

## **ВВЕДЕНИЕ** Актуальность.

До определенного этапа развития человеческого общества, в частности, индустрии, в природе существовало экологическое равновесие, то есть деятельность человека не нарушала природных процессов или очень незначительно влияла на них. Двадцатый век вошел в историю как век небывалого технического прогресса, бурного развития науки, промышленности, энергетики, сельского хозяйства. Одновременно как сопровождающий фактор росло и продолжает расти вредное воздействие индустриальной деятельности человека на окружающую среду. В результате происходит в значительной степени непредсказуемое изменение экосистем и всего облика планеты Земля. По данным моделирования в город с населением 1 млн. человек ежедневно поступает 732 тыс. т вещества (вода, пища, топливо). Из них 1 тыс. т. – газообразные и пылевые загрязняющие вещества (твердых частиц в среднем около 150 т.). Плотность выброса пыли с 1 км<sup>2</sup> площади такого города составляет 500 т/год, причем максимум поступления в атмосферу загрязняющих веществ отмечается в зимние месяцы, когда на полную мощность работают ТЭЦ и котельные. В связи с вышесказанным представляет определенный интерес рассмотрение различных методов пылеочистки.

## **1. Основные понятия и определения процессов пылеулавливания**

### **1.1. Общие понятия о пыли и ее классификация**

Пыль представляет собой дисперсную систему с газообразной дисперсионной средой и твердой дисперсной фазой, состоящей из частиц от квазимолекулярного до макроскопического размеров, обладающих свойством находиться во взвешенном состоянии более или менее продолжительное время. Аэрозоли также представляют собой дисперсные системы с газообразной (воздушной) дисперсионной средой и твердой или жидкой

дисперсной фазой. Скорость оседания частиц аэрозоля очень мала, и они могут неопределенно долгое время находиться во взвешенном состоянии.

Наиболее тонкие частицы аэрозоля по размерам приближаются к наиболее крупным молекулам, а наиболее крупные достигают 1 мкм. В технической литературе термины грубый аэрозоль и пыль являются синонимами. Пыли и аэрозоли обычно полидисперсны, т. е. частицы их дисперсной фазы имеют неодинаковый размер. В природе и технике монодисперсные пыли и аэрозоли встречаются крайне редко. Масса частиц, содержащихся в единице объема газа или воздуха, называется концентрацией пыли, пылесодержанием или запыленностью.

Атмосферные частицы классифицируют по размерам следующим образом: крупные частицы (средний диаметр 20 мкм) – сосредоточены в нижнем слое тропосферы (до 3000 м), осаждаются под действием силы тяжести, но могут переноситься ветром на большие расстояния; полутонкая пыль (диаметр 0,1 – 5 мкм) – осаждается с трудом или не осаждается вовсе. Частицы размером меньше 1 мкм служат ядрами конденсации водяного пара. Для частиц диаметром менее 0,1 мкм из-за броуновского движения осаждение в обычных условиях невозможно (эти частицы называют аэрозолем); тонкая (микроскопическая) неосаждающаяся пыль (диаметр менее 0,001 мкм), это так называемые частицы Айткена. Большинство атмосферных частиц, удерживающихся в воздухе в течение длительного времени, имеют диаметр 0,1 – 5 мкм. Тонкая и частично полутонкая пыль не осаждается в местах выброса при сухой атмосфере и может поэтому попасть в потоки региональных и глобальных загрязняющих веществ.

## 1.2. Классификация пылеуловителей

По назначению устройства для очистки газа (воздуха) от пыли подразделяются на пылеуловители и воздушные фильтры. Первые служат для санитарной очистки газов и воздуха перед их выбросом в атмосферу и для технологической очистки с целью улавливания и возврата ценных

пылевидных продуктов или полуфабрикатов, а вторые – для очистки приточного воздуха, подаваемого вентиляционными установками в производственные и общественные здания.

Пылеуловители делятся на две категории: аппараты без применения жидкости и с ее применением. Такое деление принято в ГОСТ 12.2.043-80 «Оборудование пылеулавливающее. Классификация».

Сухие пылеуловители делятся на гравитационные, инерционные, фильтрационные и электрические. По некоторым особенностям их действия или основному конструктивному признаку группы пылеуловителей делятся на подгруппы, а в зависимости от специфики конструктивного оформления на типы аппаратов.

Гравитационные пылеуловители – пылеосадочные камеры, в которых выпадение частиц из газового потока происходит под действием силы тяжести. Существуют полые и полочные камеры. Полки в камерах устанавливаются с целью осаждения более тонких частиц или чтобы иметь возможность увеличить скорость и, соответственно, расход газа в сечении камеры без снижения степени очистки.

