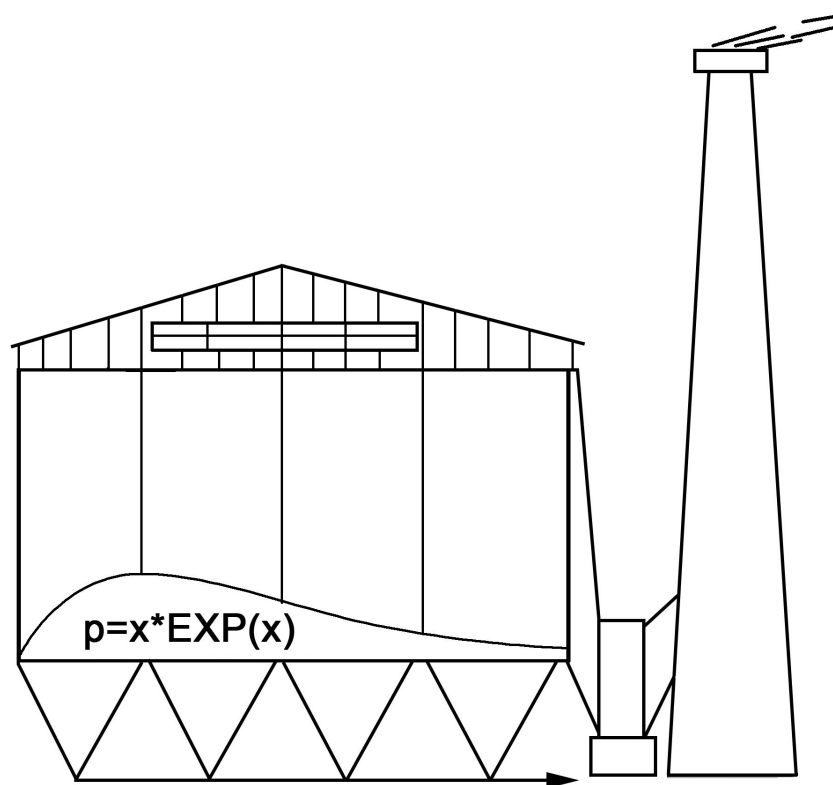


Ю.И.Санаев

ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ГАЗОВ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАМИ



Семибратово
«Кондор-Эко»
2009

Санаев Юрий Иванович

ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ГАЗОВ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАМИ

В книге кратко освещена история развития электрической очистки газов и приведены основные характеристики большинства отечественных электрофильтров.

Изложены основы электрической очистки газов, дан ретроспективный анализ изменения конструкций электрофильтров, приведены методики испытаний промышленных электрофильтров и некоторые методики исследования параметров электрофильтров в лабораторных условиях.

Дан краткий анализ методик расчета степени очистки газов электрофильтрами.

Рассмотрены методы снижения выбросов пыли из электрофильтров и контроль их работы.

В приложениях приведены ряд справочных сведений, таблицы, простейшие методы расчета степени очистки газов электрофильтрами.

Книга предназначена для работников промышленных предприятий, проектных и исследовательских институтов, занимающихся электрической очисткой газов, а также может быть использована студентами технических университетов и техникумов.

© Ю.И.Санаев, 2009
© «Кондор-Эко», 2009

Сдано в набор хх.хх.хххх. Подписано в печать хх.хх.хххх.
Формат 60х84 1/8. Бумага офсетная №1. 156 стр. Тираж 300 экз.
152101, п.Семибратово Ярославской обл., ул.Павлова, д.5

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Краткая справка о развитии электрической очистки газов и отечественных электрофильтрах	
Глава 1. Основные показатели работы электрофильтров.....	26
1.1. Степень очистки газов.....	26
1.2. Гидравлическое сопротивление электрофильтра.....	27
1.3. Производительность электрофильтров.....	27
1.4. Расход электроэнергии электрофильтрами.....	28
1.5. Стоимость электрофильтра.....	28
1.6. Стоимость очистки газов.....	28
1.7. Стоимость установки газоочистки.....	28
Глава 2. Начальные сведения об аэродисперсных системах.....	36
2.1. Начальные сведения о свойствах аэрозолей.....	36
2.2. Начальные сведения о газе.....	43
2.3. Интегральные свойства движущегося газа.....	44
Глава 3. Процессы улавливания пыли из газов в электрофильтре.....	47
3.1. Зарядка взвешенных частиц.....	47
3.2. Движение заряженных частиц в электрическом поле.....	53
3.3. Осаждение пыли на электродах.....	58
3.4. Удаление осевшей пыли с электродов.....	61
3.5. Транспортирование, утилизация и хранение условной пыли.....	62
Глава 4. Краткий обзор конструктивных решений основных узлов электрофильтров.....	63
4.1. Активная зона электрофильтра.....	63
4.2. Устройства удаления пыли, осажженной на электродах.....	66
4.3. Компоновка электродных систем в корпусе электрофильтра.....	66
4.4. Выбор количества полей при постоянной длине активной зоны электрофильтра.....	68
4.5. Устройства распределения газа в электрофильтре.....	69
4.6. О применении электрофильтров с увеличенной высотой электродной системы.....	70
4.7. О выборе межэлектродного расстояния в электрофильтрах.....	72
4.8. Интенсификация процесса пылеулавливания с помощью электростатического поля.....	74
Глава 5. Методики испытаний промышленных электрофильтров.....	75
5.1. Методика испытания электрофильтров котельных агрегатов.....	75
5.1.1. Задачи испытаний и общие указания по ним.....	75
5.1.2. Объем работ по испытаниям.....	76
5.1.3. Необходимые переносные приборы.....	77
5.2. Определение вспомогательных величин.....	77
5.3. Определение расхода газов расчетным путем.....	79
5.4. Определение расхода топлива.....	79
5.5. Определение степени очистки газов.....	80
5.6. Определение массы золы.....	80
5.7. Определение запыленности дымовых газов.....	81
5.8. Определение дополнительной затраты электроэнергии на золоулавливание.....	82
5.9. Измерение степени очистки газов по соотношению количества пыли, уловленной в бункерах электрофильтра.....	83
5.10. Устройство для оперативного измерения массовой концентрации аэрозолей.....	84
5.11. Методики проведения электрических измерений при пуско-наладке электрофильтров.....	86
5.12. Методы измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) пылей в электрофильтрах.....	87
Глава 6. Некоторые установки и методики исследования параметров электрофильтров в лабораторных условиях.....	91
6.1. Лабораторная установка для исследования улавливания пыли в электрофильтре.....	91
6.2. Измерение напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке электрофильтра.....	99
Глава 7. Обзор методов расчета степени очистки газов электрофильтрами.....	101
Глава 8. Повышение эффективности электрофильтров.....	109
8.1. Организационные работы по повышению эффективности электрофильтров.....	111
8.2. Снижение выбросов пыли из электрофильтров путем оптимизации режимов их работы (режимные методы).....	112
8.2.1. Оптимизация встряхивания осадительных электродов.....	113

8.2.2. Уточнение методики расчета режимов встряхивания электродов электрофильтров.....	114
8.2.3. Оптимизация встряхивания коронирующих электродов.....	116
8.2.4. О величине ускорений, требуемых для отряхивания пыли с электродов электрофильтров.....	118
8.2.5. О режиме работы изоляторов электрофильтров.....	118
8.2.6. Оптимизация распределения газов в электрофильтре.....	119
8.2.7. Оптимизация питания полей электрофильтра.....	119
8.3. Снижение выбросов пыли путем изменения параметров пылегазовой среды (технологические методы).....	120
8.3.1. Учет влияния неорганизованных присосов атмосферного воздуха пыли.....	123
8.3.2. Оптимизация температуры газов в электрофильтрах.....	123
8.3.3. Влияние содержания дисперсной фазы на степень очистки газов.....	123
8.3.4. Кондиционирование газов.....	124
8.4. Конструктивные и проектные методы снижения выбросов пыли.....	125
8.4.1. Оптимизация работы пылеудаления.....	125
8.4.2. Замена элементов коронирующих электродов.....	125
8.4.3. Замена активной зоны с увеличением площади осаждения.....	126
8.4.4. Выбор количества полей при неизменной общей длине электрофильтра (при реконструкции).....	126
8.4.5. Снижение суммарных выбросов из параллельно работающих электрофильтров, имеющих различную степень очистки газов.....	126
8.4.6. Коагулирующе-зарядные устройства.....	127
Глава 9. Контроль работы электрофильтров в процессе эксплуатации.....	128
9.1. Питание электрофильтров от высоковольтных источников.....	128
9.2. Вольтамперные характеристики электрофильтров.....	129
9.3. Влияние слоя пыли на электродах на вольтамперные характеристики электрофильтров.....	130
9.4. Влияние скорости газов в активном сечении электрофильтра на степень очистки газов.....	132
9.5. Влияние температуры очищаемых газов на степень их очистки в электрофильтре.....	134
9.6. Влияние размера улавливаемых частиц на степень очистки газов электрофильтром.....	135
9.7. Влияние содержания дисперсной фазы на степень очистки газов электрофильтром.....	135
9.8. Влияние влажности газов на степень очистки газов электрофильтром.....	136
9.9. Учет совместного влияния нескольких параметров на степень очистки газов электрофильтром....	136
Приложения	
Приложение 1. Перечень основных параметров, влияющих на степень очистки газов в электрофильтрах.....	138
Приложение 2. Элементарный расчет степени очистки газов электрофильтром.....	139
Приложение 3. Оценочный расчет влияния некоторых параметров электрофильтра ЭГА-2-56-12-6-4 влияющих на степень очистки газов.....	140
Приложение 4. Таблица значений функции $h = 1 - \exp(-\omega f)$	141
Приложение 5. Зависимость степени очистки газов в электрофильтре от параметра ωf	142
Приложение 6. Ориентировочные значения УЭС и эффективной скорости дрейфа некоторых пылей... ..	143
Приложение 7. Методика расчета интервалов регенерации осадительных электродов промышленных электрофильтров (упрощенный вариант).....	145
Приложение 8. Методика расчета интервалов регенерации коронирующих электродов промышленных электрофильтров (упрощенный вариант).....	146
Приложение 9. Формулы для расчета показателей назначения электрофильтров.....	147
Приложение 10. Пример расчета снижения выбросов пыли из параллельно работающих электрофильтров, имеющих различную степень очистки газов.....	149
Приложение 11. Экспресс-метод экспериментального определения степени очистки газов.....	150
Приложение 12. Влияние мощности коронного разряда на степень очистки газов в электрофильтрах... ..	151
Приложение 13. Справочные данные.....	152
Приложение 14. Единицы измерения электрических величин в различных системах, их размерности и переводные множители.....	153
Приложение 15. Пример расчета величины снижения выбросов пыли при оптимизации режима встряхивания осадительных электродов электрофильтра.....	155
Приложение 16. Выбор параметров электрофильтра с учетом времени пребывания газов в активной зоне электрофильтра.....	156
Список использованных источников.....	157

Введение

КРАТКАЯ СПРАВКА О РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАХ

1. Опыты с электрически заряженными частицами

Человечество прошло и продолжает проходить трудный путь от незнания к знанию, непрерывно заменяя на этом пути неполное и несовершенное знание все более полным и совершенным. Наука в целом, также как и любая ее отрасль, имеет историю. Каждый квалифицированный работник, исследователь должен быть осведомлен о том, что сделано до него в изучаемом им вопросе, критически оценить результаты, полученные предшественниками, т.е. в той или иной мере проделать работу историка. Работ, которые делались бы на пустом месте, нет. Каждое новое поколение начинает с того, на чем остановилось предыдущее, и передает сделанное им следующему поколению [1].

Сказанное в полной мере относится к электрическому улавливанию твердых и жидких частиц (электрогазоочистке).

Родоначальник греческой науки Фалес Милетский (около 624–574 гг. до н.э.) знал, что небольшие ниточки притягиваются к кусочку янтаря, если его перед этим натереть [1]. О притяжении мелких предметов (соломинок, листьев и т.п.) сообщали Теофраст (Теофраст) – основатель философской школы в г. Милет Плиний старший (I-й век), Солон (II-й век) [2].

Начало изучению электричества и магнетизма было положено книгой Уильяма Гильберта (1544–1603 гг.), врача английской королевы Елизаветы, «О магните, магнитных телах и большом магните – Земле» (1600 г.) Гильберт ввел термин «электричество». Он экспериментировал кроме янтаря с другими телами (алмаз, сапфир, аметист, хрусталь, сера, смола и др.). Во время своих экспериментов он заметил, что заряженные путем трения тела (сера, янтарь и др.) увлекают дым от погашенного огня.

Аналогичные исследования велись Бойлем (1675 г.).

Отто Фон Герике (1672 г.) построил электростатический генератор, который состоял из шара, изготовленного из серы и заряжаемого путем трения; он обнаружил способность остроконечных проводников притягивать заряженные тела.

В 1709 г. Фрэнсис Хэбби сообщил на заседании Королевского общества об открытии «электрического ветра».

Электрическими опытами занимался и Ньютон (1675 г.), который наблюдал электрическую пляску кусочков бумаги, помещенных под стеклом, положенным на металлическое кольцо. При натирании стекла бумажки притягивались к нему, затем отскакивали, вновь притягивались и т.д. Позднее он рассматривал явление свечения короны и электрического ветра (1718 г.), но безотносительно к свойствам частиц.

Стефан Грэй (1670–1736 гг.), член Лондонского королевского общества, в 1729 г. открыл электропроводность тел и показал, что для сохранения электричества тело должно быть изолировано [2].

Французский естествоиспытатель Шарль Дюфе (1698–1739 гг.) создал первую теорию электрических явлений. Он открыл два рода электричества («смоляное» и «стеклянное»), а также установил условия их притяжения и отталкивания.

Открытие и усовершенствование электрических машин, изобретение лейденской банки (1745–1746 гг.) возбудили массовый интерес к электрическим опытам, которые проводились в светских салонах и королевских дворцах, на заседаниях ученых обществ и в частных домах. За Европой последовали Америка и Россия.

Франклин, Рихман, Ломоносов, Эпинус внесли существенный вклад в науку об электричестве.

Рихман пытался «взвесить» электрическую силу. Эта идея в своем развитии привела к изобретению абсолютного электрометра. С помощью своего указателя Рихман открыл существование электрического поля вокруг заряженного тела, напряженность которого убывает с увеличением расстояния от тела «по некоторому, пока еще не известному закону».

В течение XVIII столетия появляется ряд сообщений о явлениях электростатики, наиболее примечательными из которых явились исследования Бенеджамина Франклина (1747 г.). Б. Франклин был одним из основателей Соединенных Штатов Америки, он был также основателем науки этого государства, учредителем одного из первых университетов.

Он создал унитарную теорию электрических явлений, доказал электрическую природу молнии, является автором идеи громоотвода.

Независимо от Франклина М.В. Ломоносов начал свои «электрические наблюдения». Он установил электрическое состояние атмосферы в отсутствии грома и молнии. Это состояние он связывал с восходящими и нисходящими потоками воздуха, которые всегда сопровождают грозовые тучи. Этот подход и по настоящее время считается правильным, но сам механизм возникновения заряда облака оказался настолько плохо поддающимся изучению, что до сих пор он окончательно не установлен [3].

Можно констатировать, что Франклин предвосхитил электронную теорию, а Рихман и Ломоносов предвосхитили теорию поля Фарадея-Максвелла [1]. Отметим, что первая попытка математического описания электрических и магнитных явлений была сделана в России академиком Петербургской академии наук Эпинусом в 1759 г.

Французский военный инженер, а с 1781 г. член Парижской Академии наук Шарль Огюст Кулон (1736–1806 гг.), в 1777 г. исследовал кручение волос, шелковых и металлических нитей. Результатом этих исследований явилось исследование законов кручения. В 1784 г. Кулон сконструировал чувствительный прибор – крутильные весы. С помощью этих весов он открыл законы электрических и магнитных взаимодействий. Его опыты и выводы из них опубликованы им в 1782–1785 гг. в семи мемуарах. В первом мемуаре он исследует отталкивающие силы электрических зарядов и устанавливает, что они обратнопропорциональны квадратам расстояний. В 1820 г. Ханс Кристиан Эрстед установил магнитное действие электрического тока. Далее Майкл Фарадей, исходивший из основной идеи о взаимной связи явлений природы, в 1831 г. получил электрический ток путем перемещения магнита. Другая идея Майкла Фарадея заключалась в признании роли промежуточной среды (теории близкодействия).

Открытия Фарадея на практике использовались очень широко, но к ним, однако же, относились свысока, иронически сомневались – а можно ли под его теорию подвести математическую базу? Роберт Милликэн писал: «Когда Фарадей подтвердил свои гениальные физические идеи гениальнейшими открытиями в области электромагнетизма, он этим не завоевал своим идеям даже минимального признания. Формалисты школы Ампера-Вебера ... с тайным, а иногда и с явным презрением смотрели на «грубые материальные» силовые линии и трубки, порожденные плебейской фантазией переплетчика и лабораторного сторожа Фарадея». Вот почему молодой Максвелл имел все основания заявить: «Современное состояние учения об электричестве представляется особенно неблагоприятным для теоретической разработки».

В этот решающий момент Максвелл и начал сражение за теорию Фарадея. Что же он сделал? Образно Милликэн определил это так: «облек плебейски обнаженное тело фарадеевских представлений в аристократические одежды математики». Известный советский физик Т.П. Кравец это же самое выразил в других словах: «Если мы теперь освоились с системой воззрения Фарадея, если его *электромагнитное поле* стало одним из наших основных знаний, если его система превратилась в стройную теорию и получила адекватное математическое выражение, то это заслуга Максвелла» [18].

Уравнения Максвелла являются релятивистскими и содержат в себе все электрические и магнитные явления. На основании теории Максвелла были предсказаны токи смещения, электромагнитные волны, создана (им же) электромагнитная теория света. При изучении электрических полей в электрофилт্রে также применяются уравнения Максвелла.

Первый наглядный показ электростатического осаждения приписывается Гольфельду, который в 1824 г. продемонстрировал исчезновение тумана из стеклянного сосуда, в котором был помещен наконечник, имеющий высокий электрический потенциал. Позже в XIX в. стало известно об аналогичных опытах, продемонстрированных другими исследованиями; одним из таких примеров является опыт с осаждением табачного дыма в стеклянном цилиндре высотой 450 мм и диаметром 230 мм, показанный Житаром примерно через 26 лет после научного доклада Гольфельда.

В 1930 г. в СССР был создан Московский энергетический институт (МЭИ) [19]. На кафедре «Техника высоких напряжений» проводятся экспериментальные и теоретические исследования сильных электрических полей и их применение для различных технологических процессов.

2. Принцип действия электрофилтров

Электрофилтр – пылеуловитель, в котором улавливание частиц пыли или жидкости осуществляется с помощью электрических сил. Частицы пыли получают (как правило) отрицательный электрический заряд в поле коронного разряда и движутся под действием электрического поля к заземленным электродам, оседают на них и после регенерации электродов собираются в бункерах. Небольшая часть пыли, примерно 0,5–1 % от общего количества, приобретает положительный заряд и осаждается на коронирующих электродах и также периодически удаляется.

Характер распределения количества уловленной пыли по длине осадительного электрода выражается (за исключением начальной части) кривой, близкой к экспоненте (рис. 1).

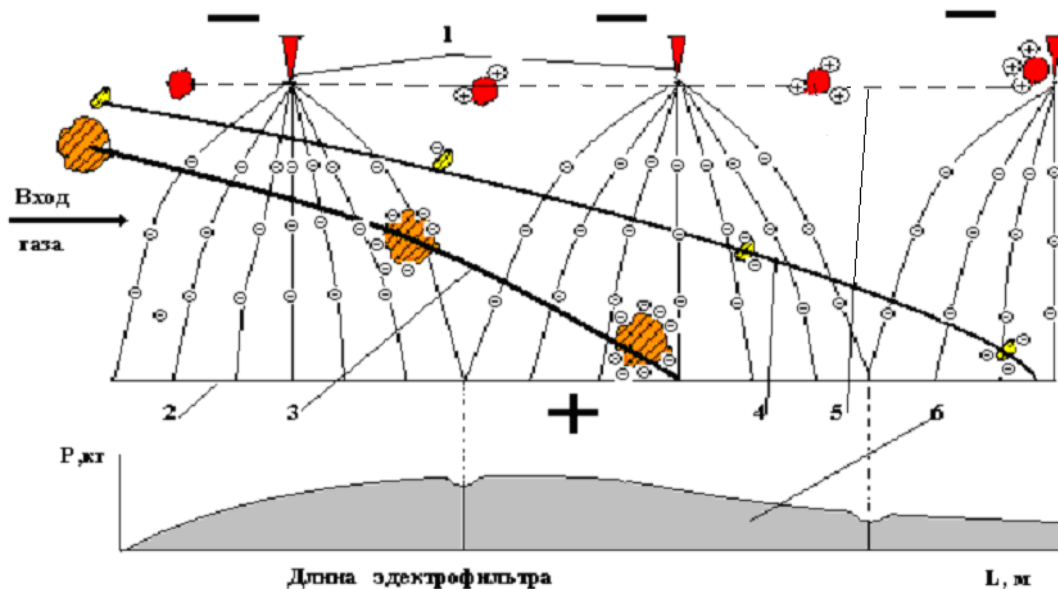


Рис. 1. Упрощенная схема зарядки и осаждения частиц пыли в электрофильтре
 1 – иглы коронирующих элементов; 2 – осадительный электрод; 3, 4 – траектория движения крупной (3) и мелкой (4) отрицательно заряженных частиц пыли; 5 – траектория положительно заряженной частицы;
 б – характер распределения пыли (P , кг) по длине осадительного электрода (L /м)

Для создания электрического поля в электрофильтрах применяются повысительно-выпрямительные агрегаты напряжением 80 кВ и выше с системами регулирования, обеспечивающими требуемый режим питания.

3. Область применения электрофильтров

Среди других способов обеспыливания газов электрический является наиболее эффективным, а электрофильтр – самым универсальным аппаратом, т.к. сила, обеспечивающая улавливание, приложена непосредственно к частице, несущей электрический заряд.

Необходимо, однако, особо отметить, что универсальность принципа действия электрофильтров ни в коей мере нельзя относить к конструкции аппарата, которая для успешной реализации возможностей электрогазоочистки, должна быть индивидуальной, применительно к конкретным условиям его эксплуатации.

Другими словами, конструкции электрофильтров, устанавливаемых в различных отраслях промышленности, имеют существенные отличия. А аппараты, устанавливаемые даже в одной отрасли промышленности, например, в теплоэнергетике, должны иметь индивидуальные особенности, вплоть до конструктивных отличий, обусловленных проектными, технологическими и режимными особенностями их работы.

Основные преимущества электрической очистки газов следующие:

- широкий диапазон производительности – от нескольких $\text{м}^3/\text{час}$ до миллионов $\text{м}^3/\text{час}$;
- степень очистки газов – до 99,9 % и выше;
- гидравлическое сопротивление – не более 0,2 кПа (является основной причиной низких эксплуатационных затрат);
- электрофильтры могут улавливать сухие частицы, капли жидкости и частицы тумана;
- в электрофильтрах улавливаются частицы размером от 0,01 мкм (вирусы, табачный дым) до десятков микрон.

Преимущественная и экономически более целесообразная область применения электрофильтров – очистка больших объемов газов, отходящих от технологических агрегатов большой мощности, однако, в ряде случаев, применение электрофильтров может оказаться целесообразным и при очистке относительно малых объемов газов.

Особенностью электрофильтров является высокая чувствительность процессов электрической очистки газов к неудовлетворительной центровке электродной системы и отклонениям технологического режима от проектного, а также к механическим дефектам внутреннего оборудования, которые могут являться результатом недостаточно тщательного проведения монтажных работ или некачественного обслуживания при эксплуатации.

Применение электрофильтров ограничено, если очищаемый газ представляет собой взрывоопасную смесь или такая смесь может образоваться в ходе процесса в результате отклонения от нормального технологического режима, так как при работе электрофильтра существует вероятность возникновения искровых разрядов. В исключительных случаях электрофильтры могут устанавливаться в условиях возможного образования взрывоопасных сред, однако при этом принимаются особые меры предосторожности, включающие спе-

циальные конструктивные решения, автоматическое выключение электропитания при возникновении взрывоопасных ситуаций и др.

В тех случаях, когда удельное электрическое сопротивление осажденного слоя пыли (УЭС) чрезмерно высоко, применение электрофильтров требует использования специальных мер по снижению УЭС пыли, что удорожает стоимость пылеулавливающей установки.

В зависимости от вида улавливаемых частиц электрофильтры подразделяются на сухие (пластинчатые горизонтальные и вертикальные) и мокрые. Осадительные электроды мокрых электрофильтров представляют собой трубы с различной формой сечения. Они изготавливаются для агрессивных и не агрессивных газов, имеющих различную температуру.

В сухих электрофильтрах очистка осадительных электродов от пыли осуществляется путем их встряхивания с помощью специальных механизмов.

В мокрых электрофильтрах удаление пыли производится с помощью жидкостей (слабая кислота, вода и др.).

Для обеспечения равномерного распределения очищаемого газа по сечению электрофильтра их корпуса снабжаются специальными газораспределительными решетками и газонаправляющими устройствами, определение параметров которых производится на моделях.

Корпуса электрофильтров рассчитаны на использование в районах определенной сейсмичности. Для районов повышенной сейсмичности разрабатываются специальные корпуса. В районах с умеренным климатом электрофильтры обычно размещают на открытом воздухе, а при необходимости защиты от атмосферных осадков – под навесом. Климатическое исполнение аппаратов и сейсмичность района установки указываются в описании конкретных типов электрофильтров.

Производительность конкретного типоразмера электрофильтра по очищаемому газу не является величиной постоянной. Ее величина зависит от скорости газа в электрофильтре, которая определяется физико-химическими свойствами пылегазового потока, проектными решениями и технологическими особенностями пылевыведяющего агрегата.

Для ориентировочного сравнения аппаратов в справочной литературе приводится производительность электрофильтров при условно принятой скорости газов в активном сечении электрофильтра равной, например, 1 м/с (фактическая скорость может существенно отличаться от этой величины в большую или меньшую сторону).

Подвод электрического тока от повысительно-выпрямительных агрегатов осуществляется с помощью высоковольтных кабелей или шин (при установке источников питания на крышке электрофильтра).

Степень очистки газов электрофильтрами зависит от многих факторов (физико-химических свойств пылегазового потока, скорости и времени пребывания газа в электрофильтре, конструкции электродов, режимов питания и встряхивания электродов, качества газораспределения и др.).

Режимы электропитания полей и встряхивания электродов необходимо поддерживать на оптимальных уровнях, учитывающих все особенности работы электрофильтра.

Качество газораспределения обеспечивается на стадии проектирования установки электрогазоочистки путем продувки физических моделей, а при необходимости инструментальным обследованием непосредственно промышленного электрофильтра и внесением требуемых изменений в конструкции газораспределительных устройств.

Степень очистки газов электрофильтром неразрывно связана с технологическими и режимными условиями его работы. Величина степени очистки газов электрофильтров, требуемый типоразмер электрофильтра, ряд режимов его работы определяются фирмой-разработчиком аппарата по специально разработанным методикам.

Методика, разработанная кафедрой ТВН Московского энергетического института и Семибратовским филиалом НИИОГАЗ с использованием баз данных НИИОГАЗ, ВТИ им. Дзержинского и «Гипрогазоочистки» учитывает распределение электрического поля, зарядку и движение частиц в межэлектродном промежутке в поле коронного разряда, а также профили концентрации пыли по сечению электрофильтра и степень неравномерности распределения газа в аппарате. Работы, выполненные в СФ НИИОГАЗ, позволили также учесть унос пыли в процессе осаждения пыли и при встряхивании электродов, и унос через неактивные и полуактивные зоны. В методику постоянно вносятся изменения, отслеживающие конструктивное усовершенствование в новых аппаратах.

Для того чтобы правильно выбранный электрофильтр обеспечил проектные показатели, холдинговая группа «Кондор Эко – СФ НИИОГАЗ» обеспечивает его инженерное сопровождение, начиная от разработки проекта установки и изготовления аппарата и кончая монтажными и пуско-наладочными работами на объекте установки, а при необходимости и надзор при эксплуатации.

Обеспечение качественного монтажа и проведения пуско-наладочных работ под надзором специалистов позволяет гарантированно обеспечивать требуемые режимы пуска и останова электрофильтра, режимы питания и регенерации электродов и др. и в итоге получать проектное значение выбросов пыли из аппарата.

4. Первые промышленные электрофильтры

Успешное применение принципа электростатического осаждения пыли в промышленности относится к первым годам XX в. Это связано с именами Лоджа в Англии, Котрелла в США и Меллера в Германии. Лодж экспериментировал в области электростатического осаждения с 1880 г. и указывал на возможности, связанные с промышленным использованием данного метода, в научном докладе, опубликованном в журнале «НЕЙЧЕ» в 1883 г. [2].

Вместе с двумя другими исследователями Уолкерм и Хадчингсом он установил первый электрофильтр промышленного значения на свинцовоплавильном заводе в г. Багилте в Северном Уэльсе. Данная установка оказалась неудачной по двум основным причинам: из-за примитивного способа получения энергии высокого напряжения, а также потому, что частицы дыма свинцовоплавильных печей обладали высоким удельным электрическим сопротивлением, а размер их очень мал.

Разработка технологии переменного тока и электрического оборудования способствовала появлению новых источников постоянного тока высокого напряжения, сочетающих в себе трансформаторы и выпрямители. Лодж запатентовал ртутный выпрямитель для целей электростатического осаждения в 1903 г.

Сочетание трансформатора переменного тока, механического выпрямителя и коронирующего электрода, покрытого хлопчатобумажной изоляцией, привело к успешному созданию электрофильтра, способного в лабораторных условиях удалять туман серной кислоты в количестве нескольких м³/час.

Далее электрофильтр был применен в промышленных условиях: сначала на пороховом заводе в Пайноле (рядом с Беркли), а затем в г. Селби на плавильном заводе, где остро стояла проблема борьбы с загрязнением воздуха [2].

Следующая установка была смонтирована на свинцовоплавильном заводе г. Балаклала, где объем очищаемых газов составлял 425 тыс. м³/час. Газы содержали пары свинца и цинка. По утверждению Лоджа и др. это была трудная задача. Однако новые источники постоянного тока высокого напряжения позволили установке работать со степенью очистки от 80 до 90 %. В дальнейшем эта установка очищала до 1,7 млн. м³/час газа при температуре 400–500°С. В ней впервые были использованы коронирующие электроды из тонкой проволоки, работающие под напряжением 45 кВ; эта установка работала в течение 45 лет.

Разработка конструкций электрофильтров в этот период велась в основном эмпирически. Количество патентов, защищающих конструкции электрофильтров, уже тогда составляло более тысячи.

Первый электрофильтр в СССР изготовлен в 1925 г. для улавливания окиси цинка на заводе «Красный выборжец» в Ленинграде. В 1926 г. был спроектирован и сооружен электрофильтр на заводе «Победа рабочих» в Ярославле. К 1930 г. в эксплуатации находилось всего 6 газоочистных установок с электрофильтрами, причем на 5 из них было установлено импортное оборудование.

5. Создание в СССР треста по очистке промышленных газов

Краткая характеристика отечественных электрофильтров.

В 1932 г. на базе конторы по электрофильтрам был создан трест электрической, химической и механической очистки промышленных газов – трест «Газоочистка», в состав которого вошли институты НИИОГАЗ и «Гипрогазоочистка». Особое внимание в работе треста было уделено проектированию и строительству электрофильтров. В 1941 г. в различных отраслях промышленности работало 167 газоочистных установок с 548 отечественными электрофильтрами. (В настоящее время их количество составляет примерно в десять раз больше).

Конструкцию электрофильтра определяют в основном технологические и проектные условия его работы: состав и свойства очищаемых газов и улавливаемых взвешенных частиц, требуемая величина выбросов из электрофильтра и условия его размещения.

Все электрофильтры по условиям зарядки и осаждения можно разделить на две основные группы: однозонные (зарядка и осаждение частиц происходят в одной конструктивной зоне) и двухзонные (в первой зоне происходит зарядка, во второй – осаждение частиц). Кроме этого существуют группы комбинированных аппаратов (например, циклон + электрофильтр, электрофильтр + фильтр, сочетания электрофильтров с мокрыми пылеуловителями и др.). Эти аппараты могут изготавливаться в одном или отдельных корпусах (рис. 2).

Электрофильтры по форме осадительных электродов можно классифицировать на два основных вида: пластинчатые и трубчатые. Подавляющее количество пластинчатых аппаратов – сухие, а мокрых – трубчатые. Однако известны пластинчатые мокрые и трубчатые сухие, но их количество ограничено несколькими единицами.

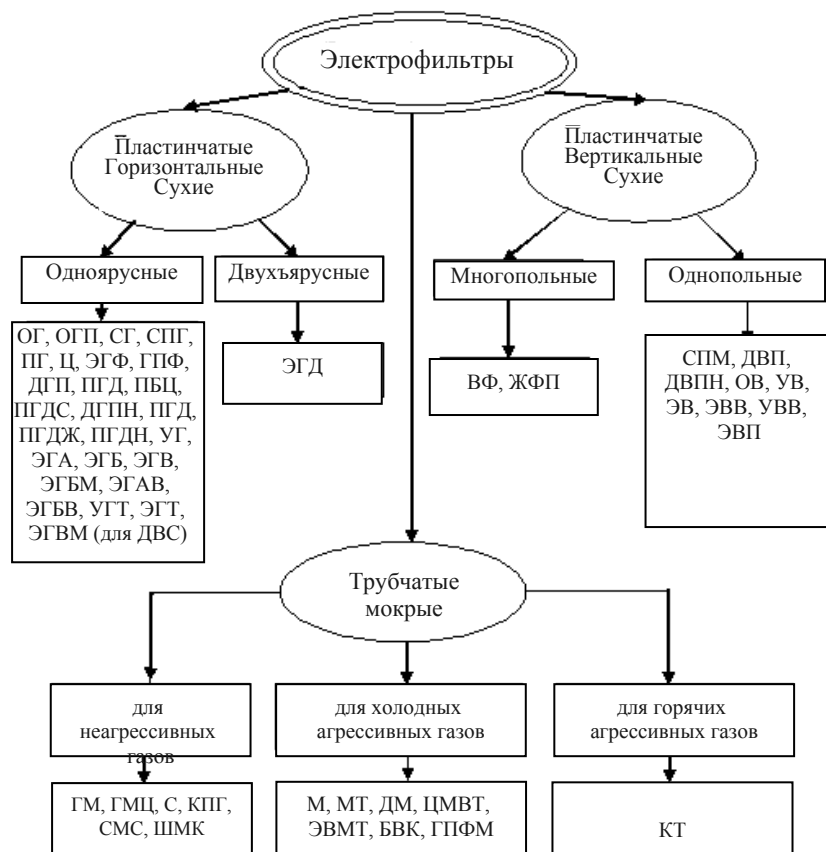


Рис. 2. Классификация отечественных электрофильтров по конструктивным и технологическим признакам

Пластинчатые электрофильтры разделяют по направлению движения газов в активной зоне на горизонтальные и вертикальные. Основное количество пластинчатых горизонтальных сухих электрофильтров – одноярусные. Эти аппараты имеют целый ряд разновидностей. Двухъярусные электрофильтры позволяют получить увеличение активной зоны электрофильтра в стесненных условиях.

Пластинчатые вертикальные электрофильтры преимущественно однопольные.

Фосфорные электрофильтры (ВФ, ЖФП) имеют два последовательно соединенных поля.

Трубчатые мокрые электрофильтры подразделяются на аппараты для неагрессивных и агрессивных газов. Последние могут быть предназначены для холодных и горячих газов.

Электрофильтры цементные горизонтальные типа Ц

Для очистки газов от пыли цементных и шламовых сушилок, мельниц и вращающихся печей применялись электрофильтры типа Ц (цементные горизонтальные). Эти аппараты монтировались в стальных или железобетонных корпусах. При скорости газов 1 м/с степень очистки газов составляла 95–97 %. Осадительные электроды электрофильтров типа Ц были выполнены из листовой волнистой стали. Шаг волны осадительного электрода не был согласован с шагом коронирующих элементов. Коронирующие электроды состояли из рам с натянутыми в них коронирующими элементами спиральной формы из нихромовой проволоки. Встряхивание электродов – механическое с помощью вращающихся молотков.

Техническая характеристика электрофильтров типа Ц

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м	Масса ЭФ общая, т
Ц-8-2	8	136	560	2,4x2	11,2x2,81x9,445	33,58
Ц-23-2	23	408	1620	2,5x2	11,2x7,96x9,445	71,1
Ц-8-3	8	204	840	2,4x3	15,23x3,81x9,455	48,26
Ц-11,5-3	11,5	306	1215	2,5x3	15,23x4,05x9,455	56,4
Ц-12-3	23	612	2430	2,5x3	15,23x7,96x9,455	100,4

В вертикальных электрофильтрах типа ЦВ осадительные электроды собраны из свободновисящих стальных прутков диаметром 10 мм. Коронирующие элементы подвешены в раме и натянуты грузами. Встряхивание электродов механическое молотковое.

Для очистки газов с большой запыленностью и при высоких температурах в цветной металлургии и химической промышленности использовались электрофильтры типа ГК (горизонтальные в кирпичном корпусе). Осадительные электроды этих электрофильтров представляли собой рамы, изготовленные из уголкового и полосовой стали с натянутой в них сеткой, а коронирующие электроды – из нихромовой проволоки диаметром 2 мм. Встряхивание электродов – механическое:

- осадительных – путем подъема-сброса пластин;
- коронирующих – через штангу по промежуточной раме.

Изготавливались также специальные электрофильтры:

- Типа У – для очистки газов от угольных частиц сушильных барабанов угольных мельниц;
- Типа С и СУ – для очистки генераторных газов от смолы и пыли.

В период до 1941 г. изготовление газоочистного оборудования производилось путем размещения заказов треста «Газоочистка» на заводах, имеющих различные технические возможности и технологическое оборудование, что тормозило развитие производства газоочистного оборудования.

Во время Великой Отечественной войны производство газоочистного оборудования было приостановлено.

6. Совершенствование и производство электрофильтров в послевоенный период

Электрофильтры типа ДГП и ДГПН

(Дымовые горизонтальные с пластинчатыми осадительными электродами и проволочными коронирующими электродами, Н – наружной установки)

Эти аппараты стали следующим этапом совершенствования электрофильтров. В них были применены карманные осадительные электроды и пружинно-кулачковые механизмы встряхивания. Аппараты предназначались для улавливания пыли из газов в различных отраслях промышленности. Они имели площадь активного сечения от 17 до 84 м² при количестве электрических полей 2–3. Междуэлектродное расстояние 325 мм.

Коронирующие элементы выполнены из проволоки специального проката, штыкового сечения размером 4x4 мм.

Техническая характеристика электрофильтров типа ДГП и ДГПН

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м	Масса ЭФ общая/оборуд., т
ДГПН-17,5-2	17,5	800	2100	3,32x2	11,0x3,95x11,5	85,8/60,6
ДГПН-84-2	84	3800	10800	3,32x2	16,9x11,0x11,5	326,9/243,9
ДГПН-32-3	32	2130	5670	3,32x3	16,05x6,47x12,335	185,5/135,5
ДГПН-35-3	35	2330	6300	3,32x3	16,05x7,18x12,335	229,5/166,5
ДГПН-42-3	42	2797	7560	3,32x3	16,05x8,48x12,335	254,2/190,7
ДГПН-55-3	55,8	3720	10080	3,32x3	16,05x11,28x12,335	310,5/32
ДГПН-42-2	42,4	1900	5040	3,32x2	11,0x8,48x12,335	-

Осадительные электроды этих электрофильтров отражали имеющееся в то время априорное представление о движении отряхиваемой пыли в электрофильтре. Предполагалось, что пыль может двигаться внутри осадительного электрода, минуя газовый поток. Электроды изготавливались из пластин с наклонными отогнутыми наружу просечками – «карманами». Коронирующие элементы изготавливались из стали штыкового профиля «бубновки» сечением 4x4 мм и натягивались в трубчатых рамах. Отряхивание пыли производилось путем соударения соседних осадительных электродов, а коронирующие электроды отряхивались с помощью молотков. Проектная степень очистки этих электрофильтров составляла 92–98 %.

Электрофильтры типа ПГД

(Пылевые, горизонтальные, дымовые)

Дальнейшее совершенствование электродных систем шло также по пути создания условий, предупреждающих развевание пыли при встряхивании. Были созданы осадительные электроды с частично закрытым желобчатым профилем. Предполагалось, что пыль после встряхивания будет «стекать» по наклонным желобам, имеющим наклон к вертикали, равный 7 градусам, минуя газовый поток. Коронирующие элементы – штыкового сечения, размером 4x4 мм.

С применением электродов желобчатого профиля были разработаны электрофильтры типа ПГД с активным сечением 20, 38, 50 м², с количеством электрических полей 2, 3, 4 м и производительностью (при скорости газа 2 м/с) 144–360 тыс. м³/час. Эти электрофильтры были поставлены на Ермаковскую,

Новосибирскую, Криворожскую и др. ГРЭС, комбинаты «Магнезит», «Фосфорит», Ачинский глиноземный, алюминиевые заводы и другие предприятия. В дальнейшем на их базе в процессе усовершенствования были разработаны электрофильтры ПГДС с С-образными осадительными и игольчатыми коронирующими элементами.

Техническая характеристика электрофильтров типа ПГД

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м	Масса ЭФ общая/оборуд., т
ПГД-2-20	20	920	1930	2x2,5	10,8x5,15x15,5	≈ 103 /36,2
ПГД-3-38	38	2388	5610	3x2,5	15,71x6,8x15,5	148,6/85,7
ПГД-4-38	38	3184	7480	4x2,5	20,08x6,8x15,5	185,3/105,9
ПГД-3-50	50	3210	7860	3x2,5	16,2x10,0x15,5	192,8/117,6
ПГД-4-50	50	4280	10480	4x2,5	19,2x10x15,5	245,6/151,4

Электрофильтры типа ПГДС

(Пылевые, горизонтальные, дымовые, с С-образными осадительными электродами)

Осадительные электроды, примененные в электрофильтрах ДГПН и ПГД, имели закрытый и полузакрытый профиль, предназначенный для удаления пыли с осадительных электродов, минуя газовый поток. Однако, как показал опыт эксплуатации этих аппаратов, внутренние полости этих электродов постепенно заполнялись прилипшей пылью, и транспортирование пыли в них отсутствовало, а падение пыли происходило в межэлектродном промежутке и сопровождалось, естественно, повышенным уносом ее при встряхивании.

В то же время выступающие кромки осадительных электродов резко снижали величину пробивных напряжений и, следовательно, степень очистки газов. При дальнейшем совершенствовании формы осадительных электродов с целью снижения их металлоемкости и улучшения электрических и аэродинамических характеристик были разработаны осадительные элементы шириной 175 и 350 мм. Производство этих элементов на заводе «Газоочистка» было освоено в 1965-1966 г. Для коронирующих электродов был разработан ряд разновидностей элементов с фиксированными точками коронирования.

Техническая характеристика электрофильтров типа ПГДС

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м
ПГДС-2-24	24	1290	3510	2x2,5	12,3x5,35x13,42
ПГДС-3-24	24	1935	5260	3x2,5	17,35x5,35x13,43
ПГДС-3-38	38	2460	6190	3x2,5	14 x7x15,5
ПГДС-4-38	38	3300	8950	4x2,53	19,73x7x15,5x
ПГДС-3-50	50	3570	8980	3x2,5	14,88x10,6x14,28
ПГДС-4-50	50	4760	11970	4x2,5	15,02x10,6x14,28
ПГДС-3-70	70	4860	12000	3x2,5	15,32x11,77x14,2
ПГДС-4-70	70	6500	16000	4x2,5	19,72x11,77x14,87

Электрофильтры типа УГ

(Унифицированные, горизонтальные)

При имеющемся многообразии типов электрофильтров – Ц, ГП, ГПИ, ПГП, ДГПН, ПГДС и др. типы были значительные трудности как при проектировании газоочистных установок, так и при изготовлении электрофильтров.

Для выполнения этой задачи было принято решение о разработке типоразмерного ряда унифицированных электрофильтров, которые могли бы быть применены на всех вновь строящихся предприятиях и использованы при модернизации и ремонте действующих электрофильтров. На основании опыта, накопленного в процессе эксплуатации электрофильтров типа ПГДС, с целью улучшения основных параметров, сокращения числа типов электрофильтров, возможности блочной поставки и сборки основных узлов, а также сокращения сроков монтажа институтами «Гипрогазоочистка», НИИОГАЗ, СФ НИИОГАЗ были определены необходимые типоразмеры и разработаны технические проекты на электрофильтры типа УГ. Электрофильтры типа УГ подразделялись на три габарита:

– первый габарит имел активную высоту электродов 4,2 м; площадь активного сечения 10 и 15 м², количество электрических полей 2 и 3;

– второй габарит имел активную высоту осадительных электродов 7,5 м; площадь активного сечения 26, 37, 53 и 74 м², количество электрических полей 3 и 4;

– третий габарит имел активную высоту осадительных электродов 12,2 м, количество электрических полей 3 и 4. Эти электрофильтры имели 22 типоразмера сечением от 88 до 265 м².

Отличительные элементы электрофильтров УГ были следующие:

– осадительный электрод набирался из С-образных элементов шириной 350 мм с нижним молотковым встряхиванием;

– коронирующий электрод состоял из трубчатых рам с натянутыми ленточно-игольчатыми элементами, молотковым встряхиванием от вращающегося горизонтального вала, вращение которого осуществлялось через цевочную передачу от вертикального вала;

– межэлектродный шаг был принят 275 мм.

Первые электрофильтры УГ были изготовлены для Каховской производственной базы в 1968 г.

Электрофильтрами типа УГ были оснащены свыше 250 промышленных объектов. Среди них: Кураховская, Запорожская, Углегорская, Ладыжинская, Эстонская, Трипольская и др. ГРЭС, Новоліпецкий, Магнитогорский, Челябинский, Орско-Халиловский, Карагандинский и другие металлургические комбинаты; Рыбницкий, Карагандинский, Душанбинский, Ставропольский, Пунане-Кундский и др. цементные заводы.

Электрофильтры типа УГ были поставлены в Пакистан, Вьетнам, Иран, Египет, Ирак, Турцию, Нигерию, Болгарию, Румынию, Югославию, Кубу, Марокко, Венгрию, Польшу и другие страны.

Всего до 1982 г. было изготовлено более 750 единиц электрофильтров типа УГ. В этот же период были разработаны и освоены в производстве аппараты:

– высокотемпературные электрофильтры типа УГТ (унифицированные, горизонтальные, температурные), предназначенные для очистки газов с температурой до 425⁰С;

– вертикальные электрофильтры типа УВ (унифицированные, вертикальные);

– электрофильтры для очистки фосфоросодержащих газов;

– электрофильтры типа СГ (сажевые горизонтальные для предприятий технического углерода);

– электрофильтры типа С (смоляные) и ПГ (пылевые, газогенераторные для коксохимической промышленности).

Техническая характеристика электрофильтров типа УГ

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаджения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м	Масса ЭФ общая/оборуд., т
УГ1-2-10	10	420		2,51x2	9,6x3,0x12,3	42,7/18,9
УГ1-3-10	10	630		2,51x3	14,1x3,0x12,3	63,2/27,7
УГ1-2-15	15	630		2,51x2	9,6x4,5x12,3	51,2/24,4
УГ1-3-15	15	940		2,51x3	14,1x4,5x12,3	75,4/36,6
УГ2-2-26	26	1690		2,51x2	14,1x4,5x15,4	
УГ2-3-26	26	2250		2,51x3	18,6x4,5x15,6	100,5/50,3
УГ2-3-37	37	2360		2,51x2	14,1x6,0x15,4	119,9/63,4
УГ2-4-37	37	3150		2,51x3	18,6x6,0x15,4	156,5/83,8
УГ2-3-53	53	3370		2,51x2	14,1x9,0x15,4	173,4/91,3
УГ2-4-53	53	4500		2,51x3	18,6x9,0x15,4	226,8/121,3
УГ2-3-74	74	4700		2,51x2	14,1x12,0x15,4	220,8/122,6
УГ2-4-74	74	6300		2,51x3	18,6x12,0x15,4	288,6/161,9
УГ2-3-88	88	9200		3,95x3	18,8x9,0x21,8	
УГ2-4-88	88	12300		3,95x4	24,8x9,0x21,8	
УГ2-3-115	115	12100		3,95x2	18,8x12x21,8	
УГ2-4-115	115	1600		3,95x4	24,8x12x21,8	
УГ3-3-177	177	18400		3,95x3	18,8x18,0x21,8	553,3/332,1
УГ3-4-177	177	24600		3,95x4	24,8x18,0x21,8	686,8/359,0
УГ3-3-230	230	24200		3,95x3	18,8x24,0x21,8	744,3/445,5
УГ3-4-230	230	32200		3,95x4	24,8x24,0x21,8	968,3/581,0
УГ3-3-265	265	27600		3,95x3	18,8x27,0x21,8	
УГ3-4-265	265	36900		3,95x4	24,8x27,0x21,8	896,0/556,2

Электрофильтры типа УГМ, УГ1М

(Электрофильтры УГМ, УГ1М: У – унифицированный; Г – горизонтальный; М – малогабаритный; 1 – габарит аппарата)

Цифры после букв для УГМ: первая – количество полей; вторая – площадь активного сечения, м²;

1 или II – исполнение корпуса; для УГ1М: первая – количество полей; вторая – длина электрического поля; третья – площадь активного сечения, м²; I или II – исполнение корпуса

Техническая характеристика электрофильтров типа УГМ, УГ1М

Типоразмер	Площадь	Площадь	зоны, м	размеры, м	Масса, т	
					Общая	Оборудования
УГМ-2-3,5	3,5	190	5	7,2x3,65x8,305	15,9	6,9
УГМ-2-7	7	320	5	7,2x4,5x9,43	29	11,2
УГ1М-2x2,5-10	10	462	5	31,2	31,2	12,2
УГ1М-2x2,5-15	15	672	5	7,2x6,0x11,325	40,5	16,4
УГ1М-2x4x10	10	726	8	10,1x4,5x10,5	45,2	17,4
УГ1М-2x4-15	12	1056	8	10,1x6,0x11,325	55,5	24

Электрофильтры типа ЭГА

(Э – электрофильтр; Г – горизонтальный; А – модификация; межэлектродный шаг 300 мм)

Цифры после букв: первая – количество секций; вторая – количество газовых проходов;

третья – номинальная высота электродов (м); четвертая – количество элементов в осадительном электроде; пятая – количество электрических полей по длине электрофильтра; шестая – температура в электрофильтре (°С), седьмая – разряжение в электрофильтре (кПа)

Дальнейшее развитие электрофильтры общепромышленного применения получили в советско-чехословацкой разработке. Эти аппараты получили название ЭГА «Дружба». С советской стороны в разработке этих аппаратов принимали участие «Гипрогазоочистка», НИИОГАЗ, СФНИОГАЗ, СЗГОА (Семибратовский завод газоочистительной аппаратуры) и СКТБГПО (специальное конструкторско-технологическое бюро, образованное на базе конструкторского и технологического отделов СЗГОА).

В 1978 г. на СЗГОА был изготовлен и смонтирован на энергоблоке 300 мВт Ладыжинской ГРЭС опытный образец электрофильтра ЭГА2-58-12-6-3, установленный параллельно с электрофильтром УГЗ-3-177.

В мае 1979 г. были проведены межведомственные испытания, которые показали следующие результаты:

- степень очистки газов – 99,72 %; (98,5 %);
- остаточная запыленность – 0,052 г/нм³; (0,25).

В скобках указаны результаты, полученные для электрофильтра УГЗ-3-177.

Проектом предусматривались следующие основные технические характеристики:

- высота осадительных электродов: 6; 7,5; 10,5; 12 м;
- количество электрических полей: 2; 3; 4;
- площадь активного сечения: 16,5–285,6 м²;
- производительность при скорости газа в активной зоне 1 м/с: 59,6–1028 тыс. м³/ч

С июня 1981 г. было начато серийное производство электрофильтров типа ЭГА, а в 1983 г. электрофильтром был присвоен государственный знак качества. За период до 1991 г. этих электрофильтров было изготовлено более 700 шт. В качестве примера некоторые типоразмеры электрофильтров ЭГА приведены в таблице.

Техническая характеристика электрофильтров типа ЭГА

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxВxН	Масса ЭФ общая/оборуд., т
ЭГА1-10-6-4-2-330-5	16,5	634	2092	5,12	9,26x4,89x12,4	38,9/15,9
ЭГА1-20-9-6-4-330-5	49	5652	18652	15,36	22,74x7,99x16x9	185,3/92,4
ЭГА1-30-12-6-4-330-5	97,4	11244	37105	15,36	22,74x10,99x19,4	313,5/170
ЭГА1-40-12-6-3-330-5	129,8	11244	37105	11,52	7,28x13,9x19,9	296,5/166,6
ЭГА2-76-12-6-3-330-5	246,6	21360	70488	11,52	17,28x25,99x19,9	532,1/316/9
ЭГА2-12-6-4-330-5	285,6	24732	81616	15,36	22,74x29,54x19,9	87,3/490,4

Электрофильтры типа ЭГБ

(Электрофильтры горизонтальные, Б – межэлектродный шаг 350 мм)

Дальнейшее совершенствование электрофильтров происходило в направлении снижения металлоемкости и энергопотребления. Было принято решение о создании электрофильтров с межэлектродным шагом 350 мм и в дальнейшем 460 мм.

В 1986 г. СЗГОА совместно с институтами «Гипрогазоочистка», НИИОГАЗ и СФ НИИОГАЗ был разработан опытный образец электрофильтра ЭГБ, который успешно прошел межведомственные испытания на Прибалтийской ГРЭС (г. Нарва) и был рекомендован к серийному производству.

Электрофильтры типа ЭГБМ

(Электрофильтры горизонтальные, Б – межэлектродный шаг 460 мм)

Электрофильтры типа ЭГБМ включали 131 типоразмер с высотой электродов от 4 до 12 метров и производительностью при скорости газов в активной зоне 1 м/с от 38 до 1028 тыс. м³/час.

По отношению к электрофильтрам типа ЭГА металлоемкость была снижена на 15 %, а энергетические затраты до 10 %.

Электрофильтры типа ЭГВ

Следующей модификацией электрофильтров явились аппараты типа ЭГВ. Техническим заданием предусмотрено 160 типоразмеров с высотой электродов от 4 до 12 м, производительностью при скорости газов 1 м/с от 38,5 до 1047,6 тыс. м³/час (от 10,7 до 291 м³/с), с количеством электрических полей от 2 до 8. Шаг по осям одноименных электродов (ширина единичного газового прохода) – 460 мм. Металлоемкость по отношению к электрофильтрам типа ЭГА была снижена до 30 %. Значительным отличием электрофильтров ЭГВ стало применение специальных коронирующих элементов «расщепленного» типа, а затем типа СФ-2. Опытный образец электрофильтра ЭГВ-2-38-12 был установлен на блоке 6 Ладыжинской ГРЭС параллельно с электрофильтром ЭГА-2-58-12-6-4 в мае 1988 г.

В декабре 1989 г. были проведены межведомственные испытания, которые показали высокую надежность конструкции, устойчивость к повышению температуры и степень очистки газов 98,5 %, т.е. не ниже, чем у электрофильтра ЭГА2-58-12-6-3.

Техническая характеристика электрофильтров типа ЭГВ

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxВxН, м
ЭГВ1-6-4-4-2	10,7	260	860	5,12	9,6x5,54x10,9
ЭГВ1-13-7,5-4-3	39,4	1420	4960	7,68	14,1x8,76x15,9
ЭГВ 1-19-7,5-4-3	62,3	2250	7430	7,68	14,1x11,52x14,4
ЭГВ1-20-12-6-8	135,1	12180	40194	30,72	48,6x14,7x19,9
ЭГВ2-30-9-6-3	117,6	6360	21000	11,52	18,6x18,2x18,1
ЭГВ2-70-12-6-8	363,8	52460	173120	30,72	48,6x35,7x19,9

Электрофильтры типа ЭГАВ

(Э – электрофильтр; Г – горизонтальный; А – модификация; В – верхнее размещение механизмов встряхивания)

Цифры после букв обозначают: первая – количество электрических полей по длине электрофильтра; вторая – количество элементов в осадительном электроде; третья – номинальная высота электродов; четвертая – количество газовых проходов; пятая – количество секций

Электрофильтры ЭГАВ – высокоэффективные горизонтальные аппараты для очистки неагрессивных невзрывоопасных газов от пыли. Применимы в металлургии, промышленности строительных материалов и других отраслях по согласованию с разработчиком.

Верхнее размещение узлов встряхивания и их новые конструктивные решения, применение осадительных элементов типа ЭКО МК, коронирующих элементов с пониженным напряжением зажигания коронного разряда и ряд других усовершенствований позволили улучшить технические характеристики аппаратов ЭГАВ по сравнению с аппаратами, разработанными до 1985 г., следующим образом:

- площадь осаждения в том же корпусе увеличена на 35-50 %;
- удельная металлоемкость снижена на 6-20 %;
- степень очистки газов повышена до уровня, обеспечивающего современные требуемые нормы выбросов;
- для поддержания требуемых выбросов пыли в период эксплуатации и в послегарантийный период, а также при изменении технологических условий работы электрофильтров по желанию заказчика аппараты снабжаются гарантийными зависимостями.

Общее количество типоразмеров электрофильтров может составлять более 200 шт.

Техническая характеристика электрофильтров ЭГАВ

Условная высота электродов, м	4; 6; 7,5; 9; 12; 13,5; 16,5; 18
Межэлектродный шаг, мм	300, 350, 400, 460, 500
Количество газовых проходов, шт.	от 8 до 88
Длина электрических полей, м	2,56; 3,2; 3,84; 4,48
Количество полей, шт.	2... 6
Производительность по очищаемому газу	

(при условно принятой скорости в активной зоне – 1м/с),

м³/час

50...1500

м³/с

13,9...416,7

Температура очищаемого газа, °С, не более

330

Запыленность газов на входе, г/нм³ не более

90

Коронирующие элементы

СФ1, СФ2, СФТ, ЛЗ

Осадительные элементы

ЭКОМК4х160, СЧС-640, ЭКОМК6х160

Привода встряхивания

мотор-редуктор с частотным регулятором скорости вращения

В таблице приведены характеристики электрофильтров ЭГАВ.

Односекционные электрофильтры

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxВxН, м	Масса, т	
					Общая	Оборудование
ЭГАВ1-10-6-4-2	16,5	635	5,12	8520x4275x14100	38,9	15,9
ЭГАВ1-10-6-4-3	16,5	952	7,68	13440x4275x14100	55,3	23,5
ЭГАВ1-10-6-5-2	16,5	749	6,40	9800x4275x15100		
ЭГАВ1-10-6-5-3	16,5	1190	9,60	14150x4275x15100		
ЭГАВ1-10-6-6-2	16,5	952	7,68	11820x4275x15100	48,6	20,6
ЭГАВ1-10-6-6-3	16,5	1428	11,52	17280x4275x15100	69,8	30,6
ЭГАВ1-12-6-5-2	19,8	952	6,40	9800x4875x15100		
ЭГАВ1-12-6-5-3	19,8	1430	9,60	14150x4875x15100		
ЭГАВ1-14-7,5-4-3	28,7	1656	7,68	12230x5475x15600	73,3	33,3
ЭГАВ1-14-7,5-4-4	28,7	2208	10,24	15940x5475x15600	95,2	44,2
ЭГАВ1-14-7,5-6-2	28,7	1656	7,68	11080x5475x16100	66,8	30
ЭГАВ1-14-7,5-6-3	28,7	2484	11,52	16070x5475x16600	95,9	44,6
ЭГАВ1-16-7,5-5-2	32,8	1578	6,40	9800 x6075 x5000		30,7
ЭГАВ1-16-7,5-5-3	32,8	2368	9,60	14150 x6075 x5000		46,1
ЭГАВ1-16-7,5-5-4	32,8	3155	12,8	18500 x6075 x5000		60,4
ЭГАВ1-20-7,5-4-3	41	2365,4	7,68	12230x7275x17100	95,75*	46,25*
ЭГАВ1-20-7,5-4-4	41	31,54,0	10,24	15940x7275x17100	126,19*	62,09*
ЭГАВ1-20-7,5-5-2	41	1971,2	6,40	9800x 7275x 17100	79,8*	36,99*
ЭГАВ1-20-7,5-5-3	41	2956,8	9,60	14150x 7275x17100	114,07*	54,47*
ЭГАВ1-20-7,5-5-4	41	3942,4	12,8	18500x7275x17100	148,7*	73,00*
ЭГАВ1-20-7,5-6-2	41	2365,4	7,68	11081x7275x17100	81,95*	42,25*
ЭГАВ1-20-7,5-6-3	41	3548,2	11,52	16070x7275x 17100	121,12*	61,12*
ЭГАВ1-20-9-4-3	49	2886,2	7,68	12230x7275x18600	-	35,71*
ЭГАВ1-20-9-4-4	49	3768,3	10,24	15940x7275x18600	-	70,76*
ЭГАВ1-20-9-5-3	49	3538,8	9,6	14150x7275x18600	-	64,46*
ЭГАВ1-20-9-6-2	49	2826,2	7,68	11080x7275x18600	99,45*	48,85*
ЭГАВ1-20-9-6-3	49	4236,4	11,52	16070x7275x18600	144,21*	73,11*
ЭГАВ1-20-9-6-4	49	5652,5	15,36	21060x7275x18600	188,17*	96,57*
ЭГАВ1-24-7,5-5-2	49,7	2365	6,4	9800x8475x1660	94,32*	44,32*
ЭГАВ1-24-7,5-5-3	49,7	3548	9,6	14150 x8475x1660	131,7,*	66,51*
ЭГАВ1-24-7,5-5-4	49,7	4731	12,8	18500 x8475x1660	175,56*	87,17*
ЭГАВ1-28-7,5-4-3	57,3	3312	7,68	12230x 9675x15600	-	68,3*
ЭГАВ1-28-7,5-4-4	57,3	5519	15,36	15940x9675x15640	-	84,73
ЭГАВ1-28 -7,5-5-2	57,3	2760	6,4	9800x9675x1600	120,32*	62,62*
ЭГАВ1-28 -7,5-5-3	57,3	4139	9,6	14150 x9675x1600	155,42*	76,22*
ЭГАВ1-28 -7,5-5-4	57,3	5519	12,8	18500 x9675x1600	200,94*	100,34*
ЭГАВ1-28 -9-4-3	68,5	3957	7,68	12230x9675x17100	172,71*	75,71*
ЭГАВ1-28 -9-4-4	68,5	5276	15,36	15940x9765x17100	-	99,14*
ЭГАВ1-30-7,5-4-3	61,4	3548	7,68	12230x10275x16600	143,00*	69,00*
ЭГАВ1-30-7,5-4-4	61,4	4731	15,36	15940x10275x16600	185,14*	90,34*
ЭГАВ1-30-7,5-6-2	61,4	3548	7,68	11080x10275x16600	122,30*	61,70*
ЭГАВ1-30-7,5-6-3	61,4	5322	11,52	16070x10275x16600	175,96*	91,62*
ЭГАВ1-30-9-6-2	73,4	4239	7,68	11080x10275x18100	141,73*	71,63*
ЭГАВ1-30-9-6-3	73,4	6359	11,52	16070x10275x18100	204,64*	104,64*
ЭГАВ1-30-9-6-4	73,4	8479	15,36	21060x10275x18100	267,63*	143,53*
ЭГАВ1-30-12-6-3	97,4	8433	11,52	16070x10275x21100	254,06*	134,86*

ЭГАВ1-30-12-6-4	97,4	11243	15,36	21060x10275x21100	328,26*	177,46*
ЭГАВ1-32-9-5-3	78,3	5652	9,6	14150x10875x18100	202,32*	100,22*
ЭГАВ1-36-9-4-3	88,1	5087	7,68	12231x12075x18100	-	93,05*
ЭГАВ1-36-9-4-4	88,1	6823	15,36	15940x12075x18100	-	123,99*
ЭГАВ1-36-12-6-3	116,8	10119	11,52	16070x4990x21600	288,11	156,61*
ЭГАВ1-36-12-6-4	116,8	13492	15,36	21060x4990x21600	376,00*	209,70*
ЭГАВ1-36-12-7-3	116,8	11806	13,44	17990x5630x21600	327,70*	187,00*
ЭГАВ1-36-12-7-4	116,8	1574	17,92	23620x5630x21600	445,86*	253,76*
ЭГАВ1-40-7,5-4-3	81,9	4731	7,68	12230x13275x17100	173,12*	88,02*
ЭГАВ1-40-7,5-4-4	81,9	6308	10,24	15940x13275x17100	225,39*	116,29*
ЭГАВ1-40-7,5-6-2	81,9	4730	7,68	11080x13275x17100	151,83*	81,29*
ЭГАВ1-40-7,5-6-3	81,9	7096	11,52	16070x13275x17100	219,69*	119,49*
ЭГАВ1-40-9-6-2	97,8	5652	7,68	11080x13275x18600	171,95*	90,25*
ЭГАВ1-40-9-6-3	97,8	8479	11,52	16070x13275x18600	252,87*	138,97*
ЭГАВ1-40-9-6-4	97,8	11305	15,36	21060x13275x18600	331,63*	185,43*
ЭГАВ1-40-9-7-2	97,8	6594	8,96	12360x13275x18600	205,25*	113,15*
ЭГАВ1-40-9-7-3	97,8	9892	13,44	17990x13275x18600	298,74*	169,64*
ЭГАВ1-40-9-8-2	97,8	7537	10,24	13640x13275x19100	-	227,57*
ЭГАВ1-40-9-8-3	97,8	11304	15,36	19910x13275x19100	227,26*	125,36*
ЭГАВ1-40-12-6-3	129,8	11244	11,52	16070x13275x21600	307,30*	175,00*
ЭГАВ1-40-12-6-4	129,8	14991	15,36	21060x13275x21600	399,56*	230,56*

Двухсекционные электрофильтры

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м	Масса, т	
					Общая	Оборудование
ЭГАВ2-48-12-6-3	155,8	13492	11,52	16070x16275x21600	375,98*	217,18
ЭГАВ2-48-12-6-4	155,8	17990	15,36	21060x16275x21600	489,92*	287,32*
ЭГАВ2-56-9-6-2	137	7913	7,68	11080x18675x18600	-	136,48*
ЭГАВ2-56-9-6-3	137	11870	11,52	16070x18675x18600	374,24*	201,64*
ЭГАВ2-56-9-6-4	137	15827	15,36	21060x18675x18600	488,48*	268,18*
ЭГАВ2-56-12-6-3	181,7	15741	11,52	16070x18675x21600	422,57*	251,87*
ЭГАВ2-56-12-6-4	181,7	20988	15,36	21060x18675x21600	559,07*	335,17*
ЭГАВ2-88-12-6-3	285,6	24736	11,52	16070x28275x21600	647,73*	390,23*
ЭГАВ2-88-12-6-4	285,6	32981	15,36	21060x28275x21600	847,03*	518,53*
ЭГАВ2-88-12-8-2	285,6	21987	10,24	12540x28275x22100	-	348,34*
ЭГАВ2-88-12-8-3	285,6	32981	15,36	19910x28275x22100	840,13*	501,63*
ЭГАВ2-88-12-8-4	285,6	43975	20,48	26180x28275x22100	1128,85*	687,25*

*масса указана для электрофильтров ЭГА.

Двухъярусные электрофильтры (ЭГД)

(Э – электрофильтр; Г – горизонтальный; Д – двухъярусный)

Цифры после букв: первая – количество газовых проходов; вторая – высота электродной системы одного яруса; третья – количество элементов в электроде; четвертая – число полей

Электрофильтры ЭГД предназначены для очистки от золы дымовых газов котельных агрегатов большой мощности на тепловых электростанциях в условиях ограниченных размеров котельных ячеек. Аппараты рассчитаны на температуру до 160⁰С, с разряжением до 5 кПа.

Активная зона электрофильтра состоит из осадительных электродов СЧС-640 высотой 9 м и ленточно-игольчатых коронирующих элементов в трубчатых рамах. Активная зона аппаратов расположена в два яруса, между которыми расположены промежуточные бункера. В нижнем ярусе часть межэлектродных промежутков выполнена без коронирующих электродов и служит для транспортировки пыли из верхнего яруса. Одна из причин разработки двухъярусных (2x9 м) электрофильтров – исключить возрастающий вторичный унос пыли при встряхивании.

Опытный образец аппарата ЭГД был смонтирован в 1984 г. на ТЭЦ г. Чайковский. Двухъярусные электрофильтры установлены на блоках 800 мВт Пермской и Березовской ГРЭС, на шести электростанциях КНР в г. Цзисянь, Иминь, Суйчжун и др.

Техническая характеристика двухъярусных фильтров ЭГД

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м	Масса ЭФ оборуд., т
ЭГД1-80-9-6-3	181	15638	11,52	19,06x18,5x39,4	
ЭГД1-128-9-6-4	293,6	33912	15,36	25,105x22,3x39,4	579289
ЭГД1-152-9-6-5	350	50875	19,2	31,05x25,94x39,48	844897

Аппараты ЭФ-РФ

(ЭФ – электрофильтр; РФ – рукавный фильтр)

Одной из последних разработок «Кондор-Эко» является создание комбинированного аппарата, предназначенного для черной и цветной металлургии, промышленности строительных материалов и др. Этот аппарат – последовательное соединение электрофильтра и фильтра в одном или отдельных корпусах с обеспечением специфических режимов благоприятных для электрофильтра и фильтра, что обеспечивает срок службы рукавного фильтра до 5 лет.

Высокотемпературные электрофильтры

Для очистки газов с температурой до 400–450°С, как с высокой начальной запыленностью (более 20–30 г/м³), так и в ряде случаев с небольшой запыленностью (до 5 г/м), например, для улавливания высокодисперсной пыли с высоким электрическим сопротивлением, разработаны высокотемпературные электрофильтры ОГП, ГП.

Эти аппараты работают с невысокими скоростями движения газов – 0,5–0,6 м/с. Эти электрофильтры оснащены пластинчатыми осадительными электродами, набранными из стальных прутков диаметром 8 мм, вставленных с шагом 15 мм в направляющие из полосовой стали и коронирующими электродами из нихромовой проволоки диаметром 2 мм.

Унифицированные электрофильтры типа УГТ предназначены для очистки газов от пыли при температуре газов до 435°С на предприятиях химической промышленности, цветной металлургии, нефтехимии и других отраслей. Электрофильтры типа УГТ оборудованы прутковыми осадительными электродами и коронирующими электродами безрамной конструкции из проволоочных элементов диаметром 2,5 мм, натянутых грузами. Электрофильтры УГТ по высоте электродов подразделяются на два габарита. В электрофильтрах первого габарита высота электродов – 7,5 м, второго габарита – 10 м.

Электрофильтры УГТ выпускались в трехпольном исполнении с длиной полей по 2,5 м и активным сечением 30, 40, 60, 80 м² (первый габарит), 50 и 80 кв.м (второй габарит). Встряхивание осадительных и коронирующих электродов ударно-молотковое. Размеры электрофильтров УГ и УГТ определены с учетом выполнения поставок с унифицированными строительными параметрами и возможностями применения типовых строительных конструкций. С целью расширения температурного предела применения С-образных осадительных электродов и повышения уровня унификации электрофильтров УГТ Семibrатовским филиалом НИИОГАЗ и Семibrатовским заводом газоочистительной аппаратуры была выполнена реконструкция по типу УГ электрофильтра УГТ-1-30-3, установленного для очистки технологического газа от огарковой пыли в серно-кислотном производстве на Уваровском химзаводе. Реконструкции предшествовали исследования электродов в термокамере, подтвердившие отсутствие недопустимых температурных деформаций С-образных электродов длиной 7,5 м при температуре до 450°С.

При сравнительных испытаниях электрофильтров УГТ и УГТС установлено, что реконструкция системы электродов позволила довести степень очистки газов в среднем до 99,3 %. При этом выходная запыленность снизилась в 1,4 раза и составила 0,09 г/м³ (н.у.).

Длительная эксплуатация электрофильтра УГТС показала, что С-образные осадительные электроды при температуре газов 425°С в среде сернистого газа работают устойчиво, без температурных деформаций.

Техническая характеристика электрофильтров серии УГТ и ОГП

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронирующих элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м
ОГП-4-8	8	380	882	4x1,5	14,4 x10,8 x2,0
ОГП-4-16	16	760	1763	4x1,5	14,4 x12,6 x4,0
УГТ1-3-30	30	1860	4320	3x2,58	14,0 x17,0 x4,5
УГТ1-3-40	40	2560	5940	3x2,58	14,0 x18,7 x6,0
УГТ1-3-60	60	3720	8640	3x2,58	14,0 x17,0 x9,0
УГТ1-3-80	50	5120	11878	3x2,58	14,0x18,7x12,0

УГТ2-3-50	80	3400	7890	3x2,58	14,0x19,0 x6,0
УГТ2-3-80	80	4950	11484	3x2,58	14,0 x19,0 x9,0

Электрофильтры типа ЭГТ

(Э – электрофильтр; Г – горизонтальный; Т – высокотемпературный)

Цифры после букв: первая – высота электродной системы; вторая – площадь активного сечения; третья – количество электрических полей

Электрофильтр ЭГТ предназначен для сухой очистки от пыли неагрессивных невзрывоопасных газов при температуре до 425⁰С. Активная зона состоит из плоских профилированных полотен и коронирующих элементов, натянутых грузами с шагом 180 мм. Расстояние между соседними электродами 260 м. В электрофильтре ЭГТ по сравнению с аппаратами УГТ увеличена производительность на 20 %, снижены металлоемкость и энергозатраты на 20 %. Опытный образец сдан межведомственной комиссии в 1984 г. на Новосибирском оловозаводе. Серийное производство – с 1987 г.

Техническая характеристика электрофильтров серии ЭГТ

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxВxН, м	Масса ЭФ общая, т
ЭГТ8-20-3	20	1262	3x2,5=7,5	12,6x4,97x16,82	29295
ЭГТ8-20-4	20	1685	4x2,5= 10	16,6x16,8x16,82	38716
ЭГТ8-30-3	30	1836	3x2,5=7,5	12,6x6,27x17,135	43957
ЭГТ8-30-4	30	2448	4x2,5= 10	16,6x6,27x17,135	58122
ЭГТ8-40-3	40	2525	3x2,5=7,5	12,6x7,38x17,855	54630
ЭГТ8-40-4	40	3366	4x2,5= 10	16,6x7,83x17,835	72891
ЭГТ8-60-3	60	3787	3x2,5=7,5	12,6x10,68x17,55	81356
ЭГТ8-60-4	60	5049	4x2,5= 10	16,6x10,69x17,135	107986
ЭГТ8-80-3	80	5164	3x2,5=7,5	12,6x14,02x17,835	108628
ЭГТ8-80-4	80	6885	4x2,5= 10	16,6x14,02x17,835	144208

Электрофильтры типа ЭСГ-15-3 (2)

(Э – электрофильтр; С – сажевый; Г – горизонтальный)

Цифры после букв: первая – площадь активного сечения; вторая – количество электрических полей; 1 – с механизмами ворошения; 11 – без механизмов ворошения

Электрофильтры предназначены для улавливания технического углерода из углеродной газовой смеси температурой от 100 до 200⁰С, а также для улавливания катализаторной пыли. Электрофильтры ЭСГ-15-2 являются приставками к аппаратам ЭСГ-15-3.

Активная зона состоит из прутковых осадительных электродов и ленточно-зубчатых коронирующих электродов с грузами. Расстояние между осями одноименных электродов – 300 мм.

Для ворошения сажи в бункерах предусмотрены специальные механизмы.

Техническая характеристика электрофильтров типа ЭСГ

Типоразмер ЭФ	Поперечное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxВxН, м	Масса ЭФ общая, т
ЭСГ-15-3-1	15	825	-	-	14,9X5,1x13,254	34,0
ЭСГ-15-3-11	15	825	-	-	14,9X5,1x13,254	37,3
ЭСГ-15-2-1	15	550	-	-	9,7x5,1x13,254	23,0
ЭСГ-15-2-11	15	469	-	-	8,38x5,1x13,0	18,0

Вертикальные электрофильтры

Первыми в перечне каталога аппаратов для электрической и механической очистки газов под номером 2А стоит электрофильтр ВП – вертикальный пластинчатый электрофильтр. Это один из первых отечественных аппаратов электрической очистки газов. Далее в этом каталоге идут вертикальные пластинчатые электрофильтры типа УВП и ДВП (16А, 17А).

Техническая характеристика электрофильтров типа УВП
(Угольные вертикальные пластинчатые при температуре до 130⁰С)

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ* LxVxH, м
УВП-8	8	142,8	500	0,335	6,2x4,9x19,635
УВП-10	10	183	650	0,335	7,0x4,9x19,635
УВП-12	12	224	792	0,335	7,8x4,9x19,635
УВП-16	16	306	1080	0,335	8,32x6,3x19,635

Техническая характеристика электрофильтров типа ДВП
(Дымовые вертикальные пластинчатые при температуре до 170°С)

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м
ДВП-2x10	20	533,25	2200	7900	6,4x4,55x16,44
ДВП-3x10	30	810,54	3300	7900	8,99x4,55x16,44
ДВП-4x10	40	1087,8	4400	7900	11,94x4,55x16,44
ДВП-4x20	80	2243,6	7900	7900	17,0x6,38x18,084

Электрофильтры типа ДВПН и ДВПН-БЦ

(Дымовые вертикальные, пластинчатые, БЦ – с прямоточным блоком циклонов)

Эти аппараты были разработаны институтом «Гипрогазоочистка» для установки в условиях ограниченных площадей. Аппараты имели площадь активного сечения 20–80 м². Количество секций – 2–4, междуэлектродное расстояние – 325 мм, осадительные электроды – тюльпанообразные. Отряхивание пыли производилось путем их подъема-сброса.

Коронирующие элементы изготавливались из проката штыкового сечения, ориентированы поперек хода газа. Проектная степень очистки газа при скорости газа 1,5 м/с составляла 90 % и 97 % – для ДВПН-БЦ.

Техническая характеристика электрофильтров типа ДВПН

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м	Масса ЭФ общая/оборуд., т
двпн-2-10	20	1040	2200		6,04x4,72x17,02	68,1/37,5
двпн-3-10	30	1560	3300		8,99x4,27x17,02	100,8/56,5
двпн-4-10	40	2080	4400		11,94x4,72x17,02	133/75
двпн-4-20	80	2490	8500		17,06x6,38x19,974	201,8/117,2

Техническая характеристика электрофильтров ДВПН-БЦ

Типоразмер ЭФ	Поперечное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м	Масса ЭФ общая/оборуд., т
ДВПН-1-16,5БЦ	16,5	700	1250		4,305x5,22x22,08	67,750/38,110
ДВПН-2-16,5БЦ	33	1400	3500		8,845x5,3x21,668	108,095/53016
ДВПН-2-20БЦ	40	1245	4250		8,580x6,380x22,08	115,405/60,205

Техническая характеристика электрофильтров УВ

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ* LxVxH, м	Масса ЭФ общая/оборуд., т
УВ-2-10	21	1200		7,4	4,5x6,0x19,9	66,4/35,4
УВ-3-10	32	1800		7,4	4,5x9,0x19,9	103,1/52,1
УВ-1-16	16	900		7,4	4,5x4,5x19,9	45,1/25,1
УВ-2-16	32	1800		7,4	4,5x9,0x19,9	86,3/48,3
УВ-2-24	48	2600		7,4	6,0x9,0x21,4	129,8/76,8
УВ-3-24	72	3900		7,4	6,0x13,5x21,4	190,1/114,1

* в таблице указана высота электродов с нижним подводом газа; при боковом подводе газа высота уменьшается на 1,4 – 0,7 м.

Осадительные электроды в электрофильтрах УВ – пластинчатые, коронирующие – рамные с верхним подвесом и молотковым встряхиванием. Расстояние между соседними осадительными электродами – 275 мм. Основные конструктивные элементы электрофильтров УВ (профиль и размеры элементов осадительных электродов, узлы их подвеса и встряхивания) унифицированы с соответствующими элементами электрофильтров серии УГ.

Эти аппараты применялись для очистки газов от котельных, сушилок, обжиговых и аспирационных установок и т.п.

Электрофильтры типа УВВ

(Унифицированные вертикальные пластинчатые сухие электрофильтры для улавливания из газов угольной пыли при температуре до 130°С)

Основные узлы этих аппаратов аналогичны таковым в электрофильтрах УВ

Встряхивающие механизмы облегченные, т.к. угольная пыль имеет низкое удельное электрическое сопротивление и легко отряхивается.

В связи с имеющейся вероятностью взрыва угольной пыли верхняя часть электрофильтра открыта в атмосферу. Конструктивные элементы внутри электрофильтра исключают скопление пыли. Межэлектродный промежуток в электрофильтрах увеличен до 350 мм.

Техническая характеристика электрофильтров типа УВВ

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м
УВВ-8	8	285		6,2	3,15x3x20,0
УВВ-10	12	430		6,2	3,15x4,5x20,0
УВВ-12	16	570		6,2	3,15x6,0x20,0
УВВ-16	24	870		6,2	3,15x9,0x20,0

Электрофильтры типа ОВ2х30

(Опытный вертикальный)

В электрофильтре ОВ2х30 в качестве осадительных электродов вместо тюльпанообразных были в опытном порядке применены С-образные осадительные электроды в сочетании с ленточно-игольчатыми коронирующими элементами. Шаг между одноименными электродами был сокращен до 275 мм (вместо 350 в электрофильтрах ДВПН2х24 и ДВПЖ2х25). Электрофильтр был смонтирован на Брянском цементном заводе в 1973 г, где были проведены его межведомственные испытания. Электрофильтр обеспечил выходную запыленность 105 мг/м³.

Активное сечение электрофильтра составило – 60 м², поверхность осаждения – 4760 м².

Активная длина коронирующих электродов – 4700 м.

Электрофильтры типа ЭВ

(Э – электрофильтр; В – вертикальный)

Электрофильтры типа ЭВ предназначены для очистки от пыли неагрессивных газов и аспирационного воздуха с температурой не более 250°С. Устанавливаются на предприятиях цементной, теплоэнергетической промышленности, черной и цветной металлургии, и в других отраслях промышленности. Активная зона состоит из осадительных С-образных электродов и коронирующих электродов (трубчатых рам) с игольчатыми элементами.

Техническая характеристика электрофильтров типа ЭВ

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxVxH, м	Масса ЭФ оборуд., т
ЭВ1-7,5-2x10	20	1080	3370	7,5	5,3x6,8x20,015	27137
ЭВ1-7,5-3x10	30	1620	5054	7,5	5,3x9,88x20,15	40111
ЭВ1-7,5-1x16	16	840	2620	7,5	5,3x5,38x20,15	19960
ЭВ1-7,5-2x16	32	1680	5242	7,5	5,3x9,88x20,15	38717
ЭВ1-7,5-2x24	48	2520	7863	7,5	7,5x9,93x21,7	57769
ЭВ1-7,5-3x24	72	3780	11794	7,5	7,514,43x21,7	85803
ЭВ1-7,5-4x24	96	5040	15725	7,5	7,5x19,45x21,7	150055

Электрофильтры типа ЭВВ

(Э – электрофильтр; В – вертикальный; В – исполнение, учитывающее взрывоопасность среды)

Типоразмер ЭФ	Активное сечение	Площадь осаждения,	Длина коронир.	Длина активной	Габариты ЭФ LxVxH, м	Масса ЭФ общая/оборуд., т
---------------	------------------	--------------------	----------------	----------------	----------------------	---------------------------

	ЭФ, м ²	м ²	элементов, м	зоны, м		
ЭВВ-1-6,1-8-1						
ЭВВ-1-6,1-8-11						
ЭВВ-1-6,1-12-1	12	431	1345	6,1	5,0x5,77x20,0	34,65/14,95
ЭВВ-1-6,1-12-11						
ЭВВ-1-6,1-16-1	16	575	1794	6,1	5,0x6,87x20,0	46,57/19,17
ЭВВ-1-6,1-24-1	24	862	2690	6,1	5,0x11,1x20,0	65,68/28,580
ЭВВ-1-6,1-24-11						

Электрофильтр типа ЭВПр

(Э – электрофильтр; В – вертикальный, Пр – для плазменной резки)

Аппарат разработан и изготовлен в СФ НИИОГАЗ, установлен на судостроительном заводе для очистки газов от пыли после машин плазменной резки углеродистой стали.

Активное сечение, м ²	4,6;
Площадь осаждения	92,1;
Габариты электрофильтра:	
длина, м	2,85;
ширина, м	2,6;
высота, м	4,8

В химической промышленности и цветной металлургии применялись электрофильтры типа ХК (химический, с камерой из красного кирпича) предназначались для очистки газов от пыли при обжиге колчедана, цинковых концентратов и др.

Начальная массовая концентрация очищаемых газов составляла 3–5 г/нм³ – на выходе 0,1–0,2 г/нм³. Скорость газов в активном сечении – 0,75–1,2 м/с. Осадительные электроды изготавливались из волнистой проволоки диаметром 3 мм, натянутой на сварные рамы, коронирующие элементы изготавливались из нихромовой проволоки диаметром 2 мм, подвешивались к верхней раме и натягивались грузами.

Отряхивание электродов производилось вручную.

Электрофильтры типа ЭВТ – 5,5-20-2Ф-01

(Э – электрофильтр; В – вертикальный; Т – высокотемпературный; 2 – количество электрических полей; 5,5 – активная длина полей, м; 20 – площадь активного сечения, м²; Ф – фосфорный; 01 – индекс)

Электрофильтр предназначен для очистки от пыли фосфорсодержащих газов температурой до 450⁰С, входящих от руднотермических фосфорных печей. Аппарат состоит из наружного корпуса и двух внутренних корпусов, в каждом из которых размещена система коронирующих и осадительных электродов, относящаяся к отдельному электрическому полю.

Внутренние корпуса соединены между собой наклонным газоходом. Наружный корпус теплоизолирован. Пространство между наружным и внутренним корпусами используется для обогрева электрофильтра инертным газом с целью предотвращения конденсата паров желтого фосфора внутри электрофильтра. В качестве осадительных электродов используются С-образные электроды, а в качестве коронирующих – ленточно-зубчатые элементы с грузами.

Система коронирующих электродов каждого поля подвешена на двух трубах к опорной конструкции, расположенной на крышке электрофильтра. Отряхивание осадительных и коронирующих электродов осуществляется молотками, установленными на вращающихся валах.

Уловленная в каждом электрическом поле пыль при встряхивании электродов сыпается на дно внутренних корпусов, откуда непрерывно перемещается скребковыми механизмами к выгрузным отверстиям, через которые пыль подается в бак и смешивается с водой. Очищенный от пыли газ поступает в систему конденсации.

Техническая характеристика

Площадь активного сечения, м ²	20
Наименьшая температура обогревающего газа, ⁰ С	350
Допустимая концентрация пыли в газе, г/м ³	80
Площадь осаждения, м ²	1750
Гидравлическое сопротивление электрофильтра, кПа (кг/м ²)	0,1 (10)
Давление газа в электрофильтре, (не более) кПа (кг/м ²)	0,5 (50)
Скорость газов в активном сечении электрофильтра, м/с	0,6

Мокрые электрофилтры

В большинстве мокрых электрофилтров осадительные электроды изготавливаются из труб с различной формой сечения (круг, шестигранник, прямоугольник со скругленными углами).

Иногда изготавливают мокрые аппараты с пластинчатыми осадительными электродами.

Запыленный газ перед поступлением в мокрые электрофилтры охлаждают до температуры ниже точки росы. При этом в случае улавливания высокоомной пыли удельное электрическое сопротивление осаденного слоя снижается, исключая обратное коронирование. В мокрых аппаратах отсутствует унос уловленных частиц в процессе осаждения и от встряхивания. Кроме того, в этих аппаратах отсутствуют неактивные и полупассивные зоны. Электрическое поле в системе коаксиальных цилиндров имеет более высокую напряженность, чем в системе провод – плоскость.

Эти особенности создают предпосылки для высокой степени очистки газов в мокрых трубчатых электрофилтрах. Электрофилтры типа М имеют шестигранные (сотовые) осадительные электроды.

Электрофилтры типа М (мокрые)

Эти аппараты предназначались для улавливания мышьяка при обжиге колчедана.

Очистка основана на предварительном насыщении газа туманом серной кислоты, в котором растворяется мышьяк, с последующим осаждением в электрофилтре. Осадительные электроды электрофилтров типа М изготавливались из листового свинца толщиной 3 мм и имели форму труб с внутренним диаметром 250 мм.

Коронирующие электроды изготавливались из проволоки диаметром 1,8–2,0 мм, освинцованной шестигранником с наружным диаметром 9–9,5 мм или с гладкой освинцованной поверхностью при диаметре 3,5 мм. Электроды размещались в освинцованной камере.

Электрофилтры типа М имеют шестигранные (сотовые) осадительные электроды.

Техническая характеристика мокрых трубчатых электрофилтров типа М и МТ

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ в плане / высота, м	Масса ЭФ общая/оборуд., т
М-2,3	2,3	114,4	44x3,35=147,4	3,35	2,55x1,96/11,66	16,7/11,84
М-3,4	3,4	166,4	64x3,34=214,4	3,35	2,98x2,25/12/49	22,4/15,45
М-5,4	5,4	205	102x3,35=341,7	3,35	3,45x2,74/12,9	28,41/20,68
М-7,0	7,0	348	134x3,35=448,9	3,35	3,87x3,01/12,9	34,8/25,95
МТ-9	9,5	478	184x4,0=736	4,0	Ø5,5 /15,35	125/100,6

Размер окружности, вписанной в шестигранник – 275 мм. Диаметр окружности, описанной вокруг звездочки коронирующего элемента – 12 мм.

По данным каталога рабочая разность потенциалов между разноименными электродами электрофилтров М составляет 70 кВ. Удельный ток короны – 0,25–0,3 мА/м.

Техническая характеристика мокрых трубчатых электрофилтров типа С, ПГ, ДМ

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Диаметр корпуса/ высота, м	Внутренний диаметр труб, мм
С-5,0	5,0	286	364	3,5	3,9/13,3	250
С-7,2	7,2	407	518	3,5	4,6/16,2	250
ПГ-8	7,8	429	545	3,5	5,0/15,5	250
ДМ-316	13,3	868	1420	4,5	7,0/21,8	230
ДМ-600	25,0	1650	2700	4,5	10,0/27,4	230

Электрофилтры типа С и ПГ рассчитаны на работу при давлении до 0,03 мПа при температуре до 60°С.

Электрофилтры типа С улавливают смолу из газов коксохимических производств и генераторных газов. Электрофилтры типа ПГ устанавливают для улавливания смолы и пыли из генераторных газов или для аналогичных условий. Аппараты типа ДМ предназначены для тонкой очистки от пыли предварительно охлажденного

и увлажненного доменного газа при температуре 45–60° С. Осадительные электроды выполнены из труб диаметром около 230 мм, а коронирующие – из мягкой медной проволоки диаметром 3 мм.

Электрофильтры СПМ-8 вертикальные пластинчатые однополюсные аппараты для очистки от сажи газов в производстве ацетилена методом пиролиза, выполнены в прямоугольном корпусе.

Электрофильтры – вертикальные, однополюсные с шестигранными трубчатыми осадительными электродами в виде сот, выполненных из свинца. Применяются для очистки печного газа контактного отделения в производстве серной кислоты от туманов серной кислоты, окислов мышьяка и селена. Коронирующий элемент – проволока с освинцовкой в форме звездочки.

Электрофильтры типа ШМК

Применение коронирующих электродов с фиксированными точками коронирования позволяет интенсифицировать процесс очистки газа и увеличить производительность аппаратов (электрофильтры ШМК-6,6И; ШМК-9,6И). Для снижения влияния капель, стекающих с игл, иглы целесообразно ориентировать вверх [6].

Техническая характеристика электрофильтров типа ШМК

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м (ориентировочно)	Длина активной зоны, м	Диаметр корпуса/высота, м
ШМК-4,5	4,5	254	322	3,5	3,6/12,55
ШМК-6,6	6,6	373	474	3,5	4,0/12,85
ШМК-9,6	9,6	541	687	3,5	4,9/13,8
ШМК-14,6	14,6	820	1041	3,5	5,4/14,8

Электрофильтры ЭВМТр1-3-3,6- БВК

(3 – диаметр корпуса, м; 3,6 – длина активной зоны, м; БВК – без влияния кромок)

Вертикальные аппараты в трубчатом цилиндрическом корпусе, предназначены для улавливания кислотного тумана из хвостовых газов башенных систем сернокислотного производства. Аппарат чувствителен к отложениям на поверхности электродов.

Электрофильтры типа С

В 2005–2006 гг. в ОАО «СФ НИИОГАЗ» был разработан смоляной электрофильтр тип С-9,7, предназначенный для очистки коксохимических и генераторных газов от смолы, масляных туманов и пыли в производстве электродов в металлургической, химической и нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности (отношение количества смолы к количеству пыли не менее чем 3:1).

По сравнению с ранее выпускаемыми электрофильтрами аналогичного назначения в аппарате С-9,7 повышены производительность и степень очистки газов за счет улучшения электрических характеристик, системы газораспределения и др. усовершенствований.

При испытаниях электрофильтра получена выходная запыленность менее 10 г/м³.

Техническая характеристика электрофильтра С

Активное сечение, м ²	9,7;
Площадь осаждения, м ²	814;
Диаметр корпуса, м	5,1;
Высота электрофильтра, м	19

Электрофильтры типа ЭГМ-6,6-1-3,5

(Э – электрофильтр; Г – горизонтальный; М – малогабаритный)

Электрофильтр предназначен для очистки отработавших газов дизелей. При испытании электрофильтров было установлено, что степень очистки газов по взвешенным частицам составляет 98–99 %, кроме того, было получено снижение содержания окиси углерода на 30–40 %, диоксида азота, диоксида серы и суммарных углеводородов на 70–80 %.

Техническая характеристика электрофильтра ЭГМ-6,6-1-3,5

Активное сечение, м ²	6,6
Поверхность осаждения, м ²	235,7
Длина активной зоны, м	3,5

Эти аппараты предназначены для улавливания аэрозолей и брызг смолы, и пыли из газов в производстве алюминия при температуре 50° С. Активная зона электрофильтра состоит из осадительных электродов (стальных труб

наружным диаметром 273 мм) и коронирующих элементов с грузами. Активная зона периодически промывается при отключенном высоком напряжении. Осадительные электроды охлаждаются водой.

Электрофильтры типа ЭМО

(Э – электрофильтр; М – мокрый; О – однополюсный)

Техническая характеристика мокрых трубчатых электрофильтров типа ЭМО

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина коронир. элементов, м	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxВxН, м	Масса ЭФ оборуд., т
ЭМО-0,7	0,7	38	-	-	2,25x3,97x10,5	2,49
ЭМО-4	4	198	-	-	3,472x5,057x11,79	18,27
ЭМО - 6	6	300	-	-	4,13x6,017x12,46	26,39

Электрофильтры типа ГПФМ

(Г – горизонтальный; П – пластинчатый; Ф – фосфорный; М – модернизированный)

Цифры после букв: первая – площадь активного сечения; вторая – количество электрических полей

Предназначены для улавливания тумана фосфорной кислоты из хвостовых газов с температурой до 100⁰С (ГПФМ7х9) и до 120⁰С (ГПФМ22х9). Электрофильтры – девятиполюсные аппараты в стальном футерованном корпусе. Осадительные электроды – плоские кирпичные перегородки с шагом 368 мм, коронирующие – ленточно-зубчатые с грузами.

Техническая характеристика электрофильтров типа ГПФМ

Типоразмер ЭФ	Активное сечение ЭФ, м ²	Площадь осаждения, м ²	Длина активной зоны, м	Габариты ЭФ LxВxН, м	Масса ЭФ оборуд., т
ГПФМ-7х9	8	525	9x4,7	13,4x4,185x9,86	16,05
ГПФМ-22х9	22	1440	9x7,7	13,4x9,66x9,86	36,63

Электрофильтры типа СПМ-8

Вертикальные пластинчатые однополюсные аппараты для очистки от сажи газов в производстве ацетилена методом пиролиза, выполнены в прямоугольном корпусе с шестигранными трубчатыми осадительными электродами в виде сот, выполненных из свинца. Применяются для очистки печного газа контактного отделения в производстве серной кислоты от туманов серной кислоты, окислов мышьяка и селена. Коронирующий элемент – проволока с освинцовкой в форме звездочки.

Электрофильтры типа ЭВМТр1-3-3,6- БВК

(3 – диаметр корпуса, м; 3,6 – длина активной зоны, м; БВК – без влияния кромок)

Вертикальные аппараты в трубчатом цилиндрическом корпусе, предназначены для улавливания кислотного тумана из хвостовых газов башенных систем серноокислотного производства. Аппарат чувствителен к отложениям на поверхности электродов.

Полимерные электрофильтры

Эти аппараты были разработаны в институте НИИОГАЗ под руководством А.А. Мошкина. В этих аппаратах шестигранные осадительные электроды набираются по высоте из штампованных элементов, изготовленных из электропроводного полимера. Диаметр вписанной в шестигранник окружности равен 250 мм. Коронирующие элементы набраны из трубок, изготовленных из полимерного материала, с зубцами. Трубки нанизаны на стержни из коррозионно-стойкого материала. Длина активной зоны аппарата 3,5 м. Электрофильтры обеспечивают повышенную степень очистки газов по сравнению с электрофильтрами ШМК.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

Функционирование электрофильтров (ЭФ) характеризуется следующими основными показателями:

1. Степень очистки газов, %; доли единицы (д.ед.) и выходная запыленность г/м³, мг/м³;
2. Гидравлическое сопротивление (перепад давления) по тракту электрофильтра; н/м, кг/м²;

3. Производительность (объем очищаемых газов); м³/час, м³/с;
4. Расход электроэнергии на 1000 м³ час, Дж, кВт/час;
5. Стоимость электрофильтра, руб.;
6. Стоимость очистки газов, рассчитанная на очистку 1000 м³ газов в час, руб.

1.1. Степень очистки газов

Степень очистки газов в значительной мере определяется типоразмером электрофильтра и зависит от физико-химических свойств газов и улавливаемых частиц. Наиболее сильное влияние на степень очистки оказывает удельное электрическое сопротивление улавливаемой пыли, ее дисперсный состав, скорость газов в активной зоне электрофильтра.

Степень очистки газов можно рассчитать несколькими способами:

1.1. По содержанию улавливаемого продукта на входе и выходе электрофильтра:

$$\eta = \frac{G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}}{G_{\text{вх}}} = \frac{Q_{\text{вх}} \cdot Z_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}} \cdot Z_{\text{вых}}}{Q_{\text{вх}} \cdot Z_{\text{вх}}} = 1 - \frac{Q_{\text{вых}} \cdot Z_{\text{вых}}}{Q_{\text{вх}} \cdot Z_{\text{вх}}}, \text{ д. ед.} \quad (1.1)$$

где $G_{\text{вх}} = Q_{\text{вх}} \cdot Z_{\text{вх}}$, $G_{\text{вых}} = Q_{\text{вых}} \cdot Z_{\text{вых}}$.

$G_{\text{вх}}$ – массовый расход улавливаемого продукта на входе в электрофильтр, кг/с;

$G_{\text{вых}}$ – массовый расход улавливаемого продукта на выходе из электрофильтра, кг/с;

$Q_{\text{вх}}$ – объемный расход газов, поступающих в электрофильтр, м³/с;

$Q_{\text{вых}}$ – объемный расход газов, на выходе из электрофильтра, м³/с;

$Z_{\text{вх}}$ – содержание улавливаемого продукта на входе в электрофильтр, г/м³ (н.у.);

$Z_{\text{вых}}$ – содержание улавливаемого продукта на выходе из электрофильтра, г/м³ (н.у.);

(н.у.) – нормальные физические условия – температура – 0°С, давление 101325 н/м².

Если объем очищаемых газов изменяется за счет присосов или выбиваний, то степень очистки газов определяется по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{G_{\text{вх}}}{G_{\text{вых}}} \cdot \alpha; \quad \alpha > 1 - \text{при присосах, } \alpha < 1 - \text{при выбивании} \quad (1.2)$$

Величину α можно определить исходя из концентрации какого-либо газового компонента, не вступающего в аппарате ни в какие реакции, обычно это SO₂, CO₂ и др.

1.2. По содержанию поступающего в электрофильтр и по количеству уловленного в нем вещества:

$$\eta = \frac{G_{\text{ул}}}{G_{\text{вх}}}, \quad (1.3)$$

где $G_{\text{ул}}$ – массовый расход уловленной пыли.

1.3. По количеству уловленного в аппарате продукта и сумме количеств уловленного и выходящего из аппарата продукта:

$$\eta = \frac{G_{\text{ул}}}{G_{\text{ул}} + G_{\text{вых}}} \quad (1.4)$$

Можно сказать, что степень очистки газов есть характеристика аппарата. Однако она зависит не только от степени совершенства и исправности электрофильтра, но и от целого ряда параметров пылегазовой среды. Поэтому величина η исправного электрофильтра имеет смысл только при указании свойств пылегазовой среды, поступающей на очистку.

Выходная запыленность вместе с объемом очищаемого газа определяет количество не уловленного вещества и является одним из параметров, служащих для оценки влияния выбросов на окружающую среду. Связь величин η и $Z_{\text{вых}}$ однозначно определяется формулами (1.1).

Суммарная степень очистки газов последовательно соединенных пылеулавливающих аппаратов:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n), \quad (1.5)$$

где $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ – степень очистки последовательно соединенных аппаратов.

При равенстве степеней очистки в последовательно соединенных полях электрофильтра формула (1.5) имеет вид:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_n)^N, \quad (1.6)$$

где N – количество полей в электрофилт্রে.

Следует отметить, что применение формулы (1.6) для последовательно соединенных полей электрофилтра возможно лишь с определенными допущениями. По причине изменения ряда параметров, в частности физико-химических свойств пыли, (особенно УЭС и дисперсного состава) по длине электрофилтра степень очистки газов, как правило, в последующих полях оказывается ниже, чем в предыдущих, за исключением случаев сильного запыления короны.

При известном фракционном составе пыли на входе электрофилтра и фракционной степени очистки можно определить общую степень очистки по формуле:

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

Возможен также и обратный расчет: по содержанию фракций пыли на входе и выходе определить фракционную и общую степень очистки газов.

1.2. Гидравлическое сопротивление электрофилтров

При движении по каналу происходит необратимый переход части механической энергии потока в тепловую, что приводит к возникновению гидравлических потерь.

Различают два вида гидравлических потерь:

- потери трения, вызванные вязкостью;
- потери местные, вызванные местным нарушением течения потока, (вихреобразование, сужение, расширение и т.п.).

Гидравлическое сопротивление (Δp) определяют по формуле:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho V^2}{2}, \text{ (Н/м}^2\text{)} \quad (1.8)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления;

V – скорость газов, м/с;

ρ – плотность газов, кг/м³;

$\zeta = \frac{\Delta P}{P_{дин}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, равный отношению гидравлического сопротивления к динамическому напору в каком-либо характерном сечении газового тракта.

Величина динамического напора:

$$P_{дин} = \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \text{ Н/м}^2$$

Потери напора на трение зависят от режима течения и состояния поверхности газопровода (шероховатости стенок, наличия внутренних препятствий).

В общем виде потери на трение можно рассчитать по формуле:

$$\Delta p = \lambda \frac{L \cdot \rho V^2}{d_{эКВ} \cdot 2}, \text{ Н/м (может квадрат)}$$

где λ – коэффициент трения;

L – длина газопровода;

$d_{эКВ}$ – эквивалентный диаметр газопровода.

Местные потери также могут рассчитываться. При этом учитываются потери на удар, коэффициенты местных сопротивлений, внезапные и плавные изменения скорости потока, слияние и разделение потоков и т.д. [1, 2].

Величина гидравлического сопротивления электрофилтров обычно не превышает 100–150 Па.

1.3. Производительность электрофилтров

Производительность электрофилтров по газу характеризуется объемом очищаемого газа в м³/час или в м³/с при условно принятой скорости газов в активном сечении электрофилтра, обычно равной 1 м/с. При выражении объема очищаемых газов в м³/с и скорости газа в активном сечении равной 1 м/с производительность численно равна активному сечению электрофилтра. Фактическая скорость газов в электрофилт্রে может существенно отличаться от условно принятой для обозначения производительности и находится примерно в диапазоне 0,3–1,5 м/с в зависимости от требуемой степени очистки газов, свойств пылегазовой среды и конструкции электрофилтра.

1.4. Расход электроэнергии электрофильтрами

Электрическая энергия в электрофильтрах расходуется на создание коронного разряда, на питание электродвигателей механизмов встряхивания, подогрев изоляторов, преодоление газом гидравлического сопротивления:

$$P = \frac{(P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3 + P_4 t_4) \cdot 10^3}{t_1 \cdot Q} ,$$

где P_1 – мощность, потребляемая агрегатами питания;

P_2 – мощность, потребляемая электродвигателями механизмов встряхивания, кВт;

P_3 – мощность, потребляемая электронагревателями, кВт;

P_4 – мощность потребляемая на преодоление гидравлического сопротивления электрофильтра, кВт;

t_1 – расчетный период эксплуатации электрофильтра за 1 год;

$t_2 \dots t_4$ – продолжительность работы соответственно электродвигателя механизма, нагревателя, дымососа.

1.5. Стоимость электрофильтров

Стоимость электрофильтра $C_{эф}$ выражается формулой:

$$C_{эф} = C_0 + C_k + C_{мэ} + C_a + C_{ма} + C_d ,$$

где C_0 – стоимость механического оборудования электрофильтра;

C_k – стоимость корпуса электрофильтра;

$C_{мэ}$ – стоимость монтажа электрофильтра;

C_a – стоимость агрегатов питания и приборов управления ими;

$C_{ма}$ – стоимость монтажа агрегатов питания;

C_d – стоимость электродвигателей механизмов встряхивания осадительных и коронирующих электродов и газораспределительных решеток.

Стоимость постаментов, шатров, газоходов, наружных лестничных переходов и тягодутьевых устройств в стоимость электрофильтров не включают.

1.6. Стоимость очистки газов

Этот показатель состоит из затрат на зарплату, электроэнергию, воду, пар, сжатый воздух, материалы и текущий ремонт, а также амортизацию оборудования и зданий.

1.7. Стоимость установки газоочистки

В эту стоимость, как правило, включают кроме стоимости собственно электрофильтра также стоимость аппаратов подготовки газов, газовых трактов, постаментов зданий, шатров, систем пылетранспорта, тягодутьевых устройств, средств КИП и А и некоторых других устройств.

Таблица 1.1

Эксплуатационные параметры некоторых электрофильтров в различных отраслях промышленности СССР (до 1990 г.)

Наименование предприятий, тип электрофильтров	$\eta_{эф}/\eta_{п}$	$Q_{вх}$	$V_{г}$	$Z_{вх}/$	$\rho_{в}/t_{вх}$	$2H_0$	L/N	L_k	F/S_{oc}	m_0/μ_0	Интерв.встр.		ω
				$Z_{вых}$							о.э.	к.э.	
											τ_1/τ_n	τ_1/τ_n	
	%	тыс.м ³ /час / м ³ /с	м/с	г/м ³	Ом · м ⁰ /С	мм	м/шт.	м	м ² /м ²	кг/м ² /г/м ²	мин.	мин.	см/с
Ярославский завод технического углерода, СГ-15-3	99,9/90	19,9/5,53	0,37	80	0,5x10 ³ /263	300	2,5/3	633	15/825	2,5/42	21 210 2100	3 3 3	19
Рязанский НПЗ СГ-13-3	92,7/58,2	78/21,7	1,44	4,1	0,5x10 ⁶ /352	300	2,5/3	633	15/825	1,7/2,9	100 244 590	3 7 12	3
Ярославский НПЗ СГ-13-3	98,5/75,3	81,3/22,6	1,5	10	2x10 ⁶ /290	300	2,5/3	633	15/825	1,56/4,9	32 150 720	16 62 260	4,9
Спасский цементный завод (сушильный барабан) Ц-23-3ск	98/72,9	42,4/11,8	0,51	153	10 ⁷ /70	330	2,5/3	810	23/612	1,39/14	5 19 72	7 26 100	7,5
Спасский цементный завод ПГДС-24-2	0,94/75,5	120,9/33,6	0,7	55	10 ¹² /180	275	2,5/3	3514	24/1290	0,14/79	3 12	7 30	3,2
Воскресенский цементный завод ГП-75-3	95,2/63,7	318,3/88,4	1,18	10,9	10 ⁸ /400	275	3,0/3	1968	75/	1,14/27	40 100 290	67 180 500	10
Ленинградский цементный завод ГП-45-3	94/60,8	161/44,7	0,99	6,0	10 ⁹ /	300	3,0/3	819	45/1035	0,89/40	20 78 195	150 380 940	12
Косогорский цементный завод ДГПС-55-3	0,90/0,53?	262/72,7	1,3	9,0	10 ⁸	275	2,5/3	3624	55/3720	1,14/27	72 152 348	6 13 30	4,5
Косогорский цементный завод Ц-7,5-2-ск	88,1/50,8	29,7/8,3	0,6-1,5	12,0	4,8x10 ⁹	-	2,4/2	500	7,5/136	0,72/50	16 48	500 1500	12,9
Цементный завод «Пролетарий» ДГПН-35-3	86,5/48,7	147,4/41	1,17	5,3	2·10 ¹⁰ /250	-	3,3/3	2100	35/1116	0,56/45	30 80 150	625 1200 2300	7,3
Цементный завод «Пролетарий» ПГД-4-50	99,6/74,8	270/75	1,5	19	1,7·10 ¹¹ /250		2,5/4	3168x3	55/4396	0,33/63	4 15 56 216	817 3100 11400 4400	9,4

Наименование предприятий, тип электрофильтров	$\eta_{эф}/\eta_{п}$	$Q_{вх}$	$V_{г}$	$Z_{вх}/Z_{вых}$	$\rho_{в}/t_{вх}$	$2H_0$	L/N	$L_{к}$	$F/S_{ос}$	m_0/μ_0	Интерв.встр.		Ω
											о.э.	к.э.	
											τ_1/τ_n	τ_1/τ_n	
%	тыс.м ³ /час / м ³ /с	м/с	г/м ³	Ом · м ⁰ /С	мм	м/шт.	м	м ² /м ²	кг/м ² /г/м ²	мин.	мин.	см/с	
Сланцевский цементный завод ПГДС-24-3	98,1/73,3	149/41,4	1,72	72	10 ¹²	275	3,25/3	1757	24/1935	0,14/79	3 3 7	50 220 800	8,5
Липецкий цементный завод УГ-2-4-53	99,4/0,722	227/63	1,2	200	10 ¹¹	275	2,5/4	3000	53/2397	0,39/66	3 3 12	3 3 12	13,4
Цементный завод «Октябрь» ДВПЗх25	72/72	257,4/71,5	1,43	7,4	0,5·10 ¹¹ /185	275	7	2436	2·25/2397	0,46/62	400	680	3,3
Брянский цементный завод ОВ2х30	99,2/99,2	194,4/54	1,08	19,4	10 ¹² /135	350	9	4760	2·25/3740	0,14/79	360	600	7,0
Николаевская ТЭЦ ДВП4х20	67,0/67,0	299,5/83,2	1,04	38,6	0,5·10 ¹⁰ /166	350	7	8800	4·20	0,72/49	40	300	3,7
ТЭЦ автозавода г.Кутаиси ДГПН2х28	96,4/81,0	110,9/30,8	1,1	43,5	0,8·10 ⁹ /160	275	3,25/2	4323	28	0,91/39	372	200	7,9
Костромская ГРЭС ЭГЗ-3-120	81/42,5	864/240	2,0	0,14	0,5·10 ⁸ /355	350	2,5/3	4400х3 16400	120/3·2030	1,2/23	4300 7400 13000	12000 12000 12000	0,5
Ладыжинская ГРЭС УГЗ-3-177	96,5/67,3	1127/313	1,78	16,3	10 ⁹ /169	275	4/3	48966	177/18500	0,89/40	150 480 1500	300 900 2700	5,7
Эстонская ГРЭС ПГДС4-70	90/43,8	456/126,7	1,81	26,7	2,5·10 ¹¹	275	2,74/4	4191х4	70	0,29/71	5,4 9,2 16	314 534 907	4,5
Троицкая ГРЭС ПГДС42Х4	90/43,8	377/140,7	2,5	25	10 ¹¹	275	1·4+3· 2,5	3440	48	0,39/66	5 8 13	75 127 217	6,0
Рефтинская ГРЭС «Лурги»	95/		1,2	55	10 ¹²	300	4,5/3	2170	221,5/1860	0,14/79	3	30	3,9
СУМЗ УГТ1-30-3	80,7/42,2	3,8/10	0,35	8	10 ¹¹	260	2,46·3	1400	30	0,39/66	85 145 247	180 300 500	1,0
Криворожский ЮГОК ПГДС-3-38	54/23	250/69	1,83	0,6	10 ¹³	275	2,9·3	2065	38	0,1/90	-	-	-
Качканарский ГОК ДВПН-3х25	92,6/92,6	394/109	1,46	1,0	4·10 ¹²	350	7,6	4526	75	0,1/90	180	180	7,2
Таджикский алюминиевый завод УВ2х24	90,8/90,8	242/67	1,4	0,18	10 ⁹	275	7,38	3510	48	0,89/40	240	240	6,1
Чимкентский фосфорный завод ЖФП-7м	98,4/87,3	12,6/3,5	0,5	4,8	10 ¹²	300	5,77	695	7	0,14/79	-	-	6,6

Обозначения параметров в таблице 1.1 следующие:

$\eta_{эф}$ – степень очистки газов электрофильтром;

η_n – степень очистки газов полем электрофильтра;

Q – объем очищаемых газов;

V_r – скорость газов в активном сечении электрофильтра;

$Z_{вх}$ – запыленность газов на входе в электрофильтр;

ρ_v – удельное электрическое сопротивление пыли;

$t_{вх}$ – температура газов на входе в электрофильтр;

$2H_0$ – расстояние между одноименными электродами в электрофильтре;

L – длина поля;

N – количество полей;

L_k – суммарная длина коронирующих элементов;

F – активное сечение электрофильтра;

$S_{ос}$ – площадь осаждения;

m_0 – пылеемкость осадительных электродов;

μ_0 – пылеемкость коронирующих электродов;

τ_1/τ_n – интервалы встряхивания электродов по полям;

ω – скорость дрейфа.

Таблица 1.2

Технические характеристики электрофильтров [6]

Параметр	Тип электрофильтра			
	УГ	ЭГА	ЭГБ(ЭГБМ)	ЭГВ(ЭГВМ)
Проведение МВИ	1967 г.	1980 г.	1986 г.	1988 г.
Межэлектродное расстояние, мм	275	300	350	460
Активная высота электродов, м	4; 7,5; 12	6; 7,5; 9; 12	6; 7,5; 9; 12	6; 7, 5; 9; 12; 15
Активное сечение, м ²	10-265	16-285	16-285	10-364
Производительность при условной скорости 1 м/с, м ³ /ч	36000-954000	57600- 1026000	57000-1026000	36000-1360000
Число электрических полей	2-4	2-4	2-5	2-8
Максимальные габаритные размеры, м				
высота	27,75	19,90	19,90	22,90
длина	24,80	22,74	28,20	48,60
ширина	29,87	29,54	29,54	35,75
Номинальное (амплитудное) напряжение питающих агрегатов, кВ	80	80	80, 110	110
Степень очистки газов	98-99	98-99	98-99	99-99,9*

*При оптимальном встряхивании осадительных электродов

Таблица 1.3.
Результаты испытаний некоторых промышленных электрофильтров

Тип ЭФ, режим	Ладыжинская ГРЭС		Рефтинская ГРЭС		Сланцевский цем. завод		Воскресенский цем. завод		Ярославский НПЗ		
	ЭГЗ-3-177		«Лурги»		ПГДС-24-3		ГП-75-3		СГ-15		
	Режим встряхивания		Режим встряхивания		Режим встряхивания		Режим встряхивания		Режим встряхивания		
Параметры	До опти- миз.	После оптимиз.	До опти- миз.	После оптимиз.	До опти- миз.	После оптимиз.	До опти- миз.	После оптимиз.	До опти- миз.	После оптимиз.	
	Скорость газа в активной зоне ЭФ, м/с	1,4	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1,3	1,3	1,4	1,4
Запыленность на входе, нг/м ³	18,0	18,0	56,0	55,0	34,7	34,7	25,0	25,0	15,0	15,0	
Запыленность на выходе, нг/м ³	0,043	0,17	2,7	1,9	1,6	1,2	0,62	0,23	0,3	0,15	
Степень очистки, %	97,5	99,0	95,1	98,5	95,0	96,0	96,3	98,5	98,0	99,0	
Пылеемкость осадительных электро- дов по полям	0,07	0,86	0,1	0,1	0,1	0,14	0,03	1,1	0,9	1,5	
	0,02		0,03		0,04		0,012		0,2		
Интервал встряхивания осадительных электродов по полям, мин.	3,3	40	3,3	3,3	3,3	4,7	0,75	25	30	48	
	3,3	138	3,3	9,0	3,3	14	0,75	70	30	122	
	3,3	478	3,3	39	3,3	33	0,75	200	30	1020	
Коэффициент вторичного уноса при встряхивании осадительных электродов	0,75	0,92	0,80	0,88	0,77	0,86	0,68	0,93	0,86	0,96	
Электрический режим: ток/напряжение, мА/кВ											
	1 поле	800/32	940/31	1310/32	1320/32	75/50	75/50	41/49	41/49	50/51	50/51
	2 поле	644/31	800/32	1228/31	1290/31	110/47	110/47	57/54	57/54	60/50	60/50
	3поле	760/33	900/32	1290/29	1310/30	119/44	119/44	50/60	50/60	120/49	120/49

Таблица 1.4.
Эксплуатационные параметры электрофильтров при сжигании основных углей
на энергоблоках отечественных ТЭС

Тип	Электростанция,	Параметры					
		Температура, °С	Скорость газов в активн. зоне, м/с	Время пребывания, с	Напряжение, кВ	Входная запыленность, г/м ³	Степень очистки, %
	Троицкая ГРЭС Блок 300 МВт (до реконструкции 6 ЭФ ПГД-3-38ПБЦ)	150	2,45	3,06	33	55	87,5
	Реконструкция – установка электродов высотой 12 м, суммарное активное сечение 228 м ²	150	1,65	4,7	36	55	96,5
Экибастузский	Блок 500 МВт 2 ЭФ ЭГЗ-4-265 (без кондиционеров)	160	1,7	9,4	30,0	55	96,0
		130	1,7	9,4	33,5	55	97,5
		120	1,7	9,4	36,0	55	98,0
		105	1,7	9,4	38,0	55	99,0
	(при снижении температуры избыточным воздухом)	100	1,4	11,4	40,0	55	99,3
	(при кондиционировании аммиаком)	160	1,7	9,4	36,7	55	99,5
	Рэфтинская ГРЭС Блок 500 МВт 2 ЭФ ЭГЗ-4-265 2 ЭФ УГЗ-5-265 (проект)	130-	1,7-	9,4-	--	55-	97,8-
ГРКузнецкий	Черепетская ГРЭС Блок 300 МВт 4 ЭФ ДГПС-55-3	160	2,3	4,3	35,0	17,4	91,8
Донецкий АШ	Трипольская ГРЭС Блок 300 МВт 4 ЭФ УГ2-4-53	150	2,5	4,0	38,0	25	96,4
Березовский	Ачинск ТЭЦ УГ2-4-53	155	1,5	6,7	45,0	4,5	97,8
Назаровский, Ирша-Бородинский	Назаровская ТЭЦ УГ2-453	140	1,9	5,3	45,0	7,5	98,1
Ангренский	Ново-Ангренская ГРЭС Блок 300 МВт 2 ЭФ УГ№-4-230 (проект)	-	-	-	-	-	-
Ангренский	ДГПНИ-91х3	195	1,8	5,5	33,0		97,0

Таблица 1.5

Характерные рабочие параметры электрофильтров для промышленности США [3,4,5]

Тип установки	Расход газа, м ³ /ч	Концентрация пыли, г/м ³		Степень очистки, %	Потребляемая мощность, Вт/10 ³ м ³
		на входе	на выходе		
<i>1. Электростанции</i>					
Котлы на угольной пыли	275000	13,16	0,163	98,67	115,6
То же	245000	10,95	0,062	99,43	131,6
Котлы-утилизаторы	85000	16,80	0,58	96,6	140,4
Котлы по сжиганию лигнита в слоевой механической топке	400000	1,6-2,0	0,017-0,037	98,15	120,4
Котлы на угольной пыли по сжиганию лигнита (молотковые мельницы)	1600000	4,63	0,16	96,5	40,1
<i>2. Угольная промышленность</i>					
Паровая барабанная сушилка для лигнита	29000	35,24	0,28	99,25	30,0
То же	26000	18,31	0,090	99,40	28,1
Паровая тарельчатая сушилка для лигнита	25000	7,87	0,063	99,20	25,0
Сушилка для лигнита, работающая на дымовых газах	42000	14,40	0,110	99,50	50,1
Мельничная сушилка для лигнита	40000	25,1	0,332	98,67	80,2
Обеспыливание в системе подачи лигнита	20500	54,7	0,278	99,40	20,0
Паровая трубчатая сушилка для каменного угля	43000	16,30	0,086	99,50	70,2
Обеспыливание в системе подачи каменного угля	11000	22,4	0,150	99,30	290,9
Дробильная установка каменноугольного кокса	4800	13,85	0,056	99,59	300
<i>3. Переработка каменного угля:</i>					
Торфяной газогенератор	4500	5,34	0,008	99,85	702
Крекинг – установка для природного газа	8700	0,224	0,002	99,20	120,4
Генераторный газ из буроугольных брикетов	13000	37,7	0,20	99,7	652
Генераторный газ из полубитуминозного лигнита	48000	28,7	0,1	99,7	602
Установка по очистке сланцевого газа	33980	40,0	0,006	99,98	903
Очистка коксового светильного газа	3100	24,15	0,010	99,96	903
То же	2300	17,0	0,03	99,9	1605
Очистка коксового газа	14000	28,0	0,078	99,8	752
Очистка замащенного водяного газа	12000	4,73	0,039	99,2	1404
Очистка насыщенного дегтем водяного пара	4000	10,0	0,050	99,5	1805
<i>4. Целлюлозно-бумажная промышленность:</i>					
Установка по обжигу шелока натроне-вой варки	132500	2,84	0,13	95,3	265
<i>5. Цементная промышленность:</i>					
Вращающаяся печь (сухой способ), 500 т/сут.	136000	2,84	0,13	95,3	265
	(0,5-1м/с)*	20,7	0,193	99,06	90,3
Вращающаяся печь для обжига (сухой способ), 470 т/сут.	127000	6,33	0,074	98,85	30,0
	(0,8-1м/с)*				
Вращающаяся печь (мокрый способ), 350 т/сут.	145000	21,3	0,067	99,68	85,5
	(1,2-1,5м/с)*				
Вращающаяся печь с кальцинатором (мокрый способ), 350 т/сут.	145000	11,0	0,24	98,2	100
	(0,5-0,9м/с)*				
Вертикальная печь	125000	1,8	0,048	97,3	90,3
Сушилка для сырого материала	36000	49	0,119	99,75	471
Цементная мельница	24000	51,3	0,085	99,8	450,8
Упаковочная машина	15000	37,7	0,110	99,7	471

<i>6. Химическая промышленность:</i>					
Печь для обжига пирита, 25 т/сут.	9500	3,22	0,047	98,5	683
то же, 29 т/сут.	11000	2,10	0,037	98,3	802
то же 35 т/сут.	13000	1,20	0,0036	99,7	962
то же 36 т/сут.	14000	4,11	0,036	93,5	552
Кислотный туман из печи сжига- ния серы, 7,5 т/сут.	2500	6,88	0,041	99,4	802
Туман серной кислоты за башен- ным холодильником	4300 (1,2-1,5 м/с)**	12,3	0,063	99,5	953
То же	5000 (1,2-1,5 м/с)**	7,57	0,070	99,1	729
Печь для обжига фосфорита	15530	5,13	0,075	98,5	513
Удаление тумана мышьяковой и серной кислоты	14000	2,71	0,000005	99,99	856
Отходящий газ для обогащения серной кислоты	23500	12,37	0,05	99,6	360
Элементарные пары серы из уста- новки по сжиганию сероводорода	4300	25,8	0,20	99,2	1700
<i>7. Обработка минерального сырья и солей:</i>					
Сушилка для бокситов, 180 т/сут.	20000	15,5	0,05	99,96	115
Печь для обжига и обработки бок- ситов, 220 т/сут.	44000	5,0	0,06	98,8	180
Кальцинатор глинозема с много- циклонным предочистителем, 45 т/сут.	14500	300	0,03	99,99	465
Сушилка для хлорида калия	29000	8,0	0,08	99,0	190
Сушилка для фуллеровой земли	30000	4,32	0,02	99,54	210
<i>8. Цветная металлургия:</i>					
Вертикальная доменная печь: свинцовая руда	10000	12,0	0,66	99,5	220
То же	16000	6,35	0,15	97,5	190
Обработка во вращающейся печи: цинковые руды	7000	40	0,44	98,9	200
То же	12500	13,2	0,061	99,53	160
Вертикальная доменная печь: оло- вянные руды	9700	5,0	0,034	99,29	180
То же	3600	6,85	0,10	98,70	240
Вертикальная доменная печь: сурьмяные руды	6200	3,77	0,007	99,8	421
Конверторы для выплавки меди	14500	4,53	0,136	97,0	70,2
Вращающаяся печь для железных руд, содержащих никель	45000	27,7	0,065	99,76	270

*

**

Таблица 1.6
Ориентировочные параметры электрофильтров типа ЭСГ для ТЭС

Мощность энергоблока	ячейки, м	Объем очища- емых газов	Типоразмер электрофильтра	Габариты электрофильтра			
				длина	ширина	высота	
150	24	0,9x10 ⁶ /250	ЭГСЭ1-30-15-4...6-(4,5,6,)	4-6 полей	10,8	18,5	2
200	36	1,2x10 ⁶ /333	ЭГСЭ1-40-15-4...6-(4,5,6,)	4-6 полей	14,0	18,5	2
300	48	1,8x10 ⁶ /500	ЭГСЭ1-56-15-4...6-(4,5,6,)	4-6 полей	19,9	18,5	2
500	60	2,9x10 ⁶ /805	ЭГСЭ1-76-18-4...6-(4,5,6,)	4-6 полей	25,9	21,5	2
800	72	4,5x10 ⁶ /1252	ЭГСЭ1-88-24-4...6-(4,5,6,)	4-6 полей	32,0	30,0	2

Для обеспечения выбросов золы из электрофильтров не более 50 мг/м³ при улавливании золы с неблаго-приятными физико-химическими свойствами скорость газов в активном сечении электрофильтров должна быть дополнительно снижена.

Глава 2

НАЧАЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АЭРОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Аэродисперсными системами – аэрозолями (аэрозоль от греческого $\alpha\epsilon\rho$ – воздух и немецкого Sol – золь–коллоидный раствор – коллоидная система) называют коллоидные системы, состоящие из газовой среды, в которой взвешены твердые или жидкие частицы. Коллоидные системы занимают промежуточное положение между истинными растворами и грубодисперсными системами – суспензиями и эмульсиями. К аэрозолям относят пыли, туманы, дымы.

2.1. Начальные сведения о свойствах аэрозолей

Пыль – система, включающая твердые частицы, образующиеся в процессах измельчения или путем распыления порошков. Частицы состоят из исходного материала; их размеры находятся в диапазоне от субмикронных до микроскопических (10^{-3} – 10^3 мкм.).

Туман – система, включающая частицы жидкости, образующиеся при конденсации пара или при распылении жидкости. В этом случае в капельках могут содержаться растворенные вещества или твердые частицы. Частицы тумана мелкие, обычно меньше микрона. В зарубежной литературе к туманам нередко относят частицы, образующиеся в результате горения, сублимации (переход из твердого вещества в газообразное, минуя стадию жидкости), дисциляции (перегонки) [1]. Типичными представителями туманов считают выбросы металлургических заводов, содержащих оксиды металлов PbO, Fe₂O₃, ZnO и др.

Дым – устойчивая дисперсная система, состоящая из мелких твердых частиц, находящихся во взвешенном состоянии в газах. Дым – типичный аэрозоль с размером твердых частиц от 0,1 до 10 мкм. Дым содержит частицы, образующиеся при некоторых процессах окисления, например, при горении.

Нередко четкого разграничения между указанными группами аэрозолей нет.

В 19-м веке аэрозоли занимали важное место в науке. Интеллектуальные гиганты того времени Тиндаль, Кельвин, Максвелл, Эйнштейн уделяли изучению аэрозолей большое внимание, так как в то время **это были** мельчайшие частицы вещества. Однако с открытием радиоактивности и развитием квантовой механики вектор исследований отвернулся от аэрозолей. Как утверждает П. Райст [1], «Наука об аэрозолях – это нелюбимая падчерица физики или, может быть, физической химии и только в настоящее время она начинает «расцветать» и возбуждать к себе заслуженный интерес».

Проблемы, связанные с аэрозолями, вновь привлекли внимание научной общественности после Второй мировой войны. Это связано с развитием ядерной энергетики и глобальным загрязнением атмосферы техногенными отходами.

Вероятно, в связи с надвигающейся экологической катастрофой в ближайшие десятилетия следует ожидать притока средств и научных сил в область охраны природы и, в частности, экотехники – отрасли, занимающейся техническими средствами для улучшения среды обитания человека.

Успешное улавливание аэрозолей из газов с помощью инерционных аппаратов, фильтров, мокрых аппаратов, электрофильтров возможно только при условии основательного знания свойств улавливаемых частиц. В противном случае пылеуловители будут использоваться неудовлетворительно (степень очистки будет недостаточной либо затраты на газоочистку будут чрезмерно большими).

Размеры частиц. Одна из основных характеристик частиц – их размеры.

Наглядное представление о размерах частиц можно получить с помощью рис. 2.1, где показано применение оптических методов определения дисперсности [2].

Аэрозоли, встречающиеся в природе и в промышленности, как правило, полидисперсны, т.е. состоят из частиц различного размера. Для характеристики их размеров могут использоваться математические и графические методы. Некоторые первоначальные сведения о размерах частиц можно получить из рис. 2.1 и таблиц 2.1, 2.2.

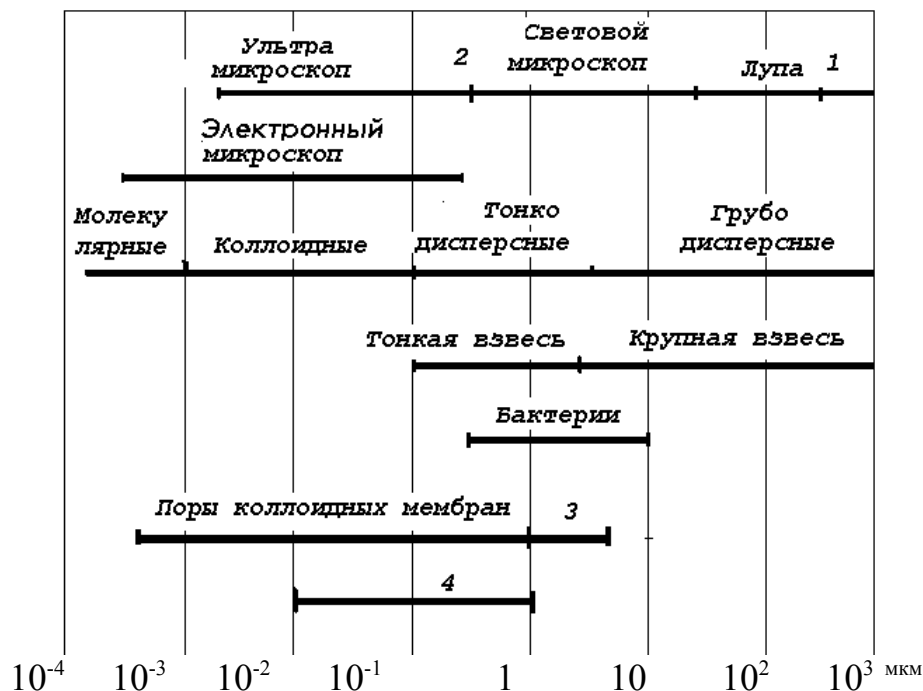


Рис. 2.1. Границы размеров частиц дисперсных систем и применения оптических методов определения дисперсности: 1 – глаз; 2 – ультрафиолетовый микроскоп [2]

Для сравнения показан размер пор бумажных фильтров (3) и пор ультрафильтров (4).

Таблица 2.1
Размеры некоторых аэрозольных частиц [3]

Вид аэрозольных частиц	Размер, мкм
Атмосферная пыль	0,97
Зола от сжигания пылевидного угля	5 – 10
Морской туман	38
Мучная пыль на мельницах	15 – 20
Нефтяной дым	0,1 – 0,005
Пыль окиси цинка	0,5
Сажа: ламповая / газовая	0,15 / 0,06
Табачный дым	0,015 – 0,001
Туман смол в генераторном и коксовом газе	0,1 – 0,001
Туман серной кислоты	1,1 – 0,16
Угольная пыль (в среднем)	10
Цементная пыль в размольных установках из газов вращающихся печей	7 – 10
- мокрый способ	10 – 15
- сухой способ	6 – 8

Таблица 2.2
Количество пыли, образующейся в некоторых отраслях промышленности [2]

Источник образования газов	Средняя концентрация взвешенных частиц, г/м ³	Содержание взвеси по отношению к готовому продукту масс, %
Газификация топлив		
Генераторы:		
– для бурого угля (пыль)	5 – 50	2,5 – 25
– для бурого угля со швельшахтой (смолы и масла)	20 – 35	4 – 6
Котельные установки		
Котлы:		
– со слоевыми топками	1,5 – 5	4 – 8*
– с камерными топками для пылевидного топлива	6 – 40	2 – 20*

Металлургическая промышленность		
Конвертеры:		
– для выплавки стали с продувкой кислородом сверху	20 – 40	1 – 5
– для переработки меди	6 – 10	3 – 6
Печи:		
– доменные	10 – 40	4 – 16
– шахтные и отражательные для выплавки свинца и олова:		
– мартеновские	3 – 20	3 – 12
– без подачи кислорода в ванну	1 – 2	0,15 – 0,3
– с подачей кислорода в ванну	10 – 15	1,5 – 2,5
– для плавки латуни	1 – 5	2 – 4
Обработка угля		
– мельницы	20 – 50	2 – 3
– сушилки:		
– для бурого угля	12 – 25	6 – 12
– для каменного угля	10 – 20	3 – 5
Сушильные установки		
– сушилки:		
– для извести и гипса	5 – 20	4 – 20
– для хлористого калия	5 – 20	3 – 8
– для руд и на установках кальцинации	30 – 100	10 – 25
Химическая промышленность		
– концентраты серной кислоты	6 – 20	1,5 – 6,0
– печи:		
– механические для обжига колчедана	2,5 – 5,0	3 – 6**
– для обжига пылевидного колчедана	20 – 80	20 – 80**
– для обжига колчедана в кипящем слое	50 – 200	-
– сажевые (и сажевые генераторы)	20 – 30	100
Цементная промышленность		
– вращающиеся печи:		
– при мокром способе производства	20 – 50	6 – 15
– при сухом способе производства	30 – 60	8 – 20
сушилки для сырья	20 – 80	8 – 26
цементные мельницы	20 – 50	3 – 6
Электрические печи		
– карбидные	0,9 – 2,0	1 – 2
– для выплавки стали	2 – 10	1,5 – 7
– для выплавки алюминия	0,5 – 1,6	0,5 – 1,5
– фосфорные	2,1 – 9,0	0,5 – 2,5

* От количества сжигаемого угля

** От количества сжигаемого колчедана

В связи с разнообразием формы частиц их размеры приходится характеризовать с помощью различных параметров: ячейки сита, длины стороны, наибольшего размера проекции частицы, диаметра описывающей окружности (который точно может охарактеризовать лишь сферическую частицу) и целого ряда других величин.

Наиболее простая характеристика частиц – с помощью среднего диаметра (средне-арифметическое значение):

$$d_{cp} = \frac{\sum n_i \cdot d_i}{\sum n_i}, \quad (2.1)$$

где n_i – число частиц диаметра d_i .

Другой характеристикой частиц может быть медианный диаметр d_{50} – размер частиц, при котором масса всех частиц в анализируемой пыли мельче или крупнее d_{50} составляет 50 %. Медианное распределение может определяться также величиной скорости оседания частиц [4].

Для характеристики содержания доли мелких и крупных частиц (σ) используются величины диаметров $d_{15,9}$ и $d_{84,1}$. Это диаметры частиц, при которых масса всех частиц меньше $d_{15,9}$ и $d_{84,1}$ составляет соответственно 15,9 и 84,1 % от общей массы частиц данной пробы:

$$\sigma = \frac{d_{84,1}}{d_{50}} = \frac{d_{50}}{d_{15,9}} \quad (2.2)$$

Величины, входящие в выражение (2.2) – диаметры частиц, соответствующие проходам 84,1; 15,9 и 50 %, находятся из графиков функции распределения.

Возможна и обратная операция – зная медиану распределения d_{50} и σ – можно из отношения (2.2) вычислить $d_{15,9}$ и $d_{84,1}$ и построить на логарифмически вероятностной сетке график функции распределения.

Величины d_{50} и σ – параметры пыли, которые используются в методиках для расчета эффективности электрофильтров.

Необходимо, однако, отметить, что указанные параметры пыли не являются исчерпывающими показателями. Различные формулы, выражающие функции распределения частиц, приведены в ряде монографий [5-9] используются для более полной характеристики пыли.

Многие случайные явления (процессы) происходят при соблюдении определенных закономерностей, описываемых законом нормального распределения вероятностей случайной величины (рис. 2.2). Это распределение может быть описано математически. Например, с использованием двух параметров:

\bar{d} – среднее значение;

σ – стандартное отклонение

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} n_i \cdot d_i}{\sum_{i=0}^{\infty} n_i}; \sigma = \left[\frac{\sum_{i=0}^{\infty} n_i (\bar{d} - d_i)^2}{\sum_{i=0}^{\infty} n_i - 1} \right]^{0.5} \quad (2.3)$$

К сожалению, этими зависимостями могут быть охарактеризованы лишь некоторые аэрозоли.

Практически оказывается, что распределение большинства аэрозолей можно привести к виду нормально-го распределения, если вместо размеров частиц использовать их логарифмы (рис. 2.2).

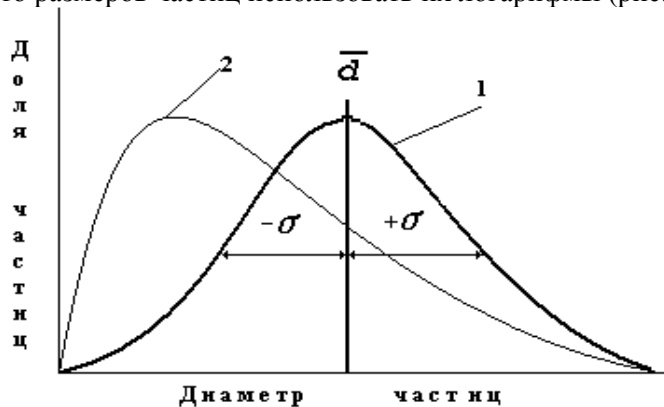


Рис. 2.2. Распределение частиц по размерам

1 – нормальное распределение; 2 – логарифмически-нормальное распределение

По аналогии с формулами (2.3) среднее значение стандартного отклонения будет определяться следующим образом:

$$\lg d_g = \frac{\sum n_i \cdot \lg d_i}{\sum n_i}; \lg \sigma_g = \left[\frac{\sum n_i (\lg d_g - \lg d_i)^2}{\sum n_i - 1} \right]^{0.5}, \quad (2.4)$$

где: d_i – средний геометрический диаметр;

σ – стандартное геометрическое отклонение.

В качестве примера вычислим d_g для данных таблицы 2.3.

Таблица 2.3

Пример вычисления среднего геометрического диаметра d_g

Интервал	d_i	n_i	$\lg d_i$	$n_i \cdot \lg d_i$
1-2	1,5	30	0,176	5,283
2-3	2,5	20	0,398	35,815
3-5	4,0	50	0,602	30,103
5-10	7,5	20	0,875	17,501
10-20	15,0	10	1,176	11,761
		$\Sigma = 130$		$\Sigma = 100,463$

$d_g = \lg^{-1}(100,463/129) = 10^{0,779} = 6,01$ мкм.

В таблице 2.4 приведен пример вычисления стандартного геометрического отклонения.

Таблица 2.4.

d_i	n_i	$\lg d_g - \lg d_i$	$n_i(\lg d_g - \lg d_i)^2$
1,5	30	0,326	3,195
3,5	90	0,104	0,983
4,0	50	-0,100	0,496
7,5	20	-0,373	2,777
15,0	10	-0,674	4,538
	$\Sigma = 200$		$\Sigma = 11,983$

$$\sigma = \lg^{-1}[11,989/199]^{0,5} = 10^{0,245} = 1,757.$$

Методы дисперсного анализа можно разделить на три группы в зависимости от получаемой характеристики дисперсности [6]:

- по массе фракций;
- по числу частиц во фракциях;
- по условным усредненным показателям (например, воздухопроницаемость, скорость растворения и др.).

В практике газоочистки широкое распространение получила седиментометрия, использующая принцип седиментации (отмучивание, измерение плотности суспензии, пофракционное осаждение, накопление осадка, отбор весовых проб, электрофотоседиментация).

При анализе пылей, улавливаемых в аппаратах газоочистки, широко используются методы жидкостной седиментации.

Седиментация – свободное осаждение частиц в вязкой среде под действием гравитационного поля. Скорость оседания пропорциональна ускорению гравитационного поля Земли (g), разности плотностей частиц и окружающей среды, квадрату радиуса оседающих сферических частиц и обратно пропорциональна вязкости среды (закон Стокса, 1880 г.).

Седиментируют только достаточно крупные частицы. Так, частицы кварца диаметром 5 мкм оседают в воде за один час на 3 см. Седиментации одномоночных и более мелких частиц препятствует броуновское движение.

Существует целый ряд методов анализа дисперсного состава пыли, находящейся непосредственно во взвешенном состоянии [4]. При этом может использоваться седиментация, инерционное осаждение, центробежная сепарация, оптическое и электронное микроскопирование, фотометрическое измерение рассеивания света и др. В качестве параметра, характеризующего размер частиц при седиментации, может использоваться стоксовский диаметр частиц, геометрический их размер, косвенные показатели.

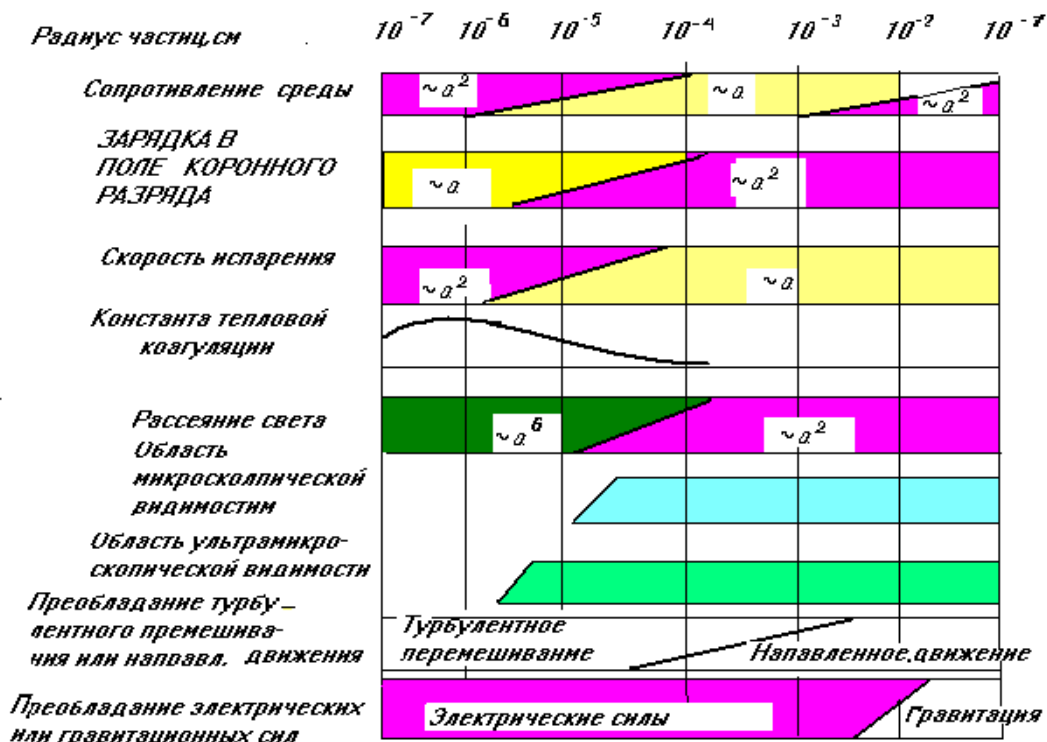


Рис. 2.3. Изменение свойств аэрозоля в зависимости от размера частиц

Графическое изображение дисперсного состава пыли представляется обычно в виде, показанном на рис. 2.3 с использованием логарифмически вероятностной координатной сетки.

Рис. 2.3 построен для данных, приведенных в таблице 2.5.

Таблица 2.5
Табличная форма характеристики размера частиц

Y, (% фракции)	12	27	40	50	60	75	82	87	91
X, (размер частиц)	5	10	15	20	30	40	50	70	85
lgX	0,69	1,0	1,18	1,30	1,48	1,60	1,70	1,84	1,93

Используя данные таблицы 2.5, параметры дисперсного распределения частиц можно определить аналитически. Аппроксимирующее уравнение имеет вид $Y = -3,62 + 66,5 \lg X$, откуда следует:

$X(d_{50}) = 20 \text{ мкм}$; $\sigma_{cp} = 3.58$.

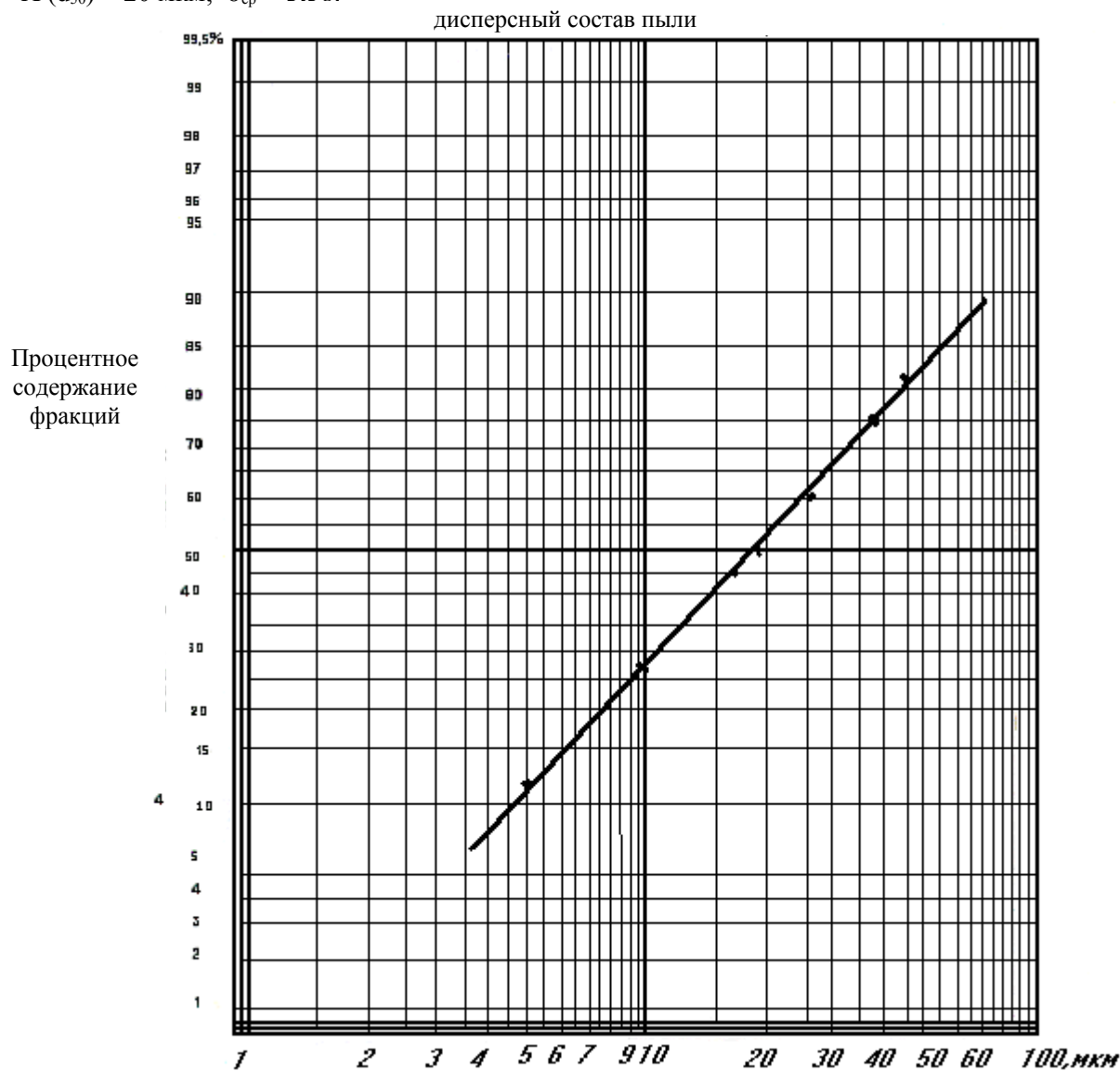


Рис. 2.4. Дисперсный состав золы, уловленной электрофильтром УГЗ-3-177

Изменения в характере законов, определяющих поведение аэрозолей, могут быть проиллюстрированы с помощью рис. 2.4 [8, 9].

На улавливаемость частиц оказывает существенное влияние их коагуляция. Частицы с противоположным зарядом коагулируют быстрее, чем нейтральные, а нейтральные быстрее, чем частицы с одноименным зарядом.

Методы измерения размеров частиц и пределы их применимости можно систематизировать, например, следующим образом:

Таблица 2.6

Метод	Диапазон размеров, мкм.
Микроскопический метод (оптический)	0,25 - 1000
Ситовой анализ: - стандартные сита - микросита	> 40 > 5
Седиментация: - в жидкости и поле силы тяжести - в центрифугах	0,5 – 100 0,05 – 50
Ультрамикроскопия: - по скорости осаждения - использование поточного ультрамикроскопа	0,1 – 10 0,05 – 10
Импульсный метод	0,2 – 300
Оптический метод: - по свету, рассеянному частицей - по форме импульса при прохождении частицы через щель	0,05 – 10 > 5

Форма частиц разнообразна. Она изменяется от шарообразной до пластинчатой и игольчатой. Частицы сложной формы приходится эквивалентировать, заменяя их, например, шаром.

Дисперсный состав пыли может быть представлен в табличной форме (таблица 2.7), где фракция – массовая доля частиц с размерами в указанном интервале.

Таблица 2.7

№ фракции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Размер частиц, мкм	0-5	>5-10	>10-15	>15-20	>20-30	>30-40	>40-50	>50-70	>70-85	>85-100	>100
Содержание, %	12	15	13	10	10	15	7	5	4	2	7

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) и диэлектрическая проницаемость пыли.

При улавливании пыли в электрофильтрах важное значение имеют УЭС пыли и диэлектрическая проницаемость частиц.

УЭС пыли определяет время стекания заряда со слоя пыли. Величина УЭС зависит от величины объемной и поверхностной проводимости, а также от свойств и количества контактов частиц при их осаждении на электроды. Обычно УЭС пылей, улавливаемых в электрофильтрах, находится в диапазоне 10^2 – 10^{12} Ом·м.

Диэлектрическая проницаемость частиц изменяется в диапазоне от 2-х – для хороших диэлектриков и до бесконечности – для проводников. Диэлектрическая проницаемость частицы определяет ее поляризацию в электрическом поле и влияет на заряд и ориентацию частиц при движении их в межэлектродном промежутке электрофильтра.

Относительная диэлектрическая проницаемость (электрическая постоянная) ϵ – величина, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме.

В изотропной среде, где свойства не зависят от направления – ϵ связана с диэлектрической восприимчивостью χ соотношением $\epsilon = 1 + 4\pi\chi$.

Диэлектрическая **проницаемость зависит от частоты поля**; в сильных электрических полях ϵ начинает зависеть от величины напряженности поля.

Величина диэлектрической проницаемости вакуума в системе СИ составляет:

$$\epsilon = \frac{1}{4\pi C^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \quad , \quad \phi / м$$

где C – скорость света в вакууме.

$$\delta = 1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \quad ,$$

где δ – показатель диэлектрических свойств частицы.

Относительная диэлектрическая проницаемость равна:

– для газов при 0°C близка к единице (воздух – 1,00059; водяной пар при $100,0^\circ\text{C}$ – 1,006);

– для жидкостей при 20°C :

- для воды – 81;
- для спирта – 26;
- для масла трансформаторного – 2,2;

- для твердых веществ:
 - гипс – 5;
 - кварц, сера – 5;
 - металлы - ∞ ;
 - лед (при 10°С:) – 70;
 - окислы металлов – 12 – 18;
 - резина – 3 – 6 ;
 - стекло – 6,6 – 10,0;
 - фарфор – 4,4 – 6,8;
 - янтарь – 2,8.

2.2. Начальные сведения о газе

Аэрозоль – взвесь частиц в газовой среде, без которой он не существует. Для изучения свойств аэрозолей необходимо рассмотрение свойств газа. Представляет интерес первоначально рассмотреть свойства газа на основе поведения микроскопических (молекулярных) частиц. С помощью этого можно проанализировать скорости молекул, длину их свободного пробега, внутреннее трение, теплопроводность, диффузию.

Для изучения свойств аэрозолей необходимо знать, что согласно молекулярно-кинетической теории газов перенос массы, энергии и импульса в среде определяется соответственно диффузией, теплопроводностью и внутренним трением.

Основные положения, на которых базируется кинетическая теория газов, следующие:

- газ состоит из очень большого количества молекул;
- молекулы малы по сравнению с расстоянием между ними и находятся в постоянном движении;
- в периоды между столкновениями молекулы перемещаются прямолинейно;
- молекулы имеют форму шара, кроме упругих столкновений, других взаимодействий не имеют. Упругие столкновения происходят без потери энергии.

Среднюю скорость молекул газа V_m (по Бернулли) можно вычислить зная давление P и плотность газа ρ :

$$V_m = (3 P/\rho)^{0.5}$$

Так, например, скорость молекулы воздуха при 20°С и давлении 760 мм рт. ст. составит:

$$P = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1013 \text{ мбар}; \rho = 1,21 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$$

$$501 \cdot 10^2 \text{ см/с} = 501 \text{ м/с}$$

Средняя длина свободного пробега молекулы определяется как расстояние, которое молекула проходит в газе до очередного столкновения с другой молекулой.

Среднюю длину свободного пробега можно оценить, используя следующие простые соображения [1].

Рассмотрим перемещение молекулы вдоль оси трубки диаметром $2d$, где d – диаметр молекулы (рис. 2.5).

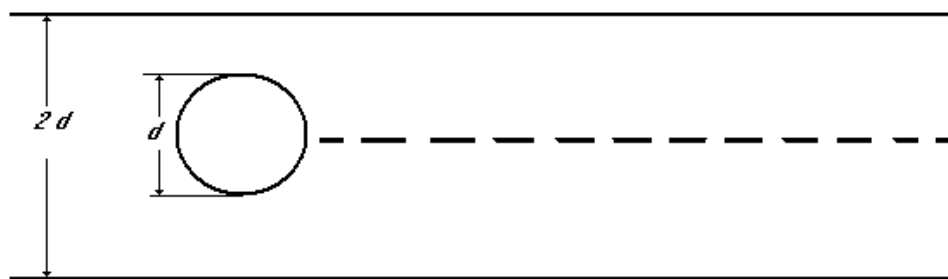


Рис. 2.5. К вычислению среднего свободного пробега молекулы [1]

Молекула столкнется со всеми молекулами, центры которых лежат на расстоянии d от осевой линии трубки, и не коснется других молекул. Пусть молекула переместится на расстояние l см. Тогда она пройдет по объему $4\pi d^2/4 \times l$ см. Если в единице объема находится n молекул, то количество молекулярных столкновений на пути в l см будет равно $n\pi d^2 l$, а средний пробег между столкновениями составит $\lambda = l/n\pi d^2$.

Если учесть, что скорости молекул не одинаковы и подчиняются максвелловскому распределению, то в формулу для средней длины свободного пробега войдет коэффициент $\sqrt{2}$, тогда

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot n\pi d^2}$$

Диаметр молекулы азота N_2 равен 3,6 А°, кислорода 3,4 А°, водорода 2,9 А°.

Средний пробег молекулы азота при 0°С составит:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 269 \cdot 10^{19} \cdot \pi(3,6 \cdot 10^{-8})^2} = 0,065 \text{ , мкм}$$

С точки зрения молекулярно-кинетической теории внутреннее трение, теплопроводность и диффузия в газах связаны соответственно с переносом импульса, энергии и массы. Коэффициент диффузии газа отражает способность одной молекулы перемещаться относительно окружающих ее молекул, и, чем больше коэффициент диффузии, тем выше скорость этого перемещения. Коэффициент диффузии для газов можно вычислить по формуле:

$$D = 6\mu / 5\rho \text{ ,}$$

где μ – коэффициент внутреннего трения (вязкости) газа,
 ρ – плотность газа.

Оба параметра в этой формуле в единицах СГС.

Величина среднего свободного пробега указывает на то, что перенос импульса, энергии или массы происходит на расстоянии λ . В стационарном состоянии суммарный перенос равен нулю. Процессы переноса всегда протекают таким образом, что состояние системы стремится к стационарному.

Направление процессов переноса:

1. Диффузия – из области с высокой концентрацией частиц в область с низкой концентрацией.
2. Перенос тепла – от горячих областей к холодным.
3. Перенос импульса – от быстро движущихся слоев к более медленным.

2.3. Интегральные свойства движущегося газа

В предыдущем разделе были рассмотрены свойства газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Представляет интерес поведение газов с учетом согласованного взаимодействия пылевых частиц и газа друг с другом. Для учета влияния потока газа на движение пылевой частицы используется число Рейнольдса (Re), характеризующее соотношение инерционных сил и сил вязкости. При больших числах Re инерционные силы внутреннего трения будут больше, чем силы вязкости, поток газа становится турбулентным. При малых Re ламинарный поток является результатом преобладания сил вязкости. В этом случае линии тока газа остаются в основном непрерывными. При промежуточных значениях чисел Re в любой момент поток может быть ламинарным или турбулентным.

Если считать среду несжимаемой и пренебречь силами тяжести, то основными силами, действующими в системе, будут инерционные силы, связанные с ускорением (замедлением) небольших масс газа вблизи тела – силы трения, возникающие благодаря вязкости среды. **Вязкость (внутреннее трение) – свойство газа (жидкости) оказывать сопротивление перемещению одной части относительно другой.**

Количественно вязкость характеризуется величиной η – коэффициентом динамической вязкости. Напряжение трения τ (сила трения), действующая на единицу площади поверхности слоя, удовлетворяет закону Ньютона (Δ) для многих веществ (растворы полимеров, дисперсные системы и др.) Однако гипотеза Ньютона справедлива не для всех сред (неньютоновские жидкости):

$$\tau = \eta \frac{dv}{dn} \text{ ,}$$

где dv/dn – градиент скорости, изменение скорости течения при удалении на расстояние dn от поверхности слоя в перпендикулярном к нему направлении.

Вязкость газа в основном определяется тепловым движением молекул, при котором они переходят из одних слоев в другие. Вязкость газов увеличивается с ростом температуры.

Величину $1/\eta$ называют текучестью, а $\nu = \eta/\rho$ – кинематической вязкостью, где ρ – плотность.

В системе единиц СИ вязкость измеряют в Па·с, а ν – в м²/с, в системе СГС ν – в ст. (в стоксах), η – в П (пуазах).

$$\frac{\text{Инерционная сила}}{\text{Сила вязкости}} = \frac{\rho \cdot V^2 / d}{\mu \cdot V / d^2} = \frac{V d \rho}{\mu} = \text{Re} \text{ ,}$$

где ρ – плотность среды;

V – относительная скорость среды и частицы;

d – диаметр тела;

μ – кинематическая вязкость среды.

Динамическая вязкость среды – коэффициент пропорциональности между скоростью и силой трения.

Кинематическая вязкость – отношение коэффициента динамической вязкости к плотности среды (см. табл. 2.8).

Таблица 2.8

Динамическая вязкость, плотность и кинематическая вязкость воздуха ($\rho = 760$ мм рт. ст.).

Параметры	0° С	20° С	Единицы измерения
Динамическая вязкость	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$1,83 \cdot 10^{-4}$	П (г/см с)
Плотность	0,001293	0,001205	г/см ³
Кинематическая вязкость	0,132	0,152	Сг (см ² /с)

Таблица 2.9

Значения Re для различных типов течения

Условия движения Тип потока	Сфера диаметром d в неподвижной среде	Среда, текущая, в трубе диаметром d
Ламинарный	Меньше 1	Больше 2100
Промежуточный	1 – 1000	2100 – 4000
Турбулентный	Больше 1000	Больше 4000

При допущении, что основными силами, действующими в системе «сфера – газ»; «газ – труба», являются силы инерции и силы трения (и при допущении, что среда несжимаема и пренебрежении силой тяжести) получим:

Таблица 2.10

Значения Re для движущейся сферы диаметром d в неподвижном газе






Тип потока	Re	Рисунок потока
Ламинарный	Меньше 1	
Промежуточный	1 ... 1000	
Турбулентный	Больше 1000	

Таблица 2.11.

Значения Re для газа, текущего в трубе диаметром d

Тип потока	Re	Рисунок потока
Ламинарный	Меньше 2100	
Промежуточный	2100 ... 4000	
Турбулентный	Больше 4000	

Сопrotивление, оказываемое средой движению частиц аэрозоля

Для «ньютоновских жидкостей» среду можно рассматривать состоящей из большого числа частиц – материальных точек. Эти частицы неподвижны и не связаны между собой. Движущаяся частица будет передавать им часть своего импульса.

В зависимости от типа потока газа молекулы могут получать импульс от аэрозоля или сообщать ему импульс с задней стороны. Края аэрозоля могут испытывать также взаимодействие молекул, и следует учитывать не только площадь проекции тела, а всю его поверхность.

Существует три вида сопротивления среды, которые зависят от характера движения тела через среду:

- деформационное или вязкостное сопротивление. Эта деформация среды может происходить на значительных расстояниях от тела впереди и сзади от него;
- сопротивление трения на поверхности тела;
- сопротивление давления, обусловленное сжатием среды.

Два последних вида представляют «поверхностное трение» тела. При малых числах Рейнольдса преобладает деформационное сопротивление. В этом случае сопротивление среды обусловлено в основном площадью проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению потока жидкости.

При больших числах Рейнольдса результаты подхода Ньютона согласуются с экспериментальными данными.

Уравнение для сопротивления среды записывается как:

$$F_D = C_D \cdot A \rho_m \cdot V^2$$

Если использовать член $V^2/2$ (подобный члену уравнения Бернулли, содержащему скорость), то

$$F_D = C_D \cdot A \rho_m \cdot (V^2/2) ,$$

где C_D – коэффициент сопротивления среды;

ρ_m – плотность среды.

Для сферы диаметром d : $A = (\pi/4)d^2$, тогда $F_D = 0,125 C_D \pi \rho_m A \rho_m d^2 V^2$.

Пример. Скорость движения частицы диаметром d , плотностью ρ под действием постоянной силы (например, тяжести) можно рассчитать следующим образом. При постоянной скорости осаждения имеем:

$$F_D = F_G, mg = C_D \cdot A \rho_m \cdot V^2 ,$$

для сферы $\pi/6 d^3 (\rho_p - \rho_m)g = C_D \pi/4 \rho_m (V^2/2)$,

$$V^2 = \frac{4 \cdot d(\rho_p - \rho_m)g}{3C_D \rho_m}$$

Для упрощения расчетов при определении величины C_D можно воспользоваться экспериментальной зависимостью $C_D = f(Re)$

Таблица 2.11
Экспериментальная зависимость $C_D = f(Re)$

Re	C_D	Re	C_D
0,1	240	100	1,07
0,2	120	200	0,77
0,3	80	300	0,65
0,5	49,5	500	0,55
0,7	36,5	700	0,5
1	26,5	1000	0,46
2	14,6	2000	0,42
3	10,4	3000	0,40
5	6,9	5000	0,385
7	5,3	7000	0,390
10	4,1	10000	0,405
20	2,55	20000	0,45
30	2,0	30000	0,47
50	1,5	50000	0,49
70	1,27	70000	0,5

Движение в вязкой среде. Закон Стокса.

При выводе закона движения частицы Стокс принял следующие допущения для среды:

- непрерывность;
- несжимаемость;
- вязкость;
- бесконечность.

При использовании этих допущений Стокс установил, что сила сопротивления, оказываемая воздухом движению сферической частицы, соответствует силе, действующей на неподвижную частицу при движении воздуха, т.е. $F = 3\mu Vd$,

где F – сила;

μ – вязкость среды;

V – относительная скорость среды и частицы;

d – диаметр сферы.

Пример. Сферическая частица плотностью 1 г/см^3 и диаметром 1 мкм движется в воздухе со скоростью 100 см/с . Вычислить силу сопротивления, оказываемую воздухом, при 20°C и 760 мм рт. ст.

$$F = 3 \mu Vd = 3 \cdot 3,14 \cdot 1,83 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 \cdot 10^{-4} = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ дин.}$$

Для крупных частиц основное сопротивление оказывает вязкость среды, тогда как для мелких частиц или при очень низкой вязкости среды преобладающим механизмом сопротивления не является вязкость среды

по причине роли молекул газа при столкновении их частицами. Когда размеры частиц приближаются к молекулярным, сила сопротивления среды становится функцией сечения частицы в соответствии с моделью Ньютона для лобового сопротивления.

Для учета этого эффекта в уравнение Стокса вводят поправку Каннингема C_c :

$$F = 3\pi\mu Vd/C_c$$

Величина поправки Каннингема равна или больше 1; она вводится для частиц диаметром менее 1 мкм. Величины C_c для различных диаметров приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12
Поправка Каннингема для частиц различного диаметра

Диаметр, мкм	10	1,0	0,1	0,01	0,001
C_c	1,018	1,176	3,015	23,775	232,54

Поправка C_c учитывает переход от вязкого течения к молекулярному. Для больших значений d величина F пропорциональна d . Для малых d сила F пропорциональна d^2 .

Хотя воздух сжимаем в области Стокса, его можно рассматривать как несжимаемую среду. При выводе закона Стокса предположение об абсолютной вязкости среды обозначает отсутствие сил инерции. Такое предположение было сделано для получения линейного уравнения Навье-Стокса. Если при этом используется приближение первого порядка, то закон Стокса можно применить при значениях числа Рейнольдса до 5. Тогда сила сопротивления может быть выражена следующим образом:

$$F = 3\pi\mu Vd (1 + 3/16) Re$$

При $Re > 50$ закон Стокса даже с этой поправкой не применим.

При перемещении частицы в вязком потоке на большое расстояние возникает возмущение среды. Присутствие других близко движущихся частиц приводит к эффекту ослабления сопротивления среды из-за уплотнения около движущейся частицы. Поэтому группа частиц будет оседать быстрее, чем отдельные изолированные частицы. Когда две частицы одного размера падают вдоль одной оси, то верхняя частица движется быстрее, чем нижняя, и возможно их столкновение. Если частицы имеют разные диаметры, то в результате аэродинамического взаимодействия между двумя частицами скорость осаждения будет возрастать. Когда нижняя частица меньше верхней, возрастание ее скорости будет больше.

При оценке скорости осаждения взаимодействием между частицами обычно пренебрегают, поскольку расстояние между ними, за редким исключением, относительно велико.

Глава 3

ПРОЦЕСС УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ ИЗ ГАЗОВ В ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЕ

Процесс улавливания пыли из газов в электрофилт্রে происходит непрерывно, однако, для удобства его можно условно разделить на следующие стадии:

1. Зарядка взвешенных частиц;
2. Движение заряженных частиц к электродам;
3. Осаждение частиц на электродах (примерно 99 % пыли осаждается на осадительных электродах и около 1 % – на коронирующих);
4. Удаление осевших частиц с электродов;
5. Транспорт и утилизация уловленной пыли.

Последняя стадия происходит за пределами активной зоны электрофилтра. Однако неудовлетворительное ее решение может свести на нет все предыдущие стадии улавливания частиц или даже, в некоторых случаях, усугубить вредное действие уловленного продукта.

3.1. Зарядка взвешенных частиц

Образование заряда на частицах происходит в результате следующих процессов:

1. **Прямая ионизация частиц.** Эффект этой ионизации почти не изучен. Он зависит от массы аэрозолей. Их масса по сравнению с массой воздуха, в которой они взвешены, мала. Поэтому заряд на частицах обусловлен абсорбцией ионов воздуха. В целом роль прямой ионизации не существенна.

2. **Статическая электризация.** Этот процесс объясняется следующими пятью процессами:

– **Электролитические эффекты.** Жидкие растворы с высокой диэлектрической проницаемостью обмениваются ионами с металлическими или другими твердыми веществами. Например, капли жидкости с большой диэлектрической проницаемостью, стекая с металла, уносят с собой значительный заряд. Возможно, этот механизм играет большую роль, хотя это окончательно не установлено. Диэлектрические проницаемости некоторых материалов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Диэлектрические проницаемости при температуре 20⁰ С (в ед. СИ)

Метиловый спирт	31
Этиловый спирт	24,3
Вода	78
Стекло	5-10
Воздух	1
Поливинилхлорид	3,3-4,5

– **Контактная электризация.** При этом процессе электроны с чистой поверхности металлов, находящихся в соприкосновении, перемещаются внутрь металла с **более низкой работой выхода электронов.**

– **Электризация при распылении жидкостей.**

В верхнем слое жидкостей с высокой диэлектрической проницаемостью благодаря действию поверхностных сил, возрастает концентрация электронов и отрицательных ионов. При распылении мелкие капли несут значительный отрицательный заряд, крупные – положительный или нейтральный.

– **Электризация трением.** Заряды могут образовываться при взаимодействии частиц между собой или частиц с поверхностями. При взаимодействии двух веществ наиболее вероятно, что положительный заряд получит материал, в таблице 3.2 выше, а отрицательный, ниже.

Таблица 3.2

(+)	Асбест
	Стекло
	Кварц
	Свинец
	Гипс
	Цинк
	Медь
	Серебро
	Кремний
	Сера
(-)	

При прохождении аэрозолей через незаземленный газопровод на нем может накопиться значительный заряд, приводящий к искрам. При повышенной влажности (более 50-60 %) электризация трением снижается.

– **Ионизация в пламени.** В пламени присутствуют положительные ионы. Вопрос о преобладании отрицательных ионов и свободных электронов в пламени является проблематичным. Наличие в пламени частиц вещества (например, сажи) существенно увеличивает заряд [8].

3. **Столкновение с ионами** (в присутствии внешнего электрического поля и без него).

Это наиболее изученный вид ионизации частиц. Ионы образуются в воздухе (газе) при присоединении положительных или отрицательных зарядов, возникающих за счет энергии α -, β -, γ -лучей, а также различного рода электрических разрядов.

Зарядка происходит двояко:

– за счет диффузионного процесса (теплого движения молекул газа) в отсутствие внешнего электрического поля;

– за счет направленного движения ионов в электрическом поле.

Эти механизмы зарядки могут действовать по отдельности или совместно. Скорость зарядки в электрическом поле выше, чем при диффузионном процессе. Для очень мелких частиц диффузионная зарядка играет большую роль даже в присутствии внешнего электрического поля. При теоретическом изучении обоих механизмов зарядки принимают [1] следующие допущения:

– частицы сферические;

- частицы монодисперсные;
- частицы между собой не взаимодействуют;
- около каждой частицы концентрация ионов и электрические поля однородны.

Диффузионная зарядка

При диффузионной зарядке частицы заряжаются униполярными ионами (ионами одного знака) в отсутствии приложенного электрического поля.

Столкновение ионов с частицами – результат хаотического теплового движения ионов, а броуновским движением самих частиц обычно пренебрегают.

В 1963 г. Уайт опубликовал [2] теорию диффузионной зарядки на основании молекулярно-кинетической теории.

При столкновении иона с частицей ион прилипает к частице. В результате таких столкновений заряд на частице накапливается. Этот заряд создает электрическое поле, в результате действия которого процесс зарядки замедляется.

Количество ионов, сталкивающихся со сферической частицей диаметром d за единицу времени, равно [1]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{NC}{4}(\pi d^2) = \frac{\pi d^2}{4} NC, \quad (3.1)$$

где N – количество ионов, находящихся у частицы;

C – среднеквадратичная скорость ионов.

В соответствии с молекулярно-кинетической теорией плотность ионов в потенциальном поле изменяется по закону:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (3.2)$$

где N_0 – средняя концентрация ионов;

W – потенциальная энергия иона на расстоянии R от центра частицы, содержащей n элементарных зарядов того же знака, выражается в виде:

$$W = -\frac{ne^2}{R}.$$

Концентрация ионов на поверхности частицы равна:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{2ne^2}{dkT}\right) \quad (3.3)$$

Из уравнения (3.1) и (3.3) получаем скорость изменения числа ионов:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\pi}{4} d^2 C N_0 \exp\left(-\frac{2ne^2}{dkT}\right) \quad (3.4)$$

Если частица не имеет первоначального заряда, интегрирование уравнения (3.4) дает следующее количество элементарных зарядов:

$$n = \frac{dkT}{2e^2} \ln\left(1 + \frac{\pi C N_0 e^2 t}{2kT}\right), \quad (3.5)$$

если характерное время зарядки определить как:

$$t' = \frac{2kT}{\pi d C N_0 e^2}, \quad (3.6)$$

уравнение (3.5) можно записать:

$$n = \frac{dkT}{2e^2} \ln\left(1 + \frac{t}{t'}\right) \quad (3.7)$$

Тогда характерный заряд определяется уравнением:

$$n' = \frac{dkT}{2e^2},$$

а уравнение (3.7) в безразмерном виде будет:

$$\frac{n}{n'} = \ln\left(1 + \frac{t}{t'}\right),$$

откуда следует, что величина заряда сильно зависит от размера частиц и относительно не чувствительна к времени и концентрации ионов.

Зарядка частиц в электрическом поле

В отличие от диффузионной зарядки, зарядка в электрическом поле происходит в потоке униполярных ионов. При попадании незаряженной частицы в поток движущихся ионов она начинает накапливать заряды вследствие осаждения на ней газовых ионов. По мере увеличения заряда частицы ее поле все сильнее искажает окружающее электрическое поле и скорость ее зарядки снижается. Зарядка крупной частицы продолжается до того момента, при котором суммарное поле у ее поверхности приближается к нулю. Максимальный заряд частицы [14]:

$$q_m = ne = 4\pi\epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E_3 r^2 = 4\pi\epsilon_0 r^2, \quad (3.8)$$

где n – число элементарных зарядов;

e – величина заряда электрона, $K.e = 1,6 \cdot 10^{-19}$;

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная) Ф/м:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,85 \cdot 10^{-12},$$

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость вещества частицы;

δ – показатель диэлектрических свойств частицы

$$\delta = 1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}, \quad (3.9)$$

E_3 – напряженность электрического поля коронного разряда в месте нахождения частицы, В/м;

r – радиус частицы, м.

Величина относительной диэлектрической проницаемости при выполнении расчетов может быть принята для: газов – 1; кварц, сера – 4; гипс – 5; окислы металлов – 12 – 18; металлы – ∞ .

Для проводящей частицы $\delta = 3$, а для диэлектрической частицы $\delta = \frac{3\epsilon}{\epsilon + 2}$.

Зарядка большой частицы выражается уравнением:

$$q = q_m \frac{\pi r N_0 e \tau}{4\pi\epsilon_0 + \pi r N_0 e \tau}, \quad (3.10)$$

где τ – время заряда частиц.

В практике электрической очистки газов для средних условий коронного разряда $k = 2 \cdot 10^4 \left(\frac{M/c}{\epsilon/M}\right) N_0 = 10^{14}$ ионов/м³ время зарядки до 90 % от максимального значения составляет примерно 0,1 с.

Для малых сферических частиц, $r < 1$ мкм, можно считать, что отток ионов из разрядного промежутка на частицу незначителен. Поэтому общее уравнение диффузии имеет вид:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{e\eta}{k_\delta T}\right), \quad (3.11)$$

где k_δ – постоянная Больцмана, Дж/град;

T – абсолютная температура, °К;

N_0 – начальная концентрация ионов коронного разряда.

Для обычно встречающихся в практике условий ($t = 150$ – 400 °С, $N_0 = 10^{14}$ ионов/м³) уравнение для количества элементарных зарядов для субмикронной частицы будет иметь вид:

$$n \approx 2 \cdot 10^8 \cdot r^2$$

Таким образом, заряд частицы более 1 мкм пропорционален r^2 , а размером менее 1 мкм пропорционален r .

В электрическом поле электрофилтра крупные частицы заряжаются ионами, движущимися под действием сил электрического поля, а мелкие частицы ионами, участвующими в тепловом движении газовых молекул.

Практически процесс ударной зарядки преобладает для частиц диаметром 0,2 мкм. Для частиц диаметром 0,2 – 0,5 мкм зарядка происходит ударным и диффузионным способом.

При невысокой концентрации пыли в межэлектродном промежутке зарядка частиц происходит в соответствии с уравнением (3.10).

При высокой запыленности практически все ионы газа оседают на частицах и заряды переносятся лишь медленно движущимися частицами, ток короны становится близким к нулю. В этом случае максимальный заряд равен предельному:

$$Q_m = q_{np} = \frac{N_0 e}{z} \quad (3.12)$$

Ориентировочно считается [15], что $z_{зап} = 1,2 \cdot 10^3 \delta_{ч}$,

где $z_{зап}$ – запыленность, при которой начинается запыление короны, кг/м³;

δ – среднеарифметический диаметр частицы, м.

Образование ионов в поле коронного разряда

Наиболее широко для зарядки аэрозольных частиц используется электрическое поле с коронным разрядом. Для этого электроды должны иметь такую конфигурацию, при которой создается резко неравномерное электрическое поле. Например, проволока-цилиндр. При возрастании разности потенциалов между электродами настает момент, когда в непосредственной близости от проволоки произойдет электрический пробой, сопровождающийся свечением – коронным разрядом. При этом можно выделить две характерных зоны:

Активная зона (зона чехла короны), где происходит столкновение ионов, покидающих коронирующий провод с молекулами газа. При достаточной скорости ионов их столкновение с молекулами приводит к возникновению дополнительных ионов. Вновь образовавшиеся ионы также ускоряются и при столкновениях создают новые ионы. Данный процесс порождает большое количество ионов одного знака, покидающих зону чехла короны и устремляющихся к противоположному электроду.

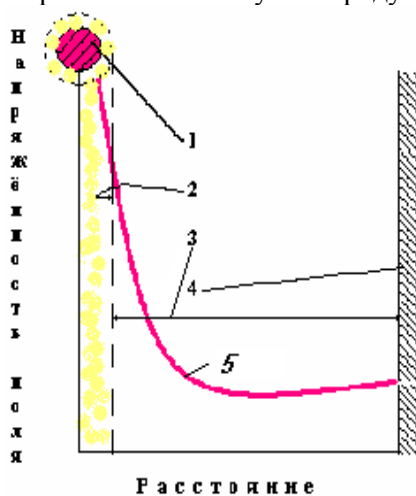


Рис. 3.1. Зоны короны и изменение напряженности в межэлектродном промежутке
1 – коронирующий электрод; 2 – активная зона; 3 – пассивная зона;
4 – внешний заземленный электрод; 5 – зависимость напряженности от координаты

Пассивная зона – это все межэлектродное пространство за исключением зоны чехла короны. Здесь ионы движутся по силовым линиям и присоединяются к газовым молекулам.

При этом образуется облако медленно движущихся ионов с зарядами того же знака, что и у коронирующего электрода (объемный заряд). Корона может быть отрицательной и положительной. Ионы, двигаясь к пассивному электроду создают для аэрозольных частиц поле униполярной зарядки. Концентрация ионов в этом поле составляет величину порядка $10^7 - 10^9$ см³.

Для различных **газов** **сродство** к электрону различное и подвижности ионов сильно отличаются, поэтому характеристики короны различны.

Отрицательная корона создает на коронирующем проводе отдельные очаги свечения, положительная – непрерывное свечение.

В электрофилтрах для очистки промышленных газов используют отрицательную корону. Она более стабильна по сравнению с положительной. Ею можно управлять при более высоких напряжениях и токах до появления искрового разряда, что важно для повышения эффективности электрофилтров.

При коронном разряде образуются озон и оксиды азота, причем при положительной короне их существенно меньше, что позволяет его использовать для очистки воздуха помещений, не причиняя вреда здоровью человека, хотя степень очистки при этом ниже.

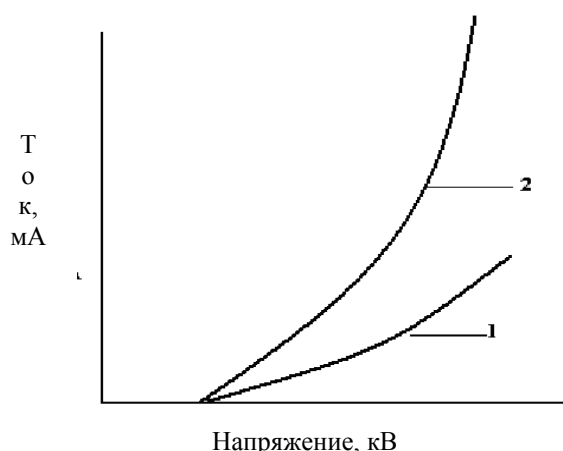


Рис. 3.2. Вольтамперные характеристики
1 – положительная корона; 2 – отрицательная корона

Плотность зарядов в области низкой напряженности поля зависит от подвижности ионов, которая в свою очередь зависит от состава ионизируемого газа.

Азот, водород, инертные газы при ударной ионизации поглощают очень мало электронов, поэтому объемные заряды в этих газах – электроны. Так как подвижность электронов велика, ток короны будет большим.

Кислород, водяной пар, двуокись серы, углекислый газ обладают высоким сродством к электрону, поэтому почти все отрицательные ионы являются газовыми ионами. Эти газы называют электроотрицательными. Ток короны для них относительно невысок.

Зарядка частиц в поле коронного разряда

Подвижность ионов (κ) – это скорость (ω_n), получаемая ими в электрическом поле при напряженности поля (E), равной единице.

$$\omega_n = \kappa \cdot E$$

В единицах СИ E – В/м; κ – (м/с) (м/Вс) = м²/Вс; ω_n – м/с.

Подвижность ионов в чистых газах высока и может составлять, например, для чистого азота – $144 \cdot 10^4$ м/с.

Добавление малейшего количества примесей в чистые газы снижает подвижность примерно на два порядка. Скорость отрицательных ионов несколько выше, чем положительных.

Для сухого воздуха скорость ионов составляет: $\omega_{n-} = 2,1 \cdot 10^4$; $\omega_{n+} = 1,32 \cdot 10^4$.

Для воздуха при температуре 25⁰С $\omega_{n-} = 1,58 \cdot 10^4$, подвижность ионов возрастает с увеличением температуры газов и снижается при увеличении давления.

$$\kappa_{(T)} = \kappa \cdot 101325 \text{ Т/р} ,$$

где T – К⁰; p – н/м²; κ – подвижность ионов м²/Вс.

Реальная скорость движения ионов в электрофилтрах составляет 60 – 100 м/с.

Механизм электризации аэрозолей

Для изучения улавливания аэрозолей в электрофилтре важно знать распределение зарядов по аэрозольным частицам и скорость движения заряженных частиц в электрическом поле.

Сила, действующая на заряженную аэрозольную частицу

Введем заряженный монодисперсный аэрозоль между горизонтальных пластин, имеющих однородное электрическое поле. Наблюдение за частицами покажет, что одни частицы двигаются вниз (падают), другие перемещаются вверх, третьи находятся в подвешенном состоянии. Поведение частиц иллюстрирует, что электрическое поле действует как силовое поле, наложенное на гравитационное поле. Величина и направление электрической силы \vec{F} , действующей на частицу, зависит от вектора напряженности электрического поля \vec{E} заряда частиц q с учетом знаков.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \tag{3.13}$$

Величина заряда частицы может быть выражена следующим образом:

$$q = n \cdot e ,$$

где n – количество элементарных зарядов;
 e – элементарный заряд (заряд электрона);
 $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ ед. заряда СГСЭ или $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кулон (СИ).

Таким образом, перемещение частицы в электрическом поле определяется двумя параметрами – напряженностью поля и величиной ее заряда. Скорость частицы в электрическом поле при напряженности поля, равной единице, называют подвижностью (ω_n):

$$\omega_n = k \cdot E.$$

Подвижность частицы диаметром 10 мкм плотностью 1 г/см³, содержащей 100 элементарных зарядов, составит:

$$\omega_n = \frac{qC_e}{3\pi\mu d} = 0,028 \quad , \text{ см/с (СГСЭ)} \quad (3.14)$$

Зная подвижность частицы и напряженность электрического поля, легко определить действующую на нее электрическую силу. Напряженность в электрофилт্রে зависит от координат и времени:

$$\vec{E} = \vec{E}(x,y,z,t) ,$$

кроме того частицы имеют разные величины зарядов.

Поэтому точный расчет траектории сложен. Однако, исключив влияние t , можно оценить скорость аэрозоля с помощью формулы (3.14), если известны q и \vec{E} .

3.2. Движение заряженных частиц в электрическом поле

Электрическая сила, действующая на частицу, определяется величиной ее заряда и величиной напряженности поля в месте нахождения частицы. Здесь уместен пример, характеризующий единство законов природы.

Сравним электрическую задачу о движении заряда q в однородном электрическом поле напряженностью E с механической задачей о движении массы m в поле тяжести Земли, имеющей ускорение свободного падения тел (аналог напряженности электрического поля) g [3].

Таблица 3.1

Параметры	Поле тяжести Земли	Однородное электростатическое поле
Величина, определяющая свойства взаимодействия тела	Масса, m	Заряд q
Величина, определяющая свойства поля	Ускорение свободного падения, g	Напряженность E
Сила, действующая на тело	mg	qE
Уравнение движения $ma = \sum \vec{F}$	$ma = mg$	$ma = qE$
Ускорение	$a = g$	$a = qE \cdot 1/m = a_3$
Скорость	$V = gt$	$V = qE \cdot 1/m t = a_3 t$
Путь	$S = \frac{1}{2} gt^2$	$S = \frac{1}{2} m qEt^2 = \frac{1}{2} a_3 t^2$

В системе СГСЭ за единицу заряда выбрали такой заряд, который действует в вакууме на равный ему заряд на расстоянии в 1 см с силой в 1 дину.

Таким образом, в формуле:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^3} r , \quad k = 1$$

В этом случае единица заряда является производной от трех единиц, принятых в механике (сантиметр, грамм, секунда), а размерность единицы заряда $\text{см}^{1/3} \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}$. Это абсолютная электростатическая единица заряда. В системе СИ положение несколько иное. Дополнительно к механическим единицам (метр, килограмм, секунда) вводится еще одна основная единица – Ампер. В этой системе заряд измеряется в Кулонах.

1 Кулон = $3 \cdot 10^9$ единиц заряда СГСЭ.

Коэффициент в формуле (3.15) не равен единице

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (3.15)$$

Если F – в Ньютонах, то $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ кг/Нм².

Два точечных заряда в 1 К, на расстоянии 1 м друг от друга взаимодействуют с силой $9 \cdot 10^9$ Н.

Величина заряда электрона :

– в системе СГСЭ $4,8 \cdot 10^{-10}$;

– в системе СИ $1,6 \cdot 10^{-19}$.

Напряженность поля можно характеризовать количеством силовых линий, проходящих через единичную, перпендикулярную им площадку.

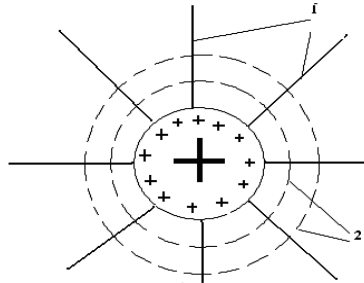


Рис. 3.3. Одиночный заряд.

1 – силовые линии изолированной заряженной частицы;
2 – эквипотенциальные сферические ортогональные поверхности

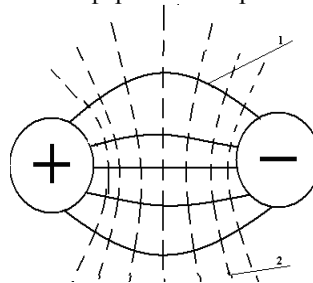


Рис. 3.4. Разноименные заряды.

1 – силовые линии разноименно заряженных аэрозольных частиц;
2 – эквипотенциальные ортогональные поверхности не являются сферическими

Проводящая частица заряжена отрицательно, если она имеет избыточное количество электронов (элементарных отрицательных зарядов). Эти заряды, взаимно отталкиваясь, удаляются друг от друга и располагаются на тончайшей внешней поверхности частицы, отделяющей ее от внешней непроводящей среды.

Если проводящая частица заряжена положительно (имеет недостаток электронов), то на ее поверхности находятся атомы, лишенные части электронов, т.е. ионы.

Так как внутри частицы положительно заряженные ионы, притягивая к себе свободные электроны, нейтрализуются, то на поверхности остаются только атомы, частично лишенные своих электронов. Таким образом, положительные заряды также сосредотачиваются на поверхности частицы.

Число силовых линий, пересекающих единичную площадку, называют потоком или индукцией через эту площадку.

Напряженность поля точечного заряда

Поток силовых линий (индукция) через произвольно ориентированный элемент поверхности ∂s равен $\partial\Phi = \vec{A} \cdot \partial s$, тогда суммарный поток через поверхность, ограничивающую заряд, будет:

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot \partial s = 4\pi r^2 / E = \gamma q \quad ,$$

где γ – коэффициент пропорциональности, зависящий от системы единиц.

Закон Кулона

Сила взаимодействия между частицами, имеющими заряды q_1 и q_2 , при нахождении зарядов в вакууме равна:

$$F = q_1 \cdot E_2 = \frac{q_1 q_2}{r^2} \gamma = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot k \quad , \text{ (в ед. СИ)}$$

Вычисление величины электрического поля нередко производится с помощью теоремы Остроградского–Гаусса. (В общем виде эта теорема была сформулирована М.В. Остроградским (1801–1862 гг.) и применена для электрического поля К.Ф.Гауссом (1777–1855 гг.)

Теорема Остроградского–Гаусса: поток электрического смещения через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме всех зарядов, расположенных внутри поверхности, т.е. $N = D_n \cdot ds = q$,
 где $N = S \cdot D \cos\alpha = S \cdot D_n$ – поток электрического смещения;
 $D = \epsilon_0 \cdot E$ – электрическое смещение;
 ϵ_0 – электрическая постоянная = $8,85 \cdot 10^{-12}$ (в ед.СИ);
 E – напряженность электрического поля.

Пример вычисления электрического поля с помощью теоремы Остроградского–Гаусса.
 Равномерно заряженная плоскость (плоский осадительный электрод электрофильтра (рис. 3.5)).

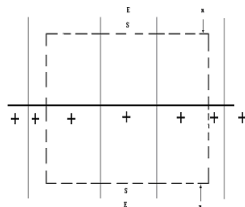


Рис 3.5. Электрическое поле равномерно заряженной плоскости

В качестве замкнутой поверхности в теории Остроградского–Гаусса можно выбрать прямой цилиндр, перпендикулярный к заряженной плоскости. Полный поток сквозь цилиндр равен сумме потоков через основания: $N = 2DS$.

Полный заряд равен σS ,
 где σ – поверхностная плотность заряда.

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S}; \quad q = CU,$$

Поскольку поток электрического смещения равен сумме электрических зарядов внутри поверхности, имеем:

$$D = \sigma / 2, \text{ т.к. } D = \epsilon_0 \cdot E$$

Напряженность поля равномерно заряженной плоскости в вакууме равна: $E = \sigma/2\epsilon_0$.

Равномерно заряженный цилиндр (трубчатый электрофильтр)

В качестве поверхности для вычисления потока электрического смещения выберем цилиндр на рис. 3.6.

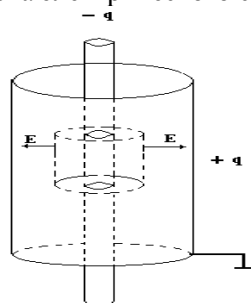


Рис. 3.6. Электрическое поле трубчатого электрофильтра

Теорема Остроградского–Гаусса связывает электрическое смещение в точках замкнутой поверхности с зарядом внутри объема этой поверхности, т.е. связывает величины, относящиеся к разным точкам поля.

Можно придать этой теореме форму, при которой в нее входили величины, относящиеся к одной и той же точке поля. Для этого применяют теорему к бесконечно малому объему. Это соотношение, выражающее теорему Остроградского–Гаусса в дифференциальной форме имеет вид (3.16) и носит название уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = \rho, \tag{3.16}$$

где $\rho = \rho(x, y, z)$ – объемный заряд.

Составляющие напряженность поля можно выразить через потенциал:

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}; E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}; E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}. \tag{3.17}$$

Подставляем (3.17) в (3.16) получим:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} (\nabla^2 U) = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3.18)$$

при $\rho = 0$ это уравнение переходит в более простое уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0, \quad (\nabla^2 U = 0) \quad (3.19)$$

Поэтому вычисление потенциала электростатического поля сводится и в общем случае к нахождению такой функции, которая удовлетворяет уравнению (3.19), а на самих проводниках принимает постоянное значение.

Решение уравнения (3.19) сложно. Оно решается в специальном разделе физики – теории потенциала.

Если форма электродов сложная, то распределение потенциала вычислить трудно.

В этом случае его определяют экспериментально, используя электрический зонд, электролитическую ванну или электропроводную бумагу.

Расчет электрического поля для простых геометрических электродов

1. Очень часто электрическое поле не постоянно, как между параллельными пластинами, и зависит от пространственных координат. В этом случае необходимо определить напряженность электрического поля как функцию некоторого характерного расстояния. Рассмотрим один электрод трубчатого электрофильтра (рис. 3.7).

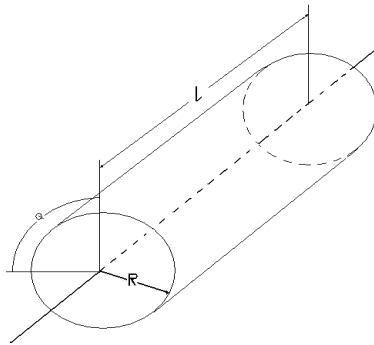


Рис. 3.7. Трубчатый электрофильтр

Если потенциал на коронирующем электроде невелик, то допускается при расчетах не учитывать плотность пространственного ионного заряда. В этом случае применимо уравнение Лапласа. В цилиндрических координатах оно имеет вид [1]:

$$\frac{dE}{dr} + \frac{E}{r} = 0 \quad (3.20)$$

После интегрирования получаем:

$$E = \frac{C}{r} \quad ,$$

где $C = \frac{U}{\ln(r_0 / r_i)}$;

r_0 – радиус внешнего электрода;

r_i – радиус внутреннего электрода.

Пусть в миниатюрном электрофильтре (пробоотборник):

$r_i = 0,5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $U = 20 \text{ кВ} = 20 \cdot 10^3 \text{ В}$; $r_0 = 40 \text{ мм} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Определим напряженность электрического поля на поверхности цилиндра:

$$E = \frac{C}{r} = \frac{U}{\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)} = \frac{20 \cdot 10^3}{r_0 \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-4}}\right)} = 8,11 \quad , \text{ ед. потенциала СГСЭ/см}$$

$$E = 8,11 \cdot 3,34 \cdot 10^{-3} = 2,43 \cdot 10^5 \text{ В/м} = 2,43 \text{ кВ/см.}$$

При этой напряженности вокруг коронирующего электрода возникает коронный разряд, генерирующий ионы. Поэтому необходим учет объемного заряда. Применение уравнения Лапласа неправомерно.

Учет пространственного заряда

Пусть подводимый к коронирующему электроду электрический ток весь расходуется на питание пространственного заряда:

$$i = 2\pi r \rho_s \omega_i E ,$$

где ω_i – подвижность ионов;

ρ_s – поверхностная плотность ионов.

Применив уравнение Пуассона получим:

$$\frac{dE}{dr} + \frac{E}{r} - \frac{2i}{\omega_u r E} = 0 , \quad (3.21)$$

$$\text{т.к. } \frac{\rho_s}{\epsilon_0} = \frac{2i}{zrE}$$

после интегрирования (3.21) получим:

$$E = \sqrt{\frac{2i}{\omega_u} + \frac{C^2}{r^2}} \quad (3.22)$$

Величина константы C зависит от напряжения и тока короны, а также от соотношения размеров внутреннего и внешнего электродов. Если i и r велики, то (3.22) сводится к уравнению:

$$E = \sqrt{\frac{2i}{\omega_u}}$$

Это значит, что напряженность в области, близкой к осадительному электроду, постоянна.

Определим напряженность поля в миниатюрном электрофилтре при наличии ионного пространственного заряда, если $U = 20$ кВ, $t = 20^0$ С, $p = 760$ мм рт. ст., $f = 6$ (коэффициент, характеризующий шероховатость коронирующего электрода, равный обычно (1–0,5); 1 – для полированной поверхности.

Тогда напряжение начала коронного разряда [2]:

$$U_0 = 100\delta \cdot f \cdot r_i \left(\frac{0,3}{\sqrt{r_i}} \ln \left(\frac{r_0}{r_i} \right) \right) ,$$

где δ – поправочный коэффициент, учитывающий отклонение от нормальных температуры и давления.

$$\delta = \frac{293}{T} \cdot \frac{P}{760} \quad \text{где } = 18,97 \text{ ед. потенц. СГСЭ.}$$

T – °К; P – мм рт. ст.

Тогда $U_0 = 18,97$ ед. потенц. СГСЭ при $\delta=1$, $U_0 = 5,7$ кВ.

$$I = U(U - U_0) \frac{2\omega_n}{r_0^2 \ln \left(\frac{r_0}{r_i} \right)} = 2,68 , \text{ ед. потенц. СГСЭ /см}$$

Тогда $E = \sqrt{\frac{2i}{\omega_u}} = 28,49$, ед. потенц. СГСЭ/см

Влияние частиц, находящихся в электрическом поле электрофилтра

Представляет практический интерес, как изменится электрическое поле в межэлектродном пространстве при наличии объемного заряда ρ_v , создаваемого аэрозольными частицами.

Если в этом случае пренебречь зарядом создаваемым ионами, то, решив уравнение Пуассона, можно показать, что напряжение начала коронирования возрастет на $\pi \rho_v r_0^2$ [2]. Обозначив напряжение, при котором коронный разряд начинается в присутствии аэрозольных частиц через U_0' , получим:

$$U_0' = U_0 + \pi \rho_v r_0^2.$$

Если в 1 см³ содержится N_T сферических частиц диаметром d_1 , на каждой из которых заряд, равный предельному, то

$$\rho_v = N_T n_s e .$$

Так как масса частиц, содержащихся в 1 см^3 , равна $m = \left(\frac{r_0}{r_i}\right) N_m d^3 \rho_v$ и $n_s e = \eta E_0 \frac{d^2}{4}$.

Имеем $\rho = \frac{3\eta m E_0}{2\pi l \rho}$, где ρ – плотность частиц.

Рассмотрим, насколько возрастет напряжение коронного разряда в электростатическом осадителе в присутствии частиц сажи со средним диаметром $0,1 \text{ мкм}$ и плотностью 1 г/см^3 , если они получили предельный заряд в поле напряженностью 5 кВ/см :

$$\rho_v = \frac{9mE_0}{2\pi l \rho} = 1,19 \text{ , ед. СГСЭ/см}^2$$

$$\pi \rho_v r_0^2 = 13,6 \text{ , ед. СГСЭ.}$$

Влияние пространственного заряда частиц заключается в том, что в результате возрастания напряжения начала коронирования ток короны снижается. Напряжение зажигания короны возрастает с повышением массовой концентрации аэрозоля и с уменьшением размера частиц при неизменной массовой концентрации. Поэтому улавливание мелкодисперсных частиц в электрофильтрах вызывает затруднения.

Кроме того, взаимное отталкивание одноименно заряженных частиц приводит к увеличению напряженности поля около осадительного электрода, которое оценивается коэффициентом $(1 + 3mR_0/d\rho)^{0,5}$. В этом случае напряженность станет равной:

$$E = \sqrt{\frac{2i}{z}} \cdot \sqrt{1 + \frac{3mR_0}{d\rho}} \quad (3.23)$$

Увеличение напряженности электрического поля не противоречит снижению тока короны. Таким образом, присутствие в электрофильтре мелких частиц приводит к уменьшению степени очистки газов.

Изменение электростатического поля при наличии аэрозольных частиц в межэлектродном промежутке электрофильтра

Кроме рассмотренных выше кулоновских сил ($F = Eq$) в электрофильтре существуют другие электрические силы.

Рассмотрим две проводящие сферические частицы в зоне очага короны. Пусть одна из частиц приобрела положительный заряд, а вторая нейтральна (рис. 3.8).

Если заряженная частица приблизится к нейтральной, ее положительный заряд притянет электроны второй частицы с удаленной от заряда части к ближней. При этом образуется диполь с отрицательным зарядом, расположенным ближе к положительно заряженной частице, и между частицами возникает сила притяжения.

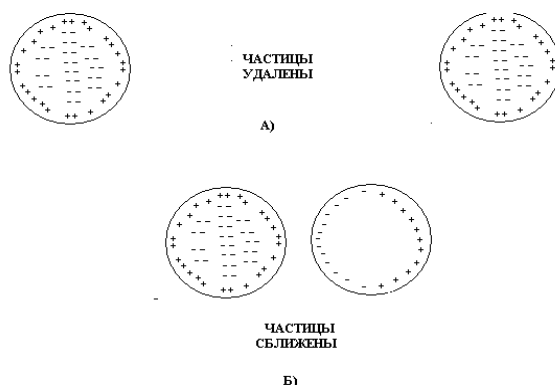


Рис. 3.8. Механизм перераспределения зарядов для проводящих частиц при их сближении под действием внешних сил

Аналогичная сила может возникать между заряженной частицей и нейтральной плоскостью и наоборот. Эту силу называют поляризационной или индукционной. Эти силы способствуют осаждению частиц в электрофильтре. Эти силы пропорциональны объему частиц: для малых частиц они незначительны.

3.3. Осаждение пыли на электродах

После приобретения заряда частицы начинают перемещаться под действием электрического поля. Основная их часть движется по направлению к осадительному электроду. Небольшое количество частиц, находя-

щихся в зоне короны и в непосредственной близости от нее, заряжается ионами противоположной полярности по отношению к короне и осаждается на коронирующем элементе.

Процессы движения частиц к осадительному электроду довольно сложны: величина напряженности электрического поля изменяется (в основном уменьшается) по мере удаления от коронирующего элемента, а величина заряда частиц увеличивается до некоторой максимальной величины.

В непосредственной близости от осадительного электрода концентрация заряженных частиц может возрастать по причине влияния некоторого (нестекшего) заряда слоя, эрозии слоя, взаимного отталкивания частиц. Кроме того, для низкоомных частиц может происходить быстрый разряд слоя. Наконец, может происходить пробой слоя при обратной короне и выброс частиц в межэлектродное пространство, и другие процессы.

При теоретическом расчете степени очистки газов электрофильтром обычно принимаются следующие допущения [4]:

1. Частица заряжена полностью.
2. Поток газа в электрофильтре полностью турбулирован, в результате чего частицы распределены равномерно по всему поперечному сечению электрофильтра.
3. Частицы при движении к осадительному электроду испытывают аэродинамическое сопротивление в режиме вязкого трения, что позволяет применять при расчете сопротивления закон Стокса.
4. Частицы, имеющие одинаковую полярность, не отталкиваются между собой.
5. Эффекты влияния осажденного слоя на приближающиеся частицы не учитываются.
6. Электрический ветер – не учитывается.
7. Скорость потока газов не влияет на скорость миграции ионов.
8. Частица движется с установившейся скоростью.
9. Расчеты относятся только к пространству активной зоны электрофильтра (не учитывается влияние неактивных и полуактивных зон).
10. Все виды вторичного уноса не учитываются.

Движение частиц в активной зоне электрофильтра

Движение частиц в электрофильтре происходит под действием сил, возникающих в электрическом и аэродинамических полях, в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$m \frac{dv}{dt} = \Sigma F$$

$$\Sigma F = F_k + F_g + F_c + F_e + F_b ,$$

где $F_k = E q$ – кулоновская сила;

$F_g = mg$ – сила тяжести;

$F_e = 2\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} grad E^2 + F_c + F_e$ – сила, обусловленная поляризацией частиц в неравномерном электрическом поле;

F_c – сила сопротивления среды;

F_b – сила гидродинамического и электродинамического взаимодействия частиц.

Подробное рассмотрение действий этих сил выполнено в книге И.П. Верещагина «Основы электрогазодинамики дисперсных систем» [5].

Под действием потока газа частицы приобретают скорость V_r . При расчете скорости дрейфа учитывают, как правило, только кулоновскую силу. В этом случае движение частицы в межэлектродном промежутке электрофильтра можно показать графически следующим образом (рис. 3.9):

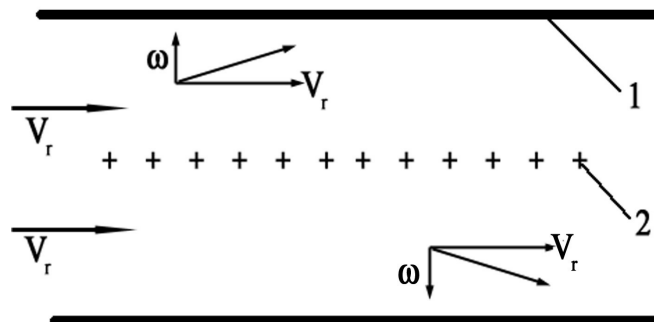


Рис. 3.9. Движение частиц в межэлектродном промежутке электрофильтра.
 ω – скорость дрейфа; V_r – скорость газа; 1 – осадительный электрод; 2 – коронирующий электрод

Теоретически скорость дрейфа ω не зависит от скорости V_r , однако в реальных электрофильтрах используется такое понятие, как эффективная скорость дрейфа ($\omega_{эф}$), полученное из уравнения Дэйча, зависящая и от скорости V_r от всех параметров, влияющих на степень очистки газов в электрофильтрах:

$$\omega_{эф} = \frac{S}{Q} \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right) = \frac{H_0 V_r}{L} \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right) = \frac{t}{H_0} \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right),$$

- где Q – количество очищаемых газов, м³/с;
- S – площадь осаждения, м²;
- H_0 – межэлектродное расстояние, м;
- V_r – скорость газов, м/с;
- L – длина активной зоны, м;
- t – время пребывания газов в активной зоне, с;
- η – степень очистки газов, д. ед.

Величина $\omega_{эф}$ зависит от геометрических параметров электрофильтра, от объема очищаемых газов и степени очистки газов. При постоянных геометрических параметрах, объеме очищаемых газов электрофильтра и неизменных свойствах пылегазовой среды $\omega_{эф} = f(\eta)$.

Таким образом, $\omega_{эф}$ зависит от всех параметров, влияющих на степень очистки газов. Очевидно, что выбрав такую величину скорости газов в активной зоне электрофильтра, при которой скорость дрейфа максимальна, можно будет выбрать электрофильтр, имеющий минимальную площадь осаждения и соответственно, минимальные габариты и стоимость.

По данным Далмона [6] максимальное значение скорости дрейфа имеет место при $V_r = 2,0 - 2,2$ м/с. По данным Басби и Дарби [7] максимум скорости дрейфа достигается при $V_r = 5 - 6$ м/с (рис. 3.10). Эти экспериментальные исследования проведены для различных типов электродных систем [4]. Однако, кроме геометрических параметров электродной системы (тип осадительных и коронирующих электродов, межэлектродное расстояние и др.) важное значение, а возможно и определяющее, оказывают свойства улавливаемой пыли.

Расчеты, выполненные для отечественных электрофильтров, установленных на крупных энергоблоках, показывают, что максимум скорости дрейфа имеет место при скорости газов в активной зоне электрофильтра в диапазоне 1,0–1,3 м/с.

По-видимому, **однозначный ответ на этот вопрос** может быть получен при определении скорости дрейфа на электрофильтрах, работающих в различных отраслях промышленности, при изменении скорости газов и определении степени очистки.

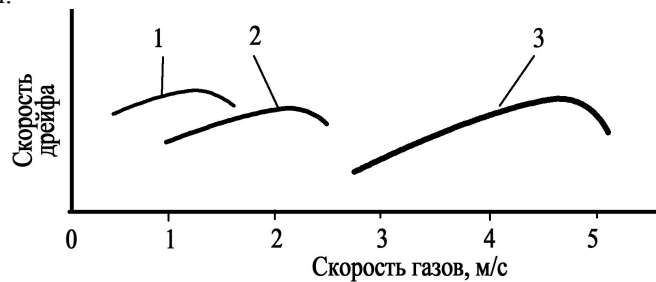


Рис. 3.10. Зависимость скорости дрейфа от скорости газов в электрофильтре.

1 – расчет для электрофильтров ТЭС России; 2 – данные Далмона; 3 – данные Басби и Дарби

Кулоновскую силу при расчетах скорости дрейфа рассчитывают следующим образом:

$$F = q_m E_{ос} = neE_{ос} = 4\pi\epsilon_0 E_3 E_{ос} r^2 \delta,$$

- где E_3 и $E_{ос}$ – напряженность электрических полей соответственно при зарядке и осаждении частиц, В/м;
- n – число элементарных зарядов на частице;
- e – заряд электрона, К;
- r – радиус частицы.

Сила F направлена к осадительному электроду за исключением области чехла короны, где крупные частицы приобретают положительный заряд и осаждаются на коронирующих электродах.

При движении к осадительному электроду частица испытывает сопротивление со стороны газа, зависящее от ее размеров, формы, скорости движения и вязкости среды.

Принимая форму частицы шарообразной (что допустимо для большинства пылей), считают, что частица имеет максимальный заряд.

Применяя закон Стокса, справедливый для частиц диаметром 2–50 мкм, получают выражение для силы сопротивления движению частицы:

$$F_c = 6\pi\mu\omega_n r,$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Нс/м²;

r – радиус частицы, м;

ω_n – скорость частицы, м/с.

При движении частицы сила F быстро уравнивается силой F_c :

$$4\pi\varepsilon_0 E_3 E_{oc} r^2 \delta = 6\pi\mu\omega_n r,$$

откуда
$$\omega_n = \frac{4\varepsilon_0 E_3 E_{oc} \delta}{6\mu} r, \text{ м/с.}$$

В электрофильтре (кроме аппаратов с отдельной ионизацией) $E_3 = E_{oc}$.

Величина $\delta = 1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}$, для проводящей частицы ≈ 2 , для диэлектрической частицы $\delta = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \approx 2$,

тогда для частиц размером 2–50 мкм в электрофильтре получим:

$$\omega_n = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} E^2}{\mu} r,$$

для частиц диаметром 0,1–2 мкм вводят поправку: $\omega'_n = \omega(1 + AS_m/r)$, $A = 0,815 - 1,63$;

S_m – средний свободный пробег молекулы, м; для газов $S_m = 10^{-7}$ м.

Таблица 3.3

Сравнение сил действующих в поле тяжести Земли и в однородном электрическом поле

Радиус частицы, г	Скорость движения ω_n , м/с	
	$E = 15 \cdot 10^4 \text{ В/м}$	$E = 30 \cdot 10^4 \text{ В/м}$
0,2	0,012	0,025
1,0	0,015	0,06
10	0,15	0,5

Из таблицы 3.3 видно, что расчетная скорость движения частиц радиусом 1 мкм и более, прямо **пропорциональна размеру (чего)**. Скорость частиц радиусом менее 1 мкм мало зависит от их размеров и изменяется только с изменением напряженности поля.

3.4. Удаление осевшей пыли с электродов

В мокрых электрофильтрах мелкие капли укрупняются после осаждения на электродах и стекают вниз. Нередко мокрые электрофильтры дополнительно орошаются потоками жидкости для интенсификации очистки поверхности электродов.

В электрофильтрах типа «С» (смоляных) применяемых для очистки коксохимических и генераторных газов, для обеспечения стекания смолы ее количество должно в три раза превосходить количество пыли.

Для обеспечения более эффективной очистки коронирующих электродов от смолы (особенно в тех случаях, когда ее электрическое сопротивление менее 10^8 Ом·м) иглы направляют вверх, что ускоряет стекание капель с концов игл [7], способствуя более интенсивному коронному разряду.

При улавливании сухой пыли известны методы соскабливания, очистки с помощью щеток. Эти методы нашли ограниченное применение. Известны методы удаления пыли с электродов путем вибрации, взрывной волны, акустические. Они также не получили широкого применения.

Для промышленных электрофильтров с большой высотой электродов применяется в основном метод отряхивания. В этом методе привод может осуществляться с помощью электродвигателей – европейский вариант. По американскому варианту подъем и сброс бойков осуществляется с помощью электромагнитов. В этом варианте для встряхивания коронирующих электродов требуются высококачественные ударопрочные высоковольтные изоляторы, устанавливаемые между бойком и наковальной коронирующего электрода.

Встряхивание осадительных электродов можно осуществлять вдоль рядов (продольное) или поперек рядов. Во втором случае выше вероятность расцентровки электродов, однако количество пыли в момент отряхивания может быть значительно приближено к оптимальному (при продольном встряхивании количество пыли в начале и конце поля существенно отличается); при оптимизации интервала встряхивания выбирается

усредненное значение пылеемкости. При поперечном встряхивании пыль отряхивается благодаря воздействию нормальных ускорений. При этом требуются менее интенсивные удары, однако, как показывает скоростная киносъемка [8], происходит более интенсивный выброс пыли в межэлектродный промежуток.

Основная частота вибрации пластин при встряхивании зависит от конструкции подвеса и от места, по которому наносится удар. При ударе по пластинам происходит наложение гармоник разной частоты на активную частоту, что приводит к изменению величины отряхивающих ускорений [4].

В 70-х годах XX века было экспериментально установлено [12], что при отряхивании более толстого слоя пыль легче отделяется от электродов и падает в бункер компактной массой. С увеличением толщины слоя выше некоторой критической величины происходит самопроизвольное обрушение пыли в отдельных местах электрода. Этот процесс увеличивает вторичный унос пыли. Кроме того, возрастающая толщина слоя приводит к уменьшению межэлектродного промежутка и электрическим пробоям. При этом система регулирования снизит питающее напряжение, что приведет к ухудшению улавливания пыли.

Г. Брандт [13] отмечает, что скорость дрейфа резко падает с увеличением средней толщины слоя. Скорость дрейфа при толщине слоя 10 мм составляет лишь 60 % от ее величины при толщине слоя 1 мм.

В. Кениг [14] считает оптимальной толщину слоя 12 мм, а Уайт [2] 12–25 мм.

Эти данные были получены экспериментально. Расхождение в величине оптимальной толщины слоя следует объяснить различными физико-химическими свойствами исследованных пылей. Критерия для прогнозирования оптимальной толщины слоя не было. Вместе с тем сильное влияние режима встряхивания осадительных электродов на степень очистки газов электрофильтром описано в большом количестве источников.

С.П. Жебровский [15] на основании исследований на промышленных электрофильтрах делает вывод, что надлежащий выбор интервалов встряхивания имеет весьма важное значение для правильной эксплуатации установки газоочистки.

В.Н. Ужов [16] указывает, что силу ударов и периодичность встряхивания применительно к каждому электрофильтру определяют опытным путем.

П. Уайт и У. Смит [17] рекомендуют удалять пыль с электродов по возможности редко, чтобы уловленные частицы успевали агломерировать, обеспечивая тем самым минимум уноса.

Х. Роуз и А. Вуд [18] считают, что удаление слоя необходимо производить так, чтобы куски, образующиеся при разрушении осаденного слоя, имели размер, при котором, падая вниз, не претерпевали уноса.

Н. Детри [19] указывает, что частота и интенсивность встряхивания обычно подбираются экспериментально.

Более конкретное по режиму встряхивания дает Г. Бандт [13]. Он указывает, что соотношение интервалов встряхивания для трехпольного электрофильтра, работающего с «высокой степенью очистки», должно составлять 1:6:30, (в соответствии с методикой СФ НИИОГАЗ это соответствует степени очистки 0,995).

Э. Уоткинс и К. Дарби [20] считают, что «типичный» режим встряхивания составляет примерно 10 встряхиваний в час на входных и 1 встряхивание в час на выходных полях электрофильтра. Применительно к трехпольному электрофильтру интервалы встряхивания составят 6 мин. : x : 60 мин., это существенно расходится с режимом, рекомендованном Г. Брандтом. (Это соответствует степени очистки 0,97.)

В последнее время интервалы встряхивания и сила удара бойков подбираются экспериментально – по минимуму выходной запыленности. При этом пытаются учесть также срок службы электрофильтра. Этот способ может быть удовлетворительным лишь при использовании специальных программ, позволяющих с применением ЭВМ находить оптимальный режим встряхивания. Следует отметить, что в этом случае американский способ встряхивания с помощью соленоидов – является наиболее подходящим.

Д. Хейнрих утверждает, что сила удара при отряхивании должна быть минимальной [21], для уменьшения диспергирования слоя пыли.

В то же время для предупреждения зарастания электродов пылью требуется [22,13] повышенная сила удара и снижение электрического режима. В настоящее время задача выбора оптимальной силы удара при встряхивании требует проведения экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования на опытном электрофильтре показали, что степень очистки газов удается повысить, применяя сочетание ударных импульсов малой силы – для отряхивания толстых слоев пыли и импульсов увеличенной силы – для отряхивания остаточных (тонких) слоев [9].

Режим встряхивания электродов можно охарактеризовать следующими основными параметрами:

1. Соотношение интервалов встряхивания электродов для первого и последующих полей электрофильтра.
2. Продолжительность периода встряхивания (количество ударов) по электроду каждого поля.
3. Продолжительность паузы (периоды между ударами бойка по наковальне электрода) для каждого поля.
4. Интенсивность импульсов при встряхивании.

Соотношение интервалов встряхивания и их продолжительность для осадительных и коронирующих электродов в настоящее время могут быть рассчитаны. Количество ударов и интенсивность импульсов при встряхивании подбирается экспериментально.

3.5. Транспортирование, утилизация и хранение уловленной пыли

Процесс обеспыливания газов заканчивается непосредственно в электрофилт্রে, однако обезвреживание уловленного продукта (в случае его токсичности) не может считаться завершенным до тех пор, пока уловленная пыль не будет доставлена к месту складирования, утилизации или ее переработки.

Утилизация (от латинского *utilis* – полезный) означает употребление с пользой, например, утилизация отходов. К сожалению слова «списать в утиль» у нас нередко означают «выбросить на свалку» как что-то совершенно ненужное.

Уловленная на осадительных электродах пыль после ее отряхивания с электродов падает в бункера, из которых непрерывно или периодически удаляется.

Вопросы транспортировки пыли решаются на стадии разработки проекта установки газоочистки. Способ их решения зависит от свойств пыли, способов ее утилизации и складирования.

Вопросы утилизации – отдельная проблема, которая решается за пределами экотехники. Здесь лишь кратко остановимся на важности этой проблемы. Известны случаи, когда уловленная пыль причиняла вред, соизмеримый с тем вариантом, когда пыль не улавливалась.

Так, например, пыль, уловленная на одном из цементных заводов, направлялась в карьеры, из которых она развеивалась ветром. Кроме того, в заполненные пылью карьеры попадали животные и погибали.

Завершающий этап очистки газов – утилизация пыли, золы, растворов и др. Этот этап должен исключить вторичное загрязнение воздуха, воды, почвы и позволить получать ощутимый экономический эффект от реализации уловленных веществ.

В любой отрасли промышленности известны способы, позволяющие, во-первых, свести к минимуму количество выделенной технологическим агрегатом пыли, во-вторых, утилизировать ее.

Примером может являться цементная промышленность, где применение цепных завес в клинкерообжигательных печах резко сокращает запыленность отходящих газов. А возврат уловленной электрофилтрами пыли в клинкерообжигательную печь, например, **по рижскому способу** позволяет использовать эту пыль в основном производстве. При этом затраты на транспорт уловленной пыли минимальны по причине малых расстояний. Кроме того, эта пыль нередко может использоваться в качестве удобрений, для дорожных покрытий и др. Необходимо отметить, что вопросы утилизации нередко сложны; для их решения требуются дорогостоящие исследования. Однако решение этих проблем целесообразно связывать с первой стадией их получения – улавливанием, на которой могут быть выполнены некоторые необходимые операции, например, сепарация, термообработка и др.

В настоящее время вопросы утилизации уловленной пыли решаются (если это имеет место), как правило, независимо от проблем пылеулавливания. Вместе с этим в ряде случаев эти вопросы целесообразно решать совместно, с использованием, например, сепарационных свойств электрофилтров; пыль, уловленная в различных полях электрофилтра, имеет различный дисперсный состав, величину которого можно прогнозировать [23], различные химические свойства и т.д.

Возможные способы использования уловленных продуктов оказывают влияние на выбор системы очистки газов:

– например, при использовании уловленной золы при производстве вяжущих требуется сухой способ улавливания и транспортировки (при мокром способе происходит выщелачивание и зола теряет вяжущие свойства);

– возможны решения, когда для утилизации уловленных вредностей целесообразнее их перевод в жидкое состояние (например, при улавливании минеральных хорошо растворимых солей Na_2CO_3 , K_2CO_3 и др. [24]). В любом случае, перед утилизацией уловленного продукта необходимо определить его физико-химические и токсические характеристики. Далее с учетом класса токсичности отхода должны разрабатываться направления и средства утилизации и (или) порядок хранения и обезвреживания отходов.

Зола ТЭС широко используется в промышленности строительных материалов в качестве добавок при изготовлении цементов, кирпичей, бетонных камней, искусственных пористых заполнителей для легких бетонов (агломератов), керамзита, асфальтобетона.

Тонкодисперсная зола из электрофилтров используется в следующих направлениях:

– вяжущие вещества – сырьевой компонент портландцемента, добавки при помоле клинкера, известково-зольное вяжущее вещество;

– стеновые изделия: кирпичи (силикатные и глиняные), ячеистый бетон, бетонные камни;

– пористые заполнители: аглопиритовый гравий (щебень, песок), глинозольный керамзит, зольный гравий;

– бетоны и растворы – пластифицирующие добавки, мелкий заполнитель, наполнитель в асфальтобетон.

Зола имеет специфические химические и физические свойства, содержит большинство химических элементов таблицы Менделеева, поэтому имеются неограниченные перспективы ее использования.

В развитых странах осваивается комплексное использование золы; из нее можно извлекать магнезит, алюминий, редкоземельные металлы. Благодаря большой удельной поверхности и содержанию углерода зола является хорошим адсорбентом для некоторых загрязняющих веществ, например, фенолов.

Зола обладает способностью очищать водоемы от некоторых видов бактерий, водной флоры, а при специальной обработке она очищает воду от твердых частиц, органических соединений, бактерий, фосфатов. Обработка нефти, разлившейся по поверхности воды, силиконизированной золой позволяет перевести нефть в твердые частицы, опускающиеся на дно водоема. Некоторые пыли, уловленные электрофильтрами после печей обжига, могут использоваться в сельском хозяйстве как удобрение.

Глава 4

КРАТКИЙ ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

С момента первого промышленного применения электрофильтров прошло более ста лет. Проследим кратко за изменением конструкций основных узлов электрофильтров за этот период.

4.1. Активная зона электрофильтра

Основная часть любого электрофильтра – его активная зона, состоящая из коронирующих и осадительных электродов.

Осадительные электроды

Требования к осадительным электродам можно сформулировать следующим образом:

- обеспечение поверхности осаждения, создающей высокую электрическую равнопрочность промежутка;
- создание предпосылок для распределения отряхивающего импульса по всей его поверхности при встряхивании и необходимой механической прочности, при многократных циклах встряхивания;
- отсутствие температурных деформаций;
- обеспечение минимального уноса при встряхивании и осаждении пыли.

Изменение конструкции осадительных электродов отражает уровень знаний об улавливании и удалении с них осажденной пыли.

Коробчатые осадительные электроды применялись в послевоенное время до конца 60 годов XX в. Эти электроды [1] имели отверстия и отгибы для поступления уловленной пыли внутрь элемента и имели вывод уловленной пыли снизу (рис. 4.1 а, б, в, г). Практика эксплуатации этих электрофильтров показала, что с течением времени полости электродов постепенно заполнялись неотряхиваемыми отложениями пыли и вся улавливаемая пыль находилась на наружных поверхностях.

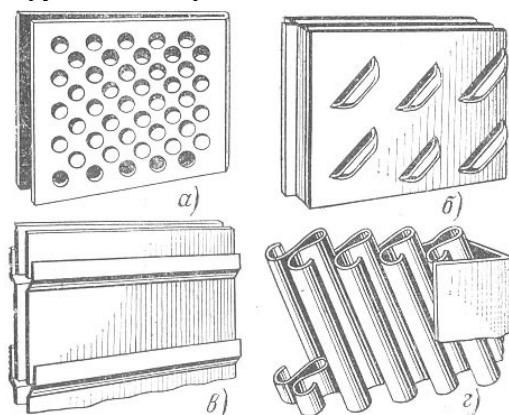


Рис. 4.1. Пластинчатые осадительные электроды сложного профиля:
а) перфорированные; б) карманные; в) тюльпанные; г) желобчатые

Можно допустить, что при улавливании некоторых пылей, обладающих пониженными адгезионными и когезионными свойствами, будет происходить транспорт уловленной пыли внутри замкнутого пространства коробчатого осадительного электрода.

Однако исключить осаждение пыли на наружных поверхностях и ее развеивание при встряхивании невозможно. Известно также, что чем меньше количество отряхиваемой пыли, тем больший ее процент подлежит развеиванию и вторичному уносу при встряхивании.

Наличие отверстий, отгибов, выступов с малым радиусом кривизны на осадительных электродах приводит к возникновению неравномерностей электрического поля и снижению рабочего напряжения в электрофильтре.

Таким образом, переход на осадительные электроды открытого профиля явился безусловно оправданным. Это подтверждено опытом промышленной эксплуатации электрофильтров, выбросы пыли из которых снижены в несколько раз по сравнению с электрофильтрами, оснащенными осадительными электродами закрытого профиля. Кроме того, резко уменьшена металлоемкость электрофильтров и трудоемкость их изготовления.

Процесс уноса пыли при встряхивании осадительных электродов кажется очевидным: падающая пыль после ее отряхивания с электрода частично развеивается движущимся пылегазовым потоком. Очевидными для разработчиков считались и средства снижения уноса пыли при встряхивании электродов. В электрофильтрах, изготавливаемых в середине прошлого века, применялись перфорированные осадительные электроды (рис. 4.1а). Предполагалось, что уловленная пыль при ее осаждении на осадительный электрод поступает в отверстия и далее, при встряхивании, падает вниз в закрытом пространстве осадительного электрода, в бункер, минуя движущийся горизонтально пылегазовый поток. При этом, казалось бы, унос при встряхивании будет минимальным. Однако, как показал опыт эксплуатации электрофильтров, внутренние полости электродов постепенно заполняются уплотняющейся при встряхивании пылью, перемещения пыли внутри электрода не происходит, вся уловленная пыль осаждается на наружной поверхности электрода.

Далее был разработан и получил довольно широкое распространение так называемый карманный осадительный электрод (рис. 4.1б). Вероятно, при разработке этого осадительного электрода авторы также априори считали, что падающая при отряхивании пыль по инерции будет поступать в «карманы» и далее двигаться внутри электрода. Выступающие кромки снижали электрическую прочность промежутка, что понижало степень очистки газов. Внутренние полости этих электродов также заполнялись уплотнившейся пылью.

Очередной модификацией стали желобчатые электроды (рис. 4.1г). Здесь также была заложена идея изолировать перемещение отряхиваемой пыли в бункера от газового потока по наклонным под углом 7° желобам, исключая, таким образом, вторичный унос. Однако, желоба этих электродов также замазывались пылью. Ожидаемого транспорта пыли не происходило. Кроме того, хотя края этих электродов были загнуты внутрь, электрическое поле было неудовлетворительным.

Следующим этапом развития конструкции осадительных электродов стало применение элементов открытого профиля. Основная цель, которая достигалась при этом, – создание электрического поля повышенной напряженности – первопричины высокой степени очистки газов в электрофильтрах. В этих электродах пыль при встряхивании заведомо двигалась в межэлектродном промежутке, контактируя с движущимся пылегазовым потоком, и часть ее, не достигая бункера, развеивалась. Поэтому приходилось экспериментально подбирать режимы встряхивания электродов, обеспечивающие снижение выбросов пыли. Для этого требовалось 3–4 недели работы бригады, проводящей пылегазовые измерения на целом ряде режимов встряхивания электродов. Поэтому возникла задача разработки расчетного метода определения режимов регенерации осадительных электродов. Этот метод был разработан в СФ НИИОГАЗ в 1970–1973 гг. и позволил, используя расчетный метод, снижать суммарные выбросы пыли из электрофильтров до 2,5 раз по сравнению с режимом непрерывного встряхивания осадительных электродов. В настоящее время электроды открытого профиля применяются практически во всех сухих горизонтальных электрофильтрах.

Изменения, аналогичные изложенным, происходили и с осадительными электродами сухих вертикальных электрофильтров. В них первоначально применялись так называемые тюльпанообразные электроды (рис. 4.1в). В конструкции этих электродов также закладывался принцип удаления пыли с электродов при встряхивании, минуя встречный пылегазовый поток. Внутренние полости этих электродов также замазывались пылью, масса электродов была большой, механизмы встряхивания (подъем-сброс электродов на опору) – сложны. Исследование движения пыли при встряхивании с помощью скоростной киносъемки [2] позволило предположить, что в вертикальных электрофильтрах целесообразно применение осадительных электродов открытого профиля. В современных электрофильтрах типа ЭВ, ЭВВ в качестве осадительных электродов теперь используются С-образные элементы. Следует, однако, отметить, что исследования на промышленных электрофильтрах показали, что даже при оптимальном режиме встряхивания электродов доля уноса при встряхивании осадительных электродов существенна. Таким образом, полностью исключить унос пыли при встряхивании до настоящего времени не удалось.

Коронирующие электроды

Коронирующие электроды должны обеспечивать требуемые электрические параметры вольтамперной характеристики (ток, пробивное напряжение, напряжение зажигания короны). Они должны обладать невысокой металлоемкостью, температурной стойкостью, надежностью, хорошей отряхиваемостью.

В первых электрофильтрах в качестве коронирующих электродов применялись провода различного сечения. В начале XX века Котрелл обнаружил, что коронирующий провод с хлопчатобумажной изоляцией поддерживает интенсивную корону на всей его поверхности. По существу это был коронирующий элемент с бессистемно-фиксированными точками коронирования.

Дальнейшее развитие электрофильтров сопровождалось применением коронирующих элементов, которые можно разделить на 3 типа по степени фиксации коронирующих участков (игл) (рис. 4.2, 4.3):

- без фиксированных точек коронирования;
- со слабо фиксированными точками коронирования;
- с фиксированными точками коронирования.

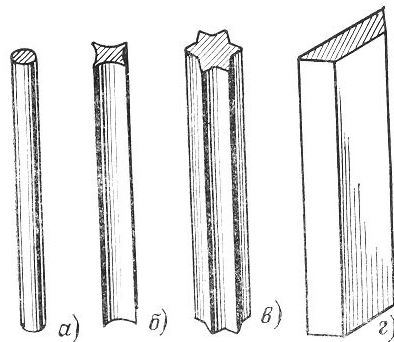


Рис. 4.2. Коронирующие электроды с нефиксированными разрядными точками

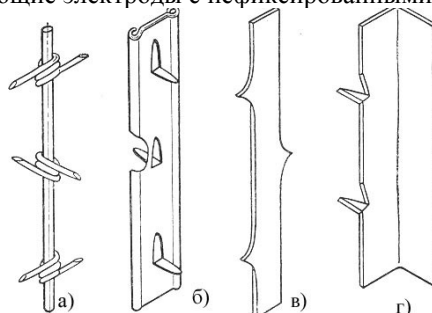


Рис. 4.3. Коронирующие электроды с фиксированными точками разряда

В отечественных промышленных электрофильтрах применялись коронирующие элементы проволочные диаметром 2–3 мм и штыкового сечения размером 4x4 мм, а также коронирующие элементы, имеющие другую форму сечения (рис. 4.2 а, б, в, г) затем применялись элементы с различной степенью жесткости (рис. 4.3) и расположением коронирующих шипов (игл). Наибольшее распространение получили ленточно-игольчатые 4.3б) и ленточно-зубчатые 4.3в). В последнее время используются коронирующие элементы с малым радиусом кривизны концов коронирующих игл (рис. 4.4) (тип СФ-1, СФ-2). Применение этих элементов позволяет получить снижение выбросов пыли в электрофильтрах до 3-х раз [3]. Эти элементы защищены патентом РФ [4].

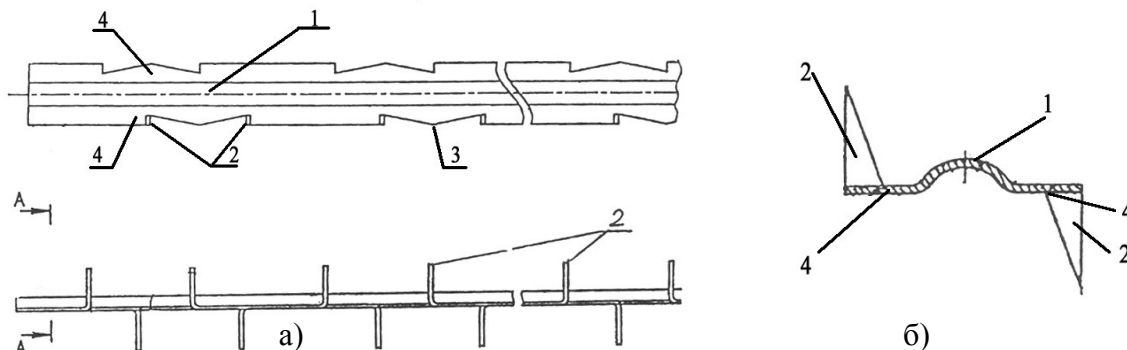


Рис. 4.4. а) коронирующий электрод типа СФ с дополнительными точками коронирования; б) поперечное сечение коронирующего электрода; 1 – желоб для придания жесткости; 2 – коронирующие иглы; 3 – дополнительные точки коронирования; 4 – корпус элемента

Применение коронирующих элементов с малым (0,05 – 0,1 мм) радиусом кривизны коронирующих игл позволяет снизить напряжение зажигания короны до 8–15 кВ и интенсифицировать процесс зарядки и осаждения частиц.

Наряду с элементами, создающими коронный разряд, в коронирующем электроде могут использоваться различные комбинации элементов, создающих электростатическое поле с той или иной степенью равномерности.

Комбинация коронирующих и «электростатических» электродов может создавать условия для существенного повышения степени очистки газов в электрофильтрах, в частности, при улавливании высокоомной пыли.

4.2. Устройства удаления пыли, осажженной на электродах

В первых конструкциях электрофильтров встряхивание осадительных электродов осуществлялось соударением эксцентрично подвешенных электродов соседних полей.

В кулачковых механизмах и подвесках осадительных электродов **возникали большие усилия**, поэтому эти механизмы не обладали требуемой надежностью. Кроме того, одновременное встряхивание соседних полей приводило к повышенному уносу пыли, т.к. фактический период их встряхивания отличался от оптимального в 3–5 раз.

В настоящее время в электрофильтрах европейской конструкции применяется преимущественно ударно-молотковое встряхивание. Этот механизм состоит из вращающегося в пылевых подшипниках вала с «опрокидывающимися» молотками. Конструкция обладает удовлетворительной надежностью. Основной ее недостаток – невозможность оперативного изменения силы удара бойка по наковальне.

Для встряхивания коронирующих элементов используется ударно-молотковый механизм с одновременным подъемом всех молотков поля и последующим их сбросом. Сила удара в этом механизме может изменяться путем изменения угла подъема бойков. Более простой является схема механизма при боковом размещении привода и установке вала-изолятора непосредственно на входе в корпус электрофильтра. Однако оперативное регулирование силы удара бойков эта схема также исключает.

В американской конструкции электрофильтров применяются ударно-импульсные системы встряхивания осадительных и коронирующих электродов. Такие системы позволяют в широком диапазоне изменять силу удара бойков (путем подъема и сброса их с разной высоты), количество ударов и паузу между ударами для любого бойка.

В этих системах изоляторы, через которые наносится удар бойка по коронирующему электроду, работают в сложных условиях. Их разрушение требует останова электрофильтра для замены изолятора. В отечественной практике эти системы не получили распространения.

4.3. Компоновка электродных систем в корпусе электрофильтра

В настоящее время параметры электрофильтра, определяющие в конечном счете его габариты (длина – L; ширина – B; высота – h), имеют следующие диапазоны:

1. Высота электродной системы 4; 6; 9; 10,5; 12; 13,5; 15; 18 м.
2. Длина поля электрофильтра $0,64 \times (4,5,6,7) = 2,56-4,48$.
3. Расстояние между одноименными электродами 300, 350, 400, 460 мм.

В электрофильтрах, выпускаемых во второй половине XX в., имели место следующие соотношения габаритов.

Таблица 4.1
Соотношение габаритов электрофильтров

Типы электрофильтров	h/B	h/L
Электрофильтры УГ	0,45–1,8	0,55–0,99
Электрофильтры ЭГБ, ЭГВ	0,7–1,5	0,5–2,0
Электрофильтры «Эдгар Андре»	0,4–1,7	0,7–1,2

Форма и размеры диффузоров, конфузоров и бункеров определены условиями подвода и отвода очищаемого газа и свойствами пыли.

В отношении минимальной поверхности корпуса электрофильтра математика дает однозначный ответ – куб.

В части выбора оптимальных соотношений габаритных размеров электрофильтра специальные исследования проводились Отто Гюпнером [5]. Им приводятся данные о том, что короткий и широкий аппарат имеет поверхность осаждения почти на 30 % меньше, чем узкий и длинный. Применительно к отечественным электрофильтрам подобные исследования отсутствуют.

Вероятно, наиболее сильно влияющими факторами здесь является унос пыли при встряхивании осадительных и коронирующих электродов, зависимость скорости дрейфа от скорости газа в активной зоне электрофильтра и величина уноса через неактивные и полуактивные зоны.

При реконструкции электрофильтров решение задачи размещения и соотношений габаритных размеров обусловлено существующими фундаментами, наличием свободной площади и ограничениями по высоте.

При проектировании новых установок с электрофильтрами задача может быть сформулирована в общем виде следующим образом: какое соотношение длины, ширины и высоты электрофильтра и его полей обеспечит:

1. Минимальные выбросы пыли из электрофильтра.
2. Наименьшую стоимость электрофильтра.

Для оценки влияния компоновки электродных систем рассмотрим первоначально влияние скорости потока на степень очистки газа в электрофильтре. Для малых величин скорости газа в активной зоне электрофильтра (до 0,5 м/с) можно считать, что скорость газа и скорость дрейфа входят в уравнение Дэйча в первой степени. Однако при больших скоростях газа эта зависимость не верна. Поэтому применение формулы Дэй-

ча для нахождения зависимости $\eta = f(\omega)$ дает ошибочные результаты, обусловленные в первую очередь неточностью определения величины ω .

Одним из возможных вариантов может быть способ, при котором определяются относительные величины влияющих параметров и степени очистки газа. Таким образом, все многообразие влияющих параметров может быть учтено, когда при изучении влияния какого-либо фактора будет взято соотношение влияющих параметров.

Учитывая изложенное, рассмотрим электрофильтр, работающий в базовом (индекс б) и измененном (индексы 1, 2) режимах.

$$\eta_6 = 1 - \exp\left(\frac{\omega_6 L_6}{H_6 V_6}\right),$$

$$\eta_1 = 1 - \exp\left(\frac{\omega_1 L_1}{H_1 V_1}\right) \quad (4.1)$$

Применим формулу Дэйча для двух электрофильтров, в которых все параметры, кроме скорости газов в активной зоне, одинаковы, т.е. $h_6 = h_1$, $L_6 = L_1$, $\omega_6 = \omega_1$. Тогда согласно (4.1) получим:

$$\eta_1 = 1 - (1 - \eta_6)^{V_6/V_1} \quad \text{и} \quad \eta_2 = 1 - (1 - \eta_6)^{V_6/V_2} \quad (4.2)$$

Используя (4.2) рассмотрим электрофильтры, работающие при одном и том же времени пребывания очищаемого газа в активной зоне, но с различной скоростью по причине разного активного сечения.

Таблица 4.2
Степень очистки газов и выбросы пыли из электрофильтров при одном и том же времени пребывания газов, но с различным активным сечением

Скорость газов, м/с	Степень очистки газов, %	$(1 - \eta_{1,2}) / (1 - \eta_6)$	Варианты
0,75	0,9987	0,13	Скорость уменьшена
1,0	0,99	1,0	Базовый
1,5	0,95	5,0	Скорость увеличена

В формулах (4.2) не учтено влияние изменения скорости дрейфа при изменении скорости газа. Для практических расчетов необходимо исключить допущение о равенстве скоростей дрейфа при разных скоростях газа в активной зоне электрофильтра и установить экспериментально зависимость $\omega = f(V_T)$ для какой-либо конкретной установки и при расчетах использовать формулу:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_6)^{V_6 \omega_1 / V_1 \omega_6} \quad (4.3)$$

Очевидно, что данные в таблице 4.2 следует рассматривать для характеристики тенденции изменения степени очистки газов и выбросов пыли из сравниваемых электрофильтров для учета величины выбросов пыли при компоновке электродных систем. При этом, безусловно, необходим учет того фактора, что зависимость $\omega = f(V_T)$ имеет максимум, который целесообразно достигать при выборе типоразмера электрофильтра.

4.4. Выбор количества полей при постоянной длине активной зоны электрофильтра

При проектировании новых и реконструкции устаревших электрофильтров представляет практический интерес выбор числа полей N при постоянной общей длине активной зоны электрофильтра [6]. Проанализируем влияние числа полей на унос пыли при встряхивании с учетом известных закономерностей [20]. Формула для расчета соотношений интервалов встряхивания электродов по полям электрофильтра имеет вид:

$$\tau^* = \frac{1}{(1 - \eta)^{\frac{n-1}{N}}}, \quad (4.4)$$

где τ^* – относительная величина интервала встряхивания любого поля;

η – степень очистки газов в электрофильтре при кратковременном отключении встряхивания;

n – порядковый номер поля электрофильтра;

N – количество полей в электрофильтре.

Абсолютные величины интервалов встряхивания определяется по формуле:

$$\tau = 16,7 \frac{S m_0}{Q z \eta_n}, \quad (4.5)$$

где S – площадь осаждения поля электрофильтра, m^2 ;

m_0 – оптимальная пылеемкость осадительного электрода, кг/м²;

Q – объем газов, очищаемых в поле электрофильтра, м³/с;

z – запыленность газов на входе в поле электрофильтра, г/м³;

η_n – степень очистки газов полем электрофильтра, д. ед.

Рассмотрим двух-, трех- и четырехпольные электрофильтры, имеющие одинаковую длину активной зоны и работающие в одинаковых технологических условиях. Допустим, что при оптимальных режимах встряхивания унос пыли при одном цикле встряхивания одинаков для всех полей сравниваемых электрофильтров. (Хотя, строго говоря, унос из более короткого поля будет несколько меньше, чем из длинного, т.к. средняя величина фактической пылеемкости в коротком поле будет ближе к оптимальной.) В этом случае суммарный унос пыли из любого поля при встряхивании будет прямопропорционален числу циклов встряхивания в единицу времени и обратнопропорционален интервалам встряхивания. Предположим, что выбранные электрофильтры имеют одинаковую степень очистки при отсутствии встряхивания, например – 99 %. Тогда соотношение интервалов встряхивания в соответствии с зависимостью (4.4) по полям составит:

в двухпольном электрофильтре – 1 : 10;

в трехпольном электрофильтре – 1 : 4,6 : 21,5;

в четырехпольном электрофильтре – 1 : 3,16 : 10 : 31,6.

С учетом зависимости (4.5) рассчитаем абсолютные значения интервалов встряхивания этих электрофильтров при неизменной общей площади осаждения, равной 11310 м² (электрофильтр ЭГАВ1-40-6-6-4). Примем следующие исходные данные для расчета по формуле (4.5): площадь осаждения поля для двухпольного, трехпольного и четырехпольного электрофильтров соответственно 5655; 3770; 2827,5 и соответственно расчетная степень очистки газов полями электрофильтра 0,9; 0,784; 0,684. Пылеемкость – 1 кг/м² (допускаем равенство УЭС по полям). Запыленность на входе в электрофильтр – 40 г/м³.

Тогда абсолютная величина интервалов встряхивания по полям будет, мин:

в двухпольном электрофильтре – 26 : 260;

в трехпольном электрофильтре – 20 : 92 : 430;

в четырехпольном электрофильтре – 17 : 54 : 170 : 537.

Учитывая принятое допущение о равенстве уносов при одном цикле встряхивания, получим следующее соотношение уносов пыли из последних полей при встряхивании для 2-х, 3-х и 4-х-польных электрофильтров: 2,06; 1,25; 1.

В этом случае, если степень очистки при непрерывном встряхивании составляет 96 %, полные выбросы пыли из электрофильтра составляют 4 %. (1,5 % – проскок и 2,5 % – унос при встряхивании осадительных электродов; унос при встряхивании коронирующих электродов условно включаем в проскок; выбросы и степень очистки газов для электрофильтров с количеством полей 4, 3, 2 составят:

$$V_4 = 2,5/2,06 = 1,21 \quad \eta_4 = 98,79;$$

$$V_3 = 2,5/1,25 = 2,0 \quad \eta_3 = 98,0;$$

$$V_2 = 2,5/1 = 2,5 \quad \eta_2 = 97,2.$$

Экспериментальная зависимость пробивного напряжения ($U_{пр}$) электрического поля электрофильтра от величины площади осаждения поля (S) при температуре 130°С и при отсутствии обратной короны, полученная для отечественных электрофильтров типа УГ, может быть аппроксимирована зависимостью:

$$U_{пр} = 4450 - 0,1 S.$$

Тогда величины напряжения на полях электрофильтров составят:

в двухпольном электрофильтре ($S=5600$)...38,9 кВ

в трехпольном электрофильтре ($S=3800$)...40,7 кВ

в четырехпольном электрофильтре ($S=2800$)...41,7 кВ.

Учет этих данных показывает, что степень очистки газов в четырехпольном электрофильтре дополнительно будет увеличена. Очевидно, что увеличение количества полей при неизменной длине активной зоны увеличивает стоимость электрофильтра из-за применения дополнительных агрегатов питания и механизмов встряхивания. Однако для окончательного решения о количестве полей в каждом конкретном случае необходим технико-экономический анализ, позволяющий выбрать электрофильтр с минимальной стоимостью.

4.5. Устройства распределения газа в электрофильтрах

Внутренний объем электрофильтра можно условно разбить на три зоны:

– активная;

– полуактивная;

– неактивная.

Активная зона – пространство между осадительными и коронирующими электродами.

Полуактивная – пространство между коронирующими электродами и заземленными корпусными деталями электрофильтра.

Неактивная зона – пространство между осадительными электродами и стенкой электрофильтра.

Неактивная зона может быть и должна путем конструктивных решений практически полностью перекрыта, и в этом случае перегородки газов могут не учитываться при расчете электрофильтров.

Основное требование к распределению газа в активной зоне электрофильтра – равенство величин скоростей по всему сечению. Известно, что снижение эффективности пылеулавливания на каком-либо участке, вызванное увеличением скорости газов, не компенсируется соответствующим снижением скорости на другом участке. Газораспределительные решетки необходимо устанавливать на входе и выходе электрофильтра, обеспечивая выравнивание потока по всей длине электрофильтра. Кроме того, необходимо обеспечить максимальное снижение скорости газов в полуактивных и неактивных зонах.

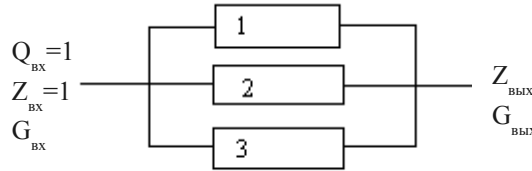


Рис. 4.4. Зоны электрофильтра: 1- активная; 2- полуактивная; 3- неактивная

Примем следующие диапазоны изменения степени очистки газов объемов очищаемых газов:

- 1 – активная зона – $\eta_1 = 99,99 \%$; $Q_1 = 80 \div 88 \%$;
- 2 – полуактивная зона – $\eta_2 = 80 \%$; $Q_2 = 10 \div 6 \%$;
- 3 – неактивная зона – $\eta_3 = 40 \%$; $Q_3 = 10 \div 6 \%$.

$$\eta_{\Sigma} = 1 - \frac{G_{\text{вых}}}{G_{\text{вх}}} = 1 - \frac{Q_1 B_1 + Q_2 B_2 + Q_3 B_3}{Q_1 + Q_2 + Q_3},$$

т.к. $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1$, то $\eta_{\Sigma} = 1 - Q_1 B_1 + Q_2 B_2 + Q_3 B_3$;
 $B_1; B_2; B_3$ – выбросы пыли из активной, полуактивной, неактивной зоны соответственно.

Таблица 4.3

Величина выбросов пыли при различных параметрах электрофильтра

Q_1	0,98	0,96	0,94	0,92	0,9	0,88
η_1	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
1- $\eta_1=B_1$	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Q_2	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
η_2	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
1- $\eta_2=B_2$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Q_3	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
η_3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1- $\eta_3=B_3$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
η_{Σ}	0,9919	0,9839	0,9759	0,9679	0,9599	0,9519
1- η_{Σ}	0,0081	0,016	0,024	0,032	0,040	0,048

Как следует из таблицы, доля суммарных относительных выбросов существенно изменяется. При вариации Q_1, Q_2, Q_3 и η_1, η_2, η_3 в указанных диапазонах $1-\eta_{\Sigma}$ составит от 0,0081 до 0,048, т.е. изменяется почти в 6 раз, степень очистки за счет влияния активных и полуактивных зон изменяется с 99,19 % до 95,19 %. Эти цифры однозначно характеризуют сильное влияние неактивных и полуактивных зон.

4.6. О применении электрофильтров с увеличенной высотой электродной системы

Чистота атмосферного воздуха промышленных регионов нередко определяется эффективностью электрофильтров, установленных для очистки больших объемов газов на ТЭЦ, металлургических и цементных заводах и других промышленных предприятиях.

Таким образом, улучшение состояния атмосферного воздуха в этих регионах может быть достигнуто за счет повышения эффективности электрофильтров.

Ввиду ограниченности производственных площадей нередко основным возможным направлением остается увеличение высоты электродной системы электрофильтров. Реализация этого связана с возрастанием уноса пыли при встряхивании осадительных электродов.

Рассмотрим физический механизм этого процесса. После удара бойка по наковальне осадительного электрода происходит отделение пыли от поверхности осадительного электрода. На основании съемок, снятых скоростной кинокамерой [1], можно с определенной степенью приближения выделить следующие этапы отделения пыли от поверхности электродов и ее движения:

1. Под действием ускорений, направленных перпендикулярно поверхности осадительного электрода, небольшая часть с поверхности слоя, осевшей на электродах пыли, выбрасывается в межэлектродное пространство. Эту часть пыли можно считать равномерно распределенной по всей высоте межэлектродного промежутка. Количество этой пыли пропорционально площади осаждения электродов. Эта пыль улавливается с эффективностью, равной степени очистки газов в данном поле.

2. Основная часть пыли, отделившаяся при встряхивании от осадительного электрода, и достигающая бункера.

3. Часть падающей пыли в процессе движения вниз дезагрегируется по причине соприкосновения с осадительными и коронирующими элементами и при взаимных соударениях. Эта пыль не достигает бункера. Количество ее зависит от высоты падения (от высоты электродной системы). Часть этой пыли улавливается.

4. Пыль, выброшенная избытком воздуха из бункера после падения основной ее части.

Изложенное изображено графически на рис. 4.5, где условно показана пыль, выброшенная под действием отряхивающих ускорений (1). Участки (2) и (3) условно изображают слой пыли, отделившийся от осадительного электрода в момент удара бойка под действием отряхивающих ускорений, причем участок (2) изображает пыль, достигшую бункера, участок (3) – пыль, развеявшуюся при падении, (4) – пыль, выброшенную из бункера после ее падения.

На рис. 4.5 показано поперечное сечение межэлектродного промежутка в момент встряхивания осадительного электрода.

Чем больше высота электродов, тем больше время падения пыли, удаленной при встряхивании, и тем большая часть пыли подвержена уносу.

При проектировании установки газоочистки с электрофильтрами, имеющими увеличенную высоту электродной системы, необходим учет величины вторичного уноса пыли при встряхивании.

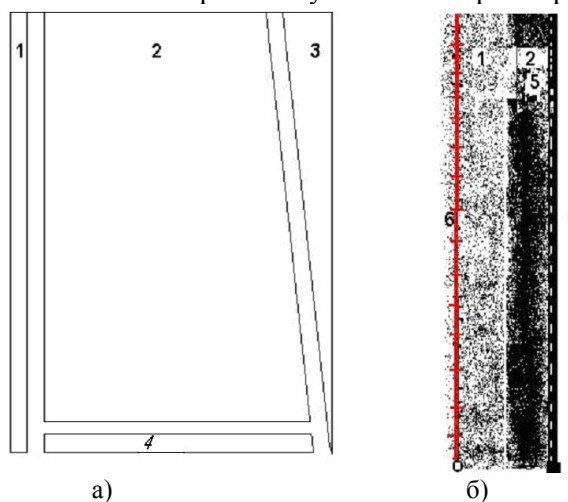


Рис.4.5. Условное изображение распределения пыли, удаленной при встряхивании с осадительного электрода 1– пыль, выброшенная в межэлектродный промежуток в момент удара; 2 – пыль, достигающая бункера; 3– пыль, подверженная уносу при ее падении; 4 – пыль, выброшенная из бункера после ее падения; 5 – неотряхиваемый слой пыли (показан пунктиром); 6 – коронирующий электрод; 7 – осадительный электрод

Примем за 1 относительный унос пыли при встряхивании в электрофильтре с высотой 12 м. Тогда на основании рассмотренного физического механизма принимая, что величина уноса пыли при встряхивании пропорциональна времени взаимодействия падающей пыли с пылегазовым потоком, получим следующее соотношение уносов пыли для электрофильтров, имеющих различную высоту электродной системы:

Высота электродной системы, м	18	12	9	6
Относительный унос при встряхивании	1,9	1,0	0,49	0,21

Другими словами, унос пыли при встряхивании в электрофильтре с высотой электродной системы 18 м почти в два раза больше, чем при высоте 12 м, а для электрофильтров с высотой электродов 9 м в два раза меньше, чем для аппаратов высотой 12 м.

Полученные результаты приведены на рис. 4.6, где для сравнения показаны экспериментальные данные по величине уноса пыли в электрофильтрах с различной высотой электродных систем.

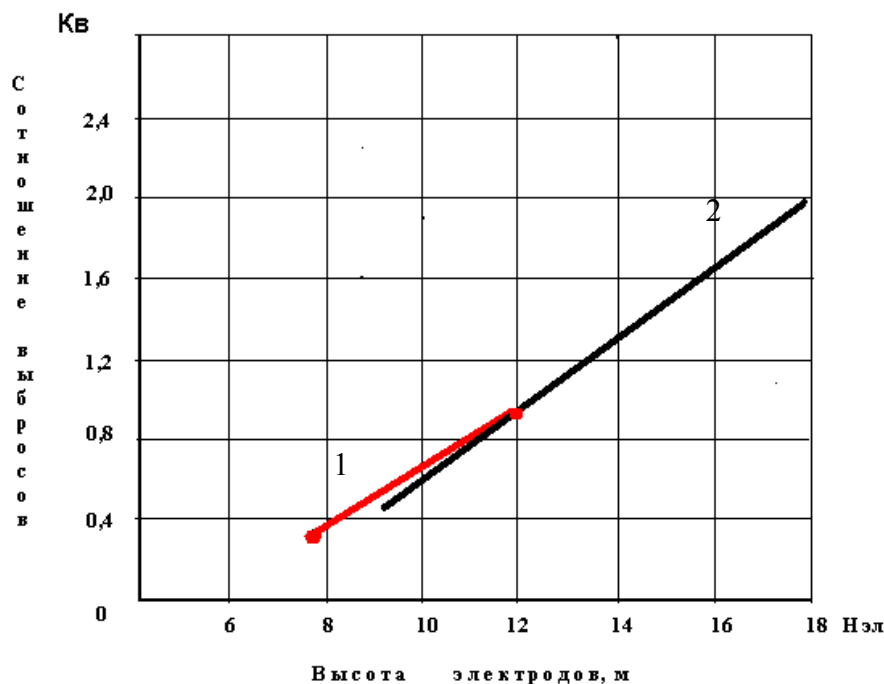


Рис.4.6. Зависимость соотношений выбросов пыли при встряхивании осадительных электродов от высоты электродной системы: 1 – эксперимент; 2 – расчет

Удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с расчетными позволяет производить оценку эффективности электрофильтров при увеличении высоты электродной системы.

Оценим количественное влияние уноса пыли при встряхивании с помощью параметра D следующим образом:

$$D = \frac{\omega S}{Q} = \frac{\omega h L n N}{Q}$$

- где ω – скорость дрейфа, м/с;
- S – площадь осаждения электрофильтра, м²;
- h – высота электродной системы, м;
- L – длина активной зоны электрофильтра, м;
- Q – объем очищаемых газов, м³/с;
- n – число газовых проходов;
- N – количество полей в электрофильтре.

Тогда сравнительную величину выбросов при изменении высоты электродов можно определить с помощью следующей таблицы:

Таблица 4.4
Сравнительная величина выбросов пыли из электрофильтра

Высота электродов	Величина параметра Дейча, D	Степень очистки, $\eta = 1 - \exp(-D)$	Выбросы пыли при встряхивании, (1- η)
12	4,6	0,9899	0,01
18	5,3	0,995	0,005

Из таблицы следует, что для компенсации двукратного увеличения выбросов пыли при встряхивании достаточно увеличить площадь осаждения в отношении 5,3: 4,6 = 1,15.

Отметим, что при увеличении высоты электродной системы с 12 до 18 м площадь осаждения увеличивается в 1,5 раза. Таким образом, унос пыли при встряхивании будет с избытком компенсирован увеличением степени очистки за счет увеличения площади осаждения.

Кроме увеличения уноса пыли при встряхивании в электрофильтре при увеличении высоты электродной системы может происходить увеличение расцентровки электродов, снижение рабочего напряжения по причине увеличения вероятности электрического пробоя при увеличении площади осаждения поля и др.

Очевидно, что кроме увеличения высоты электродной системы целесообразно принятие дополнительных специальных мер по повышению эффективности электрофильтров.

К этим мерам можно отнести:

- 1 – Ужесточение допусков при центровке электродной системы.
- 2 – Изготовление осадительных элементов типа ЭКО МК 4х160, имеющих отклонение от плоскости в 5–6 раз меньше, чем у элементов СЧС-640 [4].
- 3 – Увеличение количества полей в пределах существующей активной зоны [5].
- 4 – Снижение напряжения зажигания короны.
- 5 – Выбор соответствующего межэлектродного расстояния, выбор ориентации игл коронирующих электродов, расчет и установка режимов встряхивания осадительных и коронирующих электродов, настройка режимов питания в соответствии с величиной удельного электрического сопротивления пыли, улавливаемой по полям [6].
- 6 – Выбор оптимальных для данных условий величин газовой нагрузки, температуры, влажности и др. параметров с учетом нелинейности зависимости величины скорости дрейфа от скорости газа в активной зоне электрофильтра [6].
- 7 – Учет изменения температуры по высоте электродной системы и др.

4.7. О выборе межэлектродного расстояния в электрофильтрах

Экспериментальные исследования, выполненные СФ НИИОГАЗ на опытном электрофильтре Черепетской ГРЭС, однозначно показывают, что увеличение межэлектродного расстояния (H_0) приводит к увеличению скорости дрейфа, но при этом степень очистки газов снижается [7].

На основании экспериментов, выполненных в США на пилотной установке производительностью 3,8 м/с, сделан вывод, что увеличение межэлектродного расстояния до 400–600 мм целесообразно при сравнительно небольших концентрациях пыли. В противном случае является более эффективной двухступенчатая очистка с установкой на первой ступени активной зоны с небольшим межэлектродным расстоянием.

Увеличение межэлектродных промежутков при неизменных габаритах корпуса приводит к уменьшению площади осаждения электрофильтра, снижает массу внутреннего оборудования. Следует ожидать, что для различных условий работа электрофильтра оптимум H_0 будет зависеть от таких параметров, как УЭС пыли, запыленность, требуемая степень очистки газов, высота электродов и др. Рассмотрим влияние параметров работы электрофильтров при изменении межэлектродного расстояния на степень очистки газов и некоторые другие показатели его работы.

Таблица 4.5

Изменение некоторых параметров работы электрофильтра при увеличении межэлектродного промежутка в том же корпусе

№№ п/п	Параметры	Влияние на степень очистки газов и другие параметры электрофильтра
1	Площадь осаждения снижается обратно пропорционально величине межэлектродного промежутка	Снижение степени очистки газов
2	Напряженность электрического поля у осадительного электрода	Возрастает скорость дрейфа частиц
3	Встряхивание осадительных электродов	Более частое встряхивание, увеличение уноса при встряхивании, повышенный износ узлов встряхивания, увеличение расцентровки
4	Встряхивание коронирующих электродов	То же, что и п.3
5	Масса внутреннего оборудования, стоимость, количество узлов встряхивания	Уменьшение массы и стоимости пропорционально увеличению межэлектродных промежутков
6	Расцентровка электродов	Уменьшение влияния расцентровки на степень очистки газов при той же величине допусков
7	Полуактивные зоны	Увеличение размера полуактивных зон, снижение степени очистки газов
8	Напряжение зажигания короны	Увеличение напряжения зажигания короны, снижение степени очистки газов
9	Гидравлическое сопротивление	Уменьшается. Снижаются затраты на преодоление гидравлического сопротивления (незначительно)
10	Питание током высокого напряжения	Необходимо увеличение питающего напряжения
11	Выравнивание плотности тока по поверхности осадительного электрода	Повышение степени очистки газов при наличии обратной короны
12	Увеличение степени запираания короны	Снижение степени очистки газов при улавливании мелкой пыли высокой концентрации

Перечислим параметры электрофильтра, увеличивающие степень очистки газа при увеличении межэлектродного расстояния:

1. Увеличение напряженности электрического поля у поверхности осадительного электрода.
2. Уменьшение влияния расцентровки электродной системы.
3. Повышение равномерности плотности тока на поверхности осадительного электрода.

В то же время при увеличении межэлектродного промежутка происходит снижение степени очистки по следующим причинам:

1. Уменьшение площади осаждения.
2. Увеличение вторичного уноса пыли при встряхивании осадительных и коронирующих электродов по причине более частого встряхивания.
3. Увеличение напряжения зажигания короны.
4. Увеличение сечения неактивных зон в электрофильтрах при неизменной их конструкции.
5. Увеличение проскока при запираии короны.

Большинство электрофильтров работают без обратной короны. При достаточно высоком качестве монтажа электрофильтров влиянием расцентровки электродов можно пренебречь. Увеличение влияния полуактивных зон можно исключить, используя соответствующие конструктивные решения. Тогда для электрофильтров, работающих без запираии короны, можно рассмотреть влияние следующих параметров:

- увеличение напряженности электрического поля у поверхности осадительного электрода;
- уменьшение площади осаждения;
- увеличение уноса при встряхивании;
- увеличение напряжения зажигания короны.

Расчеты, выполненные при учете совместного действия двух факторов – увеличения напряженности при увеличении межэлектродного промежутка и соответствующего снижения площади осаждения, показывают, что в диапазоне межэлектродных расстояний от 0,137 до 0,23 коэффициент в числителе показателя формулы Дэйча, учитывающий изменение степени очистки газов, изменяется от 1,04 до 0,82, т.е., например, при $D = 5,5$ степень очистки изменится с 99,68 % до 98,9 %.

Для уточненного расчета степени очистки газов необходим учет всех перечисленных параметров для конкретных условий работы электрофильтра.

Кроме того, очевидно, что окончательное решение о целесообразности увеличения межэлектродного расстояния должно приниматься с учетом экономического аспекта.

Целесообразность увеличения межэлектродного расстояния возрастает при увеличении высоты электродной системы более 12 м, увеличении УЭС пыли и по мере снижения концентрации дисперсной фазы в очищаемом газе.

4.8. Интенсификация процесса пылеулавливания с помощью электростатического поля

В серийных отечественных электрофильтрах электростатическое поле использовалось в малогабаритных электрофильтрах «Рион» (с отдельной ионизацией) и в последние годы в электрофильтрах «Элстат». Эти аппараты рассчитаны на малую производительность.

Электродные системы, формирующие зоны с коронным электростатическим полем, позволяют повысить напряженность в электростатическом поле за счет уменьшения межэлектродного расстояния, что приводит к росту скорости дрейфа частиц и исключению обратной короны в зоне электростатического поля [9]. Это имеет принципиальное значение при улавливании высокоомных пылей, доля которых в РФ постоянно увеличивается. В США имеется специальный тип электрофильтров, предназначенный для улавливания высокоомных пылей. Скорость дрейфа в этих электрофильтрах примерно в полтора-два раза выше, чем в электрофильтрах без электростатического поля.

Японская фирма «Мацусита дэнкисанге» разработала электродную систему, в которой у поверхности осадительных электродов создается дополнительное электростатическое поле с повышенной напряженностью. Это достигается установкой дополнительных проволочных электродов вдоль поверхности осадительных электродов на некотором расстоянии от них. Дополнительные электроды подключаются к независимому источнику питания, а микропроцессор по заранее установленной программе меняет приложенное к электродам напряжение. Дополнительные электроды располагают вдоль газового потока [10], (рис. 4.7а) или подвешивают вертикально [11].

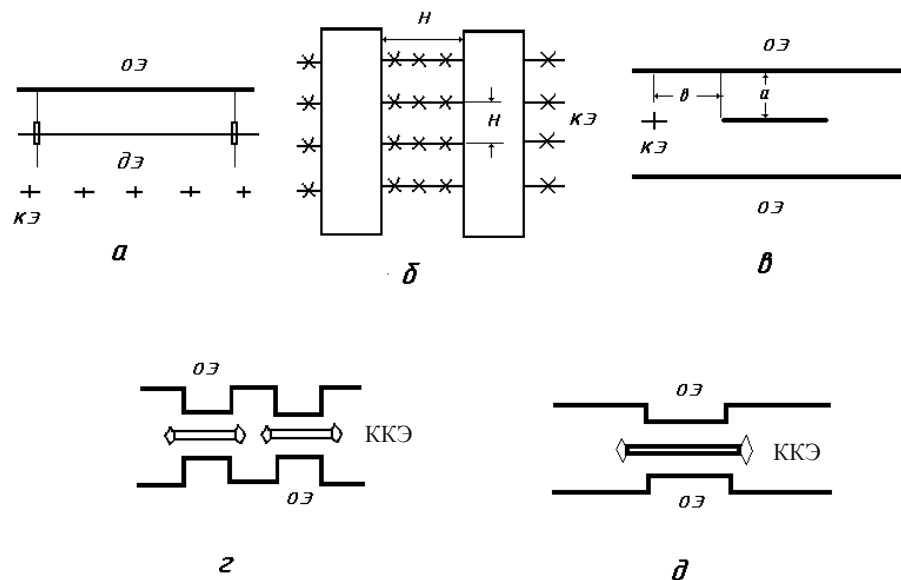


Рис. 4.7. Электродные системы электрофильтров с электростатическими полями.
 ОЭ – осадительные электроды; КЭ – коронирующие электроды; ДЭ – дополнительные электроды;
 ККЭ – комбинированные коронирующие электроды; H , a , b – размеры.

Более простая конструкция коронирующих электродов этой же фирмы имеет вид плоской пластины, на одной или обеих сторонах которой расположены коронирующие участки [12]. Такие пластины устанавливаются между осадительными электродами на одинаковом расстоянии от них.

В США используют электродную систему, в которой сочетаются пластинчатые и игольчатые электроды, подключаемые к отрицательному потенциалу; при этом коронирующие элементы могут располагаться вдоль и поперек потока газа (рис. 4.7 б, в) [13]. Отношение расстояний a : b находится в диапазоне 1:0,8 до 1:1 [14].

Усиление напряженности электростатического поля достигнуто в электродной системе, разработанной в Японии и содержащей осадительные электроды с повторяющимися выступами и впадинами (рис. 4.7г). Выступы рядом расположенных осадительных электродов направлены навстречу друг другу, а плоские участки коронирующих электродов расположены в суженном участке межэлектродного промежутка электрофильтра. Плоские участки коронирующих элементов оканчиваются отогнутыми под прямыми углами острыми выступами, которые расположены напротив впадин осадительных электродов [15]. Усиление напряженности электростатического поля происходит за счет уменьшения межэлектродного промежутка при сохранении величины подводимого напряжения к коронирующим электродам.

В СССР в НИИОГАЗе была разработана система с комбинированными коронирующими электродами (ККЭ) (рис. 4.7д). Плоские части ККЭ находятся напротив выступов осадительных электродов, а пилообразные участки расположены напротив плоских частей осадительных электродов [16]. Лабораторные исследования характеристик ККЭ показали, что, например, при скорости газа 1 м/с и напряженности электрического поля 3,8 кВ/см частицы ликоподия приобретают скорость дрейфа до 1 м/с за счет повышения напряженности вблизи осадительных электродов [17, 18].

Глава 5 МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

Требуемая эффективность электрофильтров достигается, с одной стороны, установкой правильно выбранных типоразмеров аппаратов и совершенством их конструкций, с другой стороны, высокой культурой их эксплуатации.

Для обеспечения проектной эффективности золоулавливания проводятся пуско-наладочные испытания электрофильтров, кроме того, периодические испытания их в процессе эксплуатации.

5.1. Методика испытания электрофильтров котельных агрегатов

Наиболее полный объем испытаний электрофильтров ТЭС производится специализированными организациями: ВТИ и его филиалами, ОРГРЭС, СФ НИИОГАЗ. Для периодических контрольных испытаний на электростанциях имеются специальные испытательные подразделения.

5.1.1. Задачи испытаний и общие указания по ним

Испытание электрофильтров заключается в определении степени очистки дымовых газов, гидравлического сопротивления установки, расхода электроэнергии, затрачиваемой на очистку газов, и расхода воды при мокром золоудалении. Кроме того, во время испытаний целесообразно определять фракционный коэффициент очистки электрофильтра по дисперсному составу уловленной и выбрасываемой в атмосферу золы. При испытании электрофильтров необходимо измерить все электрические характеристики полей, отобрать пробы пыли для измерения удельного электрического сопротивления пыли на входе в электрофильтр, по полям и на выходе электрофильтра. В период испытаний должны быть определены оптимальные режимы питания полей и режимы встряхивания коронирующих и осадительных электродов.

Испытания должны проводиться только на исправном оборудовании, приведенном в проектное состояние. Необходимо проверить исправность газоходов, устранить присосы (выбивания) газа по всему тракту. После обучения наблюдателей, наладки и проверки приборов в работе проводятся основные опыты в соответствии с программой испытаний.

Испытания производятся при нормальных эксплуатационных условиях работы котлоагрегата. Допустимые колебания в нагрузке котла не должны превышать 3–5 %.

При проведении испытаний рекомендуется придерживаться следующих условий [5]:

а) оценивается газоплотность вводов для термопар, сравниваются их показания с ртутными термометрами, штуцером для измерения давления, сальников для пневмометрических трубок. Подготавливаются винтовые зажимы, стеклянные и медные трубки, мягкая вязальная проволока, уплотнительный материал, изоляционная лента, реактивы для аппаратов ОРСа, спирт-ректификат, баки для отбора пульпы, журналы наблюдений.

Должны быть заготовлены и размечены рейки, предназначенные для фиксации положения пневмометрических пылезаборных трубок.

Переносные и стационарные измерительные приборы должны быть проверены перед началом испытаний.

До начала основных испытаний проводятся прикидочные опыты с целью проверки работы измерительных приборов, обучения наблюдателей, выявления дефектов в работе оборудования, выявления особенностей режима. Во время прикидочных испытаний все записи показаний приборов и измерения проводятся с такой же тщательностью, как и при основных испытаниях.

После того, как наблюдатели обучены, приборы налажены и проверены в работе, проводятся основные опыты в соответствии с программой испытаний.

б) опыты проводятся на трех различных нагрузках котлоагрегата: 70, 85 и 100 от номинальной при оптимальных значениях коэффициентов избытка воздуха;

в) длительность одного опыта – не менее 3-х часов;

г) оптимальные режимы работы электрофильтров необходимо увязывать с оптимальным режимом работы котлов (избытком воздуха, содержанием горючих в уносе, крупностью помола топлива);

д) при проведении опытов поддерживается неизменным газовоздушный режим;

е) определяется фракционный и химический состав золы, поступающей в электрофильтры, уловленной электрофильтром и выбрасываемой в дымовую трубу;

ж) в опытах проводится обязательное определение запыленности дымовых газов с помощью пылезаборных трубок.

5.1.2. Объем работ по испытаниям

В объем работ по испытаниям входят:

1. Составление и согласование рабочей программы и календарного графика.
2. Выполнение подготовительных работ.
3. Проверка эксплуатационных стационарных контрольно-измерительных приборов, используемых при испытаниях.
4. Подготовка объектов испытаний для установки переносных измерительных приборов (сверление отверстий, приварка штуцеров и колец для сальников к пневматическим трубкам и т.п.).
5. Установка приборов.
6. Обучение наблюдателей.
7. Тарировка сечений газоходов, в которых будут производиться замеры скорости потока газов, по RO_2 и по температуре газов.
8. Проведение испытаний.
9. Отбор проб во время испытаний, определение фракционного состава и УЭС золы по полям.
10. Проведение химических анализов газов.
11. Обработка результатов испытаний.
12. Составление предварительного заключения.
13. Составление технического отчета по испытаниям с выводами и рекомендациями по улучшению работы электрофильтра.

Перечень величин, принятых при проведении испытаний, их обозначение и размерность приводятся в сводной таблице 5.1 результатов испытаний.

Таблица 5.1

Сводная таблица результатов испытаний золоулавливающей установки

№ п.п.	Наименование величин.	Обозначение	Размерность
1	Дата опыта, время	-	час
2	Производительность котла	D_k	т/час
3	Горючие в уносе	$C_{ун.}^r$	%
4	Горючие в шлаке	$C_{шл.}^r$	%
5	Зольность топлива	$A_{p_1}^r$	%
7	Расход топлива	B	т/час
8	Температура газов перед и после ЭФ	$t_{г.}^1, t_{г.}^{11}$	$^{\circ}C$
9	Коэфф. избытка воздуха перед ЭФ	α^1	-
10	То же после ЭФ	α^{11}	-
11	Присосы в ЭФ	$\Delta\alpha$	-
12	Количество дымовых газов перед ЭФ по подсчетам	$Q_{г.}^1$	$м^3/час$
13	То же по замерам	$Q_{г.}^{11}$	$м^3/час$
14	Количество дымовых газов после ЭФ	$Q_{г.}^{11}$	$м^3/час$
15	Разряжение перед ЭФ	$h_{ст.}^1$	мм вод. ст.
16	Сопротивление ЭФ	$\Delta h_{эф}$	
17	Количество золы, поступившее в ЭФ	G^1	кг/час
18	Количество золы, уловленное в ЭФ	ΔG	кг/час
19	То же на выходе ЭФ	G^{11}	кг/час
20	Расход воды на орошение (смыв) ЭФ	$G_{в.}$	кг/час
21	Количество воды, испарившееся в ЭФ	$\Delta G_{в.}$	кг/час
22	Удельный расход воды на очистку 1000 $нм^3$ газа	q_0	кг/ $нм^3$
23	Запыленность дымовых газов до ЭФ	q^1	кг/ $нм^3$
24	То же выброс в атмосферу	q^{11}	кг/ $нм^3$
25	Степень очистки ЭФ	$\eta_{эф}$	%
26	Расход электрической мощности на ЭФ	P	кВт
27	Удельный расход электрической энергии на очистку 1000 $нм^3$ газа	P	$\frac{кВт \cdot ч}{1000 нм^3}$

5.1.3. Необходимые переносные приборы

Для производства испытаний электрофильтров необходимо иметь следующие переносные измерительные приборы:

1. Пневмометрические трубки (трубки Прандтля).
2. Газозаборные трубки с аллонжами и фильтрами.
3. Приборы для измерения давления и перепадов давлений: U-образные водяные манометры (тягомеры), наклонные тягомеры и микроманометры. Барометрическое давление отсчитывается по барометру турбинного цеха.
4. Термопары с потенциометрами для измерения температур дымовых газов или термометры сопротивления.
5. Газоанализаторы (например, аппараты ОРСа).
6. Весы сотенные для взвешивания пульпы и золы.
7. Секундомер.
8. Приборы для электрических измерений в соответствии с разделом 5.12.

Помимо перечисленного комплекта приборов, необходимо иметь в достаточном количестве резиновую трубку для отсоса газов на анализ и присоединения микроманометров и тягомеров; гильзы.

5.2. Определение вспомогательных величин

Измерение расхода газа

Рабочий объем дымовых газов определяется по формуле:

$$Q = 3600 F W_{cp} , \text{ м}^3\text{ч} \quad (5.1)$$

где F – площадь сечения газохода, $м^2$;

W_{cp} – средняя по сечению газохода скорость газа, $м/с$.

Определение средней скорости по среднему динамическому напору производится по формуле:

$$W_{cp} = \sqrt{\frac{2gkh_{g.cp}}{\gamma_r}} = 4,43 \sqrt{\frac{kh_{g.cp}}{\gamma_r}}, \text{ кг/м}^3 \quad (5.2)$$

где k – коэффициент пневмометрической трубки;

γ_r – удельный вес дымовых газов в рабочих условиях (при замеренных температуре и давлении), кг/м^3 ;

$h_{д.ср}$ – средний динамический напор в сечении газохода, замеренный пневмометрической трубкой, мм вод. ст.

Удельный вес газа при рабочих условиях равен:

$$\gamma_r = \gamma_0 \frac{273 \left(B \pm \frac{h_{ст}}{13,6} \right)}{(273 + t_r) \cdot 760}, \text{ кг/м}^3 \quad (5.3)$$

где γ_0 – удельный вес газа при нормальных условиях, кг/м^3 ;

t_r – температура газов в месте установки трубки, $^{\circ}\text{C}$;

B – барометрическое давление, мм рт. ст.

$h_{ст}$ – статическое давление потока в мм вод. ст. (со знаком «+» при избыточном давлении и со знаком «-» при разрежении).

Удельный вес дымовых газов при нормальных условиях для различных видов топлива может быть выбран в соответствии с таблицей 5.2:

Таблица 5.2

№№ п.п.	Топливо	Удельный вес γ_0 , кг/м^3	
		при $\alpha=1,5$	при $\alpha=2,0$
1	Каменные угли, сланцы	1,31	1,30
2	Тощие угли и антрациты	1,34	1,32
3	Влажные бурые угли, фрезерторф	1,28	1,26
4	Кусковой торф	1,30	1,28

Статическое давление при отсутствии возмущения (вращения) газового потока практически не меняется по сечению газохода, поэтому достаточно измерить его в любой точке сечения.

Полное давление газов в сечении газохода (h_n) определяется как алгебраическая сумма среднего динамического давления h_d и среднего статического давления $h_{ст}$:

$$h_n = h_d + h_{ст}, \text{ мм вод. ст.} \quad (5.4)$$

Средний динамический напор в сечении газохода определяется пневмометрической трубкой. Сечение выбирается на прямом участке газохода длиной не менее 4-5-кратной величины гидравлического диаметра газохода. С этой целью сечение газохода разбивается на ряд равновеликих площадок, в центре которых замеряются элементарные динамические напоры. При прямоугольном газоходе площадь разбивается на прямоугольники с размером сторон порядка 100–200 мм.

При круглом сечении газохода площадь круга разбивается на ряд равновеликих по площади колец. Элементарные динамические напоры замеряются по двум взаимно перпендикулярным диаметрам. Расстояние точек замера газохода определяется по формуле:

$$r_n = R \sqrt{\frac{2n-1}{2m}}, \text{ мм} \quad (5.5)$$

где r_n – расстояние точки замера в кольце от центра, мм;

R – радиус газохода, мм;

n – порядковый номер кольца;

m – число колец, на которое разбито сечение газохода.

Число колец, на которое разбито сечение, в зависимости от диаметра газохода принимается в следующих пределах:

Таблица 5.3

Диаметр газохода, м	350	400	500	600	700	800	1000
Число колец, шт.	6	7	8	10	12	14	16

Независимо от формы сечения измерение динамического напора пневмометрической трубкой в каждой точке производится дважды при движении трубки вглубь и обратно.

Для правильной и быстрой установки пневмометрической трубки в соответствующих точках сечения может быть использована деревянная рейка с метками и номерами, соответствующими расположению точек измерений в сечении.

Средний динамический напор по сечению газохода подсчитывается по формуле:

$$\sqrt{h_{д.ср.}} = \frac{\sqrt{h_{д}^1} + \sqrt{h_{д}^2} + \dots + \sqrt{h_{д}^n}}{n} \quad (5.6)$$

$$\text{или } h_{д.ср.} = \left(\frac{\sqrt{h_{д}^1} + \sqrt{h_{д}^2} + \dots + \sqrt{h_{д}^n}}{n} \right)^2, \quad (5.7)$$

где $h_{д}^1, h_{д}^2, \dots, h_{д}^n$ – элементарные динамические напоры, замеренные в центре элементарных площадок, мм вод. ст.;

n – число элементарных площадок.

Величина элементарного динамического напора подсчитывается по формуле:

$$h_{д}^n = i h_{шк}^n = i \frac{\gamma_{ф}}{\gamma_{м}} h_{шк.}, \text{ мм вод. ст.} \quad (5.8)$$

где i – коэффициент, учитывающий угол наклона шкалы микроманометра (синус угла наклона шкалы);

$\gamma_{ф}$ – фактический удельный вес жидкости, которой наполнен микроманометр (обычно спирт-ректификат), кг/м³;

$\gamma_{м}$ – удельный вес жидкости, на который проградуирована шкала микроманометра, кг/м³;

$h_{шк.}$ – показания шкалы микроманометра, мм.

С целью измерения динамического напора при проведении испытаний в одной контрольной точке проводится предварительная тарировка газохода.

Тарировка газохода проводится на трех нагрузках, при различных расходах газа. При тарировке сечения замеряются элементарные динамические напоры всех элементарных площадок, как было указано выше, и подсчитывается средний динамический напор по сечению газохода по формулам (5.6) или (5.7).

В результате тарировки определяется отношение средней по сечению газохода скорости потока к скорости в контрольной точке, которое называется коэффициентом тарировки:

$$K_{тар} = \frac{(\sqrt{h_{д}})_{ср}}{\sqrt{h_{к}}} = \frac{\sum(\sqrt{h_{д}^n})}{z \sqrt{h_{к}}}, \quad (5.9)$$

где $\sum(\sqrt{h_{д}^n})$ – **сумма корней квадратных их значений динамических напоров в элементарных площадках**;

z – число точек, в которых измерялись элементарные динамические напоры (число площадок);

$h_{к}$ – динамический напор в контрольной точке, мм вод. ст.

После предварительной тарировки во всех последующих опытах динамическое давление достаточно измерять в одной контрольной точке.

При измерении расхода в сечении с весьма неравномерным полем, например, в диффузорах, за дымососом, предварительная тарировка не дает надежных результатов и поэтому не рекомендуется.

5.3. Определение расхода газов расчетным путем

Расход дымовых газов перед электрофильтром определяется по количеству сжигаемого топлива и его элементарному составу по формуле:

$$Q_{г}^1 = B V_{г} \frac{(273 + t_{г}^1) 760}{273 \left(B - \frac{h_{д.ср.}}{13,6} \right)}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (5.10)$$

где B – часовой расход топлива, подсчитанный по обратному балансу, кг/ч;

$V_{г}$ – полный объем газов, нм³/кг;

$t_{г}^1$ – температура дымовых газов перед золоуловителем, мм вод. ст.

B – барометрическое давление, мм вод. ст.

Зависимость среднего динамического напора от расхода выражается уравнением:

$$h_{\partial.ср} = \frac{\left(\frac{Q_z^1}{3600}\right)^2 \gamma_z}{2g}, \text{ мм вод. ст.} \quad (5.11)$$

где Q_r^1 – расход газов перед электрофильтром, м³/ч;

F – площадь поперечного сечения газохода, м²;

γ – удельный вес газа, кг/м³.

Количество дымовых газов за электрофильтром подсчитывается по формуле:

$$Q_z^{11} = Q_z^1 \frac{\alpha^{11} (273 + t_z^{11}) \left(B \pm \frac{h_{cm}^1}{13,6} \right)}{\alpha^1 (273 + t_{cm}^1) \left(B \pm \frac{h_{cm}^{11}}{13,6} \right)}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (5.12)$$

где Q_z^1 – расход газов перед электрофильтром, м³/ч;

α^1 – коэффициент избытка воздуха перед электрофильтром;

α^{11} – коэффициент избытка воздуха после электрофильтра;

t_z^1 и t_z^{11} – температура газов до и после электрофильтра, °С;

h_{cm}^1 и h_{cm}^{11} – статические напоры в газоходах до и после электрофильтра, мм вод. ст.

5.4. Определение расхода топлива

Расход топлива определяется по формуле обратного баланса:

$$B = \frac{D_k (i_{n.n} - i_{n.в.})}{Q_n^p \cdot \eta_k^{бp}}, \text{ кг/ч} \quad (5.13)$$

где D_k – расход пара, определяемый по эксплуатационному параметру на щите котла, кг/ч;

$i_{n.n}$ – теплосодержание перегретого пара, определяемое из таблиц по давлению и температуре перегретого пара, ккал/кг;

$i_{n.в.}$ – теплосодержание питательной воды, определяемое из таблиц по давлению и температуре питательной воды, ккал/кг;

Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания топлива, определяемая химической лабораторией электростанции во время испытания, ккал/кг;

$\eta_k^{бp}$ – к.п.д. брутто котельного агрегата, определенный по обратному балансу.

Для ориентировочного определения количества шлака $a_{шл}$ и летучей золы $a_{ун}$ (уноса), получающихся при сжигании различных топлив, можно пользоваться данными ВТИ, приведенными в таблицах 5.4, 5.5.

Таблица 5.4

Тип топки	Вид топлива	% золы топлива	
		$a_{шл}$	$a_{ун}$
Пылеугольная (удаление шлака в твердом виде): с фронтальными горелками с угловыми горелками	Антрацит, каменные и бурые угли	15	85
	Каменные и бурые угли	7	93
Шахтно-мельничные То же То же	Бурые угли	15	85
	Сланцы	35	65
	Фрезерный торф	3	97
Пылеугольные (удаление шлака в жидком виде): однокамерные топки двухкамерные топки циклонные топки	Каменные угли	30-40	70-60
	То же	60-70	40-30
	То же	85-90	15-10

Таблица 5.5

Тип топки	Вид топлива	% золы топлива
-----------	-------------	----------------

		$a_{шл}$	$a_{ун}$
Слоевые			
Цепные решетки беспровальные и с обычными колосниками (при сортированном топливе, наклонно-переталкивающие решетки)	Для всех топлив, сжигаемых на данных решетках.	80	20
Цепные решетки с обычными колосниками	То же	70*	30

* в провале и шлаке.

5.5. Определение степени очистки газов

Степень очистки газов определяется отношением массы золы, уловленной в электрофильтре, к массе золы, поступившей в электрофильтр.

Степень очистки вычисляется по одной из следующих формул:

$$\eta_{эф} = \frac{\Delta G}{G^1} \cdot 100\% \quad , \quad (5.14)$$

$$\eta_{эф} = \frac{G^1 - G^{11}}{G^1} \cdot 100\% \quad , \quad (5.15)$$

$$\eta_{эф} = \frac{\Delta G}{\Delta G + G^{11}} \cdot 100\% \quad , \quad (5.16)$$

где G^1 – количество золы, поступающей в электрофильтр, кг/час;

ΔG – количество золы, уловленной в электрофильтре, кг/час;

G^{11} – количество золы, выбрасываемой в атмосферу с дымовыми газами, кг/час.

Практика испытаний показала, что наиболее достоверные результаты получаются при вычислении $\eta_{эф}$ по формуле (5.16), т.е. при определении количества золы, уловленной в золоуловителе и выбрасываемой в атмосферу.

5.6. Определение массы золы

5.6.1. Количество золы, поступающей с дымовыми газами в электрофильтр, может быть определено расчетным путем по формуле:

$$G^1 = \frac{BA^p a_{ун}}{100 - C_{ун}^r} \quad , \quad \text{кг / час} \quad (5.17)$$

где B – количество топлива, сжигаемого во время испытания золоуловителя, кг/час;

A^p – зольность топлива, %;

$a_{ун}$ – доля золы топлива в уносе;

$C_{ун}^r$ – содержание горючих в уносе, %.

Формула (5.17) дает удовлетворительные результаты только при достаточно точном определении доли топлива в уносе $a_{ун}$. В противном случае пользоваться формулой (5.17) рекомендуется только для прикидочных подсчетов.

Количество золы, поступающей в электрофильтр, можно определить экспериментально с помощью пылезаборной трубки (обычно нулевого типа) методом отбора пробы газов из газохода перед золоуловителем и определением запыленности потока. При этом сечение газохода перед золоуловителем разбивают на равновеликие площадки в соответствии с правилами, указанными в разделе 5.3, и определяют положение точек отбора проб газов.

Вставляют пылезаборную трубку в газоход и устанавливают ее в самой дальней точке на выбранной прямой, носиком по направлению потока газов. Соединяют пылезаборную трубку с микроанометром и фильтром и включают воздуходувку или эжектор. Поворачивают носик пылезаборной трубки строго против потока газов и регулируют зажимами или вентилем скорость отсасывания газов. Она должна быть равна скорости газов в рассматриваемой точке газохода, что достигается установкой микроанометра на нуль.

Отсос ведется во всех намеченных точках газохода, равными промежутками времени. Время отсоса принимается от 2-х до 5-ти минут. Выбор времени отсоса в каждой точке зависит от запыленности газового потока: чем она выше, тем время отсоса принимается меньшим.

Опыт считается оконченным, когда отобраны пробы запыленных газов из всех намеченных точек сечения газохода. Пылесборную трубку вынимают, снимают тканевый фильтр и определяют его вес. Зная вес предварительно высушенного фильтра до опыта, по разности определяют вес золы, задержанной фильтром.

Вес золы, поступающей в золоуловитель, вычисляют по формуле:

$$G^1 = \frac{q_0 \cdot 60 \cdot 4F}{1000n t_0 \pi d^2}, \text{ кг/ч} \quad (5.18)$$

где q_0 – вес всей золы, уловленной тканевым фильтром, г;

n – количество точек отбора проб газов;

t_0 – продолжительность отбора газов в одной точке, мин.;

F – площадь сечения газохода перед золоуловителем, м²;

d – диаметр носика пылесборной трубки, м.

Необходимо иметь в виду, что отбор проб запыленного газа перед электрофильтром не всегда дает надежные результаты в определении запыленности потока.

Часто имеет место меняющееся по сечению расслоение потока по фракционному составу частичек золы в нем, что приводит к ошибкам в определении истинной запыленности и фракционного состава золы в потоке.

Непременным условием для определения запыленности газов перед электрофильтром с помощью пылесборной трубки является наличие прямого участка газохода перед выбранным сечением, равного по длине не менее 5-ти гидравлическим диаметрам газохода.

5.6.2. Вес золы, уловленной электрофильтром, определяют непосредственным взвешиванием. Отбирают и взвешивают всю золу G^1 , уловленную золоуловителем за время опыта Z час:

$$\Delta G = \frac{G^1}{Z}, \text{ кг/ч} \quad (5.19)$$

При мокром золоулавливании, при наличии гидрозатвора, количество уловленной золы можно также определить по концентрации пульпы ρ_n по формуле:

$$\Delta G = \rho_n \cdot G_b, \text{ кг/час} \quad (5.20)$$

где G_b – расход воды через гидрозатвор на смыв уловленной золы, кг/час.

5.6.3. Количество золы, выбрасываемой после золоуловителя в атмосферу, определяется при помощи пылесборного зонда в сечении газохода за электрофильтром по описанному выше способу.

5.7. Определение запыленности дымовых газов

В испытаниях электрофильтров запыленность дымовых газов является одним из важнейших показателей, характеризующих очистку газов данным аппаратом.

Начальная запыленность дымовых газов (q^1) или запыленность перед электрофильтром подсчитывается из отношения общего веса золы, находящейся в дымовых газах перед золоуловителем (G^1), к общему объему дымовых газов при нормальных условиях по формуле:

$$q^1 = \frac{G^1}{Q^1_{zo}} \cdot 1000, \text{ г/нм}^3 \quad (5.21)$$

Запыленность после электрофильтра определяется отношением веса золы, выбрасываемой в атмосферу, к объему дымовых газов за золоуловителем, приведенному к нормальным условиям:

$$q^{11} = \frac{G^{11}}{G^{11}_{zo}}, \text{ г/нм}^3 \quad (5.22)$$

5.8. Определение дополнительной затраты электроэнергии на золоулавливание

Удельные энергетические затраты на 1000 м³ очищаемого газа, кВт час можно определить по следующей формуле:

$$P_{y\partial} = \frac{P_1 T + P_2 t_2 + P_3 t_3 + P_4 T}{T Q_{\text{эл}}} \cdot 10^3, \text{ кВт}$$

где P_1 – мощность питания электрофильтра высоким напряжением, кВт;
 T – расчетный период эксплуатации электрофильтра за год, $T = 8760$ ч.;
 P_2 – мощность, затрачиваемая на питание электродвигателей механизмов встряхивания, кВт;
 t_2 – время работы электродвигателей в течение расчетного периода с учетом периодического встряхивания осадительных и коронирующих электродов, газораспределительных решеток и вибровстряхивания бункеров;

P_3 – мощность питания электронагревателей, кВт;

t_3 – время работы электронагревателей в течение расчетного периода эксплуатации;

P_4 – мощность, потребляемая на преодоление гидравлического сопротивления электрофильтра, кВт;

$$P_1 = \frac{U_{\text{max}} j K_{\text{фи}} \text{Cos} \varphi F}{K_{\text{фи}} \eta_a 10^3} T, \text{ кВт}$$

где U_{max} – амплитуда питающего напряжения, кВт;

j – величина плотности тока коронного разряда;

$K_{\text{фи}}$ – коэффициент формы тока = 1,26;

$\text{Cos} \varphi$ – коэффициент мощности агрегата питания = 0,7;

F – площадь осаждения поля, м²;

$K_{\text{фи}}$ – коэффициент формы напряжения = 1,41;

η_a – КПД агрегата питания = 0,87 – 0,94.

$$P_2 = K_{\text{и.дв}} \cdot P_{\text{дв}} n_{\text{дв}},$$

где $K_{\text{и.дв}}$ – коэффициент использования установленной мощности электродвигателей;

$P_{\text{дв}}$ – мощность одного электродвигателя, кВт;

$n_{\text{дв}}$ – количество электродвигателей механизмов встряхивания;

$K_{\text{нагр}}$ – коэффициент использования нагревателя.

$$P_3 = K_{\text{нагр}} \cdot P_{\text{нагр}} n_{\text{нагр}},$$

где $P_{\text{нагр}}$ – мощность одного нагревателя, кВт;

$n_{\text{нагр}}$ – количество нагревателей.

$$P_4 = \frac{Q_{\text{эл}} \Delta P}{3600 \eta_d}, \text{ кВт}$$

где ΔP – максимальное гидравлическое сопротивление, Па;

η_d – КПД тягодутьевого устройства.

Более точно потребление электроэнергии при установке электрофильтра на сопротивления газового тракта с учетом изменения объема дымовых газов определяется по формуле:

$$P_4 = P_1' + P_2', \text{ кВт} \quad (5.23)$$

где P_1' – мощность, затрачиваемая на преодоление дополнительного сопротивления газового тракта, кВт;

P_2' – увеличение (уменьшение) расходуемой мощности на тягу вследствие изменения объема транспортируемых газов, кВт.

Увеличение сопротивления газового тракта определяется по формуле:

$$S_{\Delta} h = \Delta h_{\text{эф}} + \Delta h_1 + \Delta h_2 + S_{\Delta} \cdot S_{\text{д.тр}}, \text{ мм вод. ст.} \quad (5.24)$$

где $\Delta h_{\text{эф}}$, Δh_1 , Δh_2 – сопротивления электрофильтра, подводящих и отводящих газоходов, мм вод. ст.;

S_{Δ} , $S_{\text{д.тр}}$ – изменение самотяги дымовой трубы.

Сопротивление электрофильтра определяется по разности полных напоров по формуле:

$$\Delta h_{\text{эф}} = h_n^1 - h_n^{11}, \text{ мм вод. ст.} \quad (5.25)$$

где $h_n^1 = h_{\text{ст}}^1 + h_{\text{д}}^1$, мм вод. ст.;

$h_n^{11} = h_{\text{ст}}^{11} + h_{\text{д}}^{11}$, мм вод. ст.

Изменение самотяги дымовой трубы вычисляется по формуле:

$$S_{\Delta} \cdot S_{д.тр} = H_{д.тр} (\gamma_{г}^{11} - \gamma_{г}^1), \text{ мм вод. ст.} \quad (5.26)$$

где $H_{д.тр}$ – высота дымовой трубы, м;

$\gamma_{г}^1$ и $\gamma_{г}^{11}$ – удельные веса газов до и после золоуловителя, кг/м³.

Потребная мощность на валу дымососа для преодоления дополнительного сопротивления газового тракта определяется по формуле:

$$P_1' = \frac{Q_2^1 \cdot \delta \cdot \Delta h}{102 \cdot 3600 \cdot \eta_{дмс}}, \text{ кВт} \quad (5.27)$$

где Q_2^1 – количество дымовых газов перед золоуловителем, м³/час;

$\eta_{дмс}$ – к.п.д. дымососа. Принимается по материалам испытаний или в соответствии с заводской характеристикой по фактическому расходу газов.

Относительное изменение объема дымовых газов вследствие присосов воздуха в золоуловителе и уменьшения температуры газов определяется из отношения:

$$\delta = \frac{Q_2^{11} - Q_2^1}{Q_2^1} \quad (5.28)$$

где Q_2^{11} – количество дымовых газов после электрофилтра, м³/час;

Q_2^1 – количество дымовых газов перед электрофилтром, м³/час.

Изменение мощности на валу дымососа вследствие изменения объема транспортируемых дымовых газов вычисляется по формуле:

$$P_2' = \frac{Q_2^1 \cdot \Delta h_{дмс} \cdot \varepsilon}{102 \cdot 3600 \cdot \eta_{дмс}}, \text{ кВт} \quad (5.29)$$

где $\Delta h_{дмс}$ – сопротивление газового тракта, определяемого по формуле:

$$\Delta h_{дмс} = h_{п.дмс}^{11} - h_{п.дмс}^1, \text{ мм вод. ст.} \quad (5.30)$$

где $h_{п.дмс}^1$ и $h_{п.дмс}^{11}$ – полные давления газов на входе и выходе из дымососа.

5.9. Измерение степени очистки газов по соотношению количества пыли, уловленной в бункерах электрофилтра

В процессе эксплуатации электрофилтра оперативное получение информации о степени очистки газов позволяет судить о его исправности, а в случае появления неисправностей принимать меры по их устранению. Предлагаемая методика не может претендовать на получение точных данных о выходной запыленности электрофилтра, однако ее использование позволяет обслуживающему персоналу судить о тенденции и величине изменения степени очистки газов электрофилтром и, что особенно полезно, позволяет диагностировать, какое именно поле электрофилтра имеет пониженную эффективность и, следовательно, создает предпосылки для оперативного устранения неисправностей.

Сущность методики заключается в следующем. При допущении равенства степени очистки газов по полям электрофилтра получим:

$$\frac{P_{ул2}}{P_{ул1}} = \frac{P_{ex2}}{P_{ex1}} \cdot \eta_2 = \frac{P_{1ex} - P_{ул1}}{P_{ex1}} = 1 - \eta \quad (5.31)$$

Соответственно:

$$\frac{P_{ул3}}{P_{ул1}} = (1 - \eta)^2, \text{ и далее } \frac{P_{ул4}}{P_{ул1}} = (1 - \eta)^3 \text{ и т.д.} \quad (5.32)$$

Применяя, например, метод математической индукции получим:

$$\eta = 1 - C^{\frac{N}{1-n}}, \quad (5.33)$$

где C – соотношение количества уловленной пыли по полям;

N – количество полей в электрофилтре;

n – порядковый номер поля электрофилтра.

Откуда соотношение количеств уловленной пыли по полям будет:

$$C = \frac{1}{(1-\eta)^{\frac{n-1}{N}}} \quad (5.34)$$

Известно, что положение экспоненты на координатной плоскости «х-у» может быть определено двумя точками. Использование последующих точек уточняет положение экспоненты или указывает на отклонение фактического распределения пыли от экспоненциального закона, что может быть использовано для анализа работы полей электрофильтра.

Такие явления, как загибание короны, развитая обратная корона, например, на последних полях, неисправность какого-либо поля или агрегата питания, могут быть диагностированы с помощью этого метода при наличии некоторого опыта, без значительных трудозатрат при проведении регулярных измерений по соотношению количеств уловленной пыли по полям.

Для электрофильтров, имеющих два, три и четыре поля, зависимость соотношений количества уловленной пыли по полям от степени очистки газов представлена в таблицах 5.6, 5.7, 5.8.

Таблица 5.6

№ поля	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,224	0,200	0,173	0,141	0,100

Таблица 5.7

№	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,999
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,368	0,342	0,311	0,271	0,215	0,10
3	0,137	0,117	0,0965	0,0737	0,0464	0,01

Таблица 5.8

№ поля	0,96	0,97	0,98	0,99	0,995	0,999	0,9995
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,45	0,42	0,376	0,316	0,266	0,178	0,1
3	0,2	0,173	0,141	0,101	0,071	0,032	0,01
4	0,089	0,072	0,053	0,032	0,019	0,006	0,001

Приведенные в таблицах соотношения количеств уловленной пыли рассчитаны для исправных электрофильтров при допущении равенства степени очистки газов по полям. Следует отметить, что степень очистки газов в первых по ходу газов полях электрофильтра, как правило, выше чем в последующих, исключая условия сильного загибания короны.

Ориентировочно, с поправкой, степень очистки газов по полям может составлять следующие величины.

В трехпольном электрофильтре при общей степени очистки газов 99,5–99,7 %:

– на первом поле ~ 95–96%, на последнем ~ 70–80 %.

В четырехпольном электрофильтре при общей степени очистки газов 99,9 %:

– на первом поле ~ 99, на последнем ~ 70 %.

Причина изменения степени очистки газов по полям по мере продвижения пылегазового потока по электрофильтру заключается в лучшем улавливании крупных частиц, частиц с более низким УЭС, не дающих обратную корону.

Таким образом, соотношение количеств уловленной по полям пыли для каждого электрофильтра будет несколько отличаться от расчетного (экспоненциального).

Наличие неисправностей в каком-либо поле, естественно, приведет к уменьшению количества уловленной пыли в нем и к соответствующему увеличению количества пыли в последующих полях. Регулярное сравнение количеств уловленной пыли позволит получать информацию об эффективности электрофильтра в целом и об эффективности отдельных полей.

Следует особо отметить, что для использования этого метода достаточно иметь информацию о соотношении количеств уловленной пыли (без знания абсолютной величины количества уловленной пыли). Это удобно там, где имеется гидрозолоудаление, а также в тех случаях, где бункера оснащены уровнемерами.

5.10. Устройство для оперативного измерения массовой концентрации аэрозолей

Устройство предназначено для измерения массовой концентрации дисперсной фазы в неагрессивных газах при температурах до 250⁰С в диапазоне концентраций 0,005–2,5 г/м³.

Устройство является переносным малогабаритным аппаратом и может применяться в различных отраслях промышленности. Питание устройства осуществляется от сети переменного тока частотой 50 Гц номинальным напряжением 220 В при отклонении напряжения сети не более 10 % от номинального.

Перед включением корпус устройства необходимо заземлить.

Принцип работы устройства основан на поглощении светового излучения анализируемой пробой пыли, осажденной на фильтрующей перегородке.

5.10.1. Краткое описание устройства

Конструктивно устройство выполнено в виде двух отдельных блоков: пробоотборного устройства и измерительного блока-фотометра.

Пробоотборное устройство представляет собой цилиндр, выполненный из нержавеющей стали, в котором размещены шток с поршнем, приводимые в действие посредством пружины. Устройство имеет гнездо для установки и закрепления бумажного фильтра (рис. 5.1).

Измерительный блок выполнен в металлическом корпусе прямоугольной формы со съемной передней крышкой, на которой размещены элементы электрической схемы (рис. 5.2, 5.3). На передней крышке расположены: выключатель, предохранитель, микроамперметр и гнездо для подключения выносной головки со встроенным в нее источником света и фотоэлементом типа Ф41С. На задней стенке корпуса расположена клемма заземления. Принципиальная электрическая схема фотометра приведена на рис. 5.3. Габаритные размеры измерительного блока не более 350x160x110 мм.

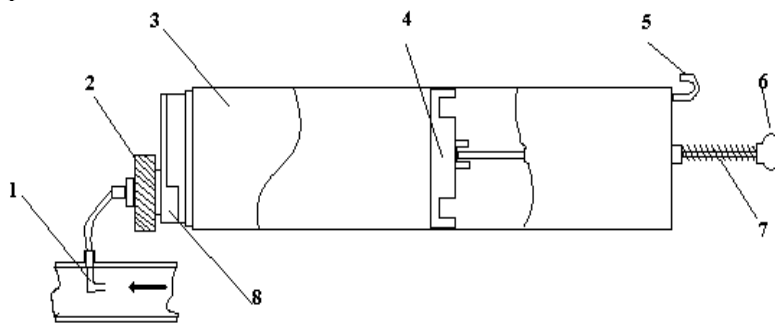


Рис. 5.1. Пробоотборное устройство.

- 1 – наконечник пылеотборной трубки; 2 – гайка фиксации фильтра; 3 – цилиндр; 4 – поршень; 5 – фиксатор пружины; 6 – рукоятка; 7 – пружина, 8 – фильтр

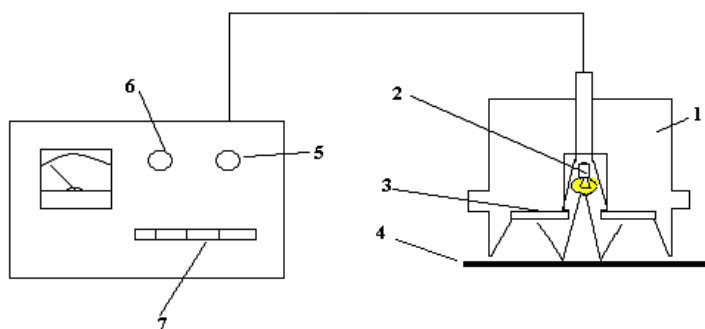


Рис 5.2. Вид измерительного блока с выносной головкой.

- 1 – выносная головка; 2 – источник света; 3 – фотоэлемент; 4 – фильтр с осажденной пробой пыли; 5 – предохранитель; 6 – резистор установки «0»; 7 – выключатель

5.10.2. Работа с прибором

Нажатием до упора на ручку штока пробоотборного устройства производится сжатие его пружины (7). После этого в пробоотборное устройство вставляется бумажный фильтр, который фиксируется гайкой (2), обеспечивая герметичность при отборе пробы.

Трубка (1) пробоотборного устройства через штуцер помещается в газопровод (9) и ориентируется входным отверстием навстречу газовому потоку. Далее предохранителем (5) освобождается пружина, которая приводит в движение шток с поршнем (4) пробоотборного устройства – при этом происходит отбор газа объемом 500 мл вместе со взвешенными частицами пыли, которая остается на фильтре. Затем производится включение и калибровка фотометра.

Для калибровки выносную головку (рис. 5.2) фотометра с источником света (2) и фотоэлементом (3) плотно прижимают к чистому фильтру и с помощью переменного резистора (6) устанавливают стрелку прибора в крайнее правое положение (100 делений).

После этого головку прижимают к запыленному фильтру и отсчитывают показания прибора в относительных единицах. Затем по градуировочным характеристикам (рис. 5.4) определяют концентрацию пыли в газе в $г/м^3$.

Для построения градуировочных характеристик необходимо с использованием фильтра АФА произвести тарировку. Для каждого вида пыли строится своя градуировочная характеристика. Правильно выполненная тарировка позволяет определять содержание дисперсной фазы с точностью $\pm 5\%$.

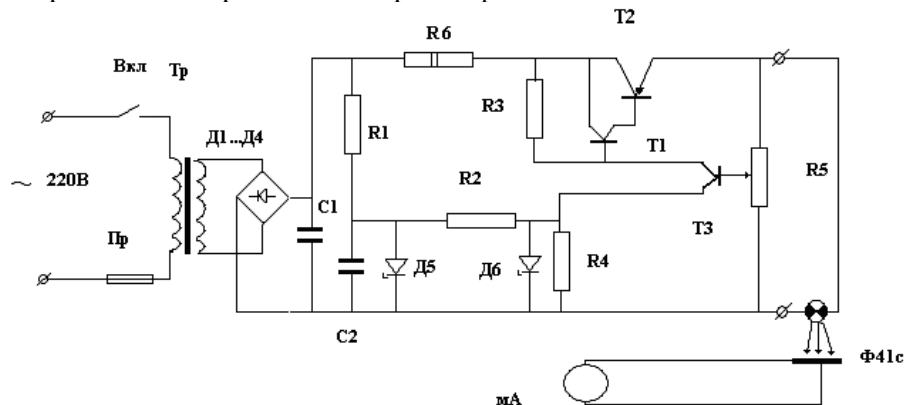


Рис. 5.3. Принципиальная электрическая схема фотометра

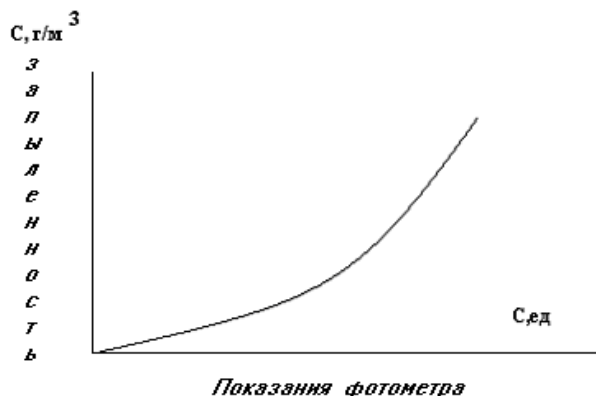


Рис. 5.4. Типичная тарировочная зависимость запыленности от показаний миллиамперметра устройства

5.11. Методики проведения электрических измерений при пуско-наладке электрофильтров

Измерение электрических параметров необходимо проводить на всех стадиях «жизненного» цикла электрофильтров. Получение объективных величин электрических параметров является предпосылкой для успешного поддержания проектных параметров электрофильтра.

Перед проведением электрических измерений электрофильтров необходимо зафиксировать:

1. Вид производства.
2. Тип технологического (пылеулавливающего) оборудования.
3. Тип (типоразмер) электрофильтра, год его изготовления, состояние корпуса теплоизоляции и системы пылеудаления, характеристики и состояние осадительных и коронирующих электродов.
4. Запыленность на входе и выходе электрофильтра.
5. Вид используемого топлива, сырья.
6. Существующий режим встряхивания осадительных и коронирующих электродов по полям.
7. Температура газов на входе и выходе электрофильтра.
8. Скорость газов в активной зоне электрофильтра, величина присосов, выбиваний.
9. Влажность газов.
10. Недожог топлива.
11. Тип повысительно-выпрямительных агрегатов и приборов управления ими.
12. Электрический режим, автоматически поддерживаемый системой регулирования (ток, напряжение, мощность питания каждого поля (полуполя)).
13. Вольтамперные характеристики при пуско-наладке электрофильтра на воздухе и газе.
14. Вольтамперные характеристики после 20...30-минутного непрерывного встряхивания электродов.

Для проведения измерений необходимо применение следующего оборудования:

1. Активный делитель напряжения сопротивлением 100 Ом с микроанометром типа М-194 (2 шт. на 2 поля).
2. Миллиамперметр многопредельный магнитоэлектрической системы на полный ток агрегата питания (2 шт.)
3. Осциллограф и самопишущие миллиамперметры и вольтметры (при длительных испытаниях).

Измерение вольтамперных характеристик электрофильтра

Вольтамперные характеристики должны сниматься для каждого поля электрофильтра при постоянном технологическом режиме. При измерениях необходимо поддерживать постоянный электрический режим на предыдущих полях электрофильтра.

Снимать вольтамперные характеристики следует не менее 5 раз, доводя напряжение каждый раз до пробоя при работающих механизмах встряхивания.

Следующую серию характеристик снимать, фиксируя высокое напряжение и ток короны при подъеме и снижении напряжения, не доводя до пробоя в поле (предельное напряжение примерно на 5 % ниже пробивного) при отключенных механизмах отряхивания поля, параметры которого измеряются.

Цикл измерений каждой характеристики производят с возможно максимальной скоростью.

Для измерения тока короны последовательно со щитовым миллиамперметром включаются магнитоэлектрический и электромагнитный миллиамперметры класса точности не ниже 1,5.

Определение критических параметров полей электрофильтра

При этих измерениях электрический режим последующего поля является индикатором, фиксирующим минимум выходной запыленности предыдущего поля. Для определения критических параметров поля необходимо измерить зависимость электрического режима данного поля от режима предыдущего поля. Порядок измерений при этом следующий:

1. Установить предельный электрический режим (без пробоев) при отключенном напряжении на предыдущем поле.
2. Поднимать ступенями напряжение на предыдущем поле, фиксируя ток короны и высокое напряжение по обоим полям не ранее, чем через 5–10 секунд на каждой ступени напряжения.
3. Зафиксировать ток и напряжение, при которых появятся искровые пробои на предыдущем поле.
4. После пробоя ступенями снижать напряжение, проводя измерения по п.2.
5. Провести не менее 5 измерений.

Характерная зависимость токов и напряжений по полям имеет вид, приведенный на рис. 5.5.

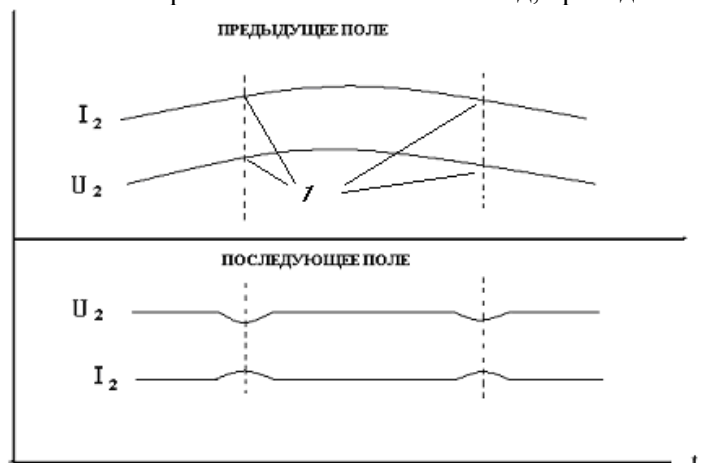


Рис 5.5. Характерная зависимость параметров последующего поля от параметров предыдущего поля.

I – критические электрические параметры предыдущего поля, соответствующие наименьшей выходной запыленности из этого поля

Обработка результатов измерений

1. Построить усредненные вольтамперные характеристики для каждого поля.
2. Построить усредненные восходящие и нисходящие ветви вольтамперных характеристик для каждого поля. Превышение токов нисходящей ветви над токами восходящей свидетельствует о вероятности наличия обратной короны.
3. Построить зависимость напряжения и тока каждого поля от напряжения и тока предыдущего поля. При наличии обратной короны величина тока, соответствующая экстремуму характеристики поз. 1 является критической.
4. Определить усредненное значение оптимального периода встряхивания коронирующих электродов каждого поля и по его величине рассчитать по формуле значение УЭС каждого поля (см. раздел 5.13).

5.12. Методы измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) пылей в электрофильтрах

Одним из факторов, затрудняющих осуществление эффективных мер по снижению влияния обратной короны, является отсутствие общепринятых методик и устройств, позволяющих получать однозначные данные о величине УЭС уловленной по полям пыли.

Известные устройства для измерения УЭС пыли в лабораторных условиях не могут дать достоверных результатов из-за невозможности воспроизведения условий промышленного электрофильтра (состав газов, условия осаждения пыли и формирования слоя) и сложности отбора **представительной пробы**.

Специально разработанные устройства для измерения УЭС «Циклоном-1» (НИИОГАЗ) [2], ИСП-1 (СФ НИИОГАЗ) и др. не получили широкого применения по причине их сложности. Этими приборами также затруднено измерение УЭС по полям.

Устройство для измерения удельного электрического сопротивления непосредственно на слое осаждаемой пыли осадительного электрода электрофильтра [2] хотя и позволяет измерить УЭС осаждаемого слоя пыли в любом поле и не требует специального источника питания для осаждения пыли, но монтаж этого устройства сложен и трудоемок.

Известен способ, использующий сравнение вольтамперных характеристик полей электрофильтра, снятых при отсутствии и наличии слоя пыли на электродах.

Величину падения напряжения на слое пыли ($U_{сл}$) можно определить по вольтамперным характеристикам как разность напряжений на чистых и запыленных электродах при рабочем токе данного поля (3). Тогда величина УЭС составит:

$$\rho_v = \frac{U_{сл}}{j\delta}, \quad (5.35)$$

где j – плотность тока через слой пыли, а/м; δ – средняя толщина слоя пыли, мм.

(При оптимальных режимах встряхивания осадительных электродов толщину слоя высокоомной пыли по полям можно принимать в диапазоне 3–5 мм; меньшее значение толщины следует принимать для последних полей и для пылей, имеющих более высокое УЭС.)

Кроме указанного способа для измерения УЭС пыли возможно также использование экспериментальных зависимостей пылеемкости осадительных (m_0) и коронирующих (μ_0) электродов электрофильтров от величины удельного электрического сопротивления слоя пыли (ρ_v). Эти зависимости, полученные для 12 электрофильтров в различных отраслях промышленности, имеют вид, приведенный на рис. 5.7.

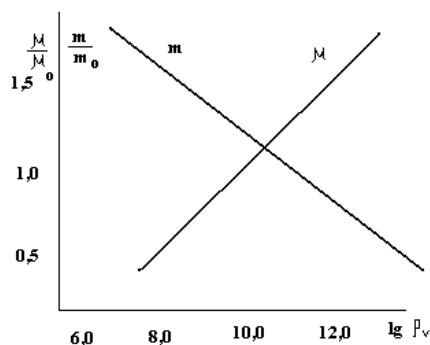


Рис. 5.7. Зависимость относительной оптимальной пылеемкости осадительных (m/m_0) и коронирующих (μ/μ_0) электродов электрофильтра от логарифма удельного электрического сопротивления пыли

Зная величины параметров m_0 и μ_0 по графикам рис. 5.7. можно определить величину УЭС пыли любого поля [4].

Измерение величины пылеемкости осадительных электродов по полям целесообразно производить с использованием пылемеров на входе и выходе электрофильтра. Для этого достаточно измерить степень очистки газов электрофильтром при величинах пылеемкости поля $m = m_0 \pm 5-15\%$ для каждого поля (практически, учитывая, что величина пылеемкости пропорциональна интервалу встряхивания, достаточно изменить величину интервала встряхивания также на 5–15%).

Максимальная величина степени очистки газов будет соответствовать оптимальной пылеемкости осадительных электродов поля; по ней и определяется уточненное значение УЭС с использованием графика рис. 5.8.

В другом способе определения УЭС может быть использовано измерение величины μ_0 . Этот способ менее трудоемок – достаточно измерить оптимальную пылеемкость коронирующих электродов в диапазоне 5–15 % от ее величины, установленной при расчете.

Измерение УЭС по величине пылеемкости коронирующих электродов

Оптимальная величина пылеемкости коронирующих электродов рассчитывается по величине удельного электрического сопротивления (УЭС), (ρ_v) по формуле: $\mu_0 = 131g \cdot \rho_v - 77$, при $10^{12} > \rho_v > 10^6$ Ом·м. При этом величина УЭС обычно определяется на основании лабораторных измерений образцов пыли, отобранных с электродов соответствующего поля или по справочным данным. В том и другом случае величина УЭС является ориентировочной по ряду известных причин. Представляет практический интерес определение величины УЭС по полям электрофильтра с использованием пылеемкости коронирующих электродов. Для измерения УЭС в этом случае, при оптимальном периодическом встряхивании электродов предыдущих полей, путем непрерывного измерения тока короны исследуемого поля определяют время, за которое наступит начало снижения тока короны или увеличения напряжения. При этом следует иметь в виду, что для пылей, имеющих малое УЭС, этот период составляет несколько минут, а для высокоомных пылей может составлять на последних полях несколько часов. Данный эксперимент необходимо повторить не менее 3-х раз, включая после каждого опыта непрерывное встряхивание электродов исследуемого поля. Полученные результаты – усреднить. Зависимость тока короны от времени при отключенном встряхивании имеет вид, приведенный на рис. 5.8.

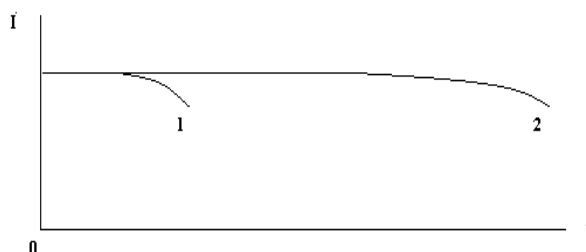


Рис. 5.8. Типичная зависимость тока короны от времени запыления коронирующих электродов при отключении встряхивания коронирующих электродов.
1 – для электрофильтра, улавливающего низкоомную пыль;
2 – для электрофильтра, улавливающего высокоомную пыль.

На основании полученной величины оптимального интервала встряхивания коронирующих электродов производится расчет величины пылеемкости коронирующих электродов. И далее рассчитывается величина УЭС по формуле:

$$\rho_v = 10^{(5,9+k \cdot \tau_k)}, \quad (5.36)$$

где k – коэффициент, зависящий от параметров электрофильтра;

τ_k – интервал встряхивания коронирующих электродов.

Для определения УЭС пылей непосредственно в газоходе в СФ НИИОГАЗ был разработан способ определения удельного электрического сопротивления пылей [3].

Этот метод трудоемок и не лишен некоторых недостатков, однако до настоящего времени он является единственным официальным методом. Он широко апробирован. Его применение позволяет получать достаточно надежные результаты различными организациями.

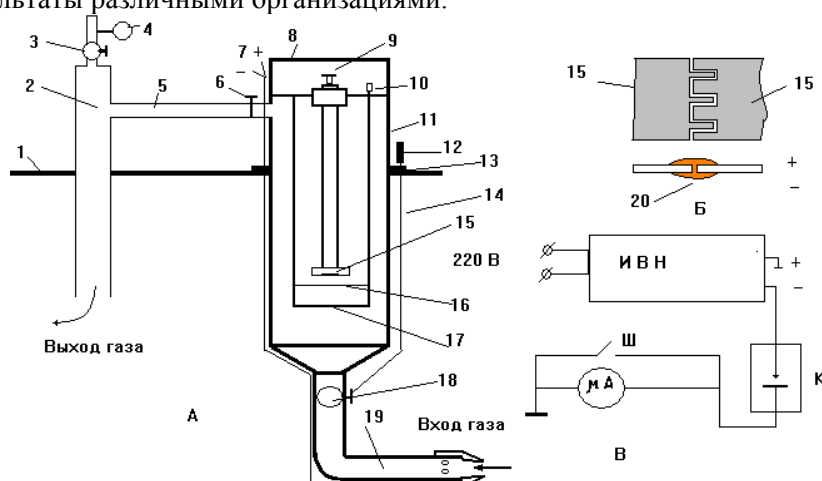


Рис. 5.8. Устройство для измерения удельного электрического сопротивления.

А – конструкция прибора; Б – схема измерительного устройства; В – схема электрических соединений.

1 – стенка газохода; 2 – эжектор; 3 – вентиль; 4 – манометр; 5 – отводной патрубков; 6 – шиберная заслонка; 7 – импульсные трубки (к микроманометру); 8 – экран; 9 – измерительные клеммы; 10 – клемма коронирующего электрода; 11 – измерительная камера; 12 – рукоятка шиберной заслонки; 13 – фланец; 14 – тяга шиберной заслонки; 15 – измерительные электроды; 16 – коронирующий электрод; 17 – рамка коронирующего электрода; 18 – шиберная заслонка; 19 – заборная трубка; 20 – слой пыли.
ИВН – источник высокого напряжения; К – измерительная камера;
Ш – тумблер шунтирующий; μA – микроамперметр.

Сущность способа заключается в измерении сопротивления слоя пыли, сформированного в электрическом поле коронного разряда в зазоре между измерительными электродами. При использовании этого способа применяется следующая аппаратура:

1. Источник высокого напряжения ВС-20-10 по ВТУ ОАА.530.001-53. Напряжение изменяется от 0 до 20 кВ, максимальный ток 10 мА. Потребляемая мощность не более 0,8 кВА. Возможно использование других источников, обеспечивающих указанные пределы напряжения и тока.

2. Тераомметр ЕК6-7 по ГОСТ 9781-67 или ЕК6-14, или другой прибор с диапазоном измерения $10^7 - 10^{17}$ Ом.

3. Кроме указанных приборов используются: микроманометр М265, тумблер ТП1-2, провод экранированный, кабель высоковольтный, манометр, воздушный термометр, трубка резиновая.

Для получения пробы пыли используется метод изокINETического отбора газового потока в измерительную камеру (1) с последующим осаждением аэрозоля на измерительные электроды (2) в электрическом поле коронного разряда (рис. 5.8). Упрощенный вариант измерительной камеры, размещаемой снаружи газохода (рис. 5.9), имеет больший вес и габариты. В этом варианте изокINETичность отбора газа соблюдается при равенстве нулю разности статических напоров, измеренных соответственно внутри канала заборной трубки и в газоходе.

Отсос газа может осуществляться любым побудительным устройством, обеспечивающим требуемую производительность. Для обеспечения сходимости измерений толщина слоя на электродах должна составлять 1-3 мм, для чего время отбора пыли должна составлять 10-30 мин. (уточняется при проведении предварительного опыта). После монтажа измерительной камеры на газоходе ее прогревают вместе с измерительными электродами в течение 30 мин.

Далее производится осаждение пыли на измерительные электроды и измерение сопротивления осажденной пыли тераомметром.

При работе с устройством необходимо соблюдение правил техники безопасности, изложенных в РТМ 26-14-07-77.

Удельное электрическое сопротивление пыли (ρ , Ом·м) вычисляется по формуле:

$$\rho = R \frac{S}{b}, \quad (5.37)$$

где R – измеренное сопротивление пыли, Ом;

S – площадь сечения активной части измерительных электродов, м^2 ;

b – величина зазора между измерительными электродами, м.

Конструкция измерительных электродов обеспечивает величину $\frac{S}{b} = 0,05$, тогда $\rho = 0,05R$, Ом·м.

Для определения УЭС пыли проводят десять опытов. Далее определяют среднее арифметическое значение $\rho_{\text{ср}}$. Среднее квадратичное отклонение σ от среднего значения ρ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\rho_i - \rho_{\text{ср}})^2} \quad (5.38)$$

где ρ_i – результаты измерений; n – количество измерений.

Результаты измерений, отклоняющиеся от среднего арифметического значения на величину большую 3σ , отбрасывают.

За окончательный результат принимают среднее арифметическое значение оставшихся измерений.

Пример вычисления результатов измерений

1. Проводилось измерение удельного электрического сопротивления золы подмосковного угля на входе в электрофильтры блока №4 Черепетской ГРЭС. При замере были получены результаты, приведенные в табл.5.9.

Таблица 5.9

Номер опыта	Температура газа, °С	Измеренное сопротивление, (R) Ом	Удельное электрическое сопротивление, (ρ) Ом·м
1	160	$4,0 \cdot 10^{11}$	$2,0 \cdot 10^{10}$
2	160	$3,6 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{10}$
3	160	$4,8 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{10}$
4	160	$4,2 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{10}$
5	160	$3,8 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{10}$
6	160	$4,4 \cdot 10^{11}$	$2,2 \cdot 10^{10}$
7	160	$4,0 \cdot 10^{11}$	$2,0 \cdot 10^{10}$
8	160	$3,8 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{10}$
9	160	$4,2 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{10}$
10	160	$3,8 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{10}$

$\rho_{\text{ср}} = 2,03 \cdot 10^{10}$ Ом·м; $\sigma = 0,168 \cdot 10^{10}$ Ом·м.

Результаты измерений не выходят за пределы:

$\rho_{\text{ср}} \pm 3 \sigma$, т.е. $2,53 \cdot 10^{10} \geq \rho \geq 1,53 \cdot 10^{10}$.

Окончательно принимаем величину удельного электрического сопротивления золы $\rho = 2,0 \cdot 10^{10}$.

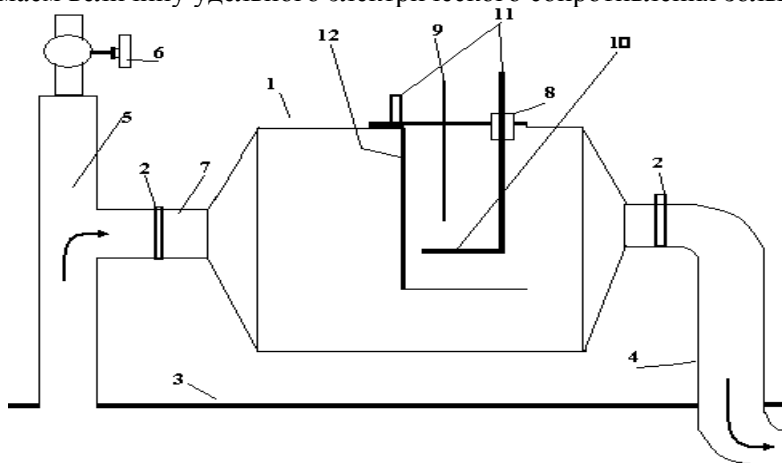


Рис. 5.9. Схема установки для измерения УЭС пылей в газопроводе.

1 – электрообогреваемая измерительная камера; 2 – шиберные заслонки; 3 – стенка газопровода; 4 – заборная трубка; 5 – эжектор; 6 – вентиль; 7 – патрубок отвода газа; 8 – изолятор; 9 – коронирующий элемент; 10 – измерительные электроды; 11 – клеммы подключения тераомметра; 12 – стойки датчика.

Глава 6

НЕКОТОРЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Простота конструкции электрофильтра находится в противоречии с многообразием и сложностью процессов, происходящих при улавливании пыли. Многие явления в электрофильтре происходят на стыке нескольких дисциплин. Теоретические расчеты электрических полей, процессов уноса пыли, степени очистки газов являются приближенными. Поэтому экспериментальные исследования, направленные на повышение степени очистки газов электрофильтрами, являются в настоящее время нередко основным инструментом изучения мало исследованных процессов, происходящих в электрофильтре.

Ниже приводятся некоторые методики и описание отдельных установок, применяемых в лаборатории электрических методов очистки газов Семибратовского филиала НИИОГАЗ (с 1991 г. ОАО «Семибратовская фирма НИИОГАЗ»). Благодаря исследованиям, выполненным на этих установках был изучен целый ряд физических процессов при осаждении и встряхивании пыли в электрофильтре, получены сравнительные характеристики осадительных и коронирующих электродов и получен ряд данных для разработки новых электрофильтров. В итоге этих исследований разработаны методики определения оптимальных режимов регенерации осадительных и коронирующих электродов, новые типы коронирующих электродов. Полученные результаты были проверены в опытно-промышленных и промышленных условиях и внедрены в промышленных условиях в нашей стране и за рубежом. Получены данные, на основании которых разработаны научные основы создания электрогазоочистного оборудования нового поколения [1].

6.1. Лабораторная установка для исследования улавливания пыли в электрофильтре

В 1970 г. в СФ НИИОГАЗ была разработана установка для исследования уноса пыли из электрофильтра при ее осаждении и отряхивании. В дальнейшем эта установка использовалась для исследований коронирующих и осадительных электродов, улавливаемости различных пылей и исследования целого ряда других параметров работы электрофильтров.

Лабораторная установка состоит из следующих основных частей:

- лабораторного электрофилтра;
- взвешивающего устройства;
- дымососа;
- пылепитателя;
- источника высокого напряжения.

Лабораторный электрофилтр (фото на 4-й стр. обложки) представляет собой горизонтальный пластинчатый аппарат с активным сечением $0,6 \text{ м}^2$ его активная зона образована двумя внутренними поверхностями осадительных электродов (рис. 6.1, 6.3), между которыми расположен один коронирующий электрод (рис. 6.2).

Для осадительных электродов использованы С-образные элементы промышленного профиля шириной 350 мм, высотой 700 мм. С целью уменьшения веса элементы осадительного электрода (рис. 6.3) выполнены из листов алюминия толщиной 1 мм. Активная длина осадительного электрода 1570 мм. Масса электрода в сборе 15,5 кг.

Коронирующий электрод представляет собой трубчатую раму размером 1610x760 мм, в которой укреплены 9 ленточно-игольчатых коронирующих элементов. Активная длина коронирующих элементов 5,37 м, расстояние между иглами 40 мм, высота игл 12 мм, межэлектродное расстояние может изменяться от 275 мм до 460 мм.

Для выравнивания скоростей воздуха в активном сечении лабораторного электрофилтра диффузор снабжен газораспределительными листами, обеспечивающими распределение потока, аналогичное таковому в промышленных аппаратах.

Для исследования влияния степени неравномерности потока на входе может устанавливаться дополнительная газораспределительная решетка.

Измерение скоростей газа в межэлектродном промежутке производилось с помощью термоанемометра.

Для определения количества пыли, улавливаемой на осадительных электродах, предназначено взвешивающее устройство.

Оно состоит из осадительных электродов, подвешенных на пружинах, чувствительных элементов, усилителя 8АНЧ и самопишущего прибора КСП-4. На рис. 6.4 приведена схема взвешивающего устройства. В качестве чувствительных элементов в схеме использованы тензодатчики. Для исключения температурной погрешности на каждой пластине установлено по два тензодатчика. Они находятся в одинаковых температурных условиях и включены в соседние плечи мостовой цепи. С целью увеличения сигнала оба тензодатчика являются рабочими и приклеены на сторонах упругой пластины, испытывающих противоположные деформации. По мере накопления пыли на осадительном электроде пружины, на которых он подвешен, растягиваются. Происходящее при этом вертикальное перемещение электрода фиксируется тензодатчиками (рис. 6.5) Сигнал тензодатчика подается на усилитель 8АНЧ и регистрируется самописцем. При этом происходит запись массы уловленной пыли. Измерение массы пыли, уловленной на осадительных электродах, позволяет определить степень очистки газов в активной зоне электрофилтра по количеству входящей и уловленной пыли.

Для взвешивания пыли в бункерах применено устройство (рис. 6.6), состоящее из герметизирующего кожуха 1, подвесного бункера 2, регулировочных болтов 3, пружин 4, и тензодатчика 5, позволяющее фиксировать вес пыли с помощью самопишущего прибора. Перед проведением экспериментов на лабораторном электрофилтре были проведены учет и оценка факторов, влияющих на точность экспериментов.

Влияние скорости воздушного потока на показания взвешивающего устройства

Изменение скорости воздушного потока в активной зоне электрофилтра воспринимается взвешивающим устройством как изменение веса электродов. Это объясняется тем, что при увеличении скорости газа в активной зоне увеличивается динамический напор. В результате этого происходит смещение осадительного электрода в направлении движения потока и изменение показаний взвешивающего устройства.

Для исключения погрешности от действия воздушного потока установка нуля и тарировка самопишущего прибора производились при той же скорости, при которой производился опыт по определению величины уноса.

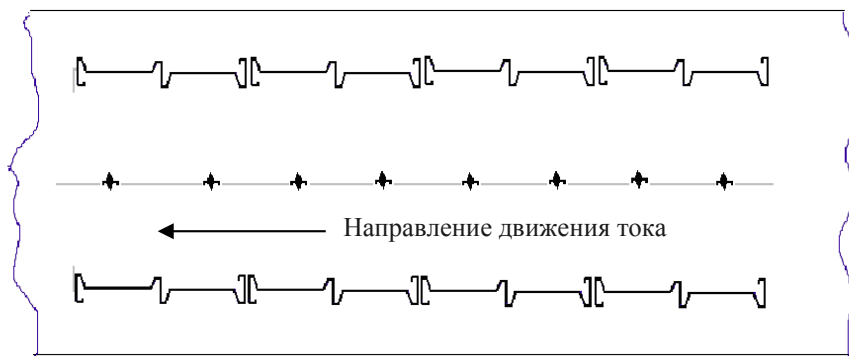


Рис. 6.1. Расположение электродов в электрофилтре (поперечный разрез)

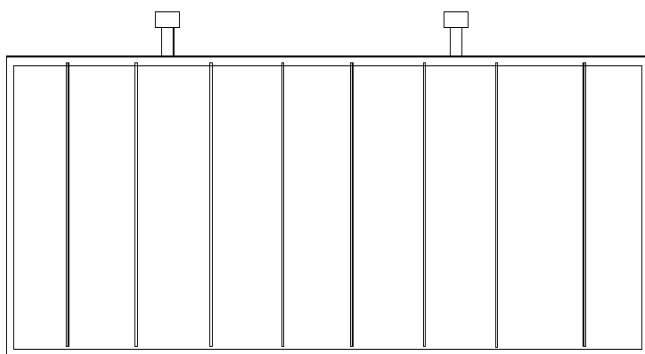


Рис. 6.2. Коронирующий электрод

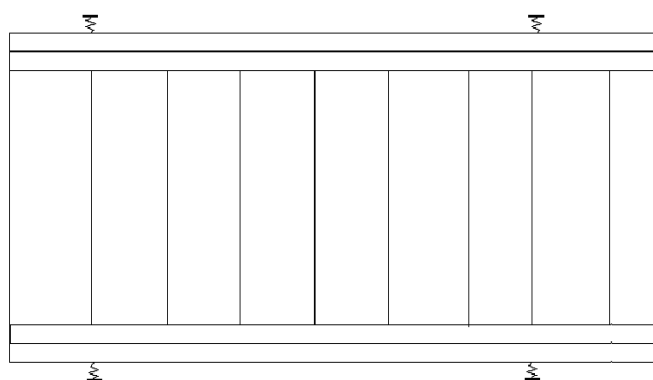


Рис. 6.3. Осадительный электрод

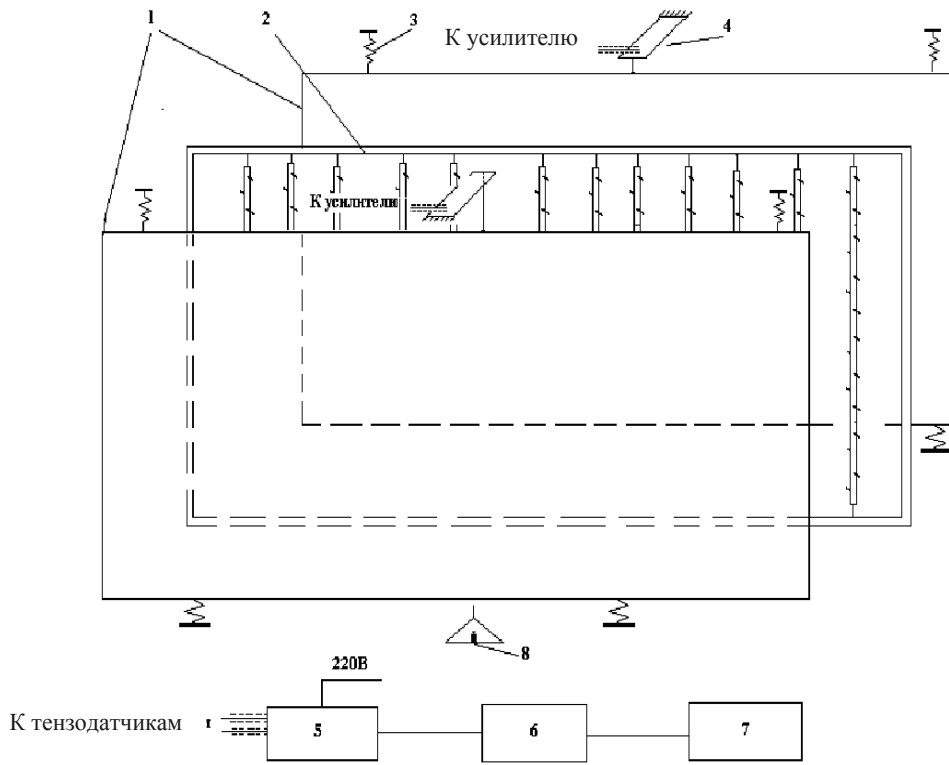


Рис. 6.4. Схема взвешивающего устройства.

1 – осадительные электроды; 2 – коронирующий электрод; 3 – пружины; 4 – тензодатчик;
5 – усилитель АНЧ-7; 6 – согласующее устройство; 7 – самописец; 8 – тарировочный груз

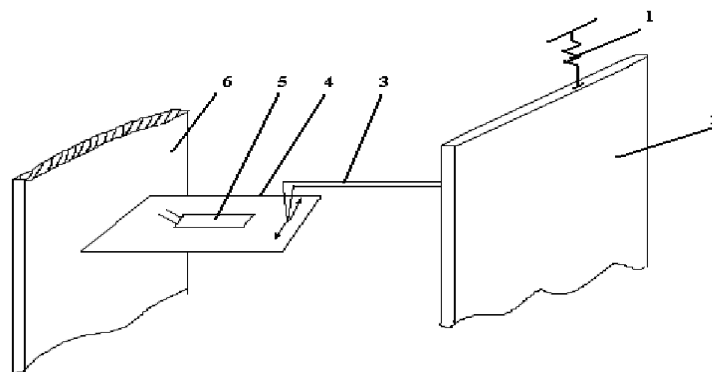


Рис. 6.5. Схема передачи вертикального перемещения осадительного электрода на тензодатчик.

1 – пружина; 2 – осадительный электрод; 3 – рычаг; 4 – тензодатчик;
5 – чувствительный элемент; 6 – корпус фильтра

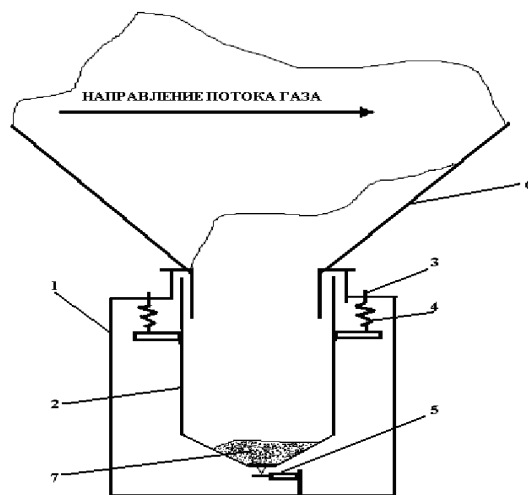


Рис. 6.6. Схема устройства для взвешивания пыли в бункерах.
 1 – герметизирующий кожух; 2 – подвесной бункер; 3 – регулировочный болт; 4 – пружина;
 5 – тензодатчик; 6 – бункер электрофильтра; 7 – уловленная пыль

Влияние колебаний осадительного электрода на точность экспериментов

При работе лабораторной установки осадительный электрод, подвешенный только в верхней части, совершает колебания, причиной которых является воздействие проходящего воздушного потока. Установка пружин в верхней и нижней частях осадительного электрода позволила добиться резкого снижения величины колебаний. Однако представилось целесообразным проверить влияние колебаний электрода на обрушение пыли.

Замеры амплитуды и частоты колебаний электродов, проведенные с помощью вибрографа типа ВР-1 при скоростях воздушного потока в активном сечении электрофильтра 1, 2 и 3 м/с, показали, что амплитуда колебаний (А) не превышает 0,1–0,2 мм, при частоте (α) 4–5 Гц. Закон колебаний близок к синусоидальному, ускорение электрода составляет:

$$A\alpha^2 = 0,2 - 5^2 = 5 \text{ мм/с}^2 \text{ или } 5 - 10^{-3} \text{ м/с}^2$$

что на несколько порядков меньше ускорений, требуемых для отрыва пыли.

Полученная в многочисленных опытах линейная зависимость накопления веса пыли на осадительных электродах от времени подтверждает, что при средних толщинах слоя до 3–4 мм не происходит самопроизвольного обрушения пыли, т.к. визуально наблюдаемое самообрушение при больших толщинах слоя четко регистрируется самопишущим прибором (при этом происходит отклонение от линейной зависимости).

Влияние включения агрегатов питания на показания взвешивающего устройства

Наличие на пластинах электрического конденсатора разноименных зарядов приводит к созданию между пластинами сил притяжения.

Действию этих сил подвержены коронирующие и осадительные электроды электрофильтра, которые с определенными допущениями можно рассматривать как обкладки конденсатора.

При включении напряжения в электрофильтре осадительные электроды, подвешенные на пружинах, притягиваются к коронирующему. При этом взвешивающее устройство отмечает изменение веса осадительных электродов.

При изменении напряжения в диапазоне 0–47 кВ показания изменяются на величину около 10 г (рис. 6.7), т.е. на 3,3–2,5 %.

С целью учета погрешности взвешивания, вносимой действием электрического поля, установка нуля и тарировка самопишущего прибора производились при том же напряжении, которое подавалось на электроды во время проведения опыта.

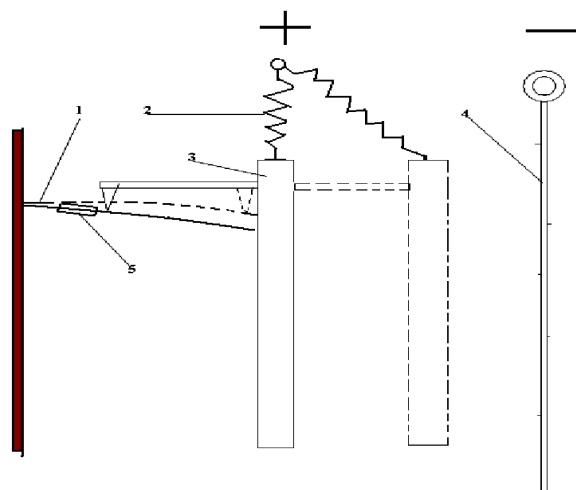


Рис. 6.7. Влияние включения высоковольтного агрегата на деформацию тензодатчиков.

Штрихами показано положение осадительного электрода и тензодатчика при включении высоковольтного агрегата;
 1 – пружина тензодатчика; 2 – пружина подвеса осадительного электрода;
 3 – осадительный электрод; 4 – тензодатчик

Влияние центра тяжести осевшей пыли на точность взвешивания

Пыль при осаждении на осадительном электроде располагается неравномерно по всей его длине, поэтому, как показали эксперименты, центр тяжести осевшей пыли не совпадает с геометрическим центром тяжести электрода.

При подвешивании дополнительной массы, близкой по величине к массе осаждаемой в опытах пыли, в крайних точках по длине осадительного электрода показания взвешивающего устройства изменялись.

Для исключения погрешности от несовпадения центра тяжести осевшей пыли и точки подвеса тарировочного груза был определен центр тяжести осевшей пыли при изменении скорости газа в диапазоне 0,5–3 м/с.

Зная вес пыли, осевшей на каждом элементе электрода (определялся в специальных экспериментах путем удаления осажденной пыли и взвешивания), можно рассчитать абсциссу центра тяжести осевшей пыли:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n m_i},$$

где X_c – абсцисса центра тяжести всего количества пыли, м;

X_i – абсцисса центра тяжести пыли на элементе, м;

m_i – масса пыли на элементе, кг.

Абсцисса центра тяжести осажденной пыли изменилась от 0,4 L_0 до 0,59 L_0 (L_0 – длина электрода) при изменении скорости от 0,5 до 3,0 м/с.

Точка подвеса тарировочного груза выбиралась с учетом абсциссы центра тяжести осаждаемой пыли. Это позволило свести к минимуму погрешность от несовпадения абсциссы центра тяжести осажденной пыли и абсциссы точки подвеса тарировочного груза, т. к. перемещение тарировочного груза в диапазоне случайных отклонений центра тяжести осажденной пыли от среднего его значения при какой-либо скорости не вызывало фиксируемых изменений в показаниях взвешивающего устройства.

Влияние смазки осадительного электрода на вольтамперную характеристику

Для исключения уноса пыли с осадительного электрода в процессе осаждения применялась смазка осадительного электрода липким электропроводным слоем, состоящим из масла МС-20 и активной сажи ПМ-70.

Удельное объемное сопротивление липкой смеси составляло 10 Ом·м. Сравнение вольтамперных характеристик, снятых при чистых и смазанных липким электропроводным слоем электродах, показывает, что наличие смазки не влияет на ход вольтамперных характеристик и, следовательно, не вносит искажений в процесс электрического осаждения пыли.

Тарировка взвешивающего устройства и проверка точности взвешивания пыли, уловленной на осадительном электроде

Тарировка взвешивающего устройства, для уменьшения погрешности, выполнялась для всего тракта и проводилась путем подвешивания на осадительных электродах гирь. При этом самописец отмечал на ленте

линии, соответствующие весу гири. Максимальный вес гири выбирался с таким расчетом, чтобы он был заметно больше веса пыли, которая будет уловлена осадительным электродом во время опыта.

После учета факторов, влияющих на точность экспериментов, и тарировки устройства было проведено сравнение показаний взвешивающего устройства с показаниями рычажных весов. Для этой цели пыль, вес которой определялся по показаниям взвешивающего устройства, тщательно удалялась с электродов и взвешивалась. Данные измерений сведены в таблицу, из которой следует, что во всех опытах вес пыли, удаленной с электродов, несколько меньше, чем вес, определенный по показаниям взвешивающего устройства. Такое расхождение можно объяснить неизбежными потерями пыли при ее удалении с осадительного элемента и погрешностями примененного метода взвешивания.

Средняя величина относительной погрешности для правого по ходу газа электрода составила 3,8 %, для левого 3,1 %. Максимальная величина ее составила 4,7 %.

Таковую величину погрешности можно считать удовлетворительной, т.к. измеряемая величина – унос при скорости 2 м/с – превышает величину ошибки для исследуемой пыли в несколько раз.

Таким образом, достигнутая точность измерения позволяет количественно оценить величину уноса пыли на данной установке.

Питание установки током высокого напряжения осуществлялось от промышленного высоковольтного агрегата. Для измерения напряжения на высокой стороне измерительный прибор типа М-109 включался последовательно с активным сопротивлением 100 Ом·м.

Таблица 6.1

Сравнение показаний взвешивающего устройства с показаниями рычажных весов

№№ пп	Вес пыли на осадительном электроде по показаниям взвешивающего устройства, г	Вес пыли, удаленной с осадительного электрода, по показаниям рычажных весов, г	Абсолютная ошибка, г	Относительная ошибка, %
Правый электрод				
1	155	148	-7	4,7
2	1005	966	-59	4,0
3	882	855	-27	3
4	690	668	-22	3
Левый электрод				
1	200	193	-7	3,6
2	182	175	-7	4
3	1210	1177	-33	2,8
4	768	750	-18	2,4
5	880	858	-22	2,5

Количество пыли, улавливаемой на осадительном электроде, зависит от запыленности газа на входе электрофильтра. Неравномерность подачи пыли приводит к изменению скорости накопления веса пыли и затрудняет анализ зависимостей величины уноса от влияющих параметров.

Равномерная подача требуемого количества пыли (100–300 г/мин) с помощью известных пылепитателей невозможна [11]. Поэтому был разработан специальный пылепитатель (рис. 6.8, 6.9), обеспечивающий требуемую равномерность пылеподачи.

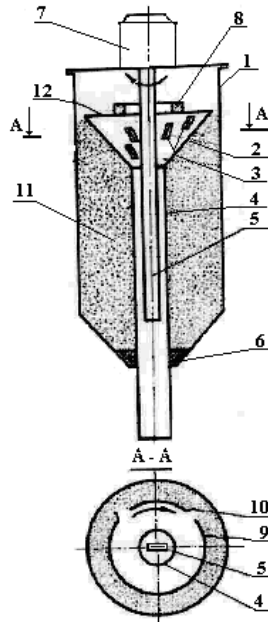


Рис. 6.8. Пылепитатель с воронкой.

- 1 – бункер; 2 – воронка; 3 – отверстия в воронке; 4 – пылеспускная трубка; 5 – рейка; 6 – подшипник с уплотнением; 7 – синхронный двигатель с редуктором; 8 – регулировочный груз; 9 – срезаемый слой пыли; 10 – отогнутая кромка отверстия; 11 – пыль; 12 – площадка для размещения груза

Применение скоростной кинокамеры СКС-1

Применение скоростной кинокамеры для исследования уноса было продиктовано необходимостью изучить динамику разрушения и перемещения слоя пыли при отряхивании, а также движение пыли после попадания ее в бункер. Киносъемка производилась на лабораторном электрофилт্রে через специальные люки. Подсветка осуществлялась лампами накаливания через верхние люки электрофилтра. Схема киносъемки приведена на рис. 6.10.

На киноплёнку снимались процессы при продольном и поперечном встряхивании пыли с 4-го и 3-го элементов осадительного электрода (с остальных пыль удалялась). Покадровая расшифровка фильмов производилась с помощью проектора «Свет-300». Линейные размеры агрегатов пыли определялись с помощью масштабного коэффициента М:

$$M = l / l_1,$$

где l – расстояние между иглами коронирующего электрода в электрофилт্রে, м; l_1 – то же на экране, м.

При расшифровке фильмов определялось время отряхивания, размер агрегатов пыли, скорость их движения и другие количественные и качественные характеристики слоя и агломератов пыли при встряхивании. Длительность процессов измерялась с помощью отметок времени на киноплёнке, получаемых при вспышках неоновой лампочки с частотой 100 Гц.

Влажность пыли в экспериментах поддерживалась постоянной в каждой серии и составляла 0,5–0,6 % (по ГОСТ 5382-65). Температура окружающей среды составляла 18–12°С, относительная влажность 75–85 %.

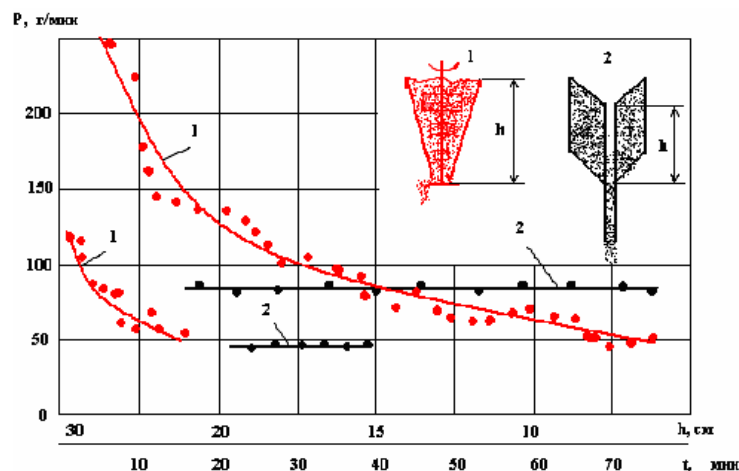


Рис. 6.9. Зависимость производительности (Р) от высоты столба пыли (h) в бункерах.
1 – тарельчатый пылепитатель; 2 – пылепитатель с воронкой

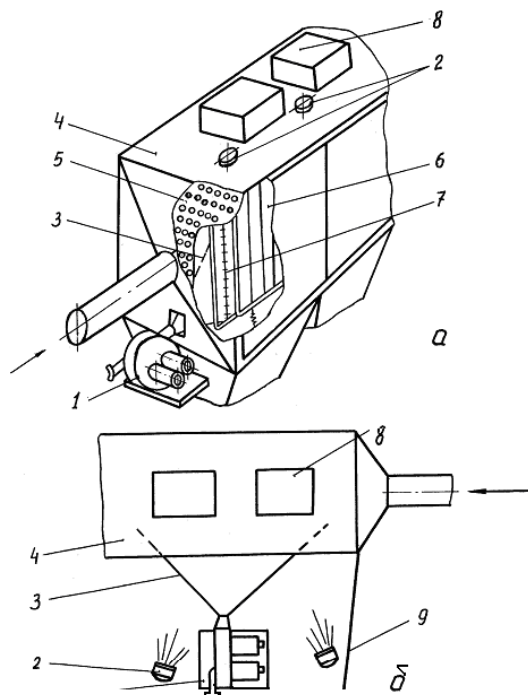


Рис. 6.10. Схема установки кинокамеры: а) при закрытом электрофилтре; б) при открытом электрофилтре.
 1 – кинокамера; 2 – источник света; 3 – ход лучей при съемке; 4 – корпус электрофилтра;
 5 – газораспределительная решетка; 6 – осадительный электрод; 7 – коронирующий электрод;
 8 – изоляторная коробка; 9 – крышка электрофилтра

6.2. Измерение напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке лабораторного электрофилтра

Схема стенда и его назначение

Стенд для исследования электрических полей систем электродов электрофилтров (рис. 6.11, 6.12) состоит из испытательной платформы, изготовленной из стальных уголков (40x40 мм), образующих параллелепипед с размерами сторон 1700x1600x1700 мм.

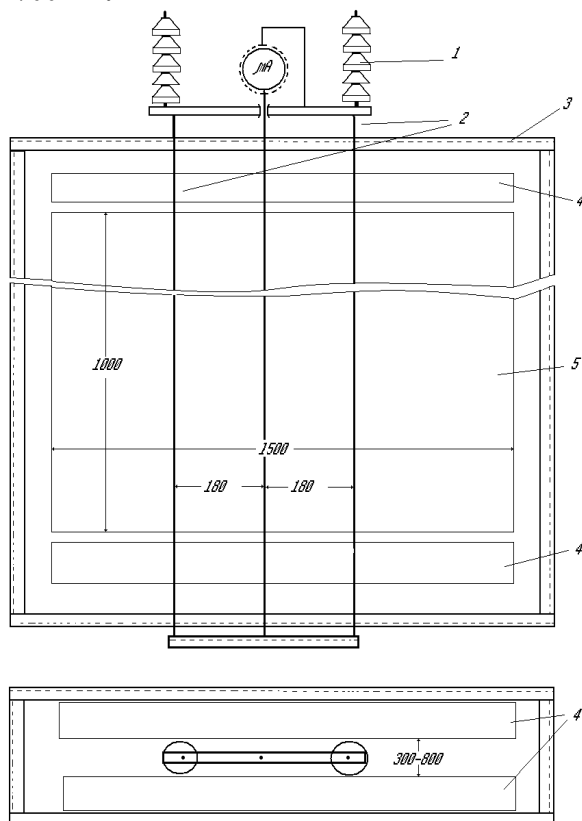


Рис. 6.11. Схема высоковольтного стенда
 1 – высоковольтные изоляторы; 2 – коронирующие элементы; 3 – платформа; 4 – экраны;
 5 – осадительный электрод.

Внутри платформы устанавливаются осадительные электроды. На изоляторах подвешиваются коронирующие элементы, фиксируемые в нижней части с помощью швеллера, укрепленного на опорных изоляторах.

В межэлектродном промежутке размещается изоляционная нить с пробным телом (стальной шарик Ø 5,5 мм).

Технические параметры стенда

Длина активной части коронирующих электродов, м – 1;

Площадь активной части осадительных электродов, м² – 2х1,5;

Величина межэлектродного промежутка, мм – 0,3–0,8;

Максимальное напряжение, кВ – 90;

Максимальный ток короны, мА – 200.

Условия работы стенда

Температура окружающей среды – °С – 20 ±5;

Относительная влажность, % – 30–80;

Для шарового изолированного зонда в случае идеальной изоляции (ток на зонд равен нулю) и размерах пробного тела таких, что в пределах области поля, соизмеримой по своим размерам с пробным телом, напряженность поля коронного разряда можно приблизительно считать постоянной и равной E_k , его заряд будет равен:

$$q_{ш} = 12\pi\epsilon_0 r_{ш}^2 E_k ,$$

где $r_{ш}$ – радиус пробного тела.

В соответствии с этим уравнением для определения напряженности электрического поля E_k в исследуемой точке поля необходимо и достаточно определить величину заряда пробного тела (зонда) или сумму сил, действующих на пробное тело.

После получения шариком заряда, максимально приближенного к предельному, напряжение с коронирующих элементов снимается. Далее для измерения заряда шарика он соединяется с электростатическим вольтметром. Для этого используется измерительная штанга, состоящая из экранированного кабеля РК-19, помещенного в заземленную металлическую трубу. Величина заряда шарика равна:

$$q_{ш} = U_{в} \cdot C_{вх} ,$$

где $q_{ш}$ – заряд шарика, К;

$U_{в}$ – показания электростатического вольтметра, В;

$C_{вх}$ – суммарная емкость измерительной системы (кабель + вольтметр).

Величина напряженности электрического поля коронного разряда в исследуемой точке межэлектродного промежутка рассчитывается по формуле:

$$E = \left(\frac{C_{вх}}{12\pi\epsilon_0 r_{ш}^2} \right) U_{в} ,$$

Для измерения потенциала шарика используется электростатический вольтметр типа С-503, класс точности 0,5, с пределом шкалы 30 В.

В связи с нелинейностью шкалы для повышения точности измерений используется «подпирающий» заряд того же знака, что и заряд шарика, с помощью одной или двух батарей «крона» (примерно 9 или 18 В). В этом случае величина $U_{в}$ определяется как разница показаний до и после измерения (касания шарика измерительной штангой).

Измерение заряда шарика следует проводить 8÷10 раз и далее принимать среднее арифметическое значение при расчете напряженности поля.

Для определения достоверности измерений предварительно выполняются измерения системы – 3 провода между двумя плоскостями – и проводится сравнение вновь полученных расчетных и базовых (рис. 6.12) данных.

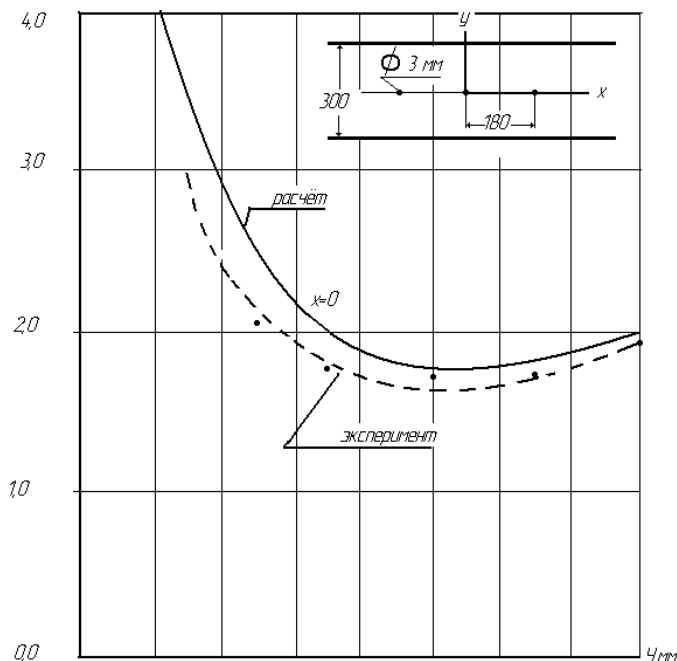


Рис. 6.12. Экспериментальное и расчетное распределение напряженности электрического поля для системы: три провода между двумя плоскостями, $U_2 = 50$ кВ (расхождение значений вновь измеренных и базовых экспериментальных точек не должно превышать $\pm 10\%$)

На основании сравнения этих результатов делается вывод о готовности системы для проведения экспериментов с другими осадительными и коронирующими электродами.

Данные измерения необходимо производить при резком изменении влажности, при установке систем, имеющих принципиально новую конструкцию электродов.

Глава 7

ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАМИ

При проектировании новых установок электрической очистки газов и при реконструкции устаревших электрофильтров требуется обеспечить требуемые санитарные нормы выбросов частиц из электрофильтра. Для этого необходимо определить параметры электрофильтра, т.е. его активное сечение, активную длину, высоту, тип электродов и целый ряд других величин.

Теория расчета процессов электрогазоочистки отстает от практических разработок. Одной из первых зависимостей для расчета степени очистки газа электрофильтром, по-видимому, является степенная формула, предложенная Андерсенем в 1919 г.:

$$\eta = 1 - K_3 \frac{L}{V_r},$$

где K_3 – постоянная электрофильтра;

L – длина активной зоны электрофильтра;

V_r – скорость газов в активной зоне электрофильтра.

Эта формула не нашла широкого применения, т.к. постоянная электрофильтра K_3 не могла отражать ни особенности конструкции, ни разнообразие технологических условий работы электрофильтра.

Теоретически формула для определения степени очистки газа электрофильтром была выведена Дэйчем в 1922 г.:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\omega L}{H_0 V_r}\right), \quad (7.1)$$

где ω – скорость дрейфа частиц;

L – длина активной зоны электрофильтра;

H_0 – межэлектродное расстояние;

V_r – скорость газов в электрофильтре.

При выводе этой формулы были приняты следующие допущения:

1. Равномерный профиль концентрации пыли.
2. Отсутствие уноса пыли.
3. Постоянство скорости дрейфа по длине электрофильтра.

4. Частицы пыли монодисперсны.
5. Течение газа ламинарное;
6. Скорость газового потока по сечению постоянна.

В 1956 г. это уравнение было уточнено Роузом и Вудом [1] и может быть записано следующим образом:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{S\omega}{Q}\right), \quad (7.2)$$

где S – площадь осаждения электрофильтра; Q – количество очищаемых газов.

Считается, что в электрофильтре происходит интенсивное турбулентное перемешивание газового потока в связи с высоким значением числа Re и в результате действия электрического ветра. Скорость дрейфа заряженных частиц быстро достигает предельной величины. С учетом закона Стокса она может быть вычислена по формуле:

$$\omega = \frac{p \cdot d \cdot E^2}{36 \cdot 10^7 \pi \cdot \mu} \left(1 + \frac{J}{\lambda \cdot d}\right), \quad (7.3)$$

где $p = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon} + 2$; ε – диэлектрическая постоянная;

d – диаметр частицы (при $d > 1$ мкм); μ – вязкость газа;

$$J = 1,746 + 0,562 \exp\left(-0,785 \frac{d}{\lambda}\right), \quad (7.4)$$

где λ – средняя длина пути свободного пробега молекул.

С помощью уравнений (7.2), (7.3) и (7.4) можно рассчитать эффективность осаждения частиц разных диаметров. Стейерменд, сравнив рассчитанные и опытные результаты (рис. 7.1), пришел к выводу, что эти уравнения могут служить только для учета изменений в работе данной установки, но не могут быть основой для расчета новых конструкций.

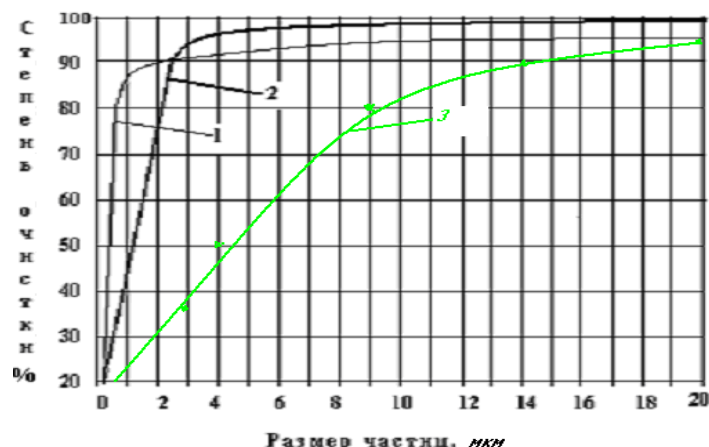


Рис. 7.1. Кривые фракционной эффективности.

- 1 – экспериментальная кривая электрофильтра; 2 – теоретическая кривая электрофильтра;
- 3 – экспериментальная кривая циклона НИИОГАЗ, диаметром 600 мм

Практический интерес представляет приближенный расчет электрофильтра, предложенный В.Н.Ужовым в его книге [2]. Пример расчета выполнен для двухпольного электрофильтра сушильного барабана от пыли сырья при производстве цемента. Исходные данные:

1. Состав газов, поступающих в электрофильтр (в объемн. %):
 $CO_2 - 13$; $H_2O - 8,5$; $O_2 - 6,5$; $N_2 - 72$.
2. Температура газов – $t = 150^0 C$
3. Разрежение в системе – $p_r = 2$ кН/м² (200 мм вод. ст.)
4. Содержание пыли в газах – $z = 40$ г/м³ (н.у.)
5. Фракционный состав пыли:

средний радиус частиц, мкм	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
содержание, масс. %	5,0	10,0	10,0	15	20	20	20

6. Скорость газов в электрофильтре $V_r = 0,8$ м/с
7. Радиус коронирующего электрода $R = 1,25 \cdot 10^{-3}$ м
8. Расстояние между коронирующими электродами в ряду – $d_k = 0,24$ м

9. Активная длина коронирующих электродов – $L_k = 924$ м
10. Количество осадительных электродов – $n = 16$
11. Площадь осадительных электродов – $S = 242$ м²
12. Расстояние между плоскостями осадительных и коронирующих электродов – $H = 0,150$ м
13. Длина активной зоны электрофильтра – $L = 4,8$ м
14. Напряжение (среднее значение) – $U_{cp} = 46$ кВ
15. Активная площадь сечения электрофильтра – $S = 7,5$ м²

Расчет электрических параметров

Относительная плотность газов:

$$\beta = \frac{B \pm p_r}{1,013 \cdot 10^5} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} \cdot \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5} \cdot \frac{273 + 20}{273 + 150} = 0,68$$

Критическая напряженность электрического поля (В/м):

$$E_0 = 3,04 \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) 10^6 = 3,04 \left(0,68 + 0,0311 \sqrt{\frac{0,68}{1,25 \cdot 10^{-3}}} \right) 10^6 = 4,26 \cdot 10^6$$

Критическое напряжение короны (В):

$$U_0 = E_0 R_0 \left(\frac{\pi H}{d} - \ln \frac{2\pi R_1}{d} \right) = 4,26 \cdot 10^6 \cdot 1,25^{-3} (1,96 + 3,42) = 28,5 \cdot 10^3$$

Линейная плотность тока короны (мА/м) будет:

$$i_0 = \frac{4\pi^2 k v}{9 \cdot 10^9 d^2} \left(\frac{\pi H}{d} - \ln \frac{2\pi R_1}{d} \right) U (U - U_0)$$

При $\frac{H}{d} = \frac{0,15}{0,24} = 0,625$ величина $v = 7,7 \cdot 10^{-2}$ [2].

$k = 2,1 \cdot 10^{-4}$ м²/(В с)

Таким образом:

$$i_0 = \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 7,7 \cdot 10^{-2}}{9 \cdot 10^9 \cdot 0,24^2 (1,96 + 3,42)} 46 \cdot 10^3 (46 \cdot 10^3 - 28,5 \cdot 10^3) = 0,185 \text{ , мА / м}$$

Напряженность электрического поля (В/м) [2] составит:

$$E = \sqrt{\frac{8i_0 H}{4\pi\epsilon_0 \cdot kd}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 0,185 \cdot 10^{-3} \cdot 4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 0,15}{4\pi \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,24}} = 1,9910^5$$

Принимаем, что $E_3 = E_{oc} = E$.

Скорость дрейфа частиц диаметром от 2 до 50 мкм определяется по формуле:

$$\omega = 0,118 \cdot 10^{-10} E^2 \frac{r}{\mu} ,$$

а для частиц диаметром от 0,1 до 2 мкм по формуле:

$$\omega_m = \omega \left(1 + A \frac{\lambda}{r} \right) ,$$

где $A = 0,815 - 1,63$; S_m – средняя длина свободного пробега молекулы, м; для газов $\lambda = 10^{-7}$.

Вязкость газов (нс/м²):

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} ; \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} = 1,93$$

Вязкость газа определяется как сумма вязкостей:

$$\mu_{O_2} = 0,137 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{273 + 254}{423 + 254} \cdot 1,93 = 0,22 \cdot 10^{-4}$$

$$\mu_{O_2} = 0,137 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{273 + 131}{423 + 131} \cdot 1,93 = 0,27 \cdot 10^{-4}$$

$$\mu_{O_2} = 0,137 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{273 + 673}{423 + 673} \cdot 1,93 = 0,149 \cdot 10^{-4}$$

$$\mu_{N_2} = 0,137 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{273 + 114}{423 + 114} \cdot 1,93 = 0,231 \cdot 10^{-4}$$

Так как относительная молекулярная масса газов М (в кг/кмоль):

$$M = a_{CO_2} M_{CO_2} + a_{O_2} M_{O_2} + a_{H_2O} M_{H_2O} + a_{N_2} M_{N_2} = 0,13 \cdot 44 + 0,065 \cdot 32 + 0,085 \cdot 18 + 0,72 \cdot 28 = 29,35$$

а – содержание компонента в долях единицы

$$M/\mu = \left(\frac{0,13 \cdot 44}{0,22} + \frac{0,065 \cdot 32}{0,27} + \frac{0,085 \cdot 18}{0,149} + \frac{0,72 \cdot 28}{0,231} \right) \cdot 10^4 = 130,9 \cdot 10^4$$

то вязкость газов (нс/м²)

$$\mu = 29,49 / 130 \cdot 9 \cdot 10^4 = 0,225 \cdot 10^{-4}$$

Скорость дрейфа частиц диаметром от 2 до 50 мкм в электрическом поле (м/с):

$$\omega = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} (1,99 \cdot 10^5)^2 \cdot r}{0,225 \cdot 10^{-4}} = 2,08 \cdot 10^4$$

Скорость дрейфа частиц диаметром от 0,1 до 2 мкм (при А= 1)

$$\omega_m = 2,08 \cdot 10^4 r \left(1 + \frac{10^{-7}}{r} \right)$$

Для разных размеров частиц скорость дрейфа составит:

$$\omega_1 = 1,25 \cdot 10^{-2}; \omega_2 = 5,2 \cdot 10^{-2}; \omega_3 = 10,4 \cdot 10^{-2}; \omega_4 = 20,8 \cdot 10^{-2}; \omega_5 = 31,2 \cdot 10^{-2}; \omega_6 = 41,6 \cdot 10^{-2}; \omega_7 = 52 \cdot 10^{-2}.$$

Расчет степени очистки газов

Степень очистки газов в соответствии с формулой $\eta = 1 - \exp(-\omega f)$ рассчитана по фракциям, причем удельная поверхность осаждения $f = S / V_r F = 242 / 0,8 \cdot 7,5 = 40,5$.

Действительные скорости дрейфа частиц в электрическом поле электрофилтра, как в то время было установлено на практике (что было близко к действительности для существовавших в шестидесятых годах условий), примерно в два раза меньше теоретически рассчитанных, поэтому при подсчете показателя степени в формуле Дэйча для частиц любого размера полученные значения скоростей дрейфа уменьшаются в два раза:

$\omega_1 f/2$	$\omega_2 f/2$	$\omega_3 f/2$	$\omega_4 f/2$	$\omega_5 f/2$	$\omega_6 f/2$	$\omega_7 f/2$
0,253	1,055	2,1	4,22	6,32	8,43	10,54

и фракционная степень очистки газов $\eta_{фр} = \exp(-\omega f/2)$ будет равна (%):

$\eta_{фр1}$	$\eta_{фр2}$	$\eta_{фр3}$	$\eta_{фр4}$	$\eta_{фр5}$	$\eta_{фр6}$	$\eta_{фр7}$
22	65	87,8	98,6	99,8	99,98	99,99

Общая степень очистки газов в (%):

$$\eta = \frac{\eta_{\text{фр1}}\Phi_1}{100} + \frac{\eta_{\text{фр2}}\Phi_2}{100} + \dots + \frac{\eta_{\text{фр7}}\Phi_7}{100} =$$

$$= \frac{22 \cdot 5}{100} + \frac{65 \cdot 10}{100} + \frac{87,8 \cdot 10}{100} + \frac{98,6 \cdot 15}{100} + \frac{99,8 \cdot 20}{100} + \frac{99,98 \cdot 20}{100} + \frac{99,99 \cdot 20}{100} = 91,139 \quad ,$$

где Φ – фракция пыли, %.

На практике целесообразно проводить предварительное испытание опытного электрофильтра, когда трудно получить требуемые результаты на уже действующей установке. Отечественная практика проектирования установок электрогазоочистки показывает, что прогнозирование эффективности электрофильтра на основании теоретических предпосылок или механического копирования аппаратов, работающих в кажущихся одинаковых условиях, приводит к существенным ошибкам.

Главной рекомендацией проектировщику А.М. Белевицкий считает [3] максимально тщательный поиск аналога и получение достоверных данных об условиях и результатах его работы.

Для использования аналога при проектировании установки электрической очистки газов предлагается [3] выполнять расчеты по следующей формуле:

$$\frac{\eta_{\text{ан}}}{\eta_{\text{пр}}} = \frac{\omega_{\text{ан}} \Psi_{\text{ан}}}{\omega_{\text{пр}} \Psi_{\text{пр}}} \quad , \quad (7.5)$$

где $\Psi = \frac{L}{HV_r}$;

L – длина активной зоны электрофильтра;

H – разрядное расстояние;

V_r – скорость газов в активном сечении электрофильтра.

Индексы «ан» и «пр» относят параметры соответственно к аналогу или прототипу. Следует, однако, отметить, что использование формулы (7.5) не позволяет получить корректные результаты.

Для учета изменения эффективной скорости дрейфа при изменении скорости газа и введения поправки на другие, не учитываемые формулой Дэйча факторы, на основании анализа экспериментальных данных предложен вариант экспоненциальной формулы (7.6) для условий улавливания золы из дымовых газов энергетических котлов:

$$\eta = 1 - \exp(-\omega \cdot f)^{0,5} \quad (7.6)$$

В ряде случаев представляет практический интерес расчет очистки газов по эмпирической формуле, предложенной Селзлером и Уотстоном [6]:

$$\eta = 1 - \exp K(S/Q)^{1,4} (P/Q)^{0,6} (c/z)^{0,22} \quad , \quad (7.7)$$

где $K = 116$ при сжигании угля в распыленном состоянии;

$K = 90$ при использовании топки циклонного типа или если перед электрофильтром стоит механический осадитель (т.е. использование механической предочистки снижает скорость дрейфа пыли примерно на 30%);

S – площадь осаждения, фут²;

Q – количество очищаемого газа в электрофильтре, тыс. фут³/мин;

P – потребляемая мощность, кВт;

c/z – отношение массы серы в золе к массе золы.

Эта формула позволяет учесть, кроме влияния параметров S , Q , P , влияние механической предочистки и влияние количества серы в угле на степень очистки газов.

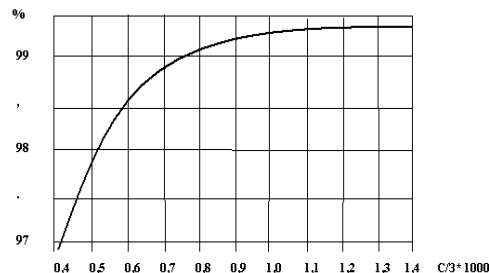


Рис. 7.2. Зависимость степени очистки от процентного содержания серы в золе угля (расчет по формуле Селзлера-Уотстона)

Для электрофильтров, улавливающих золу ТЭС, влияние напряжения зажигания короны U_0 на степень очистки газов может быть ориентировочно учтено с помощью формулы:

$$\eta = 1 - \kappa_1 \exp(-\kappa_2 U(U - U_0)Ld_{50}) ,$$

где $\kappa_1 = 0,25$;

$\kappa_2 = 6 \cdot 10^4 - 10^6$ в зависимости от УЭС слоя золы на осадительных электродах.

Выбор типоразмера электрофильтра при наличии аналоговой установки

Наиболее простым вариантом выбора типоразмера электрофильтра является случай, когда имеются надежные данные о работе аналогового аппарата в таких же или близких технологических условиях.

В этом случае при незначительных изменениях конструкции электрофильтра и аналогичных технологических условиях работы электрофильтра расчеты эффективности нового проекта установки электрогазоочистки могут производиться по формуле Дейча с использованием скорости дрейфа электрофильтра-аналога [1].

Однако во вновь проектируемых установках для обеспечения возрастающих требований к выбросам пыли в атмосферу разработки, как правило, вынуждены изменять геометрические параметры электрофильтров (длину полей, их количество, высоту электродов, межэлектродное расстояние и др.). Кроме того, естественно используются аппараты, имеющие усовершенствованные элементы конструкции, существенно повышающие эффективность электрофильтра.

Так, например, применение коронирующих электродов СФ-1, СФ-2 [4], имеющих пониженное напряжение зажигания, позволяет снизить выбросы из электрофильтра в три раза, использование осадительного элемента ЭКО МК 4×160, имеющего отклонения от размеров прямолинейности не более 3-х мм на длине 18 м, позволяет снизить выбросы пыли не менее чем в два раза. Повышение эффективности за счет применения в системах регенерации электродов частотных преобразователей позволяет снизить выбросы до 3-х раз, микропроцессорных устройств управления высоковольтными преобразователями типа БУЭФ – более чем в 2,5 раза [4].

Для учета изменившихся условий работы и влияния новых конструктивных элементов электрофильтра обозначим в формуле Дейча относительные выбросы $1 - \eta = B$, прологарифмируем и, взяв соотношение выбросов пыли для аналога и прототипа, получим:

$$\frac{\ln B_{ан}}{\ln B_{пр}} = \frac{\omega_{ан} f_{ан}}{\omega_{пр} f_{пр}} , \quad (7.8)$$

где ω – скорость дрейфа частиц;

$$f = \frac{S}{Q} = \frac{L}{H_0 V_r} = \frac{\tau}{H_0} , \quad (7.9)$$

где S – площадь осаждения, м²;

Q – количество очищаемых газов, м³/с;

L – длина активной зоны электрофильтра, м;

H_0 – межэлектродное расстояние, м;

V_r – скорость газов в электрофильтре;

τ – время пребывания газов в электрофильтре.

Используя формулы (7.8) и (7.9), можно определить параметры разных вариантов реконструкции.

Рассмотрим в качестве примера введение в расчеты поправки, обусловленной влиянием изменения длины активной зоны электрофильтра на величину скорости дрейфа.

Расчетная скорость дрейфа частиц улавливаемых в электрофильтре пыли определяется по формуле:

$$\omega = 0,118 E^2 10^{-10} r / \mu , \text{ м/с} \quad (7.10)$$

где E – напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке, В/м;

r – радиус частицы, мкм;

μ – динамическая вязкость среды, (Нс)/м².

Из формулы (7.10) следует, что величина скорости дрейфа пропорциональна радиусу частиц. Тогда, используя формулу для распределения размера частиц по длине электрофильтра, при улавливании золы экиба-стусского угля [5]:

$$d_{50} = 1,07 \exp(-1,45L) \quad (7.11)$$

можно выполнить расчет изменения скорости дрейфа в зависимости от длины электрофильтра (см. рис. 7.3).

При расчете степени очистки газов электрофильтром используют понятие эффективной скорости дрейфа, которая рассчитывается по экспериментально определенной степени очистки газов и учитывает все известные (и неизвестные) параметры, влияющие на эффективность улавливания пыли электрофильтром.

Добавление пятого поля при улавливании золы экибастузского угля на Рефтинской ГРЭС позволило снизить выбросы пыли из электрофильтра в два раза. На основании этого эксперимента, зная степень очистки газов в четырехпольном и пятипольном электрофильтре, определим изменение эффективной скорости дрейфа по формуле (7.12):

$$\omega = (Q / S) \ln(1 / 1 - \eta) \quad (7.12)$$

где Q – количество очищаемых газов, $\text{м}^3/\text{с}$;
 S – площадь осаждения электрофильтра, м^2 ;
 η – экспериментальная величина степени очистки газов.

Расчетные и экспериментальные данные по изменению скорости дрейфа при изменении длины активной зоны электрофильтра приведены на рис. 7.3. Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных позволяет предположить правомерность расчета с учетом формулы (7.12).

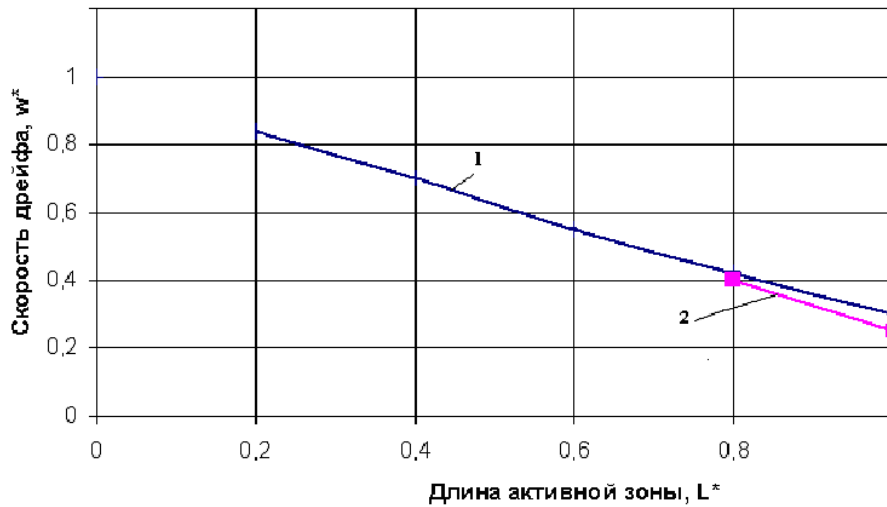


Рис. 7.3. Зависимость скорости дрейфа от длины активной зоны электрофильтра.
 1 – расчет, 2 – эксперимент

С учетом зависимостей (1) и (2) выражение для определения проектной длины электрофильтра будет иметь следующий вид:

$$L_{\text{пр}} = L_{\text{ан}} \frac{\omega_{\text{ан}} \ln B_{\text{пр}}}{\omega_{\text{пр}} k \ln B_{\text{ан}}} \quad (7.13)$$

где k – коэффициент, учитывающий изменение величины скорости дрейфа при изменении длины активной зоны.

Рассмотрим в качестве примера выбор электрофильтра при наличии аналога со следующими параметрами:

- Межэлектродное расстояние – $H = 0,15 \text{ м}$;
- Длина активной зоны – $L = 15,36 \text{ м}$;
- Скорость газов в электрофильтре – $V_r = 1,0 \text{ м/с}$;
- Степень очистки газов – $\eta = 0,972$;
- Скорость дрейфа – $\omega = 0,035 \text{ м/с}$.

Пусть требуется снизить выбросы пыли в 6 раз, оставив неизменным корпус электрофильтра. Выполним расчеты по формуле (7.13) при неизменной скорости дрейфа, тогда $k = 1$.

$$L_{\text{пр}} = 15,36 \frac{0,035 \cdot 5,36}{0,035 \cdot 3,57} = 23,1 \quad ,$$

т.е. длину электрофильтра для достижения шестикратного снижения выходной запыленности необходимо увеличить в 1,5 раз.

С учетом уменьшения скорости дрейфа при увеличении длины электрофильтра $k = 0,75$, и тогда $L_{\text{пр}}$ составит 30,7 м. Отсюда следует, что для сохранения длины активной зоны электрофильтра при реконструкции необходимо скорость дрейфа увеличить в 2 раза.

Однако если внести конструктивные изменения (например, установить коронирующие элементы СФ-1 и прибор управления высоковольтным агрегатом типа БУЭФ), то скорость дрейфа возрастет, а длина актив-

ной зоны электрофильтра останется прежней, т.е. электрофильтр может быть реконструирован в том же корпусе, а выбросы пыли из него будут снижены в 6 раз. Учитывая длительный срок эксплуатации электрофильтров и естественное снижение степени очистки газов в процессе длительной эксплуатации, целесообразно дополнительно увеличить эффективность электрофильтра, например, за счет установки устройств управления с частотным регулированием скорости вращения приводов.

Приведенный пример является иллюстрацией учета одного из изменяемых параметров во время реконструкции электрофильтра при наличии аналоговой установки.

Обычно при реконструкции установок электрогазоочистки используют комплекс, предусматривающий ряд мероприятий, включающий режимные и конструктивные, а при необходимости (когда этих мероприятий недостаточно) могут дополнительно применяться более дорогостоящие проектные и технологические мероприятия.

Учет влияния какого-либо параметра на изменение степени очистки газов может быть произведен с приемлемой для практических целей точностью на основании имеющейся базы экспериментальных данных «Кондор Эко – СФ НИИОГАЗ», например, в виде зависимостей скорости дрейфа от высоты электродов, межэлектродного расстояния, количества полей при неизменной длине активной зоны и т.п.

В тех случаях, когда аналоговая установка отсутствует, расчет электрофильтра может быть выполнен теоретически по РДРТМ 26-14-80. Нормативный метод расчета электрофильтров для теплоэнергетики. В настоящее время, в связи с усовершенствованием этой методики, она применяется для электрофильтров различных отраслей промышленности. Расчет степени очистки газов электрофильтрами по этой методике производится по фракционным степеням очистки и дисперсному составу пыли:

$$\eta = 1 - \int (1 - \eta_p) q_{\text{вх}} \alpha d \quad (7.14)$$

Расчет фракционных степеней очистки газов производится на ЭВМ по специальной программе, разработанной на основе математического описания физических процессов электрической очистки газов. Выбор требуемого электрофильтра может производиться в диалоговом режиме.

Уравнение Дэйча предполагает полную зарядку частиц непосредственно на входе в электрофильтр. Погрешности при этом для большинства промышленных электрофильтров невелики. Однако при расчетах режимов встряхивания величина отклонения интервалов встряхивания при отсутствии запирающей короны может составлять до 20 %, а при запирающей короне будет значительно больше.

В. Страус [6] предлагает определять степень очистки газов следующим образом:

$$\eta = 1 - \left(\frac{L + Vt + V\tau}{Vt + V\tau_0} \right)^{2\omega R / R}$$

где L – длина электрофильтра;

V – скорость газа;

R – радиус;

t – эквивалентное время предварительной зарядки, определяемое из уравнения $q_0 = q_{\text{max}} t / (t + \tau_0)$;

q_{max} – максимальный заряд, приобретенный частицей;

τ – постоянная времени зарядки частицы – $\tau = 4\epsilon_0 / N_i e \cdot U_i$;

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость;

N_i – концентрация ионов в начале объема;

e – заряд электрона;

U_i – подвижность ионов.

Для учета турбулентности, вихревой диффузии, и вторичного уноса частиц в уравнение Дэйча вносят поправки. Анализ зависимости скорости дрейфа от скорости газов был выполнен Робинсоном [7] и Фриландером [8].

Качественно этот анализ подтверждается экспериментами на промышленных электрофильтрах – зависимость скорости дрейфа от скорости газов имеет максимум. Снижение скорости дрейфа начинает происходить после того, как вторичный унос в процессе осаждения превышает увеличение осаждения пыли за счет турбулентных пульсаций. Уильямс и Джексон [9], предположили, что происходит повторное смешение неосажденных частиц по причине вихревой диффузии в турбулентном ядре газового потока. Это теоретическое предположение было качественно подтверждено экспериментом.

Учет явлений турбулентности в уравнении степени очистки газов электрофильтром производился Инюшкиным Н.В. и Авербухом Я.Д. [10]:

$$\eta = 1 - \exp\left\{-k(\omega + \omega_t)S/Q\right\},$$

где ω и ω_t – скорости дрейфа, обусловленные электрическими силами и турбулентной пульсацией;

κ – коэффициент, учитывающий распределение частиц пыли.

Изучением проблемы степени очистки газа занимался Куперман [11]. Он учитывал вихревую диффузию, электростатическую миграцию и повторное увлечение частиц в процессе осаждения. Однако им не получено численных решений, совпадающих с экспериментом.

Экспериментальные исследования на лабораторном и промышленном электрофильтрах показали [12], что унос пыли в процессе осаждения заключается в выбивании из осажденного слоя частицами, имеющими кинетическую энергию более, чем $10^{-8} - 10^{-10}$ Дж. Выбитые из слоя частицы уносятся потоком газа и осаждаются повторно. В результате многочисленных экспериментов, выполненных на сухой и липкой поверхности осаждения, было установлено, что унос пыли из осажденного слоя можно оценить с помощью коэффициента κ_0 :

$$\eta = 1 - \exp(-\kappa_0 \omega f),$$

где $\kappa_0 = \exp(-0,65) f^{0,61}$, $f = \omega L / H_0 V_2$;

При величинах $f \geq 3$ величина $\kappa_0 = 1$, т.е. уносом пыли в процессе осаждения в промышленных электрофильтрах в этих случаях можно пренебречь. Физически это объясняется тем, что кинетическая энергия частиц по причине уменьшения их размера по длине электрофильтра становится недостаточной для выбивания частиц из слоя.

Учет величины проскока через неактивные и полуактивные зоны, расположенные над электродами выполнен Аладжаловым [13]. При этом степень очистки газа для сухих пластинчатых горизонтальных электрофильтров представлена в виде:

$$\eta = (1 - \beta) \eta_a \quad (7.15)$$

где β – коэффициент, определяющий долю пыли, поступающей из полуактивной и неактивной зон, расположенных над электрофильтрами;

η_a – коэффициент, определяющий долю пыли, уловленной из газа, прошедшего активную зону.

На основании экспериментальных данных [14, 15] предлагается принимать $\beta = 0,02 - 0,005$. Такой разброс параметра β при степени очистки газов в активной зоне электрофильтра 0,999 приводит к расхождению величины выбросов в несколько раз. Показана возможность расчета величины β на основании технологических условий работы электрофильтра и его конструктивных параметров, при этом не учитывалось влияние неактивных зон надбункерной и бункерной частей электрофильтра [13].

В основу расчета положена зависимость подъема оси свободной струи за счет разности температур струи и окружающего ее объема. С учетом принятых допущений:

$$\beta = \left(\frac{h}{H} \right) \cdot (1 - \eta_{in})^N,$$

где h – высота подъема струи, H – высота электродов, η_{in} – степень очистки газов в неактивной и полуактивной зонах, N – количество полей электрофильтра.

На основании выполненных расчетов автором определена величина β , размер перегородок, ограничивающих перетоки над электродами для конкретного электрофильтра, и сделаны выводы, в частности, о целесообразности увеличения времени пребывания за счет увеличения количества полей, а не их длины, а также о необходимости улучшения теплоизоляции корпуса электрофильтра.

Для уточненного расчета степени очистки газов электрофильтром необходимо учитывать все виды проскока и уноса пыли, приведенные на рис. 7.4 [12].



Рис. 7.4. Классификация выбросов пыли из электрофильтра

В настоящее время еще нет разработок, позволяющих учесть с помощью расчетов одновременно все виды выбросов пыли из электрофильтров. Поэтому применение эмпирических методик расчета электрофильтров в целом ряде случаев представляет практический интерес.

Так, в «Кондор-Эко» в 2007 г. автором был разработан оценочный экспресс-метод для расчета параметров электрофильтров, который используется наряду с уже существующими методами. В основу метода положены экспериментальные зависимости скорости дрейфа (полученные более чем для 20 отечественных конструкций электрофильтров) от удельного электрического сопротивления улавливаемой пыли.

Метод позволяет оперативно учитывать влияние напряжения зажигания короны, дисперсность пыли, концентрацию дисперсной фазы, величину межэлектродного расстояния, высоту электродной системы, величину проскока пыли через неактивные зоны и ряд других параметров электрофильтров и очищаемого газа.

Глава 8 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

Электрофильтры находятся в эксплуатации десятки лет. Нередко срок их службы (с учетом ремонтов) составляет 30–40 лет. За такой период времени естественно изменяется режим работы технологического агрегата, санитарные требования к величине выбросов из электрофильтра в атмосферу, происходит физический и моральный износ электрофильтра и ухудшение его работы.

Безусловно, радикальным средством обеспечения требуемых санитарных норм является установка новых электрофильтров. Но в целом ряде случаев реконструкция устаревших электрофильтров является экономически целесообразней.

Анализ результатов выполненных реконструкций электрофильтров [1-8] показывает, что работы по повышению эффективности выполняются, как правило, по двум-трем направлениям. Например, замена системы коронирующих электродов, увеличение площади осаждения, замена агрегатов питания.

Реализация этих решений безусловно повышает эффективность электрофильтров, однако нередко, результаты оказываются недостаточными [4, 5].

Достичь требуемых результатов удается с использованием рабочих характеристик (зависимостей степени очистки газов от влияющих параметров) электрофильтра, получаемых экспериментально-расчетным путем. Получение всех требуемых характеристик для конкретного электрофильтра на одном объекте – трудоемкая и дорогостоящая работа. Поэтому целесообразно использовать уже имеющийся опыт исследований и испытаний других электрофильтров на других объектах. Такая работа выполнялась в СФ НИИОГАЗ в течение длительного времени, в результате при реконструкции устаревших аппаратов имеется возможность рассмотреть и оценить, например, 6–10 направлений работ по повышению эффективности электрофильтров. При этом прогнозируемая степень очистки газов должна быть рассчитана с известным запасом, учитывающим естественное, незначительное, но закономерное снижение эффективности электрофильтра в процессе эксплуатации.

Другими словами, реконструируемый электрофильтр должен иметь обоснованный запас по степени очистки газов, обеспечивающий требуемые нормы выбросов пыли в течение периода до планового ремонта.

Многолетний опыт разработки, испытаний, реконструкции и ремонта отечественных и зарубежных электрофильтров позволил разработать и успешно применить излагаемый ниже метод.

Одно из безусловных преимуществ предлагаемых методов – возможность разработать стратегию достижения требуемой эффективности электрофильтра, обеспечив минимальные затраты, отбросив наиболее дорогостоящие пути и переходя по мере необходимости от наиболее дешевых методов к более затратным.

Сущность данного метода заключается в аналитическом определении величины снижения выбросов до внедрения какого-либо мероприятия. Это дает возможность прогнозировать эффект от планируемого отдельного мероприятия или их комплекса и выбирать варианты реконструкции с минимальными затратами.

Метод позволяет достичь требуемых норм выбросов путем изменения режимных, технологических и, при необходимости, конструктивных и проектных параметров. Общее количество влияющих параметров в электрофильтрах может составлять более 30 (см. приложение 1).

Метод применим при разработке гарантийных зависимостей новых электрофильтров, при реконструкции устаревших аппаратов, при необходимости повышения степени очистки газов электрофильтров, выбросы пыли из которых требуется снизить.

Успешное применение метода на электрофильтрах шести ГРЭС Китая, на электростанциях Украины (Криво-рожская, Трипольская), на Яйвинской ГРЭС, на Ярославском и Рязанском НПЗ, на электрофильтрах цементных заводов и др. предприятий позволяет рекомендовать его практически для всех электрофильтров [4, 5].

В качестве примера использования метода приведена таблица 8.1, в которой рассмотрен ряд параметров применительно к двухпольному электрофильтру ДГПС-45х2 Яйвинской ГРЭС-16.

Таблица 8.1

Влияние изменений некоторых параметров на степень очистки газов и величину снижения выбросов на примере двухпольного электрофильтра Яйвинской ГРЭС-16 (базовая степень очистки 97 %)

Изменяемый параметр электрофильтра	Увеличение степени очистки по отношению к базовой, %	Величина снижения выбросов пыли, %	Примечание
1. Снижение скорости газов с 1,9 до 1,8 м/с	0,23*	7,6	
2. Снижение температуры газов с 169 до 159°С	0,25*	8	
3. Снижение присосов с 15 до 7,5 %	0,28*	9	
4. Снижение напряжения зажигания короны до 15 кВ	На одном поле – 0,77* На двух полях – 1,54*	25 50	
5. Уменьшение расцентровки электродов с 15 до 7,5 мм	1,00*	33	На двух полях
6. Режим встряхивания осадительных электродов	0 – 1,26*	0 – 42	0- непрерывное встряхивание; 1,26 оптимальный режим встряхивания
7. Увеличение площади осаждения на 30 %	1,94*	64	

* – Эти значения являются иллюстрацией изменения степени очистки газов в электрофильтре при изменении единичных параметров. Для учета одновременного влияния 2-х и более параметров необходимо выполнение дополнительных расчетов или использование специальных графиков, рассчитываемых применительно к конкретным условиям работы аппарата.

Учет совместного влияния этих параметров позволяет рассчитать требуемое повышение эффективности работы электрофильтра. В общем случае для успешной эксплуатации электрофильтров должны быть выполнены следующие виды работ:

- организационные;
- режимные;
- конструктивные и проектные;
- технологические.

Организационные работы должны выполняться в период всего «жизненного» цикла аппарата. Они проводятся на стадиях выбора и проектирования газоочистки, изготовления, транспортировки, хранения, монтажа, наладки и эксплуатации электрофильтра.

Режимные методы предусматривают разработку и поддержание таких условий работы аппарата, при котором его узлы, механизмы, агрегаты питания работают с высокой прогнозируемой надежностью, обеспечивая максимально возможную степень очистки газов.

Технологические методы повышения эффективности работы электрофильтров предусматривают создание оптимизированных параметров пылегазовой среды путем изменения условий работы технологического

агрегата. Эти методы могут быть использованы для интенсификации одной из стадий очистки (зарядка частиц, движение их к осадительному электроду, удаление с осадительной поверхности, транспортировка и сбор уловленного продукта, его утилизация и хранение и т.д.) или для нескольких стадий одновременно.

Конструктивные методы включают в себя замену изношенных узлов исправными или установку других, более совершенных, позволяющих получить снижение выбросов пыли.

Нередко устаревшую активную зону аппарата заменяют полностью, подвергая изменениям и корпус аппарата.

Проектные методы могут предусматривать изменение ранее принятых схемных решений: улучшение газораспределения, снижение гидравлических потерь, установку или замену аппаратов предварительной очистки, систем удаления пыли и т.д.

Приведенная классификация, безусловно, не является исчерпывающей и в значительной мере условна.

Однако она позволяет систематизировать возможные направления работ и целенаправленно проводить мероприятия по повышению эффективности электрофильтров.

Наиболее целесообразным является комплексное проведение указанных мероприятий. При этом на первом этапе необходимо оценить эффективность и стоимость как каждого мероприятия в отдельности, так и в комплексе.

В настоящее время наиболее распространено применение оптимизации в следующих направлениях:

- питание полей электрофильтра током высокого напряжения. Установка более совершенных устройств управления агрегатами питания электрофильтров, например, типа БУЭФ;
- периодичность и интенсивность встряхивания коронирующих и осадительных электродов и газораспределительных решеток, установка микропроцессорных контроллеров типа «Elex»;
- установка мотор-редукторов, обеспечивающих частотное регулирование режимов встряхивания;
- повышение равномерности распределения газов в электрофильтре;
- замена коронирующих элементов;
- замена осадительных элементов;
- увеличение площади осаждения электрофильтра.

8.1. Организационные работы по повышению эффективности электрофильтров

Первым этапом, от которого зависит обеспечение требуемой эффективности работы электрофильтра, является разработка проекта установки газоочистки. На этой стадии должен быть не только правильно выбран типоразмер электрофильтра, но и его элементы, такие как тип коронирующих электродов, межэлектродное расстояние, высота электродной системы, устройства пылеудаления, источники высокого напряжения и др., позволяющие обеспечить требуемую эксплуатационную степень очистки газов на период межремонтного пробега основного технологического оборудования.

Вторая важная стадия, от которой зависит степень очистки создаваемого аппарата, изготовление его внутреннего оборудования. Уже на этом этапе могут и должны учитываться ряд режимных и технологических условий его работы. Поэтому научное сопровождение (авторский надзор) при изготовлении аппарата с учетом научно-обоснованных мероприятий, разработанных применительно к конкретным условиям работы электрофильтра, позволит обеспечить проектные параметры будущего аппарата.

Так, например, определить допустимую степень износа штампа при изготовлении коронирующих элементов (это определяет радиус кривизны концов игл ленточно-игольчатых коронирующих элементов) могут только специалисты, знающие технологические условия работы будущего электрофильтра. Аналогичная ситуация возникает при ориентации игл коронирующих электродов. При улавливании высокоомной пыли иглы располагают параллельно плоскости осадительного электрода с целью выравнивания плотности тока по поверхности осадительного электрода. Для этого необходимо знать величину удельного электрического сопротивления пыли по полям. Так, на первом и последнем полях электрофильтра УЭС может отличаться в 10–100 раз. Этот факт может быть учтен путем соответствующей ориентации игл или установкой различных коронирующих элементов по полям.

Третьим исключительно ответственным этапом является стадия монтажа и пуско-наладочных испытаний электрофильтра.

Так, например, отклонение межэлектродного расстояния хотя бы в одном месте каждого поля электрофильтра на 10–15 мм снижает степень очистки до 90–80 %, что ставит его на уровень инерционного аппарата, стоимость которого ниже стоимости электрофильтра примерно на два порядка.

Гарантированные заводом-изготовителем надежность и срок службы аппарата могут быть обеспечены только при условии соблюдения норм при выполнении монтажа всех узлов и механизмов электрофильтра.

После проведения монтажа должны быть выполнены пуско-наладочные работы – заключительный этап, подготавливающий электрофильтр к успешной эксплуатации.

Режимы питания током высокого напряжения, пуска и остановка аппарата, обогрева изоляторов и др. должны быть научно обоснованы и четко регламентированы.

Так, например, нередко обоснованный выбор режимов регенерации электродов позволяет в несколько раз увеличить срок службы узлов встряхивания (по сравнению с непрерывным режимом) при одновременном повышении эффективности пылеулавливания.

Другим важнейшим условием обеспечения нормального функционирования электрофильтра является поддержание оптимального для конкретных условий электрического режима питания полей электрофильтра.

Для этого необходимо периодически сравнивать его с исходным режимом питания и производить устранение причин, вызвавших отклонение режима питания от оптимальной его величины.

Необходимо обеспечить требуемые режимы пуска и остановки электрофильтра, температурный, гидравлический и другие условия его работы в соответствии с технологическими инструкциями.

Первым этапом работ, направленных на повышение степени очистки газов в эксплуатируемом электрофильтре, является контроль состояния оборудования и анализ его работы. Опираясь на эту информацию, следует выбирать методы поддержания, а при необходимости и повышения эффективности электрофильтров.

Первоочередным условием нормальной работы электрофильтра, как любого механизма, является соблюдение паспортных условий его эксплуатации.

Работы, связанные с включением, пуском, ремонтом электрофильтров должны проводиться с соблюдением правил эксплуатации и техники безопасности [9,10], а также с соблюдением действующих на предприятии инструкций по технике безопасности.

Эксплуатация и техническое обслуживание оборудования должны выполняться в соответствии с «Инструкцией по эксплуатации» для электрофильтров и «Инструкциями по эксплуатации комплектующих электротехнических изделий», поставляемых совместно с электрофильтром.

Для обеспечения нормальной работы электрофильтров необходимо производить следующие профилактические работы:

- контроль за состоянием теплоизоляции корпуса. Нарушение теплоизоляции ведет к образованию интенсивной коррозии металла корпуса с последующим образованием сквозных отверстий и появлением присосов (выбиваний) газов;

- контроль за состоянием механизмов встряхивания, системами автоматического и ручного управления ими, анализ режима и эффективности работы механизмов встряхивания и системы пылеудаления;

- контроль за состоянием узлов встряхивания, электродов, газораспределительных решеток, бункеров, состоянием центровки электродной системы;

- контроль за состоянием высоковольтных изоляторов;

- непрерывный контроль с помощью индикаторов запыленности позволяет оперативно фиксировать отклонения в работе электрофильтра и способствует оперативному нахождению причин ухудшения работы аппарата;

- контроль за работой электрофильтров путем проведения пылегазовых измерений целесообразно осуществлять периодически с целью тарировки индикаторов непрерывного контроля запыленности и получения уточненных данных по технологическим условиям работы электрофильтра.

Для контроля работы отдельных полей электрофильтра целесообразно использовать показания датчиков уровня пыли или осуществлять измерение количества пыли, уловленной полями электрофильтра, путем контроля пульпы. Своевременное выявление снижения эффективности поля наряду с анализом электрического режима питания этого поля (вольтамперная характеристика, напряжение зажигания короны, величина пробивного напряжения, количество искровых пробоев) позволяют оперативно диагностировать возникающие неисправности, что создает предпосылки для оперативного их устранения.

8.2. Снижение выбросов пыли из электрофильтров путем оптимизации режимов их работы (режимные методы)

Безусловную пользу будет представлять получение и накопление рабочих характеристик электрофильтра – зависимостей степени очистки газов от режимных параметров (режимные методы). Выбор режима работы электрофильтра, как правило, зависит от свойств очищаемой пылегазовой среды. Он, естественно, связан и с конструкцией электрофильтра. Ряд режимов работы электрофильтров в настоящее время может быть рассчитан на стадии проектирования электрогазоочистки, другие выбираются в процессе пуско-наладки электрофильтра с учетом технологических, конструктивных, проектных и др. параметров его работы.

Для успешного функционирования электрофильтров необходимо обеспечить:

- выбор оптимального режима работы механизмов электрофильтра и высоковольтных агрегатов питания;

- поддержание наиболее рациональных технологических условий работы; постоянный анализ состояния конструктивных элементов, их ремонт, замену, поддержание и улучшение показателей их работы, снижение выбросов пыли из электрофильтров путем оптимизации режимов их работы на основании опыта эксплуатации.

Наиболее целесообразным является применение научно обоснованных рабочих характеристик электрофильтров, учитывающих теоретические и экспериментальные зависимости степени очистки газов от влияющих параметров.

Режимные методы являются одним из наиболее эффективных средств снижения выбросов пыли из электрофильтров. Характерной особенностью этих методов является, как правило, относительно низкая стоимость их реализации (по сравнению с конструктивными, технологическими и проектными).

8.2.1. Оптимизация встряхивания осадительных электродов

Оптимизация режимов встряхивания электродов электрофильтров до середины 80-х годов осуществлялась путем перебора различных вариантов на основании имеющегося опыта [1]. Применение расчетной методики оптимизации встряхивания осадительных электродов [2] при эксплуатации электрофильтров показывает, что оптимизация встряхивания осадительных электродов позволяет снизить выбросы пыли из электрофильтров в 1,3–2,5 раза по сравнению с непрерывным режимом встряхивания [3,8]. Кроме того, происходит значительное снижение механического износа узлов встряхивания, увеличивается межремонтный пробег и снижается объем ремонтных работ на электрофильтре.

Величина снижения уноса за счет оптимизации встряхивания зависит от физико-химических свойств пылегазовой среды и может быть рассчитана по имеющимся методикам с применением ЭВМ.

Как правило, наибольший эффект снижения выбросов имеет место при улавливании пылей, имеющих невысокое УЭС. Периодичность встряхивания осадительных электродов горизонтального электрофильтра может быть рассчитана. Интервал встряхивания τ_n для любого поля можно определить по формуле (8.1):

$$\tau_n = 16,7 \frac{S_n m_0}{Q Z_{вх} \eta_n}, \text{ мин} \quad (8.1)$$

где S_n – площадь осаждения поля, м²;

m_0 – пылеемкость осадительных электродов поля:

$$m_0 = 3,14 - 0,25 \lg \rho_v, \text{ кг/м}^2;$$

ρ_v – удельное электрическое сопротивление улавливаемой пыли, Ом·м;

Q – количество газов, поступающих в поле, м³/с;

η_n – степень очистки газов полем электрофильтра, д. ед.

При допущении равенства скорости дрейфа по полям степень очистки газов в любом поле электрофильтра будет равна:

$$\eta_n = \sqrt[3]{1 - \eta_{\text{эф}}}, \quad (8.2)$$

где $\eta_{\text{эф}}$ – степень очистки газов электрофильтром, д. ед.;

N – количество последовательных полей в электрофильтре;

При расчете интервалов встряхивания вертикального электрофильтра может быть применена следующая формула:

$$\tau_n = 16,7 \frac{m_0 L}{H V_r Z_{вх} \eta}, \text{ мин} \quad (8.3)$$

где $m_0 = 3,14 - 0,25 \lg \rho_v, \text{ кг/м}^2$;

L – длина поля по ходу газов вертикального электрофильтра, м;

H – расстояние между коронирующим и осадительным электродом, м;

V_r – скорость газов в активном сечении, м/с;

$Z_{вх}$ – запыленность на входе в поле электрофильтра, г/м³;

η – степень очистки газов в электрофильтре при кратковременном отключении механизмов встряхивания, д. ед.

Величина интервала встряхивания осадительных электродов вертикального электрофильтра может быть определена также с помощью номограмм [10].

8.2.2. Уточнение методики расчета режимов встряхивания электродов электрофильтров

Экспериментальные исследования, выполненные на опытном электрофильтре Черепетской ГРЭС, показывают (таблица 8.2), что выбросы пыли при режимах, рассчитанных в соответствии с разработанной методикой, могут превышать на 20 % выбросы при кратковременном отключении механизмов встряхивания электродов, причем эта величина может быть снижена в том числе за счет уточнения интервала встряхивания.

Таблица 8.2

Сравнение выбросов пыли из опытного электрофилтра
при периодическом и отключенном встряхивании

Номер опыта	1	2	3	4	5
Степень очистки при кратковременном отключении встряхивания	0,960	0,962	0,972	0,976	0,983
Степень очистки при периодическом встряхивании	0,908	0,940	0,966	0,969	0,975
Интервал встряхивания, мин	3	15	30	60	90
Соотношение выбросов пыли из электрофилтра при периодическом встряхивании и при отключенном встряхивании	2,3	1,6	1,2	1,3	1,5

Следует отметить, что высота электродной системы в опытном электрофилтре составляла 2 м. При увеличении высоты электродов величина уноса при встряхивании возрастает. Следовательно, величина выбросов пыли при встряхивании в промышленных электрофилтрах может быть дополнительно снижена. Одним из направлений усовершенствования существующей методики и, следовательно, дополнительного снижения выбросов пыли при встряхивании является уточнение принятых при ее разработке допущений (равенство удельного электрического сопротивления уловленной пыли (УЭС) по полям электрофилтра и экспоненциальное распределение количества уловленной пыли по длине электрофилтра).

Величина УЭС пыли по полям электрофилтра, как показывают лабораторные измерения образцов пыли, отобранной в разных полях, может изменяться на 1,5–2 порядка, что приводит к изменению расчетной величины интервалов встряхивания. Известно [3], что при низком удельном электрическом сопротивлении (УЭС) улавливаемой пыли встряхивание осадительных электродов необходимо производить реже, а коронирующих – чаще; при высоком УЭС – наоборот.

Учитывая, что пылеемкость осадительных электродов [3] равняется:

$$m_0 = 3,14 - 0,25 \lg \rho_v, \text{ кг/м}^2; \quad 10^6 < \rho_v < 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (8.4)$$

и, взяв соотношение величин УЭС, отличающееся на 1,5–2,0 порядка, получим, что соотношение интервалов встряхивания осадительных электродов в диапазоне высоких УЭС будет изменяться в зависимости от диапазона УЭС в среднем на 30 %.

Для коронирующих электродов [3] соотношение интервалов встряхивания будет отличаться более чем в два раза.

$$\mu_0 = 13 \lg \rho_v - 77 \cdot 10^6 < \rho_v < 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (8.5)$$

Влияние величины пылеемкости на степень очистки газов [3] можно определить по формуле:

$$\eta_0 = 1 - \frac{1 - \eta_\phi}{1 + k m_0 / m_\phi}, \quad (8.6)$$

где η_0 , m_0 – степень очистки и пылеемкость при оптимизированных интервалах встряхивания осадительных электродов;

η_ϕ , m_ϕ – степень очистки и пылеемкость при существующих интервалах встряхивания осадительных электродов;

k – коэффициент, зависящий от УЭС пыли.

Расчеты показывают, что учет изменения пылеемкости m_0 при встряхивании осадительных электродов только для последнего поля при увеличении УЭС на два порядка выбросы пыли могут быть уменьшены на 10–30 %.

Таким образом, при расчете уточненных интервалов встряхивания пылеемкость осадительных и коронирующих электродов по полям следует принимать не постоянной (как это указано выше и делалось ранее [3, 4, 5]), а рассчитывать по формулам (8.4, 8.5) с учетом изменения УЭС пыли по полям.

В соответствии с принятой в настоящее время теорией осаждения пыли распределение ее массы по длине активной зоны электрофилтра происходит по экспоненциальному закону:

$$P_{yл} = P_{вх} \exp(-kL) \quad (8.7)$$

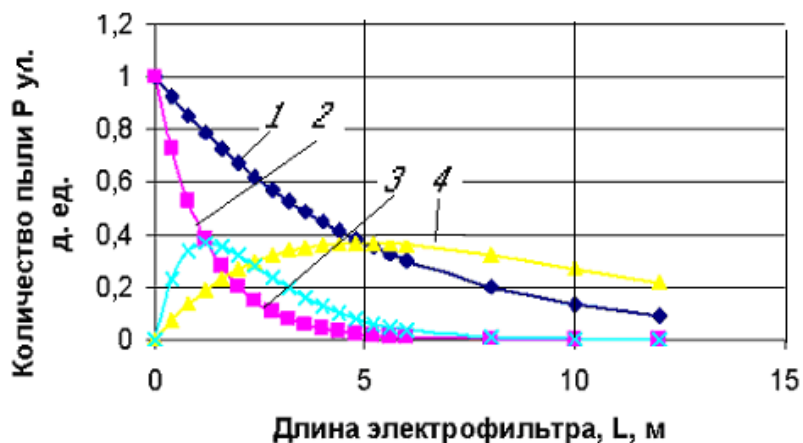


Рис. 8.1. Распределение уловленной пыли по длине электрофильтра.
 1,2 – экспериментальное распределение пыли в соответствии с формулой Дэйча;
 3,4 – фактическое распределение пыли; 1,4 – при низкой степени очистки газов;
 2,3 – при высокой степени очистки газов

Однако, как показывают многочисленные эксперименты на лабораторном электрофильтре [3], фактическое распределение пыли отличается от экспоненциального и может быть выражено зависимостью (8.8), (рис. кривые 3,4):

$$P_{ул} = P_{вх} \kappa_1 \cdot \kappa L \exp(-\kappa L) \quad (8.8)$$

Такое распределение пыли обусловлено следующими причинами:

1. Временем зарядки частиц.
2. Величиной скорости газа в активной зоне электрофильтра.
3. Запиранием коронного разряда.
4. Величиной уноса пыли в процессе ее осаждения.
5. Величиной УЭС пыли, ее дисперсностью и другими физико-химическими свойствами пыли, определяющими величину скорости дрейфа улавливаемых частиц.

Сравнение распределения уловленной пыли по формулам 8.7, и 8.8 по длине активной зоны электрофильтра представлено в таблице 8.3.

Таблица 8.3

Распределение количества уловленной пыли $P_{ул}$ по длине электрофильтра для значений $\omega = 0,03-0,12$ м/с; $L = 0-11,2$ м; $V_r = 1,0$ м/с; $P_{вх} = 1$.

L	0	1,6	4,8	8	11,2
k	0,8 – 0,2	0,8 – 0,2	0,8 – 0,2	0,8 – 0,2	0,8 – 0,2
$P_{ул} = P_{вх} e^{-\kappa x}$	1	0,27 – 0,726	0,0214 – 0,382	$1,66 \cdot 10^{-3} - 0,202$	$1,28 \cdot 10^{-3} - 0,106$
$P_{ул} = P_{вх} \kappa x e^{-\kappa x}$	0	0,356 – 0,232	0,0825 – 0,367	0,0106 – 0,323	$1,15 \cdot 10^{-3} - 0,238$

$P_{вх}$ – количество пыли на входе в электрофильтр;

L – расстояние от входа электрофильтра до середины поля;

$$K = \frac{\omega}{H_0 V_a},$$

где ω – скорость дрейфа, м/с;

H_0 – межэлектродное расстояние, м;

V_r – скорость газов, м/с;

κ_1 – коэффициент.

В общем случае величина абсциссы точки максимума кривых 3,4 (рис. 8.1) может быть определена из условия равенства нулю первой производной формулы (8.8), откуда следует, что абсцисса точки максимума кривой накопления массы пыли по длине электрофильтра:

$$L_{max} = H_0 V_r / \omega, \quad (8.9)$$

При изменении в промышленном электрофильтре междуэлектродного расстояния в диапазоне 0,15–0,23 м, а скорости дрейфа в диапазоне 0,03–0,12 м/с величина L_{max} при отсутствии запирания короны может изменяться в диапазоне от 1,25 до 7 м, т.е. примерно от середины первого поля до начала третьего. Эта ве-

личина относится к распределению пыли по длине электрофильтра как на осадительных, так и на коронирующих электродах.

Сказанное делает целесообразным выполнение расчета уточненных интервалов встряхивания или экспериментальное определение фактического распределения количества уловленной пыли по полям, например, с использованием индикаторов уровня пыли в бункерах или другим методом.

Таким образом, реализация режима встряхивания электродов с учетом изменения УЭС по полям и учетом отклонения распределения количества пыли по длине электрофильтра от экспоненциального закона позволяет дополнительно снизить выбросы из электрофильтров и увеличить срок службы узлов встряхивания.

При эксплуатации электрофильтров технологические параметры нередко подвержены существенным изменениям, оптимальные интервалы встряхивания изменяются. Для оперативного учета этого целесообразно осуществлять автоматическое регулирование режимов встряхивания по полям, например, с помощью специальных датчиков [7]. Для этой цели также может быть использован принцип контроля самопроизвольного обрушения пыли с осадительных электродов [11,12,13].

8.2.3. Оптимизация встряхивания коронирующих электродов

При оптимальном режиме встряхивания коронирующих электродов должен поддерживаться такой слой пыли на коронирующих элементах, при котором ток короны обеспечивает наиболее эффективное улавливание пыли в электрофильтре. С другой стороны, интенсивность и частоту встряхивания необходимо выбирать такими, чтобы обеспечить необходимый срок службы узлов встряхивания и минимальную расцентровку электродной системы.

До недавнего времени считалось, что при встряхивании коронирующих элементов электрофильтров необходимо обеспечивать максимальную чистоту их поверхности. В связи с этой предпосылкой рекомендуемый интервал встряхивания коронирующих электродов составлял 3–5 мин [14]. Однако частое встряхивание коронирующих электродов приводит к дополнительному уносу пыли из электрофильтра и повышенному износу узлов встряхивания, поэтому следует обоснованно выбирать интервалы встряхивания коронирующих электродов.

Запыленность газов на входе в электрофильтры в различных отраслях промышленности изменяется примерно в диапазоне 0,2–200 г/м³. Если допустить, что встряхивание электродов необходимо производить при некотором определенном количестве пыли на элементах, то длительность интервалов встряхивания первых полей электрофильтров будет отличаться в 1000 раз.

Допустим (для упрощения предварительных рассуждений), что распределение количества уловленной пыли на электродах по длине электрофильтров (по ходу газа) происходит по экспоненциальному закону. Тогда, например, при степени очистки 99,5 % соотношение количества пыли, уловленной на электродах (осадительных и коронирующих) по полям для четырехпольного электрофильтра, составит 54:14:3,8:1. Тогда соотношение длительности интервалов встряхивания первых и последних полей с учетом диапазона разброса входной запыленности будет отличаться в $54 \cdot 10^3$ раз, что свидетельствует о неправомерности выбора для коронирующих электродов всех электрофильтров интервала встряхивания, равного 3–5 мин.

При оптимизации встряхивания коронирующих электродов по сравнению с непрерывным режимом встряхивания происходит снижение выбросов пыли примерно на 5–15 %. Кроме того, происходит значительное снижение механического износа узлов встряхивания коронирующих электродов, увеличивается межремонтный пробег и снижается объем ремонтных работ на электрофильтре.

Периодичность встряхивания коронирующих электродов зависит от конструкции электрофильтра и физико-химических свойств пыли и газа.

В чехле короны электрофильтра образуются положительные ионы, которые небольшую часть пыли заряжают положительно. Некоторая доля этих частиц (ориентировочно 1 % от количества пыли на осадительных электродах) осаждается на коронирующих элементах в том числе непосредственно на коронирующих участках. Абсолютная величина интервалов встряхивания коронирующих электродов обусловлена количеством пыли и электрическим сопротивлением слоя на коронирующих участках.

Если в электрофильтр поступает низкоомная пыль, то оседающие частицы на коронирующих участках образуют проводящий слой, увеличивают их радиус кривизны, снижают ток короны и степень очистки газов. В этом случае необходимо обеспечивать минимальный слой пыли.

При улавливании высокоомной пыли на коронирующих участках образуется слой, который пробивается в поле высокой напряженности у поверхности коронирующего участка. Поэтому ионизирующая способность коронирующих электродов сохраняется дольше.

Ориентировочный расчет интервалов встряхивания коронирующих электродов τ_k для любого поля электрофильтра может быть выполнен по следующей формуле:

$$\tau_k = 1670 \frac{L_k \mu_0}{Q_{ex} \cdot Z_{ex} \cdot \eta_n}, \text{ мин} \quad (8.10)$$

где $\mu_0 = 13 \lg \rho_v - 77 \cdot 10^6 < \rho_v > 10^{12}$ Ом · м;

ρ_v – удельное электрическое сопротивление пыли, Ом · м;

L_k – длина коронирующих электродов поля, м;

$Q_{вх}$ – количество газов на входе в поле электрофильтра, м³/с;

$Z_{вх}$ – запыленность на входе в поле электрофильтра, г/м³;

η_n – степень очистки газов полем электрофильтра.

Приведенные формулы позволяют получить приближенную величину интервала встряхивания и соотношения интервалов по полям, что необходимо знать на стадии проектирования установки электрогазоочистки.

Для упрощения вычислений можно использовать данные таблиц 8.4 и 8.5 и формулы 8.5, 8.6:

Таблица 8.4

Зависимость пылеемкости (μ_0) коронирующих электродов от УЭС пылей

Тип улавливаемой пыли	УЭС, ρ_v , Ом · м	μ_0 , г/м
Технический углерод	$10^2 - 10^3$	1,6
Алюмосиликатный катализатор	$10^5 - 10^6$	5,4
Пыль сушильного барабана	10^7	8,3
Полубоженный клинкер (мокрый способ)	10^8	11,7
Зола экибастузского угля	10^{11}	68
Полубоженный клинкер (сухой способ)	10^{12}	81,5

Таблица 8.5

Соотношение интервалов встряхивания коронирующих электродов по полям

Электрофильтр	Номер	Соотношение интервалов встряхивания C_n при степени очистки η					
		0,96	0,97	0,98	0,99	0,995	0,999
Трехполюсный	1	1	1	1	1	1	1
	2	2,9	3,2	3,7	4,6	5,8	10,0
	3	8,6	10,4	13,6	21,5	34,6	100,0
Четырехполюсный	1	1	1	1	1	1	1
	2	2,2	2,4	2,7	3,2	3,8	5,6
	3	5,0	5,8	7,1	10,0	14,1	31,6
	4	11,2	13,9	18,8	31,6	54,6	178,0
Пятиполюсный	1	1	1	1	1	1	1
	2	1,9	2,0	2,2	2,5	2,9	4,0
	3	3,6	4,1	4,8	6,3	8,3	15,8
	4	6,9	8,2	10,6	15,8	24,0	63,1
	5	13,1	16,5	22,9	39,8	69,3	251,2

Допуская экспоненциальное распределение пыли по длине электрофильтра, получим соотношение интервалов встряхивания коронирующих электродов по полям C_n в зависимости от степени очистки газов (табл. 8.5).

Расчетный интервал встряхивания коронирующих электродов τ_k для любого поля электрофильтра может быть определен по следующей формуле:

$$\tau_k = 1670 \frac{L_k C_u \mu_0}{Q_{ex} Z_{ex} K}, \text{ мин} \quad (8.11)$$

где L_k – суммарная длина коронирующих элементов поля;

$Q_{вх}$ – количество газов, поступающих в поле;

$Z_{вх}$ – запыленность газов на входе в поле;

K – коэффициент, учитывающий осаждение пыли на коронирующих элементах;

μ_0 – оптимальная пылеемкость коронирующих электродов.

Для значений степени очистки газов, отсутствующих в табл. 8.5, величина C_n может быть рассчитана по формуле:

$$C_u = \sqrt[n]{(1-\eta)^{n-1}}, \quad (8.12)$$

где N – число полей в электрофильтре;

n – порядковый номер поля;

η – степень очистки газов электрофильтром при кратковременном отключении встряхивания электродов.

При эксплуатации электрофильтра расчетные величины целесообразно уточнить. Для этого достаточно при оптимальном режиме встряхивания осадительных электродов электрофильтра зафиксировать момент времени, при котором будет происходить регистрируемое щитовым прибором снижение тока короны или подъем напряжения данного поля.

8.2.4. О величине ускорений, требуемых для отряхивания пыли с электродов электрофильтров

Величина отряхивающих ускорений для сухих низкоомных пылей имеет минимальное значение. Так, например, сажа, уловленная из выхлопных газов дизеля, может быть удалена простым сдуванием слабой струей воздуха.

Для удаления высокоомных пылей с осадительных электродов требуются наибольшие ускорения.

Если допустить, что основное влияние на величину требуемых для отряхивания пыли ускорений оказывает УЭС осаждаемой пыли, то для ориентировочного определения требуемых ускорений может быть применена зависимость:

$$a \approx 20 \lg \rho_v, \quad (8.13)$$

где a – требуемое ускорение, м/с;

ρ_v – УЭС пыли, Ом·м.

Величину отряхивающих ускорений осадительных электродов можно изменить путем замены бойков механизмов встряхивания. Это трудоемкий способ. Уменьшение ускорений можно получить, применяя устройство, ограничивающее высоту падения бойков [14].

Возможность изменения величины отряхивающего импульса при регенерации коронирующих электродов в отечественных электрофильтрах заложена в конструкции механизма встряхивания путем изменения угла подъема молотков. Этот механизм позволяет изменять отряхивающие ускорения в достаточно широком диапазоне.

С точки зрения минимального уноса пыли при встряхивании электродов пыль должна отряхиваться за один удар бойка по электроду.

Величина оптимального импульса и их количество в настоящее время могут подбираться лишь экспериментально.

Толщина допустимого неотряхиваемого слоя на электродах (который всегда имеется при длительной эксплуатации электрофильтра) также в значительной мере определяется величиной УЭС слоя пыли.

Для коронирующих элементов неотряхиваемый слой низкоомной пыли увеличивает радиус кривизны острия игл, что приводит к возрастанию напряжения зажигания короны и снижению степени очистки газов. Толщина слоя такой пыли должна быть минимальной.

Слой высокоомной пыли на коронирующих электродах может пробиваться благодаря высокой напряженности в области чехла короны. При этом ток короны естественно будет возрастать. Так, например, при отключении механизмов встряхивания коронирующих электродов на последних полях электрофильтров, улавливающих золу экибастузского угля, ток короны практически не падал в течение нескольких часов.

При отряхивании коронирующих электродов при мокром способе производства цемента ($\rho_v = 10^8$ Ом·м) в соответствии с формулой (8.1) требуется отряхивающее ускорение 160 g, а при сухом ($\rho_v = 10^{10}$ Ом·м) – 240 g. Отсюда следует, что угол подъема коронирующих молотков в электрофильтрах сухого способа производства цемента должен быть существенно больше, чем при мокром способе, а встряхивание должно производиться реже.

Очевидно, что как величина ударного импульса коронирующих электродов, так и интервал их встряхивания, должны выбираться с учетом этих предпосылок.

8.2.5. О режиме работы изоляторов электрофильтров

Изоляторные коробки электрофильтров (узлы подвода к электрофильтрам высокого напряжения и крепления-подвеса коронирующих систем) – наиболее сложные элементы конструкции электрофильтров. Изоляторы работают в сложных условиях. Они должны выдерживать статическую нагрузку – вес электродной системы и динамическое воздействие механизмов встряхивания коронирующих электродов, также они подвержены действию высоких температур. Кроме того, они должны обладать высоким электрическим сопротивлением в сложных условиях воздействия пыли, кислот. В зависимости от условий, в которых находятся изоляторы, разработаны следующие основные виды изоляторных коробок [1]:

1 – изоляторные коробки с масляным затвором – для мокрых электрофильтров, улавливающих туманы кислот, смолу из генераторных газов, фосфор;

2 – изоляторные коробки с опорным обдуваемым изолятором (с обогревом и без обогрева);

3 – изоляторные коробки с проходным кварцевым обогреваемым изолятором;

4 – изоляторные коробки с подвесными обогреваемыми изоляторами;

5 – изоляторные коробки с газо-буферной защитой.

При работе электрофильтра основное требование к изолятору – обеспечение такой степени чистоты его поверхности, при которой практически отсутствуют утечки тока по его поверхности.

Наличие пыли, особенно увлажненной, на изоляторе может привести к такому режиму, когда вся мощность высоковольтного агрегата питания будет потребляться изоляторами. Однако самое опасное – появление поверхностных разрядов и выход изолятора из строя.

Превышение рабочей температуры изолятора недопустимо, т.к. это может привести к повышенным утечкам тока и пробоем изолятора. В тех случаях, когда электрофильтр работает при давлении выше атмосферного, подается воздух или другой газ для предотвращения поступления пыли в изоляторную коробку. Температура подаваемого воздуха должна быть такой, чтобы не происходило образования конденсата на поверхности изолятора, а количество и давление его должно исключать попадание пыли в изоляторную коробку.

При работе электрофильтра под разрежением в шапке изолятора делаются отверстия регулируемого сечения для создания организованного подсоса воздуха, что способствует исключению попадания пыли внутрь изолятора и обеспечению чистоты внутренней его поверхности. Для исключения образования конденсата на поверхности изоляторов их необходимо подогревать штатными ТЭНами или путем подачи горячего сухого воздуха (газа) в изоляторную коробку.

Известны случаи успешной сушки изоляторов током высокого напряжения от агрегатов питания, однако при этом возможны пробои изоляторов и выход их из строя.

Для управления и сигнализации о работе электронагревателей изоляторных коробок электрофильтра разработаны устройства, позволяющие осуществлять местное и дистанционное включение ТЭНов, сигнализировать об их включении и о снижении температуры ниже допустимой, автоматически регулировать режим работы электронагревателей.

8.2.6. Оптимизация распределения газов в электрофильтре

Газ, поступивший в электрофильтр, должен быть равномерно распределен по его сечению. Кроме того, он должен миновать полуактивные и неактивные зоны.

Снижение степени очистки газа на участке, где скорость его выше средней, не компенсируется повышением степени очистки на другом участке, где скорость газа ниже средней его величины. Это обусловлено нелинейной зависимостью степени очистки газов от скорости. На качество газораспределения наряду с условиями ввода и вывода газового потока из электрофильтров оказывает влияние наличие газораспределительных и газоотсекательных устройств, ограничивающих перетоки в неактивных и полуактивных зонах [15-20]. В полуактивных зонах электрическое поле ослаблено по сравнению с полем в межэлектродном промежутке, и степень очистки там, естественно, ниже.

В неактивных зонах электрического поля нет. Улавливание пыли под действием электрического поля в них отсутствует. Некоторое улавливание пыли в неактивных зонах электрофильтра происходит, например, под действием гравитационных сил.

Для того, чтобы рационально расходовать затраты на повышение эффективности электрофильтра, необходимо иметь возможность оценить с приемлемой точностью величину потери эффективности от каждого вида причин.

8.2.7. Оптимизация питания полей электрофильтра

Важным этапом оптимизации питания электрофильтров должен быть выбор формы и частоты питающего напряжения. Так, при улавливании высокоомных пылей (например, золы экибастузского угля) эффективным является применение специальных приставок, вырабатывающих импульсы тока со специальными параметрами.

Важным этапом оптимизации работы высоковольтного питания является технологическая настройка системы управления высоковольтным агрегатом.

Сущность настройки системы автоматического управления заключается в создании максимально возможного напряжения на электродах электрофильтра с обеспечением оптимальной величины тока короны. При этом подлежат настройке частота и длительность искровых пробоев, время и глубина отработки системы регулирования, ряд других параметров.

Обслуживающим персоналом грубая настройка режима работы агрегатов питания может быть осуществлена по числу искрений в поле. Известно, что при малом количестве искрений величина напряжения существенно ниже предпробивного.

При количестве искрений более 170 искр в минуту количество энергии, теряемой в искрах, становится значительным и степень очистки газов падает.

В первом приближении можно считать, что оптимальное количество искрений (И) (1/мин) зависит от УЭС пыли ($\rho\nu$, Ом·м):

$$И = 12 \lg \rho\nu \quad (8.14)$$

Определив приближенное требуемое значение количество искрений в электрофилт্রে, (так, например, при $\rho_v = 10^8$, $I = 96$; при $\rho_v = 10^{10}$, $I = 120$) можно изменить количество искрений, например, на 10–15 % и с помощью пылемера или путем пылегазовых измерений определить изменение выходной запыленности и, таким образом, уточнить оптимальное количество искрений.

Настройка агрегатов питания, выполняемая специалистами, позволяет снизить выбросы пыли из электрофилтра в 1,5–3 раза, а применение импульсных приставок при улавливании высокоомных пылей позволяет достигнуть дополнительно и экономии электроэнергии в 2–5 раз.

8.3. Снижение выбросов пыли путем изменения параметров пылегазовой среды (технологические методы)

Общее количество технологических параметров, влияющих на степень очистки газов в электрофилт্রে, достаточно велико (Приложение 1).

В каждом конкретном случае изменение величины какого-либо параметра может по-разному влиять на изменение степени очистки газов. В связи с этим рассмотрение влияния всех возможных параметров и их сочетаний является слишком обширной задачей. При создании установок электрической очистки газов необходимо учитывать: объем, температуру, влажность, давление, химический состав газов, дисперсность, удельное электрическое сопротивление (УЭС), гигроскопичность, абразивность, возгораемость и др. параметры пыли.

Параметры пылегазовой среды оказывают решающее влияние на выбор типа пылеуловителя, на конструктивное решение выбранного аппарата и являются исходными данными для расчета эффективности. Поэтому свойствам очищаемой пылегазовой среды уделяется большое внимание [1, 11, 21, 25, 26, 27].

По мере продвижения пылегазовой среды вдоль электрофилтра происходит сепарация частиц пыли в зависимости от их физико-химических свойств и изменение параметров газов. В итоге свойства пылегазовой среды на входе существенно отличаются от таковых на последующих полях электрофилтра, в то время как конструктивные параметры полей электрофилтра, как правило, одинаковы. Изменяются только режимы питания и регенерации полей.

Рассмотрим изменение следующих параметров пылегазовой среды по мере продвижения ее вдоль электрофилтра:

- количество улавливаемой пыли и степень очистки газов;
- дисперсный состав пыли;
- УЭС пыли;
- объем газов;
- когезионные свойства пыли.

Количество улавливаемой пыли

В соответствии с уравнением Дэйча распределение количества уловленной пыли (P) по длине электрофилтра определяется экспонентой:

$$P = \exp\left(-\frac{\omega L}{HV}\right), \quad (8.15)$$

- где ω – скорость дрейфа частиц пыли;
- L – длина активной зоны электрофилтра;
- H – межэлектродное расстояние;
- V – скорость газов в электрофилт্রে.

Лабораторные исследования (рис. 8.1) и опыт эксплуатации показывают, что распределение количества пыли по длине электрофилтра отличается от экспоненциального и имеет вид:

$$P = K \exp\left(-\frac{\omega L}{HV}\right) \quad (8.16)$$

где K – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров электрофилтра, свойств пылегазовой среды и режима питания электрофилтра током высокого напряжения.

Как видно из рис. 8.1, фактическое распределение пыли на осадительных электродах отличается от распределения, рассчитанного по формуле (8.15). Аналогичное распределение пыли имеет место и на коронирующих электродах.

Соотношение величины выбросов, рассчитанное по формулам (8.15) и (8.16), составляет:

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{1}{K}, \quad (8.17)$$

где B_1, B_2 – величины выбросов пыли, полученные соответственно с учетом формул (8.15) и (8.16).

Выражение (8.17) позволяет объяснить, в частности, двукратное, расхождение расчетной и экспериментальной скоростей дрейфа частиц пыли в электрофильтре [1].

Величина перемещения координаты максимума накопления веса пыли по длине электрофильтра (точка А на рис. 8.2) оказывает существенное влияние на режим эксплуатации электрофильтров. Абсцисса этой точки обусловлена величиной запыленности, скоростью газов, размером частиц, УЭС пыли, параметрами питания электрофильтра током высокого напряжения.

Известны случаи, когда количество пыли на втором поле оказывалось меньше, чем на первом. Это, естественно, требует изменения режимов встряхивания электродов с учетом формулы (8.16). На практике в этом случае соотношение интервалов встряхивания можно определить по соотношению количества уловленной пыли в бункерах электрофильтра.

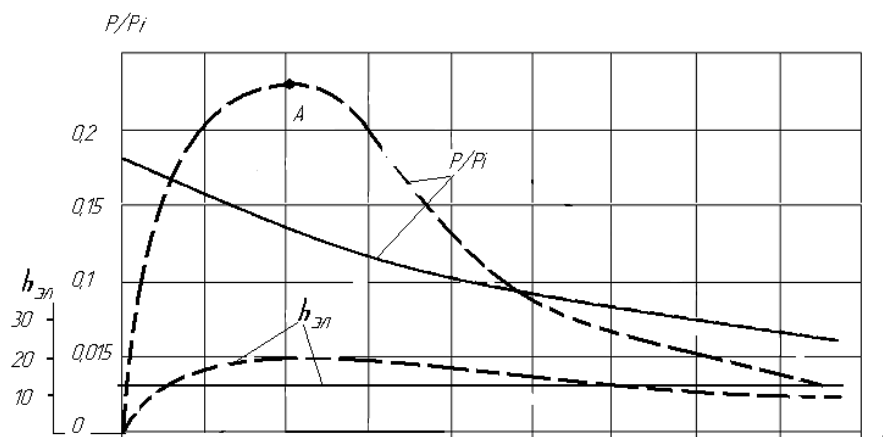


Рис. 8.2. Сравнение распределения пыли по длине электрофильтра (1).
 P, P – масса уловленной пыли соответственно на элементе и общая на электроде;
 $\eta_{эл}$ – степень очистки газа на элементе электрода; — расчет; ---эксперимент

Дисперсный состав пыли

Отбор представительной пробы для определения дисперсного состава пыли является достаточно сложной операцией [3]. Для получения пробы из активной зоны электрофильтра автором было разработано специальное пробоотборное устройство (рис. 8.3), представляющее собой шлюзовую камеру. Устройство позволяет вводить зонд (плоский съемный диск) в вырез на осадительном электроде заподлицо с его поверхностью и осаждать на нем пыль непосредственно в электрическом поле электрофильтра.

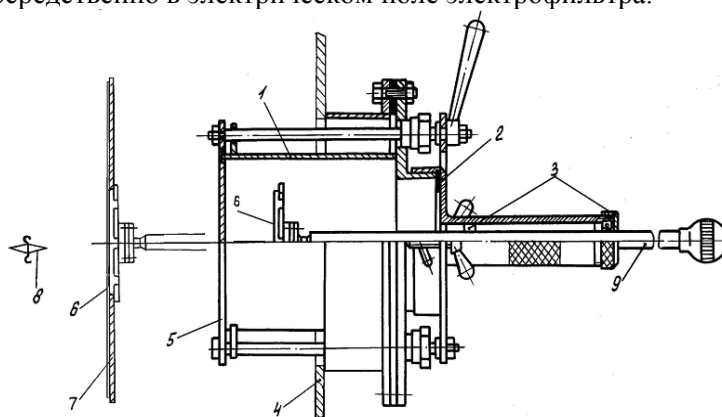


Рис. 8.3. Пробоотборное устройство.

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – подшипники; 4 – корпус электрофильтра; 5 – заслонка; 6 – съемный диск;
 7 – осадительный электрод электрофильтра; 8 – коронирующий электрод электрофильтра; 9 – подвижный шток

Пыль, уловленная на съемном диске, подвергалась анализу методом жидкостной седиментации. Изменение дисперсного состава по длине опытного электрофильтра Черепетской ГРЭС при улавливании золы от сжигания смеси экибастузского и кузнецкого углей может быть аппроксимировано следующей зависимостью:

$$\bar{d}_{50} = 0,82 \exp(-1,24\bar{L}), \quad (8.18)$$

где d_{50} – относительная величина медианного диаметра частиц;
 L – относительная длина активной зоны электрофильтра (общая длина активной зоны в опытном электро-
 фильтре составляла 4 м).

Анализ дисперсного состава пыли, улавливаемой в промышленных электрофильтрах, при отборе проб методом фильтрации на входе и выходе и из бункеров с применением квартования также показывает экспоненциальное распределение размеров улавливаемых частиц по длине активной зоны.

Так, например, при улавливании в электрофильтрах экибастузского и львовско-волынского углей изменение дисперсного состава по длине активной зоны может быть аппроксимировано соответственно следующими зависимостями:

$$\bar{d}_{50} = 1,07 \exp(-1,45\bar{L}); \quad (8.19)$$

$$\bar{d}_{50} = 1,1 \exp(-1,42\bar{L}) \quad (8.20)$$

Получение подобных зависимостей подтверждает закономерное экспоненциальное распределение размера частиц по длине активной зоны промышленных электрофильтров, что должно учитываться при их расчетах и проектировании.

Удельное электрическое сопротивление слоя пыли на осадительных и коронирующих электродах электрофильтра

Величина УЭС слоя пыли определяется объемным и поверхностным сопротивлением пылевых частиц и величиной сопротивления контактов между ними.

Изменение УЭС по длине электрофильтра обусловлено избирательным улавливанием частиц, имеющих различную диэлектрическую проницаемость, размер, форму и другие параметры.

Увеличение УЭС более 10^9 Ом · м. может приводить к уменьшению скорости дрейфа в 2–2,5 раза и соответствующему увеличению выбросов пыли из поля электрофильтра [11,21]. Причина этого – образование обратной короны в слое пыли на осадительном электроде.

Лабораторные исследования образцов пыли, отобранной на входе из бункеров и на выходе электрофильтра, показывают, что в ряде случаев УЭС пыли на последнем поле может на 2–3 порядка превышать его величину на первом поле. Очевидно, что при этом необходимо осуществлять соответствующий подбор характеристик коронирующих электродов по полям, учитывать изменение пылеемкости осадительных и коронирующих электродов, изменять способ регулирования питающего напряжения для каждого поля [21].

Объем очищаемых газов

Большинство электрофильтров включаются в схему обеспыливания перед дымососом, и таким образом, находятся под разрежением.

В конструкции электрофильтров предусматриваются организованные присосы воздуха для обдува изоляторов, а полная герметизация корпусов, бункеров, изоляторных коробок и др. практически затруднена, допускаются нормированные (3–5 %) присосы атмосферного воздуха.

Однако в практике эксплуатации нередко присосы (организованные и неорганизованные) превышают нормативную величину. При этом происходит изменение объемов и скорости газов. В случае наличия организованных присосов или невозможности устранения этих присосов: они должны быть учтены. Для этого может быть использована следующая формула:

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1)^{v_1/v_2}, \quad (8.21)$$

где η_1 и v_1 – соответственно степень очистки и скорость газов в поле электрофильтра при отсутствии присосов.

Применение формулы (8.21) позволяет при известных величинах η_1 и V_1 , задаваясь требуемой степенью очистки газов, получать значение скорости газов в активном сечении электрофильтра V_2 и далее определять величину измененной степени очистки газов η_2 . Учет этих изменений позволяет уточнить режим регенерации электродов по полям и снизить величину уноса отряхиваемой пыли.

При работе электрофильтра под давлением необходимо полностью исключать перетоки очищаемого газа через изоляторные коробки путем их герметизации и (или) наддува воздуха (газа); особое внимание следует уделять чистоте поверхности изоляторов, осуществляя контроль изоляции, например, измерением их вольтамперных характеристик (при напряжении, меньшем напряжения зажигания короны).

Когезионные свойства пыли

В процессе эксплуатации сухих пылевых электрофильтров на поверхности осадительных электродов всегда имеется тонкий неотряхиваемый слой пыли. Поэтому при отряхивании происходит разрыв когезионных

связей в слое. Уменьшение размера частиц и увеличение УЭС по длине электрофильтра приводит к усилению когезионных связей. Расчет этих сил достаточно сложен. Однако, учитывая, что пылеемкость электродов имеет функциональную связь с УЭС пыли [5,6], можно ориентировочно определить требуемую величину отряхивающих ускорений (a_g) следующим образом:

$$a_g = 20 \lg \rho_v ,$$

где ρ_v – УЭС пыли, Ом·м.

Отсюда следует, например, что при УЭС слоя пыли на первом поле $\rho_v = 10^7$, а на последнем $\rho_v = 10^9$ Ом·м., отряхивающие ускорения составят соответственно 140 и 180 м/с²

Следовательно, величина отряхивающего импульса на первых полях электрофильтров, работающих в аналогичном режиме, может быть уменьшена, что позволит снизить износ узлов встряхивания первых полей и уменьшить дезагрегирование пыли и унос ее при встряхивании.

Требования к выбросам пыли из современных электрофильтров составляют 100, 50 и менее мг/м³. Выполнение этих требований только путем увеличения габаритов электрофильтров является слишком дорогим направлением. Например, увеличение количества полей с 4-х до 5 на Рефтинской ГРЭС при улавливании золы экибастузского угля позволило снизить выбросы пыли лишь в два раза.

Для дальнейшего повышения эффективности электрофильтров и снижения их стоимости необходимо на стадиях проектирования газоочистки и конструирования учитывать изменение свойств пылегазовой среды по длине активной зоны электрофильтров и соответствующим образом изменять конструкцию электродной системы, режимы и способы питания полей, периодичность и интенсивность регенерации электродов [7,8,9].

8.3.1. Учет влияния неорганизованных присосов атмосферного воздуха пыли

Учет влияния присосов атмосферного воздуха можно производить также используя формулу (8.21), при этом для определения степени очистки газов необходимо экспериментально определить величину присосов. Сложность здесь заключается в том, что необходимо учесть места присосов и их количество. Может возникнуть необходимость расчета степени очистки для каждого отдельного поля электрофильтра. При этом общая степень очистки для всего электрофильтра определяется как для последовательно соединенных аппаратов.

8.3.2. Оптимизация температуры газов в электрофильтрах

При изменении температуры газов, очищаемых в электрофильтре, происходит изменение целого ряда параметров, влияющих на степень очистки газов.

К этим параметрам можно отнести: УЭС золы, скорость и вязкость газов, отряхиваемость пыли с электродов, величину вторичного уноса при встряхивании, электрический режим питания, уровень центровки электродов и др. В различных условиях возрастание какого-либо параметра может приводить как к увеличению, так и снижению эффективности электрофильтра.

В качестве примера рассмотрим влияние температур на УЭС пыли. Известно, что зависимость УЭС пыли от температуры в общем случае имеет максимум в диапазоне температур примерно 150–160°С. При температурах ниже 100°С степень очистки газов в электрофильтре, может быть выражена следующей имперической зависимостью:

$$\eta_2 = \eta_1 (t_1 / t_2)^{0,1} , \quad (8.22)$$

где η_1 и t_1 – существующие параметры;

η_2 и t_2 – измененные параметры.

В каждом конкретном случае температурные условия, при которых вероятно возникновение обратной коррозии, различные, поэтому построение рабочих характеристик возможно лишь после получения конкретных экспериментальных данных в промышленных условиях.

8.3.3. Влияние содержания дисперсной фазы на степень очистки газов

Можно провести аналогию между трехэлектродной лампой (состоящей из анода, катода и управляющей сетки) и активной зоны электрофильтра, где коронирующий электрод аналог катода, осадительный – аноду, а заряженная пыль – сетке. Известно, что при подаче отрицательного потенциала определенной величины на сетку трехэлектродной лампы, в ней прекращается электрический ток. Подобное явление может возникнуть и в электрофильтре. При нормальной работе электрофильтра снижение тока составляет 1–2 %, что не оказывает существенного влияния на его работу.

При поступлении в электрофильтр газов, содержащих большое количество мелких частиц, степень очистки резко снижается. По мере продвижения запыленного потока вдоль электрофильтра концентрация пыли падает. Начиная с какого-то участка по длине активной зоны, нормальное пылеулавливание в электрофильтре восстанавливается.

В последнее время в «Кондор-Эко» предложена методика [11] расчета степени очистки газов на участке запыления коронного разряда, заключающаяся в том, что длина электрофильтра разбивается на элементы небольшой длины, в пределах которых степень недозарядки принимается постоянной. Значение концентрации частиц в начале каждого участка рассчитывается по начальной концентрации и величине убыли концентрации на предшествующих участках. Степень очистки газов и, соответственно, уменьшение концентрации частиц на рассматриваемом участке рассчитывается по формуле Дейча-Попкова с учетом недозарядки частиц. Разработанная на этой основе инженерная методика расчета позволяет получать необходимые данные для расчета электрофильтров.

Для снижения влияния запирающего действия дисперсной фазы применяют предварительную очистку газов, повышение рабочего напряжения зажигания короны, увеличение количества полей по длине электрофильтра, снижение скорости газов в активной зоне и др.

8.3.4. Кондиционирование газов

Увлажнение газов позволяет в значительной мере изменить УЭС уловленной в электрофильтре высокоомной пыли.

Наиболее характерные энергетические угли, продукты сгорания которых приводят к образованию обратной короны, экибастузский, кузнецкий и куучинский. Эти угли имеют содержание серы в золе 1,4 % на горячую массу и ниже. Кислотная точка росы дымовых газов этих углей составляет 45–60°С, а точка росы водяных паров 40–50°С.

В цементной промышленности обратная корона возникает в электрофильтрах, работающих в сухом способе производства цемента при установке их за клинкерообжигательными печами и за цементными мельницами.

Наиболее просто увлажнять дымовые газы паром или впрыскивать воду в топку [24], но эти способы снижают КПД энергетических котлов.

Кондиционирование газов водой позволяет повысить влажность газов и снизить их температуру, что дает весьма высокий эффект в повышении степени очистки газов.

В 1979 году на электрофильтре ЭГЗ-4-265 блока № 8 Троицкой ГРЭС была смонтирована установка кондиционирования дымовых газов водой. Диспергирование воды воздухом осуществлялось с помощью набора орошающих устройств, состоящих из бездиффузорной трубы Вентури с горловиной прямоугольного сечения. Вода в виде пленки подается через сопла в горловину, где распыляется воздухом со скоростью 90 м/с. Кондиционирование дымовых газов водой позволяет снизить УЭС золы на 2-3 порядка, при этом происходит повышение степени очистки газов, а вольтамперные характеристики свидетельствуют об отсутствии обратной короны.

Сравнительная эффективность действия различных кондиционирующих добавок может быть проиллюстрирована с помощью рис. 8.4 [24], где по оси Y отложена относительная величина скоростей дрейфа частиц в электрофильтрах, а по оси X содержание кондиционирующих реагентов.



Рис. 8.4. Эффективность действия различных кондиционирующих добавок

Кондиционирование электропроводящими частицами

Физическая (электрическая) сущность эффекта кондиционирования электропроводящими частицами, по видимому, близка к сущности химического кондиционирования. В том и другом случае образуются проводники, отводящие электрический заряд слоя пыли на осадительный электрод.

В случае применения электропроводящих частиц можно предположить, что заряд стекает по низкоомному резистору R1 (например, частицам сажи) шунтирующему высокоомный резистор R2 (например, частицы золы). В этом случае суммарная проводимость слоя γ_c может быть рассчитана по формуле:

$$\gamma_c = \gamma_1 + \gamma_2; \gamma_1 = 1/R_1; \gamma_2 = 1/R_2,$$

а суммарное сопротивление составит: $R_c = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$.

Однако фактически измеренное сопротивление может существенно отличаться от расчетного, что, вероятно, связано в первую очередь с электропроводностью в месте контакта частиц, а также свойствами газовой среды.

На тепловых электростанциях при сжигании угля явление кондиционирования твердыми частицами нередко встречается в практике газоочистки. При одновременном сжигании твердого и жидкого топлива (подсветка мазутом), при неполном сгорании последнего образуется сажа, способная снижать сопротивление слоя пыли на осадительных электродах электрофильтров. Повышение эффективности электрофильтров проявлялось, когда количество сажи по отношению к золе не превышало 10 %.

При дальнейшем увеличении количества сажи образуется трудно отряхиваемый слой, что нарушает нормальную работу электрофильтров.

При неполном сгорании твердого топлива образуются частицы углерода в виде кокса (недожог), способствующие снижению УЭС слоя. При наличии в золе после электрофильтра 10-20 % недожога, УЭС золы будет существенно снижено.

Сами частицы недожога улавливаются в электрофильтрах плохо – из-за их уноса, обусловленного быстрой перезарядкой по причине малой величины УЭС.

8.4. Конструктивные и проектные методы снижения выбросов пыли

Изменение конструктивных и проектных решений электрогазоочистки не только достаточно дорогое мероприятие, но оно требует, как правило, останова электрофильтра. Поэтому перед выполнением указанных изменений необходимо выполнить расчеты ожидаемого снижения выбросов пыли с применением метода рабочих характеристик и определить стоимость выполняемых работ.

Наиболее часто ремонту и реконструкции подлежат узлы встряхивания. Нередко требуется реконструкция систем пылеудаления и газораспределения.

Наиболее сложной и дорогостоящей является реконструкция активной зоны электрофильтра. При этом кроме замены электродной системы может быть выполнена реконструкция корпуса аппарата.

Рассмотреть эффективность всех конструктивных мероприятий, тем более их комбинаций, невозможно. Поэтому ниже будут рассмотрены лишь некоторые характерные примеры реконструкции электрофильтров:

- увеличение производительности системы пылеудаления;
- замена элементов коронирующих электродов;
- замена активной зоны с увеличением площади осаждения;
- выбор количества полей при неизменной общей длине активной зоны электрофильтра.

8.4.1. Оптимизация работы пылеудаления

В практике эксплуатации электрофильтров нередко периодическое встряхивание осадительных электродов не может быть реализовано по причине недостаточной пиковой производительности системы пылеудаления. Первоначально необходимо определить производительность системы пылеудаления с применением повторно-кратковременного встряхивания осадительных электродов. Для этого необходимо и достаточно разделить время паузы и работы механизмов встряхивания на более короткие периоды. Например, если расчетный интервал встряхивания составляет 60 минут, а период работы 3 минуты, то разделив эти величины, например, на 6, получим интервал – 10 минут, а период работы – 30 секунд. При этом существенно снизится пиковая нагрузка системы пылеудаления. Если возможность такого пути будет исчерпана, тогда целесообразность проведения реконструкции системы пылеудаления может быть определена после выполнения расчетов ожидаемого повышения эффективности и оценки затрат на ее реконструкцию. При этом следует иметь в виду, что оптимизация режима регенерации увеличит срок службы узлов встряхивания осадительных электродов в 3–10 раз по сравнению с непрерывным режимом встряхивания.

8.4.2. Замена элементов коронирующих электродов

Широкий диапазон требований к элементам коронирующих электродов и их противоречивость создают предпосылки для многообразия их типов. Универсального коронирующего электрода нет. В связи с этим целесообразно подбирать коронирующие элементы применительно к конкретным условиям работы электрофильтра, а также его полей.

Нередко практический интерес представляет установка коронирующих элементов с пониженным напряжением зажигания. Для экономической оценки целесообразности проведения этой дорогостоящей реконструкции необходимо:

- определить существующее в электрофилт্রে (по полям) напряжение зажигания короны;
- определить величину увеличения степени очистки газов;
- выполнить расчеты, показывающие экономическую целесообразность (нецелесообразность) данной реконструкции;

- при положительном решении выбрать (заказать) коронирующие электроды или элементы с пониженным напряжением зажигания;

Так, например, при замене коронирующих элементов на электрофилтрах СГ-15 Ново-Ярославского НПЗ было установлено, что снижение напряжения зажигания короны с 30 кВ до 15 кВ позволяет увеличить степень очистки газов с 96,5 % до 99 %. Эта реконструкция при высокой стоимости улавливаемого электрофилтра катализатора позволила окупить затраты на реконструкцию менее чем через год эксплуатации электрофилтров.

Для электрофилтров, улавливающих золу тепловых электростанций, влияние изменения напряжения зажигания короны на степень очистки газов может быть ориентировочно определено по следующей формуле:

$$\eta = 1 - K_1 \exp\left(\frac{U(U - U_0)Ld_{50}}{K_2}\right) \quad (8.23)$$

где $K_1 = 0,25$;

U – рабочее напряжение, кВ;

U_0 – напряжение зажигания короны, кВ;

L – длина активной зоны, м;

d_{50} – медианный размер улавливаемых частиц;

$K_2 = 6 \cdot 10^4 \div 10^6$ – в зависимости от УЭС золы.

8.4.3. Замена активной зоны с увеличением площади осаждения

При выполнении этой дорогостоящей реконструкции проектные работы должны выполняться специализированным предприятием.. Как правило, этим работам должны предшествовать расчеты, выполняемые на ЭВМ на базе методики МЭИ – СФ НИИОГАЗ.

Ориентировочные прикидочные расчеты могут быть выполнены техническими службами предприятия, эксплуатирующего электрофилтры, на основании приложения 2.

8.4.4. Выбор количества полей при неизменной общей длине электрофилтра (при реконструкции)

Увеличение количества полей при неизменной суммарной длине активной зоны электрофилтра создает следующие предпосылки для увеличения степени очистки газов:

- повышение пробивных напряжений;
- увеличение удельного тока короны;
- снижение вторичного уноса пыли при встряхивании и осаждении пыли;
- улучшение условий пылеудаления;
- улучшение центровки электродной системы и др.

С другой стороны, увеличение количества полей приводит к увеличению количества агрегатов питания, механизмов встряхивания, количества электродов, наковален, бойков и т.д.

Математический анализ с использованием зависимостей раздела 3.1. показывает, что только за счет снижения уноса при встряхивании выбросы пыли в четырехпольном электрофилтре примерно вдвое ниже таковых в двухпольном аппарате при неизменной общей длине активной зоны электрофилтра. Напомним, что установка в четырехпольном электрофилтре дополнительного пятого поля при улавливании высокоомной пыли позволяет снизить выбросы пыли лишь в два раза.

Рассмотрение основных влияющих параметров в комплексе представляет безусловный интерес, но выполнение этих, достаточно трудоемких расчетов, имеет смысл лишь при выполнении проекта реконструкции для конкретных условий.

8.4.5. Снижение суммарных выбросов из параллельно работающих электрофилтров, имеющих различную степень очистки газов

Известно [15], что в проектах установки электрофилтров предусматривают специальные устройства, обеспечивающие равномерную раздачу газов между параллельно работающими электрофилтрами. При

этом неизменным условием является факт одинаковой эффективности электрофильтров, что, безусловно, справедливо при установке новых аппаратов, имеющих одинаковые параметры.

Однако в процессе эксплуатации по ряду причин степень очистки газов параллельно работающими электрофильтрами оказывается различной.

В этом случае суммарные выбросы из параллельно работающих аппаратов могут быть снижены на значительную величину путем увеличения газовой нагрузки на более эффективный аппарат(ы) и соответствующего снижения нагрузки на менее эффективный аппарат(ы).

Для этого требуется обеспечение минимума функции:

$$B = Z_1 Q_1 \exp(-\omega_1 S_1 / Q_1) + Z_2 Q_2 \exp(-\omega_2 S_2 / Q_2) + \dots + Z_n Q_n \exp(\omega_n S_n / Q_n) , \quad (8.24)$$

где B – суммарные выбросы пыли из параллельно работающих электрофильтров;

Z – запыленность газов на входе в аппараты;

$\omega_1 \dots \omega_n$ – скорость дрейфа в электрофильтрах $1 \dots n$;

$Q_1 \dots Q_n$ – количество газов, поступающих на электрофильтры $1 \dots n$.

Сложность использования приведенной формулы заключается в том, что величина скорости дрейфа является нелинейной функцией скорости газов и ряда других параметров. При этом вид этой функции и расположение ее максимума зависят от ряда режимных, технологических, конструктивных и проектных параметров работы электрофильтра. Определение этой зависимости возможно на основании имеющегося банка экспериментальных данных или с помощью проведения специальных исследований на промышленных (оптимизируемых) электрофильтрах.

Указанная оптимизация двух параллельно работающих электрофильтров ЭГТ1-14-7,5-7-3 была выполнена на установке каталитического крекинга АООТ «Славнефть-Ярнефтеоргсинтез», при этом определение снижения суммарных выбросов сначала было выполнено по формуле (8.24), а затем проверено экспериментально с помощью пылегазовых измерений.

При одинаковой скорости газов в активной зоне электрофильтров 0,615 м/с выбросы катализатора составляют 0,0199 г/с из электрофильтра №1 (после ремонта) и 0,449 г/с из электрофильтра №2.

При увеличении газовой нагрузки на электрофильтр №1 и одновременном снижении ее на электрофильтре №2 суммарные выбросы из электрофильтра снижаются.

При соотношении скоростей 1:1,08 выбросы снижаются на 4,4 % по сравнению с выбросами при одинаковой газовой нагрузке в электрофильтре.

Минимальные выбросы имеют место при скоростях газов в электрофильтре 0,7 и 0,53 м/с, что позволяет снизить их на 12,5 % по сравнению с выбросами, имеющими место при одинаковой газовой нагрузке электрофильтров.

Таблица 8.6.

Выбросы пыли из электрофильтров при изменении соотношения скоростей газа в активных зонах (установка 1А – 1М цеха №3)

фильтре, м/с		Соотношения скоростей			Выбросы пыли	
					г/с	%
ЭФ1	ЭФ2		ЭФ1	ЭФ2	ЭФ1+2	ЭФ2+1
0,615	0,615	1:1	0,0199	0,0499	0,0648	100
0,64	0,59	1:1,08	0,0221	0,0399	0,0620	95,6
0,7	0,53	1:1,32	0,0320	0,0247	0,0567	87,5

Указанная оптимизация может быть выполнена непосредственно путем проведения пылегазовых измерений при ступенчатом изменении скоростей газов в электрофильтрах.

Наиболее целесообразным является аналитическое нахождение скоростей газов, при которых имеют место минимальные выбросы пыли. Для этого при наличии банка данных выполняются расчеты на ЭВМ.

При этом учитывается нелинейность зависимости скорости дрейфа от скорости газов в активной зоне электрофильтра и изменении ряда других параметров.

После выполнения расчетов могут быть проведены контрольные эксперименты с выполнением пылегазовых измерений на 2-3-х режимах.

Таким образом, выбросы пыли из параллельно работающих электрофильтров, имеющих различную степень очистки газов, могут быть уменьшены путем перераспределения их газовых нагрузок.

8.4.6. Коагулирующе-зарядные устройства

Электрическая коагуляция частиц является, безусловно, перспективным направлением повышения эффективности пылеулавливания в электрофильтрах. В соответствии с законом Кулона частицы, имеющие

противоположные заряды, коагулируют быстрее, чем частицы, не имеющие заряда. Нейтральные частицы коагулируют быстрее, чем униполярно заряженные частицы.

Кроме электрических сил на коагуляцию влияют гравитационные и гидродинамические силы, а также броуновское движение частиц [13].

При коагуляции жидких частиц вновь образующиеся частицы приобретают сферическую форму. В случае коагуляции твердых частиц образуются агрегаты, которые можно рассматривать как вытянутые эллипсоиды вращения. При сближении частиц с таким эллипсоидом, кроме кулоновской силы действуют силы, обусловленные полями поляризации.

Эти силы имеют наибольшее значение у вершин эллипсоида, в результате образуются еще более удлиненные частицы. Образование таких «цепочек» неоднократно наблюдалось на практике [1].

В институте Гинцветмет проведены эксперименты по коагуляции биполярно заряженных частиц, в результате которых, в частности, получено увеличение медианного размера частиц в 2,65–5 раз.

В экспериментах, выполненных в ОАО «СФ НИИОГАЗ», на двухпольном лабораторном электрофилт্রে в 1999 г., получено существенное увеличение количества уловленной на электродах пыли при установке перед электрофилт্রেом коронирующих электродов, создающих положительную корону.

Эффект коагуляции частиц в электрофилтрах проявляется наиболее часто при улавливании частиц с малым (до 10 Ом·м) и большим (более 2·10 Ом·м) удельным электрическим сопротивлением частиц.

Известны примеры практической реализации коагулирующих устройств при улавливании частиц в электрофилтрах.

По одному варианту подлежащие очистке газы рекомендуется предварительно пропустить через два параллельно установленных короткопольных электрофилтра, один из которых работает на отрицательной короне, а другой – на положительной.

По другому варианту для коагуляции взвешенных частиц предлагается применить один короткопольный электрофилтр, питаемый переменным током высокого напряжения низкой частоты, например, 20 – 30 Гц [13].

Особенность коагуляции высокоомных частиц в электрическом поле состоит в следующем: частица, образовавшаяся в результате коагуляции двух первичных частиц, располагается таким образом, что ее продольная ось параллельна направлению поля и ее дипольный момент приобретает более высокое значение, способствуя увеличению скорости коагуляции [8].

В настоящее время установки коагуляции пыли для промышленных электрофилтров отсутствуют.

Глава 9

КОНТРОЛЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОФИЛТРОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для обеспечения требуемых норм выбросов пыли при эксплуатации электрофилтров необходимо осуществлять контроль за изменением технологических и режимных условий их работы. Для определения влияния любого параметра необходимо измерение степени очистки газов. Основным методом измерения степени очистки газов заключается в определении массового количества пыли в двух из трех составляющих:

- на входе газа в электрофилтр;
- на выходе газа из электрофилтра;
- на входе уловленной пыли из электрофилтра.

При этом степень очистки газов рассчитывается в соответствии с формулами 1.1-1.4.

ГОСТ [9.1] предусматривает определение степени очистки газов путем отбора проб пыли на входе и выходе электрофилтра и последующего их взвешивания. В связи со значительной трудоемкостью этого метода для измерения концентрации пыли и определения эффективности электрофилтра в производственных условиях используются целый ряд косвенных методов. При использовании этих методов требуется предварительная тарировка пылемеров с использованием метода по ГОСТ.

Косвенные методы используются, как правило, для оперативного контроля эффективности электрофилтров при их эксплуатации. В качестве дополнительных методов оперативного контроля можно также использовать методы и устройства, приведенные в главе 5.

9.1. Питание электрофилтров от высоковольтных источников

Режим питания электрофилтров в простейшем случае можно проконтролировать путем определения количества искрений в единицу времени. Зависимость степени очистки газов от количества искрений при отсутствии обратной короны имеет вид, приведенный на рис. 9.1 [2].

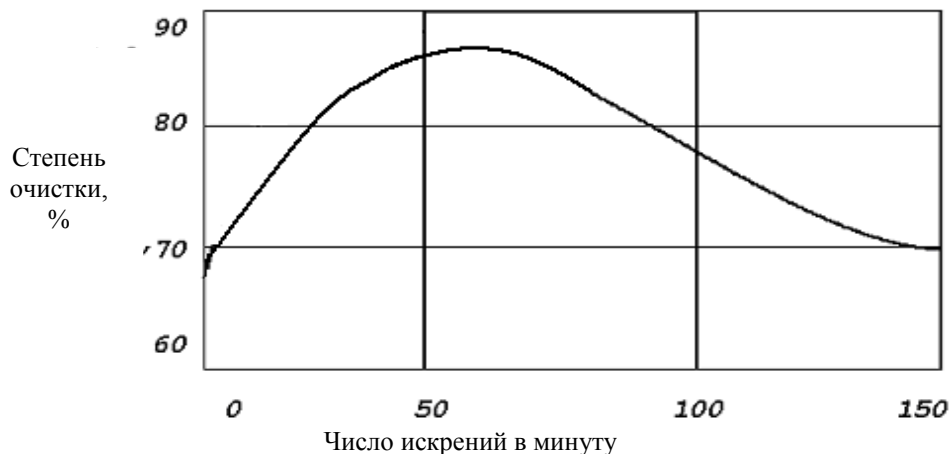


Рис. 9.1. Типичная зависимость степени очистки газов от числа искровых разрядов в электрофильтре 1/мин

Считается, что оптимальная величина напряжения на электродах электрофильтра определяется числом искровых разрядов в 1 мин. в межэлектродном пространстве, а степень очистки газов электрофильтром является функцией этой частоты.

Для большинства электрофильтров зависимость степени очистки газов от числа искровых разрядов в минуту в электрофильтре выражается кривой, изображенной на рис. 9.1. Явно выраженный максимум степени очистки дымовых газов соответствует 40–70 искровым разрядам в 1 мин. Максимуму степени очистки газов соответствует и максимально возможная величина подаваемого на электрофильтр напряжения.

При испытании электрофильтров, улавливающих золу ТЭС, было установлено, что при снижении напряжения на электрофильтрах до уровня, при котором искрение прекращается, степень очистки газов существенно снижается (рис. 9.1)

При увеличении числа искрений до 170 в 1 мин. также происходит резкое падение степени очистки газов.

Для электрофильтров, работающих в различных отраслях промышленности, оптