

Защита атмосферы

Атмосфера — весьма подвижный и изменчивый элемент природной среды, находящийся в непрерывном взаимодействии и обмене с другими ее частями — гидросферой и литосферой.

Большая часть ее массы (порядка 60-70%) сосредоточена в приземном слое толщиной 10-18 км (тропосфере). Он входит составной частью в биосферу и играет важную роль в технологиях природопользования как источник одного из основных компонентов первичного сырья (воздуха). Более высокие слои атмосферы (стратосфера, мезосфера, термосфера, экзосфера), кратко рассмотренные в разд. 1.1, непосредственного участия в процессах, связанных с обеспечением производственной деятельности человека, не принимают и в понятие биосферы не включаются.

3.1. Общие сведения

Атмосфера всегда содержит определенное количество примесей, поступающих от естественных и антропогенных источников (табл. 3.1).

К примесям, выделяемым естественными источниками, относят аэрозоли (растительные, вулканические, космические, эрозии почв, морских солей, туманы), газы лесных и степных пожаров, вулканические, продукты жизнедеятельности и распада растительного, животного, микробиологического происхождения и т.д.

Естественные источники загрязнения бывают либо *распределенными* (выпадение космической пыли), либо *кратковременными* стихийными типа лесных и степных пожаров, извержений вулканов и т.п. Уровень загрязнения атмосферы естественными источниками является фоновым и мало изменяется со временем. Организмы, как правило, успевают адаптироваться к естественным изменениям загрязнения окружающей среды.

Более устойчивые зоны повышенных концентраций загрязнений возникают в местах активной жизнедеятельности человека. Антропогенные загрязнения отличаются многообразием видов и многочисленностью источников. Если в начале 20 в. в промышленности использовали 19 химических элементов, то в середине его — уже 50, а с 70-х годов — практически все элементы таблицы Д.И.Менделеева. Это привело к качественно новому этапу — загрязнению атмосферы соединениями, весьма редко встречающимися или не существующими в природе, в частности аэрозолями тяжелых, редких и радиоактивных металлов, синтетическими, канцерогенными, бактериологическими и другими веществами.

Таблица 3.1

Основные источники естественного и антропогенного загрязнения атмосферы

Примеси	Источники		Среднегодовая концентрация в воздухе, мг/м ³
	естественные	антропогенные	
Твердые частицы (аэрозоль, пыль и др.)	Вулканические извержения, пылевые бури, лесные пожары и т.п.	Сжигание топлива в промышленных и бытовых установках	В городах 0,04-0,4
SO ₂	Вулканические извержения, окисление серы и сульфидов лито- и гидросферы	То же, цветная металлургия	В городах до 1,0
NO _x	Лесные пожары	Промышленность, автотранспорт, теплоэлектростанции	В районах с развитой промышленностью до 0,2
CO	Лесные пожары, выделения океанов, окисление терпенов	Автотранспорт, черная металлургия	В городах 1-50
Летучие углеводороды	Лесные пожары, природный метан, природные терпены	Автотранспорт, дожигание отходов, испарение нефтепродуктов	В районах с развитой промышленностью 3,0
Полициклические ароматические углеводороды	Нет	Автотранспорт, химические заводы, нефтепереработка	В районах с развитой промышленностью до 0,01

Основные антропогенные загрязнения атмосферы создает сфера материального производства. Доля ее ведущих отраслей в загрязнениях на территории России распределяется следующим образом, %: транспортные средства — 40, теплоэнергетика — 25, промышленность и предприятия строительных материалов — 35. В США атмосферные загрязнения создают, %: транспортные средства — 50; теплоэнергетика — 20; промышленные предприятия — 15; установки для сжигания отходов — 5; прочие — 10.

К самым распространенным веществам-загрязнителям атмосферы относятся оксид углерода, диоксид серы (29%), оксиды азота (8%) и аэрозоли. Среди других техногенных загрязнителей следует отметить триоксид серы, сероводород и сероуглерод, аммиак, галогенсодержащие газы (в том числе фтористый и хлористый водород), ряд углеводородов, например бензол, толуол, бенз(а)пирен — всего более 500 соединений, и их количество продолжает увеличиваться (Тереженко).

Анализ вклада неканцерогенных и канцерогенных веществ в загрязнение воздуха показал, что, вопреки ожиданиям, определяющим является воздействие загрязнителей первой группы. Оно обуславливает до 90% смертей, вызванных ухудшением состояния атмосферы. Вклад канцерогенов (бензол, ПВХ, бенз(а)пирен, кадмий, никель и др.) в развитие злокачественных новообразований составляет только 1-3% и не превышает 10% в общей смертности, определяемой загрязнением воздуха.

Защита атмосферы требует существенных финансовых средств. В 2000 г. мировые затраты на очистку воздуха должны были составить 197 млрд дол. Более 50% из них приходится на химические и смежные производства. На угольных ТЭС затраты на очистку могли достигнуть 63 млрд дол/год, в том числе от выбросов NO_x — 5 млрд дол ($\text{Air} \dots$).

Отталкиваясь от одного из эмпирических обобщений, так называемого экологического закона 10% (разд. 1.8.1), на основании данных табл. 3.2 можно заключить, что, вероятно, доля отдельных загрязнителей атмосферы либо переросла допустимый уровень, либо близка к нему. В соответствии с этим законом, материально-вещественные перемены в системе природы, достигшие 10%, могут так изменить ее характер, что одна экосистема или геосистема превращается в другую. И хотя реальные отклонения от закона 10% по конкретным потокам вещества могут отличаться на порядок, положение с общим загрязнением атмосферы следует рассматривать как угрожающее. В частности, превышение концентраций выброшенных веществ по отношению к фоновому уровню в загрязненном атмосферном воздухе составляет в среднем по оксиду углерода 80-1250, по диоксиду серы — 50-300, по диоксиду азота до — 25. Примерный состав выбросов в атмосферу больших промышленных городов равен, %: CO — 45; SO_x — 18; C_nH_m — 15; NO_x — 10; пыли — 12.

Таблица 3.2

Количество антропогенных выбросов в атмосферу, млн т/год

Вещество	Выбросы		Доля антропогенных выбросов, % от общих
	естественные	антропогенные	
Твердые частицы	3700	1000	27
СО	5000	304	5,7
Углеводороды	2600	88	3,3
NO _x	770	53	6,5
SO _x	650	100	13,3
CO ₂	485000	18300	3,6

Вред, наносимый поступающими в атмосферу промышленными загрязнителями, известен: гибель флоры и фауны, снижение урожайности и качества продукции сельского хозяйства, преждевременное разрушение жилищ, металлоконструкций промышленных и гражданских сооружений, изменение климата отдельных регионов и т.д. Наиболее надежным средством защиты от этого вреда являются способы и аппаратура пыле- и газосулавливания. Так, их использование в США позволило в период с 1990 по 1997 г. снизить выбросы основных загрязнителей воздушного бассейна на 31%. За тот же период рост ВВП составил 114%, народонаселения — 31, общего километража автомобилей — 127%, что свидетельствует о возможности совмещения экономического роста государства с политикой чистой окружающей среды. За 1970-2000 г. получены аналогичные данные (Air ...).

3.2. Пылеочистка отходящих газов

3.2.1. Пылеобразование и пылеподавление

Частицы пыли представлены, как правило, аэрозолями или близкими к ним по размерам системами с твердой и жидкой дисперсной фазой (дымами, пылями, туманами). В технической литературе обычно не делают различий между дымами и пылями, применяя к процессам очистки газов от взвешенных в них твердых частиц общий термин «пылесулавливание».

Наличие в промышленных газах взвешенных частиц является результатом механических (дробление, измельчение, перемешивание, погрузочно-разгрузочные операции) и химических процессов. Пыли, образующиеся при конденсации паров, называют *возгонами*. В большин-

стве случаев взвеси, появившиеся в механических процессах, состоят из частиц размером 5 мкм и более, а пыли химических процессов представлены частицами диаметром менее 1 мкм.

Борьба с аэрозольными загрязнителями начинается еще до того, как они выбрасываются из технологического агрегата. В этом плане стремятся провести ряд мероприятий по сокращению самого пылевыведения, снизить число и мощность его источников.

Наиболее эффективным способом устранения или резкого снижения пылеобразования является применение малопылящего оборудования. Например, при прочих равных условиях используют дробилки, порода в которых разрушается раздавливанием и раскалыванием (щековые, конусные), а не ударом и истиранием (роторные, молотковые, истиратели). При выборе грохотов учитывают, что вибрационные конструкции энергично встряхивают материал и потому сильно пылят, а валковые пылят меньше, чем барабанные, и т.д.

В погрузочно-транспортных операциях необходимо стремиться к сокращению точек перегрузок, уменьшению их высоты и скорости движения материала, к использованию малопылящих разгрузочно-погрузочных устройств (спиральных спускных желобов, редукторных, а не трансмиссионных, передач и т.п.).

Значительный эффект дает организация местных и общих укрытий (кожухов, зонтов и т.п.) для технологического оборудования, мест перегрузок, дозировок и транспортировок. Так, при наличии укрытий у грохотов запыленность не превышает 20-150 мг/м³, а при открытых грохотах и сухих породах она достигает 800-1000 мг/м³. В целом тщательная герметизация укрытий гарантирует устранение 80-90% выбросов.

Пыль, осевшую на перекрытиях и оборудовании, необходимо регулярно убирать механическим способом. Уборка на рабочих местах осуществляется ежедневно.

Эффективным методом пылеподавления является увлажнение. Например, повышение влажности шамотного порошка с 0,2 до 4% уменьшает пылеобразование в 58 раз, увеличение влажности сухих кварцитов на 1-2% снижает его в 9-10 раз. Обычная эффективность этой операции составляет 60-80%. В тех случаях, когда пыль не смачивается водой, используют жидкости с добавлением ПАВ. Смачиватели должны удовлетворять определенным условиям: быть безвредными, хорошо растворяться в воде при жесткости до 35°, не реагировать с кислотами и щелочами, давать эффект при небольшой концентрации (до 0,1%), не вызывать коррозии металла. Они должны быть также устойчивыми во времени и при изменении температуры от 0 до 45°C, транспортабельными, не иметь неприятных запахов.

Смачиватели подразделяют на ионогенные и неионогенные. Наиболее эффективны неионогенные смачиватели ДБ, представляющие темно-коричневую жидкость, растворимую в воде любой жесткости. Эффективны также ионогенные смачиватели ОП-7 и ОП-10 — маслообразные вязкие жидкости коричневого цвета, хорошо растворимые в воде, но имеющие гнилостный запах. На практике часто применяют комбинированные смачиватели — 0,05-0,1%-ю смесь ДБ и ОП-10 с добавлением к раствору в качестве пептизатора 0,25%-го раствора сульфит-целлюлозного щелока или сульфитно-спиртовой барды. Используют также мыло, мылонафт, сульфанол, чекаль и т.п.

Из других мер устранения или снижения запыленности можно отметить подвод чистого воздуха к рабочим местам и отвод загрязненного, создание эффективной аспирации, минимально возможную скорость движения воздуха в рабочих помещениях. В частности, на рабочих местах асбестовых фабрик последняя не превышает 0,5 м/с, а в общем случае не должна составлять более 2 м/с.

3.2.2. Основные свойства пыли

Для процессов пылеулавливания весьма важны дисперсность (фракционный состав), плотность, смачиваемость, адгезионные, электрические и другие свойства частиц. Для правильного выбора пылеулавливающей аппаратуры необходимо прежде всего знать их дисперсионный состав.

По степени дисперсности пыли обычно разделяют на группы, диапазон линейных размеров которых в различных классификациях не совпадает. В целом можно выделить пять фракций пыли: I — очень грубая (более 200 мкм), II — грубая (70-200 мкм), III — средняя (10-70 мкм), IV — тонкая (1-10 мкм), V — очень тонкая (менее 1 мкм).

Фракцией называют массовую долю частиц, размеры которых находятся в интервале значений, взятых в качестве нижнего и верхнего пределов.

Важная технологическая характеристика частиц пыли — плотность (истинная, кажущаяся, насыпная).

Истинная плотность частицы — это отношение ее массы к объему за вычетом объема открытых пор.

Кажущаяся плотность — отношение массы частицы к объему.

Насыпная плотность — отношение массы пыли в слое к ее объему. Отметим, что в значительной степени она определяется дисперсностью частиц. С увеличением последней насыпная масса пыли уменьшается. Для грубой пыли она составляет обычно 0,4-0,6 от истинной

плотности. Цинковые и свинцовые возгоны цветной металлургии с размерами частиц 0,3-0,5 мкм могут иметь насыпную массу, составляющую только 0,1-0,05 от истинной плотности. Насыпная плотность слежавшихся пылей примерно в 1,2-1,5 раза выше, чем свежеобразованных. Последние содержат большее количество адсорбированных примесей, сообщаящих частицам одноименный электрический заряд, мешающий их сближению.

Знание величин насыпной плотности необходимо для инженерных расчетов объемов бункеров и других емкостей, в которых улавливают или складывают пыли.

Электрический заряд того или иного знака частицы приобретают в зависимости от способа получения и химической природы. Положительный заряд имеют, например, крахмал, мелкие частицы почвы, песок, туманы крепких кислот, уголь, хлористый натрий, отрицательный — мука, оксиды железа, магния, свинца, цинка. Число элементарных зарядов на одной частице составляет 10^4 - 10^5 с общим модулем потенциала напряжения 60-350 В.

Адгезионные свойства пыли определяют ее слипаемость, которая увеличивается с возрастанием степени дисперсности частиц. Практически все пыли IV и V группы дисперсности относятся к слипающимся, II и III групп — к среднеслипающимся, I группы — к малослипающимся. Слипание пылей существенно возрастает при их увлажнении.

Смачиваемость частиц в значительной степени определяет эффективность работы мокрых пылеуловителей, которая возрастает при ее увеличении.

3.2.3. Физические принципы и параметры пылеулавливания

Многочисленные конструкции аппаратов пылеулавливания, применяемых в настоящее время, покоятся на нескольких основных физических принципах, излагаемых далее.

Осаждение под влиянием силы тяжести. По этому принципу работают пылевые камеры, газоходы, инерционные пылеуловители. Устройства такого типа обычно эффективны при улавливании грубых частиц размером 50 мкм и более.

Осаждение под действием центробежной силы. Эта сила может быть значительно больше силы тяжести. В пылеуловителях, основанных на данном принципе, газу обычно сообщают вращательное движение при тангенциальном вводе его в аппараты круглого сечения (в

плане), называемые *циклонами*. Они эффективны при улавливании частиц размером 5-10 мкм и более.

Фильтрация запыленного газа через ткань или другую пористую перегородку — надежный способ улавливания очень тонких пылей.

Электростатическое осаждение используют в электрофильтрах. Подобная очистка основана на свойстве частиц пыли заряжаться в интенсивном электрическом поле, создаваемом вокруг электрода подведенным к нему постоянным током высокого напряжения (50-90 кВ). Электрофильтры используют для улавливания более мелких, чем в циклонах, пылей, включая ультратонкие (порядка 0,1 мкм).

Промыватели. Частицы задерживают на каплях и пленках промывающих жидкостей. Как и фильтры, они эффективны при улавливании очень тонких пылей.

Перечисленные принципы позволяют разделить способы пылеулавливания на *сухие* и *мокрые* (сухие и мокрые пылеуловители).

Процесс очистки газов от аэрозолей, независимо от способа улавливания, характеризуется несколькими основными параметрами: степень очистки, гидравлическое сопротивление аппарата, расход электроэнергии, стоимость аппарата и стоимость очистки.

Степень очистки η в единичном аппарате:

$$\eta = \frac{(C_{BX} - C_{ВЫХ})}{C_{BX}}, \quad (3.1)$$

где C_{BX} и $C_{ВЫХ}$ — массовые концентрации примесей в газе соответственно до и после пылеуловителя.

Если очистку ведут в системе последовательно соединенных аппаратов, то *общая степень очистки*

$$\eta_B = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n), \quad (3.2)$$

где $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ — степень очистки первого, второго, ...n-го аппаратов.

Различают *общую* и *фракционную* степени очистки газов, которые относят соответственно ко всей массе частиц и к каждой фракции отдельно.

Гидравлическое сопротивление аппарата — разность давлений газового потока на входе и выходе из пылеуловителя.

Расход электроэнергии, стоимость аппарата (капитальные затраты) и очистки относят обычно на 1000 м^3 очищенного газа.

3.2.4. Пылеочистительная аппаратура

Как уже отмечалось, все способы пылеулавливания можно разделить на сухие и мокрые. Оборудование для сухого улавливания вклю-

чает пылеосадительные устройства, пылеуловители центробежного действия, фильтры, электрофильтры. К оборудованию для мокрого улавливания пыли относят скрубберы различных типов, барботажные аппараты, скоростные пылеуловители и др. Все пылеуловители делят на пять классов в зависимости от крупности пыли, для очистки от которой они предназначены (по нижнему пределу ее крупности):

Класс пылеуловителей	I	II	III	IV	V
Размер улавливаемых частиц, мкм	0,3	2	4	8	20

3.2.4.1. Пылеосадительные устройства

К пылеосадительным устройствам относят аппараты, в которых улавливание твердых частиц происходит под влиянием силы тяжести, т.е. пылеосадительные камеры и инерционные пылеуловители (рис. 3.1-3.3).