В инерционных пылеуловителях выделение частиц из газового потока происходит под действием сил инерции, возникающих вследствие изменения направления или скорости движения газа. Они делятся на три подгруппы: жалюзийные (пластинчатые или конические); циклонные (возвратнопоточные, прямоточные и вихревые); ротационные.

Фильтрационные пылеуловители — это устройства, в которых выделение частиц пыли из газового потока происходит вследствие его прохода через слой пористого материала. Эта группа состоит из следующих подгрупп: тканевые фильтры (каркасные и рукавные), волокнистые (рукавные, панельные, ячейковые), зернистые (насыпные, жесткие), сетчатые (ячейковые, барабанные).

Электрофильтры действуют на основе сообщения частицам в поле коронного разряда электрического заряда с последующим их осаждением на осадительных электродах.

## **2. Электрическая очистка газов**

Под электрической очисткой газа понимают процесс, при котором твердые частицы удаляются из газообразной среды под воздействием электрических сил.

Фундаментальным отличием процесса электростатического осаждения от механических методов сепарации частиц является то, что в этом случае осаждающая сила действует непосредственно на частицы, а не создается косвенно воздействием на поток газа в целом. Это прямое и чрезвычайно эффективное использование силового воздействия и объясняет такие характерные черты электростатического метода, как умеренное потребление энергии и малое сопротивление потоку газа. Даже мельчайшие частицы субмикрометрового диапазона улавливаются эффективно, поскольку и на эти частицы действует достаточно большая сила. Принципиальных ограничений степени очистки нет, поскольку эффективность может быть повышена путем увеличения продолжительности пребывания частиц в электрофильтре.

Энергия, потребляемая в электрофильтре, складывается из энергии, расходуемой генератором тока высокого напряжения, и энергии, необходимой для преодоления гидравлического сопротивления при прохождении газа через электрофильтр. Гидравлическое сопротивление электрофильтра при его правильной эксплуатации не превышает 100...150 Па, т. е. значительно ниже, чем у большинства других пылеуловителей. Энергия, подводимая к обрабатываемым газам при электроосаждении, расходуется преимущественно на оказание непосредственного воздействия на осаждаемые частицы. Этим обусловлены многие преимущества процесса электрофильтрации.

Электрофильтр относится к наиболее эффективным пылеулавливающим аппаратам. Эффективность очистки достигает 99,9 % в широких пределах

концентраций (от нескольких мг до 200 г/м<sup>3</sup>) и дисперсности частиц (до долей мкм) и невысокой затрате электроэнергии (около 0,1...0,5 кВт-ч на 1000 м<sup>3</sup> газов). Электрофильтр может обеспыливать влажную и коррозионноактивную газовую среду с температурой до 500°С. Производительность электрофильтров достигает сотен тысяч м<sup>3</sup>/ч очищаемого газа.

К недостаткам электрофильтров относится их высокая чувствительность к поддержанию параметров очистки, высокая металлоемкость и большие габариты, а также высокая требовательность к уровню монтажа и обслуживания.

Применение электрофильтрации имеет ряд ограничений. Электрофильтр не может быть использован для улавливания пылей, обладающих очень высоким электрическим сопротивлением. Нельзя направлять в электрофильтры взрывоопасные газовые выбросы, в том числе и такие, которые могут стать взрывоопасными в процессе обработки. Не следует использовать электроочистку, если осаждение взвешенных частиц может сопровождаться электрохимическими реакциями с выходом токсичных продуктов и тем более - добавлять таковые (например, SO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub> и др.) для интенсификации процесса электрофильтрации.

Электрофильтры, как более сложное и дорогостоящее оборудование, обеспечивающее тонкую очистку воздуха, обычно komponуют с другими пылеулавливающими устройствами, устанавливаемыми на начальных ступенях очистки. В результате повышается экономичность использования электрофильтров и обеспечивается более полная очистка.

### **3. Принцип действия электрофильтров**

В электрофильтре очистка газов от твердых и жидких частиц происходит под действием электрических сил. Частицам сообщается электрический заряд, и они под действием электрического поля осаждаются из газового потока.

Общий вид электрофильтра приведен на рис. 1

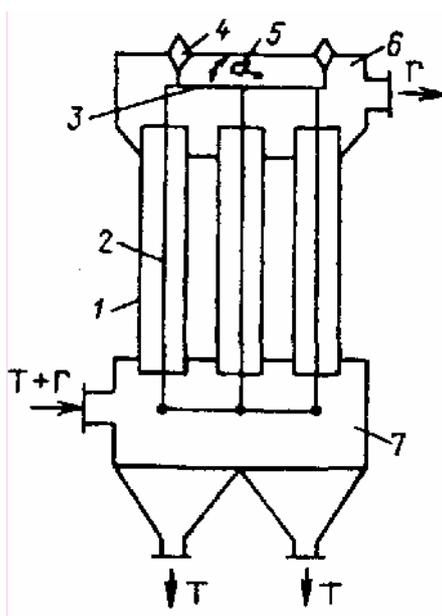


Рис. 7.1. Электрофильтр: 1 – осадительный электрод; коронирующий электрод; 3 – рама; 4 – высоковольтный изолятор; 5 – встряхивающее устройство; 6 – верхняя камера; 7 – сборник пыли.

Процесс обеспыливания в электрофильтре состоит из следующих стадий: пылевые частицы, проходя с потоком газа электрическое поле, получают заряд; заряженные частицы перемещаются к электродам с противоположным знаком; осаждаются на этих электродах: удаляется пыль, осевшая на электродах.

Зарядка частиц - первый основной шаг процесса электростатического осаждения. Большинство частиц, с которыми приходится иметь дело при промышленной газоочистке, сами по себе несут некоторый заряд, приобретенный в процессе их образования, однако эти заряды слишком малы, чтобы обеспечить эффективное осаждение. На практике зарядка частиц достигается пропусканием частиц через корону постоянного тока электродами электрофильтра. Можно использовать и положительную и отрицательную корону, но для промышленной газоочистки предпочтительнее отрицательная корона из-за большей стабильности и возможности применения больших

рабочих значений напряжения и тока. При очистке воздуха используют только положительную корону, так как она дает меньше озона.

Основными элементами электрофилтра являются коронирующий и осадительный электроды. Первый электрод в простейшем виде представляет собой проволоку, натянутую в трубке или между пластинами, второй - представляет собой поверхность трубки или пластины, окружающей коронирующий электрод (рис. 2).

На коронирующие электроды подается постоянный ток высокого напряжения 30...60 кВ. Коронирующий электрод обычно имеет отрицательную полярность, осадительный электрод заземлен. Это объясняется тем, что корона при такой полярности более устойчива, подвижность отрицательных ионов выше, чем положительных. Последнее обстоятельство связано с ускорением зарядки пылевых частиц.

После распределительных устройств обрабатываемые газы попадают в проходы, образованные коронирующими и осадительными электродами, называемые межэлектродными промежутками. Сходящие с поверхности коронирующих электродов электроны разгоняются в электрическом поле высокой напряженности и приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа. Сталкивающиеся с электронами молекулы газов ионизируются и начинают ускоренно двигаться в направлении электродов противоположного заряда, при соударении с которыми выбивают новые порции электронов. В результате между электродами появляется электрический ток, а при некоторой величине напряжения образуется коронный разряд, интенсифицирующий процесс ионизации газов. Взвешенные частицы, перемещаясь в зоне ионизации и сорбируя на своей поверхности ионы, приобретают в конечном итоге положительный или отрицательный заряд и начинают под влиянием электрических сил двигаться к электроду противоположного знака. Частицы сильно заряжаются на первых 100...200 мм пути и смещаются к заземленным осадительным электродам под воздействием интенсивного поля короны. Процесс в целом протекает очень быстро, на полное осаждение частиц

требуется всего несколько секунд. По мере накопления частиц на электродах их стряхивают или смывают.

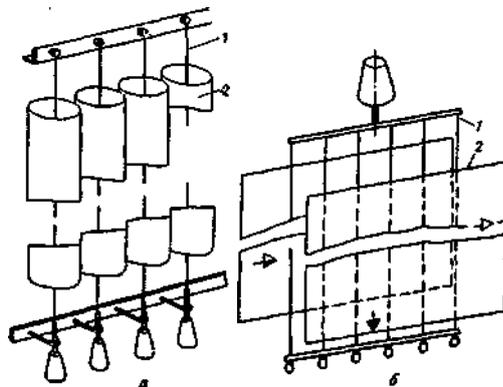


Рис. 2. Конструктивная схема электродов:

- а* - электрофильтр с трубчатыми электродами;
- б* - электрофильтр с пластинчатыми электродами;
- 1 - коронирующие электроды; 2 - осадительные электроды.

Степень очистки газов от дисперсных примесей в электрофильтрах зависит практически от всех параметров газов и взвешенных частиц, от конструктивных характеристик аппаратов, режимов эксплуатации и ряда других факторов. Из свойств дисперсных частиц наиболее очевидно проявляется влияние удельного электрического сопротивления (УЭС), оптимальное значение которого находится в пределах (106...109) Ом.м. Низкоомные частицы легко заряжаются в электрическом поле, однако с приближением к электроду с противоположным знаком перезаряжаются, и между ними начинают действовать силы отталкивания. Это служит причиной вторичного уноса низкоомных частиц, даже успевших осесть на электрод. Еще менее благоприятные процессы возникают при очистке высокоомных пылей. Оседая на электроды, они образуют неоднородный электроизоляционный слой. По месту наиболее слабой изоляции напряженность поля становится максимальной. Это способствует образованию короны с противоположным знаком ("обратной короны"), резко ухудшающей работу электрофильтра.

В наибольшей мере процесс улавливания пыли в электрофильтре зависит от электрического сопротивления пыли. По величине сопротивления пыли делят на три группы:

- пыль с малым удельным электрическим сопротивлением. УЭС  $< 10^4$  Ом·см. Эта пыль, соприкасаясь с осадительным электродом, мгновенно теряет заряд и приобретает заряд в соответствии со знаком электрода. В результате между частицей и электродом возникает отталкивающая сила, направляющая частицу в газовый поток. Если отталкивающая сила преодолет силу сопротивления среды, возникает вторичный унос, снижающий эффективность улавливания пыли в электрофильтре;
- пыли с УЭС в пределах  $10^4 \dots 10^{10}$  Ом·см без каких-либо осложнений осаждаются на электродах и удаляются;
- пыли со значительным УЭС  $> 10^{10}$  Ом·см. Улавливание этих пылей в электрофильтре представляет наибольшую сложность. Из-за медленной разрядки частиц, оседающих на электроде, на последнем накапливается слой отрицательно заряженных частиц. Возникающее электрическое поле слоя начинает препятствовать дальнейшему осаждению частиц. Эффективность электрофильтра снижается. Возможно явление обратной короны, при котором значительно увеличивается потребляемый ток при снижении напряжения на электродах. Пыли этой группы часто образуют на электродах прочный изолирующий слой, трудно поддающийся удалению. Высоким удельным электрическим сопротивлением обладают пыли магнезита, гипса, оксиды свинца и цинка  $PbO$ ,  $ZnO$ , сульфид свинца  $PbS$ .

Осадок частиц с высоким сопротивлением разрушает корону вследствие искрового пробоя, происходящего при необычно низких напряжениях, или вследствие образования обратной короны на осадительном электроде. Критическое значение удельного сопротивления составляет около  $2 \cdot 10^8$  Ом·м; при его превышении наблюдается искровой пробой и образование обратной короны.

Снижение УЭС пыли достигается добавкой к газу ряда реагентов, например, сернистого ангидрида, аммиака, хлоридов кальция и натрия и др. Такой же результат дает добавление в газ электропроводных частиц сажи или кокса.

Высокое сопротивление ряда пылей может быть понижено охлаждением пылегазового потока ниже 130°C или его нагреванием свыше 350°C.

Определенное влияние на степень осаждения частиц оказывают их концентрация и дисперсный состав. На входе в электрофильтр частицы могут иметь собственный электростатический заряд, который при их большом количестве (т.е. при высокой счетной концентрации) может заметно влиять на параметры осаждения частиц, снижая напряженность электрического поля в аппарате вплоть до закипания короны. Теоретически наименьший размер улавливаемых частиц в электрофильтрах не ограничен. Однако практически не все частицы в них улавливаются. При очень высокой концентрации высокодисперсных частиц (обычно субмикрометрового диапазона) наступает подавление тока короны объемным электрическим зарядом. Это приводит к тому, что концентрация ионов становится слишком низкой, чтобы обеспечить достаточную зарядку частиц.

Скорость дрейфа частиц в электрическом поле в значительной мере зависит от размеров частиц. Эта зависимость имеет сложный характер ввиду различия механизмов перемещения частиц разных размеров. Считается, что в диапазоне размеров менее 0,1...0,3 мкм скорость перемещения частиц в электрическом поле уменьшается с их укрупнением, в диапазоне от 0,3 до 20 мкм - увеличивается с увеличением диаметра и затем вновь несколько снижается.

Из параметров газового потока наибольшее влияние на осаждение оказывают влажность и температура. Со снижением температуры уменьшается вязкость газов, вследствие чего они оказывают меньшее сопротивление перемещению взвешенной частицы к электроду. С понижением температуры растет устойчивость коронного разряда, что

позволяет работать при более высокой напряженности электрического поля. Кроме того, с охлаждением обрабатываемого потока растет его относительная влажность, что ведет к понижению УЭС частиц вследствие их увлажнения.

Очень важным фактором, связанным практически со всем процессом электроосаждения, является скорость газового потока. От нее непосредственно зависят время пребывания частиц в аппарате и его габариты.

При слабом течении газа, слишком большой скорости газа или плохих условиях удержания может происходить унос осажденных частиц. Частицы, унесенные с осадительного электрода, в случае отрицательной короны приобретут положительный заряд вследствие эмиссии. Эти частицы могут не подвергаться перезарядке или перезарядиться только частично. В любом случае частицы будут вынесены из электрофильтра, что существенно снизит эффективность улавливания. При скоростях потока более (1...1,5) м/с резко растет вторичный унос пыли с электродов. Очень важно в связи с этим обеспечить равномерное распределение потока по сечению аппарата с тем, чтоб локальные скорости в межэлектродных промежутках ненамного отличались от средней скорости.

Определенное влияние на эффективность обработки газов оказывают конструктивные особенности тех или иных типов электрофильтров. Электрофильтры работают как под разрежением, так и под избыточным давлением. Система пылеулавливания, в которой применен электрофильтр, может быть полностью автоматизирована.

#### **4. Конструкции электрофильтров**

Аппараты для очистки газов этим методом называют электрофильтрами. Основными элементами электрофильтров являются: газоплотный корпус с размещенными в нем коронирующими электродами, к которым подводится выпрямленный ток высокого напряжения, и осадительными заземленными электродами, изоляторы электродов, устройства для равномерного

распределения потока по сечению электрофильтра, бункера для сбора уловленных частиц, системы регенерации электродов и электропитание.

Конструктивно электрофильтры могут быть с корпусом прямоугольной или цилиндрической формы. Внутри корпусов смонтированы осадительные и коронирующие электроды, а также механизмы встряхивания электродов, изоляторные узлы, газораспределительные устройства.

Часть электрофильтра, в которой размещены электроды, называют активной зоной (реже - активным объемом). В зависимости от числа активных зон известны электрофильтры однозонные и двухзонные. В однозонных электрофильтрах коронирующие и осадительные электроды в пространственном отношении, конструктивно не разделены, в двухзонных электрофильтрах - имеется четкое разделение. Для санитарной очистки запыленных выбросов используют однозонные конструкции с размещением коронирующих и осадительных электродов в одном рабочем объеме. Двухзонные электрофильтры с отдельными зонами для ионизации и осаждения взвешенных частиц применяют в основном при очистке приточного воздуха. Связано это с тем, что в ионизационной зоне происходит выделение озона, поступление которого не допускается в воздух, подаваемый в помещения.

В зависимости от направления движения газа электрофильтры подразделяют на горизонтальные и вертикальные. Вертикальные аппараты занимают в плане значительно меньше места, но при прочих равных условиях коэффициенты очистки в них ниже. Активная длина поля вертикального электрофильтра совпадает с активной высотой его электродов.

По мере осаждения пыли на электродах понижается эффективность пылеулавливания. Во избежание этого явления и поддержания оптимальной эффективности электрофильтров электроды периодически очищают от пыли встряхиванием или промывкой. Соответственно электрофильтры подразделяются на сухие и мокрые.

К мокрым относят аппараты, улавливающие жидкие или значительно увлажненные твердые частицы, а также электрофильтры, электроды которых очищаются самотеком (конденсатом уловленного жидкого аэрозоля) или посредством смывки осевших частиц жидкостью. К сухим относят электрофильтры, улавливающие сухие твердые частицы, которые удаляют с электродов посредством встряхивания через определенные промежутки времени.

Все мокрые электрофильтры, нашедшие применение в промышленности, имеют вертикальную компоновку. Сухие аппараты могут быть как вертикальными, так и горизонтальными. Преимущественное применение среди сухих электрофильтров имеют аппараты с горизонтальным ходом газа - горизонтальные многопольные аппараты, в которых очищаемый газ проходит последовательно через несколько электрических полей.

В зависимости от формы осадительных электродов известны электрофильтры трубчатые и пластинчатые (рис. 2). Трубчатые электрофильтры состоят из большого числа элементов, имеющих круглое или сотообразное сечение. По оси трубчатого элемента расположен коронирующий электрод. В пластинчатом электроfiltре имеется большое количество параллельных пластин. Между ними находятся натянутые коронирующие электроды.

Формы осадительных и коронирующих электродов могут быть самыми разнообразными. Коронирующие электроды могут набираться из тонких круглых или толстых шестигранных стержней, стальных пилообразных полос, профилированных лент с игольчатой выштамповкой. Иногда применяются и другие формы. Осадительные электроды сухих фильтров выполняют в виде профилированных пластин, желобов, реже - коробок с круглыми или сложными вырезами для лучшего удержания осажденной пыли от вторичного уноса. В мокрых электрофильтрах проблема вторичного уноса незначительна, поэтому электроды выполняют в виде наборов прутков и гладких пластин, что позволяет легко смывать осадок.

Электроды сухих фильтров встряхивают соударением или при помощи специальных ударно-молотковых механизмов. Соударения применяют в основном для встряхивания коробчатых электродов. Остальные типы коронирующих и осадительных электродов встряхивают ударами вращающихся молотковых механизмов по наковальням, прикрепленным к этим электродам.

Промывка электродов в мокрых электрофильтрах может производиться периодически или непрерывно. Для периодической промывки подают большое количество воды или другой промывной жидкости на электроды (в активную зону) при отключенном напряжении. На время промывки секции подачу газа прекращают.

Переток неочищенного газа мимо активной зоны даже в небольшом количестве может заметно ухудшить степень очистки. В горизонтальных фильтрах неактивные зоны расположены над и под электродной системой (включая бункера), а также в промежутках между крайними осадительными электродами и корпусом. В вертикальных пластинчатых фильтрах неактивны промежутки между осадительными электродами и корпусом. В вертикальных трубчатых аппаратах неактивные зоны можно устранить полностью. В пластинчатых конструкциях зазоры необходимы для встряхивания электродов и соблюдения пробойных промежутков. Поэтому в таких электрофильтрах предусматривают клапаны (щитки), создающие лабиринтное уплотнение и снижающие перетоки газа.

Скорость очищаемого газа в активной зоне является одной из основных характеристик электрофильтра. Наибольшую величину электрического заряда частицы размером до 1 мкм получают за время нахождения в электрическом поле около 1 с. Скорость принимают в зависимости от конструкции электрофильтра. Так, в сухих электрофильтрах ее значение находится обычно в пределах 0,8...1,7 м/с. Должно быть обеспечено равномерное распределение скорости очищаемого газа по сечению аппарата. Для выравнивания

скоростного поля в электрофильтре устанавливают решетки, направляющие лопатки, перфорированные пластины.

Широкое распространение в промышленности получили электрофильтры типа УГ, ЭГА и др. Эти аппараты применяют на тепловых электростанциях, в черной и цветной металлургии, химической промышленности, на предприятиях строительных материалов.

Для промышленной газоочистки из аппаратов отечественного производства могут быть рекомендованы электрофильтры общего назначения типов ЭГА, ЭГТ (горизонтальные сухие), УВ, ЭВВ (вертикальные сухие), а также ряд специализированных типов электрофильтров.

Электрофильтры серии ЭГА предназначены для обеспыливания неагрессивных невзрывоопасных газовых выбросов с температурой до 330°C. Корпуса аппаратов стальные, имеют прямоугольную форму. Корпус аппарата стальной теплоизолированный, имеет прямоугольную форму и рассчитан на разрежение до 4 кПа: в аппарате имеется 3 электрических поля, расположенных последовательно по ходу газа. Осадительные электроды представляют собой плоские полотна, набранные из прутков, а коронирующие - проволочные (диаметр проволоки 2,2 мм), натянутые при помощи грузов между осадительными. Длина одного активного поля 2,5 м, ширина 5,97 м (ширина корпуса 6,0 м), высота 7,74 м, расстояние между соседними осадительными электродами 260 мм. Уловленная пыль удаляется с электродов механическим встряхиванием посредством ударов молотков по наковальням осадительных и рамам подвеса коронирующих электродов. Аппараты ОГП изготавливались четырехпольными с активной высотой 4,5 м, длиной 1,5 м, шириной поля 2,17 (ОГП-4-8) и 3,98 м (ОГП-4-16), а ширина корпуса составляла 2,20 и 4,0 м. Допустимое разрежение в аппарате 1,5 кПа.

Электрофильтры серии ЭГТ предназначены для очистки неагрессивных, невзрывоопасных газов с температурой до 450°C.

Их основное отличие от аппаратов предыдущих серий заключается в конструкции осадительных электродов, которые аналогичны применяемым в

электрофильтрах серии ЭГА. Высота коронирующих электродов 8040 мм. Корпус аппарата рассчитан на разрежение до 4 кПа. Маркировка электрофильтров серии ЭГТ означает: электрофильтр горизонтальный высокотемпературный; первое число после букв указывает номер (габарит) типоразмерного ряда; второе - количество полей, третье - длину одного поля, м; четвертое - площадь активного сечения, м<sup>2</sup>.

Электрофильтры марки ЭГ2-2-4-37 СРК предназначены для очистки газов содорегенерационных котлоагрегатов. Электрофильтры односекционные, с двумя последовательными по ходу газа электрическими полями.

