

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

И. В. ТЕРПИГОРЕВА, С. А. МУСИНА

СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА



Уфа 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

И. В. ТЕРПИГОРЕВА, С. А. МУСИНА

СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА

*Допущено Редакционно-издательским советом УГАТУ
в качестве учебного пособия для студентов
очной и заочной форм обучения,
обучающихся по направлению подготовки бакалавров
20.03.01 Техносферная безопасность*

Учебное электронное издание сетевого доступа

© УГАТУ
ISBN 978-5-4221-1599-0

Уфа 2022

Рецензенты:

*руководитель направления водоподготовки и очистки сточных вод
ООО «Компания "ТЕХНОТЕКС"» А. Н. Кузнецов;
доцент кафедры химии почв
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
канд. биол. наук Е. А. Тимофеева*

Терпигорева И. В., Мусина С. А.

Средства защиты воздушного бассейна : учебное пособие [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2022. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-119.pdf

Изложены теоретические положения, дающие представления о способах очистки воздуха, о газоочистном оборудовании промышленных предприятий. Приводятся основные методы расчета газоочистных устройств. Для закрепления расчетных навыков по каждой теме предлагаются варианты задач для индивидуальной работы студентов. Обучающиеся имеют разный уровень математической подготовки, поэтому в приложении приведены математические основы, которые будут востребованы при решении задач по дисциплине.

Предназначено для проведения практических занятий по дисциплине «Промышленная экология» и/или для самостоятельной работы обучающихся.

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Авторы: *Терпигорева Инна Валерьевна,
Мусина Светлана Айратовна*

Редактирование и верстка: *Р. М. Мухамадиева*

Программирование и компьютерный дизайн: *О. М. Толкачёва*

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Подписано к использованию: 30.06.2022

Объем: 3,7 Мб.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Тел.: +7-908-35-05-007

e-mail: rik@ugatu.su

ВВЕДЕНИЕ

Промышленное производство и другие виды хозяйственной деятельности сопровождаются выделением в воздух помещений и в атмосферный воздух различных веществ, загрязняющих воздушную среду. В воздух поступают аэрозольные частицы (пыль, дым, туман), газы, пары, а также микроорганизмы и радиоактивные вещества.

Промышленные газовые выбросы обычно представляют собой сложные дисперсные системы (аэрозоли), в которых сплошная среда является смесью различных газов, а взвешенные твердые или жидкие частицы имеют различные размеры и сложный химический состав.

Частицы механической пыли имеют размер от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров. Частицы аэрозоля имеют размеры десятых и сотых долей микрометра.

Большое разнообразие пылегазовых выбросов с различными физико-химическими свойствами привело к созданию широкой номенклатуры газоочистного оборудования с использованием различных методов очистки.

1. ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ

Под атмосферным загрязнением понимают присутствие в воздухе газов, паров, частиц, твердых и жидких веществ, тепла, колебаний, излучений, которые неблагоприятно влияют на растения, животных, человека, климат, материалы, здания и сооружения.

Выбросы в атмосферу различают по виду, составу, количеству, агрегатному состоянию, характеру появления и пребывания в атмосфере, влиянию на биосферу и множеству других признаков. В стандартной классификации загрязнители разделены на 4 класса по агрегатному состоянию: газо- и парообразные, жидкие, твердые и смешанные. По химическому составу они делятся на группы, а в зависимости от размера частиц – на подгруппы. Например, твердые выбросы подразделяются на 4 подгруппы с размерами частиц, мкм: менее 1; 1...10; 10...50 и более 50.

Промышленное производство и другие виды хозяйственной деятельности людей сопровождаются выделением в воздух помещений и в атмосферный воздух различных веществ, загрязняющих воздушную среду.

В воздух поступают аэрозольные частицы (пыль, дым, туман), газы, пары, а также микроорганизмы и радиоактивные вещества. В атмосферу Земли ежегодно поступает 150 млн т различных аэрозолей, около 1 км³ пылевидных частиц искусственного происхождения. Еще большее разнообразие свойственно органической пыли, включающей алифатические и ароматические углеводороды, соли кислот. Она образуется при сжигании остаточных нефтепродуктов, в процессе пиролиза на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и других предприятиях.

Основными источниками искусственных аэрозольных загрязнений воздуха являются ТЭС, которые потребляют уголь высокой зольности, обогатительные фабрики, металлургические, цементные, магнезитовые и сажевые заводы. Аэрозольные частицы от этих источников отличаются большим разнообразием химического состава. Чаще всего в их составе обнаруживаются соединения кремния, кальция и углерода, реже – оксиды металлов: железа, магния, марганца, цинка, меди, никеля, свинца, сурьмы, висмута, селена, мышьяка, бериллия, кадмия, хрома, кобальта, молибдена. Источником пыли и ядовитых газов служат массовые взрывные

работы. Так, в результате одного среднего по массе взрыва (250–300 т взрывчатых веществ) в атмосферу выбрасывается около 2 тыс. м³ условного оксида углерода и более 150 т пыли. Производство цемента и других строительных материалов также является источником загрязнения атмосферы пылью. Основные технологические процессы этих производств – измельчение и химическая обработка шихт, полуфабрикатов и получаемых продуктов в потоках горячих газов всегда сопровождается выбросами пыли и других вредных веществ в атмосферу.

Твердые компоненты аэрозолей в ряде случаев особенно опасны для организмов, а у людей вызывают специфические заболевания.

Загрязнение воздуха вызывает значительные экономические потери. Запыленность и загазованность воздуха в производственных помещениях приводит к снижению производительности труда, потере рабочего времени из-за увеличения заболеваемости. Во многих производствах наличие пыли в воздушной среде ухудшает качество продукции, ускоряет износ оборудования. В процессе производства, добычи, транспортирования многих видов материалов, сырья, готовой продукции часть этих веществ переходит в пылевидное состояние и теряется (уголь, руда, цемент и др.), загрязняя в то же время окружающую среду. Потери на ряде производств составляют до 3–5%. Мероприятия по уменьшению последствий загрязнения обходятся дорого.

На предприятиях имеют место *организованные* (через трубы, вентиляционные шахты и т. п.) и *неорганизованные* выбросы (через фонари и проемы в цехах, от мест погрузки и разгрузки транспорта, из-за утечек в коммуникациях и др.). Неорганизованные выбросы составляют от 10 до 26% от общего количества выбросов в атмосферу.

Поступление в воздушную среду производственных помещений и выброс в атмосферу аэрозолей и других вредных веществ – результат несовершенства технологического и транспортного оборудования, в первую очередь, его не герметичности, а также отсутствия или недостаточной эффективности пылеулавливающих и локализирующих устройств и систем.

1.1. Характеристика и свойства аэрозольных выбросов

Обезвреживание выбросов предполагает либо удаление вредных примесей из инертного газа-носителя, либо превращение их в безвредные вещества. Оба принципа могут быть реализованы через различные физические и химические процессы, для осуществления которых требуются определенные условия. Расчеты процессов и аппаратов очистки вентиляционных и технологических выбросов при их проектировании должны быть направлены на создание условий, обеспечивающих максимально полное обезвреживание выбросов.

Очистка выбросов в атмосферу складывается из двух принципиально различных процессов:

– *очистка от аэрозолей* – извлечение содержащихся в выбросах взвешенных твердых и жидких примесей (пыли, дыма, капелек тумана или брызг);

– *физико-химическая очистка выбросов* – извлечение или обезвреживание тех или иных газо- и парообразующих примесей.

К аэрозолям относятся *пыли, туманы и дымы*.

Пылями называют дисперсионные аэрозоли с твердыми частицами, независимо от дисперсности. Пылью обычно также называют совокупность осевших частиц (гель или аэрогель).

Под *туманами* понимают газообразную среду с жидкими частицами как конденсационными, так и дисперсионными, независимо от их дисперсности.

Дымами называют конденсационные аэрозоли с твердой дисперсной фазой или включающие частицы и твердые, и жидкие.

Аэрозоли обычно полидисперсны, т. е. содержат частицы различных размеров.

Плотность и дисперсный состав пылей и аэрозолей.

Надежность и эффективность систем газоочистки во многом зависит от физико-химических свойств пыли и от основных параметров газовых потоков, которые должны быть хорошо изучены и учтены при проектировании и эксплуатации систем газоочистки.

В процессах улавливания аэрозолей весьма важны физико-химические характеристики пылей и туманов, а именно: дисперсный (фракционный) состав, плотность, адгезионные свойства, смачиваемость, электрическая заряженность частиц, удельное сопротивление слоев частиц и др.

Важнейшей характеристикой золы и пылей является их *плотность*, кг/м³ или г/см³. Принято рассматривать *истинную*, *насыпную* и *кажущуюся плотности*.

Истинная плотность частицы представляет собой отношение массы гладкой монолитной частицы к занимаемому ею объему.

Кажущаяся плотность частиц представляет собой отношение массы частиц к занимаемому ими объему, включая поры, пустоты, неровности и т. п.

Насыпная плотность пыли, в отличие от истинной, учитывает наличие воздушных зазоров между частицами свеженасыпанной пыли. Насыпной плотностью пользуются для определения объема, который занимает пыль в бункерах в первое время до начала ее слеживания. Насыпная плотность слежавшейся пыли обычно в 1,2–1,5 раза больше, чем у свеженасыпанной.

На величину насыпной и кажущейся плотности пыли существенное влияние оказывают различные физико-химические процессы (вибрация, коагуляция, спекание, смачивание, окисление и т. д.).

Для правильного выбора пылеулавливающего аппарата необходимы, прежде всего, сведения о *дисперсном составе* пылей.

Дисперсность – степень измельчения вещества. Под дисперсным (зерновым, гранулометрическим) составом понимают распределение частиц аэрозолей по размерам. Он показывает, из частиц какого размера состоит данный аэрозоль, массу или количество частиц соответствующего размера.

Дисперсность в значительной мере определяет свойства аэрозолей. В результате измельчения изменяются некоторые свойства вещества и приобретаются новые. Это вызвано в основном тем, что при диспергировании вещества многократно увеличивается его суммарная поверхность.

Интервал дисперсности аэрозольных частиц весьма велик: от 10⁻⁷ до 1 мм.

Весь диапазон размеров частиц разбивают на фракции. Под *фракцией* понимают массовые (счетные) доли частиц, содержащихся в определенном интервале размеров частиц. Например, применяют следующую шкалу размеров пылевых частиц: 1 – 1,3 – 1,6 – 2,0 – 2,5 – 3,2 – 4,0 – 5,0 – 6,3 – 8,0 – 13 – 16 – 20 – 25 – 32 – 40 – 50 – 63 мкм.

Дисперсный состав пыли представляют в виде таблицы или графика.

В таблице дается распределение пыли по фракциям в процентах от общей массы. Пример приведен в табл. 1.1.

Совокупность всех фракций аэрозоля называют фракционным составом его дисперсной фазы, которую можно представлять графически. Откладывая по оси абсцисс значения интервалов, составляющих фракции, а по оси ординат – доли или процентные содержания частиц соответствующих фракций, получают гистограммы – ступенчатые графики фракционного состава. С уменьшением интервалов фракций гистограммы приближаются к плавным кривым (рис. 1.1).

Таблица 1.1

Дисперсный состав пыли

Размер частиц на границах фракций, мкм	< 1,5	1,5–2,5	2,5–5	5–7,5	7,5–10	10–15	15–25	25–35	35–50	> 50
Фракции, % от общей массы частиц	2,19	3,73	7,89	13,16	15,45	21,13	18,63	6,06	5,1	6,66

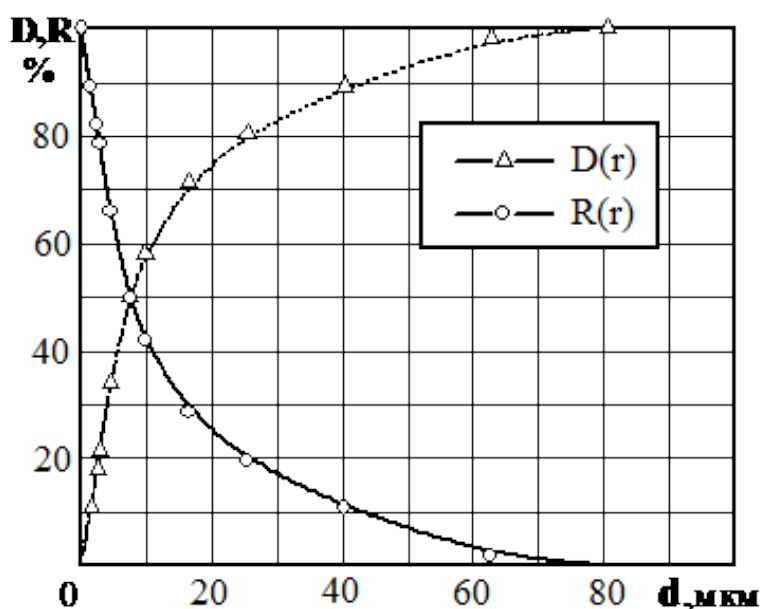


Рис. 1.1. Кривые распределения частиц аэрозоля

D и R – относительное содержание частиц меньше и больше данного размера d (мкм).

Дисперсный состав пылей определяют экспериментально. Для этого чаще всего используют приборы, называемые импакторами.

По дисперсности пыли классифицированы на 5 групп:

I – очень крупнодисперсная пыль, $d_m > 140$ мкм;

II – крупнодисперсная пыль, $d_m = 40 \div 140$ мкм;

III – среднедисперсная пыль, $d_m = 10 \div 40$ мкм;

IV – мелкодисперсная пыль, $d_m = 1 \div 10$ мкм;

V – очень мелкодисперсная пыль, $d_m < 1$ мкм.

Адгезионные свойства частиц. Эти свойства частиц определяют их склонность к *слипаемости*. Повышенная слипаемость частиц может привести к частичному или полному забиванию аппаратов.

Чем меньше размер частиц пыли, тем легче они прилипают к поверхности аппарата. Пыли, у которых 60–70% частиц имеют диаметр меньше 10 мкм, ведут себя как слипающиеся, хотя те же пыли с размером частиц более 10 мкм обладают хорошей сыпучестью.

По слипаемости пыли делятся на 4 группы:

1. *Неслипающаяся* (сухая шлаковая, кварцевая; сухая глина).

2. *Слабослипающаяся* (коксовая; магнезитовая сухая; апатитовая сухая; доменная; колошниковая летучая зола, содержащая много несгоревших продуктов; сланцевая зола).

3. *Среднеслипающаяся* (торфяная, влажная магнезитовая; металлическая, содержащая колчедан, оксиды свинца, цинка и олова, сухой цемент; летучая зола без недожиг; торфяная зола; сажа, сухое молоко; мука, опилки);

4. *Сильнослипающаяся* (цементная; выделенная из влажного воздуха; гипсовая и алебастровая; содержащая нитрофоску, двойной суперфосфат, клинкер, соли натрия; волокнистая (асбест, хлопок, шерсть)).

Абразивность частиц. Абразивность пыли характеризует интенсивность износа металла газохода и очистных устройств. Она зависит от твердости, формы, размера и плотности частиц. Абразивность учитывают при расчетах аппаратуры (выбор скорости газа, толщины стенок аппаратуры и облицовочных материалов).

Смачиваемость частиц. Смачиваемость частиц водой оказывает влияние на эффективность мокрых пылеуловителей, особенно при работе с рециркуляцией. Гладкие частицы смачиваются лучше, чем частицы с неровной поверхностью, так как последние в большей степени оказываются покрытыми абсорбированной газовой оболочкой, затрудняющей смачивание.

По характеру смачивания все частицы из твердых материалов можно разделить на три основные группы:

1) *гидрофильные материалы* – хорошо смачиваемые (кальций, кварц, большинство силикатов и окисленных минералов, галогениды щелочных металлов);

2) *гидрофобные материалы* – плохо смачиваемые (графит, уголь, сера);

3) *абсолютно гидрофобные* – парафин, тефлон, битумы.

Гигроскопичность частиц. Способность пыли впитывать влагу зависит от химического состава, размера, формы и степени шероховатости поверхности частиц. *Гигроскопичность* способствует их улавливанию в аппаратах мокрого типа.

Электрическая проводимость слоя пыли. Этот показатель оценивается по удельному электрическому сопротивлению слоя пыли $\rho_{сл}$, которое зависит от свойств отдельных частиц (от поверхностной и внутренней электропроводности, формы и размеров частиц), а также от структуры слоя и параметров газового потока. Оно оказывает существенное влияние на работу электрофильтров.

В зависимости от удельного электрического сопротивления пыли делятся на три группы:

1) низкоомные пыли $\rho_{сл} < 10^4$ Ом·см (при осаждении на электроде частицы пыли мгновенно разряжаются, что может привести к вторичному уносу);

2) пыли с $\rho_{сл} = 10^4 - 10^{10}$ Ом·см (эти пыли хорошо улавливаются в электрофильтре, так как разряд частиц происходит не сразу, а в течение времени, необходимого для накопления слоя);

3) пыли с $\rho_{сл} = 10^{10} - 10^{13}$ Ом·см (улавливание пылей этой группы в электрофильтрах вызывает большие трудности; частицы пыли этой группы образуют на электроде пористый изолирующий слой).

Электрическая заряженность частиц. Знак заряда частиц зависит от способа их образования, химического состава, а также от

свойств веществ, с которыми они соприкасаются. Этот показатель оказывает влияние на эффективность улавливания в газоочистных аппаратах (мокрых пылеуловителях, фильтрах и др.), на взрывоопасность и адгезионные свойства частиц.

Способность пыли к самовозгоранию и образованию взрывоопасных смесей с воздухом. Горючая пыль вследствие сильно развитой поверхности контакта частиц (порядка $1\text{ м}^2/\text{г}$) с кислородом воздуха способна к самовозгоранию и образованию взрывоопасных смесей с воздухом. Интенсивность взрыва пыли зависит от ее химических и термических свойств, от размеров и формы частиц, их концентрации в воздухе, от влагосодержания и состава газов, размеров и температуры источника воспламенения и относительного содержания инертной пыли. Способностью к воспламенению обладают некоторые пыли органических веществ, образующиеся при переработке красителей, пластмасс, волокон, а также пыли металлов: магния, алюминия и цинка.

Минимальные взрывоопасные концентрации взвешенной в воздухе пыли составляет примерно $20\text{--}500\text{ г}/\text{м}^3$, максимальные – $700\text{--}800\text{ г}/\text{м}^3$. Чем больше содержание кислорода в газовой смеси, тем вероятнее взрыв и больше его сила. При содержании кислорода менее 16% пылевое облако не взрывается.

1.2. Классификация пылеулавливающего оборудования

Большое разнообразие пылегазовых выбросов с различными физико-химическими свойствами привело к созданию широкой номенклатуры газоочистного оборудования с использованием различных методов очистки.

При выборе метода очистки учитывают вид загрязнений, их химические и физико-химические свойства, характер производства, возможность использования имеющихся в производстве веществ в качестве поглотителей для газа, целесообразность утилизации отделенных примесей, затраты на очистку.

Очистка газов осуществляется в **газоочистных аппаратах**.

Газоочистным аппаратом называется элемент газоочистной установки, в котором осуществляется определенный избирательный процесс улавливания твердых, жидких или газообразных вредных веществ, содержащихся в отходящих газах или вентиляционном воздухе.

На практике для достижения требуемой степени очистки газов применяются двухступенчатые и многоступенчатые установки, включающие аппараты одного и того же или разных типов.

Сооружение, предназначенное для улавливания из отходящих газов или вентиляционного воздуха содержащихся в них вредных примесей с целью предотвращения загрязнения атмосферы и состоящее из одного или нескольких газоочистных аппаратов, вспомогательного оборудования и коммуникаций, называется **газоочистной установкой**.

Газоочистные установки, как правило, устанавливаются в конце технологического процесса.

Устройства очистки промышленных газов от загрязнений могут быть объединены в основные шесть групп:

1) сухой инерционной очистки газов от пыли (пылеосадительные камеры, жалюзийные и инерционные пылеуловители, циклоны одиночные, групповые и батарейные, дымососы-пылеуловители и др.);

2) мокрой очистки газов от пыли, а в отдельных случаях от жидких и газообразных примесей (полые и насадочные скрубберы, барботажные и пенные аппараты, турбулентные газопромыватели, аппараты эжекционного и центробежного действия);

3) для очистки газов от пыли (в отдельных случаях – от тумана) методом фильтрации (тканевые, зернистые и волокнистые фильтры и др.);

4) электрической очистки газов от пыли и тумана (электрофильтры мокрые и сухие различных типов);

5) химических методов очистки газов от газообразных примесей (адсорберы, абсорберы и т. п.);

6) термической и термокatalитической очистки газов от газообразных примесей (печи сжигания, кatalитические реакторы и др.).

1.3. Механизмы очистки аэрозолей

В основу действия аппаратов для очистки аэрозольных выбросов положен определенный физический механизм. В улавливающих устройствах находят применение следующие способы отделения взвешенных частиц от взвешивающей среды, т. е. воздуха (газа): осаждение в гравитационном поле, осаждение под действием сил инерции, осаждение в центробежном поле, фильтрование, мокрая очистка, осаждение в электрическом поле и др.

По основному механизму отделения частиц аэрозолей и носит название пылеулавливающий аппарат.

Гравитационное осаждение. Частицы аэрозолей осаждаются из потока загрязненного воздуха под действием силы тяжести. Для этого необходимо создать соответствующий режим движения загрязненного воздуха в аппарате с учетом размера частиц, их плотности и т. д.

Инерционное осаждение. Инерционное осаждение основано на том, что частицы аэрозолей и взвешивающая среда ввиду значительной разности плотностей обладают различной инерцией. Аэрозольные частицы, двигаясь по инерции, отделяются от газовой среды.

Осаждение под действием центробежной силы. Происходит при криволинейном движении загрязненного воздушно-газового потока. Под действием возникающих центробежных сил аэрозольные частицы отбрасываются на периферию аппарата и осаждаются.

Эффект зацепления. Частицы аэрозолей, взвешенные в воздушной (газовой) среде, задерживаются в узких извилистых каналах и порах при прохождении воздушно-газового потока через фильтровальные материалы.

Мокрая очистка. Смачивание поверхности элементов аппаратов водой или другой жидкостью способствует задержанию аэрозольных частиц на данной поверхности.

Осаждение в электрическом поле. Проходя электрическое поле, состоящее из ионизированных молекул газа, частицы аэрозолей получают заряд. Двигаясь к электродам противоположного знака, они осаждаются на них.

В устройстве для очистки аэрозольных выбросов, наряду с основным механизмом улавливания, обычно используются и другие

закономерности. Благодаря этому общая и фракционная эффективность аппарата достигает более высокого уровня.

В целом система очистки воздуха и газов может содержать оборудование нескольких типов, соединенное в последовательную цепочку по мере повышения эффективности пылеулавливания.

Выбор оборудования при формировании системы пылеулавливания зависит от конкретных требований производства и физико-механических и физико-химических свойств дисперсных частиц.

1.4. Основные характеристики пылеуловителей. Эффективность газоочистного оборудования.

К основным характеристикам оборудования для очистки аэрозолей от взвешенных частиц относятся *эффективность (степень) очистки* воздуха от пыли, которую также иногда называют коэффициентом полезного действия аппарата, хотя это не отражает ее физический смысл; гидравлическое сопротивление; стоимость очистки. К общим параметрам пылеуловителей относят их *производительность* по очищаемому газу и *энергоёмкость*, определяемую величиной затрат энергии на очистку 1000 м³ газа.

При оценке эффективности работы пылеуловителей принимают во внимание:

– общую эффективность обеспыливания, или количество пыли, задержанной в пылеуловителе, по отношению к количеству пыли, содержащейся в обеспыливаемом газе;

– фракционную эффективность, определяющую полноту улавливания частиц определенных размеров; ее выражают процентом отделенных в пылеуловителе частиц пыли определенных размеров;

– остаточное содержание пыли в газе при выходе его из пылеуловителя;

– распределение остатка пыли в газе по размеру частиц или скорости витания.

Эффективность пылеулавливания. Основным показателем, характеризующим работу аппаратов очистки воздуха от пыли, является *коэффициент (степень) очистки (эффективность обеспыливания), %*.

Эффективность очистки η определяют по формуле

$$\eta = \frac{M_{\text{ул}}}{M_{\text{вх}}} \cdot 100\% = \frac{M_{\text{вх}} - M_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}}} \cdot 100\% = \frac{M_{\text{ул}}}{M_{\text{ул}} + M_{\text{вых}}} 100\%, \quad (1.1)$$

$M_{\text{вх}}$, $M_{\text{ул}}$ и $M_{\text{вых}}$ – масса частиц пыли, содержащихся в газах соответственно на входе в аппарат (т. е. до очистки), уловленных в аппарате и на выходе из аппарата после очистки.

При эксплуатации отдельных видов пылеулавливающих аппаратов (ПУА) возможен дисбаланс по газу. В этом случае расходы газа пересчитывают на стационарные условия ($t = 20^\circ$, $P = 101$ кПа или 760 мм рт. ст.), а коэффициент очистки (%) определяется по формуле

$$\eta = \frac{C_{\text{вх}} V_{\text{вх}} - C_{\text{вых}} V_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}} V_{\text{вх}}} 100\%, \quad (1.2)$$

где $C_{\text{вх}}$ и $C_{\text{вых}}$ – средние концентрации частиц в газах соответственно на входе в аппарат и на выходе из него (соответственно мг/м^3); $V_{\text{вх}}$ и $V_{\text{вых}}$ – объемный расход газов, поступающих в аппарат и выходящих.

Если объемные расходы газа до и после аппарата равны, то выражение примет вид

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}}\right) 100\%. \quad (1.3)$$

Если не происходит подсоса воздуха в аппарате, эффективность очистки определяют по формуле

$$\eta = \left(1 - \frac{M_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}}}\right) 100\%. \quad (1.4)$$

При наличии подсоса воздуха (например, в рукавных фильтрах) эффективность определяют по формуле

$$\eta = \left(1 - \frac{M_{\text{вых}} V_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}} V_{\text{вх}}}\right) 100\%. \quad (1.5)$$

Известно, что эффективность очистки для частиц пыли разных размеров неодинакова. Так как лучше улавливается крупная пыль, то коэффициент очистки газов часто определяют по *фракционной эффективности* – степени очистки газов от частиц определенного размера

$$\eta_{\phi} = [\Phi' - \Phi''(1 - \eta)] / \Phi', \quad (1.6)$$

Φ' , Φ'' – содержание фракций в газах соответственно на входе и выходе аппарата, %.

Зная фракционную степень очистки газов, можно определить общую эффективность аппарата:

$$\eta = \frac{\eta_{\phi 1} \Phi_1}{100} + \frac{\eta_{\phi 2} \Phi_2}{100} + \dots + \frac{\eta_{\phi n} \Phi_n}{100}. \quad (1.7)$$

Эффективность улавливания пыли может быть выражена в виде *коэффициента проскока* частиц (степени неполноты улавливания), который представляет собой отношение концентрации частиц за аппаратом к их концентрации перед ним. Его используют, когда надо оценить конечную запыленность или сравнить относительную запыленность газов на выходе из различных аппаратов. *Коэффициент проскока* $K_{\text{пр}}$ рассчитывают по формуле

$$K_{\text{пр}} = 1 - \eta. \quad (1.8)$$

Суммарную степень очистки газов η , достигаемую в нескольких последовательно установленных аппаратах, рассчитывают по формуле

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot \dots \cdot (1 - \eta_n), \quad (1.9)$$

где η_1 , η_2 , ..., η_n – степень очистки газов от пыли соответственно в первом, втором и n-ом аппарате.

Зная фракционную степень очистки газов, можно определить общую эффективность аппарата:

$$\eta = \frac{\eta_{\phi 1} \Phi_1}{100} + \frac{\eta_{\phi 2} \Phi_2}{100} + \dots + \frac{\eta_{\phi n} \Phi_n}{100}. \quad (1.10)$$

Эффективность очистки – важнейшая характеристика аппарата. На нее ориентируются при выборе пылеулавливающего оборудования в соответствии с допустимым остаточным содержанием пыли в очищаемом воздухе.

Сравнивая два аппарата, сопоставляют проценты пропущенной пыли (т. е. проскок пыли). Если эффективность одного аппарата 99%, а другого 98%, то они пропускают соответственно 1% и 2% пыли. Следовательно, эффективность первого аппарата в два раза выше, чем второго.

Гидравлическое сопротивление. Важной характеристикой пылеуловителей является гидравлическое сопротивление (Δp), которое определяется как разность давлений газового потока на входе ($P_{\text{вх}}$) и на выходе ($P_{\text{вых}}$) из аппарата.

Величину гидравлического сопротивления находят экспериментально или рассчитывают по формуле

$$\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}} = \xi \rho v^2 / 2,$$

где ρ и v – плотность и скорость газа в расчетном сечении аппарата, соответственно; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Если в процессе очистки газа, гидравлическое сопротивление изменяется (обычно увеличивается), то необходимо регламентировать ($\Delta p_{\text{нач}}$) и конечное ($\Delta p_{\text{кон}}$) значения. При достижении равенства $\Delta p = \Delta p_{\text{кон}}$ процесс очистки необходимо прекратить и провести очистку пылеулавливающего аппарата. Особенное значение это имеет для фильтров.

К общим параметрам пылеуловителей относится *производительность* по очищаемому газу и *энергоёмкость*, определяемую величиной затрат энергии на очистку 1000 м^3 газа.

Производительность характеризуется количеством воздуха, которое очищается за 1 час. Аппараты, в которых воздух очищается при прохождении через фильтрующий слой, характеризуются удельной воздушной нагрузкой, т. е. количеством воздуха, которое проходит через 1 м^2 фильтрующей поверхности за 1 час.

Стоимость очистки является важнейшим показателем, так как характеризует экономичность очистки. Она зависит от многих факторов: капитальных затрат на оборудование, эксплуатационных расходов и др. Стоимость очистки воздуха в различных аппаратах значительно отличается. Как правило, более эффективная очистка обходится значительно дороже.

Выбор аппарата для улавливания взвешенных частиц из газа и его расчет проводятся на основе физико-химических характеристик частиц и газового потока. К основным характеристикам частиц относятся: истинная и насыпная плотность, дисперсность, адгезионные и абразивные свойства, гигроскопичность и растворимость, электрическая заряженность частиц, способность аэрозолей к самовозгоранию и образованию взрывоопасных смесей с воздухом. Основными параметрами запыленного газового потока являются: объемный или массовый расход, запыленность, температура, давление и влажность.