Пылеосадительные камеры представляют собой металлическую или железобетонную емкость прямоугольного сечения, площадь которой в несколько раз больше площади газоподводящего трубопровода. Из-за резкого уменьшения скорости потока в камере (до 0,2-1,5 м/с) взвешенные частицы, обычно крупностью более 50 мкм, в значительной степени успевают осесть на ее дно. Степень очистки в камерах в зависимости от дисперсности пыли достигает 40-90%. Для ее повышения камеры оборудуют специальными приспособлениями (перегородки, подвешенные цепи, проволока и т.п.), разбивающими поток входящего газа, улучшающими распределение его струй и прижимающими их к низу камеры (рис. 3.1).

Применение камер целесообразно при: горизонтальных или наклонных газоотводах большого сечения, когда подсоединение более эффек-

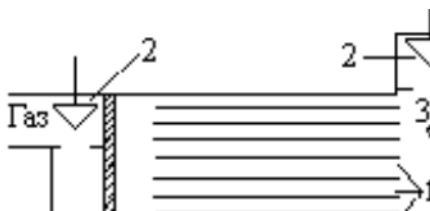


Рис. 3.1. Пылевая камера с горизонтальными полками:
1 — полки; 2 — колокольчатые затворы; 3 — люки для удаления пыли

тивной аппаратуры пылеулавливания затруднено; повышенной запыленности газов (несколько сотен граммов на 1 м³) как предварительной ступени очистки; повышенной температуре отходящих газов (600-1300°C), содержащих размягченные и слипающиеся крупные частицы, которые на пути движения по камере охлаждаются и становятся сыпучими.

Во многих случаях пылевые камеры, устанавливаемые за технологическими агрегатами, например металлургическими, из которых выходят газы с температурой свыше 600°C , заменяют котлами-утилизаторами или камерами испарительного охлаждения. Те и другие с точки зрения пылеулавливания также являются пылевыми камерами.

Во многих случаях в качестве камер используют просто расширенные газоходы, степень очистки в которых составляет 10-20%, иногда до 35%.

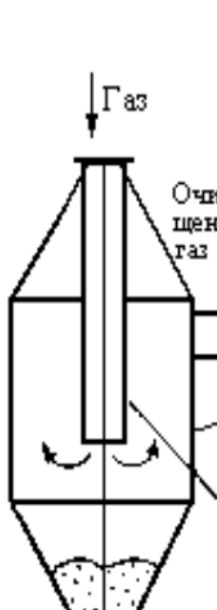


Рис. 3.2. Радиальный пылеуловитель:

- 1 — корпус;
- 2 — входная труба

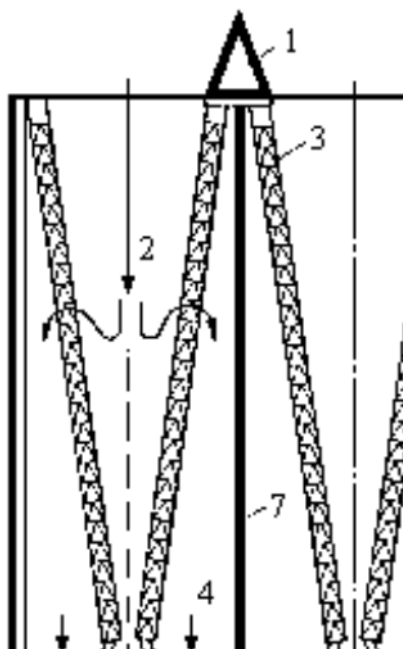


Рис. 3.3. Вертикальный жалюзийный пылеотделитель:

- 1 — защитная призма соединительного узла;
- 2 — направление движения запыленных газов;
- 3 — уголки;
- 4 — направление движения очищенных газов;
- 5 — пылесборник;
- 6 — стенки газохода;
- 7 — перегородка

Инерционные пылеуловители, основываясь на принципе пылесаживания под влиянием силы тяжести, включают дополнительный элемент, увеличивающий степень пылеулавливания, — изменение направления га-

зового потока. К этому типу устройств относятся радиальные пылеуловители (пылевые мешки) и жалюзийные пылеуловители различного вида.

Радиальные пылеуловители обычно устанавливают за агрегатами, имеющими вертикальные газоотводы типа «гусиная шея», например за шахтными печами и печами «КС», располагая по нисходящей ветви газопровода. Газ поступает в мешок сверху, а отводится сбоку, пыль по инерции в значительной степени продолжает движение в низ мешка, где скапливается и периодически выпускается через разгрузочное устройство. Эффект очистки газа от частиц размером 25-30 мкм обычно составляет 0,65-0,85.

Жалюзийные пылеуловители известны в вертикальном и горизонтальном исполнениях. В первом случае в вертикальном газоходе устанавливают несколько рядов уголков, которые соединяют призмой. Запыленные газы, проходя через уголковые жалюзи, изменяют направление движения. При этом пыль по инерции попадает в пылесборник, а очищаемые газы уходят далее по газовому тракту. Преимуществом ЖУП: малые габариты, возможность установки внутри газоходов, простота конструкции и обслуживания, относительно небольшое сопротивление. ЖУП обеспечивают очистку на уровне 80% для частиц размером более 20 мкм и применяются для дымовых газов с температурой до 450-600°C и скоростью 15-25 м/с на подходе к решетке.

Созданы также жалюзийно-магнитные сепараторы (Сандуляк...).

3.2.4.2. Пылеуловители центробежного действия

Пылеуловители центробежного действия включают циклоны, аппараты ротационного и вихревого типов. Наиболее известны циклоны, получившие широкое распространение в технике пылеулавливания.

По форме корпуса циклоны разделяют на цилиндрические и конические. Их устройство в принципе одинаково.

Газовый поток вводится в циклон (рис. 3.4) через патрубок 2 по касательной к внутренней поверхности корпуса 1 и совершает вращательно-поступательное движение вдоль корпуса к бункеру 4. Частицы пыли центробежной силой отбрасываются к стенке циклона, теряют скорость, падают в коническую часть аппарата, откуда разгружаются в находящийся внизу бункер. Газы, освободившиеся от пыли, удаляются через центральную отводящую трубу 3. Их обычная скорость на входе составляет 10-25 м/с, на выходе — 4-6 м/с. Для нормальной работы циклона необходимы герметичные бункера. При нарушении герметичности и подсосе наружного воздуха повышается вынос пыли через отводящую трубу.

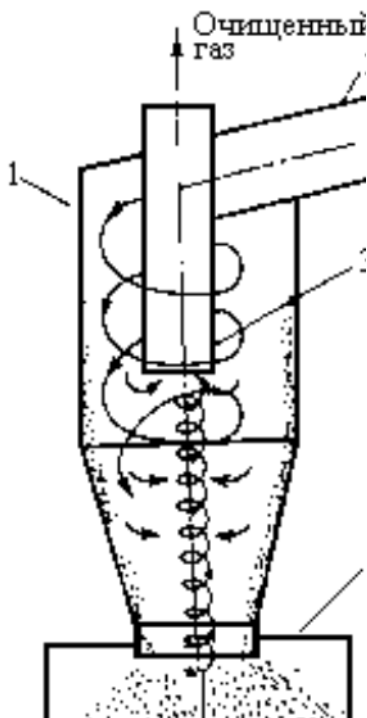


Рис. 3.4. Цилиндрический циклон

углеродистой стали, при температурах до 800°C — из жароупорной. Для более высоких рабочих температур аппараты футеруют, выхлопные трубы выполняют цельнокерамическими или водоохлаждаемыми. Созданы также циклоны с футеровкой из каменного литья, обладающие, помимо термостойкости, высокой абразивной устойчивостью.

Циклоны серии ЦН относятся обычно к пылеуловителям V класса, рассчитанным на I, II группы пылей с их входной концентрацией до 1000 г/м^3 , имеют производительность по газу до 48 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ при гидравлическом сопротивлении не более 2,5 кПа. Гидравлическое сопротивление конических циклонов СК-ЦН достигает 4 кПа. Коэффициент полезного действия цилиндрических циклонов обычно составляет 70-90%, конических — до 95%. Он сильно зависит от крупности частиц пыли. С помощью этих аппаратов успешно улавливают слабые и среднеслипающиеся грубо- и среднедисперсные пыли.

Наиболее распространенными типами циклонов являются цилиндрические диаметром 200-3600 мм, работающие при избыточном давлении до 2,5 кПа (ЦН-2, ЦН-15, ЦН-24 и др.). Здесь цифры в скобках — величина угла патрубка на входе в циклон по отношению к горизонтальной плоскости. Используют также конические циклоны НИИО-ГАЗа. Они имеют повышенное гидравлическое сопротивление при более высокой степени очистки. Конические циклоны серии СК (СК-ЦН-33, СК-ЦН-34 и др.) успешно применяют для очистки газов от сажи. Наряду с циклонами НИИОГАЗа в цветной металлургии используют близкие по эффективности циклоны типа СИОТ диаметром до 4350 мм, устанавливая их, в частности, для очистки газов печей КС. В целом циклоны пригодны для разнообразных условий работы, в том числе при сравнительно высоких температурах.

Материалы корпуса циклона подбирают в зависимости от температурного режима его эксплуатации. Для 600°C корпус изготавливают из

Циклоны обычно не используют как конечные пылеуловители. В этом качестве они могут применяться только при пылях, содержащих незначительное количество частиц размером менее 10 мкм, при условии их выброса в атмосферу на значительной высоте. Циклоны рекомендуется использовать для предварительной очистки газов, устанавливая их перед фильтрами или перед электрофильтрами.

Степень очистки газа в существенной степени зависит от диаметра циклона. При его меньших значениях очистка протекает полнее, но уменьшается производительность. Поэтому для улавливания более мелких частиц применяют групповые и батарейные циклоны (мультициклоны), состоящие из параллельного ряда небольших циклонов. Конструктивно они объединяются в один корпус и имеют общие подвод, отвод газов и разгрузочный бункер. Групповые циклоны включают 2, 4, 6, 8 циклонов диаметром от 200 до 1100 мм. Батарейные циклоны наиболее распространенного типа (БЦ-2) насчитывают до нескольких сотен мультициклонов диаметром 100-400 мм. Степень очистки газов в них можно довести до 80-98%.

3.2.4.3. Фильтры

Фильтры используют для тонкого пылеулавливания (размер частиц до 0,05 мкм) и когда затруднено применение электрофильтров. Имеются в виду случаи малого и слишком высокого электросопротивления частиц пыли или необходимость специальной подготовки газов для электрофильтра, например их дожигание. Однако электрофильтры обладают неоспоримым преимуществом при пылеочистке агрессивных газов, если температура последних близка к точке росы, т.е. реальна опасность выпадения конденсата на материал фильтра.

Фильтры классифицируют по типу и материалу фильтровальной перегородки, конструкции, назначению и другим признакам.

По типу перегородки различают фильтры: с зернистыми слоями (неподвижные свободно насыпанные зернистые материалы или псевдоожиженные слои); с гибкими пористыми перегородками (ткани, войлоки, волокнистые маты, губчатая резина, полиуретан и др.); с полужесткими пористыми перегородками (вязанные тканые сетки, прессованные спирали, стружка и т.п.); с жесткими пористыми перегородками (пористые керамика и металлы).

Зернистые фильтры состоят из частиц различной формы, чаще — гравия. Их используют для очистки газов от крупных механических примесей (от дробилок, грохотов, сушилок, мельниц). Толщина гравийного слоя составляет 100-150 мм при крупности частиц 30-50 мм.

Зернистые фильтры дешевы, просты в эксплуатации и обеспечивают 99%-ю степень улавливания грубодисперсных пылей.

Для изготовления фильтров широко используют различные *натуральные ткани* (хлопчатобумажные, шерстяные): ситец, бязь (толщина 0,2 мм), фильтровальное сукно № 2 (толщина 1,5 мм), техническое сукно ЦМ, байку с 40% капрона. Рабочая температура хлопчатобумажных тканей составляет 60°C, они нестойки в кислых средах. Для сукна допустима более высокая температура отходящих газов (65-85°C). Срок службы тканей при улавливании пылей цветной металлургии составляет 0,5-1,0 год.

Синтетические материалы часто применяют в виде нетканых волокнистых слоев (войлоков) с хаотическим расположением волокон. Тонкость и эффективность очистки войлоком выше, чем ткаными фильтрами, изготовленными из нитей того же диаметра. Используют синтетические материалы — все толщиной порядка 1,5 мм, с температурой эксплуатации 90-250°C. Они более устойчивы в кислых и щелочных средах, чем натуральные.

Основные параметры процесса пылеулавливания при использовании натуральных и синтетических волокон обычно следующие: входная концентрация пыли 20-50 г/м³, гидравлическое сопротивление фильтров 1-3 кПа, степень очистки 0,97-0,997.

Большой термо- и химической стойкостью, чем натуральные и синтетические тканевые материалы, обладает *стекловолокно*. Его рабочая температура составляет 200-250°C, оно кислотостойко, однако плохо работает на изгиб. Диаметр стекловолокна равен 8-10 мкм, толщина ткани — 0,25-0,90 мм. Срок службы стекловолокна и синтетики — 2-4 года.

Одним из распространенных фильтровальных материалов является *проволочная сетка* из низко- или высоколегированных сталей, меди, латуни, бронзы, никеля и других металлов. Такие сетки могут работать при температуре до 500°C, включая агрессивные среды. Однако они уступают фильтрующим элементам из тканей и войлока по тонкости очистки (15 мкм при однослойной сетке).

В последние годы все технически развитые страны ведут работы по созданию фильтрующих элементов из *пористых керамических и металлических материалов*. Эти элементы прочны и коррозионноустойчивы, работают при температурах 300-900°C, их пористость составляет 85%. Частицы размером более 3 мкм из очищенного потока выделяют-ся практически полностью, а при размере свыше 0,25 мкм — на 99,2%. В ФРГ освоен выпуск промышленного модуля, имеющего металлические элементы общей площадью 7 м². Он предназначен для очистки газов с температурой до 850°C и с концентрацией пыли до 35 г/м³ при надежности работы в течение более 3 тыс. ч (Раб...; Filtration...).

По конструктивному оформлению фильтры делят на ячейковые (рамочные, патронные и каркасные), рулонные и рукавные (мешочные).

Ячейковые и рукавные фильтры относят к первому классу пылеуловителей и применяют для ультратонкой очистки технологических и вентиляционных выбросов радиоактивных, биологических и высокотоксичных пылей. Эти фильтры снаряжают материалами типа ФП, представляющими собой нанесенные на марлевую подложку слои синтетических волокон диаметром 1-2 мкм (перхлорвинил — ФПП, фторполимеры — ФПФ и др.). Во всех случаях ультратонкой очистки применяют предфильтры (ткани, войлоки) для улавливания частиц крупностью 1 мкм и снижения концентрации примерно до $0,5 \text{ мг/м}^3$.

В настоящее время разработан ряд фильтров рамочной конструкции с производительностью до 3,5 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ и степенью очистки 0,999 (при входной концентрации пыли $0,5 \text{ мг/м}^3$).

Ячейковые элементы имеют ограниченный срок службы из-за быстрого засорения фильтровальных элементов, что требует их частой замены и регенерации. Этот недостаток частично устраняется при использовании рулонных фильтров, которые применяют для очистки воздуха с концентрацией примесей не более 10 мг/м^3 .

Рулонный фильтр представляет собой корпус, в верхней части которого размещена катушка с намотанным на нее чистым фильтровальным материалом в виде мата. Он перемещается через проем для прохода воздуха и периодически наматывается на нижнюю катушку по мере забивания материала пылью и достижения заданного гидравлического сопротивления прохождению воздуха. Перемещение происходит на длину, соответствующую размеру проема для входа воздуха в фильтр, составляя примерно 50 см/мин. Фильтровальным материалом служат маты из стекловолна (в виде рулонов диаметром 300 мм, длиной 20 м и толщиной 50 мм). Гидравлическое сопротивление рулонных фильтров равно 100-150 Па.

За рубежом (Швейцария) для электронной промышленности разработаны установки ультратонкой очистки воздуха, включающей 3-4 ее ступени. Степень улавливания финишных фильтров — до 99,99995% частиц с размером 0,1 мкм (Карнис...).

Наибольшее распространение в промышленности получили *рукавные фильтры*. Они обычно состоят из 10-20 параллельно работающих секций с несколькими десятками рукавов в каждой из них. Запыленные газы поступают по общему для всех секций газопроводу в нижнюю бункерную часть фильтра, закрытую распределительной решеткой с отверстиями для прохода газа (по числу рукавов секции). Нижние открытые концы рукавов крепят при помощи патрубков в решетке. Запыленные газы попадают внутрь рукавов, фильтруются через ткань со скоро-

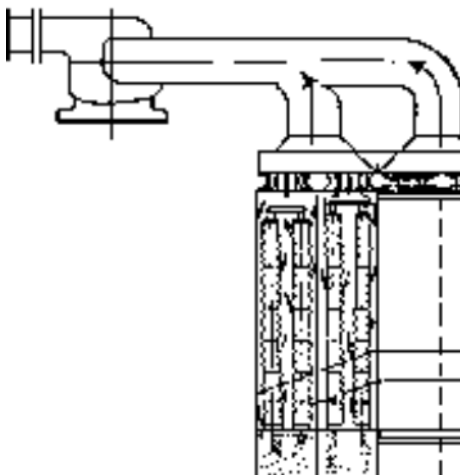


Рис. 3.5. Многосекционный рукавный фильтр с автоматическим встряхиванием и обратной продувкой ткани:

секция I во время работы;
секция II — в момент встряхивания и обратной продувки ткани

стью порядка 0,6-1,0 м/мин, проходят через клапаны, отсасываются вентилятором и выбрасываются в атмосферу (рис. 3.5). Каждые 5-10 мин одна из секций фильтра отключается, и в нее в направлении, обратном движению газового потока, подается под давлением воздух для продувки фильтровальной ткани при одновременном встряхивании рукавов специальным механизмом. Встряхивание и продувка длятся 30-50 с, затем секция автоматически включается в рабочее положение. Пыль собирается в бункер и шнеком через шлюзовую затвор выгружается из фильтра.