Коронирующие электроды представляют собой трубчатые рамы, в которых закреплены коронирующие элементы; осадительные электроды выполнены в виде плоских полотен, набранных из пластинчатых элементов специального профиля. Расстояние между соседними осадительными электродами 300 мм, высота электродов 7200 мм, ширина поля 6000 мм.

Маркировка электрофильтра означает: электрофильтр горизонтальный; первое число обозначает номер типоразмера (габарит) осадительного электрода, второе - количество полей, третье - активную длину поля, м; четвертое - площадь активного сечения, м<sup>2</sup>. Гидравлическое сопротивление фильтра 200 Па, разрежение в электрофильтре 3000 Па, пропускная способность по газу при скорости 1 м/с - 37 м<sup>3</sup>/с, температура очищаемых газов 130...250°С, ориентировочная степень очистки газов содорегенерационных котлоагрегатов 98%.

Электрофильтры типа УГМ используются для обеспыливания неагрессивных и невзрывоопасных технологических газовых выбросов с температурой до 250°С. Аппараты односекционные, с двумя электрическими полями по ходу газов. Корпуса электрофильтров прямоугольные, теплоизолированные, рассчитаны на разрежение до 4 кПа. Осадительные электроды представляют собой плоские полотна, набранные из пластинчатых элементов специального профиля. Расстояние между соседними осадительными электродами 275 мм. Коронирующие электроды составлены из

ленточно-игольчатых элементов, натянутых в трубчатых рамах. Высота электродов 3000 мм, ширина корпуса 1500 мм (УГМ-2-3,5) и 3000 мм (УГМ-2-7). Пыль с электродов удаляется механическим встряхиванием. Маркировка электрофильтров обозначает: унифицированный горизонтальный малогабаритный; первое число - количество полей, второе - площадь активного сечения, м<sup>2</sup>.

Электрофильтры ЭГ-КЭН предназначены для обеспыливания газов, содержащих высокоомные дисперсные частицы с УЭС в пределах  $10^8$ - $10^{10}$  Ом м. Степень очистки газов в них может достигать 99,75%. Электрофильтры изготавливаются двух типоразмеров с маркировкой ЭГ-2-3-3,8-17-0,4 КЭН и ЭГ-2-4-2,5-77-05 КЭН, которая означает: электрофильтр горизонтальный; первое число после букв обозначает типоразмерный (габаритный) номер, второе - количество полей, третье - активную длину поля, м, четвертое - площадь активного сечения, м<sup>2</sup>, пятое - модификацию; аббревиатура "КЭН" означает "комбинированные электроды НИИОГаз". Аппараты имеют высоту электродов 6000 и 7150 мм, ширину 3200 и 11810 мм, производительность при скорости газов в 1 м/с - 16,7 и 77,8 м<sup>3</sup>/с, допустимые пределы температур 330 и 250°С соответственно. Гидравлическое сопротивление электрофильтров составляет 200 Па, максимально допустимое разрежение - 5 кПа. Расстояние между соседними осадительными электродами 300 мм. Коронирующие электроды набираются из профилированных лент и создают электрическое поле со сложным характером изменения напряженности. Уловленная пыль удаляется механическим встряхиванием электродов.

Вертикальные сухие электрофильтры типа УВ могут применяться для обеспыливания неагрессивных и невзрывоопасных технологических газовых выбросов с температурой до 250°С. Электрофильтры однополевые, используются при низкой запыленности (до 30 г/м<sup>3</sup>), в пределах оптимальных значений удельного сопротивления пыли. В частности, они находят применение при очистке аспирационного воздуха электролизных цехов алюминиевых заводов.

Электрофильтры могут быть одно-, двух- или трех-секционными. Корпуса прямоугольные, теплоизолированные. Секции аппаратов разделены сплошными перегородками. Ширина секции аппаратов УВ 2×24 и УВ 3×24 составляет 6,1 м, остальных - 4,25 м. Движение газов в каждой секции организовано снизу-вверх. Разрежение в аппарате до 3,5 кПа. Осадительные электроды выполнены в виде пластинчатых полотен. Расстояние между соседними осадительными электродами 275 мм. Коронирующие электроды представляют собой трубчатые рамы, в которых натянуты ленточно-зубчатые элементы. Активная длина поля (высота электродов) 7,5 м. Удаление пыли с электродов осуществляется встряхиванием. Маркировка электрофильтра означает: унифицированный вертикальный; первое число после букв - количество секций, второе - площадь активного сечения одной секции, м<sup>2</sup>.

