

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

А.И. ПАНАСЕНКО

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ОТ АЭРОЗОЛЕЙ

Учебное пособие

Рекомендовано
Министерством образования и науки Украины
как учебное пособие
для студентов высших учебных заведений
направления подготовки 6.040106 «Экология, охрана
окружающей среды
и сбалансированное природопользование»

Донецк 2008

УДК 54.058 : 66.911.38 (076.5)

ББК 24.6

П-16

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів (лист № 1.4/18-Г-1432 від 27.08.2007).

Рецензенти:

Доктор технічних наук, професор М.С. Мальований
(Національний університет «Львівська політехніка»)

Доктор хімічних наук, професор А.І. Сердюк
(Донбаська національна академія будівництва і архітектури)

Доктор технічних наук, професор В.М. Шмандій
(Кременчуцький державний політехнічний університет)

А.І. Панасенко

П-16 Технологія очищення від аерозолів: Навчальний посібник. –
Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – 119 с.: іл.

ISBN 978-966-377-066-6

Розглянуті питання, пов'язані з циклом існування аерозолів: умови утворення аерозолів; процеси, що протікають у аерозолях; методи досліджень і вимірювань у аерозолях з встановленням основних характеристик аерозолів; методи очищення газів від аерозолів з розглядом реальних промислових систем уловлювання аерозолів; основи проектування систем очищення.

Рекомендовано до друку Вченою Радою
Донецького національного технічного університету
(Протокол № 1 від 16 лютого 2007 року)

ISBN 978-966-377-066-6

© А.І. Панасенко, 2008

© ДВНЗ «ДонНТУ», 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ	7
1.1 Классификация аэрозолей	7
1.2 Аэрозоли в окружающей среде	9
2 ОБРАЗОВАНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ.....	19
2.1 Образование аэрозолей при конденсации.....	19
2.2 Получение аэрозолей путем диспергирования.....	22
3 ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В АЭРОЗОЛЯХ.....	27
3.1 Седиментация. Скорость падения частиц.....	27
3.2 Броуновское движение и диффузия	28
3.3 Седиментационно-диффузионное равновесие	29
3.4 Коагуляция аэрозолей	31
3.5 Термофорез, фотофорез	37
3.6 Электризация аэрозолей.....	37
3.7 Оптические свойства аэрозолей	38
3.8 Осаждение аэрозольных частиц.....	40
3.9 Фильтрация аэрозолей.....	42
4 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ В АЭРОЗОЛЯХ.....	45
4.1 Седиментационные методы.....	45
4.2 Методы, основанные на фильтрации.....	46
4.3 Методы, основанные на инерционном осаждении	47
4.4 Методы, основанные на термофорезе	47
4.5 Ультрамикроскопия и тиндалоскопия.....	48
5 ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЕЙ	50
5.1 Форма и строение частиц	50
5.2 Дисперсность аэрозольных частиц	50
5.3 Плотность частиц.....	52
5.4 Адгезионные свойства частиц.....	52
5.5 Абразивность частиц	52
5.6 Удельное электрическое сопротивление слоя частиц	53
5.7 Смачиваемость и гигроскопичность пыли	53

5.8	Удельная поверхность пыли	54
5.9	Пожаро- и взрывоопасность частиц пыли.....	54
5.10	Минералогический состав аэрозольных проб.....	55
6	МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ АЭРОЗОЛЕЙ.....	58
6.1	Гравитационное осаждение	59
6.2	Инерционное улавливание	61
6.3	Центробежное улавливание	64
6.4	Очистка газов в фильтрах.....	69
6.5	Очистка газов в мокрых пылеуловителях.....	75
6.6	Капле- и туманоуловители	82
6.7	Звуковая и ультразвуковая коагуляция	84
6.8	Электростатическое осаждение.....	85
7	ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УЛАВЛИВАНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ	92
7.1	Технико-экономические основы выбора установок очистки.....	95
7.2	Выбор аппаратов улавливания аэрозольных частиц.....	96
8	ПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ УЛАВЛИВАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ	101
8.1	Очистка газов в производстве фосфорной муки.....	101
8.2	Очистка газов в производстве суперфосфата	102
8.3	Улавливание пыли моющих порошков	102
8.4	Очистка газов в лакокрасочной промышленности.....	105
8.5	Очистка конвертерных газов в черной металлургии.....	107
8.6	Улавливание печного полуактивного технического углерода.....	107
8.7	Очистка воздуха в производстве кормовых дрожжей	108
8.8	Транспортирование пыли.....	110
8.9	Рекуперация пылей.....	111
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	114
	АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	116
	ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	117

ВВЕДЕНИЕ

За последнее время человечество все более и более в своей жизнедеятельности имеет дело с аэродисперсными системами (аэрозолями), при этом к естественным источникам образования аэрозолей добавляются все новые и новые источники антропогенного поступления (теплоэлектроэнергетика, транспорт, металлургия, промышленность стройматериалов и прочие).

Аэрозоли (от аэро... и золи) — системы, состоящие из твёрдых или жидких частиц, взвешенных в газообразной среде. По характеру образования различают *диспергационные* и *конденсационные* аэрозоли. *Диспергационные* аэрозоли возникают: при разбрызгивании жидкостей — таковы водяные туманы, образующиеся в водопадах, при морском прибое, в фонтанах и пр., аэрозоли из слизи, образующиеся при кашле и чихании, аэрозоли из инсектицидов, получаемые с помощью аэрозольных баллончиков; при измельчении твёрдых тел и взмучивании порошков — например, пыль, поднимаемая с земли ветром, автомобильными колёсами, при подметании или образующаяся при пересыпании тонких порошков (муки, мела и пр.), в камнедробилках, при разрушении каменных стен, отбивании угля, шлифовании и т. д. *Конденсационные* аэрозоли появляются при конденсации паров — таковы природные облака, состоящие из водяных капелек или ледяных кристалликов, возникающих при конденсации водяного пара атмосферы, и близкие к облакам наземные туманы. При выплавке металлов пары их сгорают, а продукты горения конденсируются с образованием дыма, состоящего из твёрдых частиц металлических оксидов. Примерно так же образуется дым и при горении топлива (в печах, автомобильных моторах), табака, пороха и различных органических веществ, но в этом случае, помимо твёрдых частиц сажи, в дыме содержатся ещё капельки смолистых веществ.

Аэрозоли играют большую положительную роль в жизни человека. Облака — важнейшее звено в круговороте воды в природе; поглощая солнечные лучи и тепловое излучение Земли, они умеряют и жару, и холод. Опыление многих растений, в том числе злаков, осуществляется аэрозолями из цветочной пыльцы. Всё жидкое и почти всё твёрдое топливо сжигается ныне в виде аэрозоля. Борьба с вредителями и болезнями культурных растений и лесов ведётся с помощью аэрозолей из ядохимикатов. Многие важные технические материалы, например сажу, получают в виде аэрозоля. Большое значение приобретает и аэрозоль-

ная иммунизация людей и домашних животных. Аэрозоли успешно применяют для борьбы с градобитием.

Вместе с тем многие аэрозоли приносят большой вред. Огромную опасность представляют *радиоактивные аэрозоли*, образующиеся при атомных взрывах, при добыче и переработке расщепляющихся материалов. Пыль, содержащая кремнезём, вызывает тяжёлое заболевание лёгких; не менее опасны бериллиевая, свинцовая и хромовая пыли. Поэтому борьба с производственной пылью — одна из важнейших задач промышленной гигиены. Бактериальные аэрозоли, содержащие болезнетворные микроорганизмы и образующиеся при кашле и чихании больных, могут служить источником инфекционных болезней, в том числе гриппа. Природные туманы препятствуют посадке самолётов. Пыльные бури — настоящее бедствие для жарких, сухих безлесных местностей. Борьба с аэрозольным загрязнением атмосферы в промышленных центрах — одна из важных проблем. Аэрозоли играют все возрастающую роль в формировании окружающей природной среды, в особенности в отрицательном плане («смог» в городах, радиоактивные аэрозоли, пыль и прочее).

Цель курса «Технология очистки от аэрозолей» — ознакомить студентов с теоретическими основами процессов возникновения аэрозолей и процессов, имеющих место в аэродисперсных системах, а также с методами и устройствами, применяемыми для очистки газов от аэрозолей.

В итоге изучения дисциплины «Технология очистки от аэрозолей» студенты должны знать:

- основы технологии процессов очистки от аэрозолей в объеме, необходимом для решения производственных, проектных, конструкторских и научно-исследовательских задач;
- общие основы расчета и конструкции аппаратуры для очистки газов от аэрозолей.

После изучения дисциплины «Технология очистки от аэрозолей» студенты должны уметь:

- разрабатывать и применять технологию улавливания аэрозольных частиц, обеспечивая оптимальные условия ее осуществления на промышленных предприятиях;
- проектировать технологические системы и рекуперационные установки, осуществляя необходимые расчеты;
- анализировать условия и режимы работы технологического оборудования установок очистки от аэрозолей.

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1.1 Классификация аэрозолей

Аэродисперсные системы, или аэрозоли, образуются микроскопическими или субмикроскопическими частицами материи, твердыми или жидкими, взвешенными в газообразной или парообразной среде, и играют важную роль в природе и жизни людей.

Аэрозоль – это дисперсная система с газообразной или парообразной дисперсионной средой и с твердой или жидкой дисперсной фазой.

Аэрозоль – это газообразная или парообразная дисперсионная среда с распределенными в ней капельками или частицами твердых веществ дисперсной фазы весьма малых размеров.

Гносеологически термин «аэрозоль» происходит как словосочетание от *aer* (воздух, греч.) и *solutio* (раствор, лат.).

Условлено, что под аэрозолями подразумеваются системы, содержащие взвешенные материальные частицы, диаметр которых лежит в пределах от 10^{-7} до 10^{-3} см, иногда до 10^{-2} см (капельки облаков 5–50 мкм; табачный дым десятые доли микрометра, $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$).

По классификации аэродисперсных систем основным и наиболее естественным является рассмотрение их с точки зрения дисперсности. *Грубодисперсный* аэрозоль включает в себя частицы, видимые с помощью оптического микроскопа, т.е. частицы размером более 0,5–1,0 мкм и меньше 10 мкм; аэрозоль *коллоидной* дисперсности содержит частицы вещества коллоидных размеров, т.е. в пределах от 5 до 500 нм, поддающиеся наблюдению только методами ультра- и электронной микроскопии. Наконец, аэрозоли *аналитической* дисперсности имеют частицы размером 1–5 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) [1,2].

Аэрозоли могут быть классифицированы и по характеру их возникновения. Различают аэрозоли конденсационные и диспергационные. Диспергационные аэрозоли образуются при диспергировании жидкой или твердой фаз вещества. Они отличаются большим размером частиц, более широким диапазоном размеров частиц, состоят из частиц неправильной формы. Конденсационные аэрозоли образуются при объемной конденсации пересыщенных паров или при химических реакциях веществ, находящихся в газообразном состоянии. Они ближе к монодисперсным, их частицы имеют правильную форму (обычно шарообразную).

В основу классификации может быть положено различие между аэрозолями с жидкой и твёрдой дисперсной фазой.

Эти три признака деления аэрозолей в зависимости от их дисперсности, характера возникновения и фазового состояния является делением аэродисперсных систем по особенностям физико-химического характера.

Иногда применяется следующая классификация: *пыль* – аэрозоль, содержащий твёрдые частицы размером более 1 мкм (в отдельных работах – более 5 мкм) ; *дым* – твёрдые частицы субмикронных размеров; *туман* – с жидкой дисперсной фазой; *дымка* – с твердыми и жидкими частицами.

На первый взгляд может показаться, что, разделив аэрозоли на три больших класса — пыли, дымы и туманы, можно охватить все случаи, однако при более внимательном рассмотрении оказывается, что многие аэродисперсные системы можно с одинаковым правом отнести к двум классам, а некоторые системы не принадлежат ни к одному из этих классов. Несмотря на существование таких исключений, указанную классификацию целесообразно сохранить [1, 2].

Пыли (dusts) состоят из твердых частиц, диспергированных в газообразной среде в результате механического измельчения твердых тел (как, например, пыль, образующаяся при дроблении и тонком измельчении горных пород и минералов, при бурении и взрывных работах) или под действием аэродинамических сил (например, воздушной струи) на порошкообразные материалы. В обыденной жизни пылью нередко называют осадок пыли на различных поверхностях, легко переходящий обратно во взвешенное состояние. В большинстве случаев пыли — весьма полидисперсные малоустойчивые системы; они содержат больше крупных частиц, чем дымы и туманы. Счетная концентрация (число частиц в 1 см³) в пылях обычно мала по сравнению с дымами и туманами.

К *дымам (smokes)* причисляют весьма разнообразную группу аэродисперсных систем, состоящих из частиц с малой упругостью пара и с малой скоростью седиментации под действием силы тяжести. Весьма важным признаком дымов является способ их образования. Раньше дымами называли лишь аэрозоли, образующиеся при горении и деструктивной перегонке, однако в настоящее время термин «дым» включает многие другие аэродисперсные системы, которые нельзя отнести ни к пылям, ни к туманам, как, например, аэрозоли, образующиеся при возгонке и конденсации паров, а также в результате химических и фотохи-

мических реакций. Важным критерием является размер частиц, поэтому даже аэрозоль, образующийся при распылении какого-нибудь раствора и высыхании капелек, следует назвать дымом, если образующиеся частицы достаточно малы. Вообще говоря, величина частиц в дымах лежит в пределах от 5 мкм до субмикроскопических размеров, т. е. менее 0,1 мкм. Если при образовании дыма одновременно образуется какой-нибудь едкий газ или пар, например при обжиге сернистых руд, когда вместе с аэрозолем оксида металла выделяется сернистый ангидрид, такой дым обозначается на английском языке термином *fume* [1,2].

Туманы (*mists*) состоят из капелек жидкости, образующихся при конденсации пара или распылении жидкости. При этом в капельках могут содержаться растворенные вещества или суспендированные твердые частицы. Туманы, в особенности природные, состоят из сравнительно крупных капелек диаметром до 10 мкм и выше, и счетная концентрация их обычно невелика. Характерным признаком, отличающим туманы от дымов, служит размер частиц. Тонкодисперсные аэрозоли, например, образующиеся при взаимодействии паров серного ангидрида и воды, иногда называют туманами, однако, согласно нашей классификации, их лучше причислить к дымам. Если концентрация тумана настолько велика, что он заметно снижает видимость, его называют по-английски *fog*, хотя граница между понятиями *fog* и *mist* весьма расплывчата [1,2].

Капельки и частицы различных атмосферных загрязнений и пыли образуют в атмосфере *дымку (haze)*, представляющую собой комбинацию из всех трех основных классов аэрозолей, а не особый класс.

Иногда производится деление аэрозолей по следующим признакам – электрический заряд и радиоактивность. Аэрозоли с частицами несущими электрический заряд, называют *электроаэрозолями*.

По происхождению аэрозоли могут быть подразделены на *естественные и искусственные (или промышленные)* (см. таблицу 1, с.10).

1.2 Аэрозоли в окружающей среде

Наука об аэрозолях граничит с коллоидной химией, физической химией, с физикой и химией, с оптикой, метеорологией, с сельскохозяйственными, военными дисциплинами, с медициной [3]. Атмосферный воздух всегда содержит определенное количество аэрозольных частиц, находящихся в твердом или жидком состоянии. Круговорот воды в природе проходит через стадию конденсации водяных паров, т. е. через аэродисперсные системы. Пересыщенный водяной пар конденсируется

либо сам по себе, либо на ядрах конденсации, образуя микроскопические капельки (жидкий аэрозоль), которые при дальнейшей конденсации и коагуляции растут, образуя дождевые облака, и возвращаются на землю в виде дождя уже макроскопическими каплями. Помимо жидких аэрозолей в атмосферном воздухе всегда присутствуют аэрозоли с твердой дисперсной фазой, возникающие в результате вулканической деятельности, во время песчаных бурь, морских штормов и т. п.

Таблица 1 – Естественные и промышленные аэрозоли [1]

Размер частиц, см	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
Естественные аэрозоли		Туман, дым, дымка, коллоидный аэрозоль		Пыль, грубо-дисперсный аэрозоль				
Гидрометеорологические частицы	Водяной пар				Туман	Изморось	Дождь	
							Снежная крупа	Град
						Крупка	Крупа	
					Ледяные кристаллики		Снежные хлопья	
Аэропланктон	Вирусы							
	Шарообразные и палочковидные бактерии							
	Водоросли							
	Споры грибов, мхов и лишайников							
	Цветочная пыльца							
	Семена и плоды							
Технические аэрозоли				Ингаляционные	Прикладные	Инсектицидные		
						Промышленные		

Растительный и животный мир также непрерывно образует огромное количество аэрозолей, которые, с одной стороны, способствуют продолжению жизни и необходимы для ее существования, а с другой — причиняют ей колоссальный ущерб. Таким образом, в аэрозолях мы наблюдаем ту двойственность, которая часто встречается в природе и заключается в том, что одна и та же форма материи или энергии может приносить как пользу, так и вред. Аэрозоль, с одной стороны, друг жизни, с другой — ее разрушитель.

Большинство растений и деревьев опыляются пыльцой, находящейся в аэрозольном состоянии. Аэрозолями являются также и распространяющиеся по воздуху облака семян и спор некоторых растений (такие облака часто переносятся ветром на расстояния в несколько тысяч километров). Точно так же большинство микроорганизмов, обитающих в воздухе, представляет не что иное, как биологический аэрозоль или аэропланктон. Несомненно, что большинство микроорганизмов, вызывающих инфекционные заболевания, распространяется по воздуху в виде аэрозолей.

Даже самый чистый атмосферный воздух в отдельных районах планеты всегда содержит не менее 100 взвешенных частиц в 1 см^3 , т.е. представляет собой аэрозоль. Мы живём на дне своеобразного аэрозольного океана. Атмосферу иногда называют пятым океаном, воздушным океаном. Можно выделить три основных компонента фоновый (атмосферный) аэрозоля. Первый называют *континентальным*. Это частицы горных пород, почвы, мельчайшие частицы, сдуваемые ветром. Другой важнейший компонент — *морской*: частицы морской соли (ежегодно из морей в атмосферу попадает 10^{10} т соли). Именно эти частицы играют роль ядер конденсации, на которых образуются облачные капельки. Третий компонент фоновый аэрозоля образуется в результате протекания в атмосфере химических и фотохимических реакций веществ с некоторыми компонентами атмосферного воздуха, в первую очередь, с оксидами азота, возникающими при грозовых разрядах.

Кроме этих источников имеют место:

- лесные пожары;
- извержения вулканов;
- метеоритная пыль ($10^4 - 10^8$ т/год).

Существует мнение ученых о том, что предшественником катаклизмов служат аэрозоли. Так, установлено, что за определенный пери-

од до извержения вулканов в атмосфере над ними резко увеличивается содержание тяжелых металлов.

Знакомые всем природные облака, туманы и дымка по существу представляют собой дисперсные системы, в которых жидкое или твердое вещество диспергировано в газообразной среде – атмосфере. Именно на этой концепции основывается область физической метеорологии, называемая физикой облаков. Образование облаков в свободной атмосфере практически всегда связано с конвекцией – подъемом больших масс воздуха над более нагретыми участками земной поверхности. Поднимаясь в области более низкого давления, влажный воздух адиабатически расширяется и охлаждается. Когда в результате этого охлаждения создается небольшое пересыщение (обычно менее 101 %), водяной пар начинает конденсироваться на ядрах, всегда присутствующих в воздухе, и образуется облако. Конденсация сопровождается выделением тепла и это замедляет снижение температуры, создающее пересыщение. При температурах ниже точки замерзания конденсация может приводить к образованию либо переохлажденной воды, либо льда [1,3].

Атмосферный аэрозоль подразделяют также на тропосферный (до высоты приблизительно 10 км) и стратосферный (от 10 км приблизительно до 50 км). Результаты прямых исследований стратосферного аэрозоля показывают, что он в основном состоит из разбавленной серной кислоты с незначительным добавлением других веществ. Отмечено небольшое количество соединений аммония, в основном в районе 10-12 км. На высоте около 20 км был обнаружен слой сульфатных солей.

Количество аэрозолей в атмосфере огромно, существует их постоянный приток и сток. Более крупные частицы осаждаются сами, более мелкие вымываются дождем или снегом. Продолжительность пребывания аэрозолей в атмосфере определяет их так называемое «время жизни». В тропосфере время жизни аэрозолей составляет от 6 до 40 суток. В стратосфере среднее время жизни аэрозольных частиц увеличивается с высотой, и его оценки дают значения до месяца в слое 10-12 км, 1-2 года на высоте 20 км и от 4 до 20 лет на высоте 50 км.

Все эти источники вместе с континентальными аэрозолями образуют естественные источники образования аэрозольных частиц.

В настоящее время, помимо природных, или естественных, аэрозолей, в атмосферу проникает большое количество так называемых искусственных, или промышленных, аэрозолей, которые зачастую наносят непоправимый ущерб растительному и животному миру, а иногда пред-

ставляют весьма серьезную опасность для здоровья людей. Аэрозоли антропогенного происхождения составляют примерно 20 % от естественного содержания аэрозолей.

За последнее время всё большей и большей оказывается доля частиц антропогенного происхождения:

- процесс горения (энергетика, транспорт и др.), который даёт 2/3 общего количества первичных антропогенных аэрозолей;
- металлургическая промышленность;
- промышленность строительных материалов.

Немаловажным фактором является генерация вторичных аэрозолей – образование аэрозолей серной и азотной кислот или аммиачных солей этих кислот.

Крупные промышленные города окутаны аэрозолем смешанного типа, где на частицах сажи, пепла, продуктов сухой перегонки топлива конденсируется влага. Для таких систем, являющихся одновременно дымом, туманом и пылью, предложено название «смог» (в переводе с английского [smoke] – дым, а [fog] – туман).

Аэрозоли – друзья. Однако искусственные аэрозоли играют не только отрицательную роль. Их с успехом используют, например, в современной медицине – аэрозольная терапия и аэрозольная диагностика. Вдыханием аэрозолей некоторых лекарств и антибиотиков можно эффективно лечить ряд заболеваний верхних дыхательных путей и туберкулез. Аэрозольное лечение весьма рационально, поскольку в этом случае лекарство расходуется в меньшем количестве, чем при его употреблении в любой другой форме [3].

Широкое применение нашли аэрозоли и в технике. В двигателях внутреннего сгорания жидкое топливо поступает в рабочий цилиндр в виде аэрозолей. Также в виде аэрозолей, твердых или жидких, используется горючее для двигателей ракет, баллистических снарядов и космических кораблей. Порошковое горючее применяется в современных двигательных установках теплоцентралей. В техническом гетерогенном катализе часто используются флуидизированные, т. е. взвешенные в газовом потоке, катализаторы. В качестве одного из средств борьбы с пылью можно применять так называемый присоединяющий аэрозоль. Для этого в запыленную атмосферу вводятся мелкие кристаллики какого-либо химического соединения, например хлорида натрия, которые коагулируют с частичками кремниевой пыли и настолько увеличивают разме-

ры последних, что они уже не могут проникнуть в альвеолы легких, осесть там и вызвать силикоз.

Несколько экзотичным является применение в работе роботов фирмы «Фанук роботикс», «обнашивающих» джинсы, аэрозоля перманганата калия, который создает искусственные потертости на коленях и бедрах.

Широко применяют аэрозоли в сельском хозяйстве. До сих пор почти одна треть мирового урожая продовольственных и технических культур уничтожается вредителями сельского хозяйства. Главным заслоном на их пути служат инсектицидные аэрозоли. Большинство инсектицидов в настоящее время распыляется техническими аэрозоляторами в туман (агроаэрозоли), что позволяет при экономном потреблении химикатов наиболее эффективно истреблять вредителей сельскохозяйственных растений.

Наиболее важным применением аэрозолей в промышленном производстве является их использование в качестве промежуточной фазы при получении материалов с высокой степенью дисперсности (сажа – наполнитель каучука в резине, покраска путём распыления, получение пигментов, сжигание жидкого топлива и др.).

Аэрозольная технология находит применение в быту (дезодоранты, медицина, инсектициды и др.). Сейчас стоит задача, как известно, отказаться от фреоновой основы бытовых аэрозолей, но не от аэрозольной технологии.

Аэрозоли находят широкое применение при рассеивании облаков (йодид серебра имеет параметры кристаллической решетки, близкие к параметрам элементарной ячейки кристалла льда), предотвращении выпадении града, рассеивании туманов (хотя последнее ещё технически и не осуществлено).

При проведении научных исследований часто специально используется аэрозольное состояние вещества. Например, благодаря изучению движения микроскопических капелек в вертикальном электрическом поле впервые были точно определены заряд электрона, число Авогадро и др. величины. Применение камеры Вильсона, работа которой основана на явлении конденсации пересыщенного пара на ионах газа, сыграло очень важную роль в изучении явления радиоактивности и ядерных реакций. В экспериментальной аэродинамике при исследовании характера течения газа и сопротивления потоку воздуха тел, имеющих сечения различных профилей, в аэродинамических трубах с успехом применяется метод дымовых струй.

Аэрозоли – враги. Промышленные аэрозоли не только загрязняют атмосферу городов и поселков (выбросы промышленных предприятий и воздух от технических устройств, железнодорожного и водного транспорта, угольных карьеров и каменоломен, строительства, предприятий атомной промышленности и т. д.), но и являются возможной причиной заболеваний людей. Наибольшая опасность связана с вдыханием промышленных аэрозолей диоксида кремния (кремниевая пыль), почти всегда присутствующих в воздухе рудников, угольных шахт, литейных цехов и пр. Заболевание, вызванное вдыханием кремниевой пыли, так называемый силикоз, или запыленность легких, — самое распространенное в настоящее время профессиональное заболевание. Другие неорганические аэрозоли, в первую очередь металлическая пыль, также вызывают различные легочные заболевания под общим названием пневмокозиозы (наиболее вредное действие оказывают аэрозоли бериллия и его соединений) [1-3].

Установлена зависимость между курением и заболеванием раком легких. Папиросный и трубочный дым содержат аэрозольные частицы, газы и пары. Счетный медианный диаметр частиц составляет 0,6 мкм. При этом 20 % частиц имеет размер меньше 0,4 мкм, а 98 % — меньше 1,6 мкм. Несколько меньше частицы в дыме сигарет с фильтром. Счетная концентрация табачного дыма варьируется в пределах 10^8 — 10^9 частиц/см³, а весовая концентрация от 1 до 5 мг на 35 см³ выдоха, длящегося 2 с. Скорость его коагуляции — обычная для аэрозолей, получающихся при горении, а скорость испарения частиц (помимо содержащейся в них сконденсированной воды) чрезвычайно мала, так как они состоят из смолистой жидкости. Свет, рассеянный дымом, выходящим из горящего конца сигареты часто имеет голубоватый оттенок, указывающий на наличие очень мелких частиц. Но при затяжке дым насыщается влагой и принимает белую окраску, свидетельствующую об увеличении полидисперсности и величины частиц.

Дисперсная фаза табачного дыма состоит из сложной смеси различных веществ (никотина, оснований, кислот, фенолов, углеводородов и т.д.) с весьма сильно различающимися температурами кипения. Обнаружено наличие сильно канцерогенного вещества — 3,4-бензпирена в табачном дыме, по данным исследований в дыме 100 выкуренных папирос содержится около 1 мг этого вещества. Из-за малой величины частицы табачного дыма почти не задерживаются в верхних дыхательных путях, их трудно также задержать с помощью фильтров (за исключением

низких скоростей течения, когда частицы могут осесть за счет броуновского движения). Максимальная скорость течения воздуха в сигарете при затяжке составляет около 1 л/мин, что соответствует линейной скорости 36 см/с, но даже при такой скорости фильтры и фильтрующие пробки в трубках, если они правильно сделаны, могут уловить лишь 25 % дыма. Нет никаких препятствий к тому, чтобы перейти к фильтрам с достаточно малым сопротивлением, но эффективных, и снизить концентрацию дыма до минимального уровня, способного удовлетворить курильщика [1].

Развитие атомной энергетики породило новую опасность – радиоактивные аэрозоли (вспомним Чернобыль).

Доказано, что заражения такими болезнями, как острые респираторные заболевания, грипп, туберкулёз лёгких, лёгочная чума и др. происходят в основном из-за вдыхания так называемых микробиологических аэрозолей.

Аэрозоли – убийцы. Сам термин «аэрозоль», увы, обязан своим происхождением войне. Первая мировая война ознаменовалась появлением и широким применением первого из видов оружия массового поражения людей – химического. Наиболее эффективным оказалось отравляющее вещество в виде тумана. Для этих отравляющих облаков английский химик Ф. Дж. Доннан предложил термин «аэрозоль».

Большую опасность для человека представляет бактериологическое оружие – опять же в виде аэрозолей [1-3].

Применение атомного оружия сопровождается образованием значительных количеств смертоносных аэрозолей из-за конденсации испаренных конструкционных материалов, диспергации ударной волной, горения под действием светового излучения с образованием дыма, взмучивания пыли волной разряжения. Предельный случай при массовом применении ядерного оружия – «ядерная зима».