Для изготовления рукавов применяют различные ткани, войлоки, сетки, стекловолокно. Диаметр рукавов составляет 127-300 мм, длина их — до 9,6 м.

Для нормальной работы рукавных фильтров необходимо выдерживать оптимальную температуру отходящих газов. Она не может превышать максимально допустимую для данного типа ткани и одновременно должна быть выше точки росы газов на 15-30°C. При выпадении роса образует с осевшей пылью массу, заклеивающую поры ткани.

Промышленность России серийно выпускает рукавные фильтры II класса нескольких модификаций с допустимой входной концентрацией пыли 20-60 г/м³, гидравлическим сопротивлением 2-3 кПа, производительностью по газу до 1 млн м³/ч и более, степенью очистки 0,98. Фильтры предназначены для очистки от слабослипающихся пылей. Крупнейший из рукавных фильтров (Германия) содержит более 32 тыс. рукавов и имеет пропускную способность ~4,5 млн м³/ч. Площадь фильтрации больших аппаратов превышает 25 тыс. м² (Чекалов).

Промышленностью освоен также новый тип пылеулавливающего оборудования — цепные фильтры, первый серийный выпуск которых осуществлен Челябинским филиалом Росоргтехпрома. Они относятся к

аппаратуре сухой очистки, работают под разрежением, пригодны для очистки газов от сильно слипающихся и склонных к схватыванию пылей с высоким (до 50 г/м^3) влагосодержанием (известковых, известково-кремнеземистых, цементных и др.), в крупности от 3 мкм и более. Эти фильтры применяют на предприятиях, производящих стройматериалы, в химической промышленности, машиностроении и т.д. В ряде случаев они позволяют отказаться от первой стадии очистки в циклонах и от тонкой очистки в рукавных фильтрах.

Конструктивно фильтр состоит из корпуса 6, имеющего две полости, в которые монтируются детали фильтрующих секций (рис. 3.6). В каждой полости расположена верхняя рама 5 с фильтрующим элементом 4, выполненным из калиброванных цепей, и нижняя рама 2, к которой по всему периметру приваривается сетка 1. Нижняя рама подвешена к верхней на цепях. Верхняя с помощью планки 7 и каната 8 соединяется с механизмом регенерации (позиции 10, 12, 13, 14, 16, 17). Этот механизм приводится в действие сжатым воздухом через пневмораспределители 9 и 15. Верхняя секция укрыта распределительным кожухом 11.

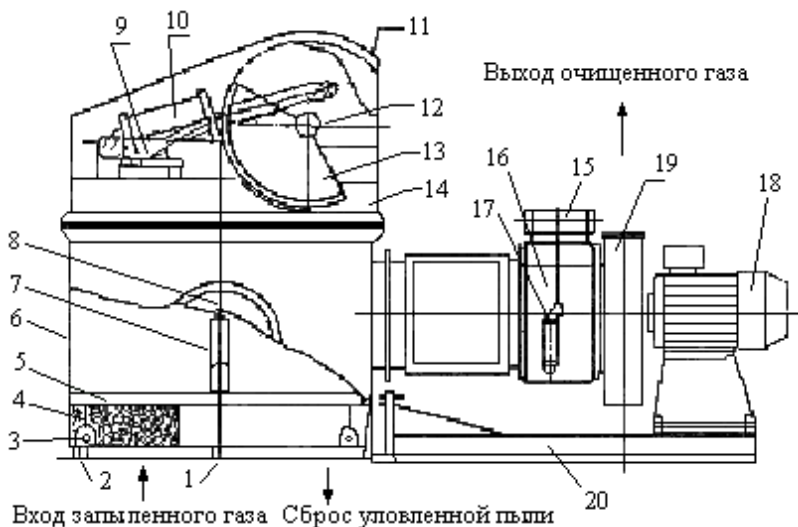


Рис. 3.6. Фильтр цепной ФЦ-2М с вентилятором:

1 — сетка; 2 — нижняя рама; 3 — проушины; 4 — фильтрующий элемент; 5 — верхняя рама; 6 — корпус; 7 — планка; 8 — канат; 9, 15 — пневмораспределители; 10, 17 — пневмоцилиндры; 11 — кожух; 12 — вал; 13 — секторы; 14 — верхняя секция; 16 — клапан; 18 — электродвигатель; 19 — вентилятор; 20 — кронштейн

Цепной фильтр может работать в режимах фильтрации и регенерации. В первом случае верхняя рама лежит на нижней. Очищаемый газ подается под нижнюю сетку и фильтруется через нее и сложенную цепь, удаляясь затем через клапан 16. В данном положении аппарат находится 1-99 мин. В режиме регенерации верхняя рама 5 поднимается на цепях 4 (фильтрующий элемент), увлекая за собой нижнюю раму 2 с закрепленной на ней проволочной сеткой 1. При этом рамы, совершая возвратно-поступательные движения, встряхиваются с частотой 15-18 мин⁻¹ и очищаются от пыли. Режим регенерации длится 1-2 мин.

Технические характеристики ФЦ-2М и других аналогичных модификаций: производительность по очищаемому газу 1-20 тыс. м³/ч, гидравлическое сопротивление не более 700 Па, степень очистки 95-98%.

Цепные фильтры отличаются от рукавных значительно более низкими эксплуатационными расходами и стоимостью, не требуют установки циклонов в качестве предварительной ступени очистки (Синельник...).

3.2.4.4. Электрофильтры

Электрофильтры — наиболее совершенные аппараты для обеспыливания. В зависимости от конкретных условий и требований, их конструируют на любую степень очистки газа (до 99,9%) и на широкий диапазон производительности — от единиц до нескольких миллионов кубометров в час. Электрофильтры работают как при атмосферном давлении, так и при давлениях выше и ниже его.

Концентрация взвешенных частиц на входе в электрофильтр может изменяться от нескольких долей до 60 г/м³ газа и более, а их температура достигать 500°C и выше. Реализована как сухая, так и мокрая очистка газов в очень широком диапазоне размеров частиц (0,01-100 мкм).

Электрофильтры выполняют из материалов, стойких к воздействию кислот, щелочей и других агрессивных веществ.

К недостаткам электрофильтров относится более высокая стоимость по сравнению с другим пылеулавливающим оборудованием, а также возможность воспламенения или взрыва горючих и взрывоопасных газовых смесей под воздействием электрического разряда.

Принцип очистки газов в электрофильтре основан на следующем (рис. 3.7). В металлической трубе или между пластинами (1) на изолирующей раме подвешены провода (2). От источника постоянного тока (выпрямленный переменный ток) к проводам подводят высокое напряжение (до 90 кВ), при этом им сообщают отрицательный заряд. Эти провода называют коронирующими электродами. Трубы или пластины заряжают положительно. Их называют осадительными электродами. Осадительные электроды заземляют, а отрицательные — изолируют.

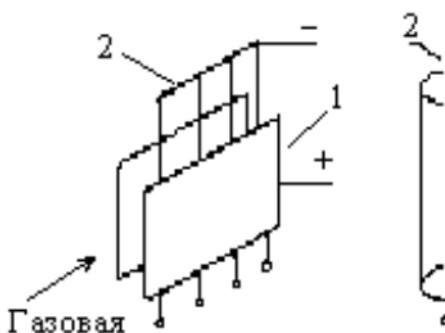


Рис. 3.7. Схема электрофильтра

Проходя по трубе или между пластинами, газы ионизируются. Ионы и электроны сталкиваются с частицами пыли и передают им свой заряд. Время зарядки аэрозольных частиц невелико и измеряется долями секунды. Поскольку наибольшая интенсивность электрического поля (плотность силовых линий) создается у коронирующего электрода с меньшей, чем у осадительного

электрода, поверхностью, то большинство частиц заряжается отрицательно и устремляется к стенкам трубы или пластинам. Небольшая доля частиц (с положительными зарядами) движется к коронирующему электроду. На электродах частицы теряют заряд и оседают. Если взвешенные частицы являются жидкостью, то после осаждения на электродах она с них стекает. Если улавливается сухая пыль, то осадительные электроды через определенный промежуток времени встряхивают, и она падает в бункера, из которых периодически удаляется.

То обстоятельство, что именно коронирующие электроды заряжают отрицательно, объясняется тем, что отрицательно заряженные частицы имеют скорость передвижения в 1,37 раза большую, чем положительно заряженные, и производительность электрофильтра таким образом повышается.

В целом работа электрофильтра основана на так называемом *коронном разряде*, возникающем в неоднородном электрическом поле. При этом типе разряда полная (ударная) ионизация газа инициируется лишь у коронирующего электрода, где напряженность электрического поля является максимальной. Внешним проявлением коронного разряда служат голубовато-фиолетовое свечение вокруг провода, негромкое потрескивание, запахи озона и оксидов азота. При этом через разделенный электродами промежуток протекает электрический ток — *ток короны*. При повышении напряжения выше допустимого или увеличении по каким-либо причинам электропроводности газов, поступающих в электрофильтр, вместо коронного разряда возникает искровой или дуговой электрический разряды, т.е. наступает *пробой* межэлектродного промежутка.

По типу осадительных электродов электрофильтры делят на пластинчатые и трубчатые.

Пластинчатые электрофильтры представляют собой камеру, в которой установлены осадительные электроды, выполненные из пластин

гладкой, волнистой или коробчатой стали, свинца, алюминия или железа, расположенных на расстоянии 250-300 мм друг от друга. Волнистость или коробчатость электродов увеличивают их поверхность, уменьшают приповерхностную скорость движения газов, снижая возможность срыва и уноса осевшей пыли. Иногда пластины заменяют рядами свободно висящих прутков диаметром 6-8 мм с расстоянием между ними 20-30 мм. Такой тип электродов используют в электрофильтрах, улавливающих трудно отряхиваемую пыль и работающих при высоких температурах. На середине расстояния между осадительными электродами подвешивают коронирующие электроды из тех же материалов.

Трубчатые, или сотовые, электрофильтры представляют собой группу вертикально установленных труб (круглых или шестигранных), в центре которых подвешены электроды. Трубы изготавливают из железа, нержавеющей стали, иногда чугуна, диаметром 200-300 мм, длиной 2-4 м, с толщиной стенки 3-6 мм. Коронирующие электроды выполняют из нихромовой или стальной оцинкованной проволоки диаметром 1-5 мм и укрепляют их на общей раме. Каждая проволока натягивается грузом массой до 2 кг.

Пластинчатые электрофильтры используют для улавливания как жидких, так и твердых частиц. Электрическое поле в них несколько слабее, чем в трубчатых, и они работают при меньшей скорости газа, однако проще в изготовлении, а их электроды встряхиваются гораздо легче.

Трубчатые электрофильтры применяют преимущественно для очистки жидких капель, но есть конструкции и для улавливания твердых частиц.

В зависимости от того, как движется поступающий на очистку газ (горизонтально или вертикально), различают *вертикальные* или *горизонтальные* электрофильтры.

Для более глубокой очистки газ обычно пропускают вдоль нескольких групп осадительных электродов, каждая из которых образует свое электрическое поле. Такие электрофильтры называют *многопольными*.

Обычно электрофильтры выполняют секционированными, т.е. в виде нескольких параллельно расположенных одинаковых секций, что дает возможность отключать часть аппаратов для осмотра, чистки и регулирования. Скорость движения газов составляет в пластинчатых электрофильтрах 0,3-0,5 м/с, в трубчатых — 1 м/с.

Электрофильтры в зависимости от температуры газов, на которых они работают (выше или ниже точки росы), делят на сухие и мокрые.

Сухими называют электрофильтры, эксплуатируемые при температурах выше точки росы, *мокрые* электрофильтры применяют на газах при температуре ниже точки росы. В сухих электрофильтрах частицы

оседают в виде пыли, в мокрых они улавливаются вместе с конденсированной жидкостью в виде шлама.

Применение сухого пылеулавливания не требует расхода воды на смыв пыли, но неэффективно при улавливании частиц с высокой (сопротивление до 10^3 или 10^4 Ом·см) или низкой (сопротивление выше 10^{10} Ом·см) проводимостью.

В случае высокопроводящих частиц, например сажи, они быстро перезаряжаются на осадительных электродах и, еще не успев закрепиться на них, отталкиваются от их поверхности и увлекаются выходящим газовым потоком. Пыли с высоким электрическим сопротивлением (возгоны оксида цинка) затрудняют или вовсе могут погасить коронный разряд. Для частичного устранения этого недостатка газы сухих электрофильтров увлажняют до 40-90% относительной влажности, что улучшает проводимость частиц и увеличивает полноту их осаждения на электродах.

Мокрые электрофильтры могут обеспечить практически любую степень улавливания любого типа пылей. Однако они требуют большого расхода воды, возникают затруднения в поддержании чистоты электродов при образовании на них шламов, которые необходимо удалять частой промывкой при снятом напряжении. Особые затруднения возникают при схватывающихся шламах.

При необходимости охлаждения газа и доведения его температуры до точки росы перед мокрыми электрофильтрами ставят мокрые пылеуловители — скрубберы. Иногда оба аппарата komponуют в единый агрегат (скруббер-электрофильтр), что исключает применение газоходов и улучшает распределение газа по сечению электрофильтра.

В промышленности используют множество конструкций электрофильтров, относящихся в основном ко второму классу пылеулавливающих аппаратов.

Сухие электрофильтры типа УГМ (унифицированные горизонтальные малогабаритные) рекомендуется применять для тонкой очистки технологических газов от пыли различных видов. Их производительность составляет 36-950 тыс. м³/ч, допустимая входная концентрация пыли 60 г/м³, гидравлическое сопротивление 4 кПа, наибольшая температура газов 250°C, степень очистки до 0,999.

Мокрые электрофильтры типа С предназначены для тонкой очистки генераторных газов от смоляных аэрозолей. При производительности по газу 18-36 тыс. м³/ч, допустимой входной концентрации пыли 3 г/м³ и наибольшей температуре газов 60°C они имеют гидравлическое сопротивление 5 кПа при степени очистки до 0,99.

Для очистки выбросов вентиляционных устройств с малой концентрацией загрязнений применяют двухзонные пластинчатые электро-

фильтры типа ФЭ, РИОН и др. В них ионизацию и осаждение пыли производят в разных последовательно расположенных полях, затем пропускают воздух через противоуносные фильтры. Накопленная пыль периодически смывается водой. Ионизатор выполняют так, чтобы при скорости 2 м/с частицы пыли успели зарядиться, но еще не осели на электроды. Последнее происходит в поле осадителя на пластинах противоположной полярности. Выбором расстояния между пластинами (6-7 мм) удастся при сравнительно небольшом напряжении между ними (7 кВ) получить напряженность 80-100 В/м, достаточную для осаждения частиц субмикронных размеров.

Электрофильтры типа ФЭ рассчитаны на производительность 1 тыс. м³/ч при входной концентрации пыли 0,001 г/м³, гидравлическом сопротивлении 0,03-0,05 кПа и степени очистки 0,95 при наибольшей температуре газов 20°C.

Во многих случаях для облегчения работы электрофильтров перед ними устанавливают так называемую грубую пылеочистку, чаще всего циклоны или батарейные циклоны.

3.2.4.5. Мокрые пылеуловители

Аппараты мокрой очистки газов получили широкое распространение, так как обеспечивают высокую степень улавливания мелкодисперсной пыли с диаметром, равным или большим 0,3-1,0 мкм, а также пригодны для работы на горячих и взрывоопасных пылях. Однако они имеют ряд недостатков, ограничивающих область их применения: образование шлама, что требует его переработки и в ряде случаев мероприятий по предупреждению его схватывания и затвердевания; отложения в газоходах. Необходима также обратная система подачи воды в пылеуловитель, так как сброс ее в неочищенном виде загрязняет окружающую среду и экономически неэффективен из-за значительного расхода жидкости.

В аппаратах мокрой очистки частицы осаждаются на поверхности капель, на пленке жидкости либо задерживаются в ее объеме. В связи с этим во всех вариантах мокрого пылеулавливания важнейшей характеристикой является смачиваемость частиц: чем она выше, тем эффективней процесс очистки.

Мокрые пылеуловители в значительной степени повторяют сухие и включают аппараты, работающие по принципу осаждения под влиянием силы тяжести, центробежных сил, электростатических. К осадительным конструкциям первого типа относятся простейшие оросительные устройства, скрубберы (безнасадочные и с насадкой), радиальные пылеуловители, к центробежным — мокрые циклоны, к электростатическим — мокрые электрофильтры. Имеются также мокрые пылеуло-

вители, основанные на принципах, не встречающихся в сухих аппаратах: барботажные и скоростные (турбулентные).

Простейшие оросительные устройства используют в тех случаях, когда требуется очистка небольших масс горячих газов от загрязнений с размером частиц более 15-20 мкм. Эти устройства выполняют в виде ряда форсунок, встроенных в газопровод. Удельный расход воды в таких системах составляет 0,1-0,3 л/м³·ч, а скорость газового потока в целях исключения интенсивного каплеуноса не должна превышать 3 м/с.