При проведении расчетов эффективности очистки газов следует учитывать тот факт, что реальные газы характеризуются высокими коэффициентами объемного расширения. В технических расчетах для ряда характеристик очищаемых газов, таких как плотность, объемный расход, запыленность или концентрация загрязняющих веществ пользуются значениями этих величин при нормальных условиях ($T_0 = 273 \text{ К}$, $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$.) Пересчет характеристик пылегазового потока, полученных при нормальных условиях, на рабочие условия производится по следующим формулам:

1. Плотность сухих газов при нормальных условиях (кг/м^3):

$$\rho_{0c} = \frac{M}{22,4}, \quad (1.11)$$

$$M = 0,01(a_1M_1 + a_2M_2 + \dots a_nM_n), \quad (1.12)$$

где M , M_1 , M_2 , M_n – молекулярные массы смеси газов и отдельных компонентов, кг/моль ; a_1 , a_2 , a_n – объемное содержание компонентов в смеси, %.

2. Плотность сухих газов при рабочих условиях (кг/м^3):

$$\rho_c = \rho_{0c} \frac{273 (p_{\text{бар}} \pm p_r)}{(273 + T_r) \cdot p_0}, \quad (1.13)$$

где ρ_{0c} – плотность сухих газов при нормальных условиях, кг/м^3 ; $p_{\text{бар}}$ – барометрическое давление газов, кПа ; T_r – рабочая температура газов; p_r – избыточное давление газа, кПа ; $p_0 = 101,3 \text{ кПа}$ – давление при нормальных условиях.

3. Плотность влажных газов при нормальных условиях (кг/м^3):

$$\rho_0 = \frac{(\rho_{0c} + d) \cdot 0,804}{(0,804 + d)}, \quad (1.14)$$

где d – содержание водяного пара в газах (влажность), кг/м^3 ;

$$\rho_{0\text{H}_2\text{O}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{22,4} = \frac{18}{22,4} = 0,804 \text{ кг/м}^3.$$

4. Плотность влажных газов при рабочих условиях (кг/м^3):

$$\rho = \frac{(\rho_{0c} + d) \cdot 273 \cdot (p_{\text{бар}} \pm p_r)}{(1 + d / 0,804) (273 + T_r) \cdot 101,3}. \quad (1.15)$$

5. Объемный расход влажных газов при рабочих условиях, м³/с

$$V = V_0 \frac{(273 + T_r) \cdot 101,3}{273 (p_{\text{бар}} \pm p_r)}, \quad (1.16)$$

где V_0 – объем влажных газов при нормальных условиях, м³/с.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Концентрация пыли, замеренная на входе в пылеулавливающий аппарат и на выходе из него при рабочих условиях, составила соответственно $Z_1 = 5,2$ г/м³ и $Z_2 = 295$ мг/м³. Определить с какой эффективностью η работает пылеуловитель. При расчете считать, что температура газов не изменяется, подсос воздуха в пылеуловитель достигает 5%.

Задача 2. Концентрация пыли на входе в пылеуловитель составляет 40 г/м³, эффективность работы пылеуловителя $\eta = 73\%$. На сколько нужно увеличить эффективность пылеулавливающего аппарата, чтобы концентрация загрязняющего вещества на выходе из пылеуловителя не изменилась, если концентрация загрязняющего вещества перед очисткой увеличилась соответственно в 2 – 3 – 4 – 5 раз?

Задача 3. Пылегазовый поток, отходящий от шахтной печи с концентрацией пыли, равной $Z_1 = 30$ г/м³, необходимо очищать от пыли до остаточной запыленности $Z_2 = 7$ мг/м³. Для очистки газов от пыли предусмотрена система, состоящая из трех последовательно включенных пылеуловителей (грубой, полутонкой и тонкой очистки). Эффективность пылеулавливания аппарата грубой очистки составляет $\eta_1 = 68\%$. Оценить, какие должны быть эффективности пылеулавливания аппарата полутонкой очистки η_2 при условии, что эффективность аппарата тонкой очистки η_3 будет составлять 99,6%.

Задача 4. Определить, сколько одинаковых газоочистных аппаратов, работающих с эффективностью улавливания равной $\eta = 78\%$ каждый, следует установить последовательно для того, чтобы концентрация загрязняющего вещества уменьшилась от $C_1 = 6$ г/м³ до $C_2 = 16$ мг/м³. Подсосами воздуха в газоочистных аппаратах можно пренебречь.

Задача 5. Для очистки газов агломерационных машин используется электрофильтр, обеспечивающий очистку газов от концентрацией пыли равной $Z_1 = 20 \text{ г/м}^3$ до остаточной запыленности равной $Z_2 = 85 \text{ мг/м}^3$. Оценить, сколько батарейных циклонов, имеющих эффективность для улавливания этих пылей равную $\eta_{\text{бц}} = 80\%$, следует установить последовательно вместо электрофильтра для достижения той же эффективности, что и электрофильтр. Изменением дисперсного состава пыли при очистке в батарейных циклонах можно пренебречь. Как будет изменяться концентрация пыли после каждого батарейного циклона?

Задача 6. В двухступенчатой системе очистки аппарат первой ступени работает с эффективностью $\eta_1 = 65\%$, а аппарат второй ступени – с эффективностью $\eta_2 = 92\%$. При этом обеспечиваются необходимые условия очистки газов. Оцените, на сколько нужно повысить эффективность очистки газов в аппарате второй ступени, если аппарат первой ступени вышел из строя.

Задача 7. По технологическим условиям концентрация пыли в газах после очистки не должна превышать 20 мг/м^3 . Пылеулавливающая установка работает со следующими параметрами: объемный расход очищаемых газов составляет $V_1 = 5 \text{ м}^3/\text{с}$, температура газов $T_1 = 150^\circ\text{C}$, эффективность пылеулавливания $\eta_1 = 95\%$, концентрация пыли на выходе из пылеуловителя $Z_2 = 15 \text{ мг/м}^3$. Оцените, будет ли отвечать технологическим условиям работа пылеуловителя, если температура очищаемых газов снизится до $20 - 50 - 80 - 120^\circ\text{C}$. Изменением температуры газов в пылеуловителе и давления или разрежения газов можно пренебречь.

2. СУХАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГАЗА

Сухие механические пылеуловители можно разделить на группы:

1) пылесадительные камеры, принцип работы которых основан на действии силы тяжести (гравитационной силы);

2) инерционные пылеуловители, принцип работы которых основан на действии силы инерции;

3) циклоны (батарейные циклоны), вращающиеся пылеуловители, принцип работы которых основан на действии центробежной силы.

К общим достоинствам сухих механических пылеуловителей относятся: простота конструкции и безотказность работы при обычных и высоких температурах; кроме того, в пылеуловителях первых двух групп обеспечивается возможность очистки химически активных газов. В сухих механических пылеуловителях можно извлекать из газов чистые продукты – пыли в сухом виде и жидкости в неразбавленном состоянии.

2.1. Пылесадительные камеры

Для улавливания крупных частиц, размером 50–100 мкм, используют пылесадительные камеры (рис. 2.1), газоходы, в которых частицы пыли осаждаются под действием силы тяжести.

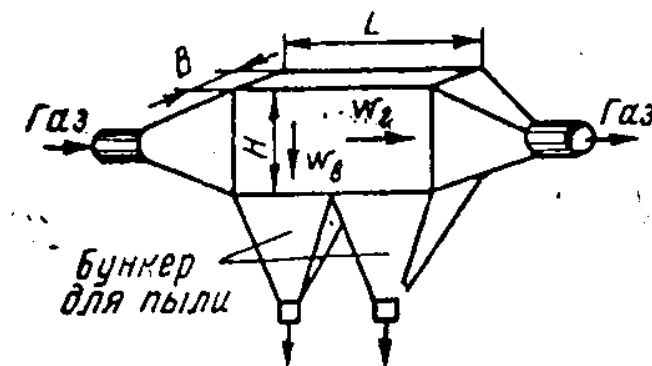


Рис. 2.1. Схема пылесадительной камеры

Отделение пыли в пылесадительной камере происходит при движении через нее запыленного газа с такой малой скоростью, что частицы пыли успевают осесть под действием силы тяжести прежде, чем газ вынесет их из камеры.

Пылеосадительная камера используется для предварительной грубой очистки газов и представляет собой прямоугольный короб, в нижней части которого имеется бункер для сбора пыли, ее гидравлическое сопротивление составляет 50–150 Па. Степень очистки газа в пылеосадительной камере не превышает 40–50% об.

2.1.1. Методика расчета пылеосадительных камер.

При приближенном расчете осадительных камер принимают, что частицы пыли, поступившие в камеру длиной L , шириной B , высотой H , равномерно движутся вдоль нее со скоростью ω_{Γ} , равной скорости движения газового потока, и одновременно опускаются вниз со скоростью ω_{oc} , равной скорости осаждения (скорости витания).

Для осаждения частица пыли должна достичь дна раньше, чем газовый поток вынесет ее из камеры. Время ее осаждения (c):

$$t_{oc} = H / \omega_{oc} \quad (2.1)$$

не должно превышать времени ее пребывания в пылеосадительной камере $t_{oc} \leq t_{\Gamma}$:

$$t_{\Gamma} = L / \omega_{\Gamma}. \quad (2.2)$$

Время осаждения пылевой частицы будет тем меньше, чем меньше будет высота камеры. Поэтому внутри камеры часто устанавливаются параллельные горизонтальные или наклонные перегородки (полки), на которых осаждается пыль при движении газа между перегородками. Таким путем увеличивается поверхность осаждения и достигается более равномерное распределение газа по ширине камеры (рис. 2.2).

Уменьшение высоты камеры приведет к уменьшению площади поперечного сечения камеры, и, следовательно, к увеличению скорости газового потока, что сократит время пребывания частицы (t_{Γ}) в камере (c):

$$t_{\Gamma} = V_{\kappa} / V_{\Gamma} = L \cdot B \cdot H / V_{\Gamma}, \quad (2.3)$$

где V_{κ} – объем камеры, м^3 ; V_{Γ} – объемный расход газов, $\text{м}^3/\text{с}$; L – длина камеры, м; B – ширина камеры, м; H – высота камеры, м.

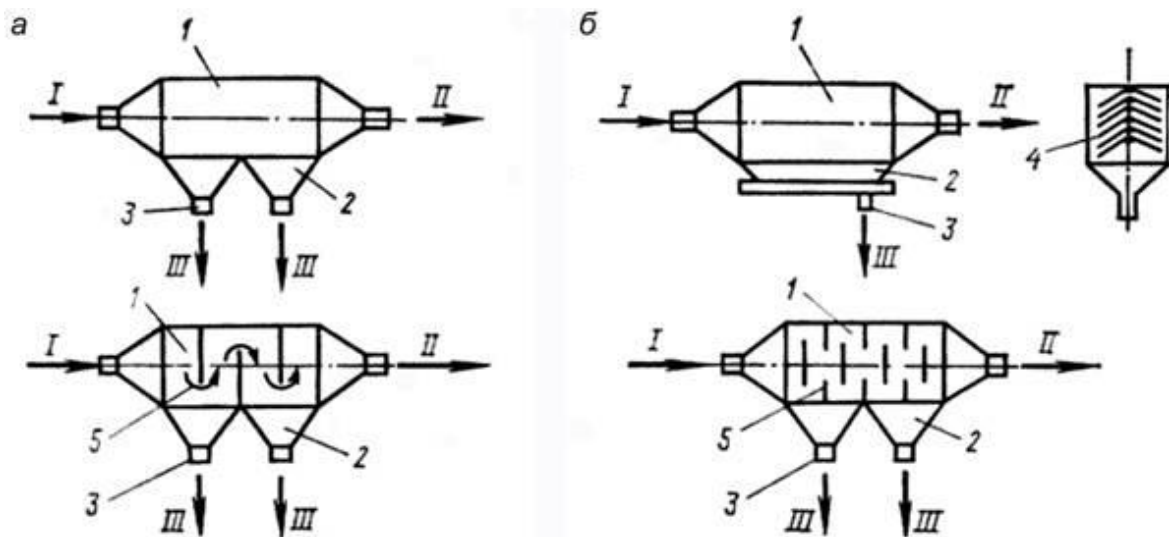


Рис. 2.2. Схемы горизонтальных пылеосадительных камер:
а – полая; *б* – с вертикальными перегородками;
I – запыленный газ; *II* – очищенный газ; *III* –пыль;
 1 – корпус, 2 – бункер; 3 – штуцер для удаления пыли;
 4 – перегородки; 5 – вертикальные перегородки

Для определения скорости осаждения ($\omega_{ос}$, м/с) используется формула

$$\omega = \frac{d^2(\rho_n - \rho_r) g}{18\mu}, \quad (2.4)$$

где d – диаметр частицы, м; ρ_n – плотность частицы пыли, кг/м³; ρ_r – плотность окружающей частицу газовой среды, кг/м³; μ – динамический коэффициент вязкости газа, (Па·с).

Формула (2.4) выводится из закона Стокса, описывающего ламинарный режим движения частиц в однородной, не ограниченной стенками вязкой среде, каковым и принимается процесс осаждения частиц пыли в осадительной камере.

Пределы применимости формулы (2.4) ограничивает критерий Рейнольдса, определяемый размером частицы d и скорости ее движения в поперечном направлении:

$$R_e = \frac{\omega_{ос} \cdot d \cdot \rho_r}{\mu}. \quad (2.5)$$

Численное значение $R_e \leq 2$ выявляет область ламинарного режима движения, а значит и правомерность применения формулы (2.4).

Решая уравнение (2.4) относительно диаметра частицы, получим:

$$d = \sqrt{\frac{18\mu\omega_{oc}}{(\rho_{п} - \rho_{г})g}} \quad (2.6)$$

Из полученного выражения следует, что при постоянной плотности $\rho_{г}$, $\rho_{п}$ и вязкости среды μ , каждой скорости осаждения соответствует свой размер пылевых частиц. Существуют номограммы для определения скорости осаждения частиц пыли (рис. 2.3).

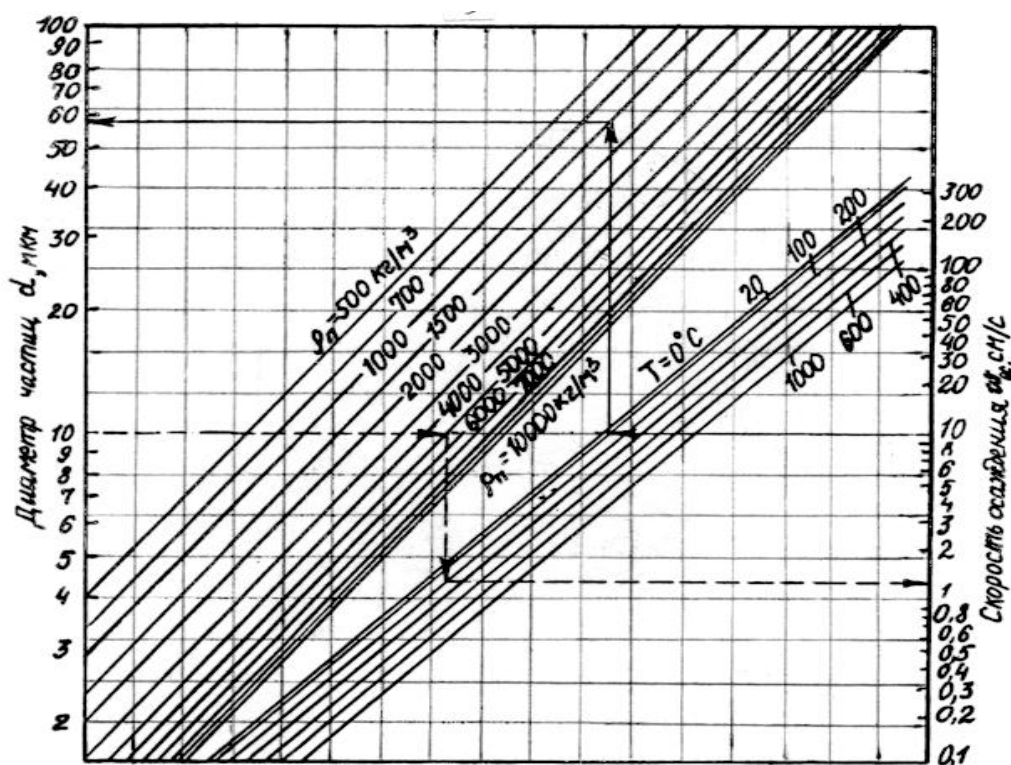


Рис. 2.3. Номограмма для определения скорости витания в воздухе частиц пыли размером 2–100 мкм

Из вышеприведенных выражений можно определить предельное количество газа, которое можно пропустить через пылесадительную камеру длиной L , шириной B , при условии осаждения частиц пыли диаметром d . В этом случае $t_{oc} \leq t_{г}$, тогда $H / \omega_{oc} \leq L / \omega_{г}$.

Выражая скорость газа через расход $V_{г}$, деленный на площадь поперечного сечения камеры ($H \cdot B$), получаем:

$$H / \omega_{oc} \leq (L \cdot H \cdot B) / V_{г} \quad (2.7)$$

Подставляем выражение (2.4) вместо ω_{oc} и получаем, что

$$V_{\Gamma} = L \cdot B \cdot \frac{d^2 \cdot (\rho_{\Pi} - \rho_{\Gamma}) g}{18\mu}. \quad (2.8)$$

Эффективность пылеосадительных камер определяется отношением h / H , где h – путь, который пройдет частица за время пребывания в камере (t_{Γ}) при скорости ω_{oc} : $h = \omega_{oc} \cdot t_{\Gamma}$.

Если величина h больше или равна величине H , то все частицы диаметром d (и более крупные), имеющие скорость осаждения ω_{oc} , улавливаются в камере.

2.1.2. Пример расчета пылеосадительной камеры

Задача 1. Какую высоту надо дать слою газа между полками пылеосадительной камеры (рис. 2.4), чтобы осели частицы пыли диаметром $d = 4$ мкм при расходе печного газа $V_0 = 0,96$ м³/с? Длина камеры $L = 4,4$ м, ширина $B = 3,5$ м, общая высота $H = 3,9$ м. Средняя температура газа в камере $T = 190^{\circ}\text{C}$, коэффициент вязкости газа при этой температуре $\mu = 26,2 \cdot 10^{-6}$ (Па·с), плотность пыли и плотность газа $\rho_{\Pi} = 3890$ и $\rho_{\Gamma} = 0,76$, соответственно, кг/м³. Подтвердить правильность применения формулы Стокса (число Рейнольдса).

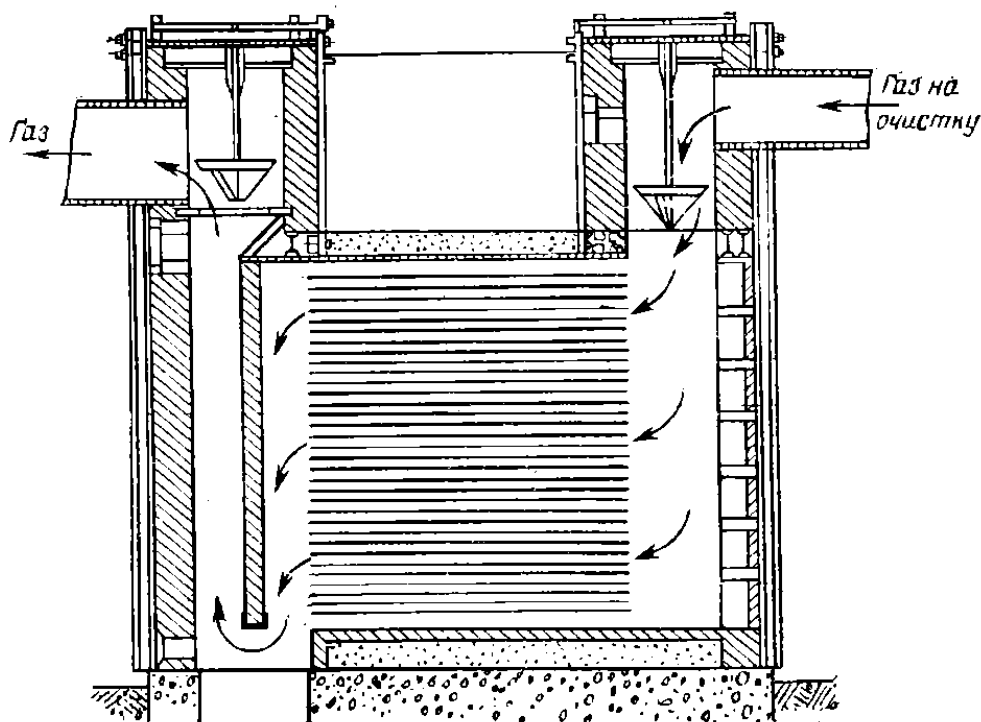


Рис. 2.4. Многополочная пылеосадительная камера

Решение:

1. Определяем расход газа при заданных (рабочих) условиях:

$$V_{\Gamma} = \frac{V_0(273 + T)}{273} = \frac{0,96 (273 + 190)}{273} = 1,63 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Определяем линейную скорость газа (пренебрегая толщиной полок):

$$\omega_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma}}{H \cdot B} = \frac{1,63}{3,9 \cdot 3,5} = 0,119 \text{ м/с}.$$

3. Находим время пребывания газа в камере:

$$t_{\Gamma} = \frac{L}{\omega_{\Gamma}} = \frac{4,4}{0,119} = 37 \text{ с}.$$

4. Скорость осаждения шарообразных частиц (ρ_{Γ} уместно пренебречь):

$$\begin{aligned} \omega_{\text{ос}} &= \frac{d^2(\rho_{\text{п}} - \rho_{\Gamma}) g}{18\mu} = \\ &= \frac{(4 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (3890 - 0,76) \cdot 9,8}{18 \cdot 26,2 \cdot 10^{-6}} = 0,0014 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

5. Находим расстояние между полками:

$$h = \omega_{\text{ос}} \cdot t_{\Gamma} = 0,0013 \cdot 37 = 0,052 \text{ м}.$$

6. Проверяем правильность применения формулы Стокса:

$$\text{Re} = \frac{\omega_{\text{ос}} \cdot d \cdot \rho_{\Gamma}}{\mu} = \frac{0,0013 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,76}{26,2 \cdot 10^{-6}} = 0,00017 < 2.$$

Задача 2. Успеют ли осесть частицы пыли диаметром $d = 20$ мкм в пылеосадительной камере длиной $L = 6,0$ м, шириной $B = 4,0$ м, высотой $H = 0,7$ м при прохождении газа объемом $V_0 = 0,6$ м³/с, средняя температура которого в камере $T = 90$ °С (коэффициент вязкости $\mu = 21,9 \cdot 10^{-6}$ (Па·с), плотность пыли и плотность газа $\rho_{\text{п}} = 4000$ и $\rho_{\Gamma} = 0,97$ соответственно, кг/м³).

Решение:

Чтобы частицы пыли осели в камере необходимо, чтобы время пребывания газа в ней превышало время, за которое частицы пыли осядут со скоростью ω_{oc} .

1. Определяем расход газа при заданных условиях:

$$V_{\Gamma} = \frac{V_0(273 + T)}{273} = \frac{0,6(273 + 90)}{273} = 0,798 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Находим линейную скорость газа:

$$\omega_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma}}{H \cdot B} = \frac{0,798}{4,0 \cdot 0,7} = 0,285 \text{ м/с}.$$

3. Определяем время пребывания газа в камере:

$$t_{\Gamma} = \frac{L}{\omega_{\Gamma}} = \frac{6,0}{0,285} = 21,1 \text{ с}.$$

4. Находим скорость осаждения частиц пыли:

$$\omega_{oc} = \frac{d^2(\rho_{п} - \rho_{г})g}{18\mu} = \frac{(20 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (4000 - 0,97) \cdot 9,8}{18 \cdot 20,9 \cdot 10^{-6}} = 0,0417 \text{ м/с}.$$

5. Рассчитываем время осаждения частиц пыли:

$$t_{oc} = H/\omega_{oc} = 0,7 / 0,0398 = 16,8 \text{ с};$$

$$t_{oc} = 16,8 \text{ с} < t_{\Gamma} = 21,1 \text{ с},$$

значит, частицы пыли успеют осесть в пылеосадительной камере.

2.1.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить время прохождения расхода газа V_0 , м³/с через камеру длиной L , м шириной B , м высотой H , м и скорость осаждения частиц диаметром d , мкм при температуре газа в камере T , °С, плотности пыли $\rho_{п}$ и плотности газа $\rho_{г}$ (кг/м³). Подтвердить правильность применения формулы Стокса. Скорость осаждения частиц определить и по номограмме (рис. 2.3). Исходные данные приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исходные данные

№ вар.	Диаметр пылевых частиц, d , мкм	Расход газа, V_0 , м ³ /с	Длина, L , м	Ширина, B , м	Высота, H , м	Температура газа в камере, T , °С	Вязкость газа, $\mu \cdot 10^{-6}$ (Па·с)/м ²	Плотность пыли, $\rho_{п}$, кг/м ³	Плотность газа, $\rho_{г}$, кг/м ³
1	26	3,76	4,9	3,5	4,0	110	22,8	6300	0,92
2	43	4,12	5,2	4,0	4,3	190	26,4	4750	0,76
3	56	6,84	6,0	3,8	5,2	60	32,0	2650	0,54
4	35	3,41	3,8	2,7	4,2	270	29,4	1250	0,65
5	48	4,88	4,3	3,3	3,8	450	34,5	3600	0,49
6	46	5,62	4,7	3,9	2,0	500	36,2	770	0,38
7	39	3,89	5,5	3,8	3,5	115	23,0	650	0,91
8	52	7,15	6,3	4,1	3,0	40	28,2	1500	0,68
9	67	6,33	3,9	3,2	4,5	87	21,8	3840	0,98
10	32	4,95	5,9	4,2	3,5	118	23,2	4600	0,90
11	35	5,80	4,1	3,1	3,2	550	30,5	3650	0,55
12	45	3,84	4,4	3,4	2,1	400	34,2	1770	0,48

Задача 2. Какую высоту надо дать слою газа между полками пылевой камеры, чтобы осели частицы пыли диаметром d , мкм при расходе печного газа V_0 , м³/с? Длина камеры L , м, ширина B , м, общая высота H , м. Средняя температура газа в камере T , °С, коэффициент вязкости газа при этой температуре $\mu \cdot 10^{-6}$ (Па·с), плотность пыли и плотность газа $\rho_{п}$ и $\rho_{г}$ соответственно, кг/м³. Исходные данные приведены в табл. 2.2.

Скорость осаждения частиц определить и по номограмме (см. рис. 2.3)

Таблица 2.2

Исходные данные

№ вар.	Диаметр пылевых частиц, d , мкм	Расход газа, V_0 , м ³ /с	Длина, L , м	Ширина, B , м	Высота, H , м	Температура газа в камере, T , °С	Вязкость газа, $\mu \cdot 10^{-6}$ (Па·с)/м ²	Плотность пыли, $\rho_{п}$, кг/м ³	Плотность газа, $\rho_{г}$, кг/м ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	44	4,96	4,4	3,5	3,9	190	26,2	890	0,76
12	19	5,55	4,4	3,5	5,0	230	27,8	1380	0,70
13	24	6,23	4,6	4,2	4,8	90	21,9	7500	0,97
14	48	7,42	3,9	3,1	4,5	70	21,0	4340	1,03

Окончание табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	14	4,63	4,1	3,5	4,6	120	23,3	2050	0,89
16	10	3,77	4,5	3,4	3,8	50	34,5	8070	0,49
17	38	5,13	3,4	2,8	5,0	330	31,1	3300	0,58
18	22	6,00	3,3	2,0	2,8	40	33,8	5600	0,51
19	35	3,32	5,6	4,1	3,6	130	23,7	1230	0,88
20	47	7,55	6,2	4,9	6,0	360	32,0	980	0,54
21	34	5,50	4,3	4,0	3,8	190	18,9	5500	0,74
22	56	4,55	3,9	3,0	4,0	70	20,0	3340	1,00

Задача 3. Рассчитать геометрические размеры пылеосадительной камеры (L , B , H), соответствующие условиям осаждения частиц пыли диаметром d , мкм при известном расходе запыленного газа V_o , м³/с. Температура газа в камере T , °С, плотность пыли и плотность газа: $\rho_{п}$ и $\rho_{г}$, кг/м³. Размеры ограничить: $L < 5$ м, $B < 3$ м, $H < 4$ м, при необходимости предусмотреть горизонтальные полки. Исходные данные приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Исходные данные

№ вар.	Расход запыленного газа, V_o , м ³ /с	Диаметр частиц пыли, d , мкм	Температура газа в камере, T , °С	Плотность пыли, $\rho_{п}$, кг/м ³	Плотность газа, $\rho_{г}$, кг/м ³
1	2	3	4	5	6
1	2,83	45	518	4600	0,90
2	1,67	32	370	1250	0,65
3	3,45	47	40	1500	0,68
4	5,91	58	110	7500	0,92
5	4,76	71	500	6000	0,38
6	1,78	35	360	3400	0,54
7	2,02	44	450	3800	0,49
8	4,09	75	30	3220	0,88
9	3,55	49	360	1500	0,54
10	2,63	34	40	7800	0,68
11	2,05	29	130	3050	0,88
12	3,15	54	110	2800	0,92
13	0,54	33	110	4200	0,92
14	1,78	66	120	4300	0,90
15	3,46	72	360	2400	0,54
16	4,91	30	130	5600	0,88
17	4,85	37	120	1800	0,90

1	2	3	4	5	6
18	1,12	50	240	5300	0,68
19	2,02	45	90	2750	0,96
20	4,48	32	118	3300	0,90
21	1,64	45	260	2400	0,55
22	5,00	37	350	4800	0,84

Контрольные вопросы

1. На какие группы можно разделить сухие механические пылеуловители?
2. Перечислите достоинства сухих механических пылеуловителей.
3. Опишите принцип работы пылеосадительной камеры.
4. Что из себя представляет пылеосадительная камера?
5. Для улавливания каких частиц пригодна пылеосадительная камера?
6. Для чего в пылеосадительной камере устанавливают горизонтальные или наклонные полки?

2.2. Циклоны

Очистка газа в циклоне основана на использовании центробежных сил, возникающих при вращении газового потока внутри корпуса циклона и представляет собой сложный аэродинамический процесс, при котором запыленный и очищенный газ движутся вихреобразно в противоположных направлениях.

Запыленный газ со значительной скоростью (20–25 м/с) поступает по касательной в корпус циклона (рис. 2.5). Дополнительно благодаря наклону входного патрубка и винтообразной верхней крышке создается направленное вращение газового потока вниз. При этом частицы пыли под действием центробежной силы отбрасываются на стенки корпуса и под влиянием движущегося в осевом направлении вращающегося потока газа и сил тяжести перемещаются по направлению к выходному отверстию циклона, откуда выводятся.