Мокрые электрофильтры ЭВМ предназначаются для улавливания туманов и капель серной кислоты с концентрацией (5...20) % об. в присутствии следов оксидов мышьяка, селена, соединений фтора. Электрофильтры выполняются вертикальными однопольными и односторонними. Корпус стальной цилиндрический, футеруется изнутри на месте монтажа кислотоупорными материалами.

Осадительные электроды выполнены из полимерных токопроводящих пластин, имеющих повышенную теплопроводность. Коронирующие электроды изготавливают из оцинкованного провода. Маркировка электрофильтра означает: электрофильтр вертикальный мокрый.

Степень улавливания диспергированного вещества при концентрации на входе от 3 до 5% в пересчете на 100%-ю серную кислоту и двухступенчатой очистке достигает 99,7%. Допускается работа электрофильтра под разрежением до 6 кПа. Температура очищаемого газа 20...45°С. При скорости газового потока 1 м/с пропускная способность составляет 6,8 м<sup>3</sup>/с, а сопротивление аппарата - около 100 Па. Площадь активного сечения 6,8 м<sup>2</sup>, площадь осаждения 218 м<sup>2</sup>. Активная длина поля (высота электродов) 3,5 м, диаметр аппарата 3,6 м.

## 5. Подбор и расчет электрофильтров

При выборе типа электрофильтра исходят из расхода, физико-химических параметров газа и дисперсной примеси, а также условий размещения фильтра. Основные рекомендации могут быть сведены к следующему. Мокрые аппараты имеют более высокие коэффициенты очистки из-за уменьшения вторичного уноса, однако им присущи и общие недостатки мокрых способов: необходимость обработки или удаления загрязненных стоков и шлама, коррозия металлических узлов аппаратов, усложнение эксплуатации очистного устройства и т.д. Поэтому для осаждения твердых примесей сухие аппараты предпочтительнее мокрых. Из конструкций сухих электрофильтров вертикальную компоновку применяют при недостатке производственной площади, низкой начальной запыленности и не слишком мелкодисперсной пыли, так как время пребывания в них намного меньше, чем в горизонтальных.

Осаждение частиц в электрофильтрах происходит под действием кулоновских или электрических сил на частицы. Эти силы заставляют частицы двигаться к осадительным электродам со скоростью, определяемой равенством электрической силы и силы гидродинамического сопротивления. Скорость осаждения возрастает вместе со скоростью миграции частиц, поэтому последняя должна иметь максимальное значение.

Модели улавливания зависят от характера течения газа в осадителе. В простейшем случае частицы переносятся ламинарным потоком. В этом случае скорость движения частиц к осадительному электроду можно рассчитать, используя законы классической механики и электростатики:

$F_e = qE$  - закон Кулона электростатического взаимодействия;

$$F_c = \frac{6\pi\mu r_q w}{1 + A \frac{\lambda}{r_q}} \quad \text{- закон сопротивления Стокса-Кенингема.}$$

Записывая  $F_e = F_c$  и решая уравнение, получаем для скорости миграции

$$w = \frac{qE}{6\pi\mu r_c} \left( 1 + A \frac{\lambda}{r_c} \right),$$

где  $q$  - заряд частицы;  $E$  - осаждающее поле;  $\mu$  - вязкость газа;  $r_c$  – радиус частицы;  $\lambda$  - средняя длина пробега молекул окружающего газа;  $A$  - безразмерный параметр, величина которого для атмосферного воздуха составляет  $\approx 0,86$ .

Полное улавливание происходит тогда, когда самая медленная частица имеет достаточно времени для того, чтобы пройти путь от коронирующего электрода до осадительного. Условия идеального ламинарного течения никогда не реализуются на практике, хотя к ним можно приблизиться в некоторых типах двухступенчатых осадителей. В одноступенчатых фильтрах, обычно используемых в промышленности, течение газа носит сложный турбулентный характер.

У малых частиц, представляющих наибольший интерес для электрофильтрации, скорость миграции много меньше скорости газа в осадителе. Движение частиц в этих условиях определяется в первую очередь полем турбулентного течения и лишь во вторую очередь - электрическими силами. Частицы осаждаются тогда, когда они приближаются к осадительному электроду и заносятся в ламинарный пограничный слой, где электрические силы вынуждают их двигаться к осадительной поверхности.

Степень очистки газов и другие эксплуатационные характеристики электрофильтра могут быть достоверно определены только при наличии точной информации об опыте эксплуатации подобных конструкций в аналогичных условиях. При отсутствии необходимых сведений (отсутствие аналога, сложность или дороговизна поиска и получения информации) можно определить степень очистки расчетом. Однако расчетных методик, дающих надежные результаты, нет. Поэтому информация, полученная расчетным путем, может использоваться как предварительная и оценочная.