Полые (безнасадочные) скрубберы, иногда называемые форсуночными, представляют собой вертикальные башни, через которые проходит газ, орошаемый водой. Воду распыляют форсунками, установленными вверху по сечению скруббера. Скорость газа в нем составляет 1-2 м/с, расход воды 3-6 л/м³·ч, гидравлическое сопротивление до 250 Па. Пыль, уловленная каплями распыленной жидкости, отстаивается и в виде шлама удаляется из системы. Осветленную жидкость вновь используют для орошения. Эффективность работы полого скруббера определяется степенью распыления и количеством подаваемой воды. Слишком мелкие капли уносятся газовым потоком, налипают на газопроводах и ухудшают работу последующих пылеулавливающих аппаратов. Крупное распыление уменьшает поверхностную активность жидкости.

Полые скрубберы просты по устройству и дешевы. До недавнего времени полагали, что они недостаточно эффективны и оправдывают себя лишь при улавливании пыли крупностью 10 мкм и более, задерживаемой в них на 90%. На возгонах степень улавливания снижается до 30-60%. Эти сооружения обычно применяли для предварительного охлаждения газов и их очистки перед последующими аппаратами тонкого мокрого пылеулавливания (скоростные пылеуловители, мокрые электрофильтры).

Однако разработанный фирмой Фест-Альпине Индустрианлагенбау (Линц, Австрия) процесс Эрфайн (Airfine) очистки отходящих газов агломерационных и окомковательных фабрик вносит существенные изменения в установившиеся представления об эффективности использования полых скрубберов. В этом процессе применяются специально разработанные форсунки двойного потока. Подача в них сжатого воздуха обеспечивает тонкое распыление воды в охлаждаемых отходящих газах. Это приводит к отделению мельчайших частиц пыли (остаточная концентрация менее 30 мг/м³), удалению хлористого водорода (<2 мг/м³) и фтора (<1 мг/м³), диоксинов и фуранов (до 0,1 нг/м³ по токсическому эквиваленту), сокращению выбросов тяжелых металлов, низким затратам на последующую установку приставки для улавливания сернистых соединений. Скрубберную жидкость после очистки вновь используют, шламы возвращают на агломерацию. В 1993 г. про-

цесс Эрфайн впервые использован фирмой на ее металлургическом заводе в Линце. Он официально признан лучшей существующей технологией по очистке отходящих газов и улавливанию мелких (<1 мкм) частиц (Геберт...; Новая...).

Дальнейшим усовершенствованием очистки газов в полом скруббере является процесс Ветфайн (Wetfine). Его основное отличие от Эрфайн заключается в замене форсунки двойного потока мокрым электро-фильтром. Первую установку Ветфайн должны были смонтировать на заводе Луккини Сервола в Италии в 2002 г. (Новая...).

Скрубберы с насадками используют для создания большой поверхности соприкосновения газа с жидкостью. В качестве насадки применяют керамические или фарфоровые кольца (высота и диаметр 15-150 мм, толщина стенок 2-15 мм), укладываемые несколькими слоями с общей высотой 1-3 м. В этом же качестве пригодны деревянные рейки. Чтобы не ухудшать работу скрубберов, необходимо орошать всю поверхность насадки, смывая образующуюся пульпу. Гидравлическое сопротивление этих конструкций 300-800 Па, степень очистки 90-98%.

Радиальные аппараты ударно-инерционного действия аналогичны по устройству радиальным сухим пылеуловителям (рис. 3.2), однако в их нижней части находится жидкость. Твердые частицы после выхода потока из сопла не успевают за поворотом газовых частиц и по инерции попадают на поверхность жидкости. В аппаратах хорошо улавливаются загрязнения диаметром более 20 мкм. Основное преимущество ударно-инерционных пылеуловителей — небольшой расход воды, составляющий $0,03$ л/м³ и менее, который обусловлен только испарением и потерей жидкости со шламом. Эффект очистки в значительной степени зависит от расстояния между срезом сопла и зеркалом жидкости.

Мокрые циклоны устанавливают в тех случаях, когда выходящий из мокрых пылеуловителей газ не должен содержать влаги. Одновременно с пылью мокрый циклон задерживает и капли жидкости. В нем, в отличие от сухого циклона, тангенциальный ввод газа расположен в нижней части корпуса, а сверху устанавливают сопла для подачи жидкости на его стенки и образования на них водяной пленки толщиной не менее 0,3 мм. Оседающие пылинки смывают в бункер, откуда пульпу затем разгружают.

Циклоны имеют диаметр цилиндрической части 600-1500 мм, высоту орошаемой части в 5 раз большую, чем диаметр, высоту над уровнем сопел 1500 мм. Скорость газа во входном отверстии циклона составляет 16-23 м/с, в самом аппарате — 4-5 м/с. При более высокой скорости газа мелкие брызги жидкости уносятся. Скорость истечения воды из сопел равна 1-2 м/с, ее расход на орошение стенок —

около $0,07-0,13 \text{ л/м}^3$ газа. Сопротивление мокрого циклона достигает $0,5-0,8 \text{ кПа}$, производительность по газу — до $20 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$.

При входной запыленности газового потока $\leq 20 \text{ г/м}^3$ степень улавливания частиц диаметром $10-20 \text{ мкм}$ составляет $0,93-0,995$, для частиц крупностью $0,5-2 \text{ мкм}$ она снижается до $0,8-0,9$.

Получили некоторое распространение вихревые технологии систем очистки уходящих газов. Их действие основано на использовании вращающихся газожидкостных систем, формирующихся в вихревых камерах. Такие процессы называют центробежным барботажем, а аппараты — центробежно-барботажными (ЦБА). Последние более эффективны, чем мокрые циклоны и барботажно-пенные пылеуловители (*Вихревые...*).

Барботеры — это аппараты, в которых газ проходит через слой жидкости в пузырьковом режиме, что обеспечивает большую площадь соприкосновения газожидких фаз. Барботеры разделяют на устройства с провальной (рис. 3.8, а) и переливной (рис. 3.8, б) решетками.

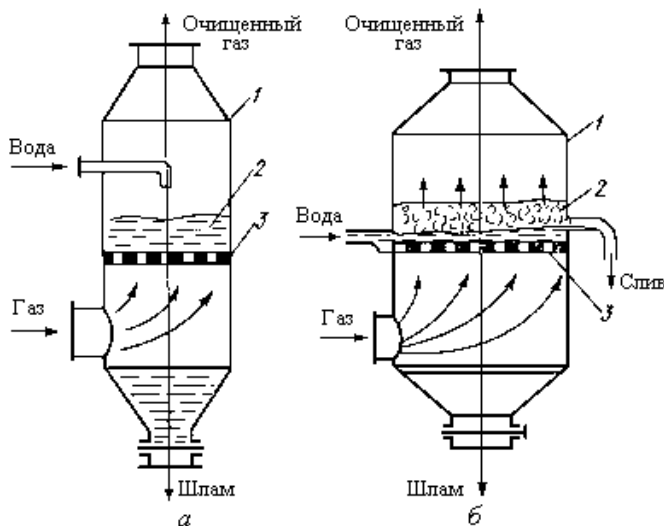


Рис. 3.8. Барботажно-пенный пылеуловитель с провальной (а) и переливной (б) решетками:

1 — корпус; 2 — пенно-жидкостный слой; 3 — решетка

На решетку, установленную горизонтально или с некоторым наклоном, подается жидкость, часть которой протекает через круглые или щелевые отверстия решетки («проваливается»), а другая, двигаясь вдоль нее, сливается через порог в специальное приемное устройство (карман).

Общая площадь отверстий равна 10-20% всей площади решетки. Газ поступает под решетку, проходит через отверстия в ней размером 4-7 мм и барботирует через слой жидкости высотой до 100 мм, очищаясь от пыли. Скорость движения газа составляет около 1 м/с.

Часто барботеры эксплуатируют при более высоких скоростях движения газа (до 2,5-3,0 м/с), что приводит к изменению режима их работы. Жидкость превращается в устойчивую пену с увеличением объема в несколько раз. Высоту слоя жидкости поддерживают обычно на уровне 30-60 мм, что дает пену высотой 100-250 мм. В некоторых случаях аппараты этого типа изготавливают с несколькими полками, принуждая газ проходить через ряд слоев пены.

Современные барботажно-пенные устройства обеспечивают 90-95%-ю степень очистки газа от твердых частиц диаметром 3-5 мкм и более при удельном расходе воды 0,4-0,5 л/м³.

Недостаток барботажно-пенных аппаратов — их высокая чувствительность к неравномерной подаче газа под провальную решетку, затрудняющей поддержание постоянного устойчивого слоя пены по всей ее площади. Это приводит к образованию в отдельных частях решетки трудно ликвидируемых прорывов газа или провалов жидкости. Решетки склонны также к засорению и замазыванию влажной пылью.

Кроме того, в барботажно-пенных аппаратах значителен брызгоунос, поэтому после них необходимо иметь каплеуловители.

В технике современного пылеулавливания заметно выражена тенденция его интенсификации за счет увеличения скорости пылегазового потока. Она нашла практическое решение в так называемых скоростных пылеуловителях.

Скоростной пылеуловитель (турбулентный промыватель, скруббер Вентури) представляет собой аппарат, состоящий из скоростного распылителя (трубы Вентури) и циклона (каплеуловителя), служащего для задержания жидкости, выносимой из трубы в виде загрязненных капель. Каплеуловитель по конструкции не отличается от мокрого циклона, но в него не подается вода. При повышенных температурах перед скоростным пылеуловителем рекомендуется устанавливать полые скрубберы.

Вместо мокрых циклонов в комплексе со скоростными пылеуловителями могут использоваться мокрые электрофилтры, что еще более снижает запыленность газов на выходе.

Основная часть скруббера Вентури — сопло Вентури, состоящее из сужающейся части (конфузора), цилиндрической части (горловины) и расширяющейся части (диффузора) (рис. 3.9).

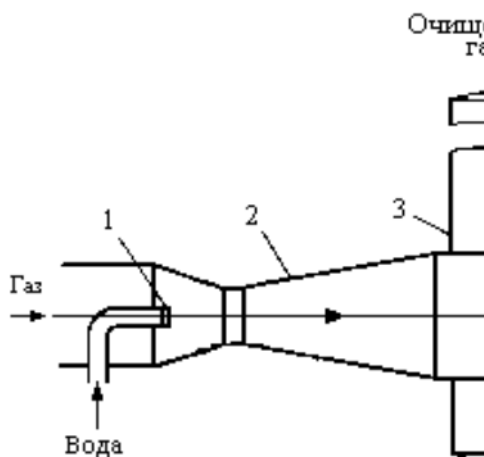


Рис. 3.9. Скруббер Вентури:
1 — центробежная форсунка; 2 — сопло Вентури; 3 — каплеуловитель

В конфузорную часть сопла Вентури со скоростью 15-20 м/с вводится запыленный поток газа и через центробежную форсунку — жидкость для орошения. К горловине скорость газа достигает 200 м/с, в диффузорной части она снижается до 15-20, а в каплеуловителе — до 4-5 м/с. Угол сужения конфузора обычно составляет 25° , угол расширения диффузора — около 6° . Жидкость подается в аппарат под давлением до 0,2 МПа. Сопло, как правило, выполняется из листовой стали.

Скрубберы Вентури относятся ко второму классу

пылеуловителей и обеспечивают высокую степень очистки аэрозолей со средним размером частиц 1-2 мкм и их начальной концентрацией до 100 г/м^3 . Удельный расход воды на орошение равен $0,1-6,0 \text{ л/м}^3$.

Один из серийно выпускаемых скоростных пылеуловителей — газопромыватель Вентури прямоточный, высоконапорный (ГВПВ), предназначенный для очистки газа от пылей любого дисперсного состава. При наибольшей температуре входящих газов 400°C , допустимой входной концентрации пыли 30 г/м^3 , гидравлическом сопротивлении 6-12 кПа, производительности 1,7-84 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ он создает степень очистки 0,96-0,98. В компоновке со скруббером ГВПВ применяют центробежный каплеуловитель (мокрый циклон) типа КЦТ, обеспечивающий влажность газа на выходе не более 70 мг/м^3 .

Помимо интенсификации процесса пылеулавливания, достоинствами скрубберов Вентури являются их несложность, малогабаритность, простота обслуживания, интенсивность процесса охлаждения газов до точки росы. Пылеуловители имеют наиболее совершенные аэродинамические формы, при которых мощность (гидравлическое сопротивление) расходуется наиболее эффективно.

Заканчивая рассмотрение основных типов пылеуловителей, приведем данные по относительной стоимости очистки в них: инерционные пылеуловители — 1; циклоны — 2-3; тканевые фильтры — 3-7,5;

электрофилтры — 5-15; промыватели (кроме скрубберов Вентури) — 2,5-4; скрубберы Вентури — 7-15.

Лидируют на мировом рынке пылеулавливающего оборудования США и ФРГ. Наибольший интерес основные фирмы развитых стран проявляют к рукавным и патронным фальтрам, доля которых в сумме продаж составляет 45-55%. Рынок зернистых фальтров незначителен (Груничев...).

3.3. Туманоуловители

Для улавливания жидких аэрозолей (туманов) используют устройства, аналогичные пылеулавливающим. Различие заключается в том, что все туманоуловители работают в режиме самоочистения, т.е. накапливаемая в них жидкость постоянно удаляется. При очистке туманов солей для предотвращения их кристаллизации, застания фильтровальной перегородки и, в целом, аппаратов последние орошают водой или обдувают паром. В качестве туманоуловителей используют скрубберы Вентури, электрические устройства и волокнистые фальтры.

В скрубберах Вентури степень очистки воздуха от туманов со средним размером частиц 0,3 мкм достигает 0,999, что вполне сравнимо с высокоэффективными фальтрами.

Из электростатических устройств, помимо мокрых электрофальтров для очистки вентиляционных выбросов от пыли, туманов минеральных масел, пластификаторов и т.п., разработаны электрические туманоуловители типа УУП (рис. 3.10). В корпусе 1 такого аппарата устанавливается туманоуловитель 2 типа ФЭ, который питается от источника 4 напряжением 13 кВ через клеммы 3. Загрязненный воздух через входной патрубок, распределительную решетку 8 и сетку 7 подается к туманоуловителю, очищается от примесей, проходит каплеуловитель 5 и поступает на выход. Жидкость отделяется от воздуха, собирается в воронках 6, а затем сливается из УУП через гидрозатвор. Технические характеристики УУП: пылеуловитель II класса, гидравлическое сопротивление 0,04 кПа, производительность по газу 5-30 тыс. м³/ч, степень очистки 0,95; наибольшая температура газов 80°C. Таким

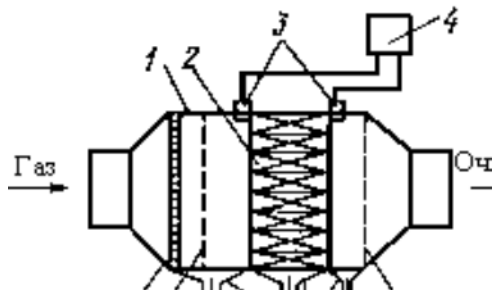


Рис. 3.10. Электрический туманоуловитель

образом, УУП сочетает высокую эффективность улавливания примесей с низким гидравлическим сопротивлением.

В *волокнистых фильтрах* капли задерживаются на поверхности волокон, уловленная жидкость стекает по ним под действием силы тяжести. Туманоуловители с волокнистыми фильтрами делят на низкоскоростные ($W_{\text{ф}} \leq 0,15$ м/с), в которых преобладает механизм диффузионного осаждения капель, и высокоскоростные ($W_{\text{ф}} = 2,0-2,5$ м/с), когда осаждение происходит главным образом под воздействием инерционных сил.

Фильтрующий элемент низкоскоростного туманоуловителя устроен следующим образом (рис. 3.11). В пространстве между двумя цилиндрами 3, изготовленными из сеток, помещается волокнистый фильтро-элемент 4, который крепится через фланец 2 к корпусу туманоуловителя 1. Жидкость, осевшая на фильтре элемента, стекает на нижний фланец 5 и затем через трубку гидрозатвора 6 и стакан 7 сливается из фильтра. Волокнистые низкоскоростные туманоуловители обеспечивают высокую эффективность очистки газа (до 0,999) от частиц менее 3 мкм и полностью улавливают частицы большего размера. Волокнистые слои (толщина 50-150 мм) формируют набивкой стекловолна диаметром 7-30 мкм или полимерных волокон (лавсан, полипропилен) диаметром 12-40 мкм. Гидравлическое сопротивление сухих фильтро-элементов равно 200-1000 Па.

Высокоскоростные туманоуловители имеют меньшие размеры и обеспечивают эффективность очистки 0,90-0,98 (при гидравлическом сопротивлении 1500-2000 Па) от тумана с частицами менее 3 мкм. В качестве фильтрующей набивки в них используют войлоки из полипропиленовых волокон, которые успешно работают в среде разбавленных и концентрированных кислот и сильных щелочей.

Высокоскоростные туманоуловители (рис. 3.12) более эффективны для улавливания высокодисперсных частиц, чем низкоскоростные. Однако повышенная скорость фильтрации приводит к заметному брызгоуносу, существенно уменьшить который удастся установкой брызгоуловителей. Обычно их создают из пакетов сеток. Скорость фильтрации в них не должна превышать 6 м/с.

