексанян [и др.]; Астрах. гос. техн. ун-т. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2012. 347 с.: ил., табл.; 20 см.; ISBN 978-5-89154-450-5
- 39 Процессы и аппараты защиты окружающей среды [Текст]: абсорбция газов: учебное пособие / В.И. Сосновский, Н.Б. Сосновская, С.В. Степанова; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Казанский гос. технологический ун-т". – Казань: КГТУ, 2009. – 114 с.; ISBN 978-5-7245-0514-2
- 40 Процессы и аппараты пищевой технологии: Учеб. для группы спец. "Технология продуктов питания" вузов / Г. Д. Кавецкий, Б. В. Васильев. – 2. изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1999. - 551 с.: ил.; 21 см. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений); ISBN 5-10-003174-3.
- 41 Улучшение условий и охраны труда персонала оперативных выездных бригад применением фотокаталитического воздухоочистителя для снижения концентрации оксида углерода в кабинах и кузовах мобильных машин: диссертация ... кандидата технических наук: 05.26.01 / Полунин Г. А.; [Место защиты: Юж.-Ур. гос. ун-т]. Челябинск, 2016. 139 с.: ил.
- 42 Природоохранные сооружения: учеб. для студентов вузов по специальности "Природоохранное обустройство территорий" / М.А. Попов, И.С. Румянцев. – М.: КолосС, 2005. – 518, [1] с.: ил., табл.; 21 см. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений); ISBN 5-9532-0262-8: 2000.
- 43 Очистка технологических газов: учеб.-практическое пособие для студентов специальностей 280201 – Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов и 280202-Инженерная защита окружающей среды / Федеральное агентство по образованию, Белгородский гос. технологический ун-т им. В.Г. Шухова; [Л.М. Смоленская и др.]. – Белгород : Белгородский гос. технологический ун-т, 2005. – 137 с.: ил., табл.
- 44 Аспирация и вентиляция. Выбор и расчёт вентилятора. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://asphpz.narod.ru/index/vybor_i_raschjot_ventiljatora/0-13свободный – (Дата обращения 21.08.2021).
- 45 Рекомендации по проектированию очистки воздуха от пыли в системах вытяжной вентиляции – М.: Стройиздат – 1985 г. 36 с.
- 46 "Правила эксплуатации установок очистки газа" (утв. Минхиммашем СССР 28.11.1983) (вместе с "Инструкцией по заполнению паспорта установки очистки газа").
- 47 СП 60.13330.2020. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.

Пронин Владимир Александрович
Мамченко Валерий Олегович
Долговская Ольга Владимировна
Цветков Вадим Александрович

ОЧИСТКА И ДЕЗОДОРАЦИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ

Научно-учебное издание

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ № 4671

Тираж 500 экз.

Отпечатано ООО «Университетские Телекоммуникации»

199034, Санкт-Петербург, В.О., Биржевая линия, 16