В России испытана самая мощная вакуумная неядерная авиабомба. Ее оценивают как щадящее, не наносящее ущерба окружающей среде, оружие нового поколения, довольно эффективное и экономное, но в то же время как невероятно беспощадное ко всему живому на Земле. Принцип действия вакуумной бомбы заключается в распылении и подрыве над целью секретного объекта горючего вещества (взрывчатое вещество создано с помощью нанотехнологий), а основным поражающим фактором является ударная волна и высокая температура.

Мы живём в век противоречия между существующей очистной технологией нашего промышленного производства и природой. Природа



Рисунок 1 – Российская вакуумная бомба

не может больше выносить чудовищные нагрузки экологически чуждых ей выбросов – отходов промышленности, которые составляют до 99 % от добываемого сырья, а их концентрация в природе возрастает по экспоненте. Мир может вскоре стать гигантской свалкой.

Астрозоли – среда обитания небесных тел. В необъятных пространствах космоса существуют гигантские облака высокодисперсных частиц – *астрозолей* (частицы пыли в безвоздушной космической среде). Все небесные тела образовались из космической пыли, поэтому

изучение её свойств необходимо для понимания процессов формирования и эволюции планетных и звёздных систем. Не исключено, что простейшие формы жизни зародились на аэрозольных пылинках и лишь потом, вместе с ними, осели на поверхности планет, где получили дальнейшее бурное развитие. Аэрозоли являются предшественниками и средой, в которой эти тела (в том числе и Земля) продолжают путь.

Генерация аэрозолей – свойство небесных тел. Так, Солнце окружено диском аэрозольных пылинок в два-три его диаметра. Например, вулканы спутника Юпитера Ио выбрасывают пары серы и её соединений, которые конденсируются в аэрозоль, увлекаемый притяжением Юпитера. В тумане вокруг Юпитера существует кольцо серного аэрозоля. Грандиозен масштаб формирования аэрозолей при приближении к Солнцу комет [3].

Аэрозоли могут иметь и антропогенную природу. Один из источников – конденсация продуктов сгорания топлива в двигателях космических аппаратов. Развитие космической технологии также должно привести к появлению новых источников аэрозолей. Дебатировалась идея создания облаков лунной пыли в космическом пространстве для защиты боевых космических аппаратов от лазерного оружия.

Таким образом, нам приходится сталкиваться с аэрозолями буквально на каждом шагу: на работе и дома, в городе и на лоне природы, — просто повсюду. Можно с полным правом сказать, что аэрозоли вездесущи.

Вопросы для самоконтроля

1. Что означает термин «аэрозоль»?
2. Какая разновидность классификации аэрозолей наиболее предпочтительна? Почему?
3. Чем отличается пыль от дыма?
4. Какие компоненты входят в состав фонового (атмосферного) аэрозоля?
5. Что означает термин «смог»?
6. Дайте три конкретных примера из раздела «аэрозоли-друзья».
7. Дайте три конкретных примера из раздела «аэрозоли-враги».
8. Дайте три конкретных примера из раздела «аэрозоли-убийцы».
9. Что означает термин «аэрозоль»?

2 ОБРАЗОВАНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ

Основными способами образования аэрозолей являются конденсационный и диспергационный способы. В конденсационном способе частицы коллоидных размеров образуются путём агрегации молекул, а в диспергационном способе – путём дробления вещества [1].

2.1 Образование аэрозолей при конденсации

Конденсация паров — наиболее распространенный способ образования аэрозолей. Пар высокой концентрации, находящийся в воздухе или инертном газе, охлаждается при разбавлении его холодным воздухом или быстром расширении до тех пор, пока не станет пересыщенным и не начнет конденсироваться, образуя аэрозоль из жидких или твердых частиц. Примером образования конденсационных аэрозолей может служить возникновение облаков при подъеме теплого влажного воздуха в холодные верхние слои атмосферы. В лаборатории получают конденсационные аэрозоли путем возгонки многих неорганических и органических веществ. В большинстве случаев процесс, приводящий к пересыщению, например, смешение холодного и теплого воздуха в атмосфере или расширение и охлаждение газообразных продуктов горения, происходит одновременно с конденсацией и степень пересыщения в различных точках системы в любой момент неодинакова. Пар может конденсироваться на стенках сосуда, на частицах пыли или атмосферных ядрах конденсации, на ионах, содержащихся в паре или нейтральном газе, на полярных молекулах, например серной кислоты, а при очень большом пересыщении — на молекулах или молекулярных агрегатах самого пара. Для конденсации на каждом типе этих ядер требуется различная степень пересыщения.

Рассмотрим каплю радиусом r из жидкости с молярной массой M , плотностью ρ и поверхностным натяжением σ . Предположим, что капля окружена паром с парциальным давлением p , а равновесное давление пара над плоской поверхностью жидкости равно p_∞ . Отношение p/p_∞ называется пересыщением. Согласно известному уравнению Томсона-Гиббса, капля находится в равновесии с паром, если:

$$\ln \frac{p}{p_\infty} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot M}{R \cdot T \cdot \rho \cdot r}.$$

Экспериментально подтверждена применимость этого уравнения для капель радиусом 0,08–1,0 мкм [1] (см. рис. 2).

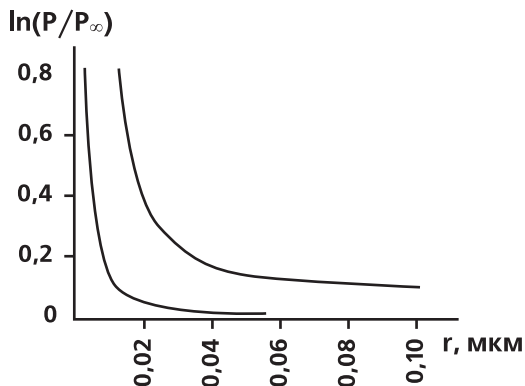


Рисунок 2 – Зависимость величины $\ln(p/p_\infty)$ от радиуса капель

Диоксилфталат, обладающий большой молярной массой и очень низкой упругостью пара, часто используют для получения стабильных аэрозолей. Интервал размеров капель, для которых становится существенным увеличение давления пара за счёт кривизны поверхности, значительно меньше для воды, чем для диоксилфталата. Это видно из графиков (нижняя кривая – вода, верхняя кривая – диоксилфталат).

Для каждой степени пересыщения существует определённый критический радиус $r_{кр}$. Более мелкие капли испаряются, а более крупные – растут. Кроме того, существуют значения критических пересыщений (при которых образуются аэрозоли), рассчитываемые с помощью зависимостей Фольмера и Флуда.

Если в паре присутствуют твёрдые посторонние частицы, поверхность которых смачивается конденсирующейся жидкостью, то это облегчает конденсацию.

Если ядра состоят из вещества, растворяющегося в конденсирующейся жидкости, то давление пара этой жидкости понижается, а, следовательно, уменьшается и пресыщение, необходимое для начала конденсации. Если раствор и чистый растворитель имеют одинаковую кривизну поверхности, то давление пара над раствором меньше на величину ΔP , которая определяется по уравнению:

$$\frac{\Delta P}{P_{\infty}} = C \cdot N,$$

где N – число молей растворённого вещества на 1000 г растворителя, а C – величина, зависящая от природы растворяемого вещества и почти не зависящая от его концентрации.

Если в капле радиусом r и плотностью ρ содержится m граммов растворённого вещества с молярной массой M_p , то:

$$N = \frac{m}{M_p} \bigg/ \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho = 750 \frac{m}{\pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot M_p},$$

и, следовательно,

$$\frac{\Delta P}{P_{\infty}} = \frac{750m \cdot C}{\pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot M_p}.$$

Тогда равновесное давление пара над поверхностью капли может быть записано:

$$\frac{P}{P_{\infty}} = \exp\left(\frac{2\sigma \cdot M}{R \cdot T \cdot \rho \cdot r}\right) - \frac{750m \cdot C}{\pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot M_p}.$$

Это уравнение является основным для конденсации паров воды на ядрах конденсации в атмосфере [1].

Роль ядер конденсации могут выполнять ионы, при этом образование капель происходит при более низких пересыщениях. На рисунке 3, приведенном ниже, все точки, лежащие на кривых, характеризуют равновесные состояния. Точки, лежащие ниже кривой 1, соответствуют условиям испарения капель. Капли, соответствующие точкам выше кривой, будут расти по одному из двух путей: если конденсация происходит на заряженной капле, представленной точкой А, то она приведёт к точке А', здесь рост капли остановится. Если же конденсация не приводит к какой-либо точке на кривой 1, то заряженная капля будет расти бесконечно до тех пор, пока внешние факторы не снимут пересыщение.

Установлено, что большая эффективность отрицательных ионов обусловлена наличием на незаряженной капле воды естественного поверхностного двойного электрического слоя с положительными зарядами на внешней стороне.

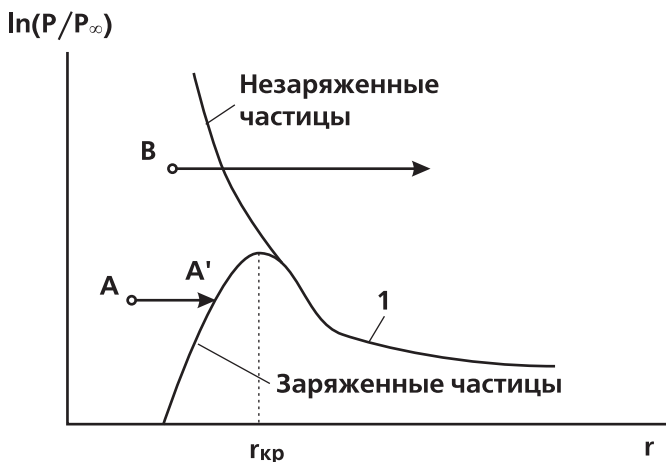
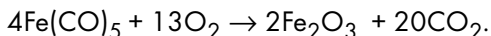


Рисунок 3 – Зависимость величины $\ln(p/p_\infty)$ от радиуса частиц

Конденсационным путем происходит образование аэрозолей при смешивании газовых потоков, содержащих пары и имеющих разную температуру; путём смешивания в струе; горение (сажа); электрическая дуга (дымы металлов); фотолиз (в ультрафиолетовом свете пары карбонила взаимодействуют с атмосферным кислородом):



2.2 Получение аэрозолей путем диспергирования

В описанных выше конденсационных методах получения аэрозолей коллоидно-дисперсная фаза возникала из молекулярно-дисперсной (газообразной) фазы. В диспергационных же методах происходит разделение сравнительно больших объемов твердых или жидких тел на частицы коллоидных размеров. Сообщаемая жидкости энергия заставляет ее принять неустойчивую форму и распадаться на капли; твердое тело диспергируется на мелкие частицы. Процесс распыления жидкостей интенсивно исследовался в связи с конструированием и эксплуатацией форсунок, широко используемых в промышленности, однако физические его основы еще не вполне выяснены и механизм распыления еще не поддается количественному теоретическому анализу [1].

Диспергирование жидкостей

При распылении жидкостей энергия затрачивается на:

1. Образование новой поверхности.
2. Преодоление сил вязкости при изменении формы жидкости.
3. Потери, обусловленные неэффективной передачей энергии жидкости. Энергия, необходимая для образования новой поверхности при разделении жидкости на капли радиусом r , равна $3\sigma/r\rho$. Требуется некоторое количество энергии, которое расходуется для создания в процессе распыления большей поверхности мельчайших коллоидных частиц, по сравнению с исходной поверхностью.

Процесс образования капель протекает очень быстро, порой в течение нескольких секунд.

Применяемые при получении туманов диспергационные методы подразделяют на:

- **Способ пневматического (аэродинамического) распыления жидкости.**

Дробление жидкости осуществляется в специальных камерах. В них через сопла подаётся жидкость, которая дробится движущимся с большой скоростью воздухом или иным газом. В ходе дробления жидкой струи под действием газового потока можно различить, по крайней мере, три стадии. Вначале на поверхности жидкости возникает небольшое возмущение в виде местных пульсаций, т.е. утолщений и сужений. Под действием аэродинамических сил эти поверхностные возмущения развиваются таким образом, что из поверхности жидкости начинают выделяться жидкие нити. Затем они распадаются под действием поверхностного натяжения на отдельные капельки. Капельки образуются не только из нитей, но и из растягивающихся и лопающихся тонких жидких плёнок. Учитывая сложный характер процесса распада жидкой струи, в туманах, получаемых распылением жидкостей в высокоскоростном потоке газа, содержатся капли самых различных размеров. Существенное влияние на степень дисперсности оказывают физические свойства жидкости. Применяют этот метод в краскораспылительных пистолетах, в форсунках Вентури, для получения инсектицидных, дезинфицирующих и лекарственных туманов и др. В пневматических распылителях можно снизить размер капелек, только понизив их концентрацию, так как для этого необходимо увеличить расход воздуха.

- **Способ центробежного распыления жидкости.** Жидкость подаётся на центр вращающегося диска или опрокинутого конуса и сбрасывается в распыленном состоянии с его краёв под действием центробежных сил.

На характеристики получаемого аэрозоля оказывают влияние характеристики жидкости, скорость вращения устройства и др. Получается туман, близкий к монодисперсному.

- **Гидравлический (гидродинамический) метод.** Жидкость продавливают под большим давлением через сопло (центробежная форсунка с вихревой камерой в сельском хозяйстве). Дисперсность получаемых капелек в большей степени зависит от физических свойств жидкости и условий её течения через сопло.

- **Способ распыления жидкости ультразвуком.** Если на поверхность воды сфокусировать с помощью погруженного в неё вогнутого рефлектора или фокусирующего излучателя пучок мощных ультразвуковых волн, то в воздухе образуется водяной туман. Ультразвуковое распыление имеет некоторые преимущества перед другими методами: оно позволяет получать туманы с более высокой концентрацией и лежащими в более узких пределах размерами капелек, причем среднюю величину последних можно регулировать, изменяя частоту колебаний. Количество жидкости, которое можно перевести во взвешенное состояние, лимитируется лишь скоростью оседания образующихся капелек.

- **Способ электростатического распыления жидкостей.** При определенных значениях напряжения, наложенного на поток вытекающей жидкости, и гидростатического давления P вытекающая жидкость принимает форму конуса, из вершины которого вытягивается тонкая нить, распадающаяся с образованием кистевидного факела капель. Условие равновесия сил, действующих на взвешенную в газообразной среде заряженную сферическую каплю радиуса r , имеет вид:

$$\frac{2\sigma}{r} - P = \frac{U^2}{8\pi \cdot r^2}$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости;

P – капиллярное давление внутри капли;

U – приложенное напряжение.

$\frac{2\sigma}{r} - P$ – капиллярный член, $\frac{U^2}{8\pi \cdot r^2}$ – электростатический член.

Равновесие становится неустойчивым, когда небольшое уменьшение радиуса кривизны капли увеличивает электростатический член в уравнении больше, чем капиллярный член. Поверхность становится неустойчивой и капля распадается [1].

• **Распыление растворов и суспензий.** При распылении разбавленных растворов нелетучего вещества в летучем растворителе растворитель испаряется из капелек и образуется аэрозоль, состоящий из очень маленьких частиц растворённого вещества. Благодаря большой удельной поверхности капелек испарение растворителя происходит очень быстро, причем его можно ускорить, смешивая первичный туман с большим объёмом воздуха.

Примем, что распыленный раствор содержит x граммов растворённого вещества на 100 г раствора. Обозначим через ρ и ρ_0 плотности того и другого. Если капелька раствора с диаметром d_0 превращается после испарения в частицу с массой, равной массе сферы с диаметром d , то:

$$\frac{1}{6} \pi \cdot d_0^3 \cdot \rho_0 \cdot \frac{x}{100} = \frac{1}{6} \pi \cdot d^3 \cdot \rho ,$$

откуда

$$d = d_0 \cdot \left(\frac{x \cdot \rho_0}{100 \rho} \right)^{1/3} .$$

С помощью этого метода получают тонко дисперсные частицы аэрозоля хлорида натрия, йодида калия, полистирола, метиленового голубого и т.д. Метод особенно полезен при диспергировании веществ, разлагающихся при нагревании.

• **Образование аэрозолей путем диспергирования твёрдых тел и распыления порошков**

Таким путём, естественно, получают пыли.

Примерами первой группы могут служить пыли, образующиеся при измельчении горных пород и минералов путём дробления, размола, бурения и взрыва.

Ко второй группе следует отнести характерные для пустынь природные атмосферные пылевые области, а также аэрозоли, искусственно создаваемые человеком из инсектицидных порошков.

После достаточно длительного измельчения материала дальнейшие усилия уже не изменяют распределения частиц полученного порошка по размерам.

Ударные волны, создаваемые с помощью взрывчатых веществ, казалось бы, должны достаточно эффективно дробить твёрдые тела на мельчайшие частицы, но в то же время обнаружено, что размеры частиц при детонации взрывчатых веществ, помещённых внутри горной породы

или на её поверхности, мало отличаются от размеров частиц, образующихся при обычном измельчении тел [1].

Образование аэрозолей возможно также в результате взрывоподобного разрушения твёрдых тел выделяющимися внутри них газами.

При образовании стабильных пылей и тонких порошков необходимо учесть силы адгезии мелких частиц друг к другу. Определено, что сила адгезии между двумя твёрдыми шариками с диаметрами d_1 и d_2 равна:

$$F = \frac{A}{12x^2} \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2},$$

где x – величина зазора между шариками;

A – постоянная.

О характере соприкосновения частиц в пылях и порошках известно ещё очень мало.

Существенно усложняется образование стабильных аэрозолей в случаях, если твёрдые частицы покрыты слоем жидкости или же если частицы распылённого в воздухе порошка заряжены.

Для искусственного запыления воздуха при исследовании пневмокониозов, испытаниях пылевых респираторов и фильтров, а также проверки приборов для отбора проб, разработан ряд аппаратов. При этом применяются:

- дезагрегация порошка с помощью пульсирующего воздушного потока.
- дезагрегация порошка с помощью пульсирующих звуковых колебаний.
- дезагрегация порошка с помощью пульсирующего продувания через узкую спиральную трубку и др.

В тоже время нужно отметить, что надёжно работающих питательных пылей в настоящее время нет.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем суть конденсационного метода образования аэрозолей?
2. В чем суть диспергационного метода образования аэрозолей?
3. Что такое «пересыщение»?
4. Чем обусловлено ускорение процесса конденсации аэрозольных частиц в присутствии ядер конденсации?
5. Какие факторы являются определяющими при реализации способа пневматического распыления жидкости?
6. В чем суть электростатического распыления жидкости?

3 ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В АЭРОЗОЛЯХ

3.1 Седиментация. Скорость падения частиц

Седиментация – направленное движение частиц в поле действия гравитационных или центробежных сил. При этом частицы дисперсной фазы одновременно испытывают действие силы земного притяжения и архимедовой силы. Частицы пыли, дыма или тумана при свободном падении быстро достигают такой постоянной скорости, при которой аэродинамическое сопротивление, действующее на частицу, становится равным её весу. При рассмотрении скорости падения целесообразно взять простейший случай оседания жесткой сферической частицы в газе в отсутствии влияния других частиц и стенок сосуда. Приравнявая стоксовское сопротивление эффективному весу шара, имеем [1, 2]:

$$3\pi \cdot \eta \cdot v \cdot d = \frac{\pi}{6} d^3 \cdot (\rho - \rho') \cdot g .$$

где d – диаметр шара;

v – его конечная скорость падения;

ρ – его плотность;

ρ' – плотность воздуха;

η – вязкость воздуха;

g – ускорение свободного падения.

Если пренебречь величиной ρ' по сравнению с ρ :

$$v = \frac{\rho \cdot g \cdot d^2}{18\eta} .$$

Если размер частиц сравним с длиной свободного пробега газовых молекул, то среду уже нельзя рассматривать как непрерывную; она «скользит» по поверхности частицы. Для учёта этого скольжения Е. Каннингом ввел известную поправку к закону Стокса:

$$v = \frac{\rho \cdot g \cdot d^2 \left(1 + 2A \cdot \frac{\lambda}{d}\right)}{18\eta} .$$

где λ – средняя длина свободного пробега газовых молекул;

A – числовой коэффициент, приближённо равный единице.

Для частиц крупнее 20 мкм влияние поправки Каннингема на величину скорости седиментации незначительно.

3.2 Броуновское движение и диффузия

Броуновское движение происходит из-за того, что все жидкости и газы состоят из атомов или молекул - мельчайших частиц, которые находятся в постоянном хаотическом тепловом движении, и потому непрерывно толкают броуновскую частицу с разных сторон. Это явление открыто Р. Броуном в 1827 г., когда он проводил исследования пыльцы растений.

Броуновское движение вызвано столкновениями молекул дисперсной фазы с молекулами дисперсионной среды. Это – своеобразный «вечный двигатель». Траектория аэрозольной частицы является непрерывной (хотя и хаотично искривлённой) в отличие от прямых линий для молекул газа.

Несмотря на кажущийся полный беспорядок, случайные перемещения броуновских частиц оказалось все же возможным описать математической зависимостью. Созданная в 1905–1906 г.г. А. Эйнштейном, при участии М. Смолуховского, статистическая теория броуновского движения исходит из предположения о совершенной хаотичности движения, т.е. полной равноправности всех направлений. В качестве характеристики движения принято смещение $\overline{\Delta_x}$ за время τ .

Согласно выведенному А. Эйнштейном уравнению, средний квадрат смещения частицы $\overline{\Delta_x^2}$ (можно вычислить на основании законов статистики) за промежуток времени τ вдоль оси x равен [1,2]:

$$\overline{\Delta_x^2} = \frac{2R \cdot T}{N_a \cdot K_c} \cdot \tau,$$

где K_c – коэффициент сопротивления (т.е. сила, действующая на частицу, движущуюся со скоростью 1 м/с).

В случае справедливости закона Стокса ($k=3\pi\eta \cdot d$):

$$\overline{\Delta_x^2} = \frac{2R \cdot T}{N_a \cdot 3\pi \cdot \eta \cdot d} \cdot \tau.$$

А. Эйнштейном показано [1,2], что полный поток частиц P (продукт броуновского движения) через 1 см² плоскости, перпендикулярной к оси x , выражается следующим образом:

$$P = -\frac{1}{2} \cdot \overline{\Delta_x^2} \cdot \frac{dn}{dx}, \quad (1)$$

где n – концентрация частиц в данной плоскости.

С другой стороны, по закону А. Фика:

$$P = -\tau \cdot D \cdot \frac{dn}{dx}, \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии ($D = \frac{R \cdot T}{3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot N_a}$, $D = \frac{R \cdot T}{6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot N_a}$,

т.к. $\frac{R}{N_a} = k$, то

$$D = \frac{k \cdot T}{3\pi \cdot \eta \cdot d}, \quad D = \frac{k \cdot T}{6\pi \cdot \eta \cdot r}.$$

Отсюда следует [1,2]: $\overline{\Delta_x^2} = 2D \cdot \tau$.

Кроме броуновского смещения, о котором речь шла выше, в аэрозолях частицы совершают беспорядочное вращательное движение вокруг своей оси, описываемое выведенным А. Эйнштейном уравнением:

$$\overline{\Delta_{BP}^2} = \frac{2R \cdot T}{N_a \cdot \pi \cdot d^3 \cdot \eta},$$

где $\overline{\Delta_{BP}^2}$ – средний квадрат составляющей угла вращения сферической частицы вокруг данной оси за время τ .

Различные количественные характеристики процессов седиментации, броуновского движения и диффузии представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Величины D , $\overline{\Delta_x^2}$, v для аэрозольных частиц различных размеров (дисперсионная среда – воздух, дисперсная фаза – вода)

Радиус частицы, см	D , см ² /с	$\overline{\Delta_x^2}$, см	v , см/с
10^{-7}	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$1,60 \cdot 10^{-1}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$
10^{-6}	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$1,64 \cdot 10^{-2}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$
10^{-5}	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-4}$
10^{-4}	$1,27 \cdot 10^{-7}$	$5,03 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$
10^{-3}	$1,38 \cdot 10^{-8}$	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^0$

Для частиц радиусом 10^{-7} см коэффициенты диффузии близки к коэффициентам диффузии газовых молекул.

3.3 Седиментационно-диффузионное равновесие

Частицы дисперсной фазы в гравитационном поле оседают, если их плотность больше плотности дисперсионной среды (наш случай – аэрозоли). Следствием процесса седиментации является возникновение градиента концентрации частиц по высоте сосуда, приводящего к диффузии, направленной в сторону меньшей концентрации.

Сравнение седиментационного ($i_{СЕД}$) и диффузионного ($i_{ДИФ}$) потоков позволяет установить, какой из процессов преобладает в данной дисперсной системе [1,2].

Для нахождения закона распределения частиц по высоте исходят из равенства потоков диффузии и седиментации:

$$i_{СЕД} = i_{ДИФ}. \quad (3)$$

Поток седиментации рассчитывают по уравнению:

$$i_{СЕД} = u_{СЕД} \cdot n \quad (4)$$

где $u_{СЕД}$ – линейная скорость седиментации;

n – число частиц в единице объёма (счетная концентрация).

Условием равновесного движения частицы является равенство силы тяжести и силы трения, последняя, для сферической частицы радиуса r , определяется по уравнению Стокса:

$$F = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot u_{СЕД}. \quad (5)$$

Скорость седиментации, с учётом поправки на потерю в массе по закону Архимеда, выражается уравнением:

$$u_{СЕД} = \frac{m \cdot g}{6\pi \cdot \eta \cdot r} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho}, \quad (6)$$

где m – масса частицы;

g – ускорение свободного падения.

ρ, ρ_0 – плотность дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Диффузионный поток рассчитывают по уравнению А. Фика:

$$i_{ДИФ} = -D \cdot \frac{dn}{dH} = -\frac{k \cdot T}{6\pi \cdot \eta \cdot r} \cdot \frac{dn}{dH} \quad (7)$$

Здесь $\frac{dn}{dH}$ – градиент концентрации по высоте H .

Приравняв правые части уравнений (6), (7), получают выражение седиментационно-диффузионного равновесия, называемое уравнением Лапласа-Перрена [1,2]:

$$\ln \frac{n_0}{n} = \frac{m \cdot g \cdot H}{k \cdot T} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho} .$$

где n , n_0 – число частиц на исследуемом уровне и на высоте H соответственно.

Вышеуказанное уравнение используют для определения размеров частиц.

Уравнение Лапласа-Перрена является частным случаем универсального закона распределения Больцмана и было получено раньше независимо от факта установления закона Больцмана.

3.4 Коагуляция аэрозолей

Одно из наиболее интересных свойств аэрозолей – их непрерывная и самопроизвольная коагуляция. Коагуляция (от лат. *coagulatio* – свёртывание, сгущение), слипание частиц коллоидной системы при их столкновениях в процессе теплового (броуновского) движения, перемешивания или направленного перемещения во внешнем силовом поле. В результате коагуляции образуются агрегаты – более крупные (вторичные) частицы, состоящие из скопления более мелких (первичных).

Частицы любого вещества при соприкосновении сливаются или слипаются, аэрозоль становится постепенно всё более грубым и, наконец, выпадает в виде хлопьев. Правильное объяснение природы процесса коагуляции дано в исследованиях Р. Уайтлоу-Грея [1,2].

Он показал, что коагуляция очень многих аэрозолей подчиняется простому линейному закону. Если n – число частиц в 1 см^3 в некоторый момент времени τ , а n_0 – в момент образования дыма, то:

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = K_K \cdot \tau, \quad (8)$$

где K_K – постоянная, называемая константой коагуляции (изменение объёма, приходящегося на одну частицу, со временем).

Сравнение экспериментальных величин константы коагуляции для большого числа аэрозолей при нормальной температуре и давлении показывает, что процесс коагуляции незначительно зависит от природы аэрозоля (см. табл. 3 ниже).

Таблица 3 – Значения коэффициента коагуляции для различных веществ

Вещество	Константа коагуляции $\times 10^9$, $\text{см}^3/\text{с}$
Хлорид аммония	0,60
Оксид железа	0,66
Оксид магния	0,83
Оксид кадмия	0,80
Стеариновая кислота	0,51

Из уравнения (8) легко установить, что скорость убывания счётной концентрации из-за коагуляции зависит лишь от квадрата концентрации частиц и константы коагуляции:

$$-\frac{dn}{d\tau} = K_K \cdot n^2$$

Кинетика броуновской коагуляции

Кинетика коагуляции системы мелких сферических частиц, сливающихся при столкновении в более крупные, была разработана М. Смолуховским. Он предположил, что частицы коагулирующего золя сталкиваются в результате броуновского движения, и некоторая доля таких столкновений приводит к соединению частиц друг с другом, таким образом, уменьшается общее число индивидуальных частиц [1].