Конструкция высокоскоростного волокнистого туманоуловителя с цилиндрическим фильтрующим элементом 3 представляет собой перфорированный барабан с глухой крышкой. В нем установлен грубоволокнистый войлок 2 толщиной 3-5 мм. Вокруг барабана на его внешней стороне расположен брызгоуловитель 1, представляющий набор плоских и гофрированных перфорированных слоев винипластовых лент. Брызгоуловитель и фильтроэлемент нижней частью установлены в слой жидкости.

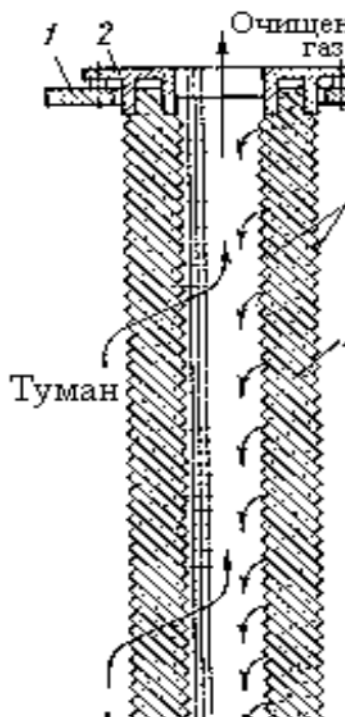


Рис. 3.11. Фильтрующий элемент низкоскоростного туманоуловителя

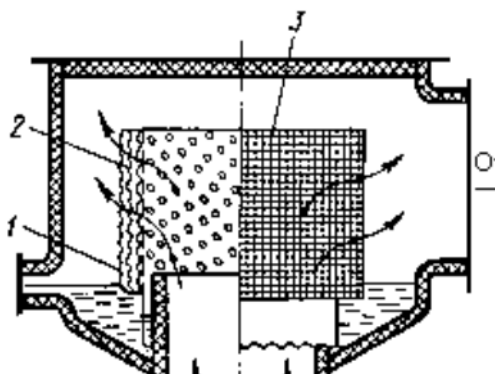


Рис. 3.12. Высокоскоростной туманоуловитель

В заключение приведем техническую характеристику одного из туманоуловителей — ФГВ-Т, предназначенного для тонкой очистки аспирационного воздуха ванн хромирования от туманов и брызг хромовой и серной кислот. Это аппарат второго класса с гидравлическим сопротивлением 0,15-0,5 кПа, производительностью по газу 3,5-80 тыс. м³/ч, эффективностью очистки 0,96-0,99 при наибольшей температуре отходящих газов 90°C. В корпусе аппарата размещена кассета с фильтрующим материалом (иглопробивным войлоком), состоящим из волокон диаметром 70 мкм, толщиной слоя 4-5 мм.

Более подробно волокнистые туманообразователи рассмотрены А.А. Мошкиным с соавторами.

3.4. Методы улавливания и обезвреживания газовых примесей

3.4.1. Классификация

Многие газообразные отходы экологически опасны для окружающей среды, но могут утилизироваться с получением тех или иных продуктов: серной кислоты из серосодержащих газов цветной металлургии, соляной кислоты из хлористого водорода и т.д.

Газовые и паровые выбросы весьма разнообразны и переменны по химическому составу, температуре, содержанию пыли. Последнее требует их предварительной пылеочистки.

Удаление из газов тех или иных газообразных вредностей осуществляется взаимодействием последних с жидкими, твердыми или газообразными веществами. Как следствие, примеси связываются или нейтрализуются, превращаясь в соединения любого агрегатного состояния. Взаимодействие может иметь физико-химический, химический или биохимический характер. Так, твердые вещества поглощают газообразные примеси физадсорбцией или хемосорбцией, при химическом взаимодействии. Жидкие вещества растворяют их без химического (абсорбция) и с химическим взаимодействием, при котором примесь превращается в нейтральное вещество, остающееся в растворе или в другом агрегатном состоянии выделяющееся из жидкого поглотителя. Взаимодействие примеси с газообразным компонентом носит только химический характер, когда вредность либо нейтрализуется, оставаясь газовой, либо образует аэрозоль (пыль, туман), улавливаемый известными способами. Среди реакций в газовой фазе ведущее место занимают термические процессы (пиролиз, дожигание и др.). Для ускорения обезвреживания загрязнителей во всех типах химических превращений могут быть использованы катализаторы.

В целом, способы очистки промышленных выбросов от газообразных загрязнителей можно разделить на: 1) физико-химические — адсорбционные (физ- и хемосорбция), абсорбционные, радиационно-химические; 2) химические, включая каталитические; 3) биохимические. В ряде случаев нельзя провести четкой границы между разными процессами, в частности физико-химическими и химическими.

3.4.2. Физико-химические

3.4.2.1. Адсорбционные

Как метод очистки адсорбция получила развитие в последнее время в связи с освоением производства высокоактивных адсорбентов (активированных углей, силикагелей, синтетических цеолитов). В качестве адсорбентов используют также оксид алюминия, алюмосиликаты, гашеную и негашеную известь, соли кальция, соду, цемент, соли аммония, различные комбинации адсорбентов и т.д. При правильно выбранных технологическом регламенте, схеме и аппаратуре примесь не только может быть удалена с помощью адсорбции практически полностью, но и возвращена в технологический процесс.

Основная технологическая характеристика адсорбента — его поглощательная способность, величина *адсорбции*. Она выражается количеством конкретного вещества, поглощаемого данным адсорбентом (г/100 г). Величина адсорбции может быть значительной. Так, активные угли различных марок, силикагели и синтетические цеолиты при давлении газа 101,3 кПа и температуре 20°C поглощают 3,8-12,7 г ацетилена и 2,0-16,8 г диоксида углерода. Адсорбция возрастает с повышением давления адсорбируемого газа, особенно при относительно низких (до 10 кПа) его значениях, и снижается при более высоких температурах. Последнее приводит к десорбции поглощенного газа.

Методы адсорбции применяются для очистки от органических паров, удаления неприятных запахов газообразных примесей, содержащихся в незначительных количествах в промышленных и сельскохозяйственных выбросах, для улавливания летучих растворителей, очистки выхлопных газов автомобилей, удаления сероводорода, ртути, оксидов серы и азота из отходящих газов и т.д.

Адсорбенты конструктивно выполняют вертикальными и горизонтальными, включая аппараты кольцевого типа. Вертикальные аппараты, как правило, применяют при небольших объемах очищаемого газа, горизонтальные и кольцевые — при производительности, достигающей сотен тысяч метров кубических в час.

Фильтрацию газа обычно ведут через неподвижный слой адсорбента (*адсорберы периодического действия*). Время от времени адсорбент регенерируют или заменяют. Аппараты периодического действия просты (сходны с туманоуловителями и рукавными фильтрами), но имеют низкую допустимую скорость газового потока и, следовательно, повышенные металлоемкость и громоздкость. Другой их недостаток —

большие энергетические затраты, связанные с преодолением гидравлического сопротивления слоя адсорбента.

В *адсорберах непрерывного действия* адсорбент движется в плотном слое под действием силы тяжести или в восходящем потоке очищаемого воздуха, например в кипящем слое. Это позволяет полнее использовать адсорбционную способность сорбента, организовать процесс десорбции, упростить эксплуатацию оборудования. Недостаток этих аппаратов — значительное разрушение и вынос адсорбента.

Адсорбционные методы получили наибольшее распространение для улавливания паров органических растворителей. В качестве адсорбента в этом случае применяют только активированный уголь, что обусловлено его гидрофобностью, высокой адсорбционной емкостью по парам органических веществ, небольшой удерживающей способностью, достаточной прочностью и т.п. *Десорбцию* растворителей и регенерацию адсорбента периодически осуществляют перегретым паром в противотоке, перекрывая при этом основной газовый поток. После адсорбции пары воды и растворителя охлаждают, конденсируют и разделяют в сепараторе или в дополнительной колонне, уголь сушат и охлаждают потоком атмосферного воздуха. На 1 т уловленного растворителя при его концентрации во входящих газах 10 г/м^3 затрачивается 2-3,5 т пара при давлении 0,3-0,5 МПа, 30-50 м^3 воды для охлаждения, 0,5-1,0 кг активированного угля и 100-250 кВт·ч электроэнергии. Поскольку эти расходные коэффициенты достаточно велики, то адсорберы оправданы только при улавливании дорогих или сильнотоксичных растворителей. Производительность аппаратов составляет 10-150 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ газа, входная концентрация растворителя изменяется от 0,5 до 20 г/м^3 , выходная его концентрация не превышает $0,5 \text{ г/м}^3$, степень улавливания достигает 95-99%.

Среди адсорбционных методов следует отметить также способы извлечения ртути активированным углем. При использовании последнего его предварительно обрабатывают минеральными кислотами, серой, йодом, сульфидом натрия и т.п., увеличивая адсорбционную емкость угля, достигающую таким образом 10-20% массы ртути. Конечная концентрация ртути в отходящих газах составляет 5-10 мкг/м^3 . Регенерацию сорбента осуществляют, отгоняя ртуть при температуре около 300°C .

Эффективным твердым адсорбентом ртути являются также синтетические цеолиты типа X, содержащие катионы натрия, кальция, свинца, серебра и позволяющие снижать содержание ртути в газах до $0,5 \text{ мг/м}^3$. Для улучшения адсорбционных свойств цеолитов их пропитывают сульфидами или йодидами металлов. Регенерация адсорбентов производится при температуре 330°C .

Широкое распространение адсорбционные методы улавливания получили в металлургии алюминия. В США, например, начиная с 1972 г., все электролизеры оборудуют сухими скрубберами для улавливания фтористого водорода. Улавливающей средой является высокодисперсный порошок глинозема, исходного сырья для электролитического получения алюминия. Глинозем, который вводят в поток отходящих газов, может адсорбировать до 4% HF, или примерно 100 его объемов по отношению к своей массе. Аналогичные системы газоочистки начали использовать и в России (Саяногорский и Уральский алюминиевый (УАЗ) заводы). Внедрение на УАЗе сухой очистки газов производительностью 780 тыс. м³/ч позволило улавливать 99,1% HF, 91% SO₂ и 99,5% пыли (Агафонов...).

Существенный недостаток адсорбционных методов — попутное поглощение пыли, которая при десорбции не удаляется и быстро забивает поры адсорбентов. При промывке последних водой образуются разбавленные растворы различных веществ, загрязненные примесями, в том числе тяжелых металлов, находящие ограниченное применение.

3.4.2.2. Абсорбционные

Абсорбция представляет собой процесс поглощения газообразной примеси жидкостью. Она подчиняется закону Генри, т.е. растворимость газа в жидкости пропорциональна его давлению над ней, обычно снижаясь с повышением температуры.

Поскольку растворение газа является диффузионным процессом, то скорость его пропорциональна поверхности соприкосновения газа с жидкостью, интенсивности их перемешивания, коэффициенту диффузии и градиенту концентрации диффундирующего компонента в газовой и жидкой средах. Поэтому при проектировании абсорберов особое внимание уделяют организации контакта газового потока с жидким растворителем и выбору поглощающей жидкости (абсорбента).

Решающим условием выбора абсорбента является растворимость в нем извлекаемого компонента и ее зависимость от температуры и давления. В частности, газ считают хорошо растворимым, если при 20°C и парциальном давлении, равном 101,3 кПа, его растворимость составляет сотни граммов на 1 кг растворителя. В воде хорошо растворимы аммиак, хлористый и фтористый водород. В ряде случаев применяют водные растворы, например серной кислоты (для улавливания водяных паров), вязкие масла (для извлечения ароматических углеводородов из коксового газа) и др.

В качестве газоулавливающей аппаратуры используют устройства, в которых контакт жидкости с газом реализуют пропуская последний

через скрубберы (Вентури, насадочные, безнасадочные), мокрые циклоны, барботажные аппараты и т.п., аналогичные применяемым при мокрых методах пылеулавливания, иногда несколько измененные в деталях.

Движущей силой абсорбции в аппаратах является разность $\Delta P_{\text{ср}}$ разностей общего и равновесного парциальных давлений взаимодействующих компонентов на входе и выходе, выражаемая формулой:

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{(P'_G - P'_P) - (P''_G - P''_P)}{(P'_G - P'_P)(P''_G - P''_P)}, \quad (3.3)$$

где P'_G, P''_G — парциальное давление поглощаемого компонента в газовой фазе на входе в аппарат и на выходе из него; P'_P, P''_P — равновесные парциальные давления поглощаемого компонента над жидкостью на входе в аппарат и на выходе из него.

При противоточном (встречном) движении газов и жидкости значения $\Delta P_{\text{ср}}$ больше, чем при прямоточном. Следовательно, противоток выгоднее, так как для его осуществления требуются аппараты меньшего размера. Однако прямоточное движение более целесообразно в тех случаях, когда равновесное давление поглощаемой примеси над жидкостью очень невелико (практически равно нулю) и почти не увеличивается по мере растворения газа. Этот случай обычно встречается при химическом взаимодействии газовой примеси с жидкостью и образовании малорастворимого соединения. И напротив, прямоточный вариант особенно неэффективен для плохо растворимых газов.

Абсорбционные методы очистки наряду с узлами абсорбции, как правило, включают также узлы десорбции. Десорбцию растворенного газа или регенерацию растворителя проводят, либо снижая парциальное давление примеси в газе, либо повышая температуру, либо используя оба фактора одновременно. Сочетание абсорбции с десорбцией позволяет многократно применять поглотитель и выделять поглощенный компонент в чистом виде.

Абсорбционные методы являются одними из наиболее доступных. Они не зависят от колебаний концентрации примесей на входе, не требуют высоких температур. В качестве поглощающих жидкостей используют водные растворы щелочей, кислот, растворы с добавками восстановителей или окислителей (разд. 3.4.3).

Абсорбционные методы очистки в последнее время внедрены на ряде крупных предприятий.

Так, на ОАО «Невинномысский Азот» используется очистка от CO_2 синтез-газа производства аммиака с заменой моноэтаноламина метилдиэтанолом (Модернизация...).

На Красноярском алюминиевом заводе для очистки анодных газов применены абсорберы инерционно-турбулентного типа с регулярной

подвижной насадкой, состоящей из собственно абсорбера и циклона-каплеуловителя. Для предварительной очистки газов используют пылеосадительные камеры, переоборудованные из электрофильтров. Степень улавливания составляет, %: по HF и SO₂ — до 99, пыли — 95-96, смолистым веществам — 88-90 (Попельничева...).

Особо следует отметить высокую эффективность использования абсорбционных методов для очистки ртутьсодержащих газов.

В одном из вариантов в качестве абсорбента используют циркулирующий рассол, содержащий около 250 мг/л хлористого натрия и 0,6-0,9 г/л хлора. Процесс осуществляют в колоннах насадочного типа или с дырчатыми тарелками при рН, равном 2-4. Концентрация остаточной ртути в отходящих газах снижается до 0,1 мг/м³.

Другим эффективным абсорбентом паров ртути является разбавленный раствор гипохлорита натрия с избыточным количеством хлористого натрия. Степень извлечения ртути достигает 95-99%.

В цветной металлургии применяют комбинированные методы, основанные на сочетании абсорбции ртути и ее окисления.

Очистку с использованием окислителей можно осуществлять сухим методом, пропуская газы со скоростью 0,1-0,2 м/с через слой пиролюзита высотой 500-800 мм (размер кусочков 3-10 мм). Таким образом удастся понизить содержание ртути в газе до 0,5 мг/м³ и менее.

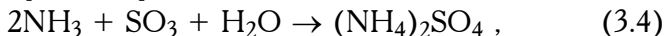
3.4.2.3. Радиационно-химическое и ультрафиолетовое облучение

Радиационно-химические методы очистки относятся к числу новых физико-химических процессов, разрабатываемых в нашей стране и за рубежом. В их основе лежит воздействие на выбросы потоком ускоренных электронов. Как следствие, в них образуются валентно-ненасыщенные возбужденные частицы с положительными или отрицательными зарядами (ионы, радикалы), обладающие повышенной химической активностью. Под их влиянием в газах происходит радиолиз токсичных элементов, т.е. их химические превращения. Продукты радиолиза нетоксичны.

Для радиационно-химических процессов характерно проведение очистки при относительно низких температурах, при которых обычные реакции не протекают. Другим важным преимуществом радиационной технологии является универсальность действия ионизирующего излучения практически на любые загрязняющие компоненты реальных выбросов.

Перспективная область применения радиационно-химического метода — очистка газов от оксидов азота и серы. В частности, при облуче-

нии топочных газов ТЭС резко возрастает скорость окисления этих оксидов до NO_2 и серного ангидрида с последующим образованием азотной и серной кислот. Оптимальная температура газов, поступающих на очистку, составляет $70\text{-}100^\circ\text{C}$, т.е. значительно ниже, чем в термических методах. Если одновременно к газам добавить эквимолярные количества аммиака, то в качестве конечных продуктов появятся не кислоты, а сульфат и нитрат аммония:



Образующиеся аммонийные соли улавливаются в электрофильтрах и могут быть использованы как удобрения. Подсчитано, что в случае реализации радиационно-химического способа очистки топочных газов США, например, потенциально способны производить около 100 млн т продуктов, содержащих до 25% азота и пригодных в качестве удобрений.

Схема радиационно-химического удаления оксидов азота и серы включает предварительную очистку отходящих газов в электрофильтрах для удаления большей части золы, их увлажнение в башне и снижение температуры до $70\text{-}100^\circ\text{C}$, впрыскивание в поток эквимолярного по серному ангидриду и оксидам азота количества аммиака и радиационно-химическую обработку газов в облучательной камере. После нее мелкие фракции твердых частиц сульфата и нитрата аммония осаждают в электрофильтрах, а более крупные улавливают в рукавных фильтрах. Облучательная камера находится в специальном здании с необходимой бетонной радиационной защитой (толщина стен $700\text{-}1000$ мм). Облучение проводят встречным горизонтальным пучком электронов, используя электронные ускорители мощностью до 800 кВт и напряжением до 200 кВ. Энергия электронов достигает 1 МэВ, производительность установок по очищаемым газам — до 100 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$.

Необходимо отметить, что источники облучения, используемые в радиационной технологии, по своим физическим параметрам в принципе не могут вызвать так называемой «наведенной активности» в облучаемых системах. Системы радиационной безопасности достаточно хорошо отработаны и позволяют эксплуатировать радиационные установки без вреда для обслуживающего персонала.

Экономическая оценка показывает, что стоимость радиационно-химической очистки в 1,5 раза ниже, чем комбинированная очистка от оксидов серы и азота с использованием химических способов. Вместе с тем ее практическое воплощение требует создания промышленной базы для сооружения ускорителей большой единичной мощности. Например, для теплоэлектростанции на 500 МВт требуется 14 ускорителей общей

мощностью 0,9 МВт. Однако, как было отмечено, в настоящее время уже прошли промышленные испытания ускорители на 0,8 МВт при напряжении 200 кВ (Электронно-лучевые...)

Радиационные методы очистки в последние годы осваиваются в ряде стран (Япония, США, Германия и др.). Применение ими ускорителей электронов мощностью порядка 0,8 МВт позволяет получить степень совместной очистки газов от сернистого ангидрида и NO_x , составляющую соответственно 90-95 и 80-85%.

Ультрафиолетовое облучение как метод обезвреживания загрязнителей в последние годы получил распространение, особенно за рубежом, при очистке питьевых, а также сточных вод (разд. 4.3.4.7). Однако этот способ начинают применять и для очистки воздуха. Разработано и серийно выпускается несколько типов УФ-облучателей для закрытых помещений (образовательных и лечебных учреждений, мест общественного пользования). Они функционируют при 10-35°C и относительной влажности до 80%, при среднем сроке службы не менее 5 лет и наработке на отказ не менее 2000 часов. Заряжаются облучатели от бытовых источников переменного тока. Почти 100% их облучения приходится на длину волны 253,7 нм. Бактерицидная эффективность ультрафиолета по некоторым типам стафилококков составляет не менее 90%. Применение облучателей выявило их высокую эффективность при эпидемиях гриппа (Кондрашов...).

3.4.3. Химические

Удаление газовых примесей химическими методами осуществляется обычно в жидкой или газообразной фазах.

3.4.3.1. Жидкофазные

В этой группе методов в качестве активной среды часто используют водные или другие растворы веществ, химически взаимодействующих с поглощаемым компонентом. Как правило, это растворы электролитов (кислот, щелочей, солей), образующих с газовой примесью малолетучие или малорастворимые химические соединения. Поглотительная способность применяемой жидкости почти не зависит от парциального давления газообразной примеси, поэтому методы химической очистки предпочтительны обычно при небольшой концентрации последней в отходящих газах.

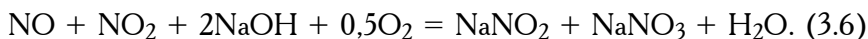
Процессы химического улавливания примесей используют для нейтрализации наиболее крупномасштабных загрязнителей окружающей среды:

оксидов азота, сернистого ангидрида, сероводорода, галогенов и др. Поскольку конкретные реакции нейтрализации каждого из этих веществ индивидуальны, удобнее имеющиеся способы очистки рассматривать применительно к перечисленным основным газовым загрязнителям.

Оксиды азота

Для их улавливания применяют щелочные растворы калия, натрия, кальция, кислоты и другие вещества. Они окисляют или восстанавливают оксиды азота, превращая их в нетоксичные соединения.

Эффективность очистки *щелочным* растворителем сильно возрастает при увеличении степени окисленности оксидов азота. При ее значениях 25%, например в отходящих газах ТЭС, эффективность очистки не превышает 70%. Продуктами взаимодействия являются в основном соли азотистой и азотной кислот:



Помимо относительно низкой степени очистки, недостаток щелочных поглотителей заключается в том, что процесс проводят при оптимальной температуре около 30°C, поэтому очищенный газ перед выбрасыванием в атмосферу подогревают, чтобы повысить эффективность его вытяжки через дымовую трубу.

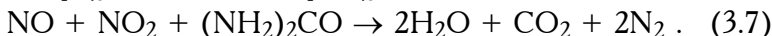
При использовании в качестве поглотителей концентрированной серной и азотной кислот либо их смесей, являющихся сильными окислителями, степень очистки возрастает. При поглощении образуются нитролеум или нитроза. Применение кислот требует коррозионностойких материалов.

Эффективность улавливания увеличивается еще в большей степени при введении в растворы окисляющих и восстанавливающих добавок. К первым относятся KBrO_3 , KMnO_4 , H_2O_2 , Na_2CrO_4 и др. Наиболее часто применяют смесь H_2O_2 , $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ и NH_4OH . В результате очистки получают нитрат аммония. Добавлением восстановителей оксиды азота переводят в элементарный азот. Из используемого в этом качестве большого количества веществ отметим NH_4OH , $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, сульфаминовую кислоту, соли двухвалентного железа, сульфит-бисульфиты, амины и аминокислоты, карбамид. Последний находит все большее применение.

Карбамидный способ запатентован США в 1980 г. Реагент нетоксичен, пожаро- и взрывобезопасен, удобен в практическом применении.

Метод не требует предварительной очистки газа, величина pH раствора составляет 5-9, что не вызывает коррозии арматуры. Эффективность улавливания практически не зависит от колебаний входных концентраций оксидов азота.

Восстановитель вводится в поток отходящих газов с температурой 700-1100°С в виде водного раствора, в твердом или расплавленном состоянии. Процесс описывается реакцией:



В настоящее время способ реализован на московском мусоросжигательном заводе №2 (*Сокращение...; Некаталитическая...*).

Первые в СНГ опытно-промышленные испытания способа, в условиях Змиевской ГРЭС, были выполнены в режиме пропускания газов через раствор карбамида. При его концентрации 70-78 г/л, температуре газа на входе 145-160°С, на выходе 65-90°С и его расходе 37-60 тыс. м³/ч содержание оксидов азота в выбросе снижалось со 157-339 до 8-18 мг/м³, т.е. на 95%.

Усовершенствованный карбамидный способ улавливания оксидов азота внедрен в начале 90-х годов 20 в. на Чепецком механическом заводе. Очищаемые газы ТЭЦ пропускают через слой пористых гранул (из силикагеля, алюмогеля или активного угля), пропитанных водными растворами восстановителей (карбамид, аммонийные соли). Эффективность улавливания оксидов при их концентрации ≤ 1 г/м³ и температурах, близких к комнатным, достигает 90-95%.

Сернистый ангидрид

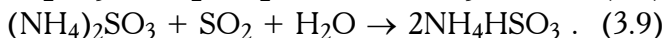
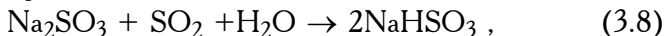
Известно несколько промышленно освоенных способов удаления этого компонента. В частности, как кислотный оксид он достаточно полно может быть уловлен раствором любого основания, особенно щелочного. Поэтому на практике щелочные методы улавливания SO₂ широко практикуют, особенно с применением известкового и известнякового молока. Используют также сульфит-бисульфитные и карбамидный поглотители, оксиды металлов, растворы кислот.

При взаимодействии сернистого ангидрида с Ca(OH)₂ образуется сульфит кальция, который окисляют до сульфата (гипса). Процесс проводят с использованием известковой пульпы, окисление CaSO₃ осуществляют при 350-500°С в аппаратах с кипящим слоем, вводя в качестве дополнительного окислителя соединения 4-валентного марганца или пиролюзитовую руду. Пульпу в ходе очистки при контакте с дымовыми газами можно доводить до сухого продукта (так называемый полусухой метод в отличие от мокрого).

Очистка до 0,05% SO₂, как правило, осуществляется в скрубберах с насадкой при pH = 6,0-6,3 и исходной концентрации сернистого ангидрида 1-2%. С целью предотвратить отложения гипса в насадке

на 1 кг улавливаемого сернистого газа приходится подавать для орошения не менее $1,5 \text{ м}^3$ жидкости.

Сульфит-бисульфитные методы очистки с применением сульфита натрия и аммония позволяют очищать газы с любым содержанием сернистого ангидрида. При его поглощении сульфитными растворами при температуре $35\text{-}45^\circ\text{C}$ в соответствии с реакциями (3.8) и (3.9) образуются бисульфиты:



Растворы регенерируют, нагревая их до кипения.

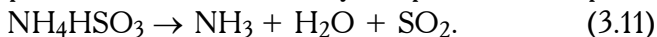
При нагревании бисульфита натрия образуются концентрированный сернистый ангидрид и сульфит натрия:



Из SO_2 можно получить либо серу по методу Клауса (разд. 3.4.3.2), либо серную кислоту, предварительно доокислив сернистый ангидрид до серного на катализаторе.

Сульфит натрия регенерируется не полностью вследствие его частичного превращения в сульфат Na_2SO_4 и гипосульфит $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$.

Регенерацию сульфита аммония и выделение сернистого газа проводят при 150°C в распылительной сушилке или в выпарном аппарате, при этом сульфит разлагается на аммиак, воду и сернистый ангидрид:

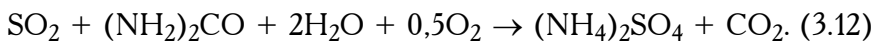


До 10% сульфита в ходе очистки превращается в сульфат аммония, который выводится в виде побочного продукта и может быть использован как удобрение или переработан на гипс при добавлении суспензии известкового молока.

Сульфит-бисульфитные методы позволяют очистить газы до концентрации 0,02% SO_2 . При начальной концентрации 3% SO_2 на 1 т уловленного сернистого ангидрида расходуется порядка 4 т пара, 125 м^3 воды и 70 кг аммиака. При исходной концентрации SO_2 на уровне 0,3% расходные коэффициенты возрастают в 1,5-2,5 раза.

Своеобразной комбинацией элементов сульфит-бисульфитного и известняково-известкового методов является десульфурация газов угольных ТЭС с использованием в оросительных скрубберах морской воды. В данной технологии используется то обстоятельство, что в морской воде содержится бикарбонат кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. При взаимодействии с SO_x он образует бисульфит кальция $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$, который окисляется воздухом до сульфата. Степень удаления SO_2 оценивается в 95%. По рассматриваемому методу Германией велось строительство коммерческой установки для Индонезии (Asalty....).

Карбамидный метод позволяет почти полностью удалять оксиды серы:



Как показали опытно-промышленные испытания по очистке отходящих газов Змиевской ГРЭС, при концентрации карбамида в растворе 78 г/л, температуре газа на входе 150-160°C, на выходе — 85-90°C и его расходе 37-60 тыс. м³/ч концентрация оксида серы в газе снижалась с 1340-3216 мг/м³ до следовой.

В ряде методов в качестве реагентов используют пульпу оксидов металлов (магния, цинка, бария, меди) с образованием сульфитов металлов. Их разлагают при 200-400°C с выделением сернистого ангидрида или нагревают в присутствии угля и водяного пара. В последнем случае образуются оксид металла и сероводород:



Часто проводят и тот и другой процессы, а газы (SO₂ и H₂S) смешивают для проведения реакции Клауса.

О технико-экономической эффективности сероулавливания с использованием оксидов металлов можно судить по данным о применении оксида цинка. В этом варианте при исходных концентрациях сернистого ангидрида, равных 0,3 и 3,0%, на 1 т его уловленной массы расходуется соответственно: пара 2 и 3 т, воды 25 и 35 м³, технического оксида цинка около 200 кг и мазута 0,3 т.

Улавливание сернистого ангидрида *серной кислотой* производят в присутствии окислителя (пиролюзитовой руды), барботируя газ через ее слабый раствор. Таким образом можно получить раствор серной кислоты с концентрацией до 20-25%. Расход пиролюзита на 1 т уловленного SO₂ составляет 15 кг при степени очистки газа 75-85%.

Наибольшее распространение из перечисленных получили способы мокрого и полусухого улавливания SO₂ при очистке отходящих газов ТЭС, работающих на угле.

За рубежом первые установки очистки газов от SO₂ появились в 70-е годы 20 в. Однако уже в 1988-1992 гг. установки обессеривания функционировали в Германии (на ТЭС суммарной мощностью 35 ГВт), США (50 ГВт), Японии (45 ГВт). Особенно часто используют мокрые методы с применением извести, известняка и сульфит-бисульфитный-натриевый. В частности, в Германии доля установок мокрого обессеривания превышает 90%, на 95% из них используют известь и известняк. Улавливание сернистого ангидрида суспензией Ca(OH)₂ внедрено также на более чем 150 ТЭС США. Применение извести обеспечивает более высокое качество образующегося при сероулавливании гипса, который может быть использован в строительстве. Однако ее производство, в свою очередь, является экологически грязным процессом.

Схема переработки гипса, продукта мокрого способа сероулавливания, включает реактор для регулирования рН сточных вод установки обессеривания дымовых газов, отстойник-осветлитель, аэратор, фильтр-пресс. Для повышения степени обезвоживания осадка вводится хлорное железо FeCl_3 и катионитовые полимеры. Влажность осадка после обезвоживания составляет 45-50% (Mierzejewski).

На сравнительно небольших топочных установках электростанций и заводов по сжиганию мусора более целесообразно применение технологии полусухого обессеривания, обеспечивающей такую же степень очистки, как и мокрый способ, при меньших капитальных затратах, чем в системе влажной обработки. В качестве одного из улавливающих компонентов в данном варианте наряду с известью можно использовать топливные золы (Weiler).

Стоимость сероулавливающих установок составляет 22-26% от капитальных вложений в тепловую электростанцию. В последнее время активно развиваются методы совместной очистки дымовых газов от оксидов серы и азота, что позволяет сохранить стоимость газоулавливающей установки на уровне 25-30% от капитальных вложений в ТЭС. При раздельном улавливании SO_x и NO_x капитальные затраты в газоочистку достигают 50% стоимости ТЭС. Ожидается, что стоимость продаж десульфурационных установок в 2008 г. достигнет 8,8 млрд дол (Пик...).

Сероводород

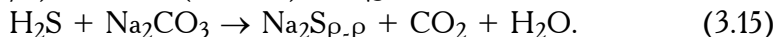
При очистке газов от сероводорода в качестве поглотителя применяют растворы фенолята натрия, щелочей, соды, аминов, мышьяксодержащие, водные суспензии фосфоритов и др.

Очистка в *фенолятном растворе* носит циклический характер, с регенерацией раствора. При обычной температуре сероводород поглощается с образованием фенола и бисульфида натрия:



При нагревании раствора процесс идет в обратном направлении с выделением концентрированного сероводорода, который может быть превращен в элементарную серу, например по реакции Клауса.

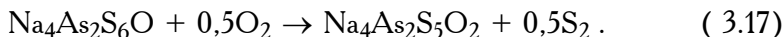
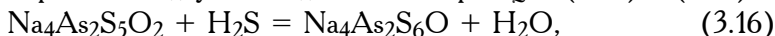
При небольшом количестве сероводорода и необязательности регенерации поглотителя примесь улавливают *растворами соды* (25-30 г/л), *поташа* (15-20%) или *щелочей*:



Аминовые процессы остаются основными при очистке от сероводорода. Широкое применение нашли моноэтаноламин (МЭА) и диэтиламин (МДЭА). На Оренбургском газоперерабатывающем заводе

используют также метилдиэтаноламин. При очистке газов нефтеперерабатывающих заводов получают (для МЭА/МДЭА): степень очистки от H_2S 99/98; концентрацию H_2S в очищаемых газах, ppm (5-30/3-5). Замена МЭА на МДЭА позволила также сократить потребление пара на 25, электроэнергии на 3-5%, уменьшить коррозию оборудования (Современные...).

Улавливание сероводорода *мышьяково-щелочными* растворами (процесс Джамарко-Ветроукока) также широко распространено в промышленности. Оно основано на окислении H_2S до элементарной серы при протекании двух последовательных реакций (3.16) и (3.17):



Реакция (3.17) служит также для регенерации растворов.

Преимуществами рассматриваемого метода являются высокая степень извлечения серы и легкость регенерации раствора. Недостаток метода — токсичность используемого реагента.

Применение *водных суспензий фосфорита* для улавливания H_2S опробовано при промышленных испытаниях очистки отходящих газов отделений сушки и плавления полифосфатов в производстве желтого фосфора. Степень удаления сероводорода — от 45-385 мг/м³ до его следов при температуре газов на входе в очистку 90-255°C и на выходе — 30-60°C. Отработанную суспензию целесообразно использовать в самом процессе получения желтого фосфора, заменяя ею до 20% фосфорита.

Помимо H_2S , из отходящих газов удалялись также оксид серы (степень извлечения до 92%), гидрид фосфора PH_3 и фтор — до следов (Шакиров).

Галогены

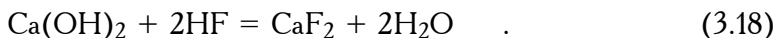
Наиболее часто встречается очистка от хлористого водорода, хлора, фтористого водорода и фтора.

Хлористый и фтористый водород, фтор хорошо растворимы в воде и улавливаются ею с образованием соляной и плавиковой кислот.

