

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

И.В. МИШАКОВ

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2010

УДК 502.3(075.8)
М 71

Рецензенты:
д-р техн. наук, проф. *В.В. Ларичкин*,
д-р техн. наук, проф. *А.С. Носков*

Работа выполнена на кафедре ИПЭ
в рамках программы Научно-образовательного центра «Катализ»

Мишаков И.В.

М 71 Основы технологии пылеулавливания : учеб. пособие /
И.В. Мишаков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 76 с.

ISBN 978-5-7782-1332-6

Изложены теоретические аспекты и механизмы процессов очистки газовых выбросов от аэрозолей. Приведена классификация видов аэрозолей, их физико-химические характеристики, дана классификация методов защиты атмосферы от взвешенных частиц. Рассмотрены основные конструкции аппаратов пылеочистки и принцип их работы, представлены методы расчета и сопоставлены преимущества и недостатки различных методов.

Учебное пособие предназначено для подготовки дипломированных специалистов по направлению 280200 «Защита окружающей среды» и инженеров-экологов по специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды». Может быть использовано в качестве дополнительной учебной литературы аспирантами, инженерами, сотрудниками природоохранных служб и слушателями курсов повышения квалификации.

УДК 502.3(075.8)

ISBN 978-5-7782-1332-6

© Мишаков И.В., 2010
© Новосибирский государственный
технический университет, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Раздел 1. ИСТОЧНИКИ И ВИДЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ.....	6
1.1. Загрязнение атмосферы	6
1.2. Источники образования пыли	7
1.3. Классификация методов очистки от аэрозолей.....	9
Раздел 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЭРОЗОЛЕЙ.....	12
2.1. Классификация дисперсных систем	12
2.2. Основные характеристики аэрозолей.....	14
2.3. Эффективность улавливания пыли	18
Раздел 3. СУХАЯ ОЧИСТКА ОТ ПЫЛИ	19
3.1. Гравитационное осаждение.....	19
3.2. Инерционное осаждение	23
3.3. Центробежное осаждение.....	27
Раздел 4. ФИЛЬТРОВАНИЕ ГАЗОВ	38
4.1. Классификация фильтров.....	38
4.2. Механизм фильтрации.....	39
4.3. Расчет фильтров	41
4.4. Аппараты фильтрации газов	43
Раздел 5. МОКРАЯ ОЧИСТКА ОТ ПЫЛИ	49
5.1. Механизмы мокрой пылеочистки.....	49
5.2. Аппараты мокрой пылеочистки.....	53
Раздел 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЫЛЕОЧИСТКИ.....	63
6.1. Принцип работы электрофильтров.....	63
6.2. Основные уравнения электроосаждения.....	67
6.3. Аппараты электрической очистки	69
Заключение	73
Библиографический список	75

ВВЕДЕНИЕ

Антропогенное загрязнение окружающей среды, и в особенности атмосферы, в последние годы приняло угрожающий характер. Санитарные нормы по загазованности и запыленности во многих крупных городах и промышленных центрах превышены в несколько раз. Природа в буквальном смысле задыхается от «результатов» научно-технической деятельности человека, с последствиями которой она уже давно не в силах бороться в одиночку. Промышленными предприятиями в атмосферу планеты ежегодно выбрасывается около миллиарда тонн пылевых частиц, что в пересчете на каждого человека составляет примерно по 0.15 тонн.

К источникам, «ответственным» за загрязнение атмосферы взвешенными частицами, следует отнести три главных «кита»: промышленность, энергетический комплекс и транспорт. Большое число современных химико-технологических процессов связано с дроблением, измельчением и транспортировкой сыпучих материалов. Огромное количество пыли образуется при выплавке чугуна, сжигании угля и нефтепродуктов, сварке, покраске и т. д. Все эти выбросы подлежат очистке, однако при этом неизбежно остается часть взвешенных частиц, которая с технологическими или вентиляционными газами выбрасывается в атмосферу.

Пылевые частицы имеют достаточно большую суммарную площадь поверхности, вследствие чего их химическая и биологическая активность очень высока. Некоторые вещества в аэродисперсном состоянии приобретают новые свойства, например способность взрываться. Частицы промышленной пыли имеют различные форму и размеры, отличаются по способности осаждаться, заряжаться, впитывать влагу и образовывать агломераты. Все эти параметры влияют на качество работы пылеуловителей, что предопределяет широкий набор ме-

тодов и аппаратов для улавливания взвешенных частиц. Несмотря на многообразие инженерных решений, все конструкции аппаратов основаны на действии нескольких основных принципов осаждения частиц, теоретические основы которых будут подробно рассмотрены в этой книге.

Защита окружающей среды является одной из важнейших задач современного человека. Для ее успешного решения необходимо развивать новые безотходные и экологически приемлемые технологии, что невозможно без совершенствования систем очистки и обезвреживания газовых выбросов и разработки новых способов утилизации накопленных отходов.

Раздел 1

ИСТОЧНИКИ И ВИДЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

1.1. ЗАГРЯЗНИТЕЛИ АТМОСФЕРЫ

Из всей массы загрязняющих вредных веществ, поступающих в атмосферу от антропогенных источников, около 90 % составляют газообразные, 10 % – твердые и жидкие вещества.

Взвешенные вещества. При наличии взвешенных веществ образуется двухфазная дисперсная система, которая получила название аэрозолей. Аэрозоли подразделяют на три класса: пыли, дымы и туманы.

Пыли – полидисперсные системы, состоящие из твердых взвешенных частиц размером от 5 до 100 мкм.

Дымы – аэрозоли, образующиеся при горении или возгонке, содержатся в выбросах электропечей, вагранок, электросварочных участков. Размеры взвешенных частиц от 0.1 до 5 мкм.

Туманы состоят из капелек жидкости, диспергированных в газовой среде. В капельках тумана могут содержаться растворенные вещества или суспендированные твердые частицы. Образуются в результате конденсации паров или распыления жидкости. В первом случае размер капель близок к размеру частиц в дымах, во втором – к пыли. Образуются при окраске, при закалке изделий в масле.

Особое место в ряду загрязнителей атмосферы занимают продукты сгорания топлива: сажа и зола.

Сажа – токсичный высокодисперсный порошок, на 90...95 % состоящий из углеродных частиц. Образуется при неполном сгорании ископаемых твердых топлив и нефтепродуктов. Обладает большой адсорбционной способностью по отношению к тяжелым углеводородам, в том числе к бенз(а)пирену, что делает сажу очень опасной для человека.

Зола – несгораемый остаток, образующийся из минеральных компонентов топлива при его полном сгорании. Состав золы во многом определяется видом и составом исходного топлива.

Особое место в технологии защиты окружающей среды занимают методы очистки от твердых аэрозолей (пыли) как наиболее массовых побочных продуктов деятельности человека. В свою очередь, пыль можно разделить на продукт его основной жизнедеятельности (создание локальных источников тепла) и продукт технической деятельности. Эта пыль подразделяется на два типа:

1) *бесполезная пыль*. Образуется при истирании, механической обработке, в процессе сжигания или возгонки и т. д.;

2) *утилизируемая пыль*. Образуется в процессе производства или переработки гранулированных материалов, таких как гипс, цемент, наполнители для резины и т. д.

Известно, что мелкие частицы пыли причиняют ощутимый вред здоровью в результате механического воздействия своими острыми кромками на дыхательные пути человека. Регулярное вдыхание частиц диоксида кремния приводит к развитию тяжелого заболевания – силикоза. Пыль органического происхождения (например, мучная) может стать питательной средой для болезнетворных бактерий. Кроме того, частицы пыли обладают развитой поверхностью и хорошо адсорбируют вредные газы и пары жидкостей. Некоторые пыли образуют с воздухом взрывоопасные смеси.

В последние годы в мире появляется все больше разработок, направленных на вторичное использование пыли, ранее не подлежащей утилизации. Ярким примером являются золошлаковые отходы, в огромном количестве образующиеся при сжигании ископаемых углей на предприятиях ТЭЦ. Сейчас зола рассматривается, в первую очередь, как ценное сырье. Из нее выделяют редкие элементы, ее используют в качестве наполнителя в составе композиционных материалов, строительных кирпичей и бетонов. В некоторых развитых странах (Германия, Китай) степень утилизации золошлаковых отходов доходит до 70...90 %.

1.2. ИСТОЧНИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ПЫЛИ

В общем виде источники загрязнения атмосферы классифицируют следующим образом:

1) *естественное загрязнение* – природный фон загрязнения;

2) *антропогенное загрязнение* – основной источник загрязнения.

К естественным загрязнениям относятся: пыль растительного, вулканического и космического происхождения; пыль от эрозии почвы; дымы от лесных и степных пожаров и т. п. Уровень загрязнения атмосферы пылью от естественных источников называют природным фоном загрязнения, который незначительно изменяется со временем.

Антропогенные загрязнения отличаются большим многообразием видов и количеством источников. Самыми распространенными источниками загрязнения атмосферы являются машиностроительные предприятия, энергетические установки, автотранспорт, ракетные двигатели, топки, котельные, сельское хозяйство и добывающие отрасли. Антропогенные источники образования взвешенных частиц можно, в свою очередь, разделить на несколько основных групп.

- **Литейные цехи**

Содержат электродуговые, индукционные печи и другое оборудование. Относятся к наиболее крупным источникам образования пыли. Например, при производстве одной тонны чугуна, помимо вредных газовых примесей, образуется до 50 кг пыли.

- **Термические цехи**

Оборудованы нагревательными печами, работающими на жидком или газообразном топливе. Вентиляционный воздух из этих цехов содержит аэрозольные частицы масла, цианистого водорода и других вредных веществ. Из дробеструйных камер после очистки металла от окалины с отходящим газом выбрасывается до 10 г/м^3 твердых частиц.

- **Сварочные, прокатные и кузнечно-прессовые цехи**

При обработке металла в этих цехах образуется большое количество пыли, тумана кислот и масел. При сварке освобождается мелкодисперсная пыль, до 99 % состоящая из субмикронных частиц. Для удаления окалины с поверхности горячего металла применяют травление в серной и соляной кислотах. При этом среднее содержание кислоты в удаляемом воздухе достигает 3 г/м^3 . Газовая и плазменная резка металлов сопровождается выделением мелкодисперсной пыли.

- **Гальванические цехи и цехи механической обработки металлов**

Используют при травлении растворы серной, соляной, азотной и плавиковой (HF) кислот. При воронении поверхности металлов в воздух выделяются особо токсичные туманы цианистых солей, хромовой и азотной кислот и др.

- **Лакокрасочные цехи**

К этой группе также можно отнести и цехи по производству неметаллических изделий из стеклопластика, пластмасс и полимеров, зна-

чительно загрязняющих окружающую среду. В этом случае в атмосферу с выбрасываемым воздухом поступают туманы растворителей, красок, полимерная волокнистая пыль и др.

- **Энергетические установки**

Сюда относятся котельные и ТЭЦ. Выбросы этих установок определяются видом используемого топлива и режимами работы агрегатов. При сжигании органического топлива образуется в основном углекислый газ и водяной пар, тем не менее в атмосферу с ними попадают также продукты неполного сгорания. К ним относятся: сажа, бенз(а)пирен, зола, оксид свинца PbO , а также оксиды урана и тория.

Например, ТЭЦ мощностью 2.5 млн кВт за сутки расходует около 20 тысяч тонн угля и выбрасывает в атмосферу около 200 тонн твердых частиц (зола, сажа и пыль).

- **Автотранспорт**

Автомобильный транспорт в последнее время стал одним из главных источников загрязнения атмосферы. Твердые частицы (в основном сажа и зола) образуются при сжигании топлива в дизельных двигателях.

Вредные вещества, выделяемые в атмосферу, можно разделить на следующие группы:

- твердые частицы (пыль);
- аэрозоли кислот;
- частицы ртути и других металлов;
- оксиды металлов;
- минеральные соли и удобрения.

В атомной и некоторых других отраслях промышленности также имеют место выбросы радиоактивных частиц пыли.

1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ОТ АЭРОЗОЛЕЙ

Дисперсные частицы пыли в отличие от газообразных примесей фиксируются в воздухе визуально уже при небольших концентрациях. По этой причине отсутствие шлейфа взвешенных частиц и прозрачность выброса служат простейшими критериями его чистоты.

Известные на сегодняшний день методы обезвреживания аэрозолей (пылей и туманов) можно разделить на три категории:

- **сухая очистка** – пылеосадительные камеры, циклоны, фильтры;
- **мокрая очистка** – барботажные и пенные аппараты, скрубберы;
- **электрическая очистка** – электрофильтры.

Более детальная классификация методов очистки от аэрозолей приведена на рис. 1.

Рис. 1. Очистка газов от взвешенных веществ

В основе сухих методов очистки газа лежат гравитационные, инерционные и центробежные механизмы осаждения частиц, а также механизмы фильтрации. При использовании мокрых методов очистка газовых выбросов осуществляется посредством тесного взаимодействия между жидкостью и запыленным газом на поверхности газовых пузырей, капель или жидкой пленки. Электрическая очистка газов основана на ионизации молекул газа электрическим разрядом и электризации взвешенных в газе частиц.

Для достижения высоких степеней очистки газов от твердых взвешенных частиц (98...99 %), как правило, требуется применять многоступенчатую технологию сепарации. В общем случае, сложные по составу выбросы, содержащие взвешенные частицы, должны пройти последовательно как минимум две стадии: предварительную и тонкую очистку. Для предварительной очистки чаще всего применяют пылесадительные камеры, инерционные и циклонные аппараты, а для окончательной – пористые фильтры, мокрые пылесадители или электрофильтры.

Жидкие дисперсные системы (туманы) могут быть разделены посредством изменения параметров состояния газа (охлаждения и повышения давления) с целью осаждения в последующем с использованием мокрых способов улавливания в скрубберах, пористых и электрических фильтрах, а также в абсорберах.

Если твердые или жидкие аэрозоли по химическому составу не содержат других элементов, кроме углерода, водорода и кислорода (пыль растительного происхождения, шерстяные волокна, туманы минеральных масел и др.), то они могут быть обезврежены в одну стадию – непосредственным сжиганием в топках котлов и печей.

Раздел 2

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЭРОЗОЛЕЙ

Аэрозоли занимают важное место в классификации дисперсных систем. Явления, происходящие на межфазных границах в этих системах, существенно воздействуют на эффективность разделения аэрозолей и во многом определяют выбор той или иной конструкции аппарата. Рассмотрим такую классификацию подробнее.

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

К поверхностным явлениям относятся процессы, происходящие на границе раздела фаз и проявляющиеся сильнее всего в телах с развитой поверхностью. К таким телам относятся мелкие частицы, пленки и капилляры. Распределяясь в определенной среде, эти тела образуют так называемую дисперсную систему.

Большинство окружающих нас реальных тел можно отнести к дисперсным системам. Дисперсные системы бывают сыпучими, волокнистыми, кристаллическими; встречаются в виде паст, эмульсий, пыли. К ним также следует отнести почву, облака, туман, полимеры, продукты питания и т. д. Дисперсные системы классифицируют по агрегатному состоянию и степени дисперсности.

Дисперсные системы относятся к *гетерогенным*. Гетерогенной называют термодинамическую систему, в которой существуют поверхности раздела ее макроскопических частей, отличающихся по свойствам и составу.

Понятие *дисперсности* включает размеры частиц, образующих гетерогенную систему, и их распределение по размерам. Дисперсность гетерогенных систем изменяется в широком диапазоне: $10^{-9} \dots 10^{-4}$ м. Гетерогенная дисперсная система состоит:

- 1) *из дисперсной фазы* – совокупности частиц;
- 2) *дисперсионной среды* – среды, в которой эти частицы распределены.

В зависимости от степени подвижности дисперсной фазы и ее среднего размера d различают следующие системы.

1. *Связнодисперсные системы* – дисперсная фаза связана (пористые тела):

- микропористые – $d < 10^{-9}$ м;
- мезопористые – $d = 10^{-9} \dots 10^{-7}$ м;
- макропористые – $d > 10^{-4}$ м.

2. *Свободнодисперсные системы* – дисперсная фаза подвижна:

- ультрамикрорегетерогенные – $d = 10^{-9} - 10^{-7}$ м;
- микрогетерогенные – $d = 10^{-7} - 10^{-5}$ м;
- грубодисперсные – $d > 10^{-5}$ м.

Для двухфазных гетерогенных систем по агрегатному состоянию дисперсной фазы и дисперсионной среды возможны 9 комбинаций, которые соответствуют следующим видам дисперсных систем.

Дисперсная среда – жидкость:

- 1) «жидкость–жидкость» – эмульсии (сырая нефть);
- 2) «твердое–жидкость» – золи, гели, суспензии и пасты:
 - а) *золи* – высокодисперсные системы при невысокой концентрации дисперсной фазы;
 - б) *гели* – высокодисперсные системы при высокой концентрации дисперсной фазы, когда частицы агрегируют и образуют связнодисперсную систему;
 - в) *суспензии* – грубодисперсные системы с низкой концентрацией;
 - г) *пасты* – грубодисперсные системы с высокой концентрацией;

3. «газ–жидкость» – пена, кипящие жидкости.

Дисперсная среда – газ (аэрозоли):

1) «газ–газ» – плохо перемешанная смесь газов с флуктуациями плотности;

2) «жидкость–газ» – туманы;

3) «твердое–газ» – пыли, дымы.