Газ, освобожденный от пыли, продолжая вращаться, совершает поворот на 180°, поднимается кверху и выводится через выхлопную трубу.

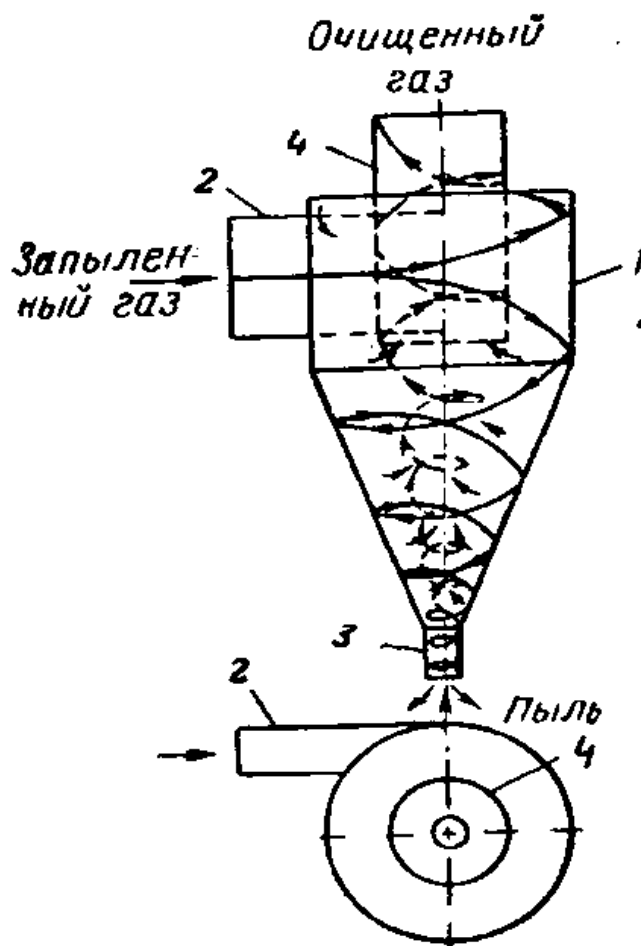


Рис. 2.5. Циклон:
 1 – корпус; 2 – входной патрубок;
 3 – пылеотводящий патрубок; 4 – выхлопная труба

При расчетах скорость частиц пыли в циклоне принимается равной скорости вращения газового потока.

Степень очистки газа от пыли в циклонах зависит от геометрических размеров и формы аппарата, свойств пыли (в первую очередь от склонности ее к слипанию), скорости и степени турбулентности вращающегося потока газа и достигает 70–95%.

Эффективность работы циклона растет с увеличением скорости газа, размера и плотности частиц пыли и уменьшается с увеличением вязкости газа и диаметра циклона.

В промышленности применяют циклоны различных типов: НИИОГАЗ ЦКТИ, ЛИОТ, СИОТ и ВЦНИИОТ. Наибольшее распространение получили цилиндрические и конические циклоны НИИОГАЗ. К цилиндрическим циклонам НИИОГАЗ относятся аппараты типа ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У (укороченный) и ЦН-24 (рис. 2.6, 2.7, табл. 2.4).

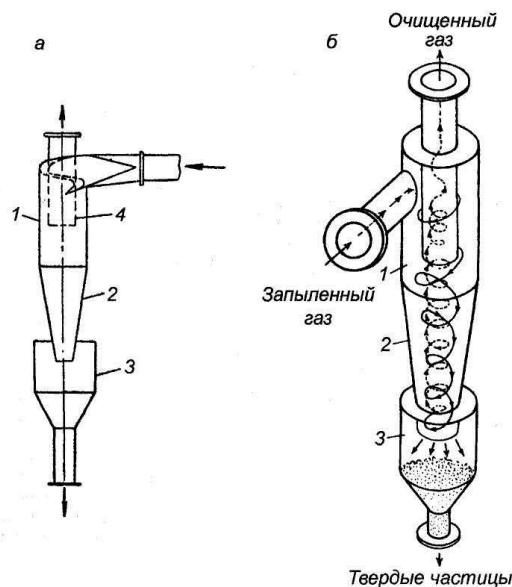


Рис. 2.6. Циклон конструкции научно-исследовательского центра по санитарной и промышленной очистке газов (НИИОГАЗ):

1 – корпус; 2 – днище; 3 – разгрузочный

К коническим циклонам НИИОГАЗ относятся аппараты типов СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34М (рис. 2.8, табл. 2.5). Они отличаются от циклонов типа ЦН длиной конической части, наличием спирального входного. Циклон СК-ЦН-34М применяют для улавливания пылей с высокими абразивными свойствами или с высокой слипаемостью.

Потери давления в этом циклоне значительно выше, чем в других конических циклонах. Цилиндрические циклоны относятся к высокопроизводительным, а конические – к высокоэффективным аппаратам.

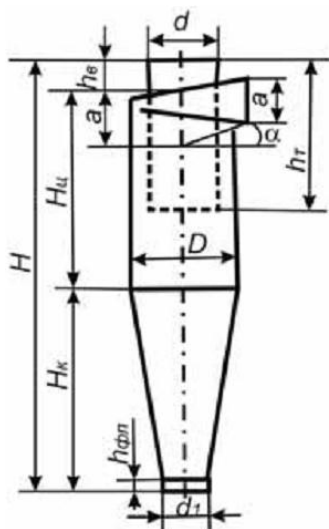


Рис. 2.7. Циклон ЦН

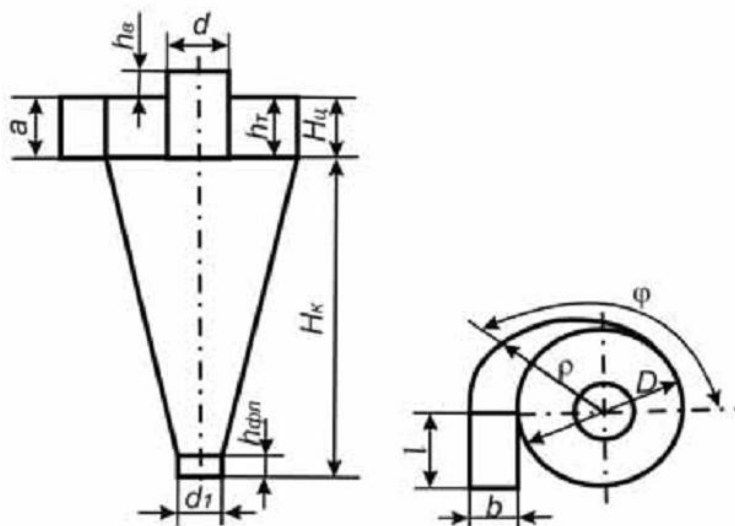


Рис. 2.8. Циклон СДК-ЦН

Таблица 2.4

Размеры циклонов типа ЦН в долях от диаметра циклона D

Показатель	Тип циклона			
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24
Внутренний диаметр: – выхлопной трубы, d – пылевыпускного отверстия, d_1	0,59 0,3–0,4	0,59 0,3–0,4	0,59 0,3–0,4	0,59 0,3–0,4
Ширина входного патрубка, b	0,2	0,2	0,2	0,2
Длина входного патрубка, l	0,6	0,6	0,6	0,6
Высота установки фланца, $h_{фл}$	0,1	0,1	0,1	0,1
Угол наклона крышки и входного патрубка циклона, α , град	11	15	15	24
Высота: – входного патрубка, a – выхлопной трубы, h_T – цилиндрической части, $H_{ц}$ – конической части, H_k – внешней части выхлопной трубы, h	0,48 1,56 2,06 2,00 0,30	0,66 1,74 2,26 2,00 0,30	0,66 1,50 1,51 1,50 0,30	1,11 2,11 2,11 1,75 0,40
Общая высота циклона, H	4,38	4,56	3,31	4,26

Таблица 2.5

Размеры циклонов типа СДК-ЦН в долях от диаметра циклона D

Показатель	Тип циклона		
	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
Внутренний диаметр цилиндрической части, D	До 300 мм	До 300 мм	До 400 мм
Высота: – цилиндрической части, $H_{ц}$ – конической части, H_k	0,535 3,0	0,515 2,110	0,4 2,6
Внутренний диаметр: – выхлопной трубы, d – пылевыпускного отверстия, d_1	0,334 0,334	0,340 0,229	0,22 0,18
Ширина входного патрубка, b	0,264	0,214	0,18
Высота: – внешней части выхлопной трубы, h_b – размещения фланца, $h_{фл}$ – входного патрубка, a	0,2–0,3 0,1 0,535	0,515 0,1 0,2–0,3	0,3 0,1 0,4
Длина входного патрубка, l	0,6	0,6	0,6
Высота заглибления выхлопной трубы, h_T	0,535	0,515	0,4

2.2.1. Методика расчета циклонов НИИОГАЗ. Расчет циклонов основан на использовании эмпирических вероятностных функций, описывающих фракционные эффективности пылеулавливания для каждого аппарата, и представляется двумя методами аналитически и графоаналитическим. На основании обобщенных теоретических зависимостей создан банк данных для параметров фракционного коэффициента проскока ряда различных циклонов.

При использовании аналитического метода общую техническую эффективность циклонов определяют с помощью переходных коэффициентов в зависимости от параметров газа и параметров пыли.

Графоаналитический метод определения эффективности циклона основан на использовании номограмм, построенных для каждого циклона. Действительный размер частиц пересчитывается на условный диаметр, с учетом среднелогарифмического разброса σ .

Достоинством данного метода расчета эффективности циклона является его простота его использования в проектной практике, а также то, что в расчет введен интегральный учет влияния естественной турбулентности движения потока в циклоне. Таблицы и номограммы составлены для распространенных марок циклонов.

Для расчета конструкции циклонов необходимы следующие исходные данные:

1. Плотность газа при рабочих условиях ρ_r , кг/м³, находят по формуле:

$$\rho_r = \rho_0 \frac{273(p_{\text{бар}} \pm p_g)}{(273 + T_r) \cdot p_{\text{бар}}}, \quad (2.9)$$

где ρ_0 – плотность газов при нормальных условиях; T_r – температура газов на входе в циклон, °С; $p_{\text{бар}}$ – барометрическое давление, Па; p_g – избыточное давление (+) или разрежение (–) газа при входе в циклон, Па.

2. Количество очищаемого газа при рабочих условиях V_r , м³/с.

3. Динамическая вязкость газа при рабочей температуре μ , Па·с.

4. Дисперсный состав пыли, который в вероятностно-логарифмических координатах аппроксимируется прямой линией (рис. 2.9) и задается двумя параметрами:

– d_m^* – медианным размером*;

– $\lg \sigma_{\Pi}$ – среднеквадратичным отклонением функции распределения.

* Медианный размер – размер частицы пыли, при котором суммарная масса всех частиц размером более d_m равна суммарной массе всех частиц менее d_m

5. Запыленность газа Z , г/м³.
6. Плотность частиц $\rho_{п}$, кг/м³.
7. Требуемая эффективность очистки газа η , %.

Циклон рассчитывается в следующем порядке:

1. Выбирается тип циклона, по табл. 2.6 определяется оптимальная скорость газа в аппарате $\omega_{\text{опт}}$. Скорость газа в циклоне имеет для каждого типа оптимальное значение $\omega_{\text{опт}}$, м/с, от которого она не должна отклоняться более чем на $\pm 15\%$. При скоростях $\omega_{\text{ц}}$, выходящих за указанные пределы в большую сторону, возрастает расход энергии, в меньшую сторону – снижается эффективность [4].

2. Вычисляется диаметр циклона D (м) при оптимальной скорости.

Скорость газа в циклоне равна расходу газа при рабочих условиях, отнесенному к круглому поперечному сечению циклона:

$$\omega_{\text{ц}} = \frac{V_{\Gamma}}{\pi D^2 / 4}. \quad (2.10)$$

Отсюда

$$D = \sqrt{V_{\Gamma} / 0,785 \cdot \omega_{\text{опт}}}, \quad (2.11)$$

где $\omega_{\text{ц}}$ – скорость газа в циклоне выбирается из табл. 2.6.

Таблица 2.6

Параметры циклонов типа ЦН и СДК-ЦН

Параметр	Тип циклона						
	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
$\omega_{\text{опт}}$, м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0
$d_{50}^{T^{**}}$, мкм	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13
$\lg \sigma_{\eta}^{***}$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340

Примечание. d_{50}^T и $\lg \sigma_{\eta}$ характеризуют кривые парциальной эффективности циклонов. Приведенные данные соответствуют следующим стандартным условиям работы циклонов: средняя скорость газа в циклоне $\omega = 3,5$ м/с; диаметр циклона $D = 0,6$ м; плотность частиц $\rho_{п} = 1930$ кг/м³; динамическая вязкость газа $\mu = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с (Н·с/м²).

** d_{50}^T – диаметр частиц, улавливаемых на 50% в стандартных условиях.

*** σ_{η} – величина, характеризующая дисперсию величины $\lg \sigma_{\eta}$ в функции фракционной степени очистки $\eta_{\phi}(d)$.

3. Вычисленный D округляется до диаметра ближайшего типового циклона. Согласно ГОСТ 9617–67, для циклонов приняты следующие размеры диаметров, мм: 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000; 2400; 3000.

4. Вычисляется действительная скорость газа в циклоне по формуле (2.10).

Полученная скорость не должна иметь отклонение более чем на 15% от оптимальной. При скоростях $\omega_{ц}$, выходящих за указанные пределы в большую сторону, превышает допустимый расход энергии, в меньшую сторону – понижается эффективность.

5. Определяется коэффициент гидравлического сопротивления циклона или группы циклонов по формуле:

$$\xi_{ц} = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{ц500} + K_3, \quad (2.12)$$

где $\xi_{ц500}$ – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм; выбираемый по табл. 2.7; K_1 – поправочный коэффициент, зависящий от диаметра циклона (табл. 2.8); K_2 – поправочный коэффициент, учитывающий запыленность газа (табл. 2.9); K_3 – коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу (для одиночных циклонов $K_3 = 0$).

6. Определяется гидравлическое сопротивление (потери давления) циклона (Па):

$$\Delta p = p_{вх} - p_{вых} = (\xi_{ц} \cdot \rho_{г} \cdot \omega_{ц}^2) / 2. \quad (2.13)$$

Если потери давления Δp не превышают 1500 Па, рассчитывается полный коэффициент очистки газа в циклоне.

7. Определяется диаметр частиц, улавливаемых с эффективностью 50% при фактических условиях работы:

$$d_{50} = d_{50}^T \cdot \sqrt{\frac{D \cdot \rho_{п}^T \cdot \mu \cdot \omega^T}{D^T \cdot \rho_{п} \cdot \mu^T \cdot \omega}}, \quad (2.14)$$

где D^T , $\rho_{п}^T$, μ^T , ω^T – величины, соответствующие стандартным условиям работы циклона (прим. табл. 2.6); D , $\rho_{п}$, μ , ω – величины, соответствующие действительным условиям работы циклона.

8. Определяют параметр X вероятностной функции распределения $\Phi(X)$ по формуле:

$$X = \frac{\lg(d_m / d_{50})}{\sqrt{\lg^2 \cdot \sigma_\eta + \lg^2 \cdot \sigma_n}}, \quad (2.15)$$

где $\lg \sigma_\eta$ определяют из табл. 2.6; $\lg \sigma_n$ находят из следующего соотношения:

$$\lg \sigma_n = \lg \frac{d_m}{d_{84,1}} = \lg \frac{d_{15,9}}{d_m}, \quad (2.16)$$

где $d_{84,1}$ и $d_{15,9}$ – абсциссы точек, ординаты которых имеют значения 84,1% и 15,9% и определяются по заданному распределению частиц пыли по размерам (рис. 2.9); d_m – среднемедианный размер частиц пыли, представляет собой такой размер частицы, при котором суммарная масса всех частиц размером более d_m равна суммарной массе всех частиц размером менее d_m .

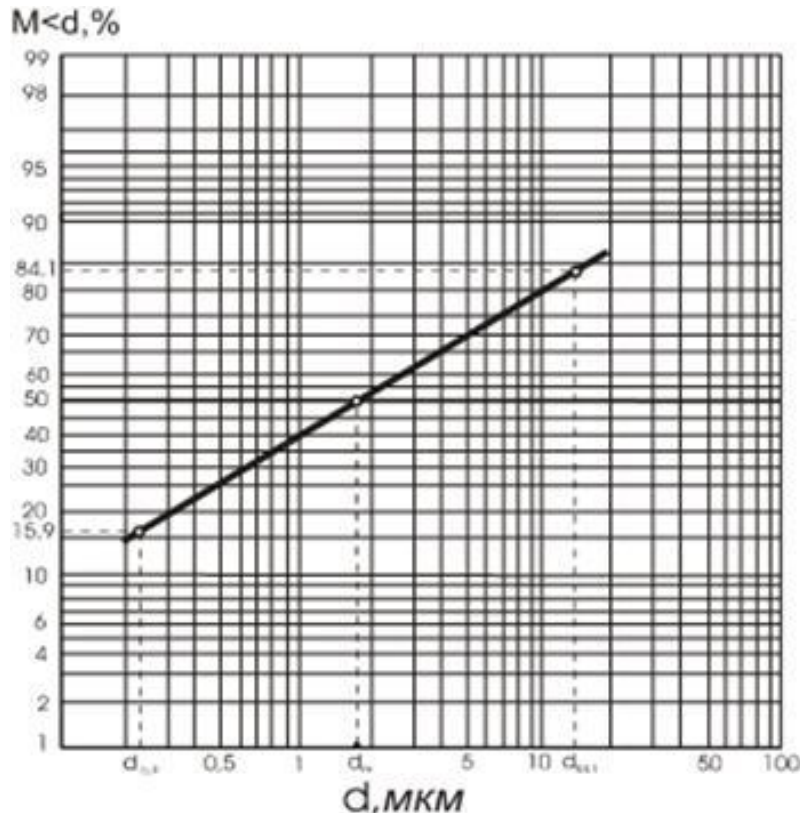


Рис. 2.9. График распределения частиц пыли по размерам

Таблица 2.7

Коэффициенты сопротивления циклонов $D = 500$ мм

Тип циклона	Без дополнительных устройств		С кольцевым диффузором		С выходной улиткой
	$\xi_{ц500}^c$	$\xi_{ц500}^п$	$\xi_{ц500}^c$	$\xi_{ц500}^п$	$\xi_{ц500}^c$
ЦН-11	245	250	207	215	235
ЦН-15	155	163	132	140	150
ЦН-15У	165	170	140	148	158
ЦН-24	75	80	64	70	73
СК-ЦН-33	520	600	–	–	500
СК-ЦН-34	1050	1150	–	–	–
СК-ЦН-34М	–	2000	–	–	–

Примечание. Индекс «с» означает, что циклон работает в гидравлической сети, а индекс «п» – циклон работает на выхлоп в атмосферу.

Таблица 2.8

Поправочный коэффициент K_1 , зависящий от диаметра циклона

D, мм	Тип циклона			D, мм	Тип циклона		
	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-24, ЦН-15У	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М		ЦН-11	ЦН-15, ЦН-24, ЦН-15У	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М
150	0,94	0,85	1,0	400	0,99	1,0	1,0
200	0,95	0,90	1,0	500	1,00	1,0	1,0
300	0,96	0,93	1,0				

Таблица 2.9

Поправочный коэффициент K_2 , учитывающий запыленность газов
($D = 500$ мм)

Тип циклона	Начальная запыленность, $Z \cdot 10^3$, г/м ³						
	1	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,940	0,92	0,90	0,87	0,850
ЦН-15	1	0,93	0,920	0,91	0,90	0,87	0,860
ЦН-15У	1	0,93	0,920	0,91	0,89	0,88	0,870
ЦН-24	1	0,95	0,930	0,97	0,90	0,87	0,860
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	0,900
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,970	0,95	–	–	–

9. Определяют значение функции распределения $\Phi(X)$ по табл. 2.10 и полный коэффициент очистки газа (%):

$$\eta = 50 \cdot [1 + \Phi(X)]. \quad (2.17)$$

В случае если полученная расчетом эффективность оказывается недостаточной по условиям допустимого выброса пыли в атмосферу, следует уменьшить размеры циклона, т. е. повысить скорость и гидравлическое сопротивление. При этом коэффициент очистки циклона возрастает. Если и этого недостаточно, следует переходить на другой, более эффективный тип циклона; например, с ЦН-24 на ЦН-15 или с ЦН-15 на ЦН-11. При этом следует повторить как расчет гидравлического сопротивления, так и расчет эффективности.

При очистке газов с высокой концентрацией пыли ($Z > 10 \text{ г/м}^3$) эффективность циклона обычно увеличивается и может быть определена по формуле:

$$\eta_1 = \eta + \frac{100 - \eta}{100} \cdot 0,12 \cdot Z \cdot \lg 0,1 \cdot Z, \quad (2.18)$$

где Z – начальная концентрация пыли в газе, г/м^3 ; η – коэффициент очистки циклона при начальной запыленности $Z = 10 \text{ г/м}^3$.

Таблица 2.10

Значения нормальной функции распределения

X	$\Phi(X)$	X	$\Phi(X)$	X	$\Phi(X)$	X	$\Phi(X)$
1	2	3	4	5	6	7	8
-2,70	0,0035	-1,06	0,1446	0,00	0,5000	1,08	0,8599
-2,60	0,0047	-1,04	0,1492	0,02	0,5080	1,10	0,8643
-2,50	0,0062	-1,02	0,1539	0,04	0,5160	1,12	0,8686
-2,40	0,0082	-1,00	0,1587	0,06	0,5239	1,14	0,8729
-2,30	0,0107	-0,98	0,1635	0,08	0,5319	1,16	0,8770
-2,20	0,0139	-0,96	0,1685	0,10	0,5398	1,18	0,8810
-2,10	0,0179	-0,94	0,1736	0,12	0,5478	1,20	0,8849
-2,00	0,0228	-0,92	0,1788	0,14	0,5557	1,22	0,8888
-1,98	0,0239	-0,90	0,1841	0,16	0,5636	1,24	0,8925
-1,96	0,0250	-0,88	0,1894	0,18	0,5714	1,26	0,8962
-1,94	0,0262	-0,86	0,1949	0,20	0,5793	1,28	0,8997
-1,92	0,0274	-0,84	0,2005	0,22	0,5871	1,30	0,9032
-1,90	0,0288	-0,82	0,2061	0,24	0,5948	1,32	0,9066
-1,88	0,0301	-0,80	0,2119	0,26	0,6026	1,34	0,9099
-1,86	0,0314	-0,78	0,2177	0,28	0,6103	1,36	0,9131

Окончание табл. 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8
-1,84	0,0329	-0,76	0,2236	0,30	0,6179	1,38	0,9162
-1,82	0,0344	-0,74	0,2297	0,32	0,6255	1,40	0,9192
-1,80	0,0359	-0,72	0,2358	0,34	0,6331	1,42	0,9222
-1,78	0,0375	-0,70	0,2420	0,36	0,6406	1,44	0,9251
-1,76	0,0392	-0,68	0,2483	0,38	0,6480	1,46	0,9279
-1,74	0,0409	-0,66	0,2546	0,40	0,6554	1,48	0,9306
-1,72	0,0427	-0,64	0,2611	0,42	0,6628	1,50	0,9332
-1,70	0,0446	-0,62	0,2676	0,44	0,6700	1,52	0,9357
-1,68	0,0465	-0,60	0,2743	0,46	0,6772	1,54	0,9382
-1,66	0,0485	-0,58	0,2810	0,48	0,6844	1,56	0,9406
-1,64	0,0505	-0,56	0,2877	0,50	0,6915	1,58	0,9429
-1,62	0,0526	-0,54	0,2946	0,52	0,6985	1,60	0,9452
-1,60	0,0548	-0,52	0,3015	0,54	0,7054	1,62	0,9474
-1,58	0,0571	-0,50	0,3085	0,56	0,7123	1,64	0,9495
-1,56	0,0594	-0,48	0,3156	0,58	0,7190	1,66	0,9515
-1,54	0,0618	-0,46	0,3228	0,60	0,7257	1,68	0,9535
-1,52	0,0643	-0,44	0,3300	0,62	0,7324	1,70	0,9554
-1,50	0,0668	-0,42	0,3372	0,64	0,7389	1,72	0,9573
-1,48	0,0694	-0,40	0,3446	0,66	0,7454	1,74	0,9591
-1,46	0,0721	-0,38	0,3520	0,68	0,7517	1,76	0,9608
-1,44	0,0749	-0,36	0,3594	0,70	0,7580	1,78	0,9625
-1,42	0,0778	-0,34	0,3669	0,72	0,7642	1,80	0,9641
-1,40	0,0808	-0,32	0,3745	0,74	0,7703	1,82	0,9656
-1,38	0,0838	-0,30	0,3821	0,76	0,7764	1,84	0,9671
-1,36	0,0869	-0,28	0,3897	0,80	0,7881	1,88	0,9699
-1,34	0,0901	-0,26	0,3974	0,82	0,7939	1,90	0,9713
-1,32	0,0934	-0,24	0,4052	0,84	0,7995	1,92	0,9726
-1,28	0,1003	-0,22	0,4129	0,86	0,8051	1,94	0,9738
-1,26	0,1038	-0,20	0,4207	0,88	0,8106	1,96	0,9750
-1,24	0,1075	-0,18	0,4286	0,90	0,8159	1,98	0,9761
-1,22	0,1112	-0,16	0,4364	0,92	0,8212	2,00	0,9772
-1,20	0,1151	-0,14	0,4443	0,94	0,8264	2,10	0,9821
-1,18	0,1190	-0,12	0,45	0,96	0,8315	2,20	0,9861
-1,16	0,1230	-0,10	0,46	0,98	0,8365	2,30	0,9893
-1,14	0,1271	-0,08	0,46	1,00	0,8413	2,40	0,9918
-1,12	0,1314	-0,06	0,47	1,02	0,8461	2,50	0,9938
-1,10	0,1357	-0,04	0,48	1,04	0,8508	2,60	0,9953
-1,08	0,1401	-0,02	0,49	1,06	0,8554	2,70	0,9965

2.2.2. Пример расчета циклона ЦН-15

Задача. Определить гидравлическое сопротивление и эффективность циклона при следующих исходных данных: расход газа при нормальных условиях $V_0 = 4100 \text{ м}^3/\text{ч}$; плотность газа $\rho_0 = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$; температура газа на входе в циклон $T = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\mu = 24,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{C}$); барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 101,3 \text{ кПа}$; разрежение в циклоне $p_{\text{ц}} = 30 \text{ Па}$; начальная концентрация пыли в газе $Z = 50 \text{ г}/\text{м}^3$; средний размер частиц пыли $d_m = 5 \text{ мкм}$; плотность пыли $\rho_n = 3000 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Решение:

1. Плотность газа при рабочих условиях определяется по формуле (1.13):

$$\rho_r = \rho_0 \frac{273(p_{\text{бар}} \pm p_r)}{(273 + T_r) \cdot p_{\text{бар}}} = 1,29 \frac{273(101,3 \cdot 10^3 - 30)}{(273 + 110) \cdot 101,3 \cdot 10^3} = 0,92 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

2. Расход газа при рабочих условиях:

$$V_r = \frac{V_0 \rho_0}{\rho_r} = \frac{4100 \cdot 1,29}{0,92 \cdot 3600} = 1,6 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Оптимальная скорость для ЦН-15 (табл. 2.6): $\omega_{\text{опт}} = 3,5 \text{ м}/\text{с}$.

4. Диаметр циклона при оптимальной скорости:

$$D = \sqrt{V_r / 0,785 \cdot \omega_{\text{опт}}} = \sqrt{1,6 / 0,785 \cdot 3,5} = 0,76 \text{ м}.$$

5. Принимается ближайший стандартный диаметр 800 мм и определяется действительная скорость движения газа в циклоне:

$$\omega_{\text{ц}} = V_r / 0,785 \cdot D^2 = 1,6 / 0,785 \cdot 0,8^2 = 3,2 \text{ м}/\text{с}.$$

Ввиду того, что действительная скорость отличается от оптимальной менее чем на 15%, выбран верный диаметр циклона. Находятся остальные размеры циклона (табл. 2.4), а именно:

6. Коэффициент сопротивления циклона:

$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500} = 1 \cdot 0,91 \cdot 155 = 141.$$

7. Гидравлическое сопротивление циклона:

$$\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}} = (\xi_{\text{ц}} \cdot \rho_r \cdot \omega_{\text{ц}}^2) / 2 = (141 \cdot 3,2^2 \cdot 0,92) / 2 = 660 \text{ Па}.$$

8. Размер частиц d_{50} , улавливаемых выбранным циклоном при рабочих условиях с эффективностью 50% по формуле 2.14:

$$d_{50} = 4,5 \cdot \sqrt{\frac{800 \cdot 1930 \cdot 24,8 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5}{600 \cdot 3000 \cdot 22,2 \cdot 10^{-6} \cdot 3,2}} = 4,30 \text{ мкм.}$$

9. Среднеквадратичное отклонение $\lg \sigma_n$, вычисляется из выражения (2.16):

$$\lg \sigma_n = \lg 5 / 17 = -0,531.$$

10. Определяется величина X по формуле (2.15):

$$X = \frac{\lg(5/4,61)}{\sqrt{0,352^2 + (-0,531)^2}} = 0,10.$$

11. По табл. 2.10 определяется $\Phi(X)$: $\Phi(0,10) = 0,5398$.

12. По формуле (2.17) определяется эффективность очистки от пыли:

$$\eta = 50 \cdot (1 + 0,9485) = 97\%.$$

13. Так как $Z > 10 \text{ г / м}^3$, пересчитывается эффективность η' по формуле (2.18).

2.2.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача. Рассчитать геометрические размеры циклона одного из типов (ЦН-15, ЦН-11, ЦН-24) и определить его гидравлическое сопротивление и эффективность при следующих исходных данных: расход газа при нормальных условиях V_0 , м³/ч; плотность газа $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$; температура газов на входе в циклон T , °С; начальная концентрация пыли в газе Z , г/м³; средний размер частиц пыли d_m , мкм; плотность пыли ρ_n , кг/м³. Циклон работает в сети без раскручивателя. Исходные данные приведены в табл. 2.11. По данным своего варианта рассчитать циклон типа СДК-ЦН.