В частности, при улавливании хлористого водорода образуется 15-18%-й раствор соляной кислоты. Его обрабатывают хлористым кальцием, поглощающим часть воды, что повышает концентрацию кислоты до товарной (30-32%) (How to...).

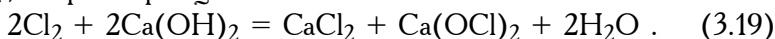
Химическую очистку от этих примесей применяют лишь в случае их низкой концентрации в отходящих газах (менее 2% — для HCl), используя в качестве поглотителя водные растворы какого-либо основания. Взаимодействие последнего с хлористым и фтористым водородом

дом является типичной реакцией нейтрализации и заканчивается образованием солей соляной или плавиковой кислот. Наилучшими поглотителями служат растворы щелочей, но экономичнее применять суспензию известкового молока:



Реакция (3.18) используется, например, при мокрой очистке газов электролитического производства алюминия.

Хлор растворяется в воде значительно хуже, чем HCl, поэтому при любых его концентрациях в отходящих газах для улавливания используют водные растворы щелочей или известковое молоко:



Оптимальная концентрация известковой суспензии составляет 20-50 г/л.

Основная аппаратура для реализации химических методов очистки газов аналогична используемой в адсорбционных методах.

3.4.3.2. Газофазные

Газофазные методы, как уже отмечалось, основаны на нейтрализации вредных примесей с переводом их в менее опасные соединения. Большая часть этих методов относится к *термическим*, т.е. проводится при высокой температуре. Они применяются в тех случаях, когда объемы выбросов велики, а концентрации загрязняющих веществ превышают 300 млн⁻¹.

Методы термической нейтрализации во многих случаях обладают преимуществом перед твердофазным или жидкофазным поглощением газовых примесей. Они не требуют шламового хозяйства, имеют компактное, простое в обслуживании оборудование, низкую стоимость очистки. Однако области их применения ограничиваются свойствами образующихся при окислении продуктов реакции. Они не используются, как правило, для газов, содержащих фосфор, галогены, серу, так как продукты реакции в этом случае по токсичности во много раз превосходят исходные газовые выбросы. Поэтому методы термического обезвреживания обычно пригодны для токсичных выбросов органического происхождения, не содержащих упомянутых галогенов, серы и фосфора. Продуктами нейтрализации этих выбросов являются простые углеводороды типа метана или пары воды и диоксид углерода.

Можно выделить три основных варианта термической нейтрализации газовых выбросов при ее продолжительности 0,3-0,8 с: сжигание, термическое окисление и термокатализ. Сжигание в пламени и термическое окисление осуществляют при температурах 600-800°C, термо-

каталитическое сжигание — при 200-450°C. Выбор схемы нейтрализации определяется химическим составом загрязняющих веществ, их концентрацией, начальной температурой газов, объемным расходом и предельно допустимыми нормами выброса этих соединений.

Сжигание — окислительный термический процесс автогенного характера. Автогенность означает, что теплоты, выделяемой при окислении отхода, достаточно для поддержания горения и что дополнительного топлива для этого не требуется.

Сжигание обеспечивает эффективность нейтрализации выбросов на 0,90-0,99. Его используют главным образом для отходов, трудно поддающихся другим видам обработки. Температура обезвреживания углеводородных газов составляет не менее 600-650°C, а содержащих оксид углерода — 680-800°C.

Сжигание проводят или в специально сконструированных топочных устройствах (камерах, циклонах и т.п.), или непосредственно в факеле, т.е. в открытой горелке, направленной обычно вертикально вверх (например, в устье трубы).

Основной недостаток сжигания заключается в том, что температура пламени может достигать 1300°C. При избытке воздуха и достаточном времени его пребывания в зоне горения это приводит к образованию NO_x . Таким образом, устраняя загрязнения одного типа, процесс сжигания может инициировать выбросы других вредных веществ.

Количество оксидов азота можно снизить усовершенствованием режима сжигания.

Хорошо известен способ уменьшения эмиссии NO_x при *двухступенчатом режиме сжигания* природного газа в горелках, предусматривающем организацию первичной и вторичной зоны горения топлива.

В частности, сжигание в первичной зоне можно осуществлять с коэффициентом α избытка воздуха, меньшим единицы. Это приводит к сгоранию топлива преимущественно до оксида углерода, снижению максимальной температуры и содержания кислорода в ядре факела, увеличению его длины, уменьшению скорости образования NO_x . Дополнительное количество воздуха для достижения общего значения $\alpha > 1$ подают во вторичную зону, дожигая в ней СО до диоксида углерода. Однако этот процесс вследствие разбавления продуктами горения из первичной зоны осуществляется при более низких, чем при одностадийном сжигании, температурах, что обеспечивает общее уменьшение выбросов NO_x .

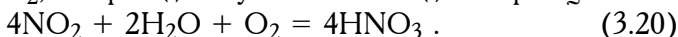
В другом варианте сжигание в первичной зоне осуществляют с большим избытком воздуха, подавая в нее только часть топлива. Это, естественно, снижает температуру и выход NO_x в данной зоне. Оставшаяся часть топлива подается во вторичную зону. Поскольку тем-

пература поступающих туда газов из первичной зоны ниже, чем при одноступенчатом сжигании, то она тем более остается такой при дожигании топлива газами этой зоны с пониженным содержанием кислорода (Уменьшение...).

Трехступенчатое сжигание предполагает горение 80-85% топлива с нормальным коэффициентом избытка воздуха (1,05-1,10) и создание восстановительной зоны выше основной зоны горения за счет ввода оставшихся 15-20% топлива при недостатке окислителя. В верхнюю часть топки подается третичный воздух для дожигания продуктов неполного сгорания из восстановительной зоны. Концентрация NO_x может быть снижена втрое, с 1100 до 400 мг/м³ (Беликов...).

Эффективным приемом является *рециркуляция* уходящих дымовых газов, когда часть продуктов сгорания возвращается и оптимально распределяется по длине факела. Сокращение содержания NO_x может достичь 2-3 раз.

Известен также *одноступенчатый способ* сжигания топлива при избытке воздуха, обеспечивающем в отходящих газах более 4% O_2 . Если при нормальном процессе горения ($\alpha = 1,05-1,10$; содержание кислорода в продуктах сжигания 1,5-2,0%) 95-97% NO_x обычно представлены NO, то при повышенном содержании кислорода этот оксид окисляется до NO_2 , который далее улавливается водой по реакции



При обычных по составу кислорода отходящих газах окисления NO в NO_2 можно достичь в электрофилтрах со струйным разрядом, а затем выделить диоксид азота из газа, например в насадочных скрубберах (Некоторые...).

Снижения концентраций NO_x и других загрязнителей атмосферы, образующихся в процессе горения, можно также добиться введением в состав горючего вещества *специальных добавок*. Так, в Японии фирма Okura Industrial Co при переработке отходов пластмасс сжиганием добавляет к ним 1% активированных нетоксичных ферроксидных присадок, способствующих подавлению выбросов NO_x , диоксинов и оксида углерода благодаря полному сгоранию пластмасс при минимальном избытке кислорода. В частности, при температуре горения 800°C содержание NO_x в отходящих газах снижается в два раза, а оксида углерода — на 30%. При введении присадки в смесь поливинилхлорида с известняком происходит также уменьшение выбросов хлористого водорода, образующегося при обычных режимах сжигания отходов (Additive in...).

Следует отметить, что затраты, связанные с уменьшением выбросов оксида азота за счет усовершенствования процесса сжигания топлива, значительно ниже, чем при строительстве установок по очистке газов.

Один из перспективных путей снижения загрязнения окружающей среды — приготовление *водотопливных суспензий*, содержащих 60-70% измельченного угля. Данный вид топлива имеет большую теплоту сгорания и резко, в 2-3 раза, снижает количество вредных выбросов в атмосферу (Пути...).

Термическое окисление, в отличие от сжигания, не носит автогенного характера и требует дополнительных источников тепла (топлива). Причиной этого являются недостаточные концентрации горючих примесей и кислорода в отходящих газах.

Для реализации термического окисления обычно используют один или несколько факторов: подмешивание свежего воздуха, нагрев отходящих газов, добавление топлива. Подмешивание свежего воздуха эффективно в тех случаях, когда газы имеют высокую температуру и достаточную концентрацию горючих примесей. Этот прием широко используют при дожигании оксида углерода в отходящих газах металлургических агрегатов (вагранок, электродуговых печей, сталеплавильных конвертеров), при дожигании продуктов неполного сгорания (CO и C_nH_m) автомобильных двигателей непосредственно на их выходе. В случаях, когда температура отходящих газов и содержание в них горючих компонентов недостаточны, их подогревают, а затем пропускают через рабочую зону, в которой дополнительно сжигают топливо, обычно газообразное, добавляя при необходимости воздух. Температура горения поддерживается выше температуры воспламенения вредных примесей, чтобы они успели сгореть за время пребывания газов в рабочей зоне.

Основное преимущество термического окисления — возможность регулирования температуры сжигания, поддержания ее на уровне, исключающем образование заметных количеств оксидов азота.

Термокаталитические реакции являются частным случаем сжигания или термического окисления, отличаясь лишь применением катализаторов. Их использование позволяет за счет резкого ускорения процесса нейтрализации существенно сократить габариты реакторов и снизить температуру реализации термических методов до 300°C и менее.

Обычно проводят гетерогенный катализ на твердых катализаторах. К наиболее эффективным из них относятся композиции на базе благородных металлов (платины, рутения, палладия и др.). Они действуют в широком диапазоне составов газовых смесей, имеют низкую температуру начала эффективной работы и ее достаточно высокий верхний уровень, долговечны, устойчиво функционируют при повышенной скорости газового потока. Эти катализаторы, несмотря на увеличенную стоимость, используют чаще других.

В ряде случаев применяют катализаторы на основе Cu , Cr , Co , Ni , их оксидов, сплавов и т.д. Эффективность их ниже, чем платиновых и

палладиевых, поскольку они менее долговечны, имеют повышенный нижний температурный предел эффективной работы и меньшую степень улавливания при высокой скорости газового потока.

Для каждого катализатора существует оптимальный температурный интервал применения. Нижний его предел определяется минимальной температурой начала реакции. Для многих углеводородов и их производных он находится на уровне 200-350°C. Максимальная рабочая температура многих катализаторов составляет 800-850°C, выше которой их активность снижается или они разрушаются.

Присутствие в обрабатываемом газе железа, свинца, кремния, фосфора и соединений серы отравляет катализаторы, сокращает срок службы многих из них.

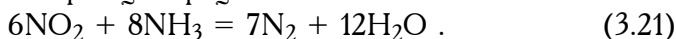
Различают два конструктивных варианта газоочистных каталитических устройств:

каталитические реакторы, в которых катализаторы размещены в отдельных корпусах;

термокаталитические реакторы, более распространенные, в которых в общем корпусе размещены контактный узел и подогреватель (рис. 3.13).

Термокатализ в настоящее время используется для очистки газов от оксидов азота и монооксида углерода.

Широкое применение получило селективное каталитическое восстановление NO_x аммиаком — технология SCR (Selective catalytic reduction), или СКВ. Появившись в 1961 г., она, начиная с 70-х годов прошлого века, внедрялась в Японии, США, Западной Европе, где в середине 90-х годов насчитывалось уже более 500 соответствующих установок. Основная реакция процесса:



Она реализуется при 200-450°C на ванадийсодержащем катализаторе с использованием носителя (оксида алюминия). Основная область применения технологии — очистка дымовых газов ТЭС с эффективностью свыше 90% на установках с единичной мощностью до 1 млн м³/ч.

Относительно высокие капитальные затраты (до 50 дол/кВт·ч) и отсутствие отечественных катализаторов сдерживают применение СКВ в нашей стра-

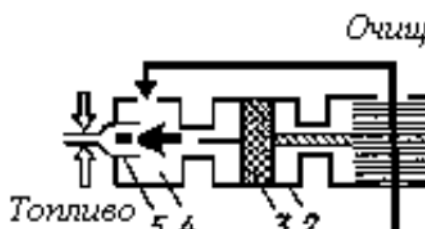


Рис. 3.13. Каталитический реактор:

- 1 — теплообменник-рекуператор; 2 — контактное устройство; 3 — катализатор;
- 4 — подогреватель; 5 — горелка природного газа

не. В начале 21 в. в ней имелись лишь три установки, работающие по технологии фирмы Топсе (Использование...).

Способ SCR предусматривает как один из вариантов осуществления процесса использование мочевины взамен аммиака (Radojevic).

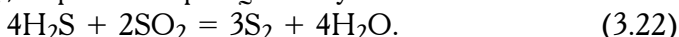
Однако наряду с SCR разработано и широко используется некаталитическое восстановление NO_x аммиаком — технология SNCR (Selective non catalytic reduction), запатентованная в США в 1975 г. В настоящее время количество установок СНКВ сопоставимо с их числом в технологии СКВ. Реализуется СНКВ, как и СКВ, по реакции (3.21) или аналогичным при 900-1100°C и продолжительности реакции 0,2-0,6 с, эффективности улавливания NO_x на уровне 70%.

Капитальные затраты на изготовление СНКВ-установок при оборудовании ими действующих котлов ТЭС примерно в 13 раз ниже, чем для СКВ-процесса (Использование...).

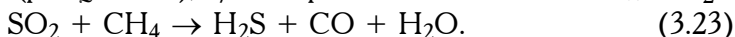
В России две первые (они же — последние) установки СНКВ эксплуатируются с 1992 г. на ТЭЦ г. Тольятти.

Современные технологии очистки газов от оксида углерода включают каталитические способы с применением металлов платиновой группы, золота и серебра (рабочие температуры 100-160°C), благородных металлов и их оксидов (0-100°C), оксидно-металлических и металлокомплексных систем, других композиций (Смола...).

Помимо рассмотренных выше термических методов, известны и другие газофазные способы. Так, в основе многих вариантов очистки газов от диоксида серы лежит реакция Клауса:



В соответствии с уравнением реакции, соотношение $\text{H}_2\text{S} : \text{SO}_2$ равно 2. Для его поддержания технологичнее вначале SO_2 метаном восстанавливать до H_2S (реакция 3.23), 1/3 которого затем вновь окислить до SO_2 :



Реакции Клауса мешает присутствие значительных количеств углекислого газа и кислорода. Углекислый газ адсорбируют щелочными растворами, кислород поглощают моноэтаноламином или другими адсорбентами в присутствии катализаторов на основе оксидов металлов (Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Al) и оксида кремния.

Процесс Клауса экономически целесообразен при концентрациях сернистого ангидрида в дымовых газах, равных или больших 2%, что имеет место в цветной металлургии (Еремин). В рядовых отходящих газах ТЭС она ниже (0,5-0,6%). Несмотря на это и на сложность метода, практическая реализация реакции Клауса постоянно находится в центре внимания энергетиков, поскольку это позволяет получить ценный продукт в виде элементарной серы. Последний получают в твердом ви-

де, он занимает гораздо меньшие объемы в сравнении с эквивалентными количествами серосодержащих газов, с минимальными затратами может быть доставлен потребителю на значительные расстояния.

Способ Клауса используется также для удаления сероводорода из природных газов с высоким его содержанием (3-26%) на Оренбургском, Саратовском и Астраханском месторождениях. Однако выявлены существенные препятствия для выхода технологий на проектные показатели из-за частых аварийных остановок, необходимости строительства дополнительных очистных сооружений и создания СЗЗ вокруг комплексов (Громов).

В Швейцарии разработан способ Plasmacat удаления паров различных примесей, например растворителей лаков и красок, галогенированных углеводородов, из газовой фазы без ее нагревания. Способ основан на возбуждении молекул в переменном электрическом поле с напряжением несколько тысяч вольт. Полученная энергия возбуждения эквивалентна тепловой, достигаемой нагревом на несколько тысяч градусов, хотя при этом температура газа практически не меняется. Возбужденные молекулы в присутствии простейших катализаторов превращаются в безвредные вещества без образования токсичных побочных продуктов. Достигаемая в этом способе плотность энергии столь велика, что превращениям (окислению) подвергаются не только молекулярно-дисперсные системы, но и гетерогенные, включающие споры, бактерии, вирусы. Производительность установок, предназначенных для реализации процесса Plasmacat, может варьировать в очень широких пределах — от 10 до 100 тыс. м³/ч очищаемого газа (Kalte...).

Подготовлена к коммерческому использованию технология удаления из дымовых газов оксида серы за счет вдувания в отходящий поток бикарбоната натрия NaHCO_3 (сухой способ очистки). При повышенной температуре потока бикарбонат натрия разлагается и окисляется с выделением паров воды, оксида углерода и свежееобразованного активного оксида натрия. Последний взаимодействует с SO_x , образуя нейтральный по химическому действию сульфат натрия Na_2SO_4 . Его отделяют от газового потока на тканевых фильтрах или электрофильтрах вместе с частицами золы. Степень очистки от SO_x достигает 90%, капитальные затраты в условиях ТЭС не превышают 20 дол./кВт (Dry...).

3.4.4. Биохимические

Биохимические методы в ряде стран (ФРГ, Швейцария, Нидерланды) начали применять для удаления неприятных запахов биологиче-

ского происхождения в литейном производстве и в автомобильной промышленности при нанесении лаковых покрытий.

Биохимические методы наиболее приемлемы для очистки отходящих газов постоянного состава. При частом его изменении микроорганизмы не успевают адаптироваться к новым веществам и выработать достаточное количество ферментов для их разложения.

Используют два типа аппаратов биохимической очистки: биоскрubberы и биофильтры.