Рассмотрим сферу радиуса S , находящуюся внутри системы частиц, беспорядочно распределённых в пространстве, объём которого велик по сравнению с суммарным объёмом частиц. Предположим, что каждая частица, диффундирующая к поверхности сферы, прилипает к ней. М. Смолуховский показал, что если n – число частиц в единице объёма, то в единицу времени сфера поглощает $4\pi D \cdot S \cdot n$ частиц (где D – коэффициент диффузии частиц). Если вместо одной неподвижной сферы все частицы действуют как центры поглощения частиц, т.е. происходит коагуляция, то скорость исчезновения частиц в единице объёма выразится следующим образом:

$$-\frac{dn}{d\tau} = 2\pi \cdot D \cdot S \cdot n^2$$

Если предположить, что D и S одинаковы для всех частиц (это верно для рассмотрения потока диффузии частиц в монодисперсной системе по направлению к одной частице, являющейся неподвижной и «центральной»). Однако это не так, поэтому следует записать вместо D сумму (D_1+D_2) коэффициентов диффузии двух сталкивающихся частиц, а вместо S следует вставить $(S_1+S_2)/2$, где S_1 и S_2 – радиусы сфер действия частиц. Подставляя эти величины, имеем:

$$-\frac{dn}{d\tau} = \pi \cdot (D_1 + D_2) \cdot (S_1 + S_2) \cdot n^2.$$

Процесс диффузии является результатом броуновского движения отдельных частиц. Как было доказано Эйнштейном:

$$D = \frac{R \cdot T}{6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot N_a},$$

где R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура;

N_a – число Авогадро;

η – вязкость среды;

r – радиус частиц.

Подставляя значения D_1 и D_2 , имеем:

$$-\frac{dn}{d\tau} = \frac{RT}{6\eta \cdot N_a} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cdot (S_1 + S_2) \cdot n^2,$$

где r_1, r_2 – радиусы двух сталкивающихся частиц.

Если теперь предположить, что отношение s радиуса сферы действия к радиусу частицы для всех частиц одинаково, то получим:

$$-\frac{dn}{d\tau} = \frac{R \cdot T \cdot S}{6\eta \cdot N_a} \cdot \frac{(r_1 + r_2)^2}{r_1 \cdot r_2} \cdot n^2.$$

Если все частицы одного размера, то:

$$-\frac{dn}{d\tau} = \frac{2}{3} \cdot \frac{R \cdot T \cdot s}{\eta \cdot N_a} \cdot n^2.$$

Так как R , T , s , η , N_a постоянны, то после интегрирования получаем [1]:

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = \frac{2}{3} \cdot \frac{R \cdot T \cdot s}{\eta \cdot N_a} \cdot \tau.$$

Из этого уравнения следует, что между приходящимся на долю одной частицы объёмом и временем коагуляции должна существовать линейная зависимость. В это уравнение не входит размер частицы. Это значит, что аэрозоли с частицами разного размера должны коагулировать с одинаковой скоростью.

Уравнение коагуляции монодисперсных аэрозолей

Уравнение непосредственно не применимо для случая, когда средняя длина свободного пробега молекул газообразной среды имеет тот же порядок, что и радиус r частиц аэрозоля. В этом случае вводится поправка Е. Каннингэма ($1 + A \cdot l/r$), где A – постоянная (для размеров частиц, обычно встречающихся в дымах $A \approx 0,9$). Таким образом, для монодисперсного аэрозоля имеем:

$$-\frac{dn}{d\tau} = \frac{2}{3} \cdot \frac{R \cdot T \cdot s}{\eta \cdot N_a} \cdot \left(1 + A \cdot \frac{l}{r}\right) \cdot n^2.$$

Если предположить, что частицы соединяются лишь при соприкосновении ($s=2$), то для простейшего случая – начальной стадии коагуляции монодисперсного аэрозоля, состоящего из сферических частиц, получим выражение:

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = \frac{4R \cdot T}{3\eta \cdot N_a} \cdot \left(1 + A \cdot \frac{l}{r}\right) \cdot \tau,$$

из которого следует, что константа коагуляции не постоянна, а уменьшается в процессе коагуляции по мере того, как средний радиус частицы растёт.

Факторы, влияющие на скорость коагуляции

Эти факторы можно разделить на две группы. К первой относятся те факторы, которые влияют на вероятность столкновения между частицами, например, размер, распределение по размерам и распределение электрических зарядов частиц, а также температура и давление газа. Ко второй относятся форма и структура частиц, влияние адсорбированных на частицах паров, т.е. факторы, от которых зависит, слипаются ли диффундирующие частицы при столкновении или нет.

Весовая концентрация и размер частиц

Величина константы коагуляции растёт с уменьшением весовой коагуляции. Это объясняется тем, что крупные частицы коагулируют медленнее мелких. Поэтому скорость процесса коагуляции увеличивается с уменьшением весовой концентрации и размера частиц.

Полидисперсность

Прежде всего, отметим, что и моно- и полидисперсность — чисто статистические понятия. Ни одна коагулирующая система не может быть монодисперсной, даже если первоначально она была таковой. В зависимости от своего происхождения система может состоять из частиц с узким или широким интервалом размеров. Аэрозоли коагулируют тем медленнее, чем ближе они к монодисперсности. Это объясняется тем, что вероятность столкновения между частицами неодинакового размера больше, чем в случае одинаковых частиц. Основное уравнение для скорости коагуляции аэрозоля (смотрите ранее его вывод):

$$-\frac{dn}{d\tau} = \frac{R \cdot T \cdot S}{6\eta \cdot N_a} \cdot \frac{(r_1 + r_2)^2}{r_1 \cdot r_2} \cdot n^2.$$

При столкновении двух частиц одного размера ($r_1=r_2$) член $(r_1+r_2)^2/r_1 \cdot r_2$ имеет минимальное значение равное 4, скорость коагуляции при этом наименьшая. Ясно, что этот член будет быстро возрастать с увеличением разности размеров сталкивающихся частиц, т.е. частицы, значительно различающиеся по размеру, будут коагулировать гораздо быстрее, чем одинаковые.

Гравитационная коагуляция

В полидисперсных аэрозолях коагуляция может происходить также и другим путем. Под влиянием гравитационных или центробежных сил крупные частицы движутся быстрее мелких и тем самым увеличивается вероятность столкновения тех и других. Коагуляция за счет разности скоростей оседания (именуемая иногда «кинематической коагуляцией») в высокодисперсных дымах с малым интервалом размеров частиц пренебрежимо мала, но она может играть важную роль в природных облаках и туманах, где разница в скоростях оседания капель значительна.

Этот фактор играет очень важную роль в образовании атмосферных осадков.

Температура, давление и вязкость газообразной среды

Из выражения для константы коагуляции

$$K_k = 4R \cdot T \cdot \left(1 + A \cdot \frac{l}{r}\right) / 3\eta \cdot N_a$$

очевидно, что скорость коагуляции монодисперсного аэрозоля зависит не только от радиуса частиц, но также от абсолютной температуры, вязкости газа и длины свободного пробега l его молекул, т.е. скорость коагуляции заметно растёт по мере того, как давление газа падает.

Из выражения для константы коагуляции видно, что влияние понижения давления оказывается лишь в увеличении длины свободного пробега.

Форма частиц

Оказывает существенное влияние в аэрозолях твёрдых веществ только тогда, когда в результате коагуляции образуются цепочки, значительно отклоняющиеся от сферических частиц.

Влияние посторонних паров

В присутствии посторонних паров скорость коагуляции изменяется лишь в аэрозолях, состоящих из твёрдых частиц, и причина изменения состоит не в увеличении или уменьшении эффективности столкновения, а в изменении формы образующихся агрегатов.

Влияние Ван-дер-Ваальсовых сил

Экспериментальные значения констант коагуляции на 20-25 % выше рассчитанных по исправленному уравнению Смолуховского для скорости коагуляции монодисперсного аэрозоля:

$$K_k = 4R \cdot T \cdot \left(1 + A \cdot \frac{l}{r}\right) / 3\eta \cdot N_a.$$

Эта разница обусловлена действием Ван-дер-Ваальсовых сил, благодаря которым радиус сферы действия каждой аэрозольной частицы возрастает.

Турбулизация потока

Очень простой способ увеличения скорости коагуляции аэрозоля – это турбулизация потока. Вихри увеличивают скорость частиц относительно друг друга, поэтому вероятность их столкновения возрастает, а, следовательно, растёт и скорость процесса коагуляции.

Учет влияния различных факторов на процесс коагуляции позволяет более точно и полно прогнозировать поведение аэрозолей при их очистке.

3.5 Термофорез, фотофорез

Замечено, что вокруг нагретого тела, помещенного в аэродисперсную систему, возникает так называемая тёмная или «обеспыленная» зона, обусловленная тем, что горячее тело отталкивает от себя частицы пыли. Толщина этой, не содержащей частиц, зоны зависит от разности температур тела и среды, давления газа, размера и формы тела и совершенно не зависит от его химического состава. Это явление названо термофорезом и вызвано действием так называемых термофоретических сил. Это силы, действующие со стороны газообразной среды на находящиеся в ней равномерно нагретые тела (в частности, частицы аэрозоля) [2].

Обычно термофоретическая сила возникает вследствие того, что газовые молекулы от более нагретой стороны сильнее бомбардируют частицу, чем от менее нагретой стороны, и потому сообщают частице импульс в направлении убывания температуры.

Если аэрозоль осветить интенсивным направленным пучком света, то аэрозольные частицы начинают совершать упорядоченное движение, причем часть из них движется в направлении распространения световых лучей, другая – навстречу свету. Это явление в 1918 г. Ф. Эрнхафт назвал фотофорезом [2].

Существуют различные взгляды на причины, обуславливающие явление фотофореза, но наиболее распространены две теории. Согласно одной из них, в основе явления лежит действие на частицу светового давления (хорошо описывается положительный фотофорез). Согласно другой теории, явление объясняется термофоретическими силами. По-видимому, на самом деле, имеют место оба описанных выше явления, преобладание одного из них над другим обуславливается размером, формой, окраской и структурой поверхности аэрозольных частиц.

3.6 Электризация аэрозолей

Аэрозоли могут заряжаться в процессе своего образования и в дальнейшем этот заряд может изменяться вследствие коагуляции и захвата ионов частицами. Даже если аэрозоль первоначально не заряжен, возможен захват атмосферных ионов частицами.

Электризация пылей осуществляется в основном за счёт трения или контакта между частицами, различающимися по размерам или по состоянию поверхности. Зарядка частиц пыли происходит путём передачи электронов при отрыве частиц друг от друга в процессе дисперги-

рования. Степень асимметрии заряда зависит от соотношения числа частиц, соприкоснувшихся со стенкой сосуда, и частиц, соприкоснувшихся только друг с другом.

М. Де Бройль определил, что при распылении неполярных жидкостей капельки не заряжаются, в то время как капельки полярных жидкостей могут иметь весьма значительный заряд. Заряд зависит от числа положительных и отрицательных ионов, находящихся в капельке в момент её отщепления от жидкости [1,2]:

$$\overline{\sigma^2} = 2N \cdot V,$$

где $\overline{\sigma^2}$ – средний квадрат заряда капельки, выраженный через число элементарных зарядов;

N – концентрация ионов одного заряда в жидкости;

V – объём капельки.

Частицы конденсационных аэрозолей, полученных при умеренных температурах, как правило, не заряжены, но вследствие диффузии к ним газовых ионов постепенно заряжаются. Доля заряженных частиц зависит от их размера, но число положительных и отрицательных частиц в отсутствие пристеночного эффекта примерно одинаково:

$$q^+ \approx q^- = \sqrt{2r \cdot k \cdot T / \pi}$$

где k – постоянная Больцмана;

r – радиус частицы;

T – температура.

В противоположность конденсационным аэрозолям, дымы, образующиеся при горении, с самого начала имеют высокий заряд (до 90 % частиц), при этом количество положительных и отрицательных частиц примерно одинаково. Так, в табачном дыме (размер частиц 0,10 – 0,25 мкм) 40 % положительных частиц, 34 % – отрицательных, 26 % – нейтральных.

3.7 Оптические свойства аэрозолей

Рассеяние, отражение и поглощение света аэрозолями зависит от размера, формы и природы частиц, а также от длины волны падающего света.

Рассмотрим несколько основных величин из теории рассеяния. Фактор эффективности рассеяния k_s , равный отношению «сечения рассеяния» частицы (суммарный поток лучистой энергии, рассеиваемый

частицей во всех направлениях, отнесённый к единице интенсивности падающего на частицу потока энергии) к её геометрическому поперечному сечению, зависит от ряда факторов:

1. Отношение радиуса частицы r к длине световой волны, обычно применяют параметр $\alpha=2\pi \cdot r/\lambda$.
2. Отношение показателей преломления частицы и среды m .
3. Угол между направлением падающего и рассеянного света или дополнительный угол $\gamma=180^\circ-\Theta$.

Полное аналитическое решение для рассеяния излучения сферическими частицами, сравнимыми по размерам с длиной волны падающего излучения, получено Ми. Уравнение Ми записывается в виде [1,2]:

$$I_\theta = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 \cdot R^2} \cdot (i_1 + i_2),$$

где I_θ – интенсивность рассеянного в направлении света (рассчитанная на единицу интенсивности падающего света);

R – расстояние от точки наблюдения до частицы.

Из теории следует (и это подтверждено экспериментально), что свет, рассеянный частицей, состоит из двух некогерентных (независимых) плоскополяризованных компонент, плоскости которых взаимно перпендикулярны. Колебания компоненты с интенсивностью i_1 перпендикулярны плоскости наблюдения, а компоненты с интенсивностью i_2 параллельны ей. Эти компоненты выражаются рядами, коэффициенты в которых a_n и b_n содержат функции Бесселя, Ханкеля и Лежандра и параметры α и m .

Полное рассеяние одной частицей («сечение рассеяния») выражается рядом:

$$S = \frac{\lambda^2}{2\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \cdot (|a_n|^2 + |b_n|^2),$$

а фактор эффективности рассеяния $k_s = S / (\pi r^2)$.

Для любой данной длины волны уравнение Ми может быть упрощено в небольшом интервале значений радиусов частиц. Интенсивность излучения, рассеянного в данном направлении определённым объёмом аэрозоля, становится пропорциональной счётной концентрации частиц n :

$$I = k \cdot r^p \cdot n,$$

где k и p – показатели, зависят от угла рассеяния.

Теория Ми объясняет происхождение цветовых эффектов, наблюдаемых в атмосфере при пропускании солнечного света. Обычно солнечный диск, видимый сквозь туман или тонкое облако, кажется белым, так как вследствие очень широкого распределения капелек по размерам пропускание света почти не зависит от длины волны [1].

Если облако полидисперсно, но все частицы имеют радиус меньше 0,5 мкм, то в прошедшем через облако свете все же будет преобладать красный цвет, поскольку капельки воды таких размеров рассеивают голубой свет сильнее, чем красный. Цвет солнца на закате обычно бывает красным из-за присутствия в атмосфере мелких частиц дымки. По мере того как солнце садится, его окраска становится более насыщенной благодаря увеличению селективного рассеяния, и последний луч (перед тем как солнце скроется за горизонт) окрашен в багрово-красный цвет. Картина цветовых эффектов меняется при радиусах капелек воды в пределах от 0,8 до 1,0 мкм, в этом случае солнце будет казаться голубым или зеленым. Аналогичное обращение происходит при переходе от радиуса 1,0 до 2,0 мкм. Таким образом, аномальные цветовые явления в атмосфере могут быть объяснены тем, что атмосферные аэрозоли весьма близки к монодисперсным и размер частиц в них таков, что они преимущественно пропускают голубой или зеленый цвет.

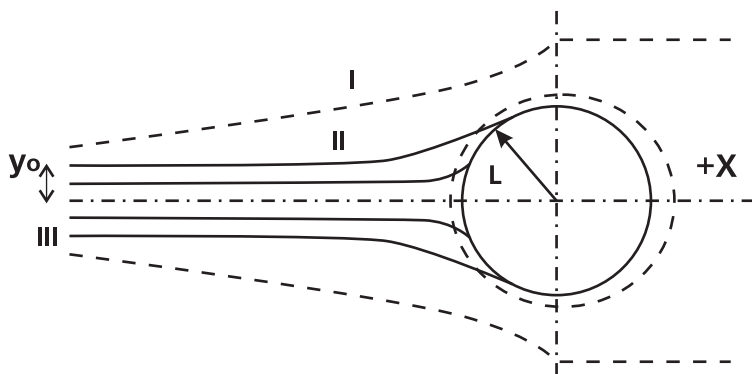
К сожалению, до настоящего времени нет удовлетворительной теории рассеяния и пропускания света полидисперсными системами.

3.8 Осаждение аэрозольных частиц

Среди вопросов, связанных с осаждением аэрозолей, большую роль играют те случаи осаждения, которые находят применение в практике очистки от аэрозолей:

- инерционное осаждение на препятствиях;
- инерционное осаждение на падающих каплях;
- инерционное осаждение из прямоугольных и круглых струй;
- осаждение в электрическом поле.

Инерционное осаждение на препятствиях [1] является, прежде всего, следствием инерции частицы, принуждающей её двигаться поперек изогнутых линий тока, в результате чего она сталкивается с препятствием, вызвавшим искривление линий тока, и во многих случаях прилипает к нему (см. рис. 4).



I – линия тока.

II – траектория касающейся частицы.

III – траектория оседающей частицы.

Рисунок 4 – Поле течения

Кроме инерции здесь играют роль и другие факторы. В случае сравнительно больших частиц существенное значение имеет эффект зацепления. Коэффициент захвата E может быть определен как отношение числа частиц, соударяющихся с препятствием, к числу частиц, которые соударялись бы, если бы линии тока не отклонялись препятствием:

$$E = y_0 / L ,$$

где y_0 – расстояние от центральной линии (оси x) до крайней линии тока, двигаясь по которой частицы еще захватываются цилиндром;

L – радиус цилиндра.

Для эффективности захвата важны три фактора:

- поле течения или распределения скоростей течения среды вблизи препятствия;
- траектория частицы, зависящая от ее массы, сопротивления среды ее движению, размера и формы препятствия, скорости воздушного потока;
- прилипаемость частиц к препятствию.

Инерционное осаждение на падающих каплях предоставляет особый случай инерционного осаждения на сферах. При этом вводится безразмерный параметр:

$$k = \frac{\lambda}{R} = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot \rho \cdot v}{R \cdot \eta},$$

где λ – инерционный пробег частицы радиусом r , вброшенной в неподвижный воздух со скоростью v ;

R – радиус улавливающей капли.

Критическое значение величины k , при котором частицы начнут захватываться каплей при потенциальном течении, равно $1/12$ (т.е. с каплей столкнутся лишь те частицы, инерционный пробег которых превосходит $1/12$ радиуса капли).

Осаждение в электрическом поле достигается при искусственной зарядке аэрозольных частиц. В случае применимости закона Стокса скорость движения заряженной частицы к электродам определяется:

$$v = \frac{n \cdot e \cdot E}{6\pi \cdot \eta \cdot r},$$

где n – число элементарных зарядов e на частице;

E – напряженность поля.

Эффективность осаждения аэрозолей в электрическом поле будет рассматриваться позже.

3.9 Фильтрация аэрозолей

Фильтрация (лат. *filtrum* – войлок, англ., франц. *filtration*) – это процесс разделения неоднородных систем (например, суспензия, аэрозоль) при помощи пористых перегородок, пропускающих дисперсионную среду и задерживающих дисперсную твердую фазу. Движущая сила процесса – разность давлений по обе стороны пористой перегородки.

Твердые частицы, уловленные в объеме фильтрующего материала или образующие пылевой слой на его поверхности, становятся для вновь поступающих частиц элементом фильтрующей среды, повышая эффективность очистки газов. Однако по мере накопления уловленных частиц газопроницаемость фильтрующего материала уменьшается, поэтому со временем возникает необходимость разрушения и удаления пылевого осадка.

Этот специфичный случай осаждения аэрозолей имеет место при пропускании аэрозоля через слой волокон.

Главное отличие между фильтрацией и простым случаем осаждения частиц на индивидуальном цилиндре заключается во влиянии большого числа препятствий на поле течения воздуха.

При улавливании частиц фильтровальной перегородкой наблюдаются следующие нижеописанные эффекты [1].

Касание. Частицы переносятся вдоль линии тока газа к препятствию. Когда частица приблизится на расстояние меньше ее радиуса, происходит касание и зацепление.

Инерционный захват. Частица движется по линии тока в обход препятствия; однако, под действием сил инерции она отклоняется и сталкивается с препятствием. Этот вид эффекта мало сказывается при диаметре частиц более 1 мкм.

Диффузия. В силу броуновского движения при диаметре частиц менее 1 мкм частица перемещается хаотично и может осесть на волокне из-за случайного отклонения.

Электростатическое осаждение. Обусловлено притяжением разноименных зарядов частиц и препятствия.

Термофорез. Частица смещается к препятствию под действием температурного градиента (термофоретических сил).

Гравитационное осаждение. Происходит под действием сил притяжения.

Ситовый эффект. Если размеры частицы слишком велики для того, чтобы пройти через поры или каналы в перегородке, происходит осаждение.

При расчетах фильтрации исходят из аддитивности их действия с учетом результатов эксперимента.

Осаждение частиц, особенно твёрдых, на волокнах может сопровождаться их агрегацией с соответствующим изменением геометрии системы, её проницаемости и, следовательно, эффективности фильтра.

При этом в большинстве случаев течение воздуха через фильтры из волокон можно считать ламинарным, т.е. турбулизация потока отсутствует. Если размер частиц порядка несколько микронов или десятых долей микрона, то инерционное и гравитационное осаждение не играют существенной роли, и основными факторами в процессе фильтрации становятся эффекты зацепления и броуновская диффузия частиц. Благодаря броуновскому движению частицы отклоняются от линии тока, а это увеличивает вероятность их соприкосновения с волокном, резко возрастающую с уменьшением размера частиц.

Во всех теориях фильтрации предполагается, что каждое соударение между частицей и волокном эффективно и что частица прилипает к волокну под действием молекулярных сил.

Эффективность фильтрации зависит:

1. От размера частиц (установлено, что существует радиус частиц, при котором их проскок через фильтр максимален и зависит от вида материала фильтра).
2. От скорости течения (существует определённая скорость, при которой существенное значение может иметь неприлипание частиц или их срыв с поверхности волокна).
3. От заряженности частиц.

Немаловажным фактором является процесс фильтрации в фильтрах, волокна которых покрыты слоем наэлектризованных трением частиц смолы. При этом электростатический эффект для мелких аэрозольных частиц значительно превышает эффект зацепления.

Вопросы для самоконтроля

1. Вычислите и сравните скорости оседания в воздухе частиц аэрозоля хлорида аммония радиусом 10^{-6} , 10^{-7} м при температуре 293 К. Плотность вещества дисперсной фазы $1,5 \cdot 10^3$ кг/м³ (плотностью воздуха можно пренебречь). Вязкость вещества дисперсионной среды равна $1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с.
2. Используя уравнение седиментационно-диффузионного равновесия, вычислите высоту, на которой концентрация частиц оксида алюминия с радиусом частицы 10^{-8} м будет вдвое меньше, чем у дна сосуда. Температура равна 293 К. Плотность вещества дисперсной фазы равна $4 \cdot 10^3$ кг/м³, плотностью дисперсионной среды можно пренебречь.
3. Что является основой для теории броуновской коагуляции по Смолуховскому?
4. Какие факторы влияют на скорость коагуляции аэрозольных частиц?
5. Что собой представляют термофоретические силы?
6. Опишите процесс фотофореза?
7. За счет протекания каких процессов происходит электризация аэрозольных частиц?
8. От каких факторов зависит эффективность рассеяния?
9. Какие эффекты наблюдаются в процессе фильтрации аэрозолей?

4 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ В АЭРОЗОЛЯХ

Определение числа аэрозольных частиц, изучение их свойств можно производить либо косвенными методами – путём предварительного отделения дисперсной фазы от газовой среды с последующим исследованием осаждённых частиц, либо с помощью прямых методов (преимущественно оптических) изучения числа и свойств частиц в определённом объёме. В последнем случае в кинетику аэрозольного облака не вносятся заметных нарушений.

Важным критерием при оценке различных способов является эффективность отделения дисперсной фазы от дисперсионной газовой (парообразной) среды. С этой точки зрения методы делятся на *абсолютные* и *избирательные* (селективные). При избирательных методах из всего широкого спектра частиц отбираются частицы только в определённой области размеров.

Отличительным признаком методов изучения аэрозолей является способ выражения концентрации. Обычно определяют либо *весовую (гравиметрическую)* концентрацию – это вес аэрозольных частиц, содержащихся в единице объема газовой среды (выражается в $\text{мг}/\text{м}^3$), либо *счетную (кониметрическую)* концентрацию – это число частиц, содержащихся в единице объёма газовой фазы (выражается числом частиц/ см^3 или числом частиц/ м^3).

Выбор того или другого метода исследования зависит от следующих обстоятельств:

- Цели измерения и требуемой точности результатов.
- Физического состояния, химического состава и особенностей биологического воздействия аэрозольного облака.
- Примерного размера и формы аэрозольных частиц, порядка величины их концентрации.
- Микроклиматических условий.

4.1 Седиментационные методы

Эти методы являются наиболее старыми и наиболее простыми. Размер седиментирующихся частиц лежит обычно в области 1–30 мкм. Положительная черта этого метода – его простота, отрицательная – сравнительно длительное время отбора пробы. Кроме того, он может быть использован лишь для грубодисперсных аэрозолей, желательнее с

твёрдой дисперсной фазой, поскольку для жидких частиц характерно испарение.

Эти методы имеют две разновидности. В первом случае исследуемый аэрозоль помещается в некоторый ограниченный объём, в котором происходит седиментация. Применение этой разновидности метода даёт возможность определять кониметрическую или гравиметрическую концентрацию. Во втором случае седиментация происходит из неограниченного пространства и результаты измерения обычно выражаются в числе или весе частиц, осаждающихся на единичной площади за определённый промежуток времени. Вторая разновидность метода применяется в системах мониторинга.

Существуют различные конструкции устройств с использованием метода седиментации [1,2].

4.2 Методы, основанные на фильтрации

Эти методы также являются старейшими. При этом захват аэрозольных частиц происходит на основании явления фильтрации в пористых или волокнистых материалах. При этом к фильтрам предъявляется требование *абсолютной эффективности*. Кроме того, важным фактором является и *избирательность*, трактуемая как эффективность фильтрации в зависимости от размера частиц [1,2].

При определении гравиметрической концентрации необходимо использовать фильтры с минимальной массой и гигроскопичностью. Фильтры же для кониметрического анализа должны быть из такого материала, с которого частицы можно было бы «легко смывать».

Широко распространен метод *ватных фильтров*, в котором известный объем газа прокачивается через фильтр из лигнина или стеклянной ваты. По увеличению массы фильтра судят о гравиметрической концентрации.

Широко применяется также метод *мембранных фильтров*, которые изготавливаются из древесной целлюлозы или нитроцеллюлозы. Мембранный фильтр представляет собой тонкий пористый фильтровальный слой толщиной 50-150 мкм. Это – субмикроскопическое двумерное сито с порами примерно одного размера. Поры занимают 70 – 80 % объема фильтра, а на 1 см² поверхности приходится 10⁷ – 10⁸ пор. Чаще всего используются фильтры с диаметром пор 0,3...0,8 мкм. Основными преимуществами этих фильтров являются их малая масса (около 30 мг), негигроскопичность, достаточная прочность, незначительная деформация во время отбора пробы, практически абсолютная эффективность.

4.3 Методы, основанные на инерционном осаждении

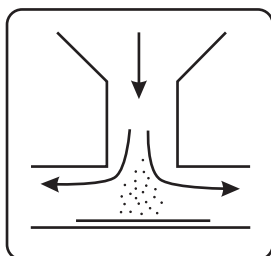


Рисунок 5 – Схема импактора

При этом используется кинетическая энергия (см. рис. 5), которую приобретают частицы в результате увеличения скорости воздушного потока, проходящего узкой струёй через щель со скоростью 10–100 м/с, после чего попадают в пространство, где скорость и направление воздушной струи резко изменяются. Частицы осаждаются на специальной подложке [2].

Эффективность инерционного осадителя (импактора) определяется:

$$\alpha = \frac{C \cdot S \cdot r^2}{\eta \cdot d}$$

где C – скорость движения газа;
 S – плотность аэрозольных частиц;
 r – радиус частиц;
 η – вязкость газа;
 d – ширина щели.

4.4 Методы, основанные на термофорезе

Еще в 1884 г. Дж. Айткен указал на возможность использования явления термофореза для отделения дисперсной фазы аэрозолей от газовой. Метод носит название *термопреципитации* [1, 2].