Дисперсная среда – твердое тело:

1) «твердое–твердое» – горные породы, стройматериалы, сплавы;

2) «жидкость–твердое» – влажный грунт, почвы, шлам;

3) «газ–твердое» – пористые материалы, адсорбенты.

Приведенная классификация показывает, что подавляющее большинство реальных состояний вещества относится к той или иной разновидности дисперсных систем. Дисперсные системы бывают *монодисперсными* (все частицы имеют примерно одинаковый размер) и *полидисперсными* (размер частиц заметно различается).

По характеру молекулярных взаимодействий на границе раздела фаз дисперсные системы могут быть разделены на две группы.

1. *Лиофобные системы* – межмолекулярное взаимодействие слабое либо отсутствует. Такие системы требуют для своего образования затрат энергии и являются термодинамически неустойчивыми. Могут длительно существовать в условиях специальной стабилизации.

2. *Лиофильные системы* – сильное межмолекулярное взаимодействие между дисперсной фазой и дисперсионной средой. Эти системы могут образовываться самопроизвольно и относятся к термодинамически устойчивым.

Четкую границу между этими группами провести трудно. В природе существует широкий набор промежуточных состояний.

2.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЕЙ

Выбор пылеулавливающего оборудования и эффективность его работы во многом определяются физико-химическими свойствами пыли. Рассмотрим наиболее важные характеристики пыли.

Плотность частиц

Плотность (ρ) – важнейшая характеристика пыли и золы. Плотность пыли измеряется в граммах на сантиметр кубический (г/см^3) или в килограммах на метр кубический (кг/м^3). Различают истинную, кажущуюся и насыпную плотность.

- *Истинная плотность* $\rho_{\text{ист}}$ – отношение массы монолитной частицы к занимаемому объему.

- *Кажущаяся плотность* $\rho_{\text{каж}}$ – отношение массы монолитной частицы к занимаемому объему, включая поры, пустоты, неровности.

- *Насыпная плотность* $\rho_{\text{нас}}$ – учитывает наличие воздушных зазоров между частицами свеженасыпанной пыли.

Насыпную плотность используют для определения объема, который занимает пыль в бункере до начала слеживания. Обычно насыпная плотность слежавшейся пыли в 1.2...1.5 раза выше.

Дисперсный состав частиц

Для того чтобы правильно выбрать пылеулавливающее оборудование, необходимо в первую очередь иметь сведения о дисперсном составе пыли. Дисперсный состав определяют экспериментально при помощи специальных приборов, называемых *импакторами*.

Частицы промышленной пыли имеют различную форму (пластинки, палочки, иглы, шарики, волокна и т. д.). Частицы пыли могут объединяться в агломераты, поэтому понятие размера частицы условно. В пылеулавливании принято характеризовать размер частицы величиной, определяющей скорость ее осаждения. Такой величиной служит *седиментационный диаметр* – диаметр шара, плотность и скорость осаждения которого эквивалентны плотности и скорости осаждения частицы произвольной формы. Чем ближе форма частиц к сферической, тем быстрее они оседают.

Диапазон дисперсности пыли характеризуют параметры d_{\min} и d_{\max} – наименьший и наибольший размеры частиц. Для характеристики дисперсного состава всю массу частичек пыли разбивают на фракции. *Фракция* – это массовая доля частиц, содержащихся в определенном интервале размеров частиц.

Дисперсный состав выражают в виде интегральных кривых. На практике распределения частиц пыли по размерам чаще всего согласуются с логарифмическим нормальным распределением (ЛНР) Гаусса:

$$M(d_a) = \frac{100}{\lg \sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lg d_a} e^{-\frac{\lg^2(d_a/d_m)}{2\lg^2 \sigma}} d(\lg d_a), \quad (2.1)$$

где $M(d_a)$ – относительная доля частиц размером $d < d_a$;

d_m – медианный размер частиц, при котором доли частиц размером $d > d_m$ и $d < d_m$ равны;

$\lg \sigma$ – среднеквадратичное отклонение.

Графики ЛНР частиц обычно строят в вероятностно-логарифмической системе координат, текущий размер частиц откладывают на оси абсцисс, а на оси ординат – относительную долю частиц размерами $d < d_a$. Шкала оси абсцисс представляет собой $\lg d$, а шкала оси ординат строится посредством вычисления каждого из значений по уравнению:

$$F(\%) = 100 - M(d_a) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-y^2/2} dy, \quad y = \frac{\lg \frac{d_a}{d_m}}{\lg \sigma}. \quad (2.2)$$

Значения функции вычисляются и наносятся на график. Если график получился линейным, значит, распределение частиц пыли по размерам является равномерным, т. е. подчиняется закону Гаусса. В этом случае медианный диаметр d_m находят как абсциссу точки графика на пересечении с ординатой $F = 50 \%$, причем $\lg \sigma = \lg d_{84.1} - \lg d_m$. Таким образом, дисперсный состав пыли характеризуют два параметра:

- d_m – медианный размер частиц;
- $\lg \sigma$ – среднеквадратическое отклонение.

Значение d_m дает средний размер частиц, а $\lg \sigma$ – степень полидисперсности.

Пыль принято разделить на пять групп, различающихся по дисперсному составу:

I – *сверхкрупнодисперсная*, $d_m > 140$ мкм,

II – *крупнодисперсная*, $d_m 40 \dots 140$ мкм,

III – *среднедисперсная*, $d_m 10 \dots 40$ мкм,

IV – *мелкодисперсная*, $d_m 1 \dots 10$ мкм,

V – *субмикронная*, $d_m < 1$ мкм.

Адгезионные свойства частиц

Адгезионные свойства частиц определяют их склонность к слипанию. Повышенная слипаемость пыли может привести к частичному или полному выходу из строя аппарата пылеочистки. Чем меньше размер частиц пыли, тем лучше они прилипают к поверхности аппарата.

По слипаемости пыли разделяют на четыре группы (трехбалльная шкала):

0 – *неслипающаяся* пыль (сухой шлак, кварц, сухая глина);

1 – *слабослипающаяся* (коксовая, апатитовая сухая, доменная);

2 – *среднеслипающаяся* (торфяная, металлическая, сажа, мука, опилки);

3 – *сильнослипающаяся* (цементная, гипсовая, волокнистая – хлопок, асбест, шерсть).

Абразивность частиц

Абразивность частиц характеризует интенсивность износа металлических частей газохода, в котором движутся частицы. Она зависит от твердости, плотности и формы частиц. Абразивность пыли учитывают при расчетах аппаратуры (выбор скорости газа, толщины стенок аппаратуры и облицовочных материалов).

Смачиваемость и гигроскопичность

Смачиваемость частиц водой влияет на эффективность работы мокрых пылеуловителей. Гладкие частицы смачиваются лучше пористых, так как последние обычно содержат адсорбированный газ.

Существует три группы частиц по смачиваемости:

- 1) *гидрофильные* – кальций, кварц, силикаты, соли;
- 2) *гидрофобные* – плохо смачиваются водой – уголь, сера;
- 3) *абсолютно гидрофобные* – парафин, тефлон, битум.

Гигроскопичность – способность пыли впитывать влагу. Зависит от химического состава, размера, формы и степени шероховатости поверхности.

Гигроскопичную пыль хорошо улавливают аппараты мокрой пылеочистки.

Электрическая проводимость слоя пыли

Электрическая проводимость слоя характеризуется величиной $\rho_{\text{сл}}$ – удельным электрическим сопротивлением слоя пыли. Удельное сопротивление слоя оказывает важное влияние на работу электрофильтров. По величине $\rho_{\text{сл}}$ пыль разделяют на три категории:

- 1) пыли с $\rho_{\text{сл}} < 10^4$ Ом·см, или низкоомные пыли, – при осаждении могут мгновенно разряжаться и улетать;
- 2) пыли с сопротивлением $\rho_{\text{сл}} = 10^4 \dots 10^{10}$ Ом·см – хорошо улавливаются в электрофильтре, так как разрядка частиц происходит не сразу, а в течение некоторого времени, необходимого для накопления пыли;
- 3) пыли с $\rho_{\text{сл}} = 10^{10} \dots 10^{13}$ Ом·см – трудности для улавливания таких частиц электрофильтрами обусловлены тем, что они образуют на электроде пористый непроводящий слой.

Взрывоопасность пылевоздушных смесей

Горючая пыль вследствие высокоразвитой поверхности ($\sim 1 \text{ м}^2/\text{г}$) при контакте с воздухом способна самовоспламеняться или взрываться. Такой способностью обладают некоторые пыли органических веществ, образующиеся при переработке пластмасс, волокон, металлов.

При содержании кислорода в газе менее 16 об. % обычно пылевое облако не взрывается.

2.3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ

Эффективность пылеулавливания, или степень очистки, является основным параметром, характеризующим работу аппаратов и систем газоочистки. Степень очистки выражают как отношение количества пыли, задержанной в аппарате, к общему количеству пыли, поданной в него на очистку. Эффективность очистки обозначают литерой η и вычисляют по формуле:

$$\eta = \frac{G'_a - G''_a}{G'_a} = \frac{V'_r c' - V''_r c''}{V'_r c'} = 1 - \frac{V''_r c''}{V'_r c'}, \quad (2.3)$$

где G'_a – массовый расход пыли, поступающей в аппарат, кг/с;

G''_a – массовый расход пыли, выходящей из аппарата, кг/с;

V'_r и V''_r – объемный расход газа, измеренный при температуре 273 К и давлении 10130 Па, м³/с;

c' и c'' – концентрация пыли в газе, кг/м³.

Для оценки конечной запыленности газового потока используют коэффициент проскока $K_{\text{пр}}$:

$$K_{\text{пр}} = 1 - \eta. \quad (2.4)$$

Эффективность очистки практически всегда неодинакова для частиц разного размера. Обычно крупные частицы улавливаются лучше, поэтому коэффициент очистки часто определяют по фракционной эффективности:

$$\eta_{\phi} = \Phi' - \Phi''(1 - \eta) / \Phi', \quad (2.5)$$

где Φ' и Φ'' – содержание фракции в газе на входе и выходе, %.

Общая эффективность аппарата будет определяться из соотношения:

$$\eta = \frac{\eta_{\phi} \Phi_1}{100} + \dots + \frac{\eta_{\phi_i} \Phi_i}{100}. \quad (2.6)$$

Для нескольких последовательно установленных аппаратов суммарную степень очистки рассчитывают по формуле

$$\eta_{\Sigma} = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_i), \quad (2.7)$$

где η_i – степень очистки от пыли, достигаемая в i -м по счету аппарате.

Раздел 3

СУХАЯ ОЧИСТКА ОТ ПЫЛИ

В зависимости от природы сил, действующих на частицы пыли в аппарате, сухие механические пылеуловители условно разделяют на три группы:

- пылеосадительные камеры – *сила тяжести (гравитация)*;
- инерционные камеры – *сила инерции*;
- вращающиеся пылеуловители, циклоны – *центробежная сила*.

Рассмотрим принцип действия различных пылеуловителей подробнее.

3.1. ГРАВИТАЦИОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ

Пылеосадительная камера (или гравитационный пылеуловитель) представляет собой полый прямоугольный короб, в нижней части которого расположен бункер для сбора пыли (рис. 2). Такие аппараты используются для улавливания крупных частиц пыли размером более 50 мкм.

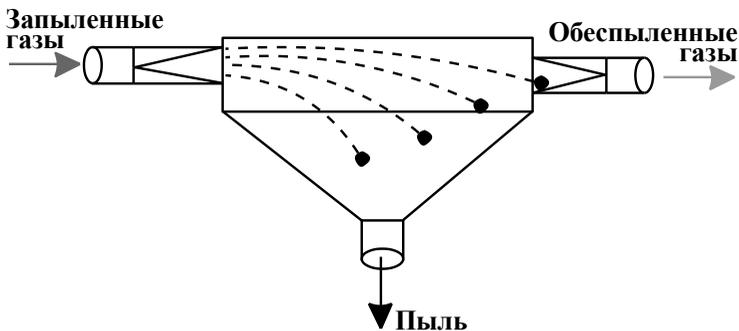


Рис. 2. Пылеосадительная камера

Работа гравитационных пылеуловителей основана на законах гравитации. Гравитационное осаждение происходит в результате вертикального оседания частиц под действием силы тяжести при прохождении их через обезвреживающее устройство. При прямолинейном движении частица встречает сопротивление среды F_c :

$$F_c = \xi_{\text{ч}} S_{\text{ч}} \omega_{\text{ч}}^2 \rho_0 / 2, \quad (3.1)$$

где $S_{\text{ч}}$ – проекция сечения частицы на направление ее движения, м²; ρ_0 – плотность среды, кг/м³; $\omega_{\text{ч}}$ – скорость частицы, м/с; $\xi_{\text{ч}}$ – аэродинамический коэффициент сопротивления частицы.

Коэффициент сопротивления $\xi_{\text{ч}}$ зависит от числа Рейнольдса $Re_{\text{ч}}$:

$$Re_{\text{ч}} (\text{для шара}) = \omega_{\text{ч}} d_{\text{ч}} \rho_0 / \mu_0, \quad (3.2)$$

где $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы, м; μ_0 – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Существуют эмпирические соотношения, по которым можно определить коэффициент сопротивления $\xi_{\text{ч}}$ в зависимости от режима газового потока:

- 1) $Re \leq 2$ – ламинарный режим: $\xi_{\text{ч}} = 24/Re$;
- 2) $2 < Re < 500$ – переходный режим: $\xi_{\text{ч}} = 18.5/Re^{1/2}$;
- 3) $500 < Re < 150\,000$ – турбулентный режим: $\xi_{\text{ч}} = 0.44$.

Для случая ламинарного движения частицы, подставив выражение $\xi_{\text{ч}} = 24/Re$ в формулу (3.1), получим

$$F_c = 3\pi\mu_0 d_{\text{ч}} \omega_{\text{ч}}. \quad (3.3)$$

Таким образом, при ламинарном движении сферической частицы ($Re \leq 2$) в вязкой среде сила сопротивления среды прямо пропорциональна скорости движения, диаметру частицы и вязкости среды. Полученная формула известна как закон Стокса.

Область применения закона Стокса определяется размерами частиц и требуемой точностью расчетов:

- при $16 < d_{\text{ч}} < 30$ мкм точность составляет 1 %;
- при $1.6 < d_{\text{ч}} < 70$ мкм точность составляет 10 %.

Согласно закону Стокса (3.3), чем меньше размер частицы, тем меньше сила сопротивления среды, возникающая при ее осаждении. В то же время хорошо известно, что слишком маленькие частицы пыли практически не осаждаются. Это связано с тем, что частицы, размер

которых сопоставим с размерами молекул газа, участвуют в броуновском (тепловом) движении. Траектория теплового движения частиц хаотично изменяется в результате многократных столкновений с молекулами газа. Приблизительная оценка из теории соударений в газе показывает, что частица размером 0.1 мкм в воздухе при 300 К и давлении 1 атм испытывает примерно 10^{10} соударений в секунду.

Перемещение частицы при тепловом движении Δx (броуновское смещение) определяется по уравнению Эйнштейна:

$$\Delta x = \sqrt{2D_{\text{ч}} \cdot T_0}, \quad (3.4)$$

где $D_{\text{ч}}$ – коэффициент диффузии частицы, м²/с; T_0 – температура воздуха, К.

Обычно скорость осаждения и величина броуновского смещения Δx соизмерима для частиц меньше 0.5 мкм в размере. Для частиц размером 0.02...0.05 мкм броуновское смещение на несколько порядков превышает путь свободного падения частицы, что делает невозможным их улавливание в гравитационных камерах.

Скорость осаждения сферической частицы $\omega_{\text{ч}}$ в области действия закона Стокса определяется из соотношения:

$$\omega_{\text{ч}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}} g}{18\mu_0} = \tau_p G, \quad (3.5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы, г/см³; τ_p – время релаксации частицы, с; G – параметр гравитационного осаждения, представляющий собой отношение силы тяжести F_T и силы сопротивления F_c .

$$G = \frac{F_T}{F_c} = \frac{mg}{F_c} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} g}{6 \cdot 3\pi \mu_0 d_{\text{ч}} v_0} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}} g}{18\mu_0 v_0} = \frac{\omega_{\text{ч}}}{v_0}, \quad (3.6)$$

где v_0 – скорость газового потока, м/с.

Отметим, что согласно формуле (3.5) скорость осаждения частицы пропорциональна квадрату ее диаметра. Скорость падения частиц плотностью 1 г/см³ в неподвижном воздухе под действием силы тяжести представлена в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Скорость падения частиц плотностью 1 г/см³ в неподвижном воздухе под действием силы тяжести

Диаметр частицы, мкм	100	10	1
Скорость падения, м/с	0.3	0.003	0.00003

Скорость газа в восходящем (идущем снизу вверх) потоке, при которой частица неподвижна (или колеблется), называется *скоростью витания*. Другими словами, скорость витания частицы равна скорости ее падения в неподвижной газовой среде. Этот параметр важен для устройств, в которых происходит перемещение газов со взвешенными частицами (аспираторы, пылеуловители, пневмотранспорт).

На практике частицы пыли далеко не всегда характеризуются правильной сферической формой. Каждому типу частиц приписывается свой поправочный коэффициент формы χ , на который умножается значение ξ_q в формуле (3.1), при этом

$$\chi = (d_s)^3 / (d_q)^3, \quad (3.7)$$

где d_s – эквивалентный диаметр частицы, равный диаметру шара, объем которого равен объему частицы неправильной формы, м.