Исходные данные

№ вар.	Расход газа, V_0 , м ³ /ч	Температура газов, T , °С	Разрежение в циклоне $p_{ц}$, Па	Начальная концентрация пыли в газе Z , г/м ³	Размер частиц пыли, d_m , мкм	Плотность пыли, ρ_n , кг/м ³
1	4500	110	30	150	5	1650
2	4030	50	60	80	8	2500
3	3800	120	50	20	3	3000
4	2910	80	80	50	12	1540
5	3500	30	25	10	9	1200
6	4200	190	40	30	15	2700
7	3900	175	50	40	20	2920
8	3720	90	40	60	7	3300
9	2700	130	55	70	10	1310
10	2500	160	60	100	4	1830
11	1840	100	75	90	14	2650
12	2570	140	45	120	10	1970
13	3200	180	64	110	5	3500
14	1950	60	25	60	6	3260
15	4100	70	30	130	16	3600
16	2200	110	25	50	18	1850
17	2400	160	45	70	7	1890
18	2830	120	70	80	9	1500
19	1690	90	55	110	12	1680
20	4900	60	100	130	11	1790

Контрольные вопросы

1. На чем основана очистка газов от пыли в циклонах?
2. Как происходит процесс пылеотделения в циклонах?
3. Из каких основных элементов состоит циклон?
4. От чего зависит эффективность работы циклона?
5. Какова степень очистки газа в циклонах?

2.3. Батарейные циклоны

Увеличение диаметра циклона приводит к снижению его эффективности, вследствие чего циклоны типа ЦН диаметром более 1 м применять не рекомендуется, что сильно ограничивает пропускную способность установки.

Часто для очистки больших количеств запыленных газов вместо одного циклона большого диаметра применяют несколько циклонных элементов значительно меньшего диаметра, смонтированных в одном корпусе. Такие циклоны называются батарейными циклонами (рис. 2.10).

В целях компактности батарейного циклона, придание вращения газовому потоку осуществляется не специальным подводом газа, а размещением внутри элемента батарейного циклона специального устройства, представляющего собой либо винт, либо розетку, состоящую из лопаток под углом α к оси (рис. 2.11).

Для каждого варианта завихряющего устройства существуют свои значения коэффициента сопротивления (ξ) и оптимальной скорости $\omega_{\text{опт}}$ в циклоне (табл. 2.12).

Таблица 2.12

Значения коэффициента сопротивления (ξ)
и оптимальной скорости $\omega_{\text{опт}}$ в циклоне

Тип завихрителя	Коэффициент сопротивления, ξ	Оптимальная скорость, $\omega_{\text{опт}}$, м/с
Винтовой	85	3,85
Розеточный		
$\alpha=30^\circ$	65	4,5
$\alpha=25^\circ$	90	3,85

Батарейные циклоны изготавливаются с элементами диаметром 100, 150, 250 мм. Степень очистки газа в батарейных циклонах составляет 65–85% для частиц диаметром 5 мкм, 85–90% для частиц диаметром 10 мкм и 90–95% для частиц диаметром 20 мкм.

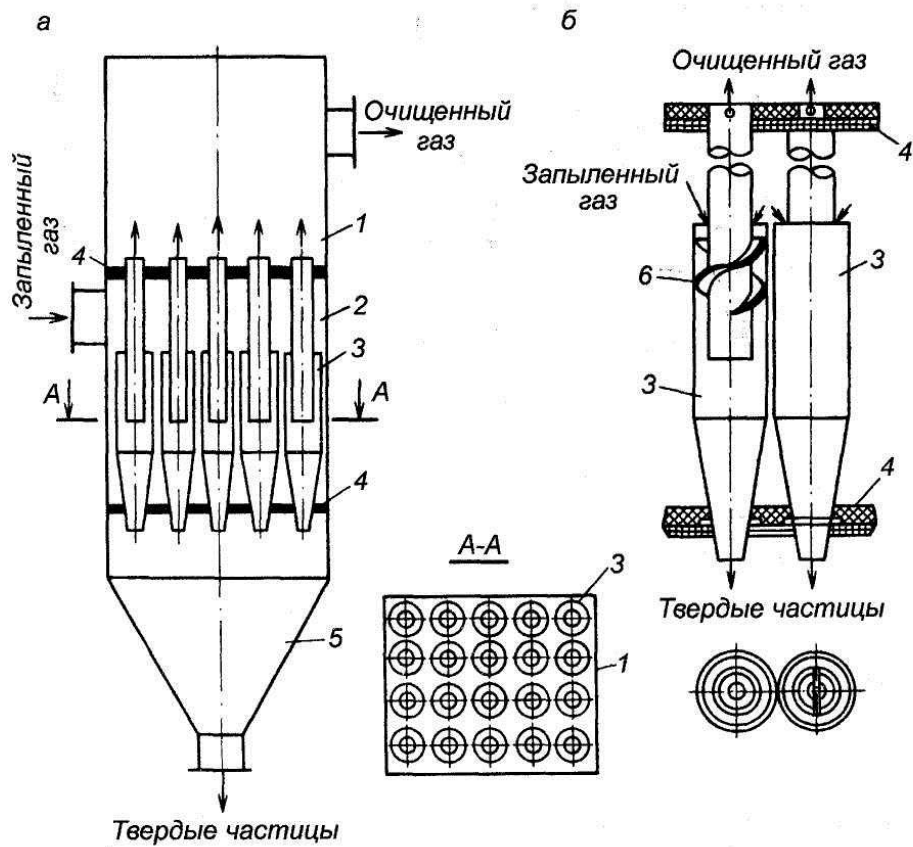


Рис. 2.10. Схема батарейного циклона (а) и его элементов (б):
 1 – корпус; 2 – газораспределительная камера; 3 – корпуса циклонных элементов;
 4 – трубные решетки; 5 – бункер для частиц пыли; б – лопастные устройства для
 закручивания газового потока внутри элементов

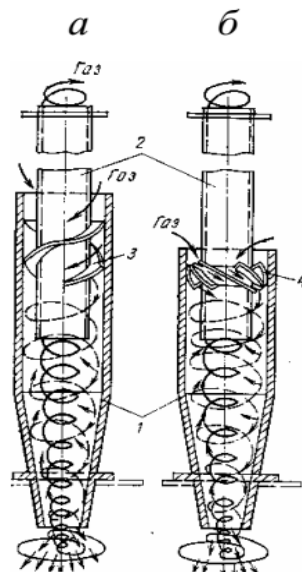


Рис. 2.11. Элементы батарейного циклона:
 а – элемент с закручивающим устройством «винт»;
 б – элемент с закручивающим устройством «розетка»

2.3.1. Методика расчета батарейных циклонов. Расчет гидравлического сопротивления батарейного циклона аналогичен расчету одиночного циклона.

Для расчета батарейного циклона необходимо:

1. Определяется общий расход газа, который требуется очищать, при рабочих условиях.

2. В зависимости от запыленности и свойств пыли выбирается диаметр одного циклонного элемента D . При большой начальной запыленности и слипаемости пыли принимаются элементы больших диаметров.

3. Определяется расход газа через один циклонный элемент при оптимальной скорости по формуле:

$$V_1 = \omega_{\text{опт}} \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \quad (2.19)$$

где V_1 – объем газа, очищаемый при рабочих условиях, м³/с, в одном циклонном элементе; $\omega_{\text{опт}}$ – оптимальная скорость газа в циклонном элементе, м³/с; D – диаметр одного циклонного элемента, м.

4. Определяется необходимое количество циклонных элементов по формуле 2.20, элементы компоуются в группы, объединенные общим пылевым бункером. По условиям компоновки максимальное число элементов в группе не должно превышать 96-ти (8 в ряду по ходу газов и 12 в ряду, перпендикулярном ходу газов), а число групп должно быть четным.

$$n = \frac{V_{\Gamma}}{V_1}, \quad (2.20)$$

где V_{Γ} – общий объем очищаемого газа при рабочих условиях, м³/с; n – число циклонных элементов.

Таблица 2.13

Ориентировочный подбор диаметра циклонного элемента D
в зависимости от запыленности газа, г/м³

Диаметр одного элемента батарейного циклона D , мм	Наибольшая допускаемая запыленность газа, г/м ³
250	75
150	35
100	15

5. Рассчитывается скорость газа в одном циклонном элементе при выбранной компоновке:

$$\omega_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{г}}}{n \cdot 0,785 \cdot D^2}. \quad (2.21)$$

Величина скорости газа при рабочих условиях не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15%.

При известном гидравлическом сопротивлении батарейного циклона скорость газа в одном циклонном элементе определяется по формуле:

$$\omega_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\xi \rho_{\text{г}}}}, \quad (2.22)$$

где Δp – гидравлическое сопротивление, Па; ξ – коэффициент сопротивления (из табл. 2.12); $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа при рабочих условиях, кг/м³.

6. Эффективность батарейных циклонов (%) находят с помощью кривой парциальных коэффициентов очистки (рис. 2.12) по заданному дисперсному составу пыли, используя формулу:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{\eta_1 \Phi_1}{100} + \frac{\eta_2 \Phi_2}{100} + \dots + \frac{\eta_n \Phi_n}{100}, \quad (2.23)$$

где η_i – фракционные коэффициенты очистки, определяемые по кривой парциальных коэффициентов для частиц среднего размера каждой фракции; Φ_i – процентное содержание каждой фракции.



Рис. 2.12. Кривая парциальных коэффициентов очистки пылеулавливающих аппаратов (батарейный циклон с диаметром элементов)

$D = 250$ мм с завихрителем «розетка» при $\alpha = 30^\circ$. $\rho_n = 2,2$ г/см³;
 $\rho_r = 1,32$ кг/м³; $T = 180$ °С; $Z = 18$ г/м²; $\omega_{\text{опт}} = 4,5$ м/с

Пересчет эталонного значения η_3 от параметров, соответствующих кривой парциальных коэффициентов очистки, на рабочие условия эксплуатации циклона выполняют по графикам пересчета (рис. 2.13).

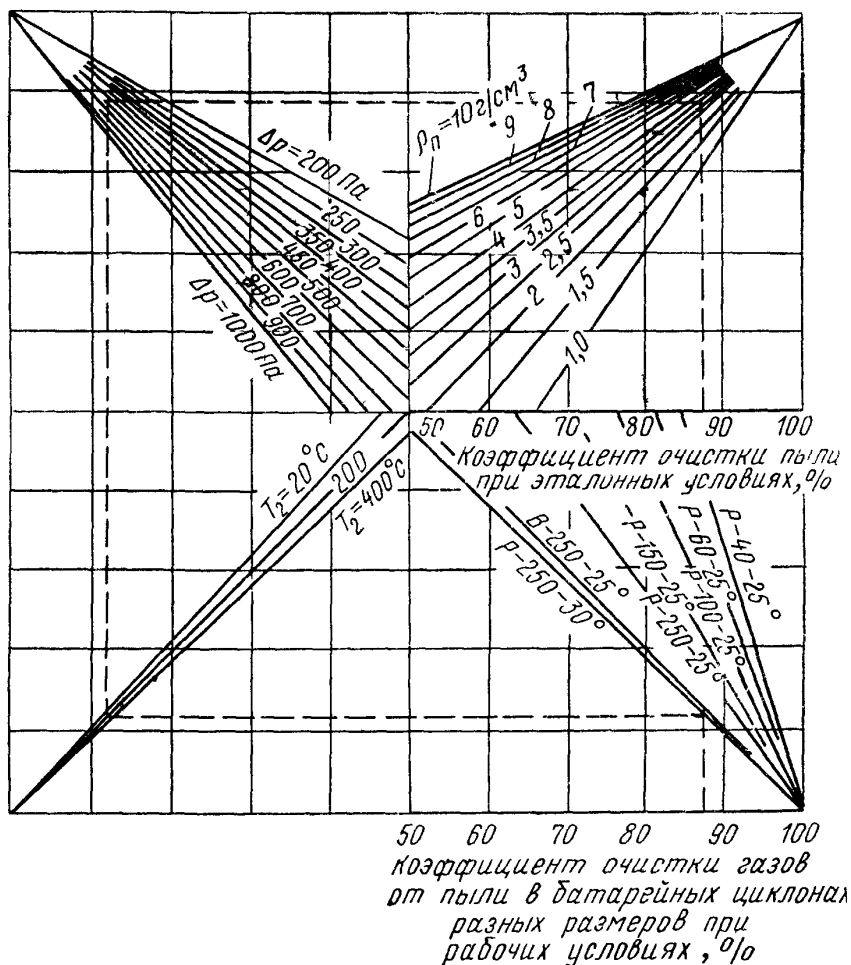


Рис. 2.13. Графики для пересчета эффективности очистки батарейного циклона на рабочие условия: P и В – розеточный и винтовой завихрители; 40, 60, 100, 150, 250 мм – диаметры циклонного элемента; 25° и 30° – углы наклона завихрителя

2.3.2. Пример расчета батарейного циклона

Задача. Подобрать батарейный циклон, определить гидравлическое сопротивление и эффективность очистки батарейного циклона при следующих исходных данных: расход газа при нормальных условиях $V_0 = 190\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$; плотность газа $\rho_0 = 1,31 \text{ кг/м}^3$; температура газа $T = 120 \text{ °C}$; барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 101,3 \text{ кПа}$; разрежение в циклоне $p_{\text{ц}} = 5 \text{ кПа}$; начальная концентрация пыли в газе $Z = 10 \text{ г/м}^3$, плотность пыли $\rho_{\text{п}} = 3600 \text{ кг/м}^3$.

Дисперсный состав пыли следующий:

d , мкм	< 5	5–10	10–20	20–40	> 40
Доля, % (по массе)	10	18	23	35	14

Решение:

1. Плотность газа при рабочих условиях:

$$\rho_{\Gamma} = \rho_0 \frac{273(p_{\text{бар}} \pm p_g)}{(273 + T_{\Gamma}) \cdot p_{\text{бар}}} = 1,31 \frac{273(101,3-5)}{(273+120) \cdot 101,3} = 0,87 \text{ кг/м}^3.$$

2. Расход газа при рабочих условиях:

$$V_{\Gamma} = V_0 \rho_0 / 3600 \cdot \rho_{\Gamma} = 90\,000 \cdot 1,31 / 3600 \cdot 0,87 = 37,6 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Исходя из возможности засорения циклонного элемента, выбираем один циклонный элемент $D = 150$ мм с розеткой $\alpha = 30^\circ$, расход газа через который при оптимальной скорости (из табл. 2.12) $\omega_{\text{опт}} = 4,5$ м/с:

$$V_1 = \omega_{\text{опт}} \cdot \pi D^2 / 4 = 4,5 \cdot 0,785 \cdot 0,15^2 = 0,079 \text{ м}^3/\text{с}.$$

4. Необходимое число циклонных элементов:

$$n = V_{\Gamma} / V_1 = 37,6 / 0,079 = 476.$$

5. По условиям компоновки выбираем 8 групп по 60 элементов в каждой (одна группа – 6 в ряду по ходу газа и 10 в ряду, перпендикулярном ходу газа).

6. Скорость газа в циклонном элементе при такой компоновке, м/с:

$$\omega_{\text{ц}} = V_{\Gamma} / (0,785 D^2 \cdot n) = 37,6 / (0,785 \cdot 0,15^2 \cdot 8 \cdot 60) = 4,44 \text{ м/с},$$

т. е. не выходим из рекомендуемых 15%-ных пределов.

7. Гидравлическое сопротивление батарейного циклона:

$$\Delta p = \xi \cdot (\omega_{\text{ц}}^2 / 2) \cdot \rho_{\Gamma} = 65 \cdot (4,44^2 / 2) \cdot 0,87 = 557 \text{ Па}.$$

8. Эффективность работы батарейного циклона при эталонных условиях подсчитывается по выражению (2.23)

$$\eta_3 = \frac{30 \cdot 10 + 72,5 \cdot 18 + 85 \cdot 23 + 95 \cdot 35 + 97 \cdot 14}{100} = 82,4\%.$$

9. Эффективность батарейного циклона при рабочих условиях находится по номограмме рис. 2.13: $\eta = 91\%$.

2.3.4. Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. В батарейном циклоне требуется очищать от пыли газ объемом V_0 , м³/ч при температуре T °С. Плотность газа 1,31 кг/м³. Барометрическое давление 101,3 кПа. На входе в батарейный циклон газы находятся под разрежением $p_{ц}$, Па. Запыленность газа Z , г/м³. Подобрать диаметр одного циклонного элемента. Для различных типов завихрителей (винт, розетка 25°, 30°) рассчитать необходимое число батарейных элементов и определить гидравлическое сопротивление циклона. Исходные данные приведены в табл. 2.14.

Таблица 2.14

Исходные данные

№ варианта	Объем очищаемого газа, V_0 , м ³ /ч	Температура газа, T , °С	Разрежение в циклоне, $p_{ц}$, Па	Запыленность газа, Z , г/м ³
1	27 000	320	490	36
2	15 000	100	120	45
3	90 000	190	1 000	28
4	40 000	210	2 000	18
5	98 000	135	7 000	25
6	8 000	290	500	28
7	10 700	340	900	20
8	23 000	180	1800	12
9	105 000	150	550	38
10	25 000	245	800	40

Задача 2. Для батарейного циклона подобрать необходимое количество циклонных элементов различных диаметров (мм) (100, 150, 250) с определенным типом завихрителя для очистки от пыли газа объемом V_0 , м³/ч при температуре T °С. Плотность газа 1,31 кг/м³. Барометрическое давление 101,3 кПа. На входе в батарейный циклон газы находятся под разрежением $p_{ц}$, Па. Гидравлическое сопротивление батарейного циклона не должно превышать $p_{\text{макс}}$, Па. Исходные данные приведены в табл. 2.15

Задача 3. Определить эффективность работы батарейного циклона с элементами диаметром D , мм, с определенным типом завихрителя и гидравлическим сопротивлением p , Па при следующих исходных данных: температура очищаемого газа T , °С, плотность пыли, $\rho_{\text{п}}$, кг/м³; известен дисперсный состав пыли. Исходные данные приведены в табл. 2.16

Таблица 2.15

Исходные данные

№ варианта	Тип завихрителя	Объем очищаемого газа, V_0 , м ³ /ч	Температура очищаемого газа, T , °С	Разрежение в циклоне, $p_{\text{ц}}$, Па	Максимальное сопротивление циклона, $p_{\text{макс}}$, Па
9	Розетка, 30°	24 000	290	800	450
10	Винт	18 000	160	800	550
11	Розетка, 25°	40 000	900	2 500	600
12	Винт	180 000	290	1 000	400
13	Розетка, 30°	18 000	280	1 000	300
14	Розетка, 25°	100 000	130	9 000	500
15	Винт	6 700	160	800	550
16	Розетка, 30°	40 000	220	3 000	450
17	Винт	30 000	230	3 600	400
18	Розетка, 30°	8 000	220	4 000	450
19	Розетка, 25°	9 500	100	100	650
20	Винт	100 000	290	200	400

Таблица 2.16

Исходные данные

№ варианта	Диаметр циклонных элементов, D , мм	Тип завихрителя	Гидравлическое сопротивление, p , Па	Температура очищаемого газа, T , °С	Плотность пыли, $\rho_{\text{п}}$, кг/м ³	Дисперсный состав пыли: доля, % (по массе) частиц диаметром, мкм				
						< 5	5–10	10–20	20–40	> 40
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	250	Розетка (30°)	550	150	3600	10	12	13	30	35
2	250	Розетка (25°)	380	340	6200	5	10	17	43	25
3	250	Розетка (30°)	480	250	2370	11	14	28	27	20
4	150	Розетка (25°)	700	380	2450	20	25	15	17	23

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	250	Розетка (30°)	850	200	8500	10	13	29	15	33
6	150	Розетка (25°)	370	195	6200	17	17	33	28	5
7	250	Розетка (30°)	400	180	5500	23	10	17	15	35
8	100	Розетка (25°)	480	280	7800	11	17	34	29	9
9	250	Розетка (25°)	380	340	6200	5	10	17	43	25
10	250	Розетка (25°)	400	200	4800	25	20	25	15	15
11	250	Розетка (30°)	800	230	3400	18	21	29	16	16
12	150	Розетка (25°)	450	280	6800	8	10	8	26	48
13	100	Розетка (25°)	850	220	8500	7	13	21	25	34
14	100	Розетка (25°)	300	180	1600	7	6	15	50	22
15	250	Розетка (30°)	900	160	2800	13	9	11	37	30
16	250	Розетка (30°)	700	250	1500	4	16	52	28	0
17	250	Розетка (30°)	680	350	1750	10	12	19	28	31
18	100	Розетка (25°)	680	280	2750	9	9	15	45	22
19	150	Розетка (25°)	250	200	2200	8	18	24	38	12
20	250	Розетка (30°)	470	220	3690	11	14	28	27	20

Контрольные вопросы

1. Что такое батарейный циклон?
2. В каких случаях применяют батарейные циклоны?
3. Из каких основных элементов состоит батарейный циклон?
4. Какие специальные закручивающие устройства размещают внутри элементов батарейного циклона?
5. Какова степень очистки газа в батарейных циклонах?

2.4. Рукавные фильтры

В основе работы пористых фильтров всех видов лежит фильтрация запыленного газа через пористую перегородку, в процессе которой частицы пыли аэрозоли задерживаются перегородкой, а газ беспрепятственно проходит через нее.

Скорость фильтрации определяется перепадом давления на пористой перегородке, для чего перед фильтром создается избыточное давление. По мере накопления уловленных частиц в лобовом слое или в объеме фильтра сопротивление движению газа непрерывно растет, в связи с чем при сохранении постоянного перепада давления на пористой перегородке, скорость фильтрации непрерывно падает. Для

поддержания стабильной скорости фильтрации перепад давления нужно постоянно увеличивать. Это возможно производить до некоторого предельного значения, после чего необходимо произвести отключение фильтра для восстановления его работоспособности (регенерацию). При превышении допустимого значения перепада давления может произойти пробой (проскок уловленных частиц) фильтра или полный выход его из строя (табл. 2.17).

Пористые перегородки по свойствам и структуре весьма разнообразны. Среди них можно выделить *зернистые* (фильтрация через слой зернистого материала – гравия, шлака, различных дробленых материалов), *волоконистые* (составленные из беспорядочно распределенных по объему фильтра волокон толщиной 0,01–100 мкм, изготовленных из отходов текстильного производства, кварца, графита, стекловолокна, полимеров), *тканевые* (фильтрация через ткань из натуральных или синтетических нитей, а также нетканые материалы – фетр и войлок), *металлокерамические* (изготовленные из различных металлических порошков методом прессования и спекания) и т. д.

В зависимости от вида и структуры пористой перегородки уловленные частицы либо осаждаются на стенках поровых каналов, накапливаясь во всем объеме фильтра, либо образует на лобовой поверхности перегородки пылевой слой, являющийся дополнительной фильтрующей средой.

К основным характеристикам пористых фильтров относятся следующие.

Пористость ε – отношение пустого пространства (объема пор) между твердыми непроницаемыми элементами пористой среды к общему объему, занятому пористой средой.

Таблица 2.17

Характеристики некоторых видов фильтров

Вид фильтра	Оптимальная скорость фильтрации, см/с	Восстановление	Фильтрующая среда
Волокнистые	1–10	Полная замена	Весь объем фильтра
Тканевые	0,8–1,7	Регенерация	Лобовой слой
Зернистые	0,2–0,8	Регенерация	При незначительных Z, ω_{ϕ}, d^* – весь объем, при больших Z, ω_{ϕ}, d – лобовой слой фильтра

* Z, ω_{ϕ}, d – запыленность, скорость фильтрации, диаметр частиц соответственно.

Плотность упаковки α – величина объема твердых элементов фильтрующей перегородки, заключенная в единице объема пористой среды.

Очевидно, что пористость и плотность упаковки связаны между собой соотношением:

$$\varepsilon = 1 - \alpha. \quad (2.24)$$

Скорость фильтрации $\omega_{\text{ф}}$ (м/с) – получаемая как отношение объемного расхода газа $V_{\text{г}}$, проходящего через фильтр, к полной площади фильтрующей перегородки F . Она численно равна *газовой нагрузке* фильтра, т. е. объему газа, проходящего через единицу поверхности фильтра в единицу времени, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$:

$$\omega_{\text{ф}} = V_{\text{г}} / F. \quad (2.25)$$

Пылеемкость M (кг) – количество пыли, задерживаемое фильтром за период непрерывной работы (между двумя регенерациями).

$$M = F \cdot M_1. \quad (2.26)$$

где F – рабочая поверхность фильтра, м^2 ; M_1 – удельная запыленность фильтра, $\text{кг}/\text{м}^2$, масса пыли, осаждающаяся на 1 м^2 площади фильтра, кг.

Наибольшее распространение в промышленности получили тканевые фильтры, эффективность очистки в которых достигает 99,9% для пылей любой дисперсности. В качестве фильтрованных материалов применяют ткани из природных волокон (хлопчатобумажные, шерстяные), из синтетических волокон – полиэстер, полипропилен, полиакрилонитрил, полиамид и т. д., а также стеклоткани, некоторые свойства фильтрующих тканей приведены в табл. 2.18. Кроме того, применяют нетканые материалы – фетры и др.

Наиболее распространенным типом тканевого фильтра является рукавный фильтр, фильтровальные элементы которого выполнены в форме рукава (рис. 2.14).

Корпус фильтра разделен на несколько герметизированных камер, в каждой из которых размещено по несколько рукавов. Газ из газопровода грязного газа подводится либо в нижнюю часть каждой камеры (*противоточный* рукавный фильтр) либо поступает внутрь рукавов сверху (*прямоточный* рукавный фильтр). Фильтруясь через ткань, газ проходит в камеру и через открытый выпускной клапан выходит из нее, поступая в газопровод чистого воздуха.

Некоторые свойства фильтрующих тканей

Фильтровальный материал	Термостойкость, °С	Прочие характеристики
Стеклоткань	260	Износостойкость, устойчивость к действию кислот и щелочей
Полиэстер	150	стойкость к абразивному износу, средние показатели устойчивости к действию кислот и щелочей, устойчивость к окислению органическими растворителями, низкая стоимость
Полипропилен	90	используется при работе с агрессивной средой (в производстве удобрений и химикатов, гальваническом производстве)
Мета-арамид (Nomex)	200	минимальная горючесть, высокая прочность на разрыв, не деформируется
Полиакрилонитрил	140	стойк к кислотам и разбавленным щелочам, износостойкость
Поливинилсульфид	200	повышенная устойчивость к гидролизу, обладает высокой стойкостью к составляющим выхлопных газов
Политетрафторэтилен	250–280	отлично противостоит агрессивной кислотнo-щелочной среде, стойк к гидролизу и окислению, высокий срок службы (до 5 лет при температуре 60–200 °С)
Полиамид	240	прочность, износостойкость, не горит, не деформируется, низкая гигроскопичность, устойчив к агрессивной среде

Регенерация рукавного фильтра осуществляется либо обратной продувкой со встряхиванием, либо подачей импульсов сжатого воздуха внутрь рукава, что не требует отключения работающего фильтра. Пыль попадает в бункер, откуда удаляется (рис. 2.14, б)

Камеры фильтра переводят на регенерацию по очереди и, следовательно, фильтр в составе $(n - 1)$ камер все время находится в работе.

Различают рукавные фильтры малой (до 30 тыс. м³/ч), средней (30–150 тыс. м³/ч) и большой производительности (> 150 тыс. м³/ч до 1 млн м³/ч). Технические характеристики рукавных фильтров приведены в табл. 2.19.

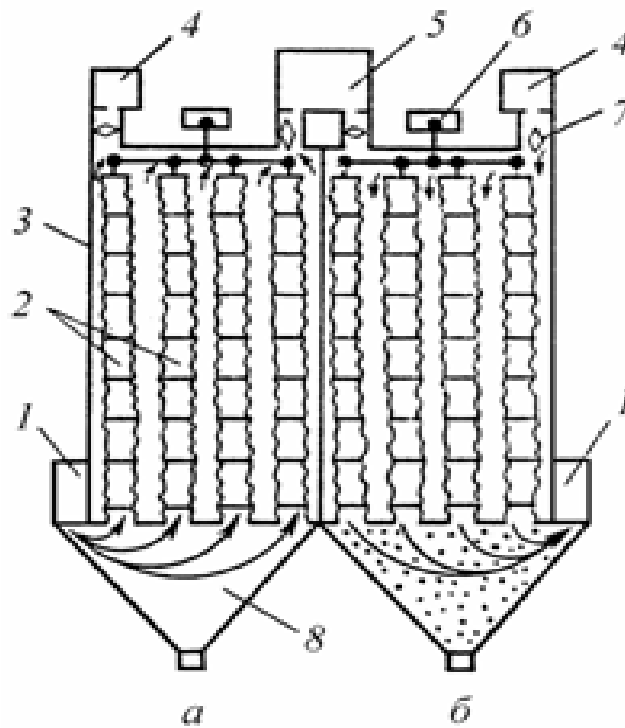


Рис. 2.14. Рукавный фильтр:

a – режим фильтрации; *б* – режим регенерации;

1 – газопровод грязного газа; 2 – рукава; 3 – корпус; 4 – воздухопровод продувочного воздуха; 5 – газопровод чистого газа; 6 – механизм встряхивания; 7 – клапан; 8 – бункер

2.4.1. Методика расчета рукавных фильтров

1. Расчет рукавного тканевого фильтра сводится к определению общей поверхности фильтрации F и числа секций фильтра. Общая поверхность фильтрации определяется по формуле (м^2):

$$F = F_{\text{раб}} + F_{\text{рег}} = V_{\text{г}} / \omega_{\text{ф}} + F_{\text{рег}}, \quad (2.27)$$

где $F_{\text{раб}}$ – поверхность фильтрации в одновременно работающих секциях, м^2 ; $F_{\text{рег}}$ – поверхность фильтрации в регенерируемой секции, м^2 ; $V_{\text{г}}$ – объемный расход очищаемых газов, $\text{м}^3/\text{с}$ (с учетом присоса в фильтре и воздуха обратной продувки) (п. 2); $\omega_{\text{ф}}$ – удельная газовая нагрузка, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Число необходимых фильтров или секций n :

$$n = F / F_1, \quad (2.28)$$

где F_1 – фильтрующая поверхность всех рукавов, установленных в одном фильтре или секции, м^2 .

Поверхность F_1 входит в основные технические характеристики фильтра и выбирается в зависимости от типа фильтра по справочным данным (табл. 2.19).

2. При расчете рукавного фильтра необходимо учитывать, что может возникнуть необходимость дополнительного подвода воздуха для охлаждения поступающего на очистку газа в случае превышения температуры газа выше допустимых значений для данного вида ткани.

Кроме того, учитывается и расход воздуха на обратную продувку фильтра, который равен 25% общего количества газа, подводимого к фильтру.