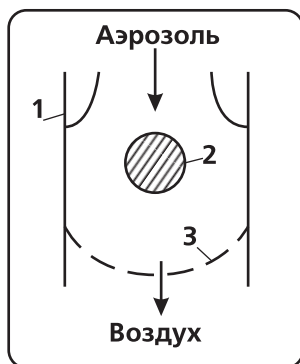


Рисунок 6 – Схема термопреципитатора

Воздух (см. рис. 6), содержащий частицы пыли, проходит через отверстие в головке, состоящей из двух половин и обтекает нить, натянутую перпендикулярно к направлению воздушного потока, движущегося со скоростью 1–3 см/с. Нить нагревается электрическим током до температуры 100–150 °С. Вокруг нее под действием термофоретических сил образуется так называемое обеспыленное пространство 3 и аэрозольные частицы оседают на стеклянных подложках 1, закрепленных на стенках латунной головки. Ширина пятна осадка дисперсной фазы аэрозоля зависит от скорости

прокачки воздуха и температуры проволоки. Длина осадка частиц определяется размером отверстия, через которое прокачивается воздух. Эффективность термопреципитатора зависит прежде всего от дисперсности исследуемого аэрозольного облака (в литературе часто приводятся данные о том, что в термопреципитаторе захватываются все частицы меньше 20 мкм), от скорости движения частиц, вызванного термофоретическими силами, и от скорости прокачки воздуха.. Так как скорость прокачки газового потока обычно мала, в термопреципитаторе устанавливается ламинарное движение газового потока.

Условие, при котором происходит осаждение всех частиц:

$$\frac{v_T}{v_s} = \frac{h}{2d},$$

где v_T – термофоретическая сила;

v_s – скорость прокачки газового потока;

h – диаметр канала;

d – диаметр нити.

4.5 Ультрамикроскопия и тиндалоскопия

Все вышеописанные методы относятся к непрямым (косвенным) методам, связанным с разрушением аэрозоля.

Оптические (простые) методы основаны на явлении рассеяния и поглощения света аэрозольными частицами [1, 2].

Ультрамикроскопия (от лат. *ultra*, греч. *mikros* – маленький и *skopeo* – смотрю), оптический метод наблюдения и анализа коллоидных частиц в жидкой или газовой фазе с помощью ультрамикроскопов. Разработан и реализован Р. Зигмонди и Г. Зидентопфом (1903), создавшими первый целевой ультрамикроскоп. В ультрамикроскопии, позволяющей определять частицы с диаметром более 0,2 мкм, проводятся исследования аэрозольных частиц в тёмном поле, которое возникает либо при боковом освещении предмета, либо при использовании темно-полевых конденсаторов. При этом виден не сам предмет, а свет, рассеянный его поверхностью. При этом нельзя исследовать форму и структуру частиц, а можно лишь определить количество частиц и оценить их дисперсность.

Тиндалоскопия предназначена для определения концентрации пыли и основана на эффекте Тиндала, который возникает при рассеянии света частицами аэрозоля в пылевой камере прибора. Источником света служит лампочка накаливания. Свет лампы с помощью двух призм

разбивается на два пучка световых лучей, один из которых проходит через поворачивающуюся призму, позволяющую ослаблять его интенсивность, а другой — освещает измерительный объем. Объектив прибора сфокусирован на матовую пластинку, одна половина которой освещается светом, прошедшим через вращающуюся призму, а другая — светом, рассеянным исследуемым аэрозолем. При измерении призму с помощью микрометра поворачивают до тех пор, пока освещенности обеих половин пластинки не станут равными. На шкале микрометра нанесена так называемая Тиндаллова величина. Эта величина может быть выражена через число частиц в 1 см^3 или через гравиметрическую концентрацию.

В заключение следует отметить, что для проведения лабораторных исследований аэрозолей наиболее широко применяются наряду с оптическими методами термопреципитация и мембранные фильтры, так как отобранные с их помощью пробы позволяют проводить микроскопическое и электронномикроскопическое изучение осажденных частиц. Значительно реже в лабораторной практике используются седиментационные методы и методы, основанные на инерционном осаждении частиц.

При измерениях в полевых условиях, где возможен чрезвычайно широкий спектр частиц по дисперсности, стремятся использовать простейшие методы. При этом, чтобы частицы некоторых размеров не оказались за пределами чувствительности прибора, измерения обычно проводятся несколькими методами одновременно. Наиболее удобными для полевых работ являются методы фильтрации, седиментации и инерционного осаждения.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем различие прямых и косвенных методов исследования аэрозолей?
2. В чем отличие двух разновидностей седиментационного метода исследования аэрозолей?
3. Охарактеризуйте сущность фильтрационного метода исследования аэрозолей.
4. Каковы особенности осуществления метода термопреципитации?
5. Охарактеризуйте сущность метода ультрамикроскопии.
6. В чем суть тиндалоскопии?

5 ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЕЙ

5.1 Форма и строение частиц

Большинство пылей состоит из частиц неправильной формы, и даже взвешенные частицы нередко представляют собой рыхлые бесформенные агрегаты.

Образующиеся путем конденсации дымы твёрдых веществ обычно состоят из сферических аморфных частиц, которые могут коагулировать, образуя агрегаты определённой структуры.

Конденсационные дымы с жидкими частицами и туманы состоят из сферических капелек, при слиянии которых вновь образуются сферы [2].

5.2 Дисперсность аэрозольных частиц

Для характеристики аэрозольного облака и его свойств очень часто необходимо знать, как распределяется множество частиц по размерам. В аэрозольном облаке (комплекс очень большого числа аэрозольных частиц, взвешенных в большом объеме газа) могут присутствовать частицы различных размеров. По тому, представлены ли в таком облаке частицы лишь одного размера или частицы разных размеров, различают аэрозоли *монодисперсные* (с частицами одинаковых размеров) и *полидисперсные* (с частицами разных размеров). Разумеется, полидисперсные аэрозоли являются более распространенными, чем монодисперсные [1,2,4].

Макрофизические свойства полидисперсного аэрозоля определяются в первую очередь средним размером частиц, представительностью частиц отдельных размеров, а также шириной всего спектра размеров. Поэтому для полидисперсных аэрозолей очень важно установить распределение размеров частиц. Распределение размеров аэрозольных частиц может быть выражено несколькими способами [1,2,4].

1. Счетное распределение. Доля частиц d_n , чьи радиусы лежат в интервале $(r, r+dr)$, есть $dn=f(r) \cdot dr$ причём $\int f(r) \cdot dr=1$.

Кривая (рис. 7), изображающая функцию $f(r)$, называется *дифференциальной кривой дисперсности* или *дифференциальной кривой счётного распределения частиц в аэрозоле*. Эту кривую дисперсности можно получить различными методами (измерением под микроскопом, по степени седиментации, с помощью хроматографии или рентгенографии, путем изучения поглощения и рассеяния света и т. д.).

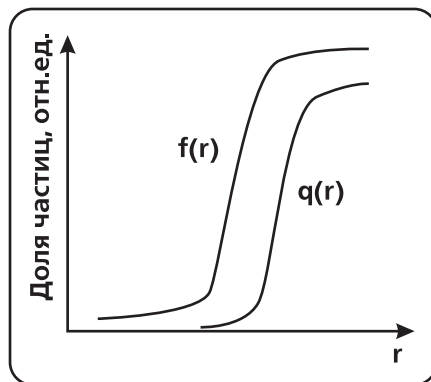


Рисунок 7 – Форма дифференциальной кривой

2. *Массовое распределение.* Распределение частиц по массе выражается уравнением, аналогичным $dn_v=q(r)\cdot dr$ причём $\int q(r)\cdot dr=1$ (см. рис. 7).

Это – дифференциальная кривая распределения по массе частиц.

3. *Интегральные кривые распределения размеров по числу и массе частиц.* На практике часто вместо дифференциальных кривых пользуются интегральными кривыми распределения (см. рис. 8), показывающими, какая доля частиц имеет радиус больше или меньше данной величины r . Соответствующие функции распределения по числу частиц получают путём интегрирования функций $f(r)$ от r до ∞ и от 0 до r .

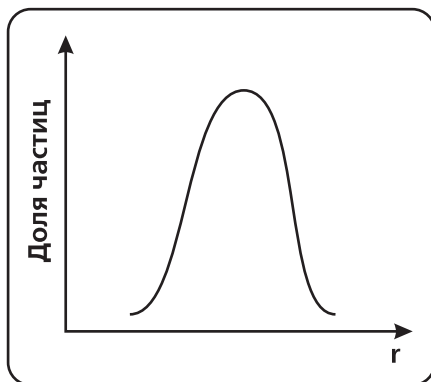


Рисунок 8 – Форма интегральной кривой

5.3 Плотность частиц

Различают истинную, кажущуюся и насыпную плотность частиц [4].

Истинная плотность определяется как отношение массы частиц к занимаемому ими объёму за вычетом объёма пор и газовых включений.

Кажущаяся плотность определяется как отношение массы частиц к занимаемому ими объёму, включая объём пор и газовых включений.

Насыпная плотность определяется отношением массы свеженасыпанных частиц к занимаемому ими объёму с учетом наличия воздушных промежутков между частицами.

Для их определения используется традиционный метод пикнометрии [4].

5.4 Адгезионные свойства частиц

Эксплуатационная надёжность систем улавливания аэрозолей во многом зависит от сцепления аэрозольных частиц друг с другом. За этими свойствами закрепился термин «слипаемость». Основным количественным показателем её является так называемая величина разрывной прочности специально сформованных пылевых слоёв [4].

По величине разрывной прочности пыли делятся на следующие группы слипаемости:

- Не слипающиеся ($P \leq 60$ Па);
- Слабослипающиеся ($60 < P < 300$ Па);
- Среднеслипающиеся ($300 < P < 600$ Па);
- Сильнослипающиеся ($P > 600$ Па);

Со слипаемостью тесно связана другая характеристика аэрозольных частиц – *сыпучесть*, оцениваемая по углу естественного откоса, который принимает пыль в свеженасыпанном состоянии.

5.5 Абразивность частиц

Истирающее действие аэрозольных частиц должно учитываться при выборе скоростей движения аэрозавеси, толщины металла для изготовления газоходов и газоочистных установок.

Коэффициент абразивности a определяется как утончение стенки поперечно обтекаемой трубы из стали 20 в местах её максимального износа при концентрации частиц 1 г/м^3 и скорости потока 1 м/с , при равномерном распределении скоростей и концентраций при комнатной температуре в течение 1 ч [4].

5.6 Удельное электрическое сопротивление слоя частиц

Оно существенно влияет на эффективность работы установок электрической чистки газов. Метод определения величины удельного электрического сопротивления слоя частиц (УЭС) предусматривает формирование слоя аэрозольных частиц между специальными измерительными электродами.

В зависимости от величины УЭС пыли делят на три группы [4]:

- Низкоомные пыли с величиной $\rho_{\text{сл.}} < 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, которые при осаждении на электроде мгновенно разряжаются;
- Пыли с величиной $\rho_{\text{сл.}} = 10^4 - 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, хорошо улавливаются, так как разрядка частиц происходит не сразу, а в течение времени, необходимого для накопления слоя;
- Пыли с величиной $\rho_{\text{сл.}} > 10^{10} - 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, которые образуют на электродах плотные пористые изолирующие слои, снижающие эффективность очистки.

Величина УЭС зависит от рода материала пыли, от дисперсного состава, температуры и влажности газа, а также от условий осаждения пыли.

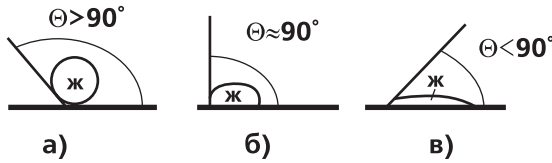
5.7 Смачиваемость и гигроскопичность пыли

Эти характеристики играют большую роль в процессе работы аппаратов мокрого пылеулавливания. Желательно иметь дело с хорошо смачиваемыми аэрозольными частицами, поскольку в противном случае возможен возврат частиц в газовый поток.

Для определения смачиваемости частиц применяется метод плёночной флотации. Суть метода заключается в определении доли смочившихся аэрозольных частиц (осевших на дно флотатора) в общей массе частиц, взятой для исследования. По смачиваемости, определённой методом плёночной флотации, промышленная пыль классифицируется на три группы [4]:

- Плохо смачиваемая – от 0 до 30 %;
- Средне смачиваемая – от 30 до 80 %;
- Хорошо смачиваемая – от 80 до 100 %.

Гигроскопичность (от др.-греч. *υγρος* – влажный и *σκοπεω* – наблюдаю) – свойство некоторых веществ поглощать водяные пары из воздуха. По гигроскопичности (см. рис. 9) с учетом величины краевого угла смачивания различают пыли гидрофобные или гидрофильные [4].



Θ – краевой угол смачивания;

а) гидрофобные; б) пограничное состояние; в) гидрофильные.

Рисунок 9 – Состояние капель

5.8 Удельная поверхность пыли

Ею называется отношение поверхности частиц пыли к их массе или объёму. По величине удельной поверхности можно судить о степени дисперсности пыли: чем она больше, тем выше степень дисперсности.

Если условно предположить, что все частицы имеют одинаковый размер и шарообразную форму, то, зная удельную поверхность, можно вычислить средний диаметр частиц [4]:

$$S = \frac{n \cdot S_q}{n \cdot V_q} = \frac{n \cdot \pi \cdot d_{CP}^2}{n \cdot \pi \cdot d_{CP}^3 / 6} = \frac{6}{d_{CP}}; \quad d_{CP} = \frac{6}{S},$$

где n – число частиц;

S – удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{см}^3$.

5.9 Пожаро- и взрывоопасность частиц пыли

Многие виды пыли из-за сильно развитой поверхности частиц способны гореть, самовоспламеняться, образовывать с воздухом взрывоопасные смеси даже в тех случаях, когда исходный материал, из которого получены аэрозольные частицы, является негорючим и невзрывоопасным. Наиболее опасным является свойство многих пылей образовывать с воздухом взрывоопасные смеси.

Среди характеристик пожаро- и взрывоопасности можно выделить [4]:

- температура воспламенения – наименьшая температура аэрозвеси, при которой выделяются горючие пары или газы с такой скоростью, что после воспламенения их от внешнего источника зажигания аэрозвесь устойчиво горит;

- *температура самовоспламенения* – наименьшая температура взвеси, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, приводящее к возникновению пламенного горения;
- *нижний предел воспламенения* – наименьшая концентрация аэрозольных частиц в взвеси, при которой взвесь способна воспламениться;
- *верхний предел взрыва (воспламенения)* – наибольшая концентрация аэрозольных частиц, при которой возможен взрыв;
- *максимальное давление взрыва* – наибольшее давление, возникающее при взрыве пожаровзрывоопасной взвеси в замкнутом сосуде.

Область концентрации между верхним и нижним пределом воспламенения называют *диапазоном воспламенения*.

Эти характеристики определяются экспериментально в специальных установках.

В зависимости от скорости распространения фронта пламени различают *воспламенение*, сопровождающееся спокойным сгоранием взвеси; *вспышку*, при которой скорость горения взвеси находится в пределах от 4 до 10 м/с; *взрыв*, при котором скорость горения взвеси более 100 м/с; *детонацию*, при которой скорость горения взвеси более 1000 м/с.

5.10 Минералогический состав аэрозольных проб

Материал дисперсной фазы взвеси может формироваться из различных веществ, при этом различие отмечается как в химическом составе, так и в минералогическом составе. Определение химического состава аэрозольных частиц осуществляется обычными аналитическими методами.

Определение содержания отдельных минералов в аэрозолях с кристаллической дисперсной фазой можно проводить методами петрографии. Пробы для петрографического анализа аэрозолей минералов отбираются с помощью фильтрации (мембранные ультрафильтры, фильтры Соксхлетова и др.), электростатического преципитатора или термопреципитатора.

Петрографическое определение содержания различных минералов в аэрозольной пробе основано на измерении оптических свойств микросталлов. Петрографический анализ аэрозолей минералов позволяет получить дополнительные данные к результатам химического анализа, определяющего отдельные элементарные соединения и ионы. Основ-

ным свойством, характеризующим минеральные микрокристаллы, является, безусловно, их показатель преломления. В случае больших кристаллов не менее 10^{-3} см можно также определить их двойное лучепреломление, плеохроизм и гашение света. Для проведения петрографического анализа необходимо иметь поляризационный микроскоп и набор эталонных жидкостей с известными показателями преломления [2].

Определение коэффициента преломления микрокристаллов аэрозоля. Для определения коэффициентов преломления кристаллов аэрозолей используется набор жидкостей, коэффициенты преломления которых лежат в диапазоне 1,420–1,770. Жидкости должны быть тщательно очищены путем перегонки. Коэффициенты преломления жидкостей, не превышающие 1,700, измеряют рефрактометром Аббе, а превышающие 1,700 — методом минимального отклонения призматического гониометра. Необходимый при анализе коэффициент преломления можно получить смешиванием нескольких жидкостей в определенных пропорциях. Кроме того, коэффициент преломления зависит от температуры (при изменении температуры на $\pm 1^\circ\text{C}$ коэффициент преломления изменяется на величину от $\pm 0,004$ до $\pm 0,007$) [2].

Коэффициент преломления микрокристаллов определяется следующим образом. Анализируемая проба помещается на предметное стекло микроскопа. Если проба отбиралась в термопреципитаторе или импакторе, то петрографический анализ проводится прямо на стеклянной подложке прибора.

На пробу капают жидкостью с известным показателем преломления и исследуют под микроскопом. Известно, что минимальные частицы, еще видимые в обычный оптический микроскоп, имеют размер около 0,2 мкм. Такое разрешение достигается путем измерения в центральном пучке лучей с помощью иммерсионного объектива.

Проба аэрозоля, находящаяся в жидкости или смеси жидкостей с известным показателем преломления, рассматривается под микроскопом при постоянном увеличении. Если коэффициенты преломления частицы и стандартной жидкости примерно равны, то частица будет невидимой. Если показатель преломления частицы больше, чем жидкости, то частица выглядит ярче среды, если меньше, частица кажется темным пятном. Однако видимость частицы (при одинаковом показателе преломления частицы и среды) зависит и от ее размера, что в отдельных случаях является причиной значительного искажения результатов.

Определение двойного лучепреломления. При наблюдении через скрещенные николи или поляризационные пластинки кристаллические частицы выглядят светлыми пятнами на темном фоне (в отличие от аморфных тел, которые кажутся темными). При этом кристаллики окрашены в определенный цвет, зависящий от разницы между максимальным и минимальным значениями величины показателя преломления для данного кристалла, толщины зерна и ориентации столика микроскопа. Чем больше двойное лучепреломление, тем интенсивнее окраска кристалла [2].

Плеохроизм. Некоторые кристаллы после облучения их ярким светом начинают сами излучать свет определенной длины волны, причем очень часто свет, испускаемый в различных направлениях, имеет разную длину волны. Таким образом, при повороте кристалла на 90° изменяется его окраска (например, биотит в смеси с железом и слюдой меняет свой цвет с темно-коричневого на соломенно-желтый) [2].

Помимо указанных петрографических свойств у кристаллических аэрозолей определяют также структуру поверхности, внешний вид и цвет.

Вопросы для самоконтроля

1. В каких видах представляется кривая дисперсности аэрозольных частиц?
2. Охарактеризуйте разновидности плотности аэрозольных частиц.
3. Перечислите и охарактеризуйте группы слипаемости аэрозольных частиц.
4. Как определяется коэффициент абразивности аэрозольных частиц?
5. Перечислите и охарактеризуйте разновидности пылей по величине удельного электрического сопротивления слоя аэрозольных частиц.
6. Какова количественная характеристика смачиваемости аэрозольных частиц?
7. Перечислите и опишите характеристики пожаро- и взрывоопасности слоев аэрозольных частиц.
8. На чем основан петрографический анализ проб аэрозольных частиц?
9. В чем суть плеохроизма?

6 МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ АЭРОЗОЛЕЙ

Для обезвреживания аэрозолей используют сухие, мокрые и электрические методы. Кроме того, аппараты отличаются друг от друга, как по конструкции, так и по принципу осаждения аэрозольных частиц. В основе работы аппаратов сухой очистки лежат гравитационные, инерционные и центробежные механизмы осаждения, а также фильтрационные методы. В мокрых пылеуловителях осуществляется контакт запыленных газов с жидкостью. При этом осаждение происходит на капли, на поверхность газовых пузырей или на пленку жидкости. В электрофильтрах (аппаратах электрической очистки) отделение заряженных частиц происходит на осадительных электродах.

Выбор метода и аппарата для улавливания аэрозольных частиц в первую очередь зависит от их дисперсного состава (с преимущественным применением) [4,5] (см. табл. 4).

Таблица 4 – Выбор аппарата в зависимости от дисперсного состава

Диаметр частиц, мкм	Аппарат
40 - 1000	Пылеосадительная камера
20 - 1000	Циклоны диаметром 1-2 м
5 - 1000	Циклоны диаметром менее 1 м
20 - 100	Скрубберы
0,9 - 100	Тканевые фильтры
0,05 - 100	Волокнистые фильтры
0,01 - 10	Электрофильтры

Способы улавливания аэрозольных частиц по применяемому механизму или принципу осаждения можно разделить на следующие группы:

- гравитационное осаждение;
- инерционное улавливание;
- центробежное улавливание;
- мокрое пылеулавливание;
- электростатическое осаждение;
- фильтрация;
- звуковая и ультразвуковая коагуляция.

Во многих промышленных установках очистки газов от аэрозольных частиц применяется комбинация нескольких способов.

Эффективность улавливания (степень очистки, коэффициент полезного действия, коэффициент очистки) определяется как отношение:

$$\eta = \frac{M_{ул}}{M_{вх}} \cdot 100,$$

где η – степень очистки, %;

$M_{ул}$, $M_{вх}$ – масса аэрозольных частиц, соответственно, уловленных в системе очистки и поступающих в систему очистки.

Кроме того, степень совершенства того или иного аппарата очистки характеризуется достигаемым с его помощью фракционным или парциальным коэффициентом очистки. Фракционный коэффициент очистки определяется как отношение массы уловленных в системе очистки аэрозольных частиц данной фракции к массе частиц данной фракции, поступающей в систему очистки. Парциальный коэффициент очистки равен отношению числа аэрозольных частиц данного размера, уловленных в аппарате, к числу частиц этого же размера на входе в аппарат [4,5].

Полный коэффициент очистки может быть определен по фракционному составу аэрозоля и величинам фракционных коэффициентов очистки:

$$\eta = \sum \eta_{\phi} \cdot \frac{\Phi_{вх}}{100},$$

где $\Phi_{вх}$ – доля аэрозольных частиц данной фракции на входе в аппарат, %.

Иногда эффективность улавливания аэрозольных частиц может быть выражена в виде коэффициента проскока частиц (степени неполноты улавливания):

$$K_{пр} = 1 - \eta$$

6.1 Гравитационное осаждение

Суть данного механизма очистки от аэрозольных частиц основана на свойстве взвешенных частиц оседать под действием силы тяжести при ламинарном режиме движения газового потока в аппарате – длинной пылеосадительной камере. Во избежание турбулизации потока применяются камеры большого поперечного сечения и длины, однако и при этом осаждаются лишь наиболее крупные частицы. Для уменьшения

завихрений вводятся отклоняющие перегородки и цепные завесы, а для снижения высоты осаждения частиц – горизонтальные полки. Однако даже аэрозольные частицы кварца диаметром 50 мкм падают лишь со скоростью 20 см/с, поэтому осадительные камеры практически непригодны для удаления частиц размером менее 50 мкм. Для достижения приемлемой эффективности очистки газов необходимо, чтобы частицы находились в камере возможно более продолжительное время [4,5].

В качестве аппаратов гравитационного осаждения используются пылеосадительные камеры (см. рис. 10).

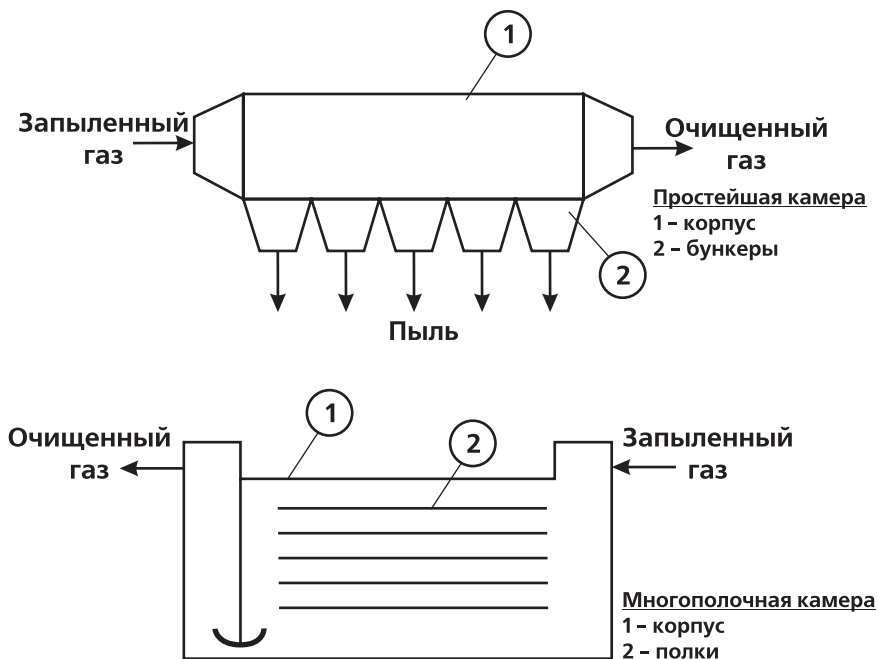


Рисунок 10 – Различные виды пылеосадительных камер

Материалом для постройки пылеосадительных камер могут служить кирпич или сборный железобетон, реже – сталь и дерево (для холодных газов).

Габариты камеры, необходимые для седиментационного осаждения аэрозольных частиц крупнее заданного размера d_z , обычно подбираются с помощью приблизительного соотношения:

$$L = H \cdot \frac{v_r}{v_3},$$

где L , H – длина и высота камеры;

v_r – скорость движения газового потока в камере (обычно выбирается в пределах от 0,2 до 0,8 м/с);

v_3 – скорость витания частиц заданного размера d_3 (находится по номограммам [4,5]).

Для равномерного газораспределения по сечению пылеосадительные камеры могут снабжаться диффузорами и газораспределительными решетками, а для снижения высоты осаждения частиц – горизонтальными или наклонными полками. В некоторых конструкциях пылеосадительных камер для повышения их эффективности предусматривается устройство цепных или проволочных завес и отклоняющих перегородок. Это позволяет дополнительно к гравитационному эффекту использовать эффект инерционного осаждения частиц при обтекании потоком газов различных препятствий.

Подробный расчет пылеосадительных камер изложен в работе [4].

Преимуществами гравитационного осаждения являются:

- малое гидравлическое сопротивление;
- простота и надежность конструкции;
- отсутствие движущихся частей;
- возможность удалять из газового потока фракции крупных аэрозольных частиц, обладающих повышенным абразивным действием.

Наиболее существенными недостатками гравитационного осаждения являются:

- значительные объемы аппаратуры;
- низкая эффективность очистки от аэрозольных частиц диаметром менее 50 мкм.

Вследствие этого, аппараты гравитационного осаждения целесообразно использовать в качестве первой (грубой) ступени очистки аэрозольных потоков перед более эффективными пылеуловителями.

6.2 Инерционное улавливание

Инерционное улавливание основано на стремлении аэрозольных частиц сохранять первоначальное направление движения при отклонении линий тока газа в сторону. Ниже приведены различные конструкции аппаратов инерционного улавливания (см. рис. 11, 12) [4,5].

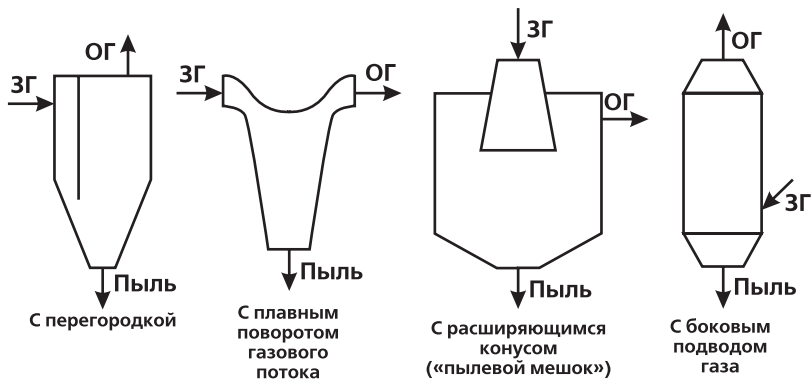


Рисунок 11 – Инерционные пылеуловители

В дальнейшем будут применяться аббревиатуры: ЗГ – загрязненный газ; ОГ – очищенный газ; П – пыль; Ш – шлам.

Камера с плавным поворотом газового потока имеет меньшее гидравлическое сопротивление по сравнению с другими аппаратами. Скорость газа в сечении камеры обычно принимают равной 1 м/с. Для аэрозольных частиц диаметром 25-30 мкм достигается степень очистки 65-80 %. Такие камеры применяют на предприятиях черной и цветной металлургии, при этом чаще всего они встраиваются в газоходы. Эффективность очистки существенно зависит от вида аэрозольных частиц [4,5].

Жалюзийный пылеуловитель

Достаточно широкое применение в практике улавливания аэрозольных частиц твердой и жидкой фазы имеют жалюзийные пылеуловители.