Значения фактора формы χ для различных типов частиц даны в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения динамического коэффициента χ для частиц разной формы

Форма частиц	Значение χ
Сферическая	1
Шероховатая сфера	2.5
Вытянутая	3
Пластинчатая	5

При равномерном распределении газового потока по сечению аппарата время нахождения газа в нем определяется как отношение объема камеры V_k (м³) к объемному расходу газа V_r (м³/с):

$$\tau = V_k / V_r. \quad (3.8)$$

Скорость газа в пылеосадительных камерах составляет 0.2...1.5 м/с, гидравлическое сопротивление невелико – 50...150 Па. Степень очистки газа от пыли гравитационным способом обычно не превышает 40...50 % и ограничивается размером эффективно осаждаемых частиц и временем нахождения газа в камере τ . Гравитационное осаждение традиционно используется как предварительная стадия в очистке газов от пыли.

Осадительные камеры применяются в производстве огнеупоров, в цементной и деревообрабатывающей промышленности. Например, для улавливания древесных отходов используется камера-коллектор, представляющая собой горизонтальный газоход диаметром 1.5 м и длиной до 30 м. Эффективность улавливания грубой древесной пыли – 65 %.

Вертикальные осадительные камеры шахтного типа используются в цементной промышленности после мельниц. Выносы пыли уменьшаются в десятки раз, степень очистки может составлять 90...95 %. Такие же камеры могут использоваться для очистки дымовых газов в малых котельных. В каждом конкретном случае выбор типа гравитационного осадителя определяется условиями его размещения и эксплуатации на промышленном объекте.

3.2. ИНЕРЦИОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ

Эффективность очистки может быть повышена, а габариты аппаратов уменьшены, если вдобавок к эффекту гравитационного осаждения придать частицам дополнительный импульс движения вниз. Действие инерционных аппаратов основано на резком изменении направления движения газопылевого потока. При этом более тяжелые пылевые частицы вследствие большей инерции будут сохранять первоначальные направления движения, а существенно более легкие молекулы газа будут резко изменять направление движения и выходить из аппарата.

Для изменения направления движения газов в аппаратах устанавливают специальные перегородки, сетки и другие элементы. Наиболее простыми аппаратами в этом классе являются так называемые пылевые мешки, используемые преимущественно в металлургии (рис. 3). Их целесообразно применять для предварительной очистки газов с высокой концентрацией пыли – 200...300 г/м³. Эффективность таких аппаратов невелика, так как в них задерживаются только крупные фракции пыли.

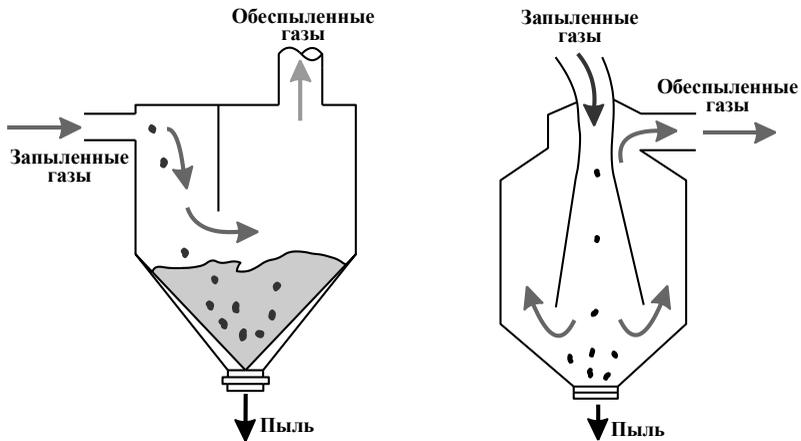


Рис. 3. Пылеуловители инерционного действия

На рис. 4 схематично показано устройство жалюзийного пылеотделителя, конструкция которого содержит решетку, состоящую из рядов пластин или колец. Очищаемый газ, проходя через решетку, делает резкие повороты. Пылевые частицы вследствие инерции стремятся сохранить вектор движения, что приводит к отделению крупных частиц из потока.

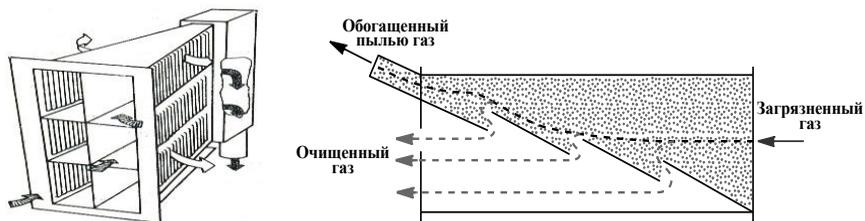


Рис. 4. Пылеуловитель жалюзийного типа

Назначение жалюзийной решетки заключается в разделении газового потока на две части: на свободную в значительной мере от пыли (содержащую 80...90 % всего количества газа) и на содержащую основную массу пыли, улавливаемую затем в циклоне или другом достаточно эффективном пылеуловителе. Обеспыленный в циклоне газ снова возвращается в основной поток газов, очищенных после жалюзийной решетки.

Жалюзийные аппараты требуют для своего размещения значительно меньших производственных площадей по сравнению со многими другими аппаратами сухой инерционной очистки газов, так как их основной элемент – жалюзийная решетка – может встраиваться в газопроводы. В то же время основным недостатком этих аппаратов является быстрый износ пластин при значительной концентрации абразивной пыли.

Инерционное осаждение наблюдается в том случае, когда масса частицы или скорость ее движения настолько значительны, что она не может следовать вместе с газом по линии тока, огибающей препятствие (шар). Стремясь по инерции продолжить свое движение, частица сталкивается с препятствием и осаждается на нем (рис. 5).

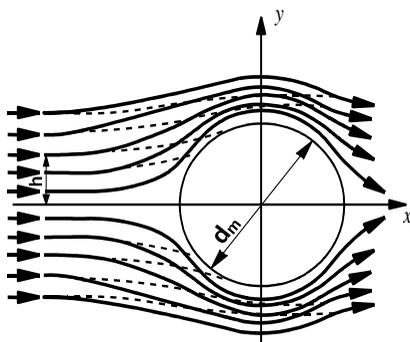


Рис. 5. Осаждение частиц пыли на поверхности шара:

— траектория движения газа;
 - - - - траектория движения частиц

Траектория движения частицы в газовом потоке в условиях применимости закона Стокса может быть описана следующим уравнением:

$$2St \frac{d^2 \bar{\rho}}{d\tau_0^2} + \frac{d\bar{\rho}}{d\tau_0} = \bar{v}_0, \quad (3.9)$$

где R – размер обтекаемого тела (радиус шара), м;

$\bar{\rho} = \bar{r}_q / R$ – безразмерная координата частицы;

\bar{r}_q – радиус-вектор частицы, м;

$\bar{v}_0 = v_r / v_\infty$ – безразмерная скорость газа;

v_∞ – скорость газа вдали от обтекаемого тела, м/с;

v_r – вектор скорости газов в месте нахождения частиц, м/с;

$\tau_0 = v_\infty \tau / R$ – безразмерное время;

τ – время движения, с.

St – инерционный параметр (критерий Стокса), характеризующий отношение инерционной силы, действующей на частицу, к силе сопротивления среды:

$$St = \frac{d_p^2 \rho_g v_r C_k}{18\mu \cdot 2R} \quad (3.10)$$

Критерий Стокса St является единственным критерием подобия инерционного осаждения. Из уравнения (3.9) следует, что при $St = 0$ (частицы с бесконечно малой массой) $\bar{v}_0 = dr/d\tau_0$, т. е. частица следует точно по линии тока, не соприкасаясь с поверхностью обтекаемого тела. Существует минимальное, или критическое, значение числа Стокса $St_{кр}$, при котором инерция частицы оказывается достаточной, чтобы отделиться от газового потока и достигнуть поверхности препятствия. Таким образом, инерционный захват частицы возможен при условии $St > St_{кр}$.

Теория инерционного осаждения рассматривает осаждение частиц на фронтальной части препятствия и не учитывает их осаждение на задней поверхности тела, которое может происходить за счет завихрений газового потока в турбулентном режиме. Это явление становится существенным при улавливании частиц пыли субмикронных размеров. Таким образом, даже при $St < St_{кр}$ эффективность осаждения не равна нулю.

Коэффициент эффективности инерционного осаждения η_{st} определяется долей частиц, отделившихся от газового потока при обтекании препятствий. В области $St > 0.1$ коэффициент осаждения на шаре может быть вычислен по эмпирической формуле:

$$\eta_{st} = \frac{St^2}{St + 0.35} \quad (3.11)$$

Инерционное осаждение эффективно для частиц размером более 1 мкм. Эффективность очистки газа от пыли в инерционных аппаратах находится на уровне 60...90 %. Точное значение эффективности очистки зависит от многих факторов: дисперсности пыли и других ее

свойств, скорости потока, конструкции аппарата и его гидравлического сопротивления. Обычно гидравлическое сопротивление жалюзийного пылеуловителя находится в пределах 400...500 Па. Скорость газа на входе в инерционный пылеосадитель должна быть достаточно высокой (до 15 м/с), чтобы достигнуть эффекта инерционного отделения пыли.

Инерционные аппараты, как и осадительные камеры, применяют обычно на первой ступени очистки с последующим обеспыливанием газа (воздуха) в более совершенных аппаратах. Преимуществом всех инерционных пылеуловителей является простота устройства и невысокая стоимость аппарата. Этим и объясняется их широкая распространенность.

3.3. ЦЕНТРОБЕЖНОЕ ОСАЖДЕНИЕ

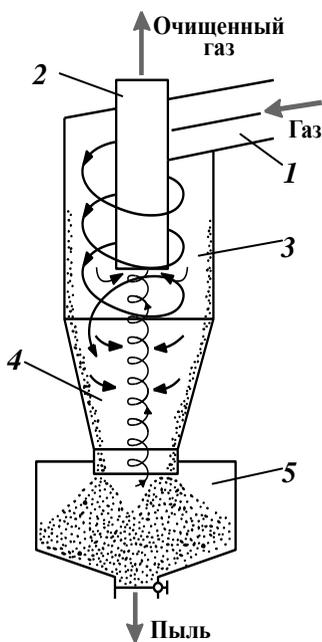


Рис. 6. Схема работы циклона:
 1 – вход газа; 2 – выход газа; 3 – цилиндрическая часть; 4 – коническая часть; 5 – бункер для сбора пыли

Центробежное осаждение пыли проводят в аппаратах, называемых циклонами. Отделение пыли от газового потока в циклонах происходит под действием центробежных сил, возникающих в результате вращения газового потока внутри аппарата. Несмотря на многообразие конструкций циклонов, его классический вариант, показанный на рис. 6, состоит из: цилиндрической части с крышкой и тангенциальным патрубком; конической части с патрубком для отвода пыли; центральной трубки для отвода очищенного газа и бункера для сбора пыли.

Запыленный газ поступает в циклон тангенциально со скоростью 14...25 м/с, в результате он приобретает вращательное движение. В цилиндрической части циклона газ совершает несколько оборотов, после чего винтообразно опускается вниз. В конической части циклона скорость вращения потока увеличивается за счет уменьшения диаметра. Под действием центробежной силы частицы отбрасываются к стенкам циклона, откуда затем попадают в бункер для сбора пыли.

В центральной части циклона возникает восходящий вихрь обеспыленного газа, который поднимается кверху и выходит через патрубок для отвода очищенного газа. В циклонах протекает ряд сложных аэродинамических процессов, от совершенства которых зависит эффективность работы этих аппаратов. Размеры и формы указанных элементов у разных циклонов могут сильно различаться, кроме того, конструкция некоторых циклонов может содержать дополнительные устройства для подкрутки газа (улитки, розетки и т. д.)

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЦИКЛОНА

На шаровую частицу пыли в циклоне действуют три силы.

1. Центробежная

$$F_{ц} = \frac{mv_T^2}{R}, \quad (3.12)$$

где m – масса частицы, кг;

v_T – тангенциальная составляющая скорости частицы, м/с;

R – радиус вращения газового потока, м.

2. Сила сопротивления движению в радиальном направлении

$$F_R = 3\pi v_R d_{ч} \mu, \quad (3.13)$$

где v_R – радиальная составляющая скорости, м/с;

$d_{ч}$ – диаметр частицы, м; μ – вязкость газа, Па·с.

3. Сила тяжести: $F_T = mg$.

Сравним центробежную силу $F_{ц}$ и силу тяжести F_T по порядку величины при скорости газа $v_T = 15$ м/с и $R = 0.5$ м. В этом случае отношение $F_{ц} / F_T = 45$, т. е. в обычных условиях работы циклона центробежная сила, действующая на частицу, в несколько десятков раз превышает силу гравитации. Этот факт позволяет пренебречь вкладом величины F_T в дальнейших расчетах.

Скорость центробежного осаждения шаровой частицы пыли можно определить, приравняв центробежную силу $F_{ц}$ (3.12) силе сопротивления среды по закону Стокса (3.13):

$$F_{ц} = F_R \Rightarrow \frac{mv_T^2}{R} = 3\pi v_R d_{ч} \mu. \quad (3.14)$$

Подставив в уравнение (3.14) массу частицы в виде $m_{\text{ч}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6} \rho_{\text{ч}}$, можно выразить скорость миграции частицы в радиальном направлении или скорость центробежного осаждения:

$$V_R = \frac{d_{\text{ч}}^2 v_T^2 \rho_{\text{ч}}}{18 \mu R} \quad (3.15)$$

Пусть R_1 – радиус выхлопной трубы; R_2 – радиус цилиндрической части циклона. Примем $R = \frac{R_2 + R_1}{2}$ за средний путь частицы и найдем выражение для времени осаждения $t_{\text{ос}}$:

$$t_{\text{ос}} = \frac{R_2 - R_1}{V_R} \Rightarrow t_{\text{ос}} = \frac{9 \mu}{d_{\text{ч}}^2 v_T^2 \rho_{\text{ч}}} (R_2^2 - R_1^2) \quad (3.16)$$

Как видно из полученного выражения (3.16), время осаждения $t_{\text{ос}}$ частицы пыли обратно пропорционально плотности частицы, квадрату скорости газа и квадрату диаметра частицы. Из этой же формулы можно найти размер самых малых частиц, которые успевают пройти путь $(R_1 - R_2)$ за время пребывания газа в циклоне:

$$d_{\text{min}} = 9 \mu_0 (R_1 - R_2) / \pi \rho_{\text{ч}} v_T n^{1/2}, \quad (3.17)$$

где n – число оборотов, совершаемых газовым потоком в циклоне. Обычно число оборотов принимают равным 2–3.

Результаты экспериментальных исследований значительно отличаются от теоретических расчетов, проводимых с помощью полученных соотношений (3.16) и (3.17). Данный факт объясняется тем, что в этих формулах не в полной мере учтены факторы, влияющие на процесс осаждения частиц пыли в циклоне. В реальных условиях пылевые частицы, имеющие размер больше критического d_{min} , улавливаются в циклонах далеко не полностью. В то же время часть от общей массы частиц, имеющих размер меньше d_{min} , осажается в циклоне в результате процесса коагуляции, который также не учитывается в приведенных формулах.

Для оценки гидравлического сопротивления циклона используют общепринятую формулу

$$\Delta P = \zeta (\rho_r v_T^2) / 2, \quad (3.18)$$

где ζ – коэффициент сопротивления циклона.

ВЫБОР И РАСЧЕТ ЦИКЛОНА

При расчете циклонов должна быть обеспечена необходимая эффективность очистки η , %, при минимальных энергетических затратах (гидравлическом сопротивлении ΔP).

Гидравлическое сопротивление циклонов существенно снижается при уменьшении закручивания газового потока в выхлопной трубе. Для этого устанавливают специальные устройства – раскручиватели, диффузоры или «улитки» на выходе.

Для расчета режимов работы и выбора марки циклона необходимы следующие исходные данные:

Q_r – объемный расход газа, м³/с;

μ – динамическая вязкость газа при рабочей температуре, Па·с;

ρ_r – плотность газа в рабочих условиях, кг/м³.

Дисперсный состав пыли, задаваемый параметрами d_m (мкм) и $\lg \sigma_q$:

$C_{вх}$ – концентрация пыли в газе, г/м³.

ρ_q – плотность частиц пыли, кг/м³.

Последовательность расчета циклонов

1. Тип циклона выбирают по табличным данным и определяют $V_{\text{опт}}$ – оптимальную скорость газа в аппарате – и дисперсию распределения значений фракционной эффективности пылеуловителя $\lg \sigma_\eta$.

2. Расчет необходимой площади циклона, м²:

$$F = Q_r / \omega_{\text{опт}}. \quad (3.19)$$

3. Определение диаметра циклона, м:

$$D = \sqrt{\frac{F}{0.785}}. \quad (3.20)$$

Полученное значение округляют до величины, кратной 100 мм.

4. Определение действительной скорости газа в циклоне:

$$V = \frac{Q}{0.785 \cdot D^2}. \quad (3.21)$$

Реальная скорость газа в циклоне не должна расходиться с $V_{\text{опт}}$ более чем на 15 %.

5. Расчет коэффициента гидравлического сопротивления циклона:

$$\xi_{\text{ц}} = K_1 K_2 \xi_{\text{ц}500} + K_3, \quad (3.22)$$

где $\xi_{\text{ц}500}$ – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм, выбираемый по табличным данным.