3. Общая потеря давления на фильтре Δp в упрощенном варианте представляется как сумма потерь давления в двух слоях – в первичном слое Δp_1 (на самом фильтре) и в образовавшемся лобовом слое пыли Δp_2 :

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 \text{ (Па)}. \quad (2.29)$$

Расчет Δp_1 и Δp_2 производится по сложным формулам, предлагаемым различными авторами. Для облегчения расчетов используются номограммы (рис. 2.15, 2.16).

4. При заданной величине максимального перепада давления на фильтре Δp по номограмме (рис. 2.15, 2.16) можно найти необходимую продолжительность периода между регенерациями t .

5. Так как эффективность очистки рукавного фильтра близка к 100%, то количество пыли, накопленное на единице площади фильтра (удельная запыленность) за время его эксплуатации t , можно определить по начальной концентрации пыли в газовом потоке:

$$M_1 = Z \cdot t \cdot \omega_{\phi}, \quad (2.30)$$

где Z – запыленность газового потока, г/м³; t – время, отсчитанное от начала эксплуатации фильтра, с; ω_{ϕ} – скорость фильтрации, м/с.

Таблица 2.19

Технические характеристики некоторых рукавных фильтров

Марка фильтра	Площадь фильтр. пов-ти, м ²	Кол-во секций, шт.	Кол-во рукавов в секции, шт	Диаметр рукава, мм	Высота рукава, м
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
ФР-6П	18	1	6	390	2,5
ФТ-2М	20	1	12	300	1,8
ФТНС-4М	12,4	1	4	386	2,6
ФТНС-8М	24,8	2	4	386	2,0
ФТНС-12М	37,2	3	4	386	2,6
ЦА-3804	4140	3	–	–	–
ФРУ	2,5–50	1–4	14; 28; 42; 56	125	0,9; 1; 2; 2,5
ФРН-20	20	2	32	130	1,63
ФРН-30	30	2	48	130	1,63
ФР-250	281	4	288	135	2,3
СМЦ-101А	50; 55; 110; 115; 205	2	36	200	2,2; 2,45; 4,9; 5,1; 9,1
РФГ	112; 168; 224; 280	4; 6; 8; 10	56; 84; 112; 140	220	3,1
УРФМ	1610; 2300	14; 20	588; 840	220	4,0
Г4-1БФМ	30; 45; 60; 90	2; 3; 4; 6	36; 54; 72; 108	135	2,09
Г4-2БМФ	60; 90	4; 6	72; 108	135	2,09
ФР-518 (650)	518 (650)	6	72 (90)	127	3,0
ФР-5000	5000	8	504	127	3,09
ФРД0-6500	6500	10	212	130	7,85
ФР0-2400-1	2400	8	42	200	8
ФР0-6000-2	6000	10	54	300	10
ФР0-20300-3	20300	10	216	300	10
РФОСП	1,9–136	–	2–24	–	1–6
РФСП-П	370	4	22	300	4,8
РФСП-1580	1580	20	24	–	–
ФРКИ-30	30	1	36	135	2
ФРКИ-В-30	30	1	36	135	2
ФРКИ-60	60	2	36	135	2
ФРКИ-В-60	60	2	36	135	2
ФРКИ-90	90	3	36	135	2
ФРКИ-В-90	90	3	36	135	2
ФРКИ-180	180	4	36	135	3

1	2	3	4	5	6
ФРКИ-360	360	8	36	135	3
ФРКИ-550	550	6	36	135	6
ФРКДИ	720	8	36	135	6
ФРКДИ-1100	1100	12	36	135	6

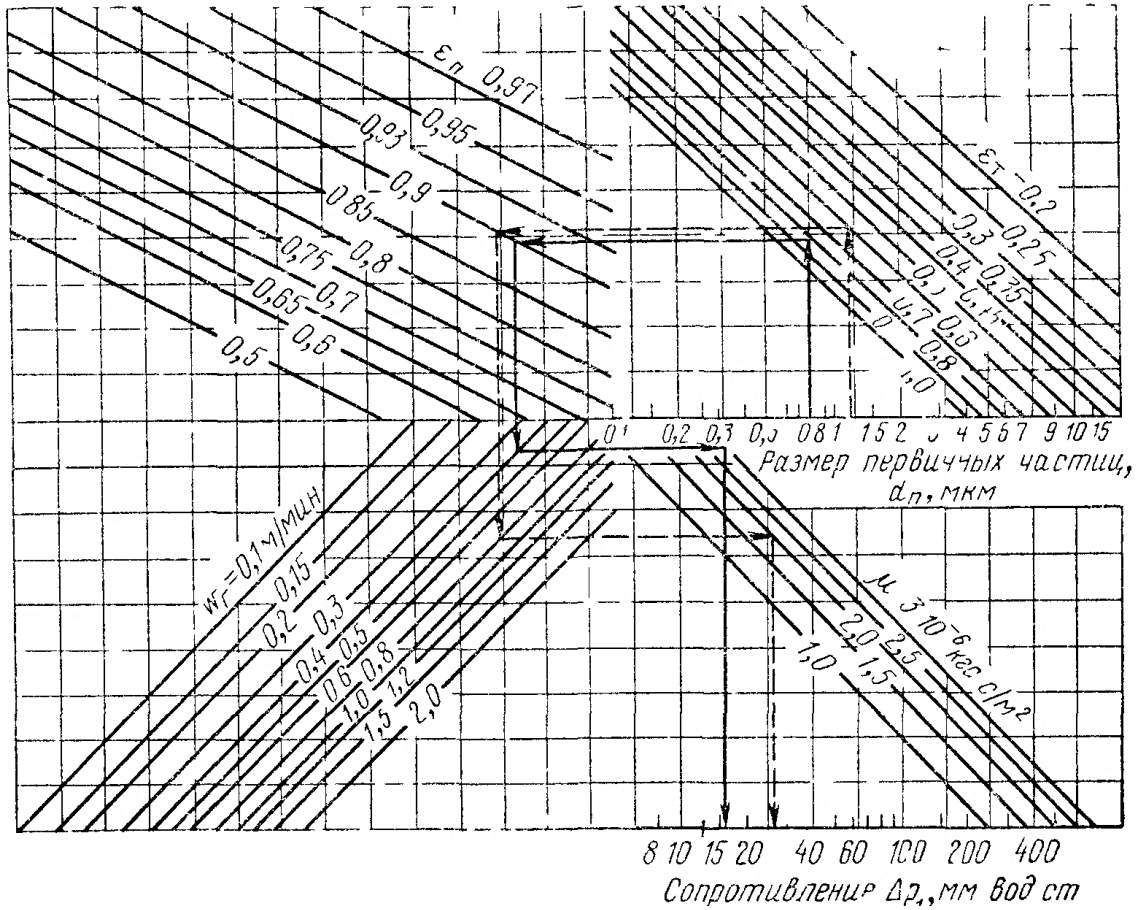


Рис. 2.15. Номограмма для определения сопротивления ткани Δp_1 .

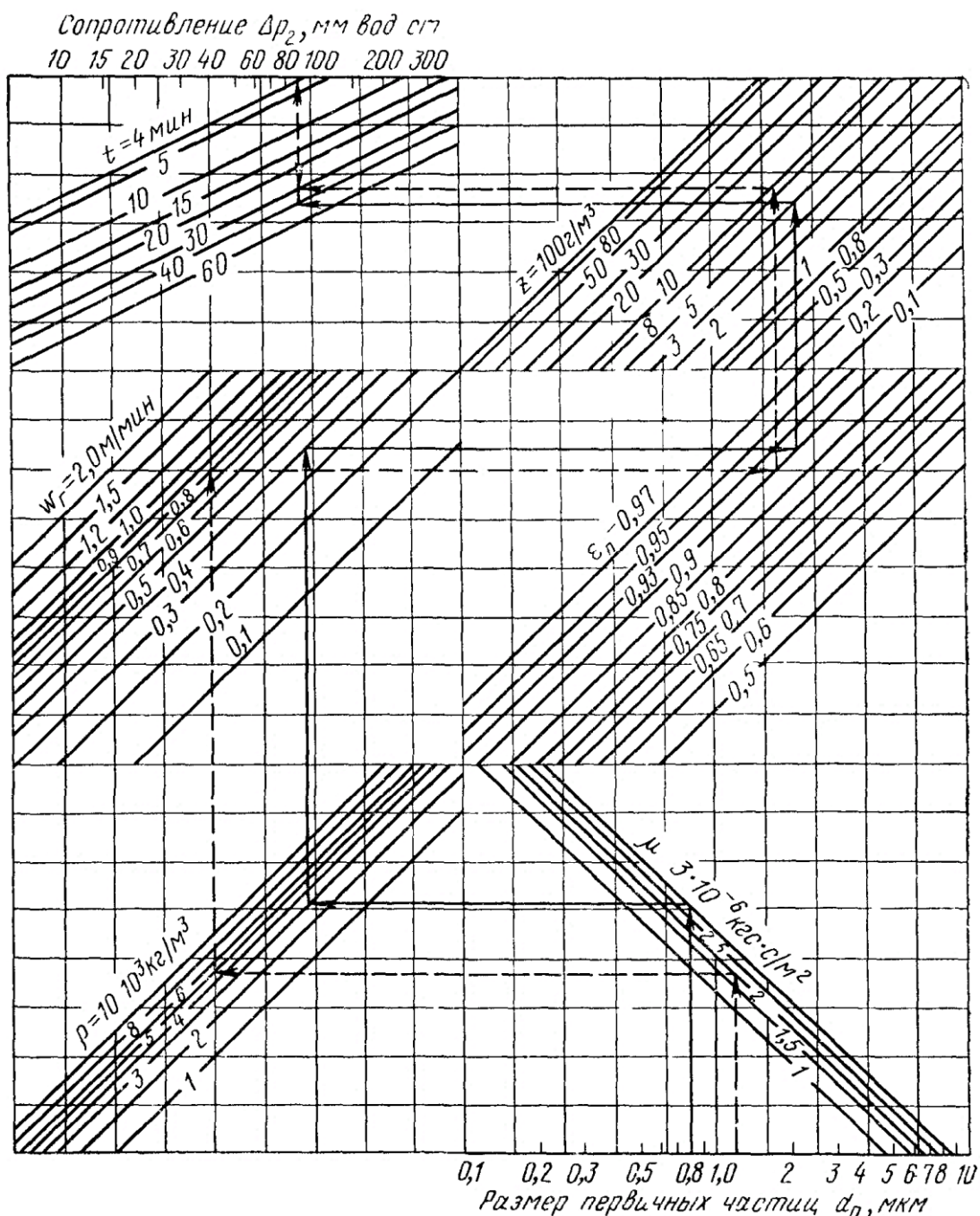


Рис. 2.16. Номограмма для определения сопротивления слоя пыли Δp_2

2.4.2. Пример расчета рукавного фильтра

Задача. Рассчитать рукавный фильтр из ткани нитрон, предназначенный для очистки газов, приняв следующие исходные данные: расход газа перед фильтрами $V_0 = 50000 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура газа, охлажденного в поверхностных холодильниках, $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, динамический коэффициент вязкости при рабочих условиях $\mu = 23,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$, барометрическое давление $101,3 \text{ кПа}$, избыточное давление перед фильтром $p = 30 \text{ Па}$. Концентрация пыли в газе перед

фильтром $Z = 10 \text{ г/м}^3$, средний размер частиц $d_m = 1,5 \text{ мкм}$, плотность пыли $\rho_{\text{п}} = 6200 \text{ кг/м}^3$, пористость ткани $\varepsilon_{\text{т}} = 0,83$, пористость пылевого газа $\varepsilon_{\text{п}} = 0,85$, максимально допустимый перепад давления на фильтр $\Delta p = 0,8 \text{ кПа}$.

Решение:

1. Так как допустимая температура газа для ткани «нитрон» равна $130 \text{ }^\circ\text{С}$, требуется присос воздуха $V_{\text{в}}$ с температурой $30 \text{ }^\circ\text{С}$ для охлаждения газа V_0 с $T_{\text{г}} = 150 \text{ }^\circ\text{С}$ до $T_{\text{смеси}} = 130 \text{ }^\circ\text{С}$:

$$T_{\text{см}}(V_{\text{в}} + V_0) = V_0 T_{\text{г}} + V_{\text{в}} T_{\text{в}} \Rightarrow \frac{V_{\text{в}}}{V_0} = \frac{T_{\text{г}} - T_{\text{см}}}{T_{\text{см}} - T_{\text{в}}} = \frac{150 - 130}{130 - 30} = 0,2.$$

$$\Rightarrow V_{\text{в}} = 0,2 \cdot V_0.$$

2. Полный расход газа на очистку с учетом охлаждающего присоса и воздуха обратной продувки фильтра:

$$V_0' = \frac{(V_0 + V_{\text{в}}) \cdot 1,25}{3600} = \frac{(50000 + 0,2 \cdot 50000) \cdot 1,25}{3600} = 20,8 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Расход газа при рабочих условиях:

$$V_{\text{г}} = V_0' \frac{(273 + T_{\text{см}}) \cdot 101,3}{273(101,3 + p)} = 20,8 \cdot \frac{(273 + 130) \cdot 101,3}{273(101,3 + 0,03)} = 30,7 \text{ м}^3/\text{с}.$$

4. Необходимая рабочая фильтрующая поверхность при скорости фильтрации $0,015 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ составит:

$$F_{\text{раб}} = V_{\text{г}} / \omega_{\text{ф}} = 30,7 / 0,015 = 2047 \text{ м}^2.$$

5. В соответствии с полученным значением $F_{\text{раб}}$ по таблице типовых проектов 2.19 выбираем 20-ти секционный фильтр УРФМ с площадью фильтрации 2300 м^2 . Учитывая, что 1 секция (115 м^2) будет находиться на регенерации, $F_{\text{раб}}$ будет $= 2300 - 115 = 2185 \text{ м}^2$, что близко к расчетному значению.

6. Фактическая скорость фильтрации,

$$\omega_{\text{ф}} = V_{\text{г}} / F = 30,7 / 2185 = 0,014 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

7. Полное гидравлическое сопротивление фильтра, Па:

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2.$$

Воспользуемся для расчета номограммами (рис. 2.15, 2.16).

При помощи номограммы определим сопротивление ткани:

$$\Delta p_1 = 220 \text{ Па.}$$

Тогда сопротивление пылевого слоя

$$\Delta p_2 = \Delta p - \Delta p_1 = 800 - 220 = 580 \text{ Па.}$$

8. По номограмме (табл. 2.16) находим необходимую при заданных условиях продолжительность межрегенерационного периода: $t = 10$ мин.

9. При заданной продолжительности межрегенерационного периода и при тех же прочих условиях можно определить допустимую скорость фильтрации. Например, при $t = 240$ °С

$$\omega_{\text{ф}} = 1,3 \text{ м/мин} = 0,022 \text{ м/с.}$$

2.4.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить продолжительность периода между регенерациями тканевого рукавного фильтра, предназначенного для очистки газов объемом V_0 , м³/ч, температурой T , °С, барометрическое давление 101,3 кПа, избыточное давление перед фильтром p , Па. Концентрация пыли в газе перед фильтром Z , г/м³, средний размер частиц d_m , мкм, плотность пыли $\rho_{\text{п}}$, кг/м³; известны пористость ткани $\varepsilon_{\text{т}}$, пористость пылевого слоя $\varepsilon_{\text{п}}$. Максимальный допустимый перепад давления на фильтре p_{max} , кПа. Определить пылеемкость фильтра. (Допустить, что фильтрация происходит при оптимальной скорости. Температура охлаждающего газа 30 °С.) Исходные данные приведены в табл. 2.20.

Исходные данные

№ варианта	Ткань	Расход газа перед фильтрами, $V_0, \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура поступающего газа, $T, \text{ }^\circ\text{C}$	Избыточное давление перед фильтром, $p, \text{ Па}$	Запыленность $Z, \text{ г}/\text{м}^3$	Диаметр пылевых частиц, $d, \text{ мкм}$	Плотность пыли, $\rho_{\text{п}}, \text{ кг}/\text{м}^3$	Пористость ткани, $\varepsilon_{\text{т}}$	Пористость пылевого слоя, $\varepsilon_{\text{п}}$	Максимальный допустимый перепад давлений на фильтре, $p_{\text{max}}, \text{ кПа}$
1	Хлопок	84000	165	30	5	0,5	8000	0,83	0,90	1,8
2	Шерсть	13500	140	30	15	0,6	5500	0,83	0,85	2,2
3	Капрон	9800	130	80	20	2	5500	0,60	0,85	0,8
4	Номекс	15500	310	50	15	1	7200	0,60	0,90	1,0
5	Лавсан	14000	120	50	7	1	7200	0,60	0,89	1,0
6	Нитрон	11800	330	40	10	1	6800	0,55	0,87	2,0
7	Полипропилен	63300	115	20	5	0,4	10000	0,86	0,90	1,5
8	Оксалон	25000	130	70	6	1,8	4000	0,86	0,70	2,0
9	Стекловолокно	32400	170	60	8	1,2	2400	0,75	0,85	1,0
10	Фторопласт	60000	50	40	7	2,0	3500	0,85	0,70	1,2
11	Шерсть	84000	65	25	6	0,8	7200	0,89	0,90	1,5
12	Хлопок	13500	110	34	11	0,6	5500	0,83	0,80	2,2
13	Лавсан	9800	230	50	9	1,5	3500	0,70	0,75	0,8
14	Номекс	15500	140	60	13	1,0	4200	0,60	0,80	1,1
15	Капрон	14000	50	55	7	1,0	2200	0,70	0,89	1,3
16	Нитрон	11800	130	45	13	1,5	6800	0,65	0,85	2,0
17	Стекловолокно	63300	85	30	5	1,7	4500	0,86	0,91	1,5
18	Оксалон	25000	130	55	6	1,8	4000	0,76	0,78	2,0
19	Полипропилен	32400	70	60	4	1,2	2400	0,70	0,87	1,3
20	Фторопласт	60000	56	35	3	2,2	5600	0,85	0,78	1,5

Задача 2. Найти гидравлическое сопротивление тканевого рукавного фильтра через t минут после включения его в работу для очистки запыленного газа при следующих исходных данных: расход газа перед фильтрами $V_0, \text{ м}^3/\text{ч}$, температура очищаемого газа $T, \text{ }^\circ\text{C}$, барометрическое давление $101,3 \text{ кПа}$, избыточное давление перед фильтром $p, \text{ Па}$. Концентрация пыли в газе перед фильтром $Z, \text{ г}/\text{м}^3$,

средний размер частиц d_m , мкм, плотность пыли ρ_p , кг/м³, пористость ткани ε_T , пористость пылевого слоя $\varepsilon_{п}$. Определить количество уловленной за это время пыли. (Допустить, что фильтрация происходит при оптимальной скорости. Температура охлаждающего газа 30 °С.) Исходные данные приведены в табл. 2.21.

Таблица 2.21

Исходные данные

№ варианта	Ткань	Время работы фильтра, t , мин.	Расход газа перед фильтрами, V_0 , м ³ /ч	Температура поступающего на очистку газа, $T^{\circ}\text{C}$	Избыточное давление перед фильтром, p , Па	Запыленность, Z , г/м ³	Диаметр пылевых частиц, d_m , мкм	Плотность пыли, ρ_p , кг/м ³	Пористость ткани, ε_T	Пористость пылевого слоя, $\varepsilon_{п}$
1	Хлопок	10	13700	270	60	8	1,4	4300	0,83	0,75
2	Шерсть	12	9900	150	60	3	1,2	2000	0,83	0,80
3	Капрон	13	10800	180	30	10	2,0	4800	0,75	0,75
4	Номекс	20	120000	350	70	2	1,0	3200	0,75	0,87
5	Лавсан	5	95000	220	50	6	1,8	1900	0,86	0,80
6	Нитрон	5	30000	400	30	8	3,0	3000	0,86	0,75
7	Полипропилен	6	44000	196	50	7	0,9	2500	0,60	0,88
8	Оксалон	9	34000	45	20	20	4,0	4500	0,60	0,70
9	Стекловолокно	9	27500	350	40	17	0,8	5400	0,55	0,90
10	Фторопласт	15	6600	120	40	15	2,0	7600	0,55	0,80
11	Полипропилен	12	12700	170	60	8	1,4	4300	0,83	0,75
12	Оксалон	10	9500	50	50	3	1,0	2700	0,83	0,80
13	Капрон	15	10700	80	30	10	2,0	4800	0,75	0,75
14	Фторопласт	10	15000	120	50	2	1,0	3200	0,75	0,87
15	Лавсан	15	92000	120	50	6	2,8	2900	0,86	0,80
16	Нитрон	12	34000	300	30	8	3,0	3500	0,86	0,75
17	Хлопок	10	45000	190	50	7	1,9	2500	0,60	0,88
18	Шерсть	15	33000	45	20	4	2,0	4500	0,60	0,70
19	Стекловолокно	10	25500	50	40	7	1,8	6400	0,55	0,90
20	Номекс	10	17600	220	40	5	2,2	4600	0,55	0,80

Контрольные вопросы

1. Что лежит в основе работы пористых фильтров?
2. Какие виды пористых перегородок применяются для фильтрации?
3. Чем определяется скорость фильтрации?
4. Что необходимо делать для поддержания постоянной скорости фильтрации?
5. Перечислите основные характеристики пористых фильтров.
6. Что такое проскок уловленных частиц?
7. Что такое пылеемкость?
8. Какова эффективность тканевых фильтров?
9. Для чего нужна регенерация рукавного фильтра и как она осуществляется?

3. МОКРАЯ ОЧИСТКА ГАЗА

Отличительной особенностью пылеуловителей мокрого типа является захват улавливаемых частиц жидкостью, которая уносит их из аппарата в виде шлама. Захват частиц пыли осуществляется двумя основными способами:

– каплями жидкости (запыленный поток промывается каплями диспергированной жидкости);

– пленкой жидкости (в этом случае поток частиц пыли направляется на поверхность жидкости, смоченную жидкостью стенку или пленку специально полученных газовых пузырей).

Неочищенный газ с частицами пыли пропускается против направления потока высокодисперсных водяных капель. Когда газ протекает относительно капель, частицы пыли в силу их инерционности не следуют изменениям направления течения и ударяются об эти капли. В итоге они сцепляются с ними, смачиваются и вместе с ними осаждаются в виде шлама в подключенном устройстве.

Осаждение пыли происходит тем лучше, чем тоньше водяные капли и чем быстрее они натекают на частицы пыли. При мокрой очистке важную роль играет смачиваемость частиц жидкостью: чем лучше смачиваемость – тем эффективнее очистка.

С помощью такого метода из газов успешно удаляется пыль с размером частиц от 0,5 до 500 мкм.

Мокрая очистка газов наиболее эффективна тогда, когда допустимы увлажнение и охлаждение очищаемого газа, а отделяемые твердые или жидкие частицы имеют незначительную ценность.

Конструктивно мокрые пылеуловители разделяют на скрубберы Вентури, форсуночные и центробежные, аппараты ударно-инерционного типа, барботажно-пенные аппараты и др.

В качестве орошаемой жидкости (абсорбента) чаще всего применяется вода.

3.1. Полный форсуночный скруббер

К полным газопромывателям относятся орошаемые жидкостью, подаваемой через форсунки, участки газопроводов, промывные камеры, полые форсуночные колонны (скрубберы). Наибольшее применение из полых газопромывателей имеет полный форсуночный скруббер.

Форсуночный скруббер (рис. 3.1) состоит из полой емкости 1, в которую встроена форсунка 2. Очищаемый газ поступает через патрубок 3 и направляется на поверхность воды, где осаждаются крупные частицы. Далее поток поднимается вверх навстречу потоку капель жидкости, распыляемый через форсунки. Частицы адсорбируются на поверхности капель и падают вниз. Шлам выводится через нижнюю часть аппарата.

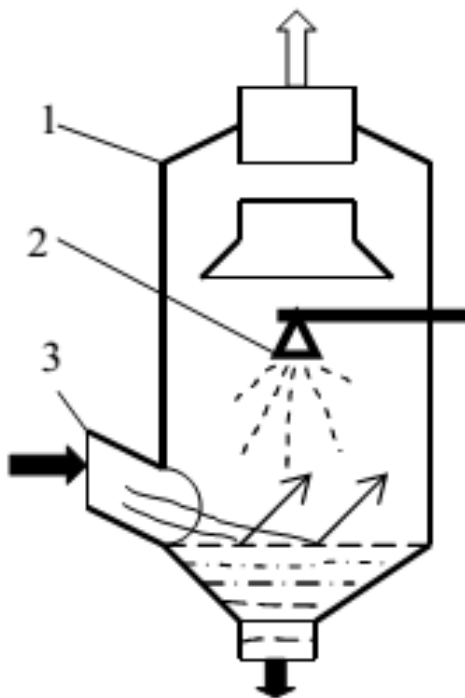


Рис. 3.1. Полный форсуночный скруббер:

1 – емкость; 2 – распыливающая форсунка; 3 – входной патрубок

Очищенный газ выводится через верхнюю часть аппарата. Количество форсунок может быть несколько. Удельный расход воды составляет $q = 3-6 \text{ л/м}^3$, гидравлическое сопротивление – до $\Delta P = 250 \text{ Па}$, при скорости потока $v = 0,7-1,5 \text{ м/с}$. Сечение аппарата можно определить по формуле $S = Q / v$, где Q – объемный расход очищаемого газа, $\text{м}^3/\text{с}$; v – скорость пропускания потока, м/с .

Форсунки используются для распыления жидкости и распределения газа в различных аппаратах защиты окружающей среды (аппараты мокрой очистки газов, абсорберы, адсорберы).

Форсунки можно разделить на три класса: центробежные, центробежно-струйные, ударно-струйные. В каждом классе десятки различных конструкций. На рис. 3.2 приведена центробежно-струйная форсунка с завихряющими вставками.

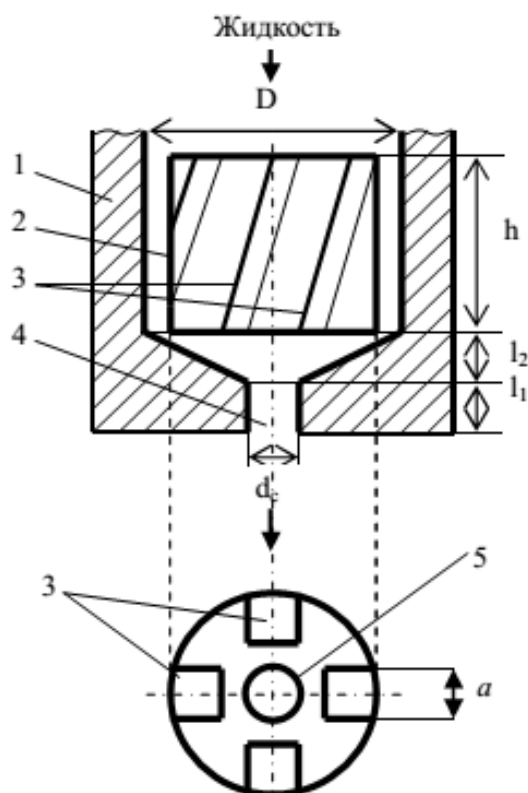


Рис. 3.2. Центробежно-струйная форсунка:

1 – корпус; 2 – вкладыш; 3 – каналы завихряющие; 4 – сопло; 5 – центральный канал

3.1.1. Методика расчета полого форсуночного скруббера

Для расчета скруббера и форсунки необходимы следующие исходные данные:

- расход очищаемого газа $Q_{\text{газ}}$, м³/с;
- скорость потока v , м/с;
- требуемая производительность форсунки Q , м³/с;
- перепад давления $\Delta P_{\text{ж}}$, Па;
- корневой угол факела β , град.;
- свойства жидкости: плотность $\rho_{\text{ж}}$ (кг/м³), вязкость $\mu_{\text{ж}}$ (Па·с) и поверхностное натяжение σ ; плотность $\rho_{\text{г}}$ и вязкость $\mu_{\text{г}}$ окружающего газа; коэффициент расхода γ .

Расчет скруббера осуществляется по методике, изложенной в [1].

1. Определяют сечение скруббера, м²:

$$S = \frac{Q_{\text{газ}}}{v}. \quad (3.1)$$

2. Определяют диаметр скруббера, м:

$$D_{\text{скр}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}. \quad (3.2)$$

3. Определяют высоту скруббера, м:

$$H_{\text{скр}} = (3 \div 4) D_{\text{скр}}. \quad (3.3)$$

Расчет центробежно-струйной форсунки.

1. Определяют диаметр сопла форсунки, мм:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \gamma \sqrt{2 \cdot \Delta P_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}}}}}. \quad (3.4)$$

Для воды $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$.

2. Определяют диаметр вкладыша и равный ему внутренний диаметр корпуса форсунки, мм:

$$D = 1,925 \cdot d_c. \quad (3.5)$$

При $d_c \leq 14 \text{ мм}$ значения D принимают 27 мм.

3. Определяют высоту вкладыша, мм:

$$h = 2,5 + 2 \cdot d_c, \quad (3.6)$$

4. Определяют длину соплового канала, мм:

$$l_1 = (0,5 \div 1,0) \cdot d_c, \quad (3.7)$$

5. Определяют высоту камеры смещения, мм:

$$l_2 = \frac{D - d_c}{2 \cdot \text{tg} \frac{\theta}{2}}. \quad (3.8)$$

где угол конусности камеры $\theta = 110 \div 130^\circ$.

6. Определяют диаметр центрального канала, мм:

$$d_0 = d_{\text{ц}} \sqrt{0,676 - 0,024 \cdot d_{\text{с}}} \quad (3.9)$$

7. Определяют суммарную площадь закручивающихся каналов, мм:

$$S_{\text{к}} = 1,075 \cdot \pi d_0^2 \quad (3.10)$$

8. Определяют угол наклона закручивающихся каналов:

$$\lg \alpha = 0,053 \cdot \beta \left(\frac{d_0^2}{d_{\text{с}}^2} \right)^{0,58} + 0,32, \quad (3.11)$$

где β в [рад] (1 рад = 57,3 град). Далее находят $\alpha = 10^x$, [рад], и переводят в [град], где $x = \lg \alpha$.

9. Определяют размер закручивающихся каналов, мм:

$$a = \sqrt{\frac{S_{\text{к}}}{n \cdot \cos \alpha}}, \quad (3.12)$$

где число каналов $n = 4 \div 6$ (если $\alpha > 90^\circ$, то заменить $\cos \alpha$ на $\cos(\alpha - 90)$).

10. По необходимости определяют средний объемно-поверхностный диаметр капель жидкости, мм:

$$d_{\text{ж}} = 0,154 \cdot \Delta P_{\text{ж}}^{0,44} \cdot d_{\text{с}}^{0,23}, \quad (3.13)$$

где $\Delta P_{\text{ж}}$ в [МПа], $d_{\text{с}}$ в [мм].