Биоскрubberами называют абсорбционные аппараты, в которых абсорбентом служит водная суспензия микроорганизмов активного ила. Содержащиеся в очищаемых газах вредные вещества улавливаются и расщепляются ею. Так как биохимические реакции протекают с относительно небольшой скоростью, то для обеспечения высокой эффективности работы газоочистной установки требуется промежуточная емкость, которая может быть выполнена в виде отдельного реактора или встроена в основание абсорбера.

Способность активного ила к расщеплению уловленных веществ устанавливается по соотношению БПК и ХПК. При соотношении $\text{БПК}_n : \text{ХПК} \geq 0,5$ вещества поддаются биохимическому окислению.

В *биофильтрах* очищаемый газ пропускают через слой насадки, орошаемый водой до влажности, достаточной для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов. Насадкой служат природные (почва, торф, компост и др.) или искусственные материалы. При использовании последних на них предварительно выращивают биологически активную пленку путем орошения водой или суспензией активного ила.

Эффективная работа биофильтров обеспечивается за счет распределения очищаемого воздуха по всей фильтрующей поверхности, равномерных влажности и плотности фильтрующего слоя, поддержания оптимальных температур (25-35°C) и значений pH, равных 6,5-8,5.

Заканчивая рассмотрение общих принципов улавливания и обезвреживания газовых примесей, отметим, что выбор метода газоочистки и его аппаратного оформления определяется технико-экономическими расчетами и зависит от ряда факторов: концентрации загрязнителя в очищаемом газе и требуемой степени очистки, зависящей от фонового загрязнения атмосферы в данном регионе; объемов газов и их температуры; массы сопутствующих газообразных примесей и пыли; потребности в тех или иных продуктах утилизации, сорбентах и катализаторах; размеров площадей, необходимых для строительства газоочистной установки; наличия теплоносителей и т.д.

Главный принцип, который необходимо выдерживать при проектировании очистных сооружений, — это максимально возможное удер-

жание вредных веществ и тепловых выбросов, возврат их в основной технологический процесс или утилизация.

3.5. Рассеивание выбросов

При наличии систем пылеулавливания и газоочистки большая часть загрязнителей атмосферы задерживается ими. Неуловленные вредности, в том числе и из неочищенных газовых объемов, выбрасываются в атмосферу. Источники выбросов классифицируют по нескольким признакам. Различают организованные и неорганизованные, нагретые и холодные, линейные и точечные, затененные и незатененные, а также другие типы выбросов.

Организованные выбросы являются контролируемыми и удаляются по искусственно локализованным маршрутам. К ним относят выбросы через газоходы, трубы, вентиляционные системы и т.п. *Неорганизованные выбросы* не контролируют. Это пыле- и газовыделение технологического оборудования, транспортных устройств, погрузочно-разгрузочных узлов и т.д.

Точечные источники — это выбросы загрязнителей в одном узко сосредоточенном месте, имеющем сопоставимые по размерам длину и ширину. К такому типу относят, например, выбросы труб, шахтных и вентиляционных стволов. Выделяющиеся из точечных источников вредные вещества при рассеивании не должны накладываться одно на другое на расстоянии двух высот здания (с заветренной стороны).

Линейные источники имеют значительную протяженность в направлении, перпендикулярном к ветру. Это аэрационные фонари, открытые окна, близко расположенные вытяжные шахты и крышные вентиляторы.

Незатененные (или высокие) источники свободно расположены в недеформируемом потоке ветра. К ним относят высокие трубы, а также другие точечные источники, удаляющие загрязнители на высоту, превышающую 2,5 высоты здания.

Затененные (или низкие) источники расположены в зоне подпора или аэродинамической тени, образуемой на здании или за ним на высоте, равной или меньшей 2,5 его высоты, при обдувании ветром.

К выбросам в атмосферу предъявляют определенные требования по концентрации пылевых и газовых загрязнителей.

Концентрация пыли в газовых выбросах не должна превышать ее предельно допустимой концентрации $C_{п}$, мг/м³ (СНиП 2.04.05-86 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха»). В свою очередь, последняя зависит от объема L выбрасываемого воздуха,

тыс. м³/ч. При L более 15 тыс. м³/ч $C_{\Pi} = 100k$. При меньших объемах $C_{\Pi} = k(160 - 4L)$, где k — коэффициент, зависящий от ПДК_{р.з.} пыли:

$$\frac{\text{ПДК}_{\text{р.з.}}, \text{ мг/м}^3}{k} \quad \begin{array}{ccccc} \leq 2 & > 2 \div 4 & > 4 \div 6 & > 6 \div 10 \\ 0,3 & 0,6 & 0,8 & 1,0 \end{array}$$

При газообразных выбросах должны соблюдаться приземные концентрации индивидуальных i-х примесей и их предельные суммы, т.е. выполняться условия, вытекающие из выражений (2.1) и (2.2).

При выбрасывании загрязнений из высоких источников промышленных выбросов можно выделить три зоны в направлении их распространения: переброс факела выбросов, характеризующийся относительно небольшим содержанием вредных веществ в приземном слое атмосферы; задымление с максимальным содержанием вредных веществ; постепенное снижение уровня загрязнения (рис. 3.14). Зона задымления является наиболее опасной для населения и должна быть исключена из селитебной застройки. Длина этой зоны в зависимости от метеорологических условий составляет 10-49 высот труб. Достаточно рядовые трубы предприятий металлургии и ТЭС имеют высоту порядка 150-200 м. Высота трубы медно-никелевого комбината в г. Садберн (Канада) равна 407 м.

На рассеивание выбросов существенно влияют состояние атмосферы, расположение предприятий и источников выбросов, характер местности, физические и химические свойства выбрасываемых веществ, высота источников, диаметр устья и т.п. Рассмотрим воздействие некоторых из этих факторов на горизонтальное и вертикальное перемещение примесей, создающие общий эффект от их рассеивания.



Рис. 3.14. Распределение концентрации вредных веществ в атмосфере от организованного высокого источника выбросов

Горизонтальное перемещение примесей определяется в основном скоростью ветра, а вертикальное — распределением температур по высоте атмосферы.

В последнем случае повышение температуры выбрасываемых газов увеличивает разность плотностей их и окружающего воздуха, а следовательно, подъемную силу и вертикальную скорость выбросов.

Это способствует их лифтингу на большую высоту, рассеиванию на увеличенном пространстве, снижению приземных концентраций загрязнителей. Такое же влияние оказывают высота трубы и количество выбрасываемых в единицу времени объемов газов. Вертикальные потоки оказывают решающее влияние на рассеивание в условиях безветрия.

При ветре основную роль в рассеивании играют горизонтальные потоки. Высокие его скорости способствуют более низким приземным концентрациям примесей, поскольку разбавление вдоль оси струи пропорционально средней скорости ветра. Одновременно уменьшается высота факела над устьем трубы. В связи с последним введено понятие *опасной скорости ветра*, при достижении которой приземные концентрации повышаются. Чтобы предотвратить отклонение струи вблизи устья трубы, скорость выброса газа должна вдвое превышать опасную скорость ветра на уровне устья.

Помимо загрязнений, попадающих в атмосферу из высоких незатененных источников, значительная их часть, особенно в машиностроении, коммунальном хозяйстве, бытовом секторе, поступает из низких затененных источников. Картина распространения таких загрязнений отличается от рассмотренной. Затенители (здания, сооружения и т.п.) изменяют направление и скорость ветра, образуя зоны циркуляции и зоны повышенных скоростей. Для этих случаев также разработаны методы расчета, позволяющие определить значения и места нахождения максимальных концентраций примесей в заветренной или циркуляционной зонах (*Шаприцкий*).

В целом рассеивание вредных веществ в атмосфере — это вынужденное мероприятие, которое в настоящее время осуществляется потому, что очистные устройства не обеспечивают полного задержания выбросов вредных веществ. И то одна то другая сопредельные территории, в зависимости от направления господствующего ветра, обмениваются выбросами на одной и той же суммарной площади.

3.6. Планировка предприятий и санитарно-защитные зоны

Видное место в системе охраны воздушного бассейна от выбросов загрязнителей занимают планировочные мероприятия, позволяющие существенно снизить воздействие выбросов на работающих и жилые зоны. Среди этих мероприятий особое внимание необходимо уделять взаимному расположению производственных зданий по отношению друг к другу и жилым массивам, выбору площадок для промышленных предприятий, созданию санитарно-защитных зон.

На промышленной площадке следует выдерживать определенные расстояния между отдельными производственными корпусами, чтобы загрязняющие вещества не накапливались в межкорпусных пространствах, которые при недостаточных промежутках между зданиями оказываются в зоне аэродинамической тени. Так, при удалении вредных веществ через аэрационные фонари расстояние от впереди стоящего здания по господствующему направлению ветра должно составлять около десяти его высот.

Здания и сооружения предприятий обычно располагают по ходу производственного процесса. При этом цехи, выделяющие наибольшее количество вредных примесей, целесообразно строить на краю производственной территории со стороны, удаленной от жилого массива. Кроме того, взаимное размещение цехов должно быть таким, чтобы при направлении ветров в сторону жилых кварталов не происходило объединение их выбросов.

Основой планировочных мероприятий является выбор оптимального взаимного расположения предприятий и населенных пунктов. Последнее должно определяться средней годовой розой ветров. Предприятия-загрязнители необходимо размещать за чертой населенных пунктов и с подветренной стороны, чтобы выбросы уносились в сторону от жилых кварталов. При неровном рельефе местности промышленный объект следует строить на возвышенном месте, хорошо продуваемом ветрами. Площадка жилой застройки не должна быть выше площадки предприятия, иначе преимущества высоких труб для рассеивания выбросов практически сводятся на нет.

Предприятия, выделяющие в окружающую среду вредные и неприятно пахнущие вещества, необходимо отделять от жилой застройки санитарно-защитными зонами. Последние охватывают территорию между границами промплощадки, складов открытого и закрытого хранения материалов и реагентов, предприятий сельского хозяйства (с учетом перспектив их развития) — с одной стороны, и селитебной застройки — с другой. СЗЗ являются частью санитарного разрыва. Он определяется как территория между источником выделения производственных вредностей (физических, химических, биологических) и границей, на которой влияние этих веществ не превышает 5% от соответствующих гигиенических нормативов.

Размеры СЗЗ определяются мощностью предприятия, условиями осуществления технологического процесса, характером и количеством выделяющихся в окружающую среду веществ. По совокупности этих показателей предприятия разделены на классы опасности (КОП):

$$КОП = \left(\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{ПДК_i} \right)^a \quad (3.24)$$

где M_i — масса i -го вещества в выбросе;
 $ПДК_i$ — среднесуточное ПДК i -го вещества;
 n — количество загрязняющих веществ;
 a — безразмерная величина приведения степени вредности i -го вещества к вредности SO_2 .

Значения a для веществ в зависимости от их класса опасности: 1 — 1,7; 2 — 1,3; 3 — 1; 4 — 0,9 (см. также табл. 2.3).

Предприятия по величине КОП классифицируют: I класс $> 10^6$; II — 10^6 - 10^4 ; III — 10^4 - 10^3 ; IV $< 10^3$.

Ширина СЗЗ определяется классом предприятия (СанПиН 2.2.1/2.1.1-1200-03):

Класс	I	II	III	IV	V
Ширина СЗЗ, м	1000	500	300	100	50

К первому классу относятся, например, металлургические комплексы, предприятия микробиологической промышленности — производство БВК (белкового витаминного концентрата) на основе парафинов нефти, этанола, метанола, природного газа, микробиологический синтез аминокислот, производство антибиотиков, дрожжей, древесного спирта. К четвертому и пятому классам принадлежат машиностроительные заводы. Их можно размещать в пределах жилых районов. Предприятия I-III классов запрещено располагать среди жилой застройки даже при соблюдении необходимых размеров СЗЗ.

При неблагоприятных аэрологических условиях рассеивания выбросов в атмосферу, при сосредоточении в одном районе ряда крупных предприятий-загрязнителей, при отсутствии или недостаточной эффективности очистных устройств ширина санитарно-защитных зон по совместному решению Главного санитарно-эпидемиологического управления Минздрава и Госстроя России увеличивается до трех раз.

Размеры санитарно-защитной зоны могут быть уменьшены при изменении или усовершенствовании технологии, при внедрении высокоэффективных очистных устройств.

Во всех случаях достаточность размеров СЗЗ, в том числе и соответствие нормативным показателям, должна проверяться расчетом приземных концентраций. Если при этом выявлено, что санитарные нормы на границе зоны с жилым районом не обеспечиваются, разрабатываются дополнительные мероприятия, направленные на снижение приземных концентраций.

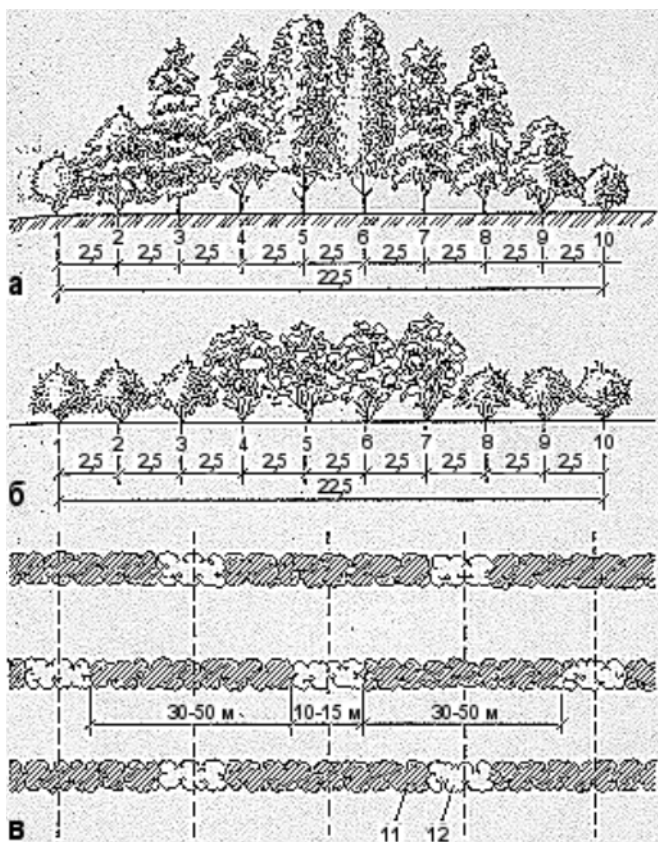
Помимо ветровой характеристики района, при определении границ и размеров санитарно-защитных зон необходимо учитывать информацию о величине загрязнения почв.

В СЗЗ запрещено размещение объектов для проживания людей. Она или какая-либо ее часть не могут рассматриваться как резервная территория объекта и использоваться для расширения промышленной или жилой территории. Вместе с тем в ней допустимо размещение объектов более низкого класса вредности, чем основное производство, для которого установлена санитарно-защитная зона, а также пожарных депо, гаражей, складов, административных зданий, научно-исследовательских лабораторий, стоянок транспорта и т.п.

Санитарно-защитные зоны подлежат озеленению газоустойчивыми породами деревьев и кустарников. При прохождении промышленных выбросов через озелененную зону концентрация содержащихся в них пыли и газов должна уменьшиться не менее чем вдвое. Зеленые насаждения особенно эффективны для локализации неорганизованных выбросов пыли и выделений дыма из низких труб. Если вокруг предприятия растет хвойный лес, то его деревья по мере их усыхания заменяют лиственными породами. Озеленение СЗЗ не производится с тех сторон предприятия, где жилая застройка отсутствует. Величина озеленения СЗЗ зависит от класса предприятий, к которым она относится, и составляет, %: для предприятий IV и V классов — не менее 60; II и III — не менее 50; I класса — не менее 40.

Недостаточно продуманная система посадки зеленых насаждений может привести к отрицательному эффекту. Создание сплошного лесного массива в санитарно-защитной зоне при низких источниках выброса вредных веществ, с одной стороны, максимально уменьшает опасность неблагоприятного воздействия предприятий на население, а с другой — может способствовать застоным явлениям и росту концентраций вредных веществ непосредственно на промышленной площадке из-за ухудшения естественной проветриваемости территории.

Для предотвращения последнего при размещении зеленых насаждений в СЗЗ устраивают своеобразные коридоры, соответствующие габаритам промплощадок. В них размещают продольные древесно-кустарниковые полосы одноструктурного построения шириной 22,5 м. В каждой полосе десять деревьев, расположенных на расстоянии 2,5 м друг от друга, причем два центральных дерева (пятое и шестое) — наиболее высокие, рост остальных понижается к краям полосы. Количество продольных полос в коридоре определяется общей его шириной, соответствующей габаритам промплощадки, и величиной межполосного разрыва (100-120 м) — рис. 3.15.



**Рис. 3.15. Построение полос зеленых насаждений
в санитарно-защитных зонах:**

- а — первый тип полос; б — второй тип полос; в — организация разрывов в полосах второго типа; 1-10 — номера рядов полос; 11 — древесно-кустарниковый участок полосы; 12 — кустарниковый участок полосы

Поперечная по отношению к полосам коридоров система защитных полос на территории СЗЗ имеет ту же ширину (22,5 м), что и полосы коридоров. Через каждые 30-50 м полосы в ней устраивают 10-15-метровые разрывы, роль которых выполняют посадки, состоящие из высоких, средних и низких кустарников. Разрывы между параллельными древесно-кустарниковыми защитными полосами составляют 40-50 м. Они используются под посевы наиболее газоустойчивых трав, а также для сельского хозяйства, садоводства и огородничества.