K_1 – поправка на диаметр циклона (0.9...1.0);

K_2 – поправка на запыленность газов (0.5...1.0);

K_3 – коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления при компоновке циклонов (0...60). Для одиночного циклона $K_3 = 0$.

6. Определение потерь давления в циклоне, Па:

$$\Delta P = \xi_{\text{вх}} \frac{\rho_{\text{г}} v_{\text{вх}}^2}{2}, \quad (3.23)$$

где $\xi_{\text{вх}} = K_1 K_2 \xi_0 + K_3$. Стандартный коэффициент сопротивления ξ_0 определяется из табличных данных.

Если перепад давления ΔP оказался приемлемым, переходят к расчету полного коэффициента очистки газа в циклоне.

7. Определение диаметра частиц, улавливаемых в циклоне на 50 % в рабочих условиях:

$$d_{50} = d_{50}^{\text{T}} \sqrt{\frac{D}{D_{\text{T}}} \frac{\rho_{\text{г}}^{\text{T}}}{\rho} \frac{\mu}{\mu_{\text{T}}} \frac{v_{\text{T}}}{v}}. \quad (3.23)$$

Символ «Т» в записи параметров d_{50}^{T} , $\rho_{\text{г}}^{\text{T}}$, μ_{T} , D_{T} , v_{T} обозначает стандартные условия. Стандартные значения выбирают из таблицы, соответствующей типу циклона и рабочим условиям очистки (диаметр циклона, скорость потока, плотность пыли и динамическая вязкость газа).

8. Определяют параметр X по формуле

$$X = \frac{\lg d_m / d_{50}}{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_{\eta}}. \quad (3.24)$$

9. По графику, приведенному на рис. 7, определяют значение нормальной функции распределения $\Phi(X)$, представляющее собой полный коэффициент очистки газа (в долях от единицы).

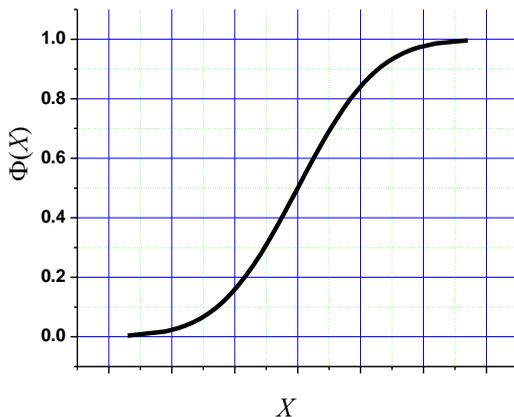


Рис. 7. График зависимости функции распределения $\Phi(X)$ от величины X

На практике эффективность очистки газов в циклонах оказывается почти всегда несколько ниже расчетной величины. Это объясняется, в первую очередь, нарушениями при эксплуатации циклонного оборудования.

ТИПЫ ЦИКЛОНОВ

Циклоны различаются следующим образом.

а) *По способу подвода газа в аппарат:*

- спиральный;
- тангенциальный;
- винтообразный;
- осевой.

Предпочтительным с точки зрения аэродинамики является подвод газа по спирали, тем не менее на практике все способы подвода применяются с равной эффективностью.

б) *По направлению вращения потока:*

- правые (вращение потока газа по часовой стрелке);
- левые (вращение против часовой стрелки).

в) *По применению в промышленности:*

- высокоэффективные;
- высокопроизводительные.

Высокоэффективные циклоны отличаются более высокой степенью очистки и требуют больших затрат на осуществление процесса. Высокопроизводительные циклоны характеризуются небольшим гидравлическим сопротивлением, большой производительностью, но хуже задерживают мелкие частицы пыли.

г) *По форме:*

- цилиндрические ($H_{ц} > H_{к}$);
- конические ($H_{ц} < H_{к}$),

где $H_{ц}$ и $H_{к}$ – высота цилиндрической и конической части циклона соответственно. Строение конической части определяет особенности движения пылегазового потока в этой части циклона и существенно влияет на процесс осаждения пыли в аппарате и устойчивость его работы.

д) *По комплектованию:*

- одиночные;
- групповые;
- батарейные.

С увеличением диаметра циклона при постоянной скорости потока снижается центробежная сила, что приводит к уменьшению эффективности очистки от пыли. К тому же увеличение производительности одиночного циклона сопряжено с трудностями монтажа и эксплуатации из-за его значительной высоты. По этой причине широкое применение в технике пылеулавливания нашли групповые и батарейные циклоны.

В групповых циклонах несколько элементов komponуют в группу с одним общим коллектором для подачи газа и общим бункером для сбора пыли. Групповые циклоны размещают двухрядным способом по 2...8 шт. либо вокруг вертикального входного патрубка по окружности по 10...14 шт.

Батарейный циклон (рис. 8) представляет собой пылеулавливающий аппарат, составленный из большого числа одиночных циклонов, закрепленных в одном корпусе с общим подводом, отводом газов и бункером для сбора пыли. Такие аппараты имеют очень высокую производительность (до 100 000 м³/ч), а количество циклонных элементов в них может достигать нескольких сотен.

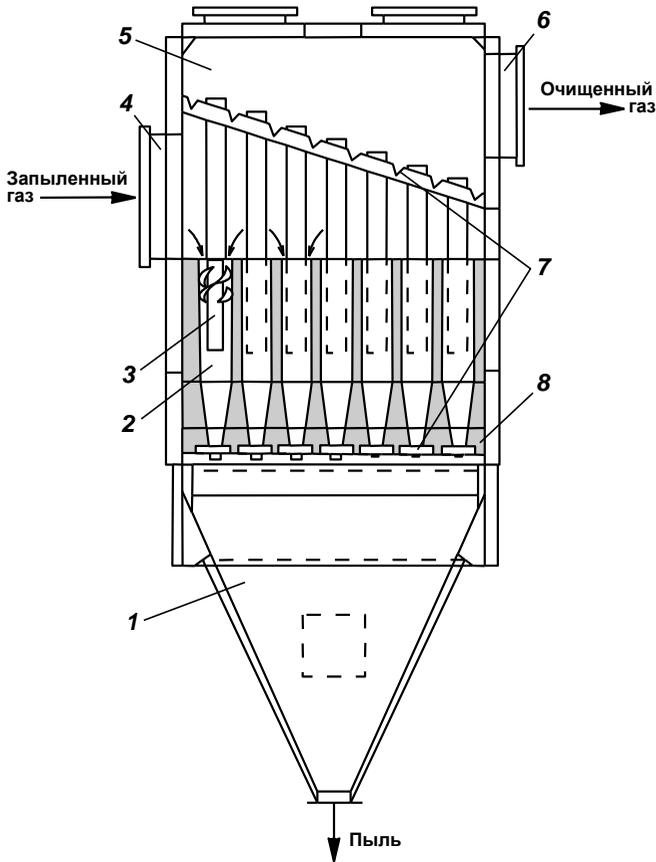


Рис. 8. Батарейный циклон с аксиальной подачей газа:

1 – бункер для сбора пыли; 2 – корпус циклона; 3 – выхлопная труба циклона; 4 – входной патрубок; 5 – проточная камера; 6 – выходной патрубок; 7 – верхняя и нижняя трубные доски; 8 – распределительная камера

Обеспыливаемый газ через входной патрубок поступает в распределительную камеру, откуда выходит в кольцевые зазоры между корпусами и выхлопными трубами циклонных элементов. В зазорах установлены направляющие аппараты, закручивающие газовый поток таким образом, что возникающая центробежная сила отбрасывает частицы пыли к стенкам корпусов элементов, и пыль сыпается через пы-

леотводящие отверстия в бункер. Поступившая в бункер пыль направляется в систему пылетранспорта. Очищенный газ поступает в проточную камеру и далее в вентиляцию (рис. 8).

Основная техническая трудность при эксплуатации групповых и батарейных циклонов заключается в том, чтобы добиться равномерного распределения очищаемых газов между циклонными элементами. Падение эффективности пылеочистки может происходить за счет перетока газов из элементов с большим ΔP в элементы с меньшим ΔP .

Обычно эффективность очистки в таких аппаратах составляет примерно 70 %.

е) По конструкции:

- противоточные (см. рис. 6);
- проточные (рис. 9);
- вихревые;
- динамические (ротационные).

Основное преимущество проточных циклонов заключается в низких величинах ΔP и простоте аппаратного оформления и монтажа. На рис. 9 показана схема наиболее распространенной конструкции проточного циклона ЦКТИ, предназначенного для предварительной очистки газов. Запыленный газ вводится тангенциально в цилиндрическую часть циклона, где приобретает вращательное движение. Пыль собирается в конусной части, а очищенный газ проходит через раскручиватель. Скорость газового потока в аппарате составляет 5...6 м/с. Основным недостатком циклона ЦКТИ – невысокая степень очистки.

Вихревые пылеуловители бывают соплового и лопаточного типа. Основное их отличие от циклонов заключается в наличии вспомогательного закручивающего газового потока. В качестве вторичного газа в вихревых

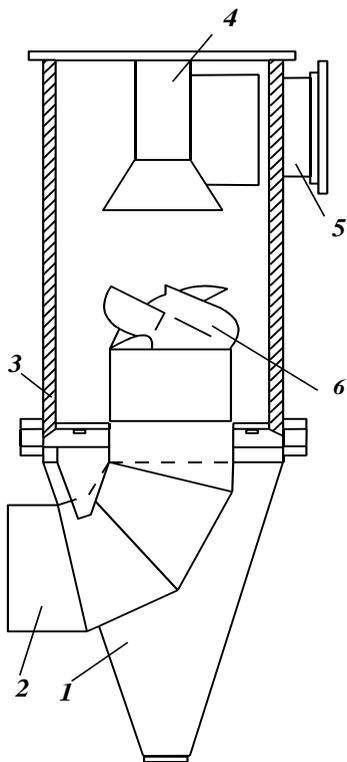


Рис. 9. Проточный циклон типа ЦКТИ:

- 1 – конусная часть; 2 – вывод газа; 3 – цилиндрический корпус; 4 – вставка; 5 – тангенциальный штуцер; 6 – раскручиватель газа

пылеуловителях используют атмосферный воздух или запыленные газы. По сравнению с противоточными циклонами вихревые характеризуются более высокой степенью очистки от мелких частиц, отсутствием абразивного износа и возможностью регулирования процесса сепарации. К недостаткам относится более сложная эксплуатация аппарата и наличие вентилятора.

Основная особенность динамических (ротационных) пылеуловителей – совмещение функции побудителя движения воздуха и пылеуловителя. Пылегазовый поток приводится во вращательное движение рабочим колесом, и пыль выделяется из газового потока под действием двух сил: центробежной и силы Кориолиса. Динамические пылеуловители компактны, надежны в работе и не требуют дополнительных компрессоров для побуждения газа. К их недостаткам следует отнести сравнительно невысокую степень очистки (70...80 %) и сложность изготовления.

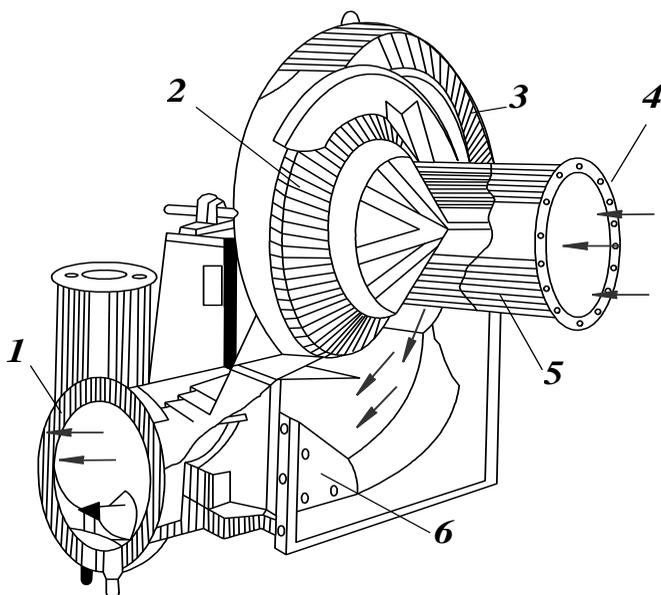


Рис. 10. Ротационный пылеуловитель:

1 – очищенный газ; 2 – колесо; 3 – спиралеобразный кожух;
4 – газ на очистку; 5 – приемный патрубок; 6 – пылесборник

Циклоны имеют несколько преимуществ перед другими аппаратами:

- возможность работы при высоких давлениях и температурах газа;
- отсутствие в конструкции движущихся частей;
- возможность извлечения пыли в сухом виде;
- низкая чувствительность к колебаниям концентрации пыли;
- ремонтпригодность.

К недостаткам циклонов следует отнести:

- высокий перепад давления ($\Delta P = 1200 \dots 1500$ Па);
- плохое улавливание частиц пыли размером меньше 5 мкм;
- невозможность использования для очистки газов от липкой пыли.

Циклоны используются для очистки воздуха и прочих газовых смесей от сухой, неслипающейся и неволокнистой пыли, образующейся в различных помольных и дробильных установках, а также при транспортировании сыпучих материалов. Циклоны весьма эффективны для очистки газов от твердых частиц размером 10 мкм и более. При уменьшении размера пылинок до 5 мкм эффективность работы циклонов резко снижается.

Для улавливания взрывоопасной и легковоспламеняющейся пыли циклоны должны быть выполнены по специальным чертежам. Они не должны иметь в конструкции узлов, где могло бы происходить скопление пыли. Такие циклоны всегда снабжают необходимым количеством взрывных аварийных клапанов.

Циклоны широко применяются в промышленных процессах очистки дымовых и технологических газов. Они незаменимы для улавливания золы в отходящих газах установок промышленной теплотехники, используются в металлургии, деревообрабатывающей промышленности и т. д. Циклоны просты в обслуживании и надежны в работе.

Раздел 4

ФИЛЬТРОВАНИЕ ГАЗОВ

Фильтрация газов – процесс очистки газов от твердых или жидких частиц с помощью пористых сред. В процессе фильтрации взвешенные в газовом потоке частицы осаждаются на поверхности или в объеме пористых сред (перегородок) за счет броуновской диффузии, эффекта касания (зацепления), инерционных и электростатических сил.

В фильтрах уловленные частицы накапливаются в порах или образуют пылевой слой на поверхности. По мере накопления пыли пористость фильтра уменьшается, что приводит к существенному возрастанию сопротивления фильтра ΔP . Следовательно, возникает необходимость периодического удаления пыли и регенерации фильтра.

4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ФИЛЬТРОВ

По структуре

Гибкие пористые перегородки – ткани из природных или синтетических волокон, волокнистые материалы (войлок, бумага, картон); ячеистые листы (губчатая резина, мембранные фильтры и т. д.).

Полужесткие пористые перегородки – слои волокон, стружка, сетки, расположенные на опорных устройствах.

Жесткие пористые перегородки – зернистые материалы (пористая керамика, спеченные порошки металлов, пористые стекла); волокнистые материалы (слои из стеклянных или металлических волокон); металлические сетки, перфорированные листы.

По назначению

Фильтры тонкой очистки – высокоэффективные или абсолютные фильтры – предназначены для улавливания субмикронных частиц с высокой эффективностью (более 99 %). Используются для очистки

промышленных газов с низкой входной концентрацией (менее 1 мг/м^3) и скоростью фильтрования не выше 10 м/с . Применяют для улавливания особо токсичных частиц, в том числе радиоактивных. Такие фильтры не подлежат регенерации.

Воздушные фильтры – используют в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха. Работают при концентрации пыли до 50 мг/м^3 и высокой скорости фильтрации: $2.5 \dots 3 \text{ м/с}$. Могут подлежать регенерации.

Промышленные фильтры применяются для очистки промышленных газов с концентрацией пыли до 60 г/м^3 . Все фильтры регенерируются.

По эффективности очистки газов от пыли

Абсолютные фильтры – $\eta = 100 \%$;

I класс – $\eta = 99 \pm 0.1 \%$;

II класс – $\eta = 85 \pm 3 \%$;

III класс – $\eta = 60 \pm 5 \%$.

4.2. МЕХАНИЗМ ФИЛЬТРАЦИИ

Процесс фильтрации в наиболее распространенных фильтрах можно представить как движение частиц пыли вблизи волокна правильной цилиндрической формы, расположенного поперек газового потока. Влиянием соседних волокон пренебрегают. Считается также, что поток имеет ламинарное течение, а частицы – шаровую форму. При соприкосновении с волокнами частицы задерживаются на их поверхности под действием сил Ван-дер-Ваальса (межмолекулярное взаимодействие).

Фильтрация запыленного потока через слой пористого материала представляет собой весьма сложный процесс, включающий в основном механизмы инерционного осаждения, молекулярной диффузии и зацепления. Схематично все три механизма показаны на рис. 11. Пыль при фильтровании в основном задерживается в результате столкновения частиц с волокнами и нитями фильтровального материала и прилипания частиц к волокнам.

При движении потока через фильтровальный материал газ огибает волокна, более крупные частицы пыли под действием сил инерции сохраняют прежний вектор движения и, сталкиваясь с волокнами, осаждаются на них. Мелкие частицы, обладающие малой инерцией, могут вместе с газовым потоком обогнуть волокно. Самые мелкие частицы участвуют в хаотичном броуновском движении и с высокой вероятностью могут столкнуться с волокном и прилипнуть к его поверхности.

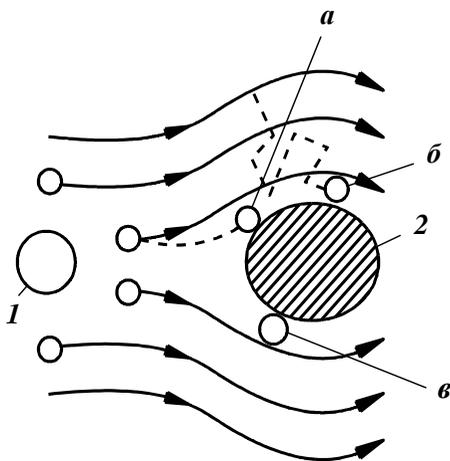


Рис. 11. Механизм осаждения пыли на цилиндрическом волокне:

1 – частица; 2 – волокно

a – инерционное осаждение; *б* – диффузия; *в* – зацепление

Вероятность столкновения частиц пыли с волокнами фильтровального материала под действием сил инерции является функцией критерия

$$St = \frac{v_r d_q \rho_q C_k}{18\mu d_B}, \quad (4.1)$$

где d_B – диаметр цилиндра (волокна фильтрующего материала), м.

Чем больше значение критерия St , тем больше число столкновений частиц с поверхностью волокна фильтровального материала.

Эффективность осаждения частиц одиночными волокнами (η_δ) при броуновском движении (температура потока ниже 100 °С) может быть определена по приближенной формуле

$$\eta_\delta = \frac{1,35 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{v_r d_q d_B}} \quad (4.2)$$

Нужно учесть, что на пути движения запыленного потока расположено обычно несколько рядов волокон, что, естественно, значительно

повышает общую эффективность очистки. Следует отметить, что эффективность осаждения частиц размером $d_c < 0.5$ мкм в основном определяется механизмом диффузионного осаждения. Для осаждения частиц большего размера определяющим является механизм инерционного захвата.

Определенное влияние на процесс фильтрации могут иметь электрические силы, особенно при применении диэлектрических фильтровальных материалов из смеси шерсти и синтетики, а также диэлектрических насыпных материалов.

Эффективность осаждения под действием электрических сил определяется по формуле

$$\eta_o = \frac{K_o E d_c^2}{6\nu_r \mu d_B} \quad (4.3)$$

Все три механизма обладают одним общим признаком: эффективность очистки обратно пропорциональна диаметру волокна. Таким образом, для получения высокой эффективности улавливания фильтровальный материал должен изготавливаться из тонких (10...20 мкм), а в отдельных случаях – и из супертонких волокон диаметром в несколько микрон.

Приведенные зависимости дают в основном качественную картину процесса осаждения в фильтрах и позволяют судить о роли основных факторов, влияющих на процесс. На практике же фильтры всегда подвергаются предварительным исследованиям на испытательных стендах.

4.3. РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ

Расчет фильтра сводится к определению поверхности фильтрования рукавов, количества рукавов и сопротивления фильтра по заданной производительности аспирационной системы цеха.

Площадь поверхности фильтровальных рукавов S (м²) находится по производительности аспирационной системы цеха:

$$S = \frac{Q}{q}, \quad (4.4)$$

где Q – объем очищаемого воздуха, м³;

q – удельная воздушная нагрузка фильтра, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, которая показывает, какой объем воздуха ($\text{м}^3/\text{ч}$) допускается пропускать через 1 м^2 фильтрующей поверхности для обеспечения ее паспортной степени очистки.

Средняя удельная газовая нагрузка находится по формуле

$$q_{\text{ср}} = \frac{\sum Q_i}{\sum F_i} . \quad (4.5)$$

Фильтровальные ткани имеют сложную пористую структуру, состоящую из соединенных между собой пор и сложной сети каналов (капилляров) различной формы и размеров. Установить для всех фильтровальных материалов закономерность движения воздушного потока пока не удастся. Поэтому гидравлические характеристики фильтровального материала определяются экспериментально.

Эффективность работы фильтра определяется как степень снижения запыленности газа при его прохождении через фильтровальную перегородку:

$$\eta = \frac{C_{\text{н}} - C_{\text{к}}}{C_{\text{н}}} 100 \% , \quad (4.6)$$

где $C_{\text{н}}$ и $C_{\text{к}}$ – концентрация пыли до и после фильтрации, $\text{мг}/\text{м}^3$.

По мере осаждения частиц образуется слой пыли, что приводит к уменьшению размера пор. Рабочим слоем при фильтрации является именно фильтровальный материал с осажденными на нем пылевыми частицами. К примеру, у чистого фильтровального материала эффективность улавливания субмикронных частиц составляет 10...20 % в среднем, тогда как те же частицы улавливаются в пылевом слое с эффективностью более 90 %.

Зарастание пор фильтра ведет к увеличению его гидравлического сопротивления, снижающего пропускную способность и соответственно производительность фильтра. По достижении некоторого критического значения $\Delta P_{\text{к}}$ процесс останавливают и удаляют накопленную пыль с фильтра продувкой воздуха в обратном направлении. Этот процесс называется регенерацией фильтра.

Степень регенерации фильтра рассчитывают по формуле

$$R = \frac{\Delta P_{\text{к}} - \Delta P_{\text{р}}}{\Delta P_{\text{к}} - \Delta P_{\text{н}}} 100 \% , \quad (4.7)$$

где ΔP_k – конечное сопротивление фильтра, кг·с/м²;

ΔP_n – начальное сопротивление фильтра;

ΔP_p – сопротивление фильтра после регенерации.

Сопротивление фильтра после продувки от пыли ΔP_p возрастает с каждой регенерацией. В конечном итоге фильтр либо промывают, либо заменяют.

Известны следующие методы регенерации фильтров:

- продувка газом в обратном направлении;
- пропускание жидкости в обратном направлении;
- продувка горячим паром;
- вибрация или простукивание.

Класс эффективности фильтров определяют на основании результатов, полученных при стендовых исследовательских испытаниях, в ходе которых измеряют:

1) *аэродинамические свойства* – зависимость сопротивления фильтра от расхода воздуха, пропускаемого через фильтр;

2) *пылевую характеристику* – ΔP фильтра и эффективность η от количества осажденной пыли.

Из-за сложности процесса в фильтрах практически невозможно установить влияние всех факторов на параметры фильтрации. По этой причине при определении эффективности очистки и гидравлического сопротивления фильтра пользуются данными, полученными на основе обобщения результатов экспериментальных исследований.

4.4. АППАРАТЫ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОВ

ТКАНЕВЫЕ ФИЛЬТРЫ

Данный тип фильтров является одним из самых распространенных в промышленности. Возможности использования тканевых фильтров все время расширяются за счет создания новых термостойких тканей, устойчивых к воздействию агрессивных газов.

Тканевые фильтры различают между собой по следующим признакам:

1) форме тканевых фильтрующих элементов (рукавные, плоские, клиновидные и др.);

2) месту расположения вентилятора относительно фильтра (всасывающие и нагнетательные);

3) способу регенерации ткани (встряхиваемые, с обратной продувкой, с вибровстряхиванием, с импульсной продувкой и др.);

4) форме корпуса для размещения фильтрующих элементов (прямоугольные, цилиндрические, открытые);

5) числу секций в установке (одно- и многосекционные);

6) виду используемой ткани (шерсть, бязь, стеклоткань и т. д.).

Наибольшее распространение среди тканевых фильтров получили рукавные фильтры (рис. 12). Корпус фильтра представляет собой металлический шкаф, разделенный вертикальными перегородками на секции, в каждой из которых размещена группа фильтрующих рукавов. Верхние концы рукавов заглушены и подвешены к раме, соединенной со специальным встряхивающим механизмом. Внизу расположен бункер-пылесборник, оснащенный шнеком для выгрузки пыли. Встряхивание рукавов в каждой из секций производится поочередно.

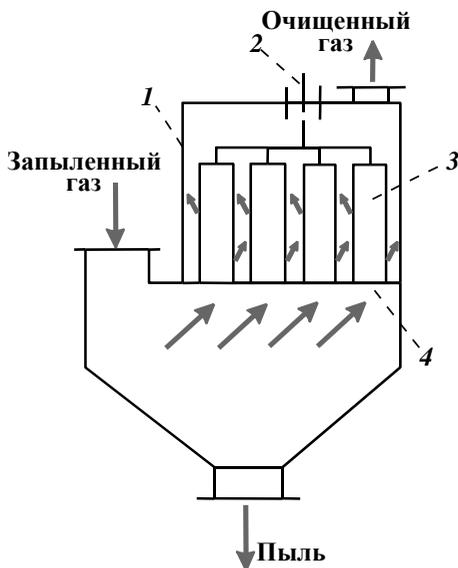


Рис. 12. Рукавный фильтр:

1 – корпус; 2 – встряхивающее устройство;
3 – рукав; 4 – распределительная решетка

В обычных фильтровальных тканях размер сквозных пор между нитями составляет 100...200 мкм. К тканям предъявляются следующие требования:

1) высокая пылеемкость;

- 2) оптимально высокая воздухопроницаемость;
- 3) высокая механическая прочность и стойкость к истиранию при многократных изгибах;
- 4) способность к легкому удалению накопленной пыли;
- 5) невысокая стоимость.

Существующие материалы не могут обладать одновременно всеми перечисленными свойствами, поэтому их подбирают в зависимости от конкретных условий очистки. Например, хлопчатобумажные ткани отличает хорошая эффективность отделения пыли и низкая стоимость наряду с недостаточной химической и термической стойкостью, горючестью и высокой влагоемкостью.

Синтетические материалы постепенно вытесняют хлопок и шерсть благодаря более высокой прочности, стойкости к повышенным температурам и агрессивным воздействиям при сопоставимой или более низкой стоимости. К таким фильтрующим материалам относятся, например, нитроновые ткани, используемые при температуре 120...130 °С в химической промышленности и цветной металлургии.

ВОЛОКНИСТЫЕ ФИЛЬТРЫ

Эти фильтры рассчитаны на улавливание и удержание частиц по всей глубине слоя. Фильтрующий элемент состоит из слоев однородно распределенных волокон. Для фильтров используют натуральные или синтетические волокна толщиной от 0.01 до 100 мкм. Толщина фильтров составляет от нескольких долей миллиметра (бумага) до 2 м (многослойные насадочные фильтры долговременного использования). Такие фильтры в основном применяют для очистки газов с концентрацией 0.5...5 мг/м³.

Волокнистые фильтры часто применяют для тонкой очистки от высокодисперсной пыли. Волокнистые фильтры могут быть подразделены на *тонковолокнистые*, *глубокие* и *грубоволокнистые* фильтры. Тонковолокнистые фильтры служат для улавливания высокодисперсной пыли и других аэрозольных частиц размером 0.05...0.1 мкм с эффективностью не менее 99 %. В качестве фильтровального материала используется ФП (фильтр Петрянова).

Для тонкой и условно грубой очистки применяют фильтры со стекловолокном. Производительность фильтров находится на уровне 200...1500 м³/ч, сопротивление 200...1000 Па. Фильтры применяют в тех случаях, когда температура очищаемой среды выше 60 °С и в ней находятся вещества, разрушающие материалы ФП.

Конструкция комбинированного фильтра тонкой очистки схематично показана на рис. 13.

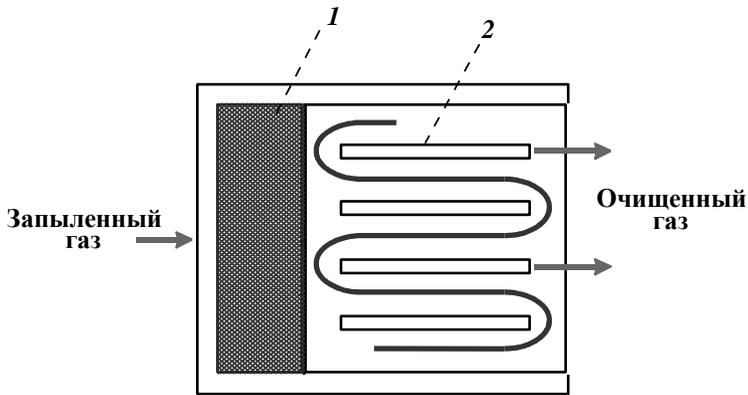


Рис. 13. Комбинированный фильтр тонкой очистки:

1 – секция с набивным слоем из волокон; 2 – секция тонкой очистки

Волокнистые фильтры тонкой очистки широко применяют для обезвреживания радиоактивных аэрозолей. Скорость фильтрации при этом очень низка и составляет 0.01...0.15 м/с, сопротивление чистых фильтров не превышает 300 Па и по мере насыщения фильтрующего материала пылью может возрасти до 1500 Па. Улавливание частиц в фильтрах тонкой очистки происходит за счет броуновской диффузии и эффекта касания.

Волокнистые фильтры используют в таких областях, как радиоэлектроника, атомная энергетика, приборостроение, промышленная микробиология и др. Фильтры позволяют очищать большие объемы газов от твердых частиц всех размеров, включая субмикронные.

ЗЕРНИСТЫЕ ФИЛЬТРЫ

В качестве фильтрующего элемента в этих фильтрах используют зернистый материал с размером гранул 0.2...2 мм. Пример устройства зернистого фильтра с движущимся слоем приведен на рис. 14.

Можно выделить несколько преимуществ зернистых фильтров по сравнению с другими типами:

- 1) доступность материалов;
- 2) работа при высоких температурах и в агрессивных средах;
- 3) способность выдерживать большие перепады давления и температуры.

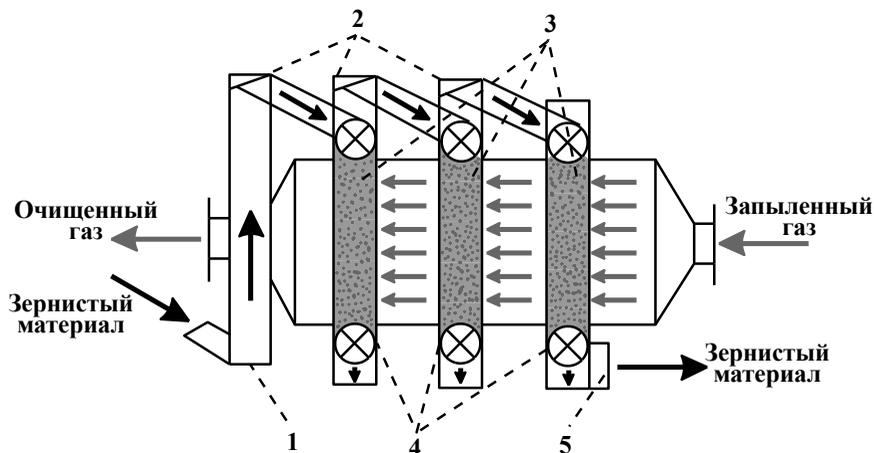


Рис. 14. Фильтр с движущимся слоем насадки:

1 – емкость для подачи свежей насадки; 2 – питание; 3 – фильтрующие слои; 4 – затворы; 5 – емкость для отработавшего материала

Различают два типа зернистых фильтров.

Насадочные – улавливающие элементы не связаны друг с другом. Функцию насадки выполняет песок, галька, шлак, опилки, кокс и пр. Выбор типа насадки определяется ее доступностью, а также термической и химической стойкостью.

Жесткие – зерна прочно связаны друг с другом в результате спекания, прессования или склеивания и образуют прочную неподвижную систему.

К жестким фильтрам относятся: пористая керамика, пористые металлы и пористые пластмассы. Фильтры устойчивы к высокой температуре, коррозии и механическим нагрузкам и применяются для фильтрования сжатых газов.

К недостаткам зернистых фильтров следует отнести их высокую стоимость и трудности регенерации. В силу этих факторов зернистые фильтры используют на практике значительно реже волокнистых фильтров.

Пример зернистого фильтра – гравийный фильтр для улавливания пыли с наличием абразивных частиц и агрессивных газов от дробилок, грохотов, сушилок, мельниц и транспортирующих устройств предприятий по производству строительных материалов, фосфорных удобрений и др. Удельная нагрузка на фильтр – $17 \dots 50 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, сопротивление фильтра – в пределах $0.5 \dots 1.5 \text{ кПа}$. Эффективность очистки – до 99.8 %.

ТУМАНОУЛОВИТЕЛИ

Для очистки воздуха от туманов кислот, щелочей, масел и других жидкостей используют туманоуловители, принцип действия которых основан на осаждении капель на поверхности волокон с последующим стеканием жидкости под действием силы тяжести. Осаждение капель жидкости на поверхности волокон и пор происходит в соответствии с рассмотренными ранее механизмами отделения частиц загрязнителя от газовой фазы на фильтрах.

На рис. 15 показан один из вариантов устройства фильтрующего элемента низкоскоростного туманоуловителя. Капельки жидкости, уловленные на фильтре, стекают вниз через трубку гидрозатвора и попадают в стакан-приемник. Волокнистые низкоскоростные туманоуловители обеспечивают очень высокую эффективность очистки газа (до 99.9 %) от аэрозольных частиц размером менее 3 мкм и полностью улавливают частицы большего размера.

Фильтрующий элемент изготавливается посредством набивки стекловолокна или полимерных волокон диаметром от 7 до 30 мкм. Толщина слоя составляет 5...15 см. Гидравлическое сопротивление сухих фильтрующих элементов изменяется в пределах 200...1000 Па, а в режиме очистки без образования твердого осадка составляет 1200...2500 Па.

Высокоскоростные туманоуловители имеют меньшие габаритные размеры и обеспечивают эффективность очистки газа от тумана с частицами менее 3 мкм $\eta = 0.90...0.98$ при $\Delta P = 1500...2000$ Па. В качестве фильтрующей набивки обычно используются войлоки из полипропиленовых волокон, которые успешно работают в среде разбавленных и концентрированных кислот, а также сильных щелочей.