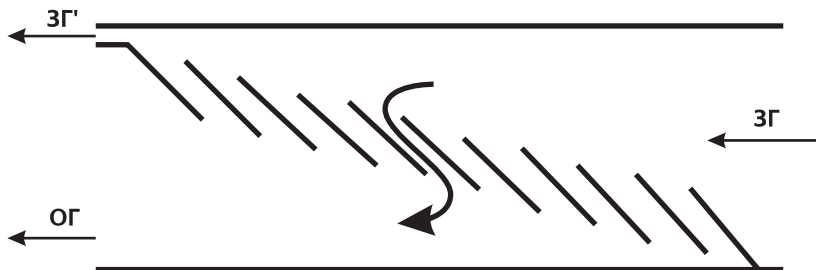


Рисунок 12 – Движение газа в жалюзийном пылеуловителе

Жалюзийный пылеуловитель состоит из жалюзийной решетки и пылеуловителя – чаще всего циклона. Очищаемый газовый поток, проходя через решетку, делает резкие повороты. Это приводит к отделению крупных аэрозольных частиц из газового потока, тому же способствуют их удары о наклонные плоскости решетки, от которых они отражаются и отскакивают в сторону от щелей между пластинами решетки. Назначение жалюзийной решетки – разделить газовый поток на две части: одну, в значительной мере освобожденную от пыли и составляющую 80-90 % всего количества аэрозольного потока, и другую, составляющую 10-20 % потока и в которой сосредоточена основная масса аэрозольных частиц, улавливаемая в дальнейшем в циклоне. После очистки в циклоне происходит объединение двух потоков. Наиболее существенным недостатком аппарата является абразивный износ пластин решетки при высокой концентрации пыли.

Для приблизительных расчетов коэффициента очистки газового потока в жалюзийном пылеуловителе можно применять соотношение:

$$\eta = 0,8 \cdot \eta_p,$$

где η_p – степень очистки газа в решетке.

Расчет жалюзийных пылеуловителей сводится к следующему. Вначале задаются гидравлическим сопротивлением аппарата и определяют скорость газового потока во входной камере. Затем определяют геометрические размеры аппарата, рассчитывают отсосную систему и коэффициент очистки.

Преимуществами инерционного улавливания являются:

- малое гидравлическое сопротивление;
- простота и надежность конструкции;
- отсутствие движущихся частей;
- возможность удалять из газового потока фракции крупных аэрозольных частиц, обладающих повышенным абразивным действием.

Наиболее существенным недостатком инерционного улавливания является низкая эффективность очистки от аэрозольных частиц диаметром менее 20 мкм.

Вследствие этого, аппараты инерционного улавливания, как и аппараты гравитационного осаждения, целесообразно использовать в качестве первой (грубой) ступени очистки аэрозольных потоков перед более эффективными пылеуловителями.

6.3 Центробежное улавливание

Аппараты центробежного улавливания наиболее распространены в промышленности и применяются с 80-х годов 19-го века.

В аппаратах используется центробежная сила, развиваемая при вращательно-поступательном движении газового потока. Принцип работы аппаратов центробежного улавливания (под последним чаще всего подразумевается циклон) заключается в следующем. Газ вращается внутри циклона, двигаясь сверху вниз, а затем движется вверх. Частицы пыли отбрасываются центробежной силой к стенке. Обычно в циклонах центробежное ускорение в несколько сот, а то и тысяч раз больше ускорения силы тяжести, поэтому даже весьма маленькие частицы пыли не в состоянии следовать за газом, а под влиянием центробежной силы движутся к стенке (см. рис. 13).

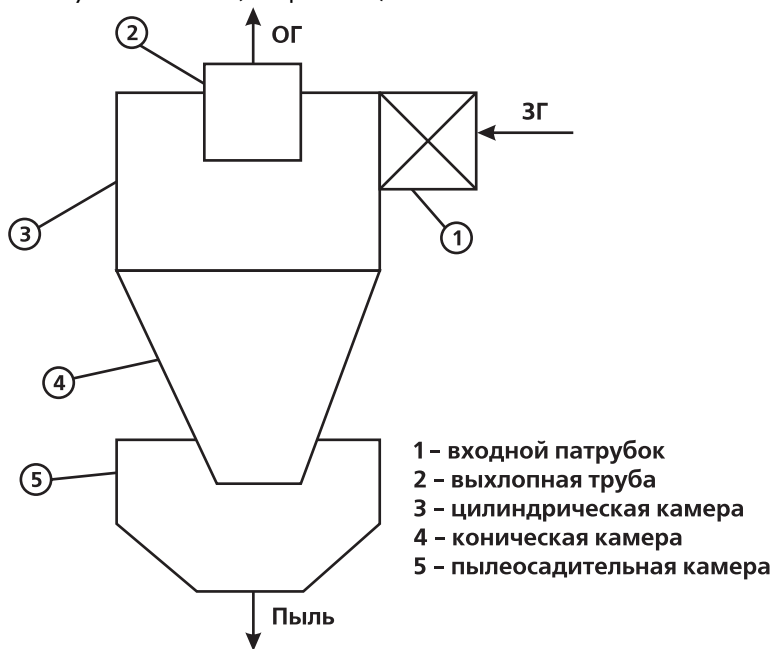


Рисунок 13 – Схема циклона

Эффективность улавливания частиц пыли в циклоне прямо пропорциональна скорости газов в степени $1/2$ и обратно пропорциональна диаметру аппарата также в степени $1/2$. Оптимальное соотношение между высотой и диаметром аппарата равно от 2 до 3 [4,5].

По способу подвода газов в аппарат циклоны подразделяются на циклоны со спиральным, тангенциальным и винтообразным, а также осевым подводом. Наиболее предпочтительным по форме, с точки зрения аэродинамики, является подвод газов по спирали [4,5].

В промышленности принято разделять циклоны на высокоэффективные и высокопроизводительные. Первые эффективны, но требуют больших затрат на осуществление процесса очистки; циклоны второго типа имеют небольшое гидравлическое сопротивление, но хуже улавливают мелкие частицы.

С увеличением диаметра циклона при постоянной тангенциальной скорости потока центробежные силы, воздействующие на пылевые частицы, уменьшаются и эффективность пылеулавливания снижается. Кроме того, установка одного высокопроизводительного циклона вызывает затруднение при его размещении вследствие его большой высоты. В связи с этим в технике пылеулавливания широкое применение нашли групповые и батарейные циклоны.

При больших расходах очищаемых газов применяют групповую компоновку аппаратов. Это позволяет не увеличивать диаметр циклона, что положительно сказывается на эффективности очистки.

В групповых циклонах применяются типовые циклоны, устанавливаемые либо попарно с общим числом 2–8 циклонов или вокруг вертикального подводящего газохода по 10–14 штук.

Применяются также батарейные циклоны (при расходе газа до 65000 м³/ч). Это — объединение большого числа (до 800 штук) малых циклонов (мультициклонов) в группу. Снижение диаметра циклонного элемента преследует цель увеличения эффективности очистки.

Методика расчёта циклонов

Для расчёта циклонов необходимы следующие исходные данные [4]:

1. Количество очищаемого газа при рабочих условиях Q_p .
2. Плотность газа при рабочих условиях ρ .
3. Динамическая вязкость газа при рабочей температуре μ_t .
4. Дисперсный состав пыли, задаваемый двумя параметрами d_m и $lg\sigma_\varphi$, где d_m — медианный диаметр частиц, при котором количество частиц крупнее d_m равно количеству частиц мельче d_m ; $lg\sigma_\varphi$ — среднее квадратичное отклонение в функции распределения.
5. Запылённость газа C_{BX} .
6. Плотность частиц ρ_φ .

7. Требуемая эффективность очистки газа η .

Расчёт циклонов проводится методом последовательных приближений в следующем порядке:

1. Задавшись типом циклона, по табличным данным определяют оптимальную скорость газа в аппарате $v_{опт}$
2. Определяют необходимую площадь сечения циклонов $F = \frac{Q_p}{v_{опт}}$.
3. Задаваясь количеством циклонов N , определяют диаметр циклона

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785 \cdot N}}.$$

4. Вычисляют действительную скорость газа в циклоне

$$v = \frac{Q_p}{0,785 \cdot N \cdot D^2}.$$

Скорость газа в циклоне не должна отклоняться более чем на 15 % от оптимальной скорости.

5. Определяют коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона или группы по формуле:

$$\xi_{ц} = k_1 \cdot k_2 \cdot \xi_{ц500}^{C,П} + k_3$$

где $\xi_{ц500}^{C,П}$ – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм (выбирают по табличным данным);

k_1 – поправочный коэффициент на диаметр циклона;

k_2 – поправочный коэффициент на запылённость газа;

k_3 – коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу.

Эти коэффициенты определяются таблично.

6. Определяют потери давления в циклоне $\Delta P = \xi_{ц} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$.

Если потери давления оказались приемлемыми, то переходят к расчёту полного коэффициента очистки газа в циклоне.

По окончании расчёта полученное значение η_p сопоставляется с требуемым. Если η_p оказывается меньше требуемого, необходимо выбрать другой тип циклона с большим значением коэффициента гидравлического сопротивления.

Вихревые пылеуловители

Они были разработаны значительно позже циклонов и отличаются от последних наличием в аппарате (см. рис. 14) двух встречных в осевом направлении закрученных потоков – нижнего (первичного) и верхнего (вторичного) [4,5].

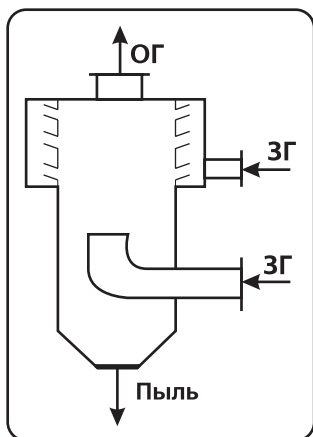


Рисунок 14 – Вихревой пылеуловитель

При подаче запылённого газа одновременно по обоим каналам частицы пыли, поступающие в вихревой пылеуловитель по верхнему каналу, отбрасываются центробежными силами к стенке аппарата, движутся вдоль неё вниз по спирали и попадают в пылевой бункер; частицы пыли, поступающие в аппарат по нижнему каналу, сначала с потоком газа поднимаются по спирали, затем под действием центробежных сил отбрасываются к стенке и со вторым, верхним потоком пыли движутся вниз, также попадая в пылевой бункер.

По вводу верхнего, вторичного потока газа вихревые пылеуловители разделяют на пылеуловители с сопловым, лопаточным и тангенциальным вводом.

К основным преимуществам вихревых пылеуловителей следует отнести более интенсивную, чем у циклонов сепарацию частиц по всей высоте, более эффективное улавливание тонкодисперсной пыли (менее 5 мкм), широкий диапазон нагрузок по газу и дисперсной фазе.

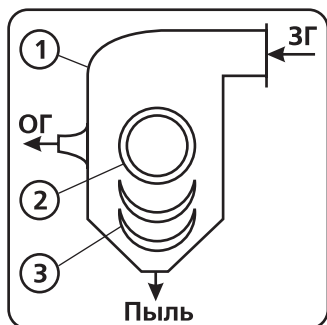
В качестве вторичного газа в вихревых пылеуловителях может быть использован свежий атмосферный воздух, часть очищенного или запылённого газа. Наиболее выгодным в экономическом отношении является использование в качестве вторичного газа запылённых газов. В этом случае производительность аппарата повышается на 40–65 % без заметного снижения эффективности очистки.

К недостаткам относятся:

1. Необходимость дополнительного дутьевого устройства.
2. Повышение за счёт вторичного газа общего объёма газов, проходящих через аппарат.
3. Большая сложность аппарата в эксплуатации.

Ротационный (динамический) пылеуловитель

В этих пылеуловителях (см. рис. 15) действующие на частицы пыли центробежные силы и силы Кориолиса возникают при вращении рабочего колеса (ротора), которое, по существу, заменяет дутьевое устройство.



1 – кожух. 2 – барабан. 3 – решетки для уменьшения завихрений

Рисунок 15 – Ротационный пылеуловитель

Очищаемый газ всасывается во вращающийся барабан через отверстия.

Ротационные пылеуловители делятся на две группы: отделяемые частицы двигаются в направлении подачи газа; улавливаемые частицы перемещаются в направлении, обратном движению газа.

Недостатком ротационных пылеуловителей является их высокая энергоёмкость, но вследствие совмещения функции непосредственно пылеуловителей и вентиляторов они отличаются компактностью.

Аппараты центробежного улавливания имеют следующие достоинства:

1. Отсутствие движущихся частей в аппарате.
2. Надёжность работы при температурах газа до 500 °С.
3. Возможность улавливания абразивных материалов при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями.
4. Улавливание пыли в сухом виде.
5. Почти постоянное гидравлическое сопротивление аппарата.
6. Эффективная работа при высоких давлениях газов.
7. Простота изготовления.
8. Сохранение высокой фракционной эффективности очистки при увеличении запылённости газов.

Недостатки:

1. Высокое гидравлическое сопротивление (1250 – 1500 Па).
2. Плохое улавливание частиц диаметром менее 5 мкм.
3. Невозможность использования для очистки газов от липких загрязнителей.

Недопустимым является эксплуатация циклонов при температуре газов ниже точки росы, образующиеся при этом капли влаги смачивают пыль, и циклон быстро забивается. Температура газов должна быть на 20–25 °С выше точки росы.

Аппараты гравитационного осаждения, инерционного и центробежного улавливания относятся к аппаратам предварительной (грубой) очистки газов от аэрозольных частиц и характеризуются следующими показателями (см. табл. 5).

Таблица 5 – Характерные параметры сухих механических пылеуловителей

Тип пылеуловителя	Максимальная производительность, м ³ /ч	Эффективность, %	Гидравлическое сопротивление, Па	Верхний предел температуры газов, °С
Осадительная камера	Определяется площадью размещения	80 - 90 (50 мкм)	50 - 130	350 - 550
Циклон	85000	50 - 80 (10 мкм)	250 - 1500	350 - 550
Вихревой пылеуловитель	30000	90 (2 мкм)	До 2000	До 250
Батарейный циклон	170000	90 (5 мкм)	750 - 1500	350 - 550
Инерционный пылеуловитель	127000	90 (2 мкм)	750 - 1500	До 400
Динамический пылеуловитель	42500	90 (2 мкм)	750 - 1500	До 400

6.4 Очистка газов в фильтрах

В основе работы пористых фильтров всех видов лежит процесс фильтрации газа через пористую перегородку, в ходе которого аэрозольные частицы задерживаются, а газ проходит через неё [4,5].

В зависимости от назначения и величины входной (выходной) концентрации фильтры делят на три класса:

- *фильтры тонкой очистки* (высокоэффективные или абсолютные фильтры) – предназначены для улавливания с очень высокой эффективностью (более 99 %) субмикронных частиц из промышленных газов с низкой входной концентрацией (менее 1 мг/м³) и скоростью фильтрации менее 10 см/с. Фильтры применяют для улавливания особо токсичных частиц, а также для ультратонкой очистки воздуха при проведении некоторых технологических процессов. Они не подвергаются регенерации.

- *воздушные фильтры* – используют в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха. Работают при концентрации пыли менее 50 мг/м^3 и высокой скорости фильтрации – до $2,5\text{--}3 \text{ м/с}$. Фильтры могут быть нерегенерируемые и регенерируемые.
- *промышленные фильтры* – применяются для очистки промышленных газов с концентрацией до 60 г/м^3 . Фильтры регенерируются.

По типу фильтровальных материалов фильтры классифицируются:

- с *гибкими пористыми перегородками*:
- тканевые фильтры из природных, синтетических и минеральных волокон (шерсть, стеклоткань, синтетическая ткань);
- фильтры из нетканых материалов (войлок, бумага, картон);
- фильтры из ячеистых материалов (пенополиуретан, губчатая резина);
- с *полужесткими пористыми перегородками* (слои волокна, стружка, сетка и др.);
- с *жесткими пористыми перегородками* зернистой структуры (пористая керамика, пластмасса и т.п.);
- с *зернистым слоем*, неподвижным, псевдооживленным из сыпучих различных материалов.

Тканевые фильтры

В тканевых фильтрах запылённые газы проходят через ткань, на которой осаждается пыль, образуя дополнительный фильтрующий слой. Осаждение частиц в поверхностном пылевом слое и внутри запылённой ткани основано в значительной мере на «ситовом» эффекте, так как поры в слое, обтекаемые элементы (осаждённые пылинки) и улавливаемые частицы имеют близкие размеры [4,5].

В тканевых фильтрах целесообразно использовать небольшие скорости фильтрации, обычно $0,5\text{--}2 \text{ см/с}$. При большей скорости происходит чрезмерное уплотнение пылевого слоя, сопровождающееся резким увеличением его сопротивления.

К тканям предъявляются следующие требования:

1. Высокая пылеемкость до и после регенерации;
2. Сохранение оптимально высокой воздухопроницаемости;
3. Высокая механическая прочность и стойкость к истиранию;
4. Стабильность при повышенной температуре и агрессивном воздействии химических веществ в пыли;
5. Способность к лёгкому удалению накопленной пыли;
6. Низкая стоимость.

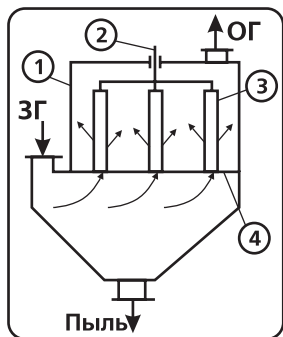
Существующие материалы обладают не всеми указанными свойствами и их выбирают в зависимости от конкретных условий очистки.

Тканевые фильтры классифицируют по форме фильтровальных элементов (рукавные, плоские, клиновые, дисковые и др.), по виду используемой ткани и т.д.

В зависимости от способа регенерации различают пять типов фильтров:

- фильтр с механическим встряхиванием;
- фильтр со встряхиванием при одновременной обратной продувке воздухом низкого давления (менее 10 кПа);
- фильтр с обратной продувкой воздухом низкого давления, который может подаваться непрерывно или в виде пульсирующего потока;
- фильтр с импульсной регенерацией воздухом высокого давления (более 10 кПа);
- фильтр со струйной продувкой, характеризующийся тем, что воздух обратной продувки проходит не через всю поверхность рукава. Процесс регенерации перемещается по всей высоте рукава, обеспечивая поочерёдную очистку его поверхности.

Тканевые фильтры работают под давлением (нагнетательные) – вентилятор расположен перед фильтром и при разрежении (всасывающие) – вентилятор установлен после фильтра. Последнее предпочтительнее, так как при этом уменьшается эрозионный износ вентилятора и в случае утечки пыль в помещение не попадает.



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

Рисунок 16 – Рукавный фильтр

Наибольшее распространение имеют рукавные фильтры (см. рис. 16). Обычно отношение рукава к его диаметру составляет от 15 до 50. Запылённый газ поступает снизу секций в рукав, проходя через ткань и очищаясь. Очищенный газ через открытый выпускной клапан выходит в выхлопной газопровод. Пыль постепенно оседает на внутренней поверхности рукавов. Когда толщина слоя пыли достигает допустимого предельного значения (при этом снижается эффективность очистки), подачу газа прекращают и с помощью механизма регенерации (в данном случае путем встряхивания) пыль ссыпается с рукавов в бункер.

Методика расчета тканевых фильтров

Главным фактором при оценке фильтровальных аппаратов является стоимость аппарата и применяемого материала, его долговечность, энергетические затраты, определяемые гидравлическим сопротивлением и расходами на регенерацию, и степень очистки.

При выборе тканевого фильтра учитываются следующие факторы:

- характеристика очищаемых газов на входе в фильтр (расход, состав, температура, содержание влаги, температура точки росы);
- свойства пыли;
- характеристика и требования к уловленной пыли (ценность, возможность регенерации, возвращения её в производство и др.);
- характеристики фильтра (допускаемое сопротивление, величина выходной концентрации и др.).

Для приближенного расчета [4] необходимой площади фильтрации тканевого фильтра следует определить общий расход запылённых газов, поступающих на ткань (с учетом подсоса воздуха в газовом тракте от источника пылевыведения до фильтровальной ткани), и расход продувочных газов или воздуха, поступающих из регенерируемой секции. Кроме того, надо знать допустимую нагрузку по газу (скорость фильтрации), которую принимают в зависимости от применяемой ткани.

$$\text{Общая площадь фильтрации: } S = S_p + S_C = \frac{Q_1 + Q_2}{W} + S_C,$$

где S_p – площадь фильтрации в одновременно работающих секциях;

S_C – площадь ткани в регенерируемой секции;

Q_1, Q_2 – расход запылённых газов с учетом подсосов и расход продувочных газов или воздуха;

W – скорость фильтрации (газовая нагрузка на ткань), $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{мин}$.

Газовая нагрузка на ткань зависит от вида ткани и колеблется в пределах $0,3-1,2 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{мин}$.

По данным многочисленных испытаний остаточная концентрация пыли при этих условиях составляет $20-50 \text{ мг}/\text{м}^3$ при начальных концентрациях $5-50 \text{ г}/\text{м}^3$.

Высокая степень очистки газов в тканевых фильтрах, средние капитальные и эксплуатационные затраты делают их конкурентоспособными по сравнению с электрофильтрами и аппаратами мокрой очистки. Их все чаще применяют в практике очистки.

Волокнистые фильтры

Фильтрующий элемент этих фильтров состоит из одного или нескольких слоёв, в которых однорядно распределены волокна. Это фильтры объёмного действия, так как они рассчитаны на улавливание и накопление частиц преимущественно по всей глубине слоя.

Процесс фильтрации в волокнистых фильтрах состоит из двух стадий. На первой начальной стадии уловленные частицы практически не изменяют структуры фильтра во времени (*стационарная фильтрация*). На второй стадии процесса (*нестационарная фильтрация*) в фильтре происходят непрерывные структурные изменения вследствие накопления уловленных частиц в значительных количествах. В соответствии с этим все время изменяется эффективность очистки [4,5].

Основной механизм улавливания в значительной мере определяются размеры частиц. Для частиц диаметром менее 0,3 мкм преобладает диффузионное осаждение, для более крупных – эффекты касания и инерции (см. п.3.9).

Такие фильтры используют при концентрации дисперсной фазы 0,5–5 мг/м³ и только некоторые грубоволокнистые фильтры применяют при концентрации 5–50 мг/м³. При таких концентрациях основная доля аэрозольных частиц имеет диаметр менее 5–10 мкм.

Различают следующие виды промышленных волокнистых фильтров:

1. *Сухие* – тонковолокнистые, электростатические, глубокие фильтры предварительной очистки (предфильтры);
2. *Мокрые* – сеточные, самоочищающиеся, с периодическим или непрерывным применением.

В СНГ широко распространены фильтрующие материалы типа ФП (фильтры Петрянова) из полимерных смол. Они представляют собой слои синтетических волокон диаметром 1–2,5 мкм, нанесённые на марлевую подложку (основу) из скреплённых между собой более толстых волокон. В качестве полимеров для ФП используют чаще всего перхлорвинил и диацетатцеллюлозу. К недостаткам фильтров относят нестойкость их против действия масел и растворителей, термостойкость их невелика (до 60 °С).

Разработаны стекловолоконные фильтры тонкой и грубой очистки производительностью от 200 до 1500 м³/ч с гидравлическим сопротивлением от 200 до 1000 Па.

Зернистые фильтры

Применяются для очистки газов реже, чем волокнистые фильтры. Достоинство зернистых фильтров: доступность материала, возможность работы при высоких температурах и в условиях агрессивной среды, способность выдерживать большие механические нагрузки и перепады давлений, а также резкие изменения температуры.

Различают насадочные и жесткие зернистые фильтры [4,5].

Насадочные (насыпные) фильтры. В них улавливающие элементы (гранулы, куски и т.д.) не связаны друг с другом. К ним относятся статические (неподвижные) слоевые фильтры; динамические (подвижные) слоевые фильтры с гравитационным перемещением сыпучей среды; псевдооживленные слои. Используется песок, галька, шлак, дроблённые горные породы, древесные опилки, кокс, крошки резины и др. Максимальный эффект достигается при улавливании конденсационных аэрозолей, частицы которых интенсивно коагулируют в слое.

По мере накопления пыли в порах насадки эффективность улавливания возрастает. При увеличении сопротивления до допустимого предела производят рыхление слоя. После нескольких циклов рыхления насадку промывают или заменяют.

Зернистые жесткие фильтры. В этих фильтрах зерна прочно связаны друг с другом в результате спекания, прессования или склеивания и образуют прочную неподвижную систему. К ним относятся: пористая керамика, пористые металлы, пористые пластмассы. Фильтры устойчивы к высокой температуре, коррозии и механическим нагрузкам и применяются для фильтрации сжатых газов.

Жесткие пористые фильтры могут регенерироваться следующими методами:

- продуванием воздуха или газа в направлении, противоположном рабочему потоку;
- пропусканьем жидкостей в обратном движению газов направлению, иногда при одновременном действии на жидкость ультразвуком;
- пропусканьем горячего пара или струи горячих газов (особенно при забивке насадки);
- простукиванием или вибрацией насадки.

Недостатком их является высокая стоимость, большое гидравлическое сопротивление и трудоёмкость регенерации, чувствительность к изменению режима эксплуатации, температура газа должна быть на 20–25 °С выше температуры точки росы.

Поэтому фильтры находят ограниченное применение в специфических условиях. Чаще всего такие фильтры применяют для фильтрации сжатых газов, когда требуется выдерживать высокий перепад давлений, а также при температурах 300–500 °С.

Преимуществами метода фильтрационной очистки газов от аэрозольных частиц являются:

- более высокая эффективность очистки;
- универсальность;
- возможность улавливать частицы при различном давлении газа;
- использование химически стойких материалов;
- возможность очистки газов при температурах до 400 °С;
- практически полная автоматизация процесса очистки;
- стабильность процесса очистки;
- простота эксплуатации.

К недостаткам метода следует отнести:

- необходимость периодической замены некоторых фильтровальных перегородок;
- громоздкость установок очистки;
- относительно высокий расход энергии;
- чувствительность к изменению параметров очищаемого газового потока.

6.5 Очистка газов в мокрых пылеуловителях

В мокрых пылеуловителях в качестве орошающей жидкости чаще всего используется вода. В зависимости от поверхности контакта или по способу действия их подразделяют на следующие виды [4,5]:

- полые газопромыватели;
- насадочные скрубберы;
- тарельчатые (барботажные и пенные) газопромыватели;
- газопромыватели с подвижной насадкой;
- газопромыватели центробежного действия;
- газопромыватели ударно-инерционного действия (ротоклоны);
- механические газопромыватели;
- скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури и эжекторные).

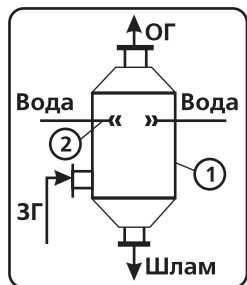
В результате контакта запылённого газового потока с жидкостью образуется макрофазная поверхность контакта. Эта поверхность состоит из газовых пузырьков, газовых струй, жидких струй, капель, плёнок жидкости.

Наиболее часто имеем дело с каплями жидкости. При описании процесса осаждения частиц аэрозоля на каплях распылённой жидкости чаще всего используют две модели.

Первая из них исходит из наличия так называемой *кинематической коагуляции*, возникающей при движении частиц разного размера с различными скоростями под воздействием внешних сил. Такая коагуляция происходит при осаждении частиц на каплях воды, падающих под действием силы тяжести, либо вводимых в аэрозоль со скоростью, превосходящей скорость их седиментации.

При использовании второй модели учитывают большую разность между скоростями газа и жидкости, рассматривая процесс осаждения как фильтрацию подлежащих очистке газов через объёмный мелкозернистый фильтр (капли воды подобны зернам фильтра).

Полые газопромыватели



1 – корпус; 2 – форсунки

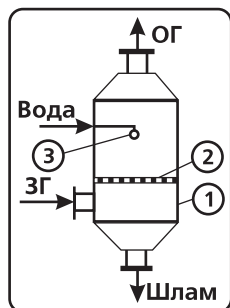
Рисунок 17 – Полый газопромыватель

Наиболее распространены полые форсуночные скрубберы (см. рис. 17). Форсунки устанавливают в колонне в одном или нескольких сечениях: иногда рядами по 14–16 в каждом сечении, иногда только по оси аппарата. Скрубберы обеспечивают быстрое резкое охлаждение газа и высокую степень очистки только при улавливании частиц пыли диаметром до 10 мкм и мало эффективны при улавливании частиц диаметром менее 5 мкм.

Насадочные скрубберы

Они представляют собой колонны с насадкой навалом или регулярной. Их используют для улавливания хорошо смачиваемой пыли, но при невысокой её концентрации. Из-за частой забивки насадки такие газопромыватели используют мало. Эффективность при улавливании частиц диаметром более 2 мкм превышает 90 %. Они находят применение при улавливании тумана хорошо растворимой пыли, также при совместном протекании процессов пылеулавливания, охлаждения газов и абсорбции.