3.1.2. Задачи для самостоятельного решения

Задача. Рассчитать параметры полого форсуночного скруббера для очистки воздуха от пыли по исходным данным, приведенным в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Исходные данные

№ вар.	$Q_{\text{газ}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$v, \text{ м/с}$	$\Delta P_{\text{ж}}, \text{ МПа}$	γ	β
1	2	3	4	5	6	7
1	3000	30	0,50	0,50	0,85	80
2	2800	28	0,45	0,45	0,80	65
3	2500	25	0,40	0,40	0,75	70
4	1500	15	0,35	0,35	0,67	60

1	2	3	4	5	6	7
5	1000	10	0,20	0,20	0,71	85
6	500	5	0,15	0,15	0,65	75
7	2400	24	0,45	0,45	0,83	80
8	1600	16	0,30	0,30	0,74	60
9	1800	18	0,40	0,40	0,70	65
10	2000	20	0,25	0,25	0,81	70
11	1200	12	0,20	0,20	0,73	80
12	1500	15	0,30	0,30	0,78	75
13	2200	22	0,40	0,40	0,69	60
14	2500	25	0,50	0,50	0,84	75
15	3000	30	0,45	0,45	0,46	75
16	3000	30	0,50	0,50	0,58	80
17	2800	28	0,50	0,50	0,67	60
18	2500	25	0,45	0,45	0,71	75
19	1500	15	0,40	0,40	0,65	80
20	1000	10	0,35	0,35	0,83	60

3.2. Скрубберы Вентури

Простейший скруббер Вентури (рис. 3.3) включает в себя трубу Вентури и прямоточный циклон. Труба Вентури состоит из конфузора, служащего для увеличения скорости газа, и в котором размещают оросительное устройство, горловины, где происходит осаждение частиц пыли на каплях воды, и диффузора, в котором протекают процессы коагуляции, а также за счет снижения скорости восстанавливается часть давления, затраченного на создание высокой скорости газа в горловине. В каплеуловителе (циклоне) благодаря тангенциальному вводу газа создается вращение газового потока, вследствие чего смоченные и укрупненные частицы пыли отбрасываются на стенки и непрерывно удаляются из каплеуловителя в виде шлама.

При подаче орошающей жидкости в трубу Вентури ее начальная скорость незначительна. За счет сил динамического давления газового потока капли одновременно с дроблением получают значительные ускорения и в конце горловины приобретают скорость, близкую к скорости газового потока. В диффузоре скорости газового потока и капель падают, причем вследствие сил инерции скорость капель превышает скорость газового потока. Поэтому захват частиц

пыли каплями наиболее интенсивно идет в конце конфузора и в горловине, где скорость газа относительно капли особенно значительна и коагуляция протекает наиболее эффективно.

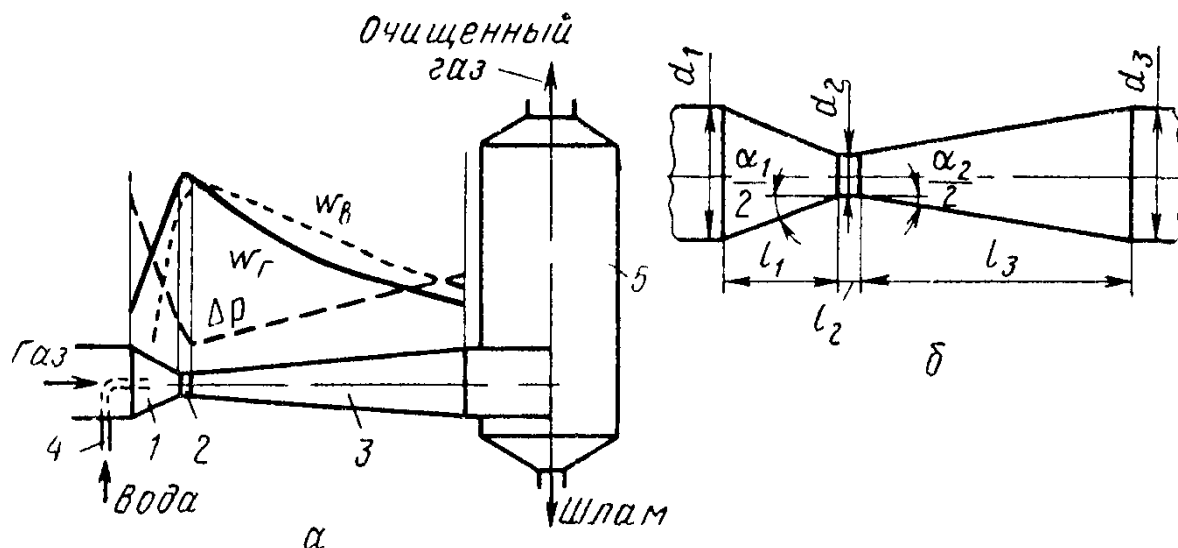


Рис. 3.3. Скруббер Вентури:

1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор; 4 – подача воды; 5 – каплеуловитель

Аэродинамически оптимальными являются следующие соотношения размеров труб Вентури круглого сечения, в соответствии с которыми эти трубы нормализованы (см. рис. 3.3):

– длина горловины

$$l_2 = 0,15d_2, \quad (3.14)$$

где d_2 – диаметр горловины, рассчитывается по формуле:

$$d_2 = 1,13 \sqrt{\frac{V_2}{\omega_2}}, \quad (3.15)$$

где ω_2 – скорость газа, м/с, в горловине Вентури;

– угол сужения конфузора $\alpha_1 = 15 \div 28^\circ$;

– длина конфузора

$$l_1 = \frac{(d_1 - d_2)}{2 \operatorname{tg}(\alpha_1 / 2)}; \quad (3.16)$$

– угол расширения диффузора $\alpha_1 = 6 \div 8^\circ$,

– длина диффузора

$$l_3 = \frac{(d_3 - d_2)}{2 \operatorname{tg}(\alpha_2 / 2)}; \quad (3.17)$$

– диаметр входного отверстия конфузора определяют из соотношения:

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{V_1}{\omega_1}}, \quad (3.18)$$

– диаметр выходного сечения диффузора d_3 находят по формуле:

$$d_3 = 1,13 \sqrt{\frac{V_2}{\omega_3}}, \quad (3.19)$$

где V_1, V_2 – количество газа при рабочих условиях на входе и на выходе из трубы Вентури, соответственно, $\text{м}^3/\text{с}$; ω_1, ω_3 – скорость газа при входном сечении конфузора и в выходном сечении диффузора, $\text{м}/\text{с}$.

В промышленности при малых скоростях газа и мелкодисперсной пыли иногда применяют трубы Вентури с удлиненной горловиной $l_2 = (3 \div 5) d_2$, дающие в этом случае повышенную эффективность.

По способу подачи жидкости трубы Вентури делят на три группы:

– с форсуночным орошением (рис. 3.4, *а*) (через оросительные устройства, выполненные в виде форсунок);

– с пленочным орошением (рис. 3.4, *б*) (при котором подаваемая вода непрерывно стекает по стенкам конфузора, образуя возобновляющуюся пленку);

– с периферийным орошением (рис. 3.4, *в*) (организуется более полное орошение в трубах Вентури – круглого или прямоугольного сечения – больших размеров через отверстия с двух противоположных сторон, расположенных в шахматном порядке);

– с совместной конструкцией.

В качестве каплеуловителей применяются преимущественно прямоточные циклоны, центробежные скрубберы ВТИ.

Для увеличения пропускной способности скрубберов Вентури создаются компоновки, состоящие из нескольких параллельно работающих труб.

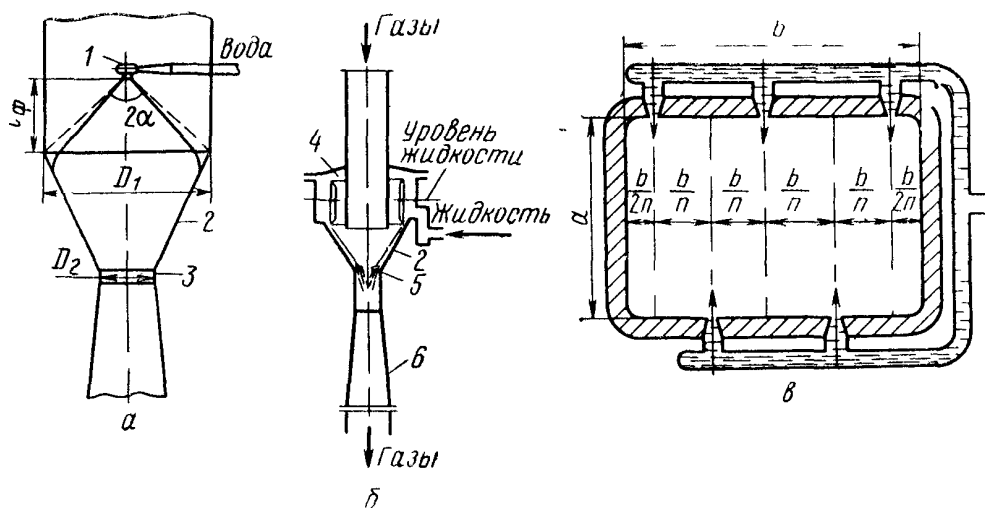


Рис. 3.4. Способы орошения труб Вентури:
 1 – форсунка; 2 – конфузор; 3 – горловина; 4 – камера для воды;
 5 – уступ; 6 – диффузор

В табл. 3.2 приведена сравнительная характеристика аппаратов мокрой очистки газа.

Таблица 3.2

Сравнительная характеристика некоторых аппаратов мокрой очистки

Аппарат	Диаметр эффективно улавливаемых частиц, d , мкм	Скорость газа в аппарате, ω_r , м/с	Удельный расход орошающей воды, q , л/м ³	Гидравлическое сопротивление, p , кПа	Эффективность очистки, η , %
Форсуночный скруббер	> 10–15	0,7–1,5	3–6	≤ 0,250	60–75
Скруббер Вентури	≤ 1–2	горловина трубы – 50–160; входное сечение конфузора – 8–12; выходное сечение диффузора – 16–20; каплеуловитель – 4–5 м/с	0,4–1,2	10–20	96–99

3.2.1. Методика расчета скрубберов Вентури. Эффективность очистки мокрого пылеуловителя рассчитывают энергетическим методом. В основе метода лежит зависимость между затратами энергии на процесс очистки от пыли данного вида и эффективностью работы аппарата (и не зависит от размера и конструкции пылеуловителя). При этом учитывается как энергия, затраченная на движение газа через пылеуловитель, так и энергия, израсходованная на подачу и диспергирование жидкости.

Эффективность очистки скруббера Вентури определяется по формуле:

$$\eta = 1 - e^{-BE^\chi}, \quad (3.20)$$

где B и χ – константы, зависящие от физико-химических свойств и дисперсионного состава пыли, определяемые экспериментальным путем (табл. 3.3);

E – расход энергии на обработку жидкостью определенного объема газов в единицу времени (суммарная энергия соприкосновения), кДж/1000 м³ газа, определяется по формуле:

$$E = \Delta p + p_{\text{ж}} \frac{V_{\text{ж}}}{V_{\text{г}}} = \Delta p + p_{\text{ж}} \cdot q, \quad (3.21)$$

где Δp – гидравлическое сопротивление скруббера, Па; $p_{\text{ж}}$ – давление распыляемой жидкости (напор) при входе в аппарат, Па; $V_{\text{ж}}$ и $V_{\text{г}}$ – объемные расходы жидкости и газа, соответственно, м³/с; q – удельный расход воды, м³/м³.

С эффективностью очистки связано число единиц переноса $N_{\text{ч}}$:

$$N_{\text{ч}} = l_n \frac{1}{1 - \eta}, \quad (3.22)$$

Из формул (3.20) и (3.22) следует, что

$$N_{\text{ч}} = B \cdot E^\chi. \quad (3.23)$$

Эта зависимость аппроксимируется в логарифмических координатах $E - N_{\text{ч}}$ прямой линией, угол наклона которой к горизонту дает величину χ , а величина B определяется как $N_{\text{ч}}$ при $E = 1$ (рис. 3.4).

Гидравлическое сопротивление скруббера Вентури Δp равно сумме сопротивлений трубы Вентури Δp_T и Δp_K каплеуловителя:

$$\Delta p = \Delta p_T + \Delta p_K. \quad (3.24)$$

Потеря давления в трубе Вентури зависит от скорости газов в горловине ω_r и удельного расхода воды q ($\text{м}^3/\text{м}^3$) и определяется как сумма:

$$\Delta p_T = \Delta p_c + \Delta p_{ж} = \xi_c \frac{\omega_r^2 \rho_r}{2} + \xi_{ж} \frac{q \omega_r^2 \rho_{ж}}{2} = \frac{\omega_r^2}{2} (\xi_c \rho_r + \xi_{ж} \rho_{ж} q), \quad (3.25)$$

где Δp_c – гидравлическое сопротивление сухой трубы (без подачи жидкости на орошение), Па; $\Delta p_{ж}$ – гидравлическое сопротивление, обусловленное введением жидкости, Па; ξ_c и $\xi_{ж}$ – коэффициенты сопротивления сухой трубы и вызванного вводом жидкости; ω_r – скорость газа в горловине трубы при рабочих условиях, м/с; ρ_r и $\rho_{ж}$ – плотность газа при рабочих условиях и жидкости, соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для нормализованных труб, работающих в условиях, соответствующих данным табл. 3.3, ξ_c и $\xi_{ж}$ принимаются равными:

$$\begin{aligned} \xi_c &= 0,12 \div 0,15; \\ \xi_{ж} &= 0,63 \cdot \xi_c (q)^{-0,3}. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Гидравлическое сопротивление каплеуловителя, Па:

$$\Delta p_K = \xi_K \frac{\omega_K^2 \rho_r}{2}. \quad (3.27)$$

Для прямоточного циклона $\xi_K = 30 \div 33$, для циклона ЦН-24 $\xi_K = 70$. Плотность газа ρ_r принимается равной плотности газа на выходе из трубы Вентури. Скорость газа в каплеуловителе ω_K должна находиться в пределах 2,5–4,5 м/с.

Необходимый диаметр каплеуловителя определяется по формуле:

$$D_k = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{V_2}{\omega_k}}. \quad (3.28)$$

Активная высота каплеуловителя определяется в зависимости от скорости газа в циклоне по табл. 3.4.

Одновременно с пылезadržанием в аппаратах мокрой очистки происходят процессы тепло- и массообмена, вследствие различных температур газа и жидкости. При расчете скруббера Вентури необходимо знать температуру газа на выходе из трубы Вентури, которая определяется по формуле:

$$T_2 = (0,133 - 0,041q) T_1 + 35, \quad (3.29)$$

где T_1 – начальная температура газов; q – удельный расход воды, л/м³.

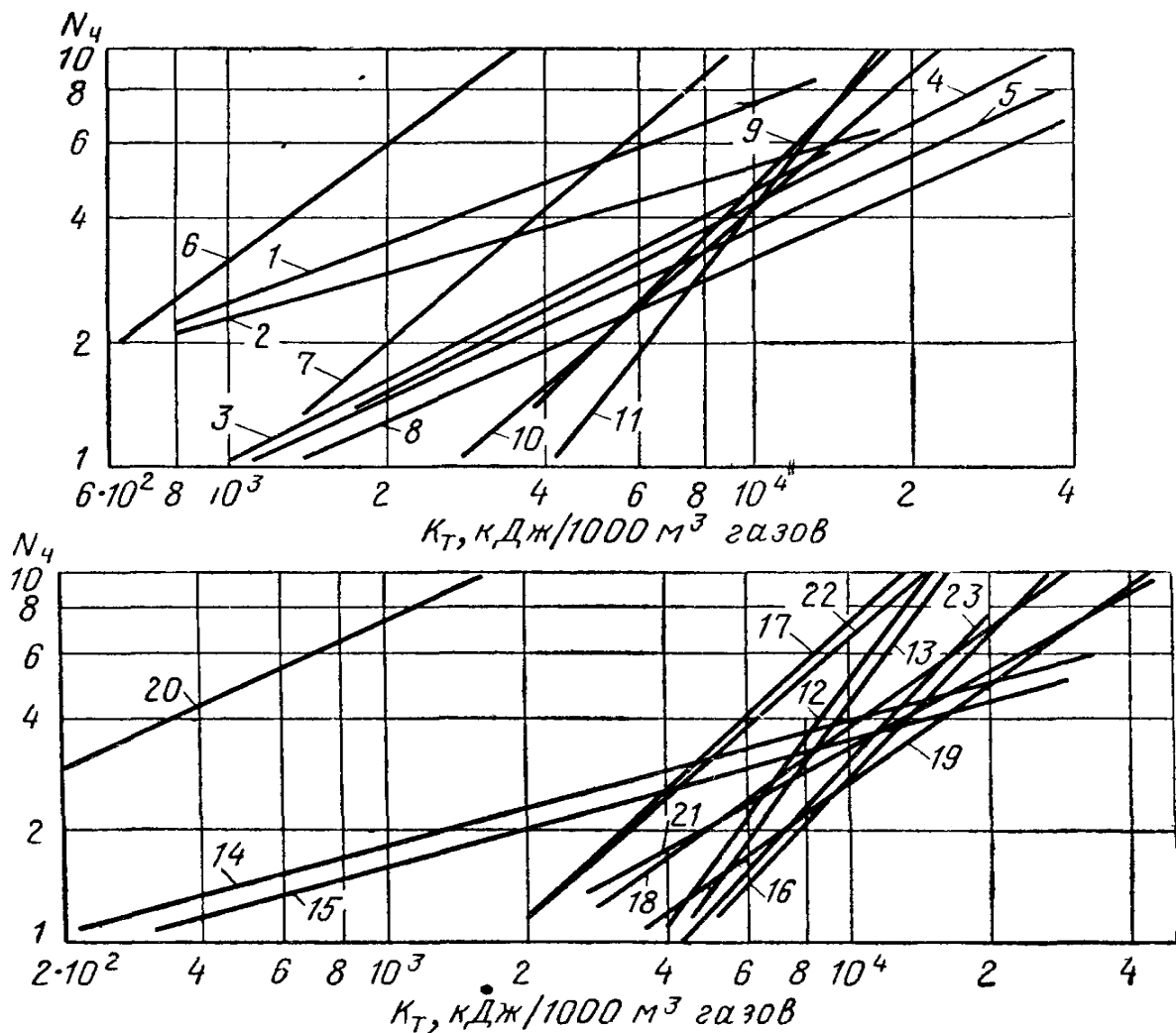


Рис. 3.5. Зависимости коэффициентов очистки мокрых пылеуловителей от энергетических затрат

Таблица 3.3

Характеристика некоторых видов пылей и туманов

Номер прямой на рис. 3.5	Виды пыли и тумана.	B	χ
1	Конверторная пыль (при продувке кислородом сверху)	$9,8 \cdot 10^{-2}$	0,4663
2	Тальк	0,206	0,3506
3	Туман фосфорной кислоты	$1,34 \cdot 10^{-2}$	0,6312
4	Ваграночная пыль	$1,355 \cdot 10^{-2}$	0,6210
5	Мартеновская пыль	$1,915 \cdot 10^{-2}$	0,5688
6	Колошниковая (доменная) пыль	$6,61 \cdot 10^{-3}$	0,891
7	Пыль известковых печей	$6,5 \cdot 10^{-4}$	1,0529
8	Пыль, содержащая окислы цинка из печей, выплавляющих латунь	$2,34 \cdot 10^{-2}$	0,5317
9	Щелочной аэрозоль из известковых печей	$5,53 \cdot 10^{-5}$	1,2295
10	Аэрозоль сульфата меди	$2,14 \cdot 10^{-4}$	1,0679
11	Дурно пахнущие вещества	$1,09 \cdot 10^{-5}$	1,1446
12	Пыль мартеновских печей, работающих на дутье, обогащенном кислородом	$1,565 \cdot 10^{-6}$	1,619
13	Пыль мартеновских печей, работающих на воздушном дутье	$1,74 \cdot 10^{-6}$	1,594
14	Пыль из доменных печей	0,1925	0,3255
15	Пыль из томасовского конвертора	0,268	0,2589
16	Пыль, образующаяся при выплавке 45%-го ферросилиция в закрытых электропечах	$2,42 \cdot 10^{-5}$	1,26
17	Пыль, образующаяся в электропечах при производстве целлюлозы	$4 \cdot 10^{-4}$	1,05
18	Пыль производства черного щелока при обработке увлажненных газов	$1,32 \cdot 10^{-3}$	0,861
19	то же, при обработке сухих газов	$9,3 \cdot 10^{-4}$	0,861
20	Частицы поташа из МГД-установок открытого цикла	0,016	0,554
21	Пыль, образующаяся при выплавке силико-марганца, в закрытых электропечах	$6,9 \cdot 10^{-3}$	0,67
22	Пыль коалинового производства	$2,34 \cdot 10^{-4}$	1,115
23	Сажа, образующаяся при электрокрекинге метана	10^{-5}	1,36

Активная высота каплеуловителя

Скорость газа в каплеуловителе, ω_k , м/с	2,5–3	3–3,5	3,5–4,5	4,5–5,5
Высота каплеуловителя, H_k , (в долях от D_k)	2,5	2,8	3,8	4,5

3.2.2. Пример расчета скруббера Вентури

Задача. Рассчитать скруббер Вентури для очистки отходящих газов закрытой электропечи, выплавляющей силикомарганец, определить его размеры, эффективность и гидравлическое сопротивление при следующих условиях: расход влажного газа $V_0 = 2000 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура Газа $T_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, разрежение перед очисткой $p_1 = 2 \text{ кПа}$, плотность газа $\rho_0 = 1,26 \text{ кг/м}^3$, концентрация пыли в газе $Z_1 = 1 \text{ г/м}^3$, температура воды, поступающей на орошение под напором $p_{\text{ж}} = 300 \text{ кПа}$, равна $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Необходимая концентрация пыли на выходе аппарата $Z_2 = 20,0 \text{ мг/м}^3$. Удельный расход воды на орошение $q = 0,0012 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Решение:

1. Необходимая эффективность работы аппарата

$$\eta = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} = \frac{1 - 0.02}{1} = 0.98.$$

2. Число единиц переноса по формуле (3.22)

$$N_{\text{ч}} = \ln \frac{1}{1 - \eta} = \ln \frac{1}{1 - 0.98} = 3.91.$$

3. Удельная энергия, затрачиваемая на пылеулавливание из формулы (3.23):

$$N_{\text{ч}} = BE^\chi; \quad 3,91 = 6,9 \cdot 10^{-3} E^{0,67}.$$

Откуда

$$E = 12860 \text{ кДж} / 1000 \text{ м}^3 \text{ газа.}$$

Значения B и χ приняты по табл. 3.3.

4. Общее гидравлическое сопротивление скруббера Вентури:

$$\Delta p = E - q = 12860 - 300000 \cdot 0,0012 = 12500 \text{ Па.}$$

5. Плотность газа на входе в трубу Вентури при рабочих условиях:

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{273(101,3 - p_1)}{(273 + T_1) 101,3} = \frac{273 (101,3 - 2)}{(273 + 60) 101,3} = 1,01 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

6. Объемный расход газа, поступающего в трубу Вентури при рабочих условиях:

$$V_1 = V_0 \frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{2000 \cdot 1,26}{3600 \cdot 1,01} = 0,69 \text{ м}^3/\text{с}.$$

7. Температура газов на выходе из трубы Вентури:

$$T_2 = (0,133 - 0,041q)T_1 + 35 + (0,133 - 0,041 \cdot 1,2)60 = 40 \text{ }^\circ\text{C}.$$

8. Плотность газа на выходе из скруббера Вентури:

$$\rho_2 = \rho_0 \frac{273(101,3 - p_1 - \Delta p)}{(273 + T_2)101,3} = 1,26 \frac{273(101,3 - 2 - 12,5)}{(273 + 40)101,3} = 0,9 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

9. Объемный расход газа на выходе из трубы Вентури при рабочих условиях:

$$V_2 = V_0 \frac{\rho_0}{\rho_2} = \frac{2000 \cdot 1,26}{3600 \cdot 0,94} = 0,74 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

10. Диаметр циклона-каплеуловителя по формуле 3.28:

$$D_k = 1,13\sqrt{0,74/2,5} = 0,61 \text{ м,}$$

где ω_k принимаем равным 2,5 м/с или определяем из соотношения

$$\omega_k = \left(\frac{4V_2}{\pi D_k^2} \right).$$

11. Высота циклона-каплеуловителя согласно табл. 3.4:

$$H = 2,5 \cdot D = 2,5 \cdot 0,61 = 1,53 \text{ м.}$$

12. Гидравлическое сопротивление циклона-каплеуловителя по формуле (3.27):

$$\Delta p_{\kappa} = 32 \frac{2,5^2 \cdot 0,94}{2} = 94 \text{ Па.}$$

13. Гидравлическое сопротивление трубы Вентури по формуле (3.24):

$$\Delta p_{\Gamma} = \Delta p - \Delta p_{\kappa} = 12,540 - 0,094 = 12,446 \text{ кПа.}$$

14. Коэффициент сопротивления, обусловленный вводом орошающей жидкости, для нормализованной трубы Вентури:

$$\xi_{\text{ж}} = 0,63 \xi_{\text{с}}(q)^{-0,3} = 0,63 \cdot 0,15(0,0012)^{-0,3} = 0,71.$$

15. Необходимая скорость газов в горловине трубы Вентури из формулы (3.25):

$$\omega_{\Gamma} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{\Gamma}}{\xi_{\text{с}}\rho_{\Gamma} + \xi_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}q}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12446}{0,15 \cdot 0,94 + 0,71 \cdot 998,2 \cdot 0,0012}} = 158 \text{ м/с.}$$

16. Диаметр горловины трубы Вентури по формуле (3.15):

$$d_2 = 1,13 \sqrt{0,74 / 158} = 0,077 \text{ м.}$$

17. По полученному диаметру находятся все остальные размеры нормализованной трубы Вентури.

3.2.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача. Рассчитать скруббер Вентури для очистки запыленного газа, определить его размеры, эффективность и гидравлическое сопротивление при следующих условиях: расход газа V_0 , м³/ч, температура газа T_{Γ} , °С, разрежение перед газоочисткой, p , кПа, плотность газа $\rho_{\Gamma} = 1,26 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, концентрация пыли в газе Z_1 , г/м³, необходимая концентрация пыли на выходе из аппарата Z_2 , мг/м³. Поступающая на орошение вода $T_{\text{ж}} = 30$ °С имеет напор $p_{\text{ж}}$, кПа. Исходные данные приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Исходные данные

№ вар.	Вид пыли	Расход газа V_0 , м ³ /ч	Температура газа T_r , °С	Разрежение перед газоочисткой, p , кПа	Концентрация пыли в газе Z_1 , г/м ³	Напор орошающей воды, $P_{ж}$, кПа	Удельный расход воды на орошение, q , л/м ³	Концентрация пыли на выходе из аппарата Z_2 , мг/м ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Мартеновская пыль	1800	120	2	5	250	1,1	100
2	Пыль известковых печей	2000	90	1,5	30	200	1,0	600
3	Пыль доменных печей	4500	250	1,8	17	230	0,8	300
4	Пыль каолинового производства	1900	100	1	3	300	1,2	60
5	Сажа	5600	180	1	10	300	1,2	200
6	Гальк	1100	110	1,5	8	200	0,9	160
7	Ваграночная пыль	1470	80	1,9	16	200	0,7	320
8	Конверторная пыль	2500	210	2	22	250	1,0	440
9	Пыль, образующаяся в печах при производстве целлюлозы	8000	150	1	2	250	0,1	80
10	Окислы цинка	1500	70	2	18	200	0,7	400
11	Сажа	2000	100	1,5	1	180	0,6	40
12	Пыль, образующаяся при выплавке силикомарганца	4000	160	2	4	200	0,8	80
13	Пыль известковых печей	6500	160	1,7	15	250	1,0	300
14	Мартеновская пыль	4000	190	2	10	250	1,1	300
15	Конверторная пыль	3000	300	1,5	9	300	1,2	180
16	Частицы поташа	5000	90	2	3	220	0,9	120

1	2	3	4	5	6	7	8	9
17	Пыль производства черного щелока (увлажненные газы)	900	100	1	5	250	0,9	100
18	Пыль производства черного щелока сухие газы	1300	190	1,3	2	300	1,2	60
19	Дурнопахнущие веществ	2500	150	1,8	25	230	1,0	500
20	Гальк	7200	80	2	1	200	0,9	30

Контрольные вопросы

1. В чем суть мокрой очистки газа от пыли?
2. От чего зависит эффективность осаждения пыли в аппаратах мокрой очистки газа?
3. Из чего состоит форсуночный скруббер?
4. На какие классы подразделяются форсунки?
5. Из чего состоит скруббер Вентури?
6. Какие бывают трубы Вентури по способу подачи жидкости?

3.3. Пенные газоочистители

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

На рис. 3.5 показана схема, а в табл. 3.6 приведены основные размеры однополочных аппаратов для очистки газов с отводом воды через сливное устройство.

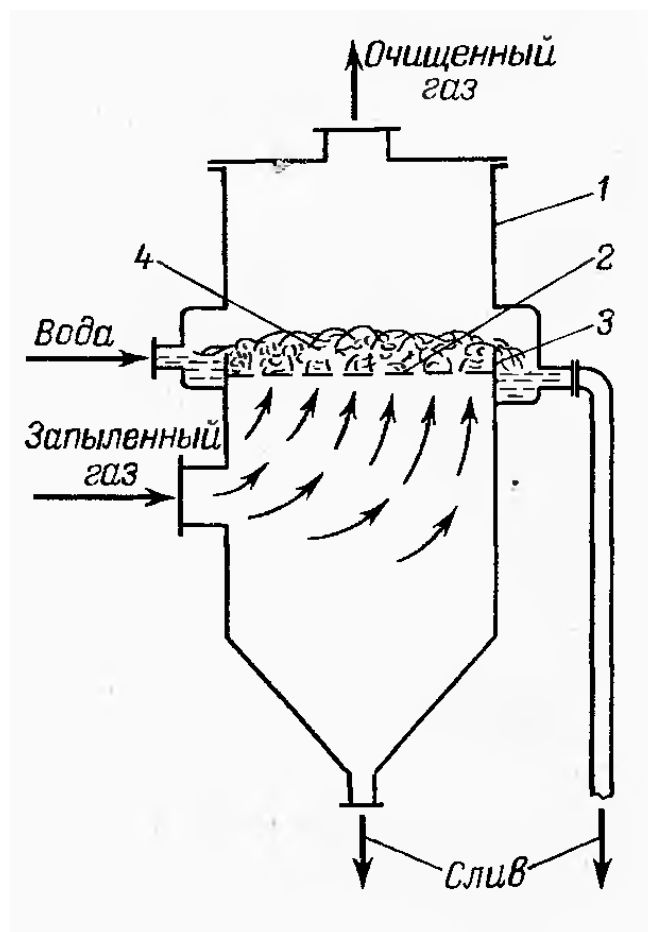


Рис. 3.6. Пенный газоочиститель:
 1 – корпус; 2 – перфорированная полка (решетка);
 3 – сливной порог; 4 – слой пены

Таблица 3.6

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

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

При расчете пенных газоочистителей определяют площадь поперечного сечения аппарата; расход воды, который требуется для очистки газа; высота слоя пены и сливного порога, обеспечивающие нормальную работу аппарата.