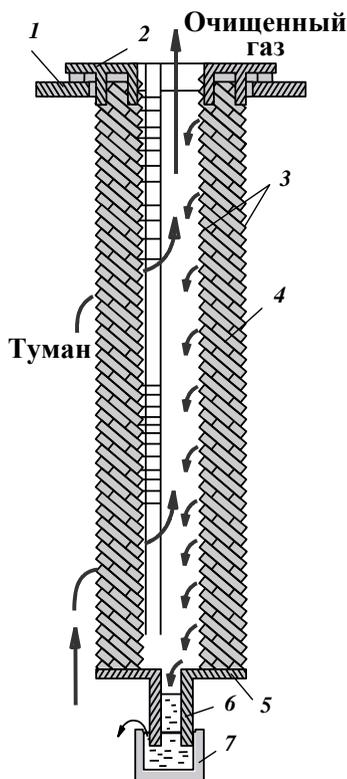


Рис. 15. Низкоскоростной туманоуловитель:

1 – корпус аппарата; 2 – верхний фланец; 3 – цилиндры; 4 – волокнистый фильтр; 5 – нижний фланец; 6 – трубка гидрозатвора; 7 – стакан-приемник

Раздел 5

МОКРАЯ ОЧИСТКА ОТ ПЫЛИ

Процесс мокрого пылеулавливания основан на контакте запыленного газа с жидкостью, которая захватывает взвешенные частицы. Рассмотрим механизм и особенности процесса осаждения частиц пыли при контакте газового потока с жидкостью.

5.1. МЕХАНИЗМЫ МОКРОЙ ПЫЛЕОЧИСТКИ

Осаждение взвешенных частиц при контакте запыленного газа с жидкостью может осуществляться различными способами:

- 1) улавливание каплями жидкости, движущимися через газ;
- 2) улавливание в пузырьках газа, поднимающихся в жидкости;
- 3) улавливание в слое жидкости.

УЛАВЛИВАНИЕ ЧАСТИЦ КАПЛЯМИ ЖИДКОСТИ

Улавливание взвешенных частиц каплями основано на кинематической коагуляции, обусловленной разностью скоростей частиц и капель. Можно выделить три основных режима захвата:

1) *спокойный режим*: аэрозоль движется с малой скоростью, капли падают под действием силы тяжести;

2) *переходный режим*: аэрозоль движется со скоростью, соответствующей переходной области между ламинарным и турбулентным режимом, капли имеют скорость, значительно превышающую скорость седиментации;

3) *динамический режим*: скорость потока аэрозоля находится в области сильного турбулентного течения; капли, поступая в поток, интенсивно диспергируются под влиянием мощных турбулентных пуль-

саций, которые также способствуют улучшенному контакту между жидкостью и аэрозольными частицами.

Во многих случаях при улавливании пыли мокрым способом работают практически все упомянутые механизмы, однако их вклад в общую эффективность очистки далеко не одинаков. При рассмотрении теоретических основ процесса капли чаще всего рассматриваются как жесткие шары. Механизм инерционного зацепления практически всегда является преобладающим.

Эффективность инерционного осаждения частиц пыли на каплях жидкости зависит от критерия Стокса. Решающее значение в данном случае имеет размерный фактор, поскольку действие сил инерции обычно имеет место в отношении частиц с $d_p > 1$ мкм.

Для шаровых взвешенных частиц размером d_p в спокойном режиме эффективность инерционного осаждения на каплях может быть выражена следующим образом:

$$\eta = f \left(\frac{d_p^2 v_r \rho_r}{18 \mu_r d_k} \right) \quad (5.1)$$

где d_k – диаметр капель, м.

В динамическом режиме жидкость интенсивно дробится на капли за счет энергии потока. На эффективность пылеочистки в данном случае влияют два основных фактора:

- скорость потока запыленного газа, м³/с;
- удельная скорость подачи жидкости (орошение), л/м³.

При относительно небольшой удельной скорости подачи жидкости (0.1...1.0 л/м³) и при значениях $0.1 \geq St \geq 1.0$ эффективность осаждения на каплях можно определить по эмпирической формуле Ленгмюра:

$$\eta = \frac{St^2}{St + 0.35^2}, \quad (5.2)$$

Под действием электростатических сил частицы могут захватываться каплями жидкости по механизму диффузионного осаждения. В то же время коэффициент диффузии даже очень малых частиц пыли на несколько порядков меньше коэффициента диффузии молекулы газа.

Эффективность диффузионного осаждения на поверхности шарообразной капли определяется соотношением

$$\eta_0 = 2\sqrt{2} \text{Re}d_{\text{ч}}^{-1/2}, \quad (5.3)$$

где Re – критерий Пекле.

Следует отметить, что вклад диффузии в суммарную эффективность очистки по сравнению с инерционным механизмом оказывается очень незначительным. Для частиц размером более 0.2 мкм диффузионный механизм обычно не учитывается.

УЛАВЛИВАНИЕ ЧАСТИЦ В ПУЗЫРЬКАХ ГАЗА

При барботировании запыленного газа через слой жидкости размер образующихся пузырьков колеблется в пределах 2...20 мм и является функцией скорости газового потока. В определенных условиях работа барботажных аппаратов переходит в пенный режим, что способствует увеличению площади контакта газа и жидкости и, как следствие, значительно улучшает эффективность очистки. Существует несколько причин, которые могут привести к разрушению пенного слоя:

- 1) падение скорости газа ниже некоторого критического значения (для разных типов аппаратов она различна);
- 2) возрастание скорости газа до значений, когда начинается разбрызгивание и унос значительного количества жидкости из аппарата;
- 3) перемещение пены преимущественно к одной стороне сечения аппарата из-за неравномерности газового потока, вызванной отклонением пенообразующей решетки от горизонтальной позиции.

В обычных условиях в пузырьках осаждение частиц происходит под действием четырех механизмов: инерции, гравитации, центробежной силы и диффузии. С ростом размера частицы (т. е. с увеличением ее массы) увеличивается вклад первых трех механизмов и уменьшается роль диффузии.

Степень улавливания за счет инерционного осаждения теоретически оценивается по формуле

$$\eta_{\text{st}} = \frac{18v_{\text{п}}\tau_{\text{п}}}{d_{\text{п}}^2} \quad (5.4)$$

где $v_{\text{п}}$ – скорость подъема пузырька газа, м/с; $\tau_{\text{п}}$ – время релаксации частицы, представляющей данную фракцию, с; $d_{\text{п}}$ – диаметр пузырька, м. Степень улавливания за счет гравитации:

$$\eta_{\text{гп}} = \frac{3g\tau_{\text{п}}}{2d_{\text{п}}v_{\text{п}}} \quad (5.5)$$

Как видно из формул (5.4) и (5.5), эффективность механизмов инерции и гравитации тем выше, чем меньше диаметр пузырька газа. Таким образом, для увеличения степени очистки необходимо обеспечить как можно меньший размер пузырьков при барботировании.

УЛАВЛИВАНИЕ ЧАСТИЦ В СЛОЕ ЖИДКОСТИ

Улавливание частиц пыли в данном случае осуществляется поверхностью жидкости. При этом жидкость может располагаться в виде тонкой пленки на твердой поверхности (пленочные аппараты) или занимать определенный объем и иметь глубину, достаточную для полного поглощения частиц (аппараты ударного действия). И в том и в другом случае при осаждении частиц преобладает инерционный эффект.

После соударения с поверхностью жидкости существуют несколько вариантов поведения частицы:

- 1) отражение от поверхности и унос с потоком газа;
- 2) прилипание к поверхности жидкости;
- 3) погружение в слой жидкости.

В пылеулавливании наиболее желателен третий вариант, поскольку первый не приводит к захвату частиц, второй ведет к загрязнению поверхности жидкости и затрудняет ее последующую обработку. Следует также иметь в виду, что частица, погруженная в жидкость, может всплыть обратно на ее поверхность под действием силы Архимеда, если ее плотность окажется ниже плотности жидкости.

В общем виде движение частицы, погружившейся в жидкость, описывается уравнением

$$0.166 Re_0 = \frac{l_q}{10^{-6} d_q}, \quad (5.6)$$

где Re_0 – критерий Рейнольдса в начальный момент движения; l_q – длина пути, проходимого частицей по инерции, м.

Путь, проходимый частицей в жидкости по инерции, в среднем очень мал и, в зависимости от скорости вхождения и размера, составляет от нескольких микрон до 1...2 мм. Считается, что толщина пленки жидкости должна составлять не менее 0.2...0.3 мм для предотвращения вторичного уноса частиц газовым потоком после удара о поверхность пленки

Газовые струи образуются при высокой скорости газов в устройствах, где устанавливаются контактные или опорные тарелки или решетки

ки. В этом случае струи газов, сформировавшиеся в отверстиях тарелок, с относительно высокой скоростью проникают в слой жидкости на тарелке. Скорость газа в щелях (отверстиях) может достигать 180 м/с. При таких скоростях потока значение критерия Стокса велико, что определяет основной вклад инерционного механизма осаждения. Уже при значении $St = 0.32$ эффективность осаждения достигает 100 %.

5.2. АППАРАТЫ МОКРОЙ ПЫЛЕОЧИСТКИ

Использование аппаратов мокрой очистки газов от пыли позволяет одновременно решать сразу несколько задач:

- пылеулавливание;
- абсорбция газовых примесей;
- охлаждение газов.

Конденсация паров жидкости, содержащихся в газах, при их охлаждении способствует росту эффективности мокрых пылеуловителей. В качестве орошающей жидкости в аппаратах мокрой очистки чаще всего используется обычная вода или вода с примесями, улучшающими абсорбцию вредных газов. В целях экономии жидкости применяют замкнутую систему орошения.

Мокрые пылеуловители имеют ряд достоинств по сравнению с аппаратами других типов, среди которых:

- небольшая стоимость очистки;
- высокая эффективность улавливания взвешенных частиц;
- возможность очистки газов от частиц размером до 0.1 мкм;
- отсутствие опасности возгорания и взрывов;
- отсутствие ограничений по температуре и влажности газов;
- одновременное улавливание газообразных примесей.

Нередко эффективность мокрой очистки от пыли достигает 100 %. Диапазон фракционной эффективности в данном случае максимален: мокрыми методами улавливаются частицы очень малого размера, перед которыми сухая очистка обычно бессильна. На эффективность методов мокрой пылеочистки практически не влияет температура входящих газов и их начальная влажность.

К недостаткам мокрой пылеочистки следует отнести:

- выделение уловленной пыли в виде шлама;
- возможность уноса капель жидкости из аппаратов;
- трудности в очистке агрессивных газов от пыли.

Уловленная пыль выделяется в виде влажного шлама, что влечет за собой необходимость его высушивания и обработки сточных вод, а это существенно удорожает процесс очистки. Жидкость в той или иной степени неизбежно выносится потоком газа из аппарата и, попадая в газоходы и дымососы, значительно снижает срок их эксплуатации. Трудности в очистке агрессивных газов от пыли связаны с необходимостью защиты аппаратуры и коммуникаций антикоррозионными материалами.

По способу действия мокрые аппараты разделяют:

- 1) на полые газопромыватели;
- 2) насадочные скрубберы;
- 3) барботажные и пенные аппараты;
- 4) мокрые аппараты ударно-инерционного типа;
- 5) мокрые аппараты центробежного действия;
- 6) скоростные газопромыватели.

Помимо перечисленных типов к мокрым пылеуловителям в определенной степени можно отнести мокрые электрофильтры, орошаемые волокнистые фильтры и аппараты, применяемые для конденсации.

ПОЛЫЕ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛИ

В аппаратах этого типа загрязненные газы пропускают через завесу распыляемой жидкости. Пылевые частицы захватываются каплями жидкости и осаждаются в промывателе, а очищенные газы удаляются из аппарата. Полые газопромыватели широко используются для очистки газов от достаточно крупных частиц пыли и для охлаждения газов, выполняя в различных системах пылеулавливания роль аппарата, обеспечивающего кондиционирование газов.

По направлению движения очищаемых газов и орошающей жидкости полые скрубберы подразделяются на прямоточные, противоточные и с поперечной подачей жидкости. В полых газопромывателях устанавливают форсунки грубого распыления, дающие капли необходимого размера (0.5...1 мм), при котором достигается максимальная эффективность инерционного осаждения частиц на каплях, падающих под воздействием силы тяжести.

Орошаемый газопромыватель представляет собой простейшую конструкцию полого газопромывателя (рис. 16). На пути следования запыленного газа ряд форсунок создает водяную завесу. Обычно скорость потока в газопромывателе ограничивают 3 м/с во избежание интенсивного уноса брызг. Расход воды составляет 0.1...0.3 г/м³.

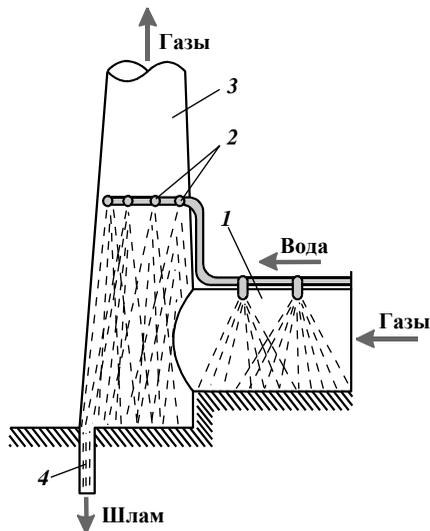


Рис. 16. Орошаемый газоход:

1 – газоход; 2 – форсунки; 3 – выход газа;
4 – труба для шлама

При более высоких скоростях газа применяют промывные камеры, выполненные из металла, бетона или кирпича (рис. 17).

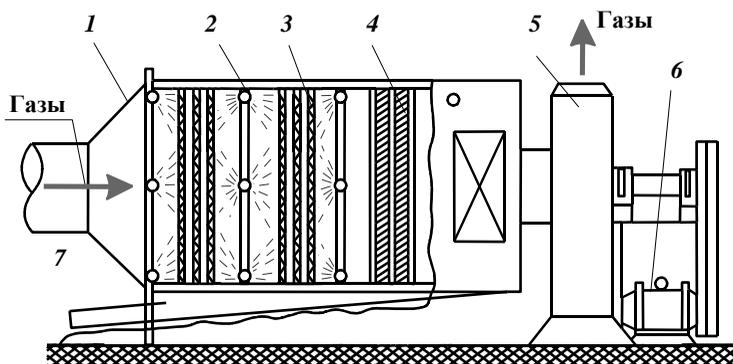


Рис. 17. Камера для промывания запыленных газов:

1 – камера; 2 – форсунки; 3 – перегородки; 4 – брызгоуловитель;
5 – вентилятор; 6 – двигатель; 7 – отвод шлама

Внутри камеры размещают несколько распылительных форсунок для создания водяных завес на пути газа. Для повышения эффективности промывки газа в камере устанавливают отбойные пластины, сетки или перфорированные листы. Такие аппараты применяют для очистки от пыли и увлажнения воздуха в вентиляционных установках и установках кондиционирования воздуха.

Полые форсуночные скрубберы представляют собой колонну круглого или прямоугольного сечения с форсунками (рис. 18). Они, как правило, работают в противопоточном режиме. Скорость потока газа обычно $0,6 \dots 1,2$ м/с. Иногда форсунки устанавливают в несколько рядов. Высокая степень очистки в полых скрубберах достигается при улавливании частиц с $d_p > 10$ мкм.

Гидравлическое сопротивление полного скруббера незначительно и при отсутствии газораспределителя в основном не превышает 200 Па. Полые форсуночные скрубберы обеспечивают высокую степень очистки только при улавливании частиц размером больше 5 мкм.

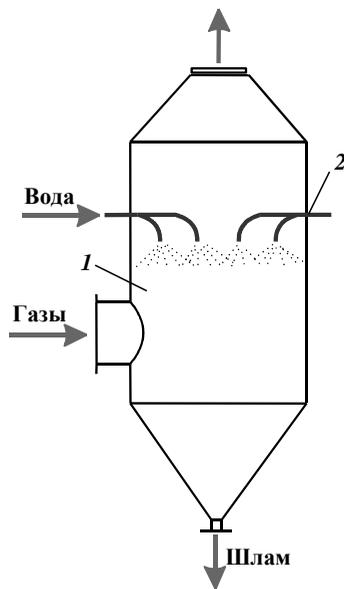


Рис. 18. Полый скруббер:
1 – корпус, 2 – форсунки

НАСАДОЧНЫЕ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛИ

Насадочные газопромыватели представляют собой колонны, заполненные телами (насадка), которые насыпают на опорную решетку. В качестве насадки используют керамические элементы всевозможной формы: кольца Рашига и Палля, седла Берля и т. д. Эти аппараты подходят для улавливания хорошо смачиваемой пыли, когда процесс пылеулавливания сопровождается охлаждением газа и абсорбцией газообразных примесей.

К основным параметрам, характеризующим свойства насадки, относятся удельная поверхность или геометрическая поверхность тел ($\text{м}^2/\text{м}^3$); доля свободного объема или порозность слоя ($\text{м}^3/\text{м}^3$) и эквивалентный диаметр элемента насадки (м).

Расход жидкости в противопоточных скрубберах (рис. 19) составляет $1.3 \dots 2.6 \text{ л/м}^3$, в скрубберах с поперечным орошением (рис. 20) – $0.1 \dots 0.5 \text{ л/м}^3$.