Тарельчатые газопромыватели (барботажные, пенные)



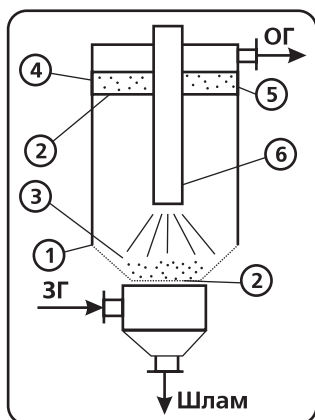
1 – корпус; 2 – тарелка;
3 – ороситель

Рисунок 18 – Тарельчатый газопромыватель

Наиболее распространены аппараты с провальными тарелками или тарелками с переливом. Пыль улавливается пенным слоем, который образуется при взаимодействии газа и жидкости (см. рис. 18).

Выделяют следующие стадии процесса улавливания пыли в пенных аппаратах: инерционное осаждение частиц пыли в подрешеточном пространстве; первую стадию улавливания частиц пыли в пенном слое («механизм удара»); осаждение частиц в слое пены «насадка–жидкость–газ»; вторую стадию улавливания частиц пыли в пенном слое (инерционно-турбулентное осаждение частиц на поверхности пены).

Газопромыватели с подвижной насадкой



1 – корпус; 2 – опорная
решетка; 3 – слой шаров;

4 – бризгоуловитель;

5 – ограничительная решетка;

6 – форсунка

Рисунок 19 –
Газопромыватель
с подвижной насадкой

Они имеют большое распространение в пылеулавливании. В качестве насадки используют шары из полимерных материалов, стекла или пористой резины.

Колонна с подвижной насадкой может работать при различных режимах, но оптимальный режим – режим полного (развитого) псевдооживления (см. рис. 19).

Для обеспечения высокой степени пылеулавливания рекомендуются следующие параметры процесса: скорость газа 5–6 м/с; удельное орошение 0,5–0,7 л/м³; свободное сечение тарелки $S_0=0,4$ м²/м³ при ширине щели 4–6 мм.

При выборе диаметра шаров соблюдается соотношение: $D_{АП}/d_{Ш} \geq 10$. Оптимальным размером шаров являются $d_{Ш}=20-40$ мм.

Газопромыватели центробежного действия

Наиболее распространены центробежные скрубберы, которые по конструктивному признаку можно разделить на два вида:

- аппараты, в которых закрутка газового потока осуществляется при помощи центрального лопастного закручивающего устройства;
- аппараты с боковым тангенциальным или улиточным подводом газа.

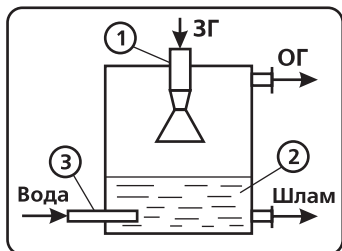
Последние орошают через форсунки, установленные в центральной части аппарата, кроме того, жидкость, стекающая по внутренней поверхности аппарата, образует плёнку.

Осаждение происходит за счет суммарного действия двух механизмов:

- инерционного осаждения на каплях жидкости;
- центробежного осаждения на плёнке жидкости.

Большинство отечественных центробежных скрубберов имеют тангенциальный подвод газов и плёночное орошение.

Газопромыватели ударно-инерционного действия



1 - входной патрубок; 2 - резервуар с жидкостью; 3 - сопло

Рисунок 20 –
Газопромыватель ударно-инерционного действия

В этих аппаратах контакт газов с жидкостью осуществляется за счет удара газового потока о поверхность жидкости с последующим пропусканием газожидкостной взвеси через отверстия различной конфигурации (см. рис. 20). В основе процесса осаждения лежит «механизм удара», за счет которого образуются капли жидкости диаметром 300–400 мкм, на которых и идёт процесс осаждения аэрозольных частиц.

Механические газопромыватели

Характерной особенностью их является наличие вращательного устройства (ротора, диска и т.п.), обеспечивающего разбрызгивание и перемешивание жидкости или перемешивание газового потока. В зависимости от способа подвода механической энергии аппараты делят:

- *механические скрубберы*, в которых очищаемые газы приводятся в соприкосновение с жидкостью, разбрызгиваемой с помощью вращающегося тела;

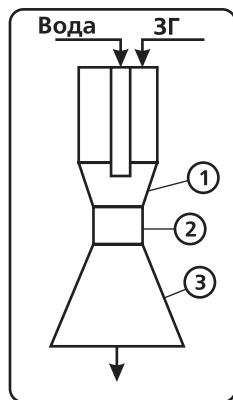
- динамические газопромыватели, в которых подводимая механическая энергия служит для вращения газового потока.

Скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури)

Это эффективные высоконапорные мокрые пылеуловители струйного действия. Считаются наиболее эффективными из аппаратов мокрой очистки газов.

Принцип действия основан на интенсивном дроблении газовым потоком орошающей его жидкости. Запылённый поток газа движется со скоростью до 150 м/с, распыляя при этом поток жидкости. Осаждению частиц пыли на каплях орошающей жидкости способствует турбулентность газового потока и высокие относительные скорости между улавливаемыми частицами и каплями.

После трубы Вентури устанавливается каплеуловитель. Эффективность скоростного газопромывателя зависит от скорости газа и удельного орошения (обычно 0,5–1,5 л/м³). При больших объёмах газа применяют батарейные или групповые компоновки скрубберов Вентури.



1 – конфузор; 2 – горловина;
3 – диффузор

Рисунок 21 – Скоростной газопромыватель

По гидравлическим характеристикам скрубберы Вентури (см. рис. 21) делятся:

- высоконапорные;
- низконапорные;
- эжекторные.

Первые применяются для тонкой очистки газов от микронной и субмикронной пыли и характеризуются высоким гидравлическим сопротивлением (до 20000–30000 Па); вторые используются главным образом для подготовки (кондиционирования) газов перед другими пылеулавливающими аппаратами и их гидравлическое сопротивление не превышает 3000–5000 Па.

В эжекторных скрубберах энергия, затрачиваемая на очистку газов, подводится к орошающей жидкости, которая подаётся в трубу Вентури через расположенную в конфузоре форсунку под давлением 400–1200 кПа.

В зависимости от способа подвода орошающей жидкости выделяют следующие основные типы аппаратов:

- с центральным подводом жидкости в конфузоре;
- с периферийным орошением (в горловине или конфузоре);
- с плёночным орошением;
- с подводом жидкости за счет энергии газового потока;
- с предварительным дроблением орошающей жидкости;
- с комбинированным орошением.

Методика расчета аппаратов мокрого пылеулавливания

Расчёт мокрых пылеуловителей, в том числе и трубы Вентури, затруднен. Наиболее широко используется так называемый энергетический метод [4], который основан на допущении, что при улавливании определённого вида пыли эффективность аппарата зависит только от удельного расхода энергии и не зависит от размера и конструкции пылеуловителя. Общий расход энергии на обработку определенного объема газов на единицу времени включает в общем случае три составляющие: энергию газового потока, характеризующую степень турбулизации газожидкостного потока в аппарате; энергию жидкостного потока в аппарате, характеризующую степень диспергирования жидкости; механическую энергию вращающихся элементов конструкции, проявляющуюся у динамических газопромывателей.

Общий расход энергии в мокрых пылеуловителях больше суммарной энергии соприкосновения, так как включает потери на трение в газоходах, вентиляторах, насосах и т.д. В затраты энергии соприкосновения не должны входить затраты энергии, идущие на создание движения газового потока.

Затраты энергии на осуществление мокрой очистки газов от пыли (энергия соприкосновения, выражаемая в кДж/1000 м³ газов) определяются по формуле:

$$k_{\text{ч}} = \Delta P_{\text{АП}} + P_{\text{ж}} \cdot \frac{Q_{\text{ж}}}{Q_{\text{г}}} + \frac{N_{\text{м}}}{Q_{\text{г}}},$$

где $\Delta P_{\text{АП}}$ – гидравлическое сопротивление аппарата, Па;

$P_{\text{ж}}$ – напор распыляемой жидкости, Па;

$N_{\text{м}}$ – мощность вращающегося механизма, расходуемая на контактирование газов с жидкостью;

$Q_{\text{ж}}$, $Q_{\text{г}}$ – объёмный расход, соответственно, жидкости и газа, м³/с.

Величина k_q учитывает способ ввода жидкости в аппарат, диаметр капель, а также все свойства жидкости, включая вязкость и поверхностное натяжение. Влияние на величину k_q каждого слагаемого в правой части вышеприведенного уравнения зависит от типа аппарата. Так, в обычном скруббере Вентури решающая роль принадлежит гидравлическому сопротивлению аппарата, в то время как в эжекторных аппаратах давлению распыла жидкости.

Зависимость между степенью очистки газов и затратами энергии выражается формулой:

$$\eta = 1 - \exp(-B \cdot k_q^n),$$

где B , n – константы, определяемые дисперсным составом и видом аэрозоля.

Ниже в таблице 6 приводятся значения вышеуказанных констант для ряда пылей и туманов (определены экспериментально).

Таблица 6 – Экспериментальные значения коэффициентов

Вид пыли или тумана	B	n
1. Пыль каолинового производства	$2,34 \cdot 10^{-4}$	1,115
2. Туман фосфорной кислоты	$1,34 \cdot 10^{-2}$	0,631
3. Конвертерная пыль	$9,88 \cdot 10^{-2}$	0,466
4. Мартеновская пыль	$1,92 \cdot 10^{-2}$	0,569
5. Дурно пахнущие вещества мыльных фабрик	$1,09 \cdot 10^{-5}$	1,415

С возрастанием энергоёмкости влияние этих факторов ослабевает.

Для интенсификации работы мокрых пылеуловителей используются следующие способы:

- использование эффекта конденсации, наблюдающегося при охлаждении газов, предварительно насыщенных водяными парами;
- предварительная электризация частиц пыли и капель орошающей жидкости;
- применение ПАВ (смачивателей);
- равномерное распределение газов по сечению аппаратов.

Мокрые пылеуловители имеют ряд достоинств и недостатков в сравнении с аппаратами других типов. К достоинствам относятся:

1. Небольшая стоимость и более высокая эффективность улавливания взвешенных частиц;

2. Возможность использования для очистки газов от частиц диаметром до 0,1 мкм;
3. Возможность очистки газа при высокой температуре и повышенной влажности, а также при опасности возгораний и взрывов очищенных газов и уловленной пыли;
4. Возможность наряду с пылью одновременно улавливать парообразные и газообразные компоненты.

Среди недостатков можно отметить:

1. Выделение уловленной пыли в виде шлама, что связано с необходимостью обработки сточных вод;
2. Возможность уноса капель жидкости и осаждения их с пылью в газоходах и дымососах;
3. В случае очистки агрессивных газов необходимо защищать аппаратуру и коммуникации;
4. Ухудшение условий рассеяния примеси в атмосфере из-за существенного снижения температуры газа в процессе очистки и увлажнения газа.

6.6 Капле- и туманоуловители

Каплеулавливание - удаление из газовых потоков капель размером более 10 мкм, туманоулавливание - в случае удалении капель размером менее 10 мкм осуществляются с целью предотвращения уноса жидкости (брызгоуноса) в элементах химико-технологического оборудования, защиты трубопроводов, аппаратов и тягодутьевых устройств от коррозии, эрозии и обрастания, получения чистых продуктов, обеспечения газов осушки, повышения производительности и экономичности аппаратов.

Устройства для сепарации капельного уноса базируются на тех же принципах, что и обычные аппараты для улавливания частиц дисперсной фазы, которые мы уже рассматривали. Наиболее часто применяют инерционное и центробежное осаждение частиц жидкости, а также фильтрацию.

В инерционных туманоуловителях используют различные насадки (горизонтальные, жалюзийные, стержни каплевидного сечения, гофрированные вязаные сетки, уголковые, волнистые и т.п.), устанавливаемые по ходу газового потока в виде слоя 80–200 мм. Каплеуловители из слоя насадок обеспечивают достаточно высокую эффективность очистки при скорости газа до 3 м/с. При более высоких скоростях может наступить захлёбывание аппарата или вторичный унос капель.

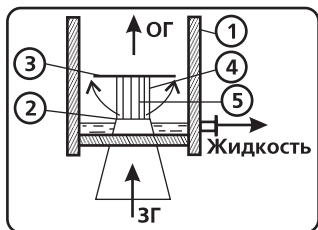


Рисунок 22 – Элемент центробежного туманоуловителя

В центробежных туманоуловителях (см. рис. 22) аэрозольный поток через кольцо (2) подается в каналы (5) цилиндрического или конического завихрителя с лопатками (4), ограниченного сверху диском (3). Очищенный газ уходит по корпусу трубы (1). Уловленную жидкость отводят через сливные патрубки, расположенные в нижней части аппарата. При скорости жидкости в сливных патрубках около 0,2 м/с обеспечивается полный отвод уловленной жидкой фазы.

Однако эти и другие методы характеризуются значительной капитало- и металлоёмкостью.

Поэтому наиболее широко применяются в настоящее время в качестве туманоуловителей волокнистые самоочищающиеся фильтры, снаряжаемые слоями из стеклянных, синтетических и металлических волокон, а также пакетами вязанных металлических или синтетических сеток [4,5].

Волокнистые фильтры-туманоуловители подразделяются на три разновидности:

- **низкоскоростные** (скорость движения газового потока не более 0,2 м/с), снаряженные волокнами диаметром 5 – 20 мкм и предназначенные для улавливания субмикронных частиц за счет броуновской диффузии и эффекта зацепления. Эффективность их увеличивается при уменьшении скорости фильтрации, размера частиц и диаметра волокон;
- **высокоскоростные** (скорость движения газового потока превышает 0,5 м/с) со слоем грубых волокон диаметром 20–100 мкм, которые служат для выделения из газа частиц крупнее 1 мкм за счет механизма инерционного осаждения, эффективность которого возрастает с увеличением размера частиц и скорости фильтрации до определённой критической величины (обычно 1,5–2,5 м/с), при которой начинается вторичный брызгоунос;
- **многоступенчатые** (комбинированные), состоящие из 2-3 фильтров вышеуказанных типов.

Загрязнённый каплями жидкости (см. рис. 23) газовый поток проходит через слой волокон (1) и очищенный уходит из аппарата.

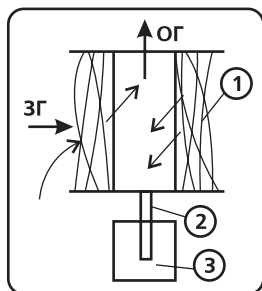


Рисунок 23 – Элемент волоконного туманоуловителя

Улавливание капелек жидкости в слое волокон осуществляется с помощью известных нам механизмов. Непрерывный рост сопротивления и падение эффективности очистки по мере накопления жидкости продолжается до тех пор, пока фильтрующий слой не войдет в стационарный режим самоочистки. После этого жидкость стекает из слоя и по трубке (2) поступает в стакан (3), из которого удаляется дальше.

При этом достигаются эффективности очистки (см. табл. 7).

Таблица 7 – Значения величины эффективности очистки, %

Диаметр частиц	Низкоскоростной	Высокоскоростной
Более 3 мкм	100	100
В пределах 1-3 мкм	98-100	85-97
Менее 1 мкм	92-98	50-85

Волокнистые фильтры-туманоуловители находят широкое применение встроенными в абсорбционные башни сернокислотного производства; для очистки газов от масляных туманов при работе металлообрабатывающих станков и т.п.

Сеточные туманоуловители служат для очистки грубодисперсных туманов. Осажденные на проволоке капли в виде плёнки перемещаются к точкам перекрещивания, где образуются крупные капли, способные под действием силы тяжести преодолеть силы поверхностного натяжения и аэродинамического сопротивления восходящего потока и упасть вниз. Подобная картина наблюдается до определённых значений нагрузок по газу, выше которых возникает вторичный унос.

Допустимая скорость движения газов составляет величину 1–6 м/с, при этом максимальная концентрация жидкой фазы в газе не должна превышать 100–120 г/м³.

Эффективность сеточных туманоуловителей при скорости 2,5–4,5 м/с и при низком гидравлическом сопротивлении 0,2–1,0 кПа (это одно из преимуществ) в зависимости от диаметра частиц:

$$d_p \text{ до } 1 \text{ мкм} - 20-40 \%;$$

$$d_p = 1 - 3 \text{ мкм} - 70-90 \%;$$

$$d_q = 3 - 10 \text{ мкм} - 90-98 \%$$

Сеточные фильтры применяются встроенными в аппараты. Комбинация их с волокнистыми фильтрами дает возможность эффективно удалять туманы.

6.7 Звуковая и ультразвуковая коагуляция

Этот способ еще мало применяется на практике. Суть его заключается в предварительном укрупнении аэрозольных частиц, облегчающем их улавливание обычными методами. Аппаратура состоит из генератора звука, коагуляционной камеры и осадителя [1, 2].

Процесс акустической коагуляции зависит от следующих факторов:

- совместное колебание частиц и газа (ортокинетическая коагуляция);
- давление звукового излучения;
- гидродинамические силы притягивания и отталкивания частиц.

При этом важно установить оптимальный акустический режим, при котором частицы будут колебаться и агрегироваться. Во многом этот режим определяется размером и формой частиц.

Основным процессом агломерации при частотах до 50 Гц является ортокинетическая коагуляция, а при больших частотах гидродинамические силы.

Требуемая для коагуляции аэрозолей частота акустических колебаний зависит от радиуса частиц и может изменяться от слышимой до ультразвуковой. Звуковая коагуляция с генераторами сиренного типа (сирена – сжатый воздух) применяются в США при улавливании тумана серной кислоты, золи из отходящих газов содового производства и сажи.

Оптимальными условиями процесса акустического осаждения сегодня признаны:

- частота звуковых колебаний 1–4 кГц;
- концентрация частиц размером 1–10 мкм от 2 до 200 г/м³.

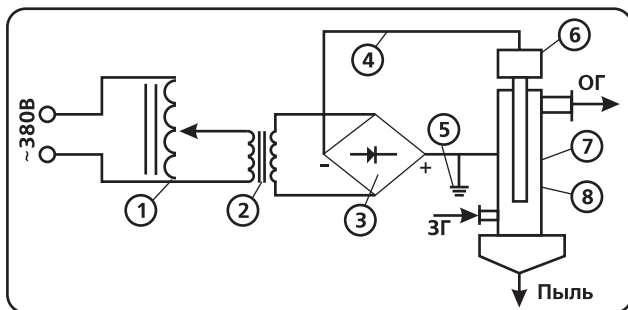
Нужно отметить, что для того, чтобы частицы могли коагулировать, они должны находиться на близком расстоянии друг от друга; поэтому необходима высокая концентрация аэрозоля, не менее 2 г/м³ (для частиц диаметром 1–10 мкм).

Наиболее эффективно очищаются аэрозоли с жидкой дисперсной фазой.

6.8 Электростатическое осаждение

Очистка газов в основном аппарате электростатического осаждения – электрофильтре (см. рис. 24) включает следующие этапы:

- заряд аэрозольных частиц в газе;
- движение и осаждение заряженных аэрозольных частиц к электродам;
- удаление осажённых аэрозольных частиц с электродов.



- 1 – регулятор напряжения; 2 – повышающий трансформатор;
 3 – высоковольтный выпрямитель; 4 – высоковольтный кабель;
 5 – заземление; 6 – изолятор; 7 – осадительный электрод;
 8 – коронирующий электрод

Рисунок 24 – Принципиальная электрическая схема электрофильтра

В электрофильтре обеспечивается стабильный электрический режим следующим образом. Регулятором напряжения (1) поддерживается стабильное напряжение на входе в повышающий трансформатор (2). В высоковольтном выпрямителе (3) получается выпрямленный постоянный ток. Через высоковольтный кабель (4) ток отрицательной полярности при напряжении 50–80 кВ подводится к коронирующим электродам (8), которые изолированы от земли изолятором (6). Осадительные электроды (7) заземлены и подключены к положительному полюсу. Таким образом, аэрозольный поток пропускают через неоднородное электрическое поле, после которого очищенный газ выходит из электрофильтра.

Очистка в электрофильтрах характеризуется следующим механизмом улавливания. Аэрозольный поток проходит между электродами, к которым подводят достаточно высокое постоянное напряжение; режим электроочистки рассчитан так, чтобы между электродами образовался так называемый коронный разряд, характеризующийся тем, что у поверхности одного из электродов (коронирующего) возникает светящаяся

ся корона – область ударной ионизации газа (на всё электродное пространство она не распространяется). Газ, состоящий из нейтральных молекул, не имеет электрической проводимости, которая может возникнуть при воздействии сильного электрического поля. Происходит так называемая электроионизация газа, т.е. процесс, при котором в газе в результате столкновения быстрых заряженных частиц с молекулами (некоторая доля заряженных частиц в газе почти всегда имеется) образуются ионы – заряженные частицы. Ионы адсорбируются (удерживаются) на поверхности аэрозольных частиц, которые вследствие этого становятся заряженными и двигаются под действием электрического поля к осадительным электродам.

Физические основы электрической очистки газов

Зарядка частиц в поле коронного заряда происходит по двум механизмам: воздействием электрического поля (частицы бомбардируются ионами, двигающимися в направлении силовых линий поля) и диффузией ионов. Первый механизм преобладает при диаметрах аэрозольных частиц более 0,5 мкм, второй – менее 0,2 мкм. Для частиц диаметром 0,2–0,5 мкм эффективны оба механизма. Максимальная величина заряда частиц диаметром более 0,5 мкм пропорциональна квадрату диаметра частиц, а частиц диаметром меньше 0,2 мкм – диаметру частицы.

При обычных условиях коронного разряда в электрофильтрах для большинства промышленных пылей зарядка частиц происходит очень быстро (от 1 до 2 с) и не лимитирует процесс улавливания.

При движении частицы в электростатическом поле на неё в основном действуют электрические силы и силы гидродинамического сопротивления. Процесс очистки можно интенсифицировать увеличением неоднородности электрического поля.

В принципе возможно использование как положительной, так и отрицательной короны, однако для промышленной газоочистки предпочтительнее отрицательная корона, так как она более стабильна и позволяет получить высокие напряжения и ток.

Характеристики короны зависят от многих факторов:

- конфигурация электродов и расстояния между ними;
- состав газов;
- давление;
- температура;

- концентрация и размер частиц;
- наличие осадка на электродах;
- электропроводность слоя осадка.

Вопросы расчёта и выбора электрофильтров

Электрофильтры разделяют на однозонные (частицы пыли заряжаются и осаждаются в одной зоне) и двухзонные (те же процессы происходят в различных зонах – в ионизаторе и осадителе). Двухзонные электрофильтры применяют для очистки газа с меньшей концентрацией аэрозольных частиц, в них расстояние и напряжение между электродами меньше, чем у однозонных электрофильтров.

По способу удаления осажённых на электродах аэрозольных частиц электрофильтры разделяют на сухие и мокрые. В мокрых электрофильтрах осажённые аэрозольные частицы смачиваются жидкостью, чаще всего водой; такие электрофильтры предназначены для улавливания капельной жидкости или туманов. В сухих электрофильтрах пыль с электродов удаляется встряхиванием.

По способу прохождения аэрозольных электрофильтры бывают горизонтальные и вертикальные. Сухие электрофильтры редко изготавливают вертикальными, мокрые – чаще.

Наиболее распространены электрофильтры с пластинчатыми и трубчатыми электродами. В пластинчатых электрофильтрах между осадительными пластинчатыми электродами натянуты проволочные коронирующие электроды. В трубчатых электрофильтрах осадительные электроды представляют собой цилиндры (трубки), внутри которых по оси расположены коронирующие электроды.

Технологический расчёт электрофильтров сводится к определению времени пребывания газа в электрофильтре или параметров, определяющих время пребывания (скорость газа и активная длина электрофильтра) [4].

Кроме того, в основу выбора электрофильтра закладываются следующие характеристики:

- параметры пылегазового потока (температура, давление, состав газа, концентрация, дисперсность улавливаемых частиц);
- электрический режим аппарата;
- скорость газа в активном сечении;
- режим встряхивания электродов;
- конструкция электродов;

- характеристики осадка на электродах.

Важнейшим фактором, влияющим на процесс улавливания, является время, необходимое улавливаемой частице для достижения электрода. Скорость дрейфа частицы прямопропорциональна квадрату средней напряжённости электрического поля в электрофилт্রে. Из этого следует, что для сокращения времени осаждения частиц в электрофилт্রে надо поддерживать на его электродах максимально возможное напряжение.

Существенным фактором является значение удельного электрического сопротивления слоя аэрозольных частиц, осадённого на электродах. В зависимости от этой величины принято делить пыли на три группы:

- низкоомные пыли с удельным электрическим сопротивлением слоя ниже 10^4 Ом·см, при осаждении на электроде практически мгновенно разряжаются и могут возвратиться в газовый поток прежде, чем их удастся удалить в бункер аппарата;
- пыли с удельным электрическим сопротивлением слоя 10^4 до 10^{10} Ом·см обычно хорошо улавливаются в электрофилт্রে, а также достаточно хорошо удаляются в бункер;
- высокоомные пыли с удельным электрическим сопротивлением слоя 10^{10} – 10^{11} Ом·см и выше, которые создают наибольшие трудности для процесса электрической очистки газов. Такие пыли при осаждении образуют пористый изолирующий слой на осадительном электроде (см. п.5.6). В слое может происходить электрический пробой, в результате которого образуется тонкий канал, заполненный положительными ионами. При этом развивается мощный обратный коронный разряд, вследствие чего резко снижается эффективность электрофилтра.

Теоретическое выражение для парциальной эффективности электрофилтра было предложено В. Дейчем:

- для трубчатого электрофилтра

$$\eta_n = 1 - e^{-\frac{2\omega \cdot L}{WR}};$$

- для пластинчатого электрофилтра

$$\eta_n = 1 - e^{-\frac{\omega \cdot L}{WH}};$$

где ω – скорость дрейфа частиц;

W – скорость газа в активном сечении;

L – активная длина электрофильтра;

R – радиус трубчатого осадительного электрода;

H – расстояние между коронирующим и пластинчатым осадительным электродом.

Выбор типа электрофильтра [4] определяется требуемой степенью улавливания частиц, концентрацией и свойствами этих частиц, параметрами и объемом очищаемого газа, а также условиями установки электрофильтра.

Мокрые электрофильтры для очистки газа от пыли обеспечивают обычно более высокую степень улавливания, чем сухие, из-за отсутствия в них вторичного уноса осажденных частиц и наличия в активной зоне ряда благоприятных условий, способствующих стабильному протеканию процесса электрогазоочистки.

В мокрых электрофильтрах при соответствующих условиях может быть обеспечена стабильная очистка до выходных концентраций частиц в очищенном газе ниже $5\text{--}10\text{ мг/м}^3$, что удовлетворяет самым жестким требованиям технологического использования газа, например в турбинах или компрессорных установках. Мокрые электрофильтры используются также в том случае, если в соответствии с поставленными условиями очищаемый газ должен быть охлажден до температуры, соответствующей точке росы.

Однако мокрым электрофильтрам присущи все недостатки мокрых способов пылеулавливания, а именно: необходимость обработки образующихся шламов, наличие стоков, загрязняющих водоемы, возможность коррозии при наличии агрессивных составляющих в газе и т. д. Поэтому в тех случаях, когда это возможно, предпочтительно использование для пылеулавливания сухих электрофильтров. Следует, однако, иметь в виду, что стабильная очистка газа в этих аппаратах до выходных концентраций ниже 50 мг/м^3 в большинстве случаев сильно осложнена и может быть достигнута только путем значительного увеличения объема аппарата.

При использовании сухих электрофильтров предпочтение следует отдавать горизонтальным аппаратам, в которых может быть достигнута значительно более высокая эффективность улавливания, чем в вертикальных. Вертикальные электрофильтры для очистки дымовых газов обычно применяются в случае невозможности размещения горизонталь-

ных из-за отсутствия места. При этом следует учитывать, что однополюсные вертикальные электрофильтры могут работать с относительно невысокой степенью улавливания или в облегченных условиях (низкие входные концентрации пыли, отсутствие в ее составе особо мелких частиц, благоприятные условия для осуществления процесса электрогазоочистки). В ряде специальных случаев используются двухполюсные трубчатые электрофильтры с низкими скоростями таза в активном сечении.

С помощью электрофильтров (аппаратов электростатического осаждения) можно улавливать самые мелкие частицы, в том числе и субмикронные. Степень улавливания высокодисперсных частиц в них достигает 99,9 %. Гидравлическое сопротивление электрофильтров не более 100–150 Па, температура очищаемого газа может достигать 400–450 °С. Недостатки электрофильтров – высокая металлоёмкость и громоздкость, большая чувствительность к отклонениям от режима работы, высокие требования к взрыво- и пожаробезопасности. Ввиду высоких капитальных затрат экономически целесообразно применять электрофильтры при больших расходах газа; имеются электрофильтры, рассчитанные на расход газа более 1 млн. м³/ч [4,5].

Вопросы для самоконтроля

1. Какие Вы знаете методы обезвреживания аэрозолей?
2. Какие Вы знаете способы улавливания аэрозольных частиц?
3. Охарактеризуйте суть механизма гравитационного осаждения.
4. Чем обусловлено массовое применение аппаратов центробежного улавливания?
5. Перечислите преимущества и недостатки центробежного улавливания.
6. Перечислите преимущества и недостатки улавливания аэрозольных частиц в фильтрах.
7. Перечислите преимущества и недостатки мокрого пылеулавливания.
8. Охарактеризуйте известные Вам теории осаждения аэрозольных частиц на каплях жидкости.
9. Какие способы и аппараты наиболее предпочтительны при улавливании туманов?
10. В чем суть звуковой и ультразвуковой коагуляции аэрозольных частиц?
11. Каков механизм электростатического осаждения?

7 ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УЛАВЛИВАНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

В разделе практически без изменений использованы рекомендации, изложенные в работе [4].

Требования к полноте улавливания аэрозольных частиц могут определяться санитарно-гигиеническими условиями обеспечения чистоты атмосферного воздуха, необходимостью защиты технологического оборудования или требованиями самой технологии, например защитой вентиляторов от быстрого износа в результате эрозии лопаток ротора при воздействии на них абразивных аэрозольных частиц, предупреждением загрязнения катализатора при каталитических методах обезвреживания аспирационного воздуха или забивки промывных колонн пылью при абсорбции из газов необходимых составляющих. Наконец, в некоторых случаях полнота улавливания обуславливается стоимостью продукта, находящегося в дисперсной фазе аэрозоля.

Борьба с загрязнением атмосферного воздуха должна проводиться по трем основным направлениям: во-первых, путем конструктивного совершенствования технологических установок и оптимизации режимов их работы; во-вторых, путем правильного выбора аппаратов для очистки от аэрозолей; в-третьих, путем установки достаточно высоких дымовых труб или рассеивания примесей на значительные расстояния и площади, ослабляя тем самым их вредное действие.

К основным требованиям, предъявляемым к системам очистки от аэрозолей, относятся высокая эффективность и эксплуатационная надежность. Эффективность работы практически всех аппаратов очистки зависит от дисперсного состава частиц. Однако на работу электрофильтров не менее важное влияние оказывают и удельное электрическое сопротивление слоев аэрозольных частиц, температура и влажность газов. Эксплуатационная надежность многих аппаратов зависит от слипаемости частиц и их абразивности, начальной запыленности газов и их агрессивности.

Размеры частиц, образующихся при некоторых технологических процессах, и целесообразность их улавливания в различных типах аппаратов можно оценить по диаграмме на рисунке 25.

Следует иметь в виду, что чем выше требуемая степень очистки газов и чем мельче подлежащие улавливанию аэрозольные частицы, тем большими оказываются удельные капитальные затраты на сооружение установок очистки и расходы на их эксплуатацию. Прежде чем приступить к

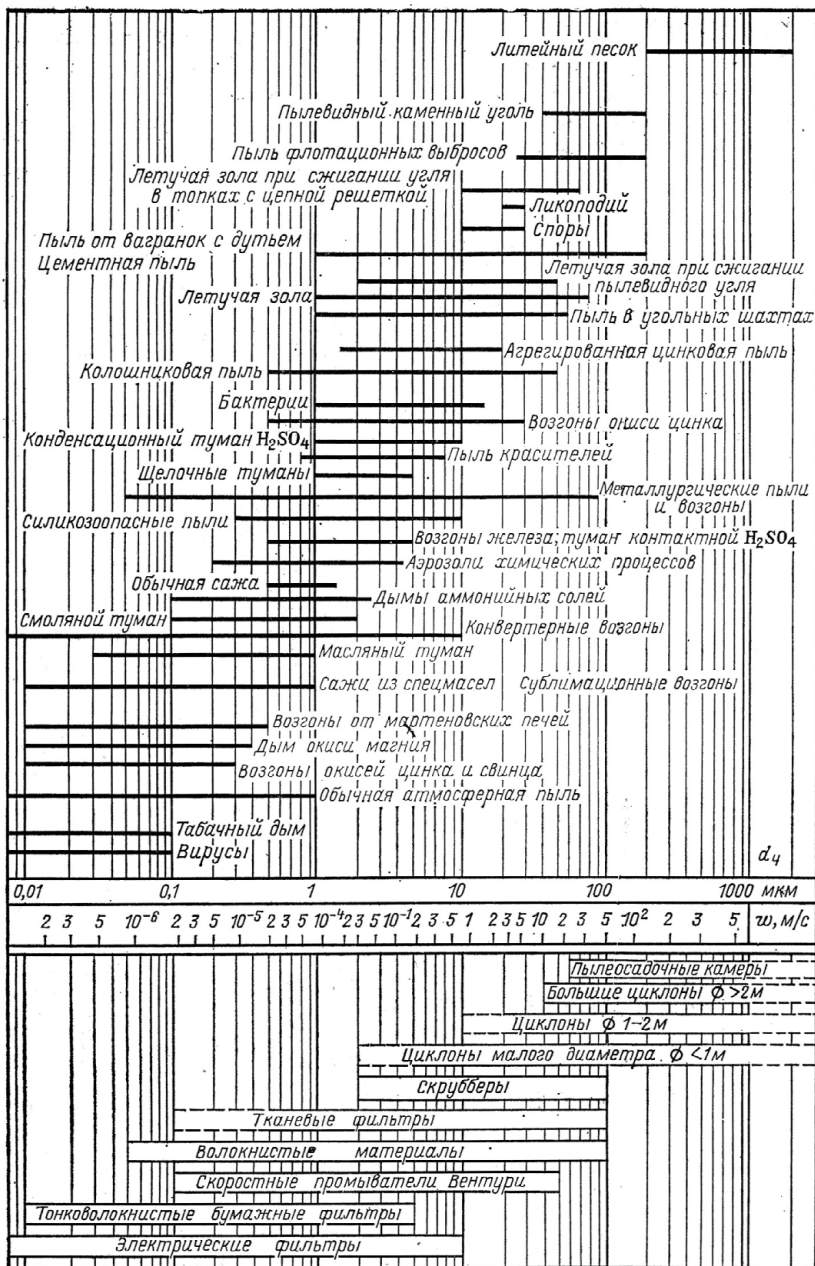


Рисунок 25 – Область применения пылеулавливающих установок [4]

проектированию системы газоочистки, необходимо изучить конструкционные и эксплуатационные особенности имеющихся аппаратов очистки.

Каждый аппарат очистки рассчитан на определенные условия работы. К ним в первую очередь следует отнести допустимое давление или разрежение, температуру, допустимые пределы изменения объемов очищаемого газа, возможность размещения на открытом воздухе и восприятия нагрузок от подводящих газопроводов и площадок обслуживания.

При компоновке аппаратуры очистных установок следует руководствоваться следующими положениями.

Пылеуловители обычно устанавливаются на всасывающей стороне вентиляторов или дымососов. Установка пылеуловителей на напорной стороне тягодутьевых машин возможна, если нет опасности, что тягодутьевые машины подвергнутся ускоренному абразивному износу. При мокрых схемах улавливания установка тягодутьевых машин желательна на напорной стороне во избежание отложения шлама на роторе машин и конденсаций паров воды на внутренней стороне улитки машины. В этом случае во избежание абразивного износа вентиляторов и дымососов перед ними обычно устанавливается ступень предварительной очистки сухим методом.

Для удобства обслуживания и ремонта улавливающей аппаратуры на каждом технологическом агрегате, как правило, устанавливаются индивидуальные аппараты очистки. Однако при разработке очистных установок для ряда параллельно работающих технологических агрегатов может быть принята и такая схема, когда отходящие газы от всех технологических агрегатов объединяются перед газоочисткой. Это дает возможность применения аппаратов большей производительности, и, как следствие — снижения капитальных и эксплуатационных затрат.

Установка аппаратов очистки отходящих газов от аэрозольных частиц может производиться как внутри зданий, так и на открытом воздухе. При этом должны учитываться климатические условия района, периодичность работы, тип применяемой аппаратуры, объем очищаемого газа. Практически же большинство аппаратов очистки может работать вне зданий. Так, например, наиболее сложные по конструкционному оформлению газоочистные аппараты — электрофильтры устанавливаются вне зданий. Однако для защиты изоляторных коробок от осадков и облегчения условий их обслуживания верх электрофильтра закрывается шатром или специальной кровлей. Подбункерное пространство электрофильтров также укрывается легкими материалами.

7.1 Технико-экономические основы выбора установок очистки

Сооружение газоочистных установок чаще всего связано с необходимостью обеспечения очистки отходящих газов. При этом технико-экономическое сравнение различных схем пылеулавливания может производиться лишь при сопоставимой эффективности рассматриваемых вариантов, обеспечивающей соблюдение норм предельно допустимых концентраций (ПДК). Этим обусловлены специфические особенности в сравнительной экономической оценке капитальных затрат на газоочистные сооружения.

Газоочистные установки, как правило, не дают прибыли. Возможность использовать уловленный продукт обычно лишь частично окупает их сооружение. Поэтому в числе технико-экономических показателей обычно отсутствуют данные, характеризующие рентабельность капитальных затрат, их окупаемость за счет ожидаемой прибыли. Технико-экономическая оценка газоочистных сооружений строится в основном на базе сравнительных данных. Объект газоочистки, подлежащий оценке, сравнивается по технико-экономическим показателям с лучшим действующим или запроектированным аналогичным объектом (аналогом). Аналог приводится в сопоставимые условия с оцениваемым объектом по мощности, степени очистки газов, условиям производства. Сравнения производятся по капитальным вложениям, численности обслуживающего персонала, производительности труда, эксплуатационным затратам, уровню приведенных затрат.

Часто при малых объемах подлежащих очистке газов относительно большие удельные расходы электроэнергии все же не составляют значительной суммы по сравнению с затратами на остальное производство, и поэтому можно отдать предпочтение тем аппаратам, которые требуют больших затрат электроэнергии на преодоление их аэродинамического сопротивления, но при этом более компактны или удобны в эксплуатации.

Наиболее трудно выбрать тип пылеуловителя при больших объемах очищаемых газов. В этих случаях размеры аппарата и энергетические затраты могут быть столь значительными, что они могут, с одной стороны, существенно повлиять на себестоимость основного производства, а с другой серьезно изменить размеры и компоновку цеха.

При экономической оценке того или иного метода следует учитывать непосредственные затраты на капитальное строительство и эксплуатацию не только улавливающих аэрозольные частицы аппаратов, но и вспомогательных устройств, таких как охладители газов, насосы для подачи воды, здания и т. д., а также принимать во внимание коррозию аппаратов, надежность их работы, сброс загрязненных сточных вод.

7.2 Выбор аппаратов улавливания аэрозольных частиц

Улавливание грубодисперсных аэрозольных частиц при умеренных требованиях к степени очистки газа в большинстве случаев целесообразно осуществлять в таких широко распространенных аппаратах, как различные виды циклонов, дымососы-пылеуловители, или в низконапорных мокрых аппаратах, таких как циклоны с водяной пленкой, ротоклоны и др.

При необходимости высокой эффективности очистки, в особенности при улавливании тонкодисперсной пыли, следует иметь в виду, что обеспечить заданную конечную концентрацию частиц в газе можно различными путями и в результате применения разных способов очистки газа. Поэтому выбор аппаратуры для улавливания является важнейшим моментом проектирования установок газоочистки.

Основным критерием для правильного выбора способа улавливания пыли является технико-экономическое сравнение вариантов. Однако в ряде случаев проведение такого сравнения на начальной стадии проектирования из-за отсутствия достаточно полных или достоверных данных бывает затруднено. В таких случаях приходится полагаться на некоторые общие соображения, приводимые ниже.

При выборе между сухими и мокрыми способами очистки необходимо иметь в виду, что хотя мокрыми способами можно проще добиться желаемой степени очистки и аппараты мокрой газоочистки значительно меньше по объему, чем сухие, однако энергозатраты в мокрых аппаратах для осуществления высокоэффективного улавливания аэрозольных частиц значительно выше, чем в сухих аппаратах. Соответственно капитальные затраты для мокрых систем ниже, а эксплуатационные затраты выше, чем для сухих.

К общим недостаткам аппаратов мокрой очистки следует отнести:

- необходимость обработки образующихся в системе шламов с отстаиванием из них уловленной пыли и возвращением оборотной воды на проведение процесса очистки газов (системы водооборотно-

го хозяйства требуют дополнительных капитальных затрат, поэтому если учитывать их в составе установок мокрых газоочисток, то последние по общим капитальным затратам приближаются к капитальным затратам на установки сухого улавливания, а в некоторых случаях даже превосходят их);

- возможность зарастания систем трудноудаляемыми отложениями, резко снижающими эксплуатационную надежность установки, если пыль обладает склонностью к цементации при обработке водой, например при содержании оксида кальция выше 20 %;
- коррозионное воздействие среды при наличии в газе агрессивных составляющих;
- ухудшение условий рассеивания при выбросе очищенных газов из трубы за счет низких температур газа, а также из-за конденсации водяных паров в выбрасываемых газах, так как газы после прохождения мокрых газоочисток, как правило, имеют температуру точки росы и т. п.

Поэтому при проектировании систем очистки запыленных газов предпочтение должно отдаваться сухим методам, если при этом технически возможно добиться требуемой эффективности.

Мокрые методы улавливания аэрозольных частиц предпочтительны, если в соответствии с технологическими требованиями очищаемый газ должен быть охлажден до точки росы или если улавливаемая дисперсная фаза используется в дальнейшем в производстве в виде пульпы или раствора. В ряде случаев мокрые методы приходится применять для улавливания аэрозольных частиц из взрывоопасных или токсичных газов, так как аппараты мокрой газоочистки из-за малого объема позволяют значительно лучше обеспечить условия герметизации корпусов, их эффективной и быстрой продувки, чем крупногабаритные сухие аппараты — электрофильтры или рукавные фильтры. Иногда мокрые методы очистки применяются при реконструкции сложившихся производств, когда должна быть обеспечена высокая степень очистки, а для строительства электрофильтров или рукавных фильтров не хватает места.

Снижение энергозатрат в мокрых схемах может быть получено при применении мокрых электрофильтров, однако при этом увеличиваются капитальные затраты и габариты установок.

В качестве средств высокоэффективного сухого улавливания аэрозольных частиц могут быть использованы рукавные фильтры или электрофильтры. Рукавные фильтры могут обеспечить значительно более

устойчивую и эффективную очистку, чем электрофильтры, при одинаковых параметрах улавливаемой пыли.

Сухие электрофильтры являются наиболее удобными аппаратами для очистки невзрывоопасных газов при температурах до 400 °С в том случае, если запыленность газа на выходе составляет не ниже 50—100 мг/м³ при объемах очищаемого газа свыше 50 000 м³/ч. Если объем очищаемого газа меньше или требуется более высокая эффективность улавливания, то выбор между электрофильтром и рукавным фильтром может быть сделан только путем тщательного технико-экономического анализа.

Следует также иметь в виду, что в некоторых случаях эффективность электрофильтров резко снижается из-за неблагоприятных параметров аэрозольного потока.

Данные о цели очистки газа позволяют выбрать оптимальный метод их очистки, например сухой или мокрый, наметить способ транспортировки уловленного продукта, отметки расположения выгрузочных устройств и в случае необходимости использовать уловленный продукт в сухом виде. Очистку отходящих газов нужно довести до санитарных норм, не исключая двухступенчатую схему очистки газов, когда основная масса продукта улавливается в сухих инерционных аппаратах, а тонкая доочистка производится в высокоэффективных аппаратах мокрого улавливания.

Стоимость улавливаемых продуктов позволяет решить вопрос о целесообразности степени извлечения продукта из газов, сопоставляя экономические затраты на очистку с эффективностью выше требуемой санитарными нормами со стоимостью извлеченного продукта.

Данные о происхождении выбросов, количестве одновременно работающих технологических аппаратов позволяют грубо оценить возможные изменения дисперсности аэрозольных частиц, направляемых на очистку газов, и их концентраций, а также возможные изменения их расхода. В большинстве случаев частицы, образовавшиеся в результате механических процессов измельчения, имеют размеры от 5 до 50 мкм и более; частицы, образовавшиеся как следствие термических и химических процессов, имеют размеры до 3 мкм.

Сведения о составе аэрозольных проб также позволяют уточнить выбор метода очистки газов. Например, наличие в них извести заранее исключает возможность использования мокрого пылеулавливания. Присутствие значительного количества абразивного материала требует изготовления центробежных аппаратов с повышенной толщиной стенок или специальной защитой, а также затрудняет применение фильтроваль-

ной ткани из-за быстрого износа на ней ворса. Сведения о наличии химически активных, горючих или взрывоопасных веществ позволяют предусмотреть необходимые меры по защите системы улавливания от коррозии, пожаров и взрывов. Объем подлежащих очистке газов дает возможность подобрать такую единичную производительность аппаратов, при которой число их не окажется слишком большим. Объемы газа влияют и на выбор метода его очистки. Например, применение сухих электрофильтров целесообразно при расходах газов не менее $8-10 \text{ м}^3/\text{с}$.

Сведения о температуре газов при входе в газоочистку позволяют решить вопрос о целесообразности их предварительного охлаждения и выбрать тип аппаратов очистки от аэрозольных частиц. При температуре газов $500-1000 \text{ }^\circ\text{C}$ их предварительное охлаждение необходимо.

Состав газов, их агрессивность, взрывоопасность, токсичность дают дополнительные сведения о типах пригодного для применения оборудования, материалах, необходимых для его изготовления, возможности расположения установок на открытом воздухе, мерах техники безопасности при работе с взрывоопасными и токсичными газами.

Содержание водяных паров в газах позволяет определить точку росы газов, оценить удельное электрическое сопротивление слоя пыли, рассчитать толщину теплоизоляции, необходимую для предупреждения конденсации паров воды на стенках аппаратов. Кроме того, знание влагосодержания газов является дополнительной информацией для выбора оптимальной схемы улавливания. Например, практически для всех технологических процессов очистка горячих газов с влагосодержанием менее $60-70 \text{ г}/\text{м}^3$ в электрофильтрах затруднена, так же, как и очистка сухого аспирационного воздуха (с влагосодержанием менее $15-20 \text{ г}/\text{м}^3$ при температурах более $70 \text{ }^\circ\text{C}$). Наличие в очищаемых газах серосодержащих соединений повышает температуру точки росы газов и заметно улучшает работу электрофильтров, хотя одновременно с этим возникает опасность сернокислотной коррозии.

Зная требования органов санитарного надзора к максимально допустимому остаточному содержанию тех или иных частиц в отходящих газах для данного района, необходимо провести ряд вариантных расчетов для выбора оптимального по технико-экономическим показателям метода очистки.

Сведения о плотности аэрозольных частиц и угле естественного откоса позволяют выполнить аппарат очистки с необходимыми для надежной работы механической прочностью и углами наклона стенок бункеров. Кро-

ме того, с учетом насыпной плотности частиц рассчитываются строительные конструкции под аппараты, подбираются транспортные устройства.

При выборе того или иного аппарата газоочистки обычно исходят из того, какая требуется степень очистки. Однако высокое значение степени очистки в ряде случаев не гарантирует выполнения санитарных норм, так как при расчете ПДК учитывается остаточная концентрация аэрозольных частиц в отходящих газах. Например, осаждение в электрофильтре, казалось бы, с высокой степенью эффективности (98—99 %) при содержании золы в отходящих газах на уровне 60 г/м^3 позволит снизить остаточную запыленность всего лишь до $0,6\text{—}1,2 \text{ г/м}^3$. При этом для обеспечения ПДК в приземном слое потребуется сооружение высокой дымовой трубы для рассеивания золы.

С другой стороны, очистка запыленных газов с эффективностью 98—99 % вполне достаточна при начальной запыленности на уровне 5 г/м^3 . При этом остаточная запыленность составит $0,05\text{—}0,1 \text{ г/м}^3$, что для большинства случаев является вполне приемлемой и не требует доочистки или специальных мероприятий по рассеиванию.

При выборе схем газоочисток расчет эффективности следует вести по остаточной концентрации аэрозольных частиц в очищенном газе. В случае невозможности очистки газов до требуемой остаточной концентрации в одном аппарате приходится устанавливать многоступенчатые схемы очистки газов. В частности, применяются установки сухого пылеулавливания в циклонах с последующей доочисткой в рукавных фильтрах. При мокрых методах обеспыливания газов в качестве ступени предварительной очистки применяется низконапорный скруббер Вентури перед мокрыми электрофильтрами или полые скрубберы перед высоконапорными скрубберами Вентури.

В ряде случаев применяются комбинированные схемы, состоящие из сухих механических аппаратов с доочисткой в высокоэффективных мокрых аппаратах.

Как отмечалось выше, установка механических ступеней очистки перед электрофильтрами нежелательна. Однако при начальных концентрациях аэрозольных частиц, превышающих $70\text{—}100 \text{ г/м}^3$, такая схема очистки бывает необходима.

Применение указанных многоступенчатых и комбинированных схем очистки отходящих газов от аэрозольных частиц позволяет поднять производительность наиболее эффективных аппаратов очистки, снизить содержание твердых отложений при мокрых методах очистки.

8 ПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ УЛАВЛИВАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ

Описанные выше процессы и аппараты очистки отходящих газов от аэрозолей находят непосредственное применение при реализации разнообразных технологий очистки в конкретных производствах. Отдельные примеры приведены ниже [5-10].

8.1 Очистка газов в производстве фосфорной муки

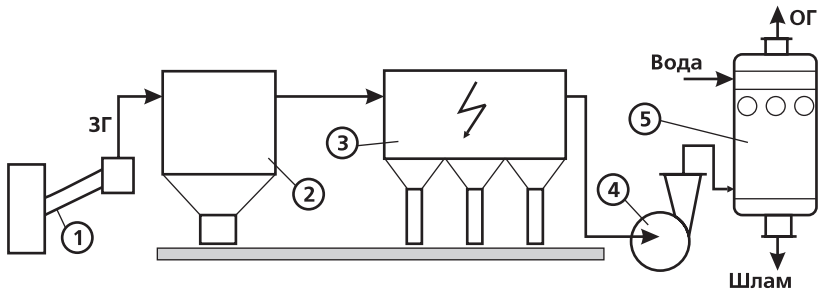
Фосфорная мука – основа для промышленности фосфорных удобрений и длительно действующее удобрение для кислых почв.

Фосфорную муку получают, подвергая природные фосфаты размолу и обогащению методами сухой или мокрой аспирации, обжига или флотации. Процессы обогащения связаны с уносом пыли с воздухом из аспирационных систем и с газами из сушильных установок. Рассмотрим очистку газов от фосфоритной муки.

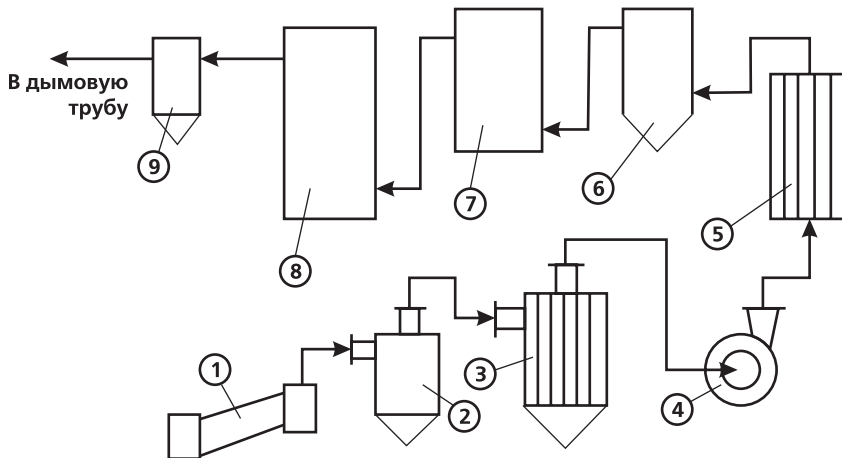
Отходящие газы через разгрузочную камеру сушильного барабана (1) (см. рис. 26) поступают в трехступенчатую пылеулавливающую установку. При этом уносятся практически все частицы диаметром менее 30 мкм. Первой ступенью очистки является аппарат центробежного улавливания – мультициклон (2), второй ступенью – аппарат электростатического осаждения – электрофильтр (3). Пыль, поступающая в электрофильтр, состоит из частиц с размером не более 10 мкм. Из электрофильтра газы дымососом (4) направляются в пенный аппарат (5), который кроме очистки служит для подогрева воды, подаваемой в основной технологический процесс. Охлажденные газы выбрасываются в атмосферу. Пыль из бункеров циклонов и электрофильтра возвращается в основное производство.

Установка очистки газов в производстве фосфорной муки характеризуется показателями:

Показатели	Циклон	Электрофильтр	Пенный аппарат
1 Температура, °С	110	110	45
2 Запыленность, г/м ³	298/37	37/3	3/0,8
3 Степень очистки, %	85,9	91,8	77,2
Всего:		99,7	



1 – сушильный барабан; 2 – батарейный мультициклон;
 3 – электрофильтр; 4 – дымосос; 5 – пенный аппарат
 Рисунок 26 – Схема очистки газов в производстве фосфорной муки



1 – сушильный барабан; 2 – циклон; 3 – групповой циклон;
 4 – вентилятор; 5 – орошаемый газоход; 6 – промывная башня;
 7,8 – орошаемые скрубберы I и II ступени; 9 – брызгоуловитель
 Рисунок 27 – Схема очистки отходящих газов в производстве суперфосфата

8.2 Очистка газов в производстве суперфосфата

Формирование больших объемов газопылевых выбросов происходит при получении гранулированного суперфосфата на стадиях сушки, грохочения, охлаждения и транспортировки продукта.

Отсасываемый от сушильного барабана (1) (см. рис. 27, стр.102) газ отделяется от пыли в группе аппаратов центробежного улавливания – циклонов (2), (3). Для предотвращения конденсации влаги в циклонах и газоходах предусмотрен паровой обогрев. Очищенные от грубодисперсной пыли газы направляются в промывную башню (6). После промывной башни (6) газы поступают на двухстадийную систему абсорбции. В качестве абсорбентов применяют воду или щелочные растворы, при этом одновременно с удалением пыли идет очистка газов от соединений фтора, которые выделяются в газовую фазу при разложении природного фосфата фосфорной кислотой.

8.3 Улавливание пыли моющих порошков

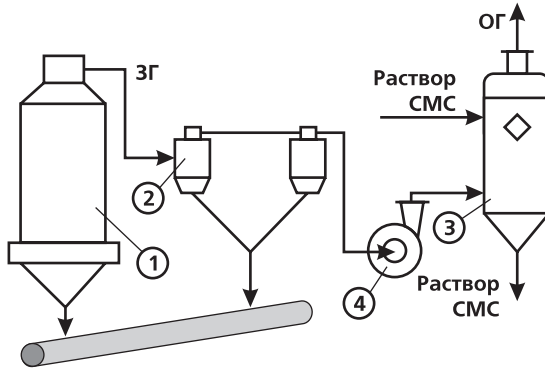
Основными загрязнителями атмосферы в данном производстве являются теплоноситель после распылительной сушилки, воздух из эрлифта (транспортёр – охладитель порошка). Температура газов после сушилки 100 – 130 °С. Уносимая пыль имеет обычно медианный диаметр частиц 30 – 70 мкм. Содержание пыли составляет 2 – 25 г/м³.

В стране действует ряд импортных и отечественных установок, выпускающих порошкообразные синтетические моющие средства (СМС). Эти установки оснащены различными системами пылеулавливания. Одна из них – установка фирмы «Кестнер» (см. рис. 28).

Запыленный газ отводится из сушилки (1) и поступает на первую ступень очистки в циклоны (2). Улавливаемая пыль через шлюзовые затворы подается на транспортёр порошка или пневмотранспортом может быть возвращена в сушилку (1). Газ из циклона подается дымососом (4) в скрубберы (3). Аппараты мокрого улавливания – многополочные скрубберы орошаются раствором СМС с концентрацией до 40 %, который подается на каждую из тарелок.

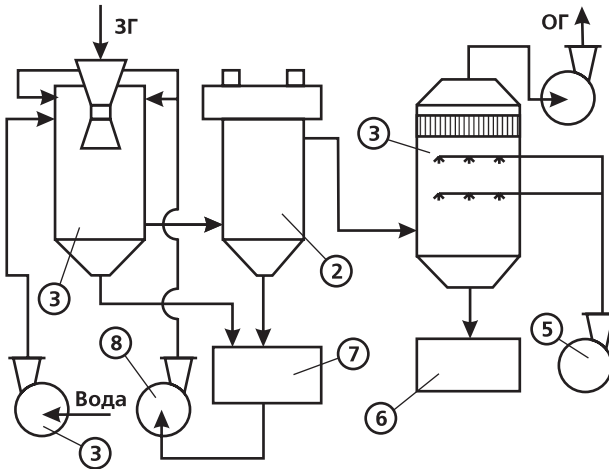
Часто перед циклонами устанавливаются инерционные пылеуловители для предварительной сепарации грубых фракций СМС.

Сухие пылеуловители дают эффективность очистки 90-93 %. Применение мокрого пылеулавливания дает возможность практически полностью удалить СМС из газа.