3.3.1. Методика расчета пенного газопромывателя

1. Расчет пенного газопромывателя проводится по методике, изложенной в [10]. Выбор расчетной скорости газа. Скорость газа в аппарате – один из важнейших факторов, определяющих эффективность работы аппарата. Допустимый диапазон фиктивных скоростей составляет 0,5–3,5 м/с. Однако при скоростях выше 2 м/с начинается сильный брызгоунос и требуется установка специальных брызгоуловителей. При скоростях меньше 1 м/с возможно сильное протекание жидкости через отверстия решетки, вследствие чего высота слоя пены снижается, а жидкость может не полностью покрывать поверхность решетки. Для обычных условий рекомендуемая скорость $\omega = 2$ м/с.

2. Определение площади и формы сечения аппарата.

Площадь сечения S (м²) равна

$$S = Q_{\text{н}} / \omega, \quad (3.30)$$

где $Q_{\text{н}}$ – расход газа, поступающего в аппарат при рабочих условиях, м³/с.

Газоочиститель может быть круглого или прямоугольного сечения. В первом случае обеспечивается более равномерное распределение газа, во втором – жидкости. При выборе аппарата прямоугольного сечения длину и ширину решетки находят с помощью табл. 3.6.

3. Определение расхода поступающей воды.

Для холодных и сильно запыленных газов расход определяется из материального баланса пылеулавливания, для горячих газов из теплового баланса. Обычно газ можно рассматривать как холодный, если его температура ниже 100 °С.

Расход поступающей воды L (кг/с) рассчитывают, исходя из материального баланса пылеулавливания:

$$L = L_{\text{у}} + L_{\text{сл}}, \quad (3.31)$$

где $L_{\text{у}}$ – расход воды, стекающий через отверстия в решетке (утечка), $L_{\text{сл}}$ – расход воды, стекающий через сливной порог, кг/с.

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

$$L_y = G_{\text{п}} K_p / x_y. \quad (3.32)$$

Расход уловленной пыли (в кг/с) может быть определен по соотношению:

$$G_{\text{п}} = Q_{\text{н}} c_{\text{н}} \eta, \quad (3.33)$$

где $c_{\text{н}}$ – начальная концентрация пыли в газе, кг/м³; η – заданная степень пылеулавливания, доли единицы.

Коэффициент распределения K_p – находится в диапазоне 0,6–0,8. Концентрация пыли в утечке изменяется от $x_y = 0,2$ (для не склонных к слипанию минеральных пылей) до $x_y = 0,05$ (для цементирующихся пылей).

Поскольку в утечку попадает больше пыли, чем в воду, стекающую через сливной порог, то для уменьшения общего расхода воды целесообразно уменьшать величину $L_{\text{сл}}$. Однако слишком сильная утечка создает неравномерность высоты слоя воды на решетке. Поэтому в расчетах рекомендуется принимать $L_{\text{сл}} = L_y$. Исходя из этого, выражение (3.31) приводится к виду:

$$L = 2G_{\text{п}} K_p / x_y. \quad (3.34)$$

4. Определение типа решетки.

В задачу этот этапа расчета входит выбор типа перфорации (круглые отверстия или щели), диаметра отверстия d_o или ширины щели $b_{\text{щ}}$ и шага между ними t . Форму отверстий выбирают из конструктивных соображений, а их размер – исходя из вероятности забивки пылью. Обычно принимают $b_{\text{щ}} = 2\text{--}4$ мм, $d_o = 2\text{--}6$ мм. Затем выбирают такую скорость газа в отверстиях ω_0 , которая обеспечит необходимую величину утечки. При диаметрах отверстий $d_o = 2\text{--}3$ мм скорость газа должна составлять 6–8 м/с, а при $d_o = 4\text{--}6$ мм $\omega_0 = 10\text{--}13$ м/с.

5. Далее рассчитывают долю свободного сечения решетки, отвечающую выбранной скорости:

$$S_0 = \omega / (\omega_0 \varphi), \quad (3.35)$$

где φ – отношение перфорированной площади решетки к площади сечения аппарата ($\varphi = 0,9 - 0,95$).

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

$$t = d_0 \sqrt{0,91 / S_0}. \quad (3.36)$$

Толщину решетки δ по конструктивным соображениям. Минимальному гидравлическому сопротивлению отвечает $\delta = 4 - 6$ мм.

6. Определение высоты слоя пены и сливного порога.

Высоту порога на сливе с решетки устанавливают исходя из создания слоя пены такой высоты, которая обеспечила бы необходимую степень очистки газа.

Первоначально определяют коэффициент скорости пылеулавливания K_{Π} (в м/с):

$$K_{\Pi} = 2\eta\omega / 2 - \eta, \quad (3.37)$$

где η – заданная степень очистки газа.

Связь между K_{Π} и высотой слоя пены H (в м) при улавливании водой гидрофильной пыли выражается эмпирическим уравнением:

$$H = K_{\Pi} - 1,95\omega + 0,09. \quad (3.38)$$

Далее определяют высоту исходного слоя воды на решетке h_0 (в м):

$$h_0 = 1,43H^{1,67}\omega^{-0,83}. \quad (3.39)$$

Высоту порога h_{Π} (в м) рассчитывают по эмпирической формуле:

$$h_{\Pi} = 2,5h_0 - 0,0176\sqrt[3]{i^2}, \quad (3.40)$$

где i – интенсивность потока на сливе с решетки [в кг/(м·с)], определяемая как:

$$i = L_{\text{сл}} / b_{\text{сл}}, \quad (3.41)$$

где $b_{\text{сл}}$ – ширина сливного отверстия. При прямоугольном аппарате $b_{\text{сл}}$ равна ширине решетки.

3.3.2. Пример расчета пенного газопромывателя

Задача. Рассчитать пенный газопромыватель для очистки 48000 м³/ч газа от гидрофильной пыли не склонной к слипанию. Температура газа 60 °С. Запыленность газа на входе в аппарат $c_{\text{п}} = 0,008$ кг/м³, требуемая степень очистки $\eta = 0,99$. Очистка производится водой.

Решение:

1. Принимаем рабочую скорость газа $\omega = 2$ м/с.
2. Рассчитываем по (3.30) площадь сечения аппарата:

$$S = \frac{48000}{(3600 \cdot 2)} = 6,67 \text{ м}^2.$$

3. По табл. 3.6 выбираем аппарат ЛТИ-ПГС-50, имеющий решетку длиной 2,1 м и шириной 3,48 м. Сечение аппарата:

$$S = 2,1 \cdot 3,48 = 7,3 \text{ м}^2.$$

Фактическая скорость газа:

$$\omega = \frac{48000}{3600 \cdot 7,3} = 1,82 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

4. Определяем по формуле (3.33) расход уловленной пыли:

$$G_{\text{п}} = 48000 \cdot 0,008 \cdot 0,99 / 3600 = 0,106 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

5. Принимаем коэффициент распределения $K_{\text{р}} = 0,7$ и концентрацию пыли в утечке $x_{\text{у}} = 0,15$ кг пыли/ кг воды. Тогда расход поступающей воды составит (3.34):

$$L = 2 \cdot 0,106 \cdot \frac{0,7}{0,15} = 0,989 \text{ кг/с}.$$

6. Выберем решетку с круглыми отверстиями диаметром $d_0 = 4$ мм. Тогда скорость газа в отверстиях должна быть равна $\omega_0 = 10$ м/с. Доля свободного сечения решетки S_0 при $\varphi = 0,95$ равна:

$$S_0 = 1,82 / (10 \cdot 0,95) = 0,192 \text{ м}^2.$$

7. Шаг между отверстиями составит:

$$t = 0,004\sqrt{0,91/0,192} = 0,0087 \text{ м.}$$

8. Толщину решетки принимаем равной $\delta = 5$ мм.

Определим по уравнению (3.37) коэффициент скорости пылеулавливания:

$$K_{\Pi} = 2 \cdot 0,99 \cdot 1,82 / 2 - 0,99 = 3,57 \text{ м/с.}$$

9. Тогда высота слоя пены на решетке в соответствии с (3.38) равна:

$$H = 3,57 - 1,95 \cdot 1,82 + 0,09 = 0,11 \text{ м.}$$

10. Высота исходного слоя воды на решетке:

$$h_0 = 1,430,11^{1,67} \cdot 1,82^{-0,83} = 0,0218 \text{ м.}$$

11. Интенсивность потока на сливе с решетки по соотношению (3.41) с учетом того, что ширина сливного отверстия равна ширине решетки, а $L_{\text{сл}} = L/2$:

$$i = 0,989/2 \cdot 3,48 = 0,142 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}.$$

12. Высота сливного порога по (3.40):

$$h_{\Pi} = 2,50,0218 - 0,0176\sqrt[3]{0,142^2} = 0,05 \text{ м.}$$

3.3.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача. Определить основные размеры пенного газопромывателя, для очистки воздуха от пыли по данным, представленным в табл. 3.7. Температура воздуха 75 °С. Очистка производится водой. Исходные данные приведены в табл. 3.7.

Исходные данные

№ варианта	Вид пыли	Запыленность газа на входе c_n кг/м ³	Требуемая степень очистки, η	Расход газа Q_n , м ³ /ч
1	не склонная к слипанию	0,010	0,98	500000
2	склонная к слипанию	0,009	0,99	35000
3	не склонная к слипанию	0,016	0,95	48000
4	не склонная к слипанию	0,007	0,97	45000
5	склонная к слипанию	0,008	0,98	52000
6	склонная к слипанию	0,012	0,95	30000
7	не склонная к слипанию	0,006	0,98	42000
8	склонная к слипанию	0,017	0,99	39000
9	склонная к слипанию	0,010	0,95	46000
10	не склонная к слипанию	0,011	0,97	25000
11	склонная к слипанию	0,009	0,98	52000
12	склонная к слипанию	0,008	0,95	37000
13	не склонная к слипанию	0,012	0,98	28000
14	склонная к слипанию	0,014	0,99	31000
15	не склонная к слипанию	0,009	0,95	43000
16	склонная к слипанию	0,016	0,97	34000
17	не склонная к слипанию	0,007	0,98	48000
18	не склонная к слипанию	0,008	0,95	37000
18	склонная к слипанию	0,012	0,99	24000
20	не склонная к слипанию	0,010	0,98	47000

Контрольные вопросы

1. В каких случаях допустима мокрая очистка газа?
2. На какие конструктивные виды подразделяются мокрые пылеуловители?
3. Какими бывают пенные газоочистители?
4. Из чего состоят пенные газоочистители?
5. От чего зависит выбор числа полок пенного газоочистителя?
6. Что определяют при расчете пенного газоочистителя?

4. АППАРАТЫ ЭЛЕКТРООЧИСТКИ ГАЗА

Принцип электростатического обеспыливания основан на том факте, что частицы пыли с электростатическим зарядом притягиваются в электрическом поле электрода с противоположным зарядом.

При электростатическом обеспыливании поток загрязненного пылью газа проводится между коронирующим электродом с сильным отрицательным зарядом (постоянное напряжение) и положительно заряженным осадительным электродом. Коронирующий электрод находится под высоким напряжением (около 50 кВ) и отдает электроны, которые отрицательно заряжают (ионизируют) окружающие его молекулы газа. Они притягиваются положительно заряженным осадительным электродом и в поле высокого напряжения между коронирующим и осадительным электродами перемещаются в направлении последнего. На пути к осадительному электроду заряженные молекулы газа сталкиваются с протекающими мимо частицами пыли, отдают им свой заряд и отрицательно заряжают их. Далее отрицательно заряженные частицы пыли притягиваются положительно заряженным осадительным электродом, летят к нему, разряжаются и сцепляются с уже имеющимися там частицами пыли, образуя клубки. Вибрационно-выколачивающее устройство отрывает их от осадительного электрода, и они падают вниз.

4.1. Электрофильтры

С помощью электрофильтров удается успешно удалять мелкую и мельчайшую пыль с размером частиц от 0,001 до 10 мкм. Инвестиционные затраты здесь весьма высоки, зато расходы на эксплуатацию вполне умеренные.

Электрофильтры можно классифицировать по многим признакам. По расположению зон зарядки и осаждения электрофильтры делят на однозонные и двухзонные. В однозонных электрофильтрах зоны зарядки и осаждения совмещены, а в двухзонных коронирующие и осадительные электроды разделены и размещены в разных конструктивных зонах.

В соответствии с направлением движения газового потока фильтры разделяют на горизонтальные и вертикальные.

По форме осадительных электродов различают электрофильтры пластинчатые, трубчатые и иногда шестигранные.

По числу последовательно расположенных полей электрофильтры бывают однополюсными и многополюсными, а по числу параллельно работающих секций – односекционными и многосекционными.

Вывод уловленной пыли из электрофильтра может осуществляться в сухом виде посредством встряхивания электродов и в мокром виде смывом водой. В соответствии с этим различают сухие и мокрые электрофильтры.

4.1.1. Электрофильтры серии ЭГА. Электрофильтры ЭГА (рис. 4.1) (электрофильтры горизонтальные модификации А общепромышленного применения для очистки газов с температурой до 330 °С при разряжении до 5 кПа. На электроды подается выпрямленный электрический ток с напряжением 50–80 кВ.

В обозначении электрофильтра: 1-я цифра – количество секций, 2-я цифра – количество газовых проходов, 3-я цифра – высота электродов, 4-я цифра – количество элементов в осадительном электроде, 5-я цифра – количество электрических полей по длине электрофильтра, 6-я цифра – температура в электрофильтре, °С, 7-я цифра – разрежение в электрофильтре.

Фильтры ЭГА используются для обеспыливания неагрессивных невзрывчатых газов в энергетике, промышленности строительных материалов, в цветной и черной металлургии и др. Рекомендуемая скорость газа в электрофильтре 1 м/с. Радиус коронирующего электрода $R_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ м.

Расстояние между осадительными электродами 300 мм, между коронирующими в линии 160 мм, между осадительными и коронирующими 150 мм.

Подвижность ионов может быть принята $k = 2,1 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с)

Технические характеристики электрофильтров ЭГА приведены в табл. 4.1.

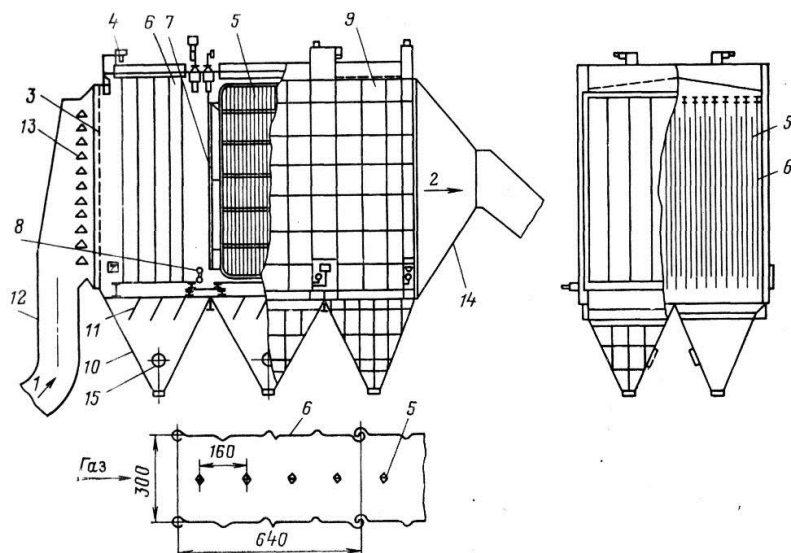


Рис. 4.1. Трехпольный двухсекционный электрофильтр ЭГА:

- 1 – вход запыленного газа; 2 – выход очищенного газа;
 3 – газораспределительная решетка; 4 – подвод тока высокого напряжения;
 5 – коронирующий электрод; 6 – осадительный электрод; 7 – встряхивающий механизм коронирующих электродов; 8 – встряхивающий механизм осадительных электродов; 9 – корпус; 10 – бункер; 11 – перегородки для уменьшения перетоков газа через бункер; 12 – подъемная шахта; 13 – газораспределительные объемные элементы МЭИ; 14 – конфузорный отвод дымовых газов;
 15 – смотровые люки в бункерах

Таблица 4.1

Технические характеристики электрофильтров ЭГА

Марка	Активная длина поля полю L , м	Площадь, м ²		Габаритные размеры $L \times B \times H$, мм
		активного сечения F_a	осаждения общая F_{oc}	
1	2	3	4	5
Односекционные фильтры				
ЭГА1-10-6-4-2-330-5	2,56	16,5	634	9260×4890×12400
ЭГА1-10-6-4-3-330-5	2,56	16,5	952	13440×4890×12400
ЭГА1-10-6-6-2-330-5	3,84	16,5	952	11820×4920×13400
ЭГА1-10-6-6-3-330-5	3,84	16,5	1428	17280×4920×13400
ЭГА1-14-7,5-4-3-330-5	2,56	28,7	1656	13440×6120×13900
ЭГА1-14-7,5-4-4-330-5	2,56	28,7	2208	17620×6120×13900
ЭГА1-14-7,5-6-2-330-5	3,84	28,7	1656	11820×6190×11900
ЭГА1-14-7,5-6-3-330-5	3,84	28,7	2484	17280×6190×14900
ЭГА1-20-7,5-4-3-330-5	2,56	41	2366	13440×7920×15400
ЭГА1-20-7,5-4-4-330-5	2,56	41	3152	17620×7920×15400
ЭГА1-20-7,5-6-2-330-5	3,84	41	2366	11820×7990×15400
ЭГА1-20-7,5-6-3-330-5	3,83	41	3549	17280×7990×15400
ЭГА1-20-9-6-2-330-5	3,84	49	2826	11820×7990×16900
ЭГА1-20-9-6-3-330-5	3,84	49	4239	17280×7990×16900
ЭГА1-20-9-6-4-330-5	3,84	49	5652	22740×7990×16900

1	2	3	4	5
ЭГА1-30-7,5-4-3-330-5	2,56	61,4	3549	13440×10950×14900
ЭГА1-30-7,5-4-4-330-5	2,56	61,4	4732	17620×10950×14900
ЭГА1-30-7,5-6-2-330-5	3,84	61,4	3549	11820×10990×14900
ЭГА1-30-7,5-6-3-330-5	3,84	61,4	5322	17280×10990×14900
ЭГА1-30-9-6-2-330-5	3,84	73,4	4240	11820×10990×16400
ЭГА1-30-9-6-3-330-5	3,84	73,4	6360	17280×10990×16400
ЭГА1-30-9-6-4-330-5	3,83	73,4	8480	22740×20990×26400
ЭГА1-30-12-6-3-330-5	3,84	97,4	8433	17280×10990×19400
ЭГА1-30-12-6-4-330-5	3,84	97,4	11244	22740×10990×19400
ЭГА1-40-7,5-4-3-330-5	2,56	81,91	4731	13440×13920×15400
ЭГА1-40-7,5-4-4-330-5	2,56	81,91	6308	17620×13920×15400
ЭГА1-40-7,5-6-2-330-5	3,84	81,91	4731	11820×13990×15400
ЭГА1-40-7,5-6-3-330-5	3,84	81,91	7095	17280×13990×15400
ЭГА1-40-9-6-2-330-5	3,84	97,9	5652	11820×13990×16900
ЭГА1-40-9-6-3-330-5	3,84	97,9	8478	17280×13990×16900
ЭГА1-40-9-6-4-330-5	3,84	97,9	11304	22740×13990×16900
ЭГА1-40-12-6-3-330-5	3,84	129,8	11244	17280×13990×19900
ЭГА1-40-12-6-4-330-5	3,84	129,8	14992	22740×13990×19900
Двухсекционные электрофилтры				
ЭГА2-48-12-6-3-330-5	3,84	155,8	13494	17260×17540×19900
ЭГА2-48-12-6-4-330-5	3,84	155,8	17992	22740×17540×19900
ЭГА2-56-12-6-3-330-5	3,84	181,7	15738	17280×19940×19900
ЭГА2-56-12-6-4-330-5	3,84	181,7	20984	22740×19940×19900
ЭГА2-76-12-6-3-330-5	3,84	246,6	21360	17280×25940×19900
ЭГА2-76-12-6-4-330-5	3,84	246,6	28480	22740×25940×29900
ЭГА2-88-12-6-3-330-5	3,84	285,6	24732	17280×29540×19900
ЭГА2-88-12-6-4-330-5	3,84	285,6	32076	22740×29540×19900

Примечание 1. Расшифровка марки электрофилтра (в порядке следования цифр): число секций N_c ; число газовых проходов N_r ; активная высота электродов H ; число элементов в осадительном электроде $N_{эл}$; число электрических полей по длине электрофилтра N_p ; допустимая рабочая температура $t_{др}$; допустимое рабочее разрежение $P_{доп}$, кПа; $Z_{доп} \leq 100 \text{ г/м}^3$; $Z_{доп}$ – не лимитирована.

Примечание 2. Коронирующие электроды рамные с игольчатыми элементами, имеющими эффективный радиус $R = 2 \cdot 10^{-3}$ м. Шаг между одноименными электродами $H = 0,3$ м. Расстояние между осадительным и коронирующим электродами $h = 0,133$ м.

4.1.2. Электрофилтры серии ЭГТ. Аппараты этого типа (электрофилтры горизонтальные, высокотемпературные) рассчитаны на очистку газов с температурой до 425 °С при разрежении до 4 кПа. Аппараты имеют прямоугольную форму и состоят из трех или четырех полей, расположенных последовательно по ходу газа. Длина каждого поля 2,5 м, активная высота 7,5 м.

Активная зона состоит из осадительных электродов (плоских полотен, набранных из пластинчатых элементов специального профиля) и коронирующих электродов из проволоки диаметром 2,2 мм, натянутых при помощи грузов между осадительными электродами. Расстояние между плоскостями одноименных электродов 260 мм. Такая система электродов не дает деформации при высоких температурах. Удаление пыли с электродов осуществляется встряхиванием при помощи ударно-молотковой системы. Выпускается восемь типоразмеров аппаратов с площадями активного сечения 20, 30, 40 и 60 м² в трехпольном и четырехпольном исполнении каждый. Характеристики электрофильтров серии ЭГТ приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Характеристики фильтров ЭГТ

Марка	Общая площадь осаждения $F_{ос}$, м ²	Габаритные размеры $L_э \times B_э \times H_э$, м
ЭГТ2-3-2,5-20	1448	12,6×4,93×17,86
ЭГТ2-4-2,5-20	1930	16,6×4,93×17,86
ЭГТ2-3-2,5-30	2238	12,6×6,23×17,16
ЭГТ2-4-2,5-30	2984	16,6×6,23×17,16
ЭГТ2-3-2,5-40	2895	12,6×7,79×17,86
ЭГТ2-4-2,5-40	3860	16,6×7,79×17,86
ЭГТ2-3-2,5-60	5790	16,6×10,64×17,16

Примечание 1. Расшифровка марки электрофильтра ЭГТ (в порядке следования цифр): модификация фильтра ЭГТ; число электрических полей по длине фильтра N_p ; активная длина поля L , м; площадь активного сечения F_a , м².

Примечание 2. Число газовых проходов $N_r = 1$; число секций $N_c = 1$; шаг между одноименными электродами $H_k = 0,26$ м; шаг между коронирующим и осадительным электродами $h_p = 0,1$ м; коронирующие электроды гладкие из проволоки сечением $R = 0,0011$ м; допустимая рабочая температура $t_{др} \leq 425$ °С; допустимое разрежение в электрофильтре $P_{доп} \leq 4$ кПа; активная высота электродов $H = 7,5$ м, $Z_{доп} = 40$ г/м³, $Z_{доп}^м$ не лимитировано.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Активная высота электродов	7.46	7.46	7.462	12.16	12,16	12,16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16
Активная длина поля	2,51	2,51	2.51	3,95	3,95	3.95	3,95	3.95	3,95	3,95	3,95
Общая площадь осаждения электродов, м ²	3370	4500	3370	12100	16100	18400	24600	24200	32200	27600	36900
Габариты электрофильтра, м											
Длина	14,1	18,6	14,1	18,8	24,8	18,8	24,8	18,8	24,8	18,8	24,8
Высота	15,4	15,4	15,4	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8
Ширина по осям крайних опор	9	9	12,0	12,0	12,0	18,0	18,0	24,0	24,0	27,0	27,0

Таблица 4.4

Значения параметра d для электрофильтров серии УГ

Марка электрофильтра	УГ2-2-10; УГ1-3-10; УГ1-2-15; УГ1-3-15	УГ2-4-74	УГ3-3-26; УГ3-4-26	УГ2-4-74	УГ3-3-88; УГ3-4-88	УГ2-3-26; УГ3-4-88	УГ2-3-26 УГ2-3-53 УГ2-4-26 УГ3-3-ИБ	УГ2-3-37 УГ2-4-37 УГ2-3-74 УГ2-4-53	УГ3-3-177 УГ3-4-177	УГ3-3-230 УГ3-4-230 УГ3-3-265 УГ3-4-265
d , м	0,23	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,1	0,1	0,1

4.2. Агрегаты питания электрофильтров

Эффективность электрофильтров в значительной степени определяется работой агрегатов питания. Агрегат питания должен обеспечивать проведение в процессе эксплуатации следующих основных операций:

- 1) включения и выключения электрофильтра с панели управления на месте и дистанционно;
- 2) регулирования выходного напряжения на электрофильтр в широких пределах;
- 3) поддержания на электродах электрофильтра напряжения, по возможности близкого к пробойному;
- 4) ограничения и последующего гашения электрических дуг, возникающих при пробоях электрофильтра;
- 5) автоматического повторного включения высокого напряжения после гашения дуги в электрофильтре.

В каждый современный агрегат питания входят следующие основные элементы: высоковольтный повышающий трансформатор; выпрямитель для преобразования переменного тока в постоянный; регулятор напряжения; высоковольтный выключатель; панель управления.

Агрегат типа АТФ однофазный и рассчитан на подсоединение к двум фазам сети трехфазного тока. Он состоит из четырех блоков: силового блока, включающего трансформатор и выпрямитель, распределительное устройство высокого напряжения; блока управления с регулирующей аппаратурой; навешенного на бак силового трансформатора и блока измерительных приборов и пусковых кнопок, выносимого часто в отдельное помещение.

На базе агрегата типа АТФ полностью автоматизированы регулирование режима питания, работа систем встряхивания электродов и транспортировки пыли, режим поддержания температуры в изоляторных коробках.

На базе агрегата типа АТФ выпускаются модернизированные аппараты типа АТПОМ, в которых полностью автоматизированы регулирование режима питания, работа систем встряхивания электродов и транспортировки пыли, режим поддержания температуры в изоляторных коробках.

Вся серия агрегатов типа АТФ и АТПОМ имеет следующие общие характеристики: частота 50 Гц, напряжение питающей сети 380 В, номинальное выпрямленное напряжение 80 кВ, коэффициенты мощности и к. п. д. при номинальной нагрузке соответственно 0,8 и 0,85. Выпускается пять модификаций агрегатов питания, отличающихся друг от друга силой выпрямленного тока и потребляемой мощностью. Технические характеристики агрегатов питания АТФ и АТПОМ приведены в табл. 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5

Технические характеристики агрегатов питания АТФ

Марка	Выпрямленное напряжение, кВ, макс/средн.	Средний выпрямленный ток, мА	Потребляемые из сети			КПД агрегата $\eta_{ар}$	Коэффициент мощности K_N (не менее)
			ток, А	напряжение, В	мощность, кВ·А (не более)		
АТФ-250	80/50	250	70	380,400,415	26	0,85	0,8
АТФ-400	80/50	400	100	380,400,415	40	0,85	0,8
АТФ-600	80/50	600	150	380,400,415	60	0,85	0,8
АТФ-1000	80/50	1000	245	380,400,415	100	0,90	0,8
АТФ-1600	80/50	1600	390	380,400,415	160	0,90	0,8
АТТФ-80-2500	80/50	2500	610	380,400,415	250	0,90	0,8

Технические характеристики агрегатов питания АТПОМ

Модель	Параметры после выпрямителя		Мощность на выходе, кВт	Напряжение в сети (В) при частоте, Гц:		Потребляемая мощность, кВт	КПД,	Коэффициент мощности K_N
	напряжение, кВ, макс. / среднее	ток, мА, действ. / средний		50	60			
100	80/50	133/100	7,5	380, 415	380, 400, 415, 440	10	0,87	0,80
250	80/50	330/250	18,0	то же	то же	26	0,90	0,82
400	80/50	530/400	30,0	то же	то же	40	0,90	0,82
600	80/50	800/600	45,0	то же	то же	60	0,90	0,83
1000	80/50	1330/1000	75,0	то же	то же	100	0,92	0,83
1600	80/50	2130/1600	121,0	то же	то же	160	0,92	0,83

Примечание. Напряжение, потребляемое из сети, выбирается одно из трех, указанных в табл. 4.5 и 4.6.

4.3. Методика расчета электрофильтров

Рассматриваемая в пособии методика представляет приближенный расчет электрофильтра, предложенный В. Н. Ужовым в его книге [15].

Технологический расчет электрофильтра заключается в расчете площади его активной зоны по заданному количеству очищаемого газа и рекомендуемой скорости его в электрофильтре, определении электрических параметров работы электрофильтра и эффективности очистки газа в нем.

Порядок расчета.

1. Выбирается тип электрофильтра.
2. Задается скорость газа в электрофильтре.
3. Определяется площадь активного сечения электрофильтра по формуле:

$$F = \frac{V}{3600v}. \quad (4.1)$$

4. Выбирается по каталогу типоразмер электрофильтра с активной площадью близкой к расчетной площади F .

5. По величине активной площади F_a выбранного электрофильтра уточняется скорость газа в электрофильтре по формуле

$$v = V / F_a \cdot 3600. \quad (4.2)$$

6. Вычисляется коэффициент β выражающий отношение плотности газов в рабочих условиях к их плотности при $t = 20^\circ \text{C}$ и $p = 101,3 \text{ кПа}$:

$$\beta = \frac{p_{\text{бар}} \mp p}{101,3 \cdot 10^3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t}, \quad (4.3)$$

где $p_{\text{бар}}$ барометрическое давление, Па; p – избыточное давление или разряжение в газоходе перед электрофильтром, Па; t – температура газа $^\circ\text{C}$.

7. Критическую напряженность электрического поля рассчитывается по формуле:

– для отрицательной полярности коронирующего электрода, В/м:

$$E_0 = 3,039(\beta + 0,0311 \cdot \sqrt{\beta / R_1}) \cdot 10^6, \quad (4.4)$$

– для положительной полярности коронирующего электрода, В/м:

$$E_0 = 3,37 \left(\beta + 0,0242 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) 10^6, \quad (4.5)$$

где β – отношение плотности газа в рабочих условиях к плотности газа при температуре 20°C и $p=101,3 \text{ кПа}$; R_1 – радиус коронирующего электрода.

8. Критическое напряжение короны или разность потенциалов между коронирующим и осадительным электродами рассчитывается по формуле:

– для трубчатого электрофильтра:

$$U_0 = E_0 R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}; \quad (4.6)$$

– для пластинчатого электрофильтра:

$$U_0 = E_0 \cdot R_1 \left[\pi \cdot H / d - \ln(2\pi R_1 / d) \right], \quad (4.7)$$

где H – расстояние между коронирующими и осадительными электродами, м; R_2 – радиус трубчатого осадительного электрода; d – расстояние между соседними коронирующими электродами в ряду, м.

9. Определяется линейная плотность тока короны i_0 , А

– для пластинчатого электрофильтра:

$$i_0 = \frac{4\pi^2 k \nu}{d^2 \cdot 9 \cdot 10^9 \left[\frac{\pi H}{d} - \ln\left(\frac{2\pi R_1}{d}\right) \right]} U(U - U_0); \quad (4.8)$$

– для трубчатого электрофильтра:

$$i_0 = \frac{2k}{9 \cdot 10^9 R_2^2 \ln \frac{R_2}{R_1}} U(U - U_0), \quad (4.9)$$

где U – напряжение, приложенное к электродам – 80, кВ; коэффициент k – величина подвижности ионов; коэффициент ν , зависящий от взаимного расположения электродов (от значения H/d) определяется по табл. 4.7:

10. Рассчитывается напряженность поля:

– в трубчатом электроде:

$$E_x = \sqrt{\frac{2i_0}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot k}}; \quad (4.10)$$

– в пластинчатом электроде:

$$E_x = \sqrt{\frac{8 \cdot i_0 \cdot H}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot k \cdot d}}; \quad (4.11)$$

где $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м.

11. Находится динамическая вязкость отдельных компонентов газовой смеси по формуле:

$$\mu_t = \mu_0 \left[(273+C) / (T+C) (T/273)^{2/3} \right], \quad (4.12)$$

где T – абсолютная температура газа, К; C – постоянная Сазерленда, для воздуха $C = 124$, азота $C = 114$, водяного пара $C = 961$, двуокиси углерода $C = 254$, окиси углерода $C = 100$, аммиака $C = 626$, двуокиси серы $C = 396$, кислорода $C = 131$.

12. Находится молекулярная масса газовой смеси по формуле:

$$M_{\text{см}} = \frac{M_1 \cdot a_1}{100} + \frac{M_2 \cdot a_2}{100} + \dots + \frac{M_n \cdot a_n}{100}. \quad (4.13)$$

13. Находится отношение величин молекулярной массы смеси $M_{\text{см}}$ и динамической вязкости газовой смеси $\mu_{\text{см}}$:

$$\frac{M_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}} = \sum_{i=1}^n \frac{a_n \cdot M_n}{100 \cdot \mu_n} = D. \quad (4.14)$$

14. По полученному значению суммы определяется вязкость газовой смеси:

$$\mu_{\text{см}} = M_{\text{см}} / D. \quad (4.15)$$

15. Определяется теоретическая скорость движения заряженных частиц различного радиуса r_i к осадительным электродам электрофильтра по формуле:

$$v_i = \frac{0,018 \cdot 10^{-10} \cdot E^2}{\mu_{\text{см}}} r_i. \quad (4.16)$$

16. Рассчитывается удельная поверхность осаждения по формуле:

$$f = F_{\text{об}} / V. \quad (4.17)$$

17. Фракционная степень очистки рассчитывается по формуле:

$$\eta_i = 1 - e^{-v_i(L / H \cdot v_i)}. \quad (4.18)$$

где L – длина осадительного электрода по паспорту электрофильтра; H – расстояние между коронирующим и осадительным электродами; v_i – скорость движения заряженных частиц различного радиуса.

При расчете фракционной степени очистки принимать значения эффективной скорости по табл. 4.8.

18. Общая степень очистки газа в электрофильтре определяется по формуле

$$\eta = \frac{1}{100} \sum \Phi_i \cdot \eta_{\Phi i}, \quad (4.19)$$

где Φ_i – содержание частиц разных фракций по массе, %

19. Содержание пыли в очищенном газе будет:

$$q_2 = q_1[(100 - \eta) / 100], \text{ мг/м}^3, \quad (4.20)$$

где q_1 – начальная запыленность газа.

Таблица 4.7

Значения коэффициента ν

H/d	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
ν	0,08	0,068	0,046	0,035	0,027	0,022	0,0175	0,015	0,013	0,0115

Таблица 4.8

Действительные значения эффективной скорости

r , мкм	0,5	2,5	5	10	15	20	25
$\nu_{\text{п.д.}}$, 10^{-2} м/с	3,67	18,03	36,07	72,15	108,22	144,3	180,37

4.3.1. Пример расчета электрофильтра

Задача. Требуется подобрать тип электрофильтра по каталогу, рассчитать его электрические параметры и степень очистки газа в нем, исходя из следующих данных:

Количество газа $V = 27\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$;

Температура газа $t = 150 \text{ }^\circ\text{C}$;

Разрежение в системе $p = 1960 \text{ Па}$;

Содержание пыли в газе $q_1 = 10 \text{ г/м}^3$;

Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Состав газа: 13% CO_2 , 6,5% O_2 , 8,5% H_2O и 72% N_2 .

Фракционный состав пыли характеризуется следующими данными:

Средний радиус частиц, r_i , мкм	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
% (по массе)	5	10	10	15	20	20	20

Решение:

1. Принимаем к установке электрофильтр типа УГ. Задавшись скоростью газа в электрофильтре $v = 1$ м/с, рассчитываем площадь активного сечения:

$$F = \frac{V}{3600v} = \frac{27\,000}{3600 \cdot 1} = 7,5 \text{ м}^2.$$

2. Выбираем по каталогу электрофильтр типа УГ1-2-10, у которого площадь активного сечения составляет 10 м^2 . Уточняем скорость газа в электрофильтре:

$$v = 27\,000 / (3600 \cdot 10) = 0,75 \text{ м/с}.$$

3. По технологической характеристике электрофильтра, характеристике газа и содержащейся в нем пыли рассчитываем электрические параметры и степень очистки газа.

4. Вычисляем относительную плотность газа по формуле (4.3):

$$\beta = \frac{1,013 \cdot 10^5 - 1,96 \cdot 10^3}{1,013 \cdot 10^5} \cdot \frac{273 + 20}{273 + 150} = 0,679.$$

5. Критическую напряженность электрического поля при отрицательной короне рассчитываем по формуле (4.4). Для принятого электрофильтра радиус коронирующего электрода $R_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ м:

$$E_0 = 3,04 \cdot \left(0,679 + 0,0311 \cdot \sqrt{0,679 / 1 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 10^6 = 4,52 \cdot 10^6 \text{ В/м}.$$

6. Критическое напряжение короны или разность потенциалов между коронирующим и осадительным электродами при возникновении коронного разряда в пластинчатом электрофильтре определяется по формуле (4.7). В принятом электрофильтре расстояние между осадительным и коронирующим электродом исходя из табл. 4.2: $H = 0,275 / 2 = 0,1375$ м; а расстояние между соседними коронирующими электродами в ряду $d = 0,275$ м

$$U_0 = 4,52 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \left[\left(3,14 \cdot \frac{0,1375}{0,18} \right) - 2,3 \lg \left(2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,18} \right) \right] = 25,93 \cdot 10^3 \text{ В}.$$

7. Линейную плотность тока короны для пластинчатого электрофильтра определяем по формуле (4.8). Подвижность ионов k для средних условий коронного разряда может быть принята равной $2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. При $H/d = 0,1375 / 0,275 = 0,5$; $\nu = 0,05$.

8. Напряжение, приложенное к электродам, составляет 80 кВ. Тогда, по формуле (4.8)

$$i = \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,05}{0,275^2 \cdot 9 \cdot 10^9 \left[\left(3,14 \cdot \frac{0,1375}{0,275} \right) - \ln \left(2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot \frac{10^{-3}}{0,275} \right) \right]} \cdot 80 \cdot 10^3 (80 \cdot 10^3 - 25,93 \cdot 10^3) = 1,068 \cdot 10^{-3} \text{ А/м.}$$

9. Напряженность поля в пластинчатом электрофильтре определяем по формуле (4.11)

$$E_x = \sqrt{\frac{8 \cdot 1,068 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 0,1375}{4 \cdot 3,14 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,18}} = 5,27 \cdot 10^5 \text{ В/м.}$$

10. Находим динамическую вязкость газовой смеси, пользуясь уравнением.

Вязкость отдельных компонентов газовой смеси рассчитываем по формуле (4.12):

$$\mu_{\text{CO}_2} = 0,137 \cdot 10^{-4} \frac{273 + 254}{423 + 254} \cdot \sqrt{\left(\frac{423}{273} \right)^3} = 0,205 \cdot 10^{-4} \text{ Па/с;}$$

$$\mu_{\text{O}_2} = 0,2 \cdot 10^{-4} \frac{273 + 131}{423 + 131} \cdot \sqrt{\left(\frac{423}{273} \right)^3} = 0,281 \cdot 10^{-4} \text{ Па/с;}$$

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1 \cdot 10^{-4} \frac{273 + 961}{423 + 961} \cdot \sqrt{\left(\frac{423}{273} \right)^3} = 0,172 \cdot 10^{-4} \text{ Па/с;}$$

$$\mu_{\text{N}_2} = 0,17 \cdot 10^{-4} \frac{273 + 114}{423 + 114} \cdot \sqrt{\left(\frac{423}{273} \right)^3} = 0,236 \cdot 10^{-4} \text{ Па/с.}$$

11. Молекулярную массу газовой смеси находим по формуле (4.13)

$$M_{\text{см}} = 0,13 \cdot 44 + 0,065 \cdot 32 + 0,085 \cdot 18 + 0,72 \cdot 28 = 29,48 \text{ кг/моль.}$$

12. Определяем параметр D по формуле (4.14)

$$D = M_{\text{см}} / \mu_{\text{см}} = (0,13 \cdot 44 / 0,205 + 0,065 \cdot 32 / 0,281 + 0,085 \cdot 18 / 0,172 + 0,72 \cdot 28 / 0,236) \cdot 10^{-4} = 129,6 \cdot 10^{-4}.$$

Тогда по (4.15) $\mu_{\text{см}} = M_{\text{см}} / D = 29,48 / 129,6 \cdot 10^{-4} = 0,227 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$

13. Определяем теоретическую скорость движения заряженных частиц различного радиуса r_i к осадительным электродам электрофильтра по формуле (4.16). Для частиц с размером 2.5 мкм:

$$v_{2,5} = 0,018 \cdot 10^{-10} (5,27 \cdot 0^5) 2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} / 0,227 \cdot 10^{-4} = 5,5056 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

Рассчитанные параметры внесем в таблицу:

r_i , мкм	2,5	5	10	15	20	25
$v_i \cdot 10^{-2}$, м/с	5,5	72,15	144,3	216,45	288,6	360,75

В дальнейших расчетах учитывается действительная скорость, которая в два раза меньше расчетной.

14. Рассчитывается удельная поверхность осаждения по формуле (4.17).

Так как для электрофильтра УГ1-2-10 общая поверхность осаждения осадительных электродов составляет 420 м^2 , то:

$$f = 420 \cdot 3600 / 27 \ 000 = 56 \text{ м}^2 / (\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

Рассчитанные по формуле (4.18) значения фракционной степени очистки по действительной скорости внесем в таблицу:

v_i	3,67	18,03	36,07	72,15	108,22	144,3	180,37
η_ϕ	85	100	100	100	100	100	100

15. Общая степень очистки газа в электрофильтре по формуле (4.19) составит:

$$\eta = (85 \cdot 5 + 100 \cdot 10 + 100 \cdot 15 + 100 \cdot 20 + 100 \cdot 20 + 100 \cdot 20) / 100 = 99,25\%$$

16. Содержание пыли в очищенном газе будет

$$q_2 = q_1 [(100 - \eta) / 100] = 10 [(100 - 99,25) / 100] = 0,075 \text{ г/м}^3 \text{ или } 75 \text{ мг/м}^3.$$

4.3.2. Задачи для самостоятельного решения

Задача. Подобрать тип электрофильтра по каталогу, рассчитать его электрические параметры и степень очистки газа в нем, исходя из данных варианта, представленных в табл. 4.9.

Для всех вариантов:

1. Фракционный состав пыли характеризуется следующими данными:

Средний радиус частиц, r_i , мкм	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
% (по массе)	15	25	10	10	20	10	10

2. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 1,013 \cdot 10^5$ Па.

3. Состав газа: 13% CO₂, 6,5% O₂, 8,5% H₂O и 72% N₂.

Таблица 4.9

Исходные данные

№ варианта	Количество газа, V , м ³ /ч	Температура газа, °С	Содержание пыли в газе, q , г/м ³	Разрежение в системе, p , Па
1	40 000	100	40	1500
2	62 500	110	35	1600
3	34 000	120	30	1700
4	28 500	130	25	1800
5	64 200	120	35	1900
6	38 500	110	15	2000
7	26 900	100	40	2100
8	75 300	90	30	2200
9	88 000	110	50	2300
10	28 500	90	55	2400
11	41 000	115	45	1500
12	56 500	100	50	1800
13	63 700	95	40	2000
14	37 500	120	15	1900
15	53 200	110	25	1600
16	45 500	100	30	2100
17	77 600	90	45	1900
18	37 500	145	20	1700
19	29 800	130	45	1800
20	92 500	110	35	2000

Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип электростатического обеспыливания?
2. Как устроены электрофильтры?
3. Как электрофильтры классифицируются?
4. Какие формы имеют осадительные электроды?
5. В чем преимущества электрофильтров?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены основные процессы и аппараты технологии защиты атмосферы от выбросов аэрозолей с использованием различных методов и способов: гравитационных, центробежных, мокрых, электрических. Приведены основы проектирования аппаратов и реакторов очистки и обезвреживания выбросов в атмосферу. Рассмотрены методики расчета аппаратов пылеочистки, включая пылесадительные камеры, циклоны, фильтры, мокрые скрубберы, электрофильтры. Приведены примеры выбора и расчета оборудования газоочистных установок. В приложении приведены справочные сведения, необходимые для расчетов.

Учебное пособие может быть использовано студентами при подготовке к практическим занятиям, выполнении курсовых проектов, выпускных квалификационных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старк С. Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии. М.: Металлургия, 1977. 327 с.
2. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. М. – Л., «Химия», 1964. 633 с.
3. Борисов Г. С. , Брыков В. П. , Дытнерский Ю. И. и др. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. 2-е изд., перераб. и дополн. М.: Химия, 1991. 496 с.
4. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / под ред. В. Г. Айнштейна. Кн. 1 и 2. М.: Логос, ВШ, 2003. 1760 с.
5. Тимонин А. С. Инженерно-экологический справочник. Т. 1–4. Калуга: изд-во Н. Бочкаревой, 2003.
6. Белов С. В. Средства защиты в машиностроении. М.: Машиностроение. 1989. 368с.
7. Баранов Д. А., Кутепов А. М. Процессы и аппараты. М.: Академия, 2004. 304 с.
8. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха. М.: Стройиздат, 1981. 296 с.
9. Енохович А. З. Справочник по физике. М.: Просвещение, 1990. 384 с.
10. Позин М. Е и др. Пенные газоочистители, теплообменники и абсорберы. Работа и расчет пенных аппаратов/ М. Е. Позин, И. П. Мухленов, Э. Я. Тарат. Л.: Госхимиздат, 1959. 123 с.
11. Родионов А. И., Клушин В. Н., Систер В. Г. Технологические процессы экологической безопасности: учебник для студентов технических и технологических специальностей. 3-е изд., перераб. и доп. Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2000. 800 с.
12. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1985. 520 с.
13. Мазур И. И., Молдаванов О. И. Курс инженерной экологии. М.: Высшая школа. 1999. 448 с.
14. Кузнецов И. Е., Троицкая Т. М. Защита воздушного бассейна от загрязнений вредными веществами химических предприятий. М.: Химия, 1979. 344 с.
15. Ужов В. Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М.: Химия, 1976. 344 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица III

Приставки СИ для обозначения десятичных
кратных и дольных единиц

Наименование	Обозначение приставки		Множитель
	Русское	Международное	
<i>Кратные</i>			
Экса	Э	E	10^{18}
Пета	П	P	10^{15}
тера	Т	T	10^{12}
гига	Г	G	10^9
мега	М	M	10^6
кило	к	k	10^3
гекто	г	h	10^2
дека	да	da	10^1
<i>Дольные</i>			
деци	д	d	10^{-1}
санти	с	c	10^{-2}
милли	м	m	10^{-3}
микро	мк	μ	10^{-6}
нано	н	n	10^{-9}
пико	п	p	10^{-12}
фемто	ф	f	10^{-15}
атто	а	a	10^{-18}

Таблица П2

Плотность ρ сухого воздуха при различной температуре t
и нормальном атмосферном давлении

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
-50	1,5840	14	1,2298	120	0,9376
-30	1,4530	16	1,2213	150	0,8339
-20	1,3857	18	1,2129	200	0,7457
-10	1,3420	20	1,2046	300	0,6166
-6	1,3222	24	1,1883	400	0,5248
-2	1,3026	30	1,1647	500	0,456
0	1,2928	40	1,1274	600	0,404
2	1,2836	50	1,0924	700	0,362
4	1,2743	60	1,0596	800	0,329
6	1,2652	70	1,0286	900	0,301
8	1,2561	80	0,9995	1000	0,277
10	1,2472	90	0,9719	1200	0,239
12	1,2385	100	0,9458		

Таблица П3

Плотность воздуха ρ (кг/м^3) в зависимости
от давления и температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$								
	96	97	98	99	100	101	101,3	102	103
0	1,224	1,237	1,250	1,263	1,275	1,288	1,293	1,301	1,314
2	1,216	1,228	1,240	1,253	1,266	1,279	1,284	1,291	1,304
4	1,207	1,219	1,232	1,244	1,257	1,270	1,274	1,282	1,295
6	1,198	1,211	1,223	1,236	1,248	1,260	1,265	1,273	1,285
8	1,190	1,202	1,214	1,227	1,239	1,252	1,256	1,264	1,276
10	1,181	1,193	1,206	1,218	1,230	1,243	1,247	1,255	1,267
12	1,173	1,185	1,197	1,210	1,222	1,234	1,239	1,246	1,258
14	1,165	1,177	1,189	1,201	1,213	1,225	1,230	1,238	1,250
16	1,157	1,169	1,181	1,193	1,205	1,217	1,221	1,229	1,241
18	1,149	1,161	1,173	1,185	1,200	1,209	1,213	1,221	1,232
20	1,141	1,153	1,165	1,177	1,188	1,200	1,205	1,212	1,224
22	1,133	1,145	1,157	1,169	1,180	1,192	1,196	1,204	1,216
24	1,126	1,137	1,149	1,161	1,172	1,184	1,188	1,196	1,208
26	1,118	1,130	1,141	1,153	1,165	1,176	1,180	1,188	1,200
28	1,111	1,122	1,134	1,145	1,157	1,168	1,172	1,180	1,192
30	1,103	1,115	1,126	1,138	1,149	1,161	1,165	1,172	1,184
32	1,096	1,107	1,119	1,130	1,142	1,153	1,157	1,165	1,176
34	1,185	1,198	1,210	1,222	1,235	1,147	1,251	1,259	1,272

Плотность воды ρ (кг/м³) при различной температуре t
и нормальном атмосферном давлении

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
0	999,841	20	998,203	40	992,21
1	999,900	21	997,992	41	991,83
2	999,941	22	997,770	42	991,44
3	999,965	23	997,538	43	990,63
4	999,973	24	997,296	44	990,22
5	999,965	25	997,044	45	989,37
6	999,941	26	996,783	46	989,37
7	999,902	27	996,512	47	988,93
8	999,849	28	996,232	48	988,49
9	999,781	29	995,944	49	988,04
10	999,700	30	995,646	50	985,70
11	999,605	31	995,340	55	983,21
12	999,498	32	995,025	60	980,56
13	999,377	33	994,702	65	977,78
14	999,244	34	994,371	70	974,86
15	999,099	35	994,031	75	971,80
16	998,943	36	993,68	80	968,62
17	998,774	37	993,33	85	965,31
18	998,595	38	992,96	90	958,35
19	998,405	39	992,59	100	

Динамическая вязкость μ газов и паров при разной температуре
и нормальном атмосферном давлении

Газ или пар	μ , мкПа·с				
	при температуре				
	0 °С	20 °С	50 °С	100 °С	200 °С
Азот	16,5	17,5	18,8	20,8	24,6
Аммиак	9,3	10,0	11,1	12,8	16,5
Ацетилен	9,4	10,2	11,1	12,5	...
Аргон	21,0	22,1	24,1	26,9	32,1
Водород	8,5	8,8	9,4	10,3	12,1
Водяной пар насыщенный	8,8	...	10,7	12,4	16,1
Воздух	17,1	18,2	19,6	21,2	25,1
Гелий	18,8	19,6	20,8	22,9	26,9
Кислород	19,2	20,2	21,8	24,4	29,0
Криптон	23,3	24,6	26,9	30,6	37,2
Ксенон	21,1	22,6	24,7	28,2	34,9
Метан	10,4	10,9	11,8	13,3	16,0
Неон	28,9	31,1	33,1	36,5	42,5
Оксид углерода (IV)	13,7	14,6	16,0	18,3	22,5
Оксид углерода (II)	16,6	17,5	18,8	20,8	24,6
Ртуть (пары)	45,0
Спирт этиловый (пары)	7,8	8,3	9,3	10,9	13,7
Хлор	12,3	13,3	14,7	16,8	20,9

Таблица П6

Динамическая вязкость μ воздуха при различной температуре
и нормальном атмосферном давлении

$T, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мкПа}\cdot\text{с}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мкПа}\cdot\text{с}$
0	17,1		
10	17,7	160	23,5
20	18,2	170	23,9
30	18,7	180	24,3
40	19,1	190	24,7
50	19,6	200	25,1
60	19,9	220	25,9
70	20,2	240	26,7
80	20,6	260	27,4
90	20,9	280	28,2
100	21,2	300	29,0
110	21,6	320	29,8
120	22,0	340	30,6
120	22,5	360	31,3
140	22,8	380	32,1
150	23,2	400	32,9

Таблица П7

Классификация пыли по дисперсности

Класс	Характеристика пыли	Размер, мкм
I	Очень крупнодисперсная пыль	$d_{50} > 140$
II	Крупнодисперсная пыль	$d_{50} = 40-140$
III	Среднедисперсная пыль	$d_{50} = 10-50$
IV	Мелкодисперсная пыль	$d_{50} = 1-10$
V	Очень мелкодисперсная пыль	$d_{50} < 1$

Основные свойства текстильных волокон, применяемых для фильтровальных тканей

Исходный полимер или сырье	Название волокна	Плотность кг/м ³	Термостойкость, °С		Химическая стойкость в различных средах		Стойкость в средах		Горючесть	Прочность на разрыв, МПа	Разрывное удлинение, %	Стойкость к истиранию	Влагоемкость, %, при 20°С	
			при длительном воздействии	при кратковременном воздействии	кислоты	щелочи	Окисляющие агенты	Растворители					при Ф = 65%	при Ф = 90–95%
Целлюлоза	Хлопок	1520	65–85	90–95	ОП	Х	У	ОХ	Да	360–530	7–8	У	7–8,5	24–27
Протеины	Шерсть	1320	95–100	120	У	ОП	У	Х	Да	130–200	30–40	У	13–15	21,9
Полиамид	Капрон	1140	80–90	120	ОП	ОХ	У	Х	Да	450–600	18–32	ОХ	3,5–4,5	7–8,5
	Номекс	1380	220	260	У	ОХ	Х	Х	Нет	400–800	14–17	ох	–	–
Полиэфир	Лавсан	1380	130	160	Х	У-П	Х	Х	Да	450–700	15–25	ох	0,4	0,5
Полиакрилонитрил	Нитрон	1170	120	150	Х-У	У	Х		Да	300–470	15–17	У	0,9–2	4,5–5
Полиолефин	Полипропилен	920	85–95	120	ох	ох	Х	Х	Да	440–860	22–25	ох	0	0
Поливинилхлорид	Хлорин, ацетохлорин, ПВХ	1380–1470	65–70	80-90	ох	ох	ох	У-Х	Нет	180–230	15–30	оп-п	0,17–0,3	0,7–0,9
Политетрафторэтилен	Фторопласт, полифен	2300	220	270	ох	ох	ох	ох	Нет	350–400	50	У-П Х	0	0
Полиоксидиазол	Оксалон	–	250	270	Х	–	ох	ох	Нет	1600–3000	3–4	ОП	0,3	–
Алюмоборосиликатное стекло	Стекловолоконное	2540	240	315	Х	У-П	У	ОХ	Да	360–530	7–8	У	7–8,5	24–27

Сравнительная характеристика газоочистительной аппаратуры

Аппараты	Эффективно отделяемые частицы	Максимальная запыленность, г/м ³	Степень очистки, %	Гидравлическое сопротивление, Па	Достоинства	Недостатки
Пылеосадительные камеры	Средне-, крупно-дисперсная пыль	–	40–50	50–150	Невысокие эксплуатационные затраты	Громоздкая, занимает большие площади
Циклоны одиночные	Среднедисперсная пыль	400	70–95	400–2500	Компактны и очищают химически активные газы при высоких температурах	Механическое истирание корпуса аппарата частицами пыли и чувствительность к колебаниям нагрузки по газу
Батарейные циклоны	Среднедисперсная пыль	100	85-95	400 – 800	Очищает большие объемы газа	
Рукавные фильтры	Мелкодисперсная пыль	20	98–99	500–2500	Эффективны при очистке от волокнистой пыли, сухой и трудно увлажняемой	Непригодные для удаления влажной и липкой пыли
Аппараты мокрой очистки	Мелко- и очень мелкодисперсная пыль, туманы	50–300	85–99	250–15000	Очистка горячих и взрывоопасных газов, охлаждение и увлажнение газа до состояния насыщения	Образование в процессе работы шлама; вынос влаги; образование отложений в газоходах при охлаждении газов, приводящее к преждевременным остановкам и увеличению пылевых выбросов в атмосферу
Электрофильтры	> 0,005 + аэрозоли	10–50	До 99	100–200	Низкий расход электроэнергии вследствие малого потребления тока	Непригодны для очистки газа от твердых частиц, имеющих очень малое удельное электрическое сопротивление; дорогостоящий и сложный в эксплуатации

**Пыле- и туманоуловители для очистки газовых выбросов,
применяемых в машиностроении и приборостроении**

Вид пыле- и туманоуловителя	Класс пылеуловителя	Группа пыли	Параметры пыле- и туманоуловителя					Область применения
			Допустимая входная концентрация пыли, г/м ³	Гидравлическое сопротивление, кПа	Производительность по газу, тыс. м ³ /ч	Эффективность очистки	Наибольшая температура газов, °С	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Циклоны ЦН-11 ЦН-15 ЦН-24	V	I, II	1000 (слабослипающая пыль)	Не более 0,5	0,162...48	0,8 при $d_{50} = 20$ мкм	400	Сухая очистка от пыли невзрывоопасных газов, кроме сильнослипающихся пылей. Очистка выбросов деревообрабатывающих и механических цехов, сушилок, печей и т. д. Сухая очистка от пыли взрывоопасных газов (дымовые газы парогенераторов и т. п.). Очистка газов от сажи
ЦП-2	V	I, II	250 (среднеслипающая пыль)	Не более 0,4	38...230	0,86...0,9	250	
СК-ЦН-34	IV	II, III	1500	4	2,54...92	0,95	250	
Батарейные циклоны БЦ-2	V	I, II	75 (слабослипающая пыль) 35 (среднеслипающая пыль)	0,45...0,6	15...49	0,85 при $d_{50} = 250$ мкм	400	Очистка дымовых газов от золы, улавливание волокнистой и неслипающейся пыли
Электрофильтры: УГМ	II	I...V	60	4	36...950	До 0,000	250	Тонкая очистка технологических выбросов от пыли
С	II	I...V	3	5	18...36	До 0,99	60	Тонкая очистка от аэрозолей смолы генераторных газов

Окончание табл. П10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
УУП	II	IV, V	–	0,04	5...30	0,95	80	Тонкая очистка вентиляционных выбросов от пыли, туманов масел, пластификаторов и т. п.
ФЭ	II	IV, V	0,01	0,03...0,05	1	0,95	20	Очистка вентиляционного воздуха от пыли
Рукавные фильтры ФРО	II	III, IV	20	2...3	До 50	0,98	130 (рукав из лавсана) 230 (из стеклоткани)	Очистка сухих газов от слабослипающихся пылей
Фильтры: Д, Д-КЛ	I	IV, V	0,0005	0,4...0,6	До 35	0,999	60	Ультратонкая очистка вентиляционных выбросов от радиоактивных, биологических и высокотоксичных пылей
ФАРТОС	I	IV, V	–	0,5	0,500	0,999	100	Ультратонкая очистка технологических сдувок от радиоактивных пылей
Скрубберы Вентури	II	–	30	6...12	1,7...84	0,95...0,98	400	Высокоэффективная очистка газов от пылей любого дисперсного состава
Сепаратор Капель КЦТ	V	–	Не более 1000	0,35	1,7...84	Концентрация влаги в газе на выходе не более 70 мг/м ³	400	Улавливание капель после скруббера Вентури
Центробежный скруббер СЦВБ-29	II	II...IV	Не более 10	1,7	20	0,98 для частиц размером 10 мкм	60	Мокрая очистка нетоксичных и невзрывоопасных пылей
Волокнистый фильтр ФВГ-Т	II	–	–	0,15...0,5	3,5...80	0,96...0,99	90	Тонкая очистка аспирационного воздуха ванн хромирования от тумана и брызг