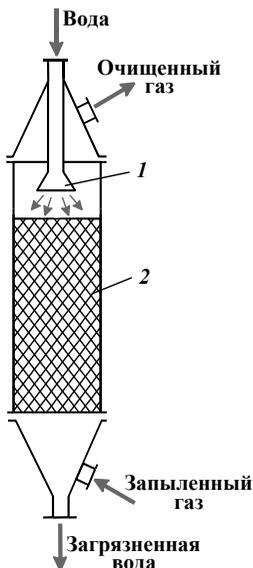


Рис. 19. Противопоточный насадочный скруббер:

- 1 – разбрызгиватель;
- 2 – насадка

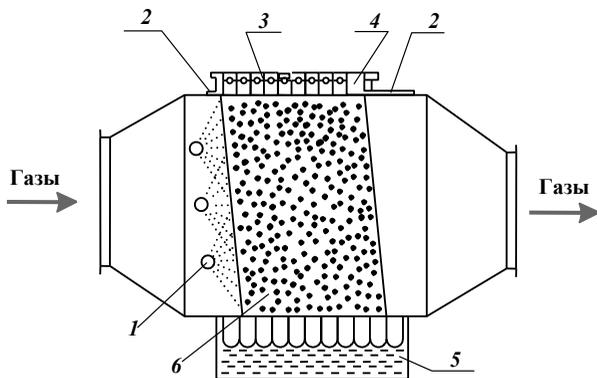


Рис. 20. Насадочные скрубберы с поперечным орошением:

- 1 – форсунки; 2 – опорные решетки; 3 – оросительное устройство; 4 – брызгоуловитель; 5 – шламосборник; 6 – насадка

Эффективность улавливания пыли в насадочных скрубберах возрастает при использовании более мелкой насадки, однако надо учитывать, что это также влечет за собой увеличение гидродинамического сопротивления и приводит к возрастанию энергетических затрат. Перепад давления в противоточных скрубберах варьируется от 1000 до 3500 Па в пересчете на 1 м слоя насадки. Эффективность улавливания пыли часто превышает 90 %.

БАРБОТАЖНО-ПЕННЫЕ (ТАРЕЛЬЧАТЫЕ) АППАРАТЫ

В основе этих аппаратов лежит взаимодействие газов с жидкостью на тарелках разной конструкции. Скорость потока газа во многом определяет характер данного взаимодействия. При малых скоростях

(до 2 м/с) газ проходит через слой жидкости в виде пузырьков, т. е. происходит барботаж.

С ростом скорости газа наблюдается образование пены, в которой происходит непрерывное слияние, разрушение и образование новых пузырьков газа. Газопромыватели данного типа часто называют пенными аппаратами (рис. 21).

Итак, в зависимости от скорости газа тарельчатый аппарат может работать в трех различных режимах:

- барботажном;
- пенном (пленочном);
- волновом.

Последний вид режима взаимодействия газа и жидкости характеризуется образованием газовых струй, колебаниями слоя жидкости на тарелке, брызгоуносом и высокими значениями ΔP .

Пенный, или пленочный, режим наиболее эффективен, так как именно в этом случае обеспечивается максимальная поверхность контакта газа с жидкостью. Для предотвращения возникновения волнового режима на тарелках устанавливают специальные стабилизаторы пены, представляющие собой сотовые решетки из пластин, разделяющих пенный слой по сечению аппарата на небольшие ячейки. Применение стабилизаторов позволяет значительно сократить расход воды на орошение аппарата. Удельный расход орошающей жидкости составляет в среднем 0.5 л/м^3 .

АППАРАТЫ УДАРНО-ИНЕРЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ

Контакт с жидкостью в аппаратах ударно-инерционного действия осуществляется за счет удара газового потока о поверхность жидкости с последующим пропусканием газожидкостной взвеси через отверстия различной формы. В результате образуются капли диаметром 300...400 мкм.

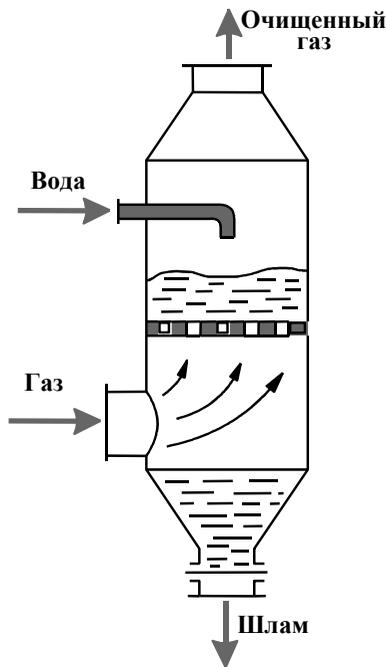


Рис. 21. Барботажно-пенный пылеуловитель с переливной решеткой

Отличительная особенность этих устройств заключается в полном отсутствии средств, побуждающих движение жидкости. Вся энергия, необходимая для создания поверхности контакта фаз, привносится вместе с газовым потоком. Схематическое изображение принципа действия такого аппарата показано на рис. 22.

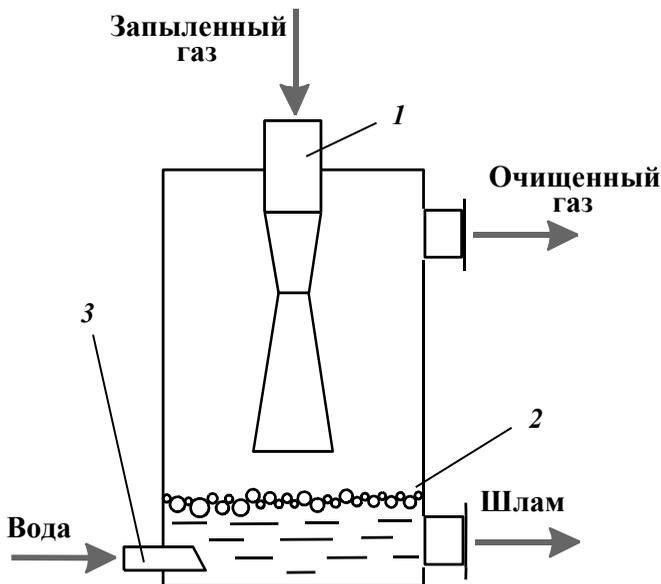


Рис. 22. Пылеуловитель ударно-инерционного действия:

1 – подача газа; 2 – резервуар с водой; 3 – подача воды

Большое значение для стабильной работы газопромывателей этого класса имеет поддержание постоянного уровня жидкости в аппарате, незначительное отклонение от которого приводит к резкому снижению степени очистки или увеличению перепада давления.

Скорость газов, проходящих через узкую щель, на выходе из трубы составляет примерно 35...55 м/с. Ударяясь с большой скоростью о поверхность жидкости, газовый поток создает завесу капель. Частицы пыли по инерции осаждаются на каплях. Гидравлическое сопротивление аппарата зависит от исходного уровня жидкости в нем и скорости газа. Обычно ΔP колеблется в пределах 500...4000 Па. Удельный расход жидкости – 0.13 л/м³.

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ СКРУББЕРЫ

Принцип использования центробежной силы для улавливания частиц пыли, широко используемый в циклонах, нашел применение в целом ряде аппаратов мокрой очистки. Улавливание частиц пыли в центробежном скруббере происходит за счет аддитивного действия двух механизмов:

- *центробежного* – перемещение частиц к стенкам аппарата;
- *инерционного* – осаждение частиц на каплях жидкости.

Устройство центробежного скруббера с тангенциальным подводом газа показано на рис. 23. В некоторых аппаратах вращение газового потока осуществляется при помощи специальных закручивающих устройств. Во входном патрубке скруббера устанавливают вставку, которая уменьшает его сечение, увеличивая тем самым скорость газа до 30...40 м/с. Попадая в центробежный скруббер, частицы отбрасываются центробежной силой к стенке аппарата, где приводятся в контакт с орошающей жидкостью.

Центробежные скрубберы используют для очистки газов от любых видов нецементирующейся пыли с входной концентрацией не выше 2 г/м^3 . В случае, когда $C_{\text{вх}} > 2 \text{ г/м}^3$, рекомендуется предварительная очистка газов в аппарате другого типа.

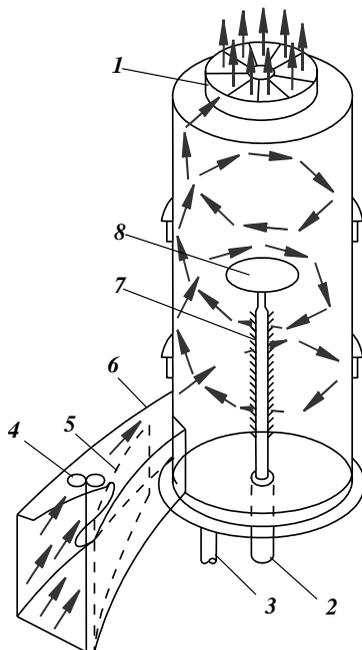


Рис. 23. Центробежный скруббер с тангенциальным подводом газов: 1 – лопатки-стабилизаторы; 2 – диск; 3 – система орошения; 4 – ввод газов; 5 – заслонка; 6 – шток; 7 – отвод шлама; 8 – подвод орошающей жидкости

СКОРОСТНЫЕ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛИ

Скоростные газопромыватели относятся к наиболее эффективным аппаратам мокрой пылеочистки. Принципиальным элементом конструкции этих аппаратов является труба Вентури, за что их и принято называть скрубберами Вентури.

Принцип действия скруббера Вентури основан на интенсивном дроблении орошающей жидкости газовым потоком, который движется с высокой скоростью (до 150 м/с). Частицы пыли осаждаются на каплях, образующихся в результате диспергирования жидкости. Решающее значение при улавливании пыли размером до 1 мкм имеют инерционные силы.

Конструкция скруббера Вентури включает (рис. 24):

- 1) трубу Вентури;
- 2) каплеуловитель.

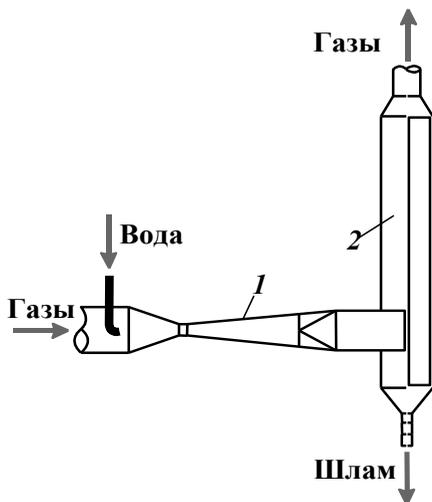


Рис. 24. Скруббер Вентури с выносным каплеуловителем:

1 – труба Вентури; 2 – циклон-каплеуловитель

Скрубберы Вентури отличаются очень большим гидравлическим сопротивлением. Для высоконапорных аппаратов потеря давления может достигать 20 000 Па.

В зависимости от способа подвода орошающей жидкости можно выделить несколько типов аппаратов:

- с центральным подводом жидкости;
- с пленочным орошением;
- с периферийным орошением;
- с подводом жидкости за счет энергии газа.

В качестве каплеуловителя в скруббере Вентури могут применяться сепараторы различных конструкций, наибольшее распространение среди которых получили циклоны (рис. 24), разделительные емкости и сепараторы с закручивающимися элементами.

При больших расходах запыленных газов используются групповая компоновка нескольких труб Вентури с небольшим круглым сечением, или так называемые батарейные скрубберы Вентури. Такие аппараты характеризуются большим удельным расходом орошающей жидкости и высокой производительностью.

Раздел 6

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЫЛЕОЧИСТКИ

Электрическое осаждение – один из наиболее совершенных видов очистки газов от взвешенных частиц пыли и тумана. Этот процесс основан на ударной ионизации газа в зоне коронирующего разряда, передаче заряда ионам частицам примесей и их диффузии к осадительным электродам. С помощью электрофильтров очищают большие объемы газов с частицами размером от 0.01 до 100 мкм при температуре газов 400 °С и выше.

Электрофильтры могут работать при разрежении и под давлением очищаемых газов. Электрофильтры отличаются относительно низкими эксплуатационными затратами, однако капитальные затраты на сооружение этих аппаратов довольно высоки, поскольку они металлоемки и занимают большую площадь, а также снабжаются специальными агрегатами для электропитания. При этом с уменьшением производительности установок по газу удельные капитальные затраты сильно возрастают.

6.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

При обычных условиях бóльшая часть молекул газа нейтральна и не несет электрического заряда. Электрическая зарядка частиц может осуществляться тремя способами: при образовании устойчивого аэрозоля, за счет диффузии свободных ионов и при коронном разряде. Первые два способа дают приблизительно одинаковое количество положительно и отрицательно заряженных частиц. Коронный разряд, напротив, приводит к появлению у всех частиц одноименного заряда.

Коронный разряд представляет собой особый вид разряда в газах, имеющий фиолетово-голубое свечение и издающий характерное потрескивание. Для генерации коронного разряда используют два электрода с резко различной кривизной поверхности. Рассмотрим механизм образования коронного разряда на примере провода цилиндрического сечения и плоскости (рис. 25).

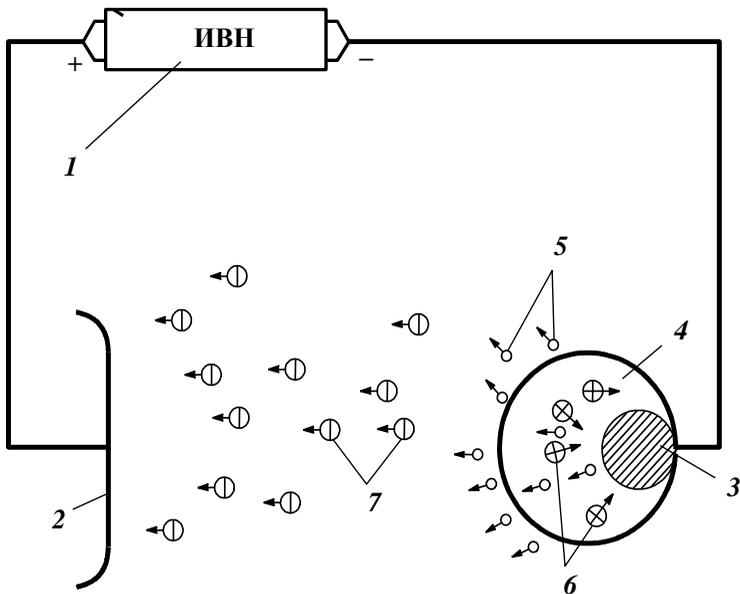


Рис. 25. Механизм образования заряда при коронном разряде:

1 – источник высокого напряжения; 2 – плоский электрод; 3 – провод;
4 – чехол короны; 5 – электроны; 6 – положительные ионы; 7 – отрицательные ионы

От высоковольтного источника напряжения I на электроды подается постоянное, очень высокое напряжение (до 30 000 В). При этом положительную полярность источника подключают к плоскому электроду 2 (осадительной пластине), а отрицательную – к проводу 3. В пространстве между электродами образуется электрическое поле. Значительно отличающаяся кривизна электродов вызывает неравномерность напряженности электрического поля (E). При определенном значении напряжения поля $U_{кр}$ в промежутке между проводом и плоскостью образуется коронный разряд. В условиях устойчивой короны,

когда $U > U_{кр}$, ионы настолько ускоряются, что, сталкиваясь с молекулами газа, ионизируют их. Величину $U_{кр}$ называют напряжением зажигания коронного разряда.

В области, прилегающей к проводу, значение напряженности поля становится настолько большим, что в этой зоне резко возрастает количество носителей заряда обоих знаков: электронов δ и положительных ионов β . Эту зону принято называть чехлом короны.

Отрицательно заряженные электроны начинают движение в сторону положительно заряженной плоскости осадительного электрода. При движении электронов внутри чехла короны их кинетическая энергия настолько высока, что при столкновении с нейтральными молекулами газа они выбивают из них новые электроны. Таким образом, из одной нейтральной молекулы образуется новая пара зарядов. В этом заключается суть явления, которое называют электрическим пробоем в газе.

За пределами чехла короны электроны, потерявшие энергию, присоединяются к молекулам газа, превращая их в отрицательные ионы γ . Именно отрицательно заряженные ионы, движущиеся к осадительным пластинам, ответственны за осаждение более 95 % всех пылевых частиц.

Процесс зарядки частиц схематично показан на рис. 26.

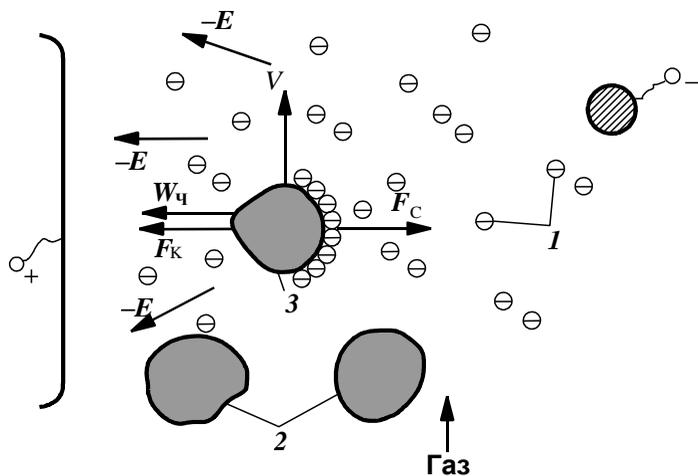


Рис. 26. Зарядка частиц в поле коронного разряда:

- 1 – отрицательные ионы; 2 – взвешенные частицы;
- 3 – заряженная частица

Под действием электрических сил отрицательные ионы 1, образующиеся вблизи чехла короны, диффундируют к плоскому электроду. При этом они могут сталкиваться с частицами 2 и осаждаться на них, сообщая им отрицательный заряд. Заряженные частицы пыли 3 приобретают ускорение по направлению к плоскому электроду, где и происходит их осаждение. Движение заряженных частиц к осадительному электроду происходит под действием аэродинамических сил, силы взаимодействия электрического поля и заряда частицы, силы тяжести и силы давления электрического ветра. Лишь небольшая часть пылинок заряжается положительно в области чехла короны и осаждается на коронирующем электроде.

Устройство осадительной ячейки одноступенчатого пластинчатого электрофильтра показано на рис. 27. Запыленный газ подается в пространство, где расположены коронирующие электроды 1 между осадительными пластинами 2. Частицы пыли сильно заряжаются на первых 100...200 мм пути и смещаются к заземленным осадительным электродам под воздействием интенсивного поля короны 3. Процесс в целом протекает очень быстро, на полное осаждение частиц требуется всего несколько секунд.

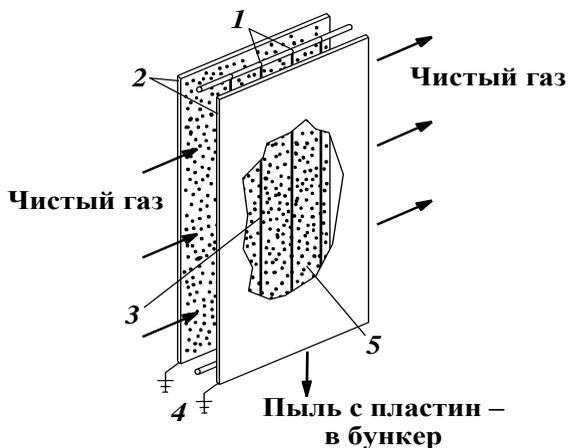


Рис. 27. Схема одноступенчатого электрофильтра:

- 1 – высоковольтные проволоки для коронного разряда;
- 2 – осадительные пластины; 3 – коронный разряд вдоль проволоки; 4 – заземление; 5 – пыль на пластинах

Слой осажденных частиц удаляется встряхиванием и падает в бункер, откуда пыль направляют на хранение и переработку. В случае улавливания жидких частиц, например дегтя или серной кислоты, частицы сливаются в капли и стекают в сборные резервуары под действием силы тяжести.

6.2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ

Величину заряда q (Кл), который приобретает проводимая частица сферической формы под воздействием электрического поля, определяют по следующей формуле:

$$q = 3\pi d_q^2 \varepsilon_0 E, \quad (6.1)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость, равная $8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

E – напряженность электрического поля коронного разряда, В/м.

Если частица является непроводящей, тогда при расчете величины заряда необходимо учитывать ее диэлектрическую проницаемость:

$$q = 3 \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \pi \varepsilon_0 d_q^2 E, \quad (6.2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость частицы, Ф/м.

При диффузионном механизме зарядки величину заряда можно определить по приближенному уравнению

$$q_D \approx k d_q e, \quad (6.3)$$

где e – величина заряда электрона, равная $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл; k – коэффициент, учитывающий температуру и время, в течение которого происходит зарядка.

Время, требуемое для достижения максимального заряда частицы q_s , определяется из соотношения:

$$q = q_s \frac{t}{t + t_0}, \quad \text{где } t_0 = \frac{4\varepsilon_0}{N_0 e K}. \quad (6.4)$$

Максимальный заряд частицы q_s рассчитывают по формуле:

$$q_s = 12\pi\varepsilon_0 E_0 r_p^2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right). \quad (6.5)$$

Из соотношений (6.2) и (6.3) видно, что максимальная величина заряда частиц размером более 0.5 мкм пропорциональна квадрату диаметра частиц, а частиц размером меньше 0.2 мкм – диаметру частицы. Оценка, проводимая по формуле (6.5), показывает, что сферическая частица диаметром 1 мкм способна адсорбировать более 300 элементарных зарядов.

Зарядка частиц пыли в электрофильтрах происходит чрезвычайно быстро. Для достижения 99 % от предельного заряда q_s , обычно требуется меньше секунды (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Отношение заряда частицы q к предельному значению q_s в зависимости от времени зарядки

Время зарядки, с	0.001	0.01	0.1	1
q/q_s	0.138	0.61	0.94	0.995

Приравняв кулоновскую силу $F_E = qE$, действующую на заряженную частицу в электрическом поле, силе сопротивления среды F_c (закон Стокса), можно выразить скорость осаждения заряженных частиц v_{oc} :

$$v_{oc} = \frac{qEC_k}{3\pi\mu d_p} \quad (6.6)$$

Величину заряда q определяют по формулам (6.1)–(6.3) в зависимости от размера и свойств частицы.

Эффективность очистки в электрофильтре η определяют по формуле, полученной теоретически:

$$\eta = 1 - \exp(-v_{oc}A), \quad (6.7)$$

где A – удельная поверхность осаждения, $m^2/m^3 \cdot c$; v_{oc} – скорость движения заряженных частиц к осадительному электроду, м/с.

Удельная поверхность осаждения A является одним из основных параметров, необходимых для проектирования и расчета электрофильтров. Физически она определяется как отношение поверхности осадительных электродов (F , m^2) к скорости потока очищаемого газа (U , m^3/c).

Степень очистки, определяемая теоретически, почти всегда отличается от действительной эффективности η , так как исходит из идеали-

зированных условий и не учитывает всех факторов, влияющих на процесс осаждения частиц. На практике чаще всего используют эмпирические данные. Эффективность электрического способа очистки очень высока и в среднем составляет 99.8 %.

Главным осложнением, возникающим в процессе работы электрофильтра, является сопротивление слоя пыли. Осадок пыли, накапливающийся на осадительной пластине, должен обладать хотя бы малой электрической проводимостью, чтобы обеспечить ионный ток между электродами. Максимальное сопротивление слоя при этом должно быть не выше $10^9 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$.

Если слой пыли плохо проводит ток и $R > 2 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$, то это приводит к возникновению отрицательных явлений, таких как избыточное искрение, обратная корона или обратный разряд со слоя осажденной пыли, что вынуждает значительно уменьшать напряжение и ток короны. Довольно часто пыль содержит примеси силикатов и оксидов металлов, которые в сухом состоянии обладают плохой проводимостью и тем самым создают проблемы в процессе очистки.

На практике применяют несколько способов борьбы с высоким сопротивлением слоя пыли:

- 1) увеличение влажности газового потока;
- 2) добавление SO_3 или NH_3 в очищаемый газ;
- 3) добавление Na_2CO_3 в сжигаемый уголь;
- 4) увеличение температуры газа.

Добавление реагентов (особенно широко используют серный ангидрид) и увлажнение газов приводит к заметному улучшению проводимости пылевого слоя. Небольшая добавка соединений натрия к углю на тепловых электростанциях позволяет обеспечить хорошую работу электрофильтров в холодной и горячей зонах. Сопротивление пыли также снижается при увеличении температуры пылегазового потока.

6.3. АППАРАТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ

Электрофильтр представляет собой аппарат, в котором размещены коронирующие и осадительные электроды. Осадительные электроды заземлены, а к коронирующим подводят прямой постоянный электрический ток высокого напряжения.

Конструкцию аппарата электрической очистки также можно видеть на рис. 28. Между двумя осадительными плоскостями натянут ряд проводов (коронирующих электродов). Запыленный газ поступает в

пространство между плоскостями. В поле коронного разряда частицы пыли заряжаются и затем осаждаются.

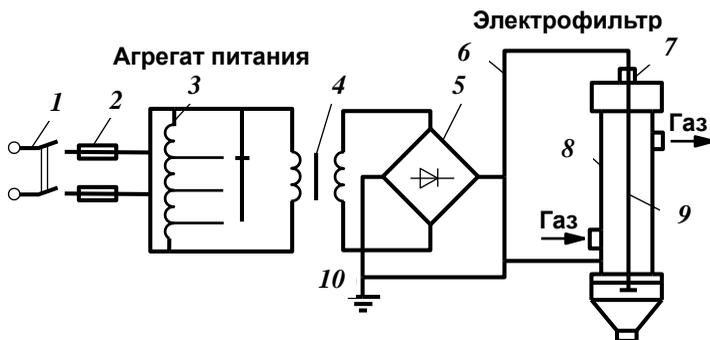


Рис. 28. Схема электрофильтра:

1 – выключатель; 2 – предохранитель; 3 – латер; 4 – трансформатор; 5 – выпрямитель; 6 – кабель; 7 – изолятор; 8 – осадительный электрод; 9 – коронирующий электрод; 10 – заземление

Процесс очистки газов в электрофильтре можно разделить на три основные стадии:

- 1) зарядка частиц пыли;
- 2) диффузия заряженных частиц к электродам;
- 3) удаление осажденных частиц с поверхности электродов.

По конструкции осадительного электрода электрофильтры можно разделить на пластинчатые и трубчатые. В пластинчатых электрофильтрах осадительные электроды представляют собой параллельные плоскости из пластин определенного сечения. В трубчатых электрофильтрах осадительные электроды выполнены в виде цилиндров или труб овального или шестигранного сечения. Из-за лучших характеристик электрического поля трубчатые электроды предпочтительнее пластинчатых. Однако обеспечить хорошее встряхивание трубчатых электродов достаточно сложно, и поэтому их редко применяют в сухих электрофильтрах и довольно широко в мокрых.

Коронирующий электрод в самом простом случае представляет собой прочную металлическую проволоку точной формы. В зависимости от условий работы электрофильтра и свойств улавливаемой пыли могут применяться различные типы так называемых игольчатых электродов. Наличие шипов на поверхности коронирующего электрода дает

возможность управлять коронным разрядом и достигать заданной неравномерности электрического поля при пониженных значениях тока.

По объему очищаемого газа электрофильтры подразделяются на аппараты высокой производительности (более 10 000 м³ очищаемого газа в час) и малогабаритные фильтры (1000...2000 м³).

По расположению электродов электрофильтры подразделяются на *двухзонные*, где зоны зарядки и осаждения частиц конструктивно выполнены в виде отдельных частей, и *однозонные*, где указанные зоны конструктивно совмещены. Конструкция современного электрофильтра включает в себя:

- 1) коронирующие и осадительные электроды;
- 2) устройство для удаления пыли с электродов;
- 3) корпус для механического оборудования;
- 4) узлы подвода и отведения газов;
- 5) высоковольтный агрегат питания;
- 6) устройство для вывода пыли из аппарата.

Накопленная в электрофильтрах пыль удаляется посредством встряхивания. Исключение составляют мокрые электрофильтры, в которых частицы пыли смываются с электродов водой. При встряхивании пыль попадает в бункер и направляется в систему пылевыведения. Существует несколько систем, выполняющих встряхивание электродов:

- 1) ударно-молотковая система;
- 2) пружинно-кулачковый механизм;
- 3) вибрация;
- 4) магнитно-импульсное встряхивание.

Первый тип встряхивающих устройств зарекомендовал себя как самый эффективный в практике улавливания пыли электрическим методом.

Существует большое количество марок электрофильтров, однако все они характеризуются основными техническими параметрами, которые перечислены ниже:

- удельная осадительная поверхность электрофильтра;
- производительность по газу;
- рабочее гидравлическое сопротивление;
- масса аппарата;
- допустимая запыленность газа;
- допустимая температура газа.

Выбор электрофильтра определяется требуемой степенью улавливания пыли, свойствами частиц пыли, параметрами и объемом очищаемых газов, а также условиями установки электрофильтра на производстве.

Основные характеристики электрофильтров в сравнении с другими методами очистки газов от взвешенных частиц суммированы в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Преимущества и недостатки электрофильтров

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> • Низкие энергозатраты (0.1...0.5 кВт·ч/1000 м³) • Высокая эффективность ~ 99.5 и выше • Низкое ΔP (~100...150 Па) • Возможность работы в агрессивных средах • Полная автоматизация • Широкий диапазон применения • Возможность очистки от твердых и жидких частиц 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая чувствительность процесса очистки к отклонениям от заданных параметров процесса и дефектам в аппаратах • Высокие требования к уровню обслуживания • Невозможность очистки от взрывоопасной пыли

Аппараты электрической очистки газов от пыли широко применяются в различных отраслях промышленности, среди которых:

- 1) металлургия;
- 2) горно-обогатительная промышленность;
- 3) энергетика;
- 4) производство цемента, гипса;
- 5) утилизация отходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время известно несколько сотен различных конструкций аппаратов, применяемых для очистки газов от пыли и других дисперсных частиц. Несмотря на многообразие, все они являются вариантами аппаратурного оформления, в которых использованы основные принципы осаждения или задержания взвешенной фазы: гравитационное осаждение, инерционное осаждение, осаждение под действием центробежной силы, фильтрование, мокрая очистка и осаждение в электрическом поле.

Методы, применяемые на практике в каждом конкретном случае, как и требуемая эффективность очистки, определяются в первую очередь санитарными требованиями и нормами. Выбор метода очистки зависит от физико-химических характеристик взвешенных частиц, конструктивного решения устройств, применяемых для очистки, а также от доступности метода и стоимости процесса. Другие факторы, знание которых полезно, но имеет меньшее значение, – это уровень запыленности, состав очищаемого газа, перепад давления и допустимое давление, габариты аппарата и параметры технологического цикла. В связи с этим применяемые методы очистки газов от взвешенных частиц весьма разнообразны и отличаются как по конструкции аппаратов, так и по технологии обезвреживания.

Промышленные газообразные отходы, содержащие токсичные элементы в виде пыли или тумана, очищают в механических пылеуловителях (сухих и мокрых), фильтрах или электрофильтрах. Для тонких аэрозолей (древесная, табачная, мучная и угольная пыль) кроме механических пылеуловителей применяют адсорбционную очистку или сжигание.

Мокрые способы очистки от твердых и жидких аэрозолей являются наиболее эффективными. Однако несмотря на высокую степень очистки, мокрые методы имеют существенный недостаток, заключающийся

в необходимости отделения уловленного загрязнителя от улавливающей жидкости. По этой причине мокрые способы следует применять только при отсутствии других методов очистки, отдавая предпочтение технологическим вариантам с минимальным расходом жидкости.

Проблемы, возникающие при разработке и проектировании очистных систем, тесно связаны и с общими законами (цикличность, безотходность и др.), и с конкретными закономерностями природных технологий. Например, взвешенные частицы могут оседать под влиянием гравитационных, инерционных, когезионных, электростатических и других сил. Вклад каждой из них в суммарную скорость осаждения частиц зависит от большого числа факторов, связанных с параметрами среды, свойствами частиц и конструктивными особенностями аппаратов.

В последнее время интенсивно развивается направление, связанное с математическим моделированием процессов газоочистки и теоретическим предсказанием эффективности работы выбранных систем очистки. Однако на сегодняшний день возможности математического аппарата недостаточны для всестороннего количественного учета характеристик реальных процессов. Многие из факторов взаимосвязаны, а результирующие зависимости имеют настолько сложный характер, что не всегда удается найти логическое объяснение полученным результатам. Поэтому даже в расчетах простейших очистных устройств – пылеосадительных камер и жалюзийных решеток – зачастую приходится полагаться на экспериментальные данные и производственный опыт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
2. *Родионов А.И.* Техника защиты окружающей среды: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.И. Родионов, В.Н. Клушин, Н.С. Торочешников. – М.: Химия, 1989. – 512 с.
3. *Мухленов И.П.* Основы химической технологии: учеб. для вузов. В 2 т. Т. 1: Теоретические основы химической технологии / И.П. Мухленов. – М.: Высш. шк., 1984. – 256 с.
4. *Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию* / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др.; под ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1995. – 496 с.
5. *Охрана окружающей среды: учеб. для техн. спец. вузов* / С.В. Белов, Ф.А. Барбинов, А.Ф. Козьяков и др.; под ред. С.В. Белова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. 319 с.
6. *Ветошкин А.Г.* Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. пособие. – Пенза: Изд-во ПГАСА, 2002. – 290 с.
7. *Защита атмосферы от промышленных загрязнений: справ. изд.* В 2 ч. Ч. 1 / пер. с англ.; под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда. – М.: Metallургия, 1988. – 760 с.
8. *Защита атмосферы от промышленных загрязнений: справ. изд.* В 2 ч. Ч. 2 / пер. с англ.; под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда. – М.: Metallургия, 1988. – 712 с.
9. *Техника и технология защиты окружающей среды: учеб. пособие для вузов* / В.В. Юшин, В.М. Попов, П.П. Кукин и др. – М.: Высш. шк., 2005. – 391 с.
10. *Калыгин В.Г.* Промышленная экология: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 432 с.
11. *Процессы и аппараты защиты окружающей среды: курс лекций по дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды».* Часть 1 / сост. И.Г. Кобзарь, В.В. Козлова. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 68 с.

Мишаков Илья Владимирович

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ

Учебное пособие

Редактор И.Л. Кескевич
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *Л.Н. Кишин*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Подписано в печать 26.02.2010. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Уч.-изд. л. 4,41. Печ. л. 4,75. Изд. № 369. Заказ № Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20