1 – сушилка; 2 – циклоны; 3 – скруббер; 4 – дымосос

Рисунок 28 – Схема улавливания пыли синтетических моющих средств из отходящих газов



1 – конфузорный скруббер; 2 – мокрый трубчатый электрофильтр;

3 – скруббер химической очистки газов;

5, 8, 9 – насосы для подачи растворов щелочи, серной кислоты и воды;

6, 7 – баки растворов щелочи и серной кислоты

Рисунок 29 – Схема очистки газов в лакокрасочной промышленности

8.4 Очистка газов в лакокрасочной промышленности

Неорганические пигменты, получившие преимущественное распространение в лакокрасочной промышленности, чаще всего представляются оксидами различных металлов – цинка, свинца, железа и других. Получение пигментов очень часто осуществляется через аэрозольную технологию.

При получении титановых белил имеют место газовые выбросы, содержащие диоксид титана до 4 г/м^3 . Пыль данного неорганического пигмента полидисперсна, частицы имеют неправильную форму с размером частиц $0,5\text{--}1,2 \text{ мкм}$.

Газы, поступающие из трубчатой печи, очищаются и охлаждаются с 400 до $80 \text{ }^\circ\text{C}$ в полом скруббере (4) (см. рис. 29, с.104) с конфузорным подводом, орошаемым циркулирующим 5%-ным раствором серной кислоты. Для компенсации потерь на испарение и каплеунос через форсунки подается определенное количество воды. Улавливание тумана серной кислоты и пыли диоксида титана производится в мокром вертикальном трубчатом электрофилтре (2). Окончательная очистка газов осуществляется в полом скруббере (3), который орошается слабым раствором едкого натра.

Степень улавливания диоксида титана:

- на первой ступени — 70 %;
- во второй ступени — 95 %;
- на третьей ступени — 80 %

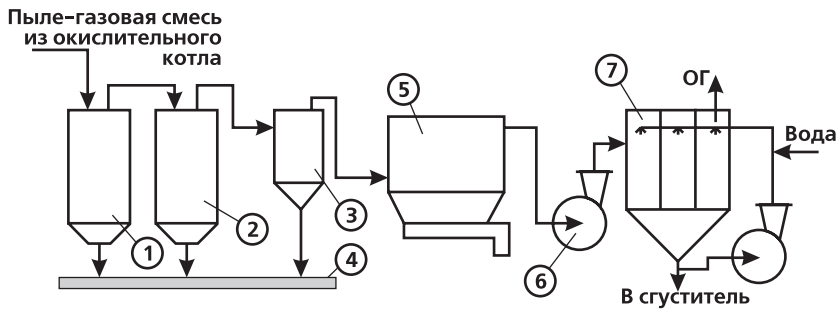
при общей эффективности очистки 99,2 %.

Установка сочетает очистку от пыли с химической очисткой от серного и сернистого ангидрида.

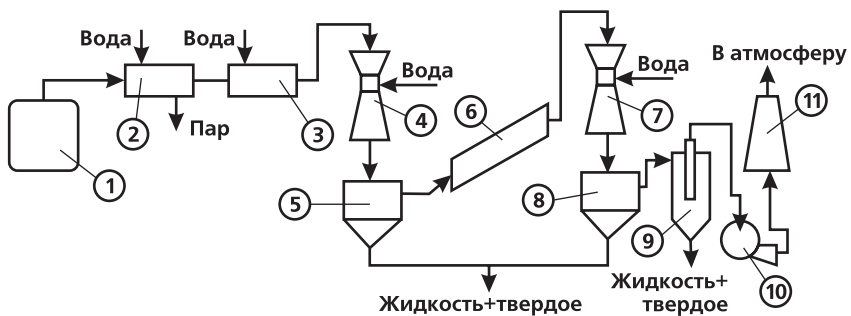
Оксид свинца (II), называемый в технике глетом, получают путем окисления расплавленного металлического свинца кислородом воздуха при $450\text{--}480 \text{ }^\circ\text{C}$ и отделением образовавшегося мелкодисперсного продукта от воздуха в пылеулавливающих аппаратах.

Обычно используется четырехступенчатая система очистки газов (см. рис. 30).

На первой и второй ступенях используются аппараты гравитационного осаждения – осадительные камеры (1), (2) и аппараты центробежного улавливания – одиночные циклоны (3). Тонкая очистка осуществляется в рукавных фильтрах (5) и аппаратах мокрого улавливания – камерах-скрубберах (7), в верхнюю часть которых впрыскивается вода. Образовавшаяся суспензия идет в сгуститель, а воздух выбрасывается в атмосферу.



1, 2 – пылеосадительные камеры; 3 – циклон; 4 – шнековый транспортер; 5 – рукавный фильтр; 6 – вентилятор; 7 – мокрая камера-скруббер; 8 – циркуляционный насос
Рисунок 30 – Схема очистки газа от оксида свинца



1 – конвертер; 2 – камин; 3, 6 – газод; 4, 7 – труба Вентури; 5, 8 – инерционные пылеуловители; 9 – центробежный скруббер; 10 – дымосос; 11 – дымовая труба
Рисунок 31 – Схема очистки конвертерных газов в черной металлургии

8.5 Очистка конвертерных газов в черной металлургии

В процессе кислородной продувки чугуна из конвертеров с отходящими газами выносятся в виде пыли 1,5–2,0 % от массы залитого чугуна. Концентрация пыли в газах изменяется в диапазоне 20–250 г/м³ и зависит от большого числа факторов:

- система отвода и охлаждения газа;
- режим кислородной продувки;
- качество, гранулометрический состав, влажность извести, подаваемой в ходе продувки.

Средний диаметр частиц пыли на входе в систему газоочистки составляет 25–30 мкм. Система пылеулавливания должна обеспечить очистку газа до 80–100 мг/м³. Пыль в основном состоит из оксидов железа.

Конвертерные газы, выходящие из конвертера (1) (см. рис. 31, с.106) с температурой 1300–1800 °С поступают в камин (2) со встроенным котлом – утилизатором, в котором газы охлаждают до 800–900 °С. Дальнейшее охлаждение газов производят в горизонтальном газоходе (3) за счет подачи мелкораспыленной воды, а затем в низконапорных трубах Вентури (4). После отделения суспензии «жидкость–твердое» в инерционном уловителе (5) по газоходу (6) газ поступает в высоконапорную трубу Вентури (7), где происходит коагуляция мелкодисперсной пыли при орошении водой в пределах 1,4–1,7 л/м³. Отделение суспензии «жидкость – твердое» снова осуществляется в инерционном уловителе (8).

После этого окончательная очистка газа от укрупненной пыли происходит в центробежном скруббере (9). Дымососом (10) через дымовую трубу (11) очищенные газы с концентрацией пыли около 70 мг/м³ выбрасываются в атмосферу.

8.6 Улавливание печного полуактивного технического углерода

Технический углерод – сырьё для резиновой, электротехнической, лакокрасочной, полиграфической промышленности – получают разложением газообразных или жидких углеводородов в условиях ограниченного доступа или без доступа воздуха. Размер частиц лежит в пределах 0,01–0,55 мкм, при этом 25–35 % технического углерода уносится с газами.

Из реакторов газовая смесь, охлажденная до 250–280 °С и увлажненная до содержания водяных паров 35–37 %, поступает в систему улавливания.

Вначале газы проходят через трехпольный электрофильтр (1) (см. рис. 32), где осажается часть технического углерода и происходит электрическая коагуляция частиц. Последующая очистка газа осуществляется в циклонах (3). Далее следует доочистка газов в однопольном пенном аппарате (5), назначение которого – предварительная очистка газов, охлаждение их до 75–80 °С и подготовка газов (насыщение водой) перед трубой Вентури. В трубе Вентури (6) осуществляется коагуляция мелких частиц углерода, не уловленных в предыдущих аппаратах. Установленный за трубой Вентури двухпольный пенный аппарат (7) используется в качестве каплеуловителя и аппарата тонкой завершающей очистки газа.

Запыленность газов с 40–50 г/м³ на входе в систему очистки снижается до 0,04–0,08 г/м³ на выходе из системы очистки.

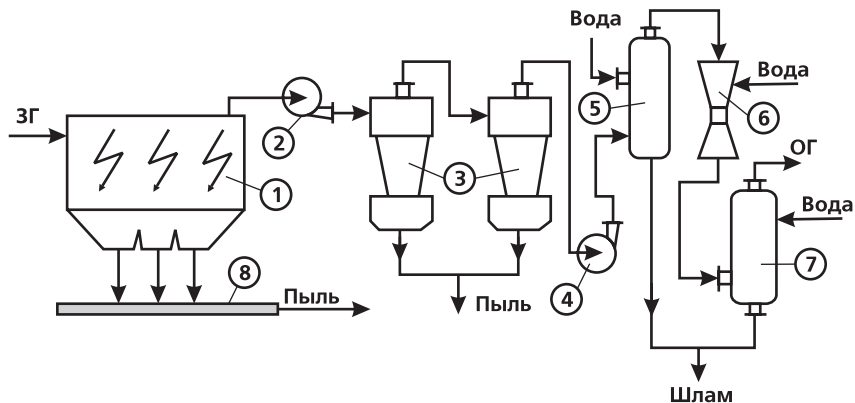
8.7 Очистка воздуха в производстве кормовых дрожжей

Завершающей стадией в производстве является сушка суспензии и улавливание полученного продукта. В большинстве случаев сушка ведется в распылительных сушилках, при этом 12–20 % уносятся с сушильным агентом в систему пылеочистки с температурой 80–95 °С и концентрацией дрожжей 200–300 г/м³. Кормовые дрожжи относятся к огнеопасным материалам, поэтому нежелательна очистка от них в электрофильтрах.

Сушильный агент, состоящий из дымовых газов и воздуха, при 300–400 °С под действием разряжения, создаваемого дымососом (7) (см. рис. 33), подается в сушилку (4), куда также подается дрожжевая суспензия. Высокодисперсные частицы уносятся сушильным агентом в систему групповых циклонов (6), откуда уловленный продукт совместно с основной частью продукта пневмотранспортом подается в циклон – разгрузитель (3). Готовый продукт поступает в накопительный бункер (2). Очищенный воздух подается вентилятором (9) в групповой циклон (6) для дополнительного улавливания мелких фракций.

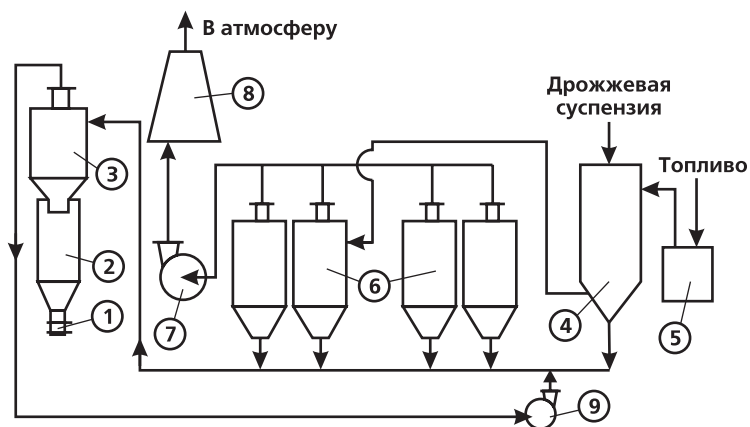
Дымовые газы дымососом (7) сбрасываются в атмосферу через дымовую трубу (8).

В качестве аппаратов очистки иногда используют рукавные фильтры, обеспечивающие более высокую степень очистки.



- 1 – электрофильтр; 2, 4 – газодувки (вентиляторы); 3 – циклоны;
 5 – однополочный пенный аппарат; 6 – труба Вентури;
 7 – двухполочный пенный аппарат; 8 – шнековое разгрузочное устройство

Рисунок 32 – Схема улавливания печного полуактивного технического углерода



- 1 – затвор; 2 – накопительный бункер; 3 – циклон системы пневмотранспорта; 4 – сушилка; 5 – полочная камера; 6 – групповые циклоны; 7 – дымосос; 8 – дымовая труба; 9 – вентилятор

Рисунок 33 – Схема очистки газов дрожжевой сушильной установки

8.8 Транспортирование пыли

Вопросы транспортирования уловленной пыли от пылеуловителей к местам ее складирования и утилизации имеют очень важное значение.

Применение того или иного метода транспортирования зависит от:

- способа выгрузки пыли из бункеров пылеулавливающих аппаратов;
- расстояния, на которое должна перемещаться пыль;
- метода дальнейшей переработки уловленной пыли;
- экономической целесообразности.

Различают следующие разновидности транспортирования пыли: пневмотранспорт, гидротранспорт, сухие способы

Пневмотранспорт

Наиболее часто применяемый способ.

Суть процесса заключается в транспортировании по герметичным трубопроводам с помощью воздуха (или газа). Это устраняет пыление материала и выделение вредных газов в помещение. Пневмотранспорт не имеет вращающихся механизмов и исключает возможность травматизма. При этом достигается высокая степень автоматизации процесса.

Системы пневмотранспорта могут работать при разрежении или под давлением. По способу создания в трубопроводе разности давлений пневмотранспортные установки делят: вакуумные (всасывающие), напорные (нагнетательные), комбинированные.

Вакуумные системы применяются в основном для транспортирования пыли с температурой менее 300 °С на расстояния до 200 м. При этом вакуумные системы бывают: с низким разрежением – до 10 кПа, средним – 30 кПа и высоким – до 93 кПа.

Напорные установки характеризуются высокой производительностью и дальностью транспортирования сыпучих материалов. Они могут работать под высоким давлением 0,1–0,6 МПа на расстояние до 1000 м при температуре до 200 °С, под средним давлением 1–100 кПа и низким давлением (до 1 кПа).

По направлению перемещения материала пневмотранспорт делят на горизонтальный пневмотранспорт и вертикальный пневмотранспорт.

К недостаткам пневмотранспорта можно отнести:

- большой расход электроэнергии;
- повышенный абразивный износ трубопроводов;
- невозможность перемещения влажных и слипающихся пылей.

Гидротранспорт

Это транспортирование материала по трубам с помощью воды (в виде пульпы). Метод характеризуется большой производительностью, несложностью технического обслуживания, высокой степенью автоматизации.

Движение пульпы может происходить как самотеком (безнапорный гидротранспорт), так и под напором (напорный гидротранспорт).

Количество воды может достигать 20 л на 1 кг материала. При этом применяются оборотные по воде циклы.

Недостатки гидротранспорта:

- ограниченность применения для больших размеров частиц;
- изнашиваемость трубопроводов;
- невозможность транспорта водорастворимых веществ;
- большой расход воды;
- необходимость отделения воды.

Сухие методы

Пыль можно транспортировать в герметичных контейнерах, цистернах, мешках или конвейерами: винтовыми, ковшовыми, скребковыми, ленточными (намного реже применяются из-за трудностей обеспечения герметизации).

По сравнению с другими видами транспортирования пыли сухие методы находят наименьшее применение.

8.9 Рекуперация пылей

В зависимости от способа улавливания, природы, количества и др. существуют методы рекуперации, ликвидации и изоляции промышленных пылей. Наиболее рациональной является рекуперация пылей.

Возможны следующие пути рекуперации промышленных пылей:

1. Использование в качестве целевых продуктов.
2. Возврат в производство, в технологии которого происходит образование пыли.
3. Переработка в другом производстве с целью получения товарных продуктов.
4. Сельскохозяйственное использование (в отдельных случаях как удобрение).
5. Специальная утилизация с использованием отдельных свойств.

Примером разнообразного применения уловленных пылей в строительной индустрии является зола-унос тепловых электростанций. Она используется для:

1. Производства вяжущих изделий:
 - Производство портландцемента;
 - Производство известково-зольных вяжущих веществ;
 - Добавление при помоле клинкера.
2. Изготовления стеновых изделий:
 - Производство силикатного кирпича;
 - Производство ячеистого бетона;
 - Производство глиняного кирпича;
 - Производство бетонных камней.
3. Производства заполнителей:
 - Гравий, щебень, песок;
 - Производство глиноземного керамзита;
 - Безобжиговый зольный гравий;
 - Производство зольного гравия.
4. Приготовления бетонно-растворных смесей:
 - Пластичная добавка в бетоны и растворы;
 - Мелкий заполнитель для бетона;
 - Микрозаполнитель в асфальтобетон.

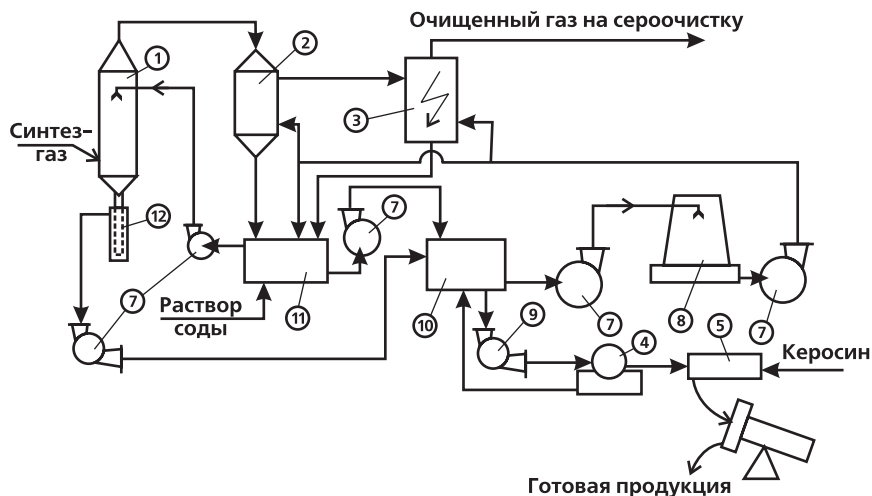
Кроме того, зола тепловых электростанций является хорошим адсорбентом ряда органических веществ (фенолы). Зола применяется в модифицированном виде для ликвидации нефтяных загрязнений на море.

Установлена возможность применения золы в сельском хозяйстве для удобрения почв с целью введения в неё цинка, калия, молибдена и бора, находящихся в золе.

Осваиваются процессы комплексного использования золы с целью получения магнезита, глинозема и даже углерода.

Рассмотрим один из способов утилизации пыли, уловленной в одном из производств, с использованием в качестве сырья для другого производства. Примером может служить схема производства топливных гранул из сажи, рекуперированной при очистке синтез-газа в процессе газификации жидких топлив.

Синтез-газ, содержащий частицы сажи, очищают от неё в несколько ступеней с использованием последовательно установленных по ходу газа скруббера (1) (см. рис. 34), пенного аппарата (2) и электрофильтра (3).



- 1 – скруббер; 2 – пенный аппарат; 3 – электрофильтер; 4 – вакуум-фильтр; 5 – смеситель; 6 – тарельчатый гранулятор; 7 – насос; 8 – градирня; 9 – шламный насос; 10 – отстойник; 11 – смеситель; 12 – гидрозатвор

Рисунок 34 – Схема производства топливных гранул из сажи, рекуперированной при очистке синтез-газа в процессе газификации жидких топлив

В качестве рабочей жидкости в системе используют воду, циркуляция которой обеспечивается насосами (7). Во избежание накопления в воде вредных примесей и солей, обуславливающих жесткость, в системе водооборота помимо охлаждения воды в градирне (8) предусмотрено её подщелачивание раствором соды в смешителе (11). Отделяемую в отстойнике (10) сажевую пульпу (шлам с содержанием сажи около 5 %) обезвоживают на вакуум-фильтре (4). Полученный кек смешивают в смешителе (5) с керосином (или другим подобным веществом) и гранулируют в тарелочном грануляторе (6). Готовый продукт – топливные гранулы размером 5-15мм содержат 25 % сажи, 70 % керосина, 5 % влаги.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основной библиографический список

1. Грин К., Лейн В. Аэрозоли - пыли, дымы и туманы. - Изд. 2-е. -Л.: Химия, 1972. - 428 с.: ил.
2. Спурный К., Йех Ч., Седлачек Б., Шторх О. Аэрозоли. - М.: Атомиздат, 1964. - 360 с.: ил.
3. Петрянов-Соколов И. В., Суругин А. Г. Аэрозоли. - М.: Наука, 1989.- 144 с.: ил.
4. Справочник по пыле- и золоулавливанию /Под ред. Русанова А. А. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.: ил.
5. Техника защиты окружающей среды /Родионов А. И., Клушин В. Н., Торочешников Н. С. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Химия, 1989. - 512 с.: ил.
6. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха – 2-е изд., перераб. и доп. – М.:Стройиздат, 1981. – 296 с.: ил.
7. Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю., Мягков Б. И., Ремизов И. К. Очистка промышленных газов от пыли. - М.: Химия, 1981. - 392 с.: ил.
8. Коузов П. А., Мальгин А. Д., Скрябин Г. М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. - Л.: Химия, 1985. - 256 с.: ил.
9. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. - М.: Metallургия, 1986. – 544 с.: ил.

Дополнительный библиографический список

10. Пылеулавливание в металлургии / В.М. Алешина, А.Ю. Вальдберг, Г.М. Гордон и др. – М.: Metallургия, 1984. -336 с.: ил.
11. Денисов С.И. Улавливание и утилизация пылей и газов – М.: Metallургия, 1991. - 319 с.: ил.
12. Страус В. Промышленная очистка газов – М.: Химия, 1981. – 616 с.
13. Юдашкин М.Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии. – М.: Metallургия, 1984. – 320 с.: ил.
14. Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Тарат Э.Я. Технология пылеулавливания. – Л.: Машиностроение, 1985. – 192 с.: ил.
15. Алиев Г.М.-А. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок. - М.: Metallургия, 1983. – 295 с.: ил.
16. Чуюнов Г.Г. Обезвоживание, пылеулавливание и охрана окружающей среды: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1987.- 260 с.: ил.

17. Исаенко П.В. Аэрозоли и их свойства. – М.: Гидрометеоиздат, 1985. – 232 с.: ил.
18. Цетлин В.Н. Аэрозоли в быту, - М.: Наука, 1978. – 136 с.: ил.
19. Райст П. Аэрозоли: Введение в теорию. – М.: Мир, 1987. – 280 с.: ил.
20. Гордон Г.М., Пейсахов И.Л. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1977. – 456 с.
21. Стефаненко В.Т. Очистка от пыли газов и воздуха на коксохимических предприятиях. – М.: Металлургия, 1991. – 70 с.: ил.
22. Ковалев О.С., Мухленов И.Г., Туболин А.Ф., Балабеков О.С. и др. Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений. – М.: Химия, 1987. – 208 с.: ил.
23. Петрухин М.П., Гродель Г.С. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах. – М.: Недра, 1981. – 217 с.: ил.
24. Калмыков А.В., Журбинский Л.Д. Борьба с пылью и шумом на обогатительных фабриках. – М.: Недра, 1984. – 222 с.: ил.
25. Лукашин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология. – М.: Металлургия, 1984. – 215 с.
26. Шаприцкий В.Н. Защита атмосферы в металлургии. – М.: Металлургия, 1984. – 215 с.
27. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах/ Нецепляев М.И., Любимова А.И., Петрухин П.М. и др.. – М.: Недра, 1992. – 298 с.: ил.
28. Лукин В.Д., Курочкина М.И. Очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности. – Л.: Химия, 1980. – 232 с.: ил.
29. Оборудование для санитарной очистки газов: Справочник/ И.Е. Кузнецов, К.И. Шмат, С.И. Кузнецов; Под общей редакцией И.Е. Кузнецова. – Киев: Техніка, 1989. – 304 с.: ил.
30. Джигирей В.С. Екологія та охорона навколишнього середовища: Навчальний посібник. – Київ: Знання, КОО, 2000. – 203 с.: іл.
31. Денисов С.И. Улавливание и утилизация пылей и газов: Учебное пособие. – М.: Металургия, 1991. – 319 с.: ил.
32. Техника и технология защиты воздушной среды: Учебное пособие для вузов/ В.В. Юмин, В.Л. Лапин, В.М. Попов и др. – М.: Высшая школа, 2005. – 391 с.: ил.
33. Пришивалко А.П., Астафьева П.Г. Человек в мире аэрозолей. – Минск: Наука и техника, 1989. – 157 с.: ил.
34. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: Справочное издание/ М.Г. Ладыгичев, Г.Я. Бергер. - М.: Теплотехник, 2004. - 696 с.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

<p style="text-align: center;">А</p> <p>Айткен Дж.....47</p> <p>Архимед.....30</p>	<p style="text-align: center;">М</p> <p>Ми Г.39,40</p>
<p style="text-align: center;">Б</p> <p>Броун Р.28</p>	<p style="text-align: center;">П</p> <p>Перрен Ж.Б.....31</p>
<p style="text-align: center;">Г</p> <p>Гиббс В.Е.19</p>	<p style="text-align: center;">С</p> <p>Смолуховский М.....28,32</p> <p>Стокс Д.Г.....27,28,30,42</p>
<p style="text-align: center;">Д</p> <p>Де Бройль М.....36</p> <p>Дейч В.89</p> <p>Доннан Ф.Дж.....16</p>	<p style="text-align: center;">Т</p> <p>Томсон Дж.19</p>
<p style="text-align: center;">З</p> <p>Зигмонди Р.....48</p> <p>Зидентопф Г.....48</p>	<p style="text-align: center;">У</p> <p>Уайтлоу-Грей Р.....31</p>
<p style="text-align: center;">К</p> <p>Каннингэм Е.27,34</p>	<p style="text-align: center;">Ф</p> <p>Фик А.28,30</p>
<p style="text-align: center;">Л</p> <p>Лаплас П.С.31</p>	<p style="text-align: center;">Э</p> <p>Эйнштейн А.....28,29,33</p> <p>Эренхафт Ф.....37</p>

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А	З
Абразивность52,92	Захват инерционный.....43
Адгезия26	Зацепление41,43
Анализ петрографический...55,56	
Астрозоль17,18	И
Аэрозоль.....5,24,45,92	Импактор.....47,53
	Испарение15,25,105
В	
Взрыв6,55	К
Взрывоопасность54,97,99	Камера пылеосадительная.....60
Воспламенение.....55	Коагуляция10,31,58
Вспышка55	Коагуляция звуковая85
	Коагуляция кинематическая.....76
Г	Коагуляция ортокинетическая...85
Газопромыватель	Конденсация5,19,81,94
• механический78	Концентрация
• полый.....76	гравиметрическая45,46
• скоростной79	Концентрация
• с подвижной насадкой77	кониметрическая.....45
• тарельчатый77	Коэффициент очистки59,63
• ударно-инерционного	Коэффициент преломления.....56
действия.....78	
• центробежного действия78	Л
Гигроскопичность46,53	Лучепреломление двойное57
Д	О
Движение броуновское..16,28,43	Осаждение.....40,60,70
Дезагрегация26	Осаждение
Детонация25,55	гравитационное43,58
Диспергирование.....7,23,25,37	Осаждение
Дисперсность.....7,14,50,88	электростатическое.....43,86
Диффузия28,43,79	Отражение света38
Дым.....8,15,38	
Дымка.....9,10,12,40	

П		Тиндаллоскопия48
Пресыщение.....19		Туман8,10,14,23
Плеохроизм56,57		Туманоуловитель
Плотность19,52,99		• волокнистый83
Поверхность удельная25,54		• сеточный84
Поглощение света58,75		• центробежный.....83
Пробег инерционный42		
Прочность разрывная52		У
Пылеулавливание мокрое....58,75		Улавливание
Пылеуловитель		• инерционное.....58,61
• вихревой.....67,69		• центробежное.....58,64
• жалюзийный62		Ультрамикроскопия48
• инерционный62,69,106		
• ротационный68		Ф
Пыль.....8,10,25		Фаза дисперсная7,15,29
		Фильтр
Р		• ватный46
Равновесие седиментационно- диффузионное30		• волокнистый73
Распределение		• зернистый74
• массовое51		• мембранный.....46
• счетное.....50		• рукавный.....71,97,106
Рассеяние света38		Фильтрация42,46,58,69
		Фотофорез.....37
С		Ц
Седиментация.....27,46		Циклон
Система аэродисперсная ..5,7,37		• батарейный.....65,66
Скруббер насадочный76		• групповой.....65,108
Слипаемость52,92		
Смачиваемость.....53		Э
Смог6,13		Электризация.....37,81
Среда дисперсионная7,30		Электрофильтр86,88,102
		Эффект ситовой43,70
Т		Я
Термопреципитация47		Ядро конденсации11,21
Термофорез.....37		

Навчальне видання

ПАНАСЕНКО Анатолій Іванович

**ТЕХНОЛОГІЯ ОЧИЩЕННЯ ВІД АЕРОЗОЛІВ
(російською мовою)**

ISBN 978-966-377-066-6

Свідоцтво про внесення до державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції: серія ДК № 2982 від 21.09.2007.

Підп. до друку 26.09.2008 р.
Папір офсетний
Ум.друк.арк. 7,34
Тираж 100 прим.

Формат 60x84/16
Друк різнографія
Обл.-вид. арк. 6,92
Замовлення № 1671

Надруковано ТОВ «ДРУК-ІНФО»
83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, к. 113
тел. (062) 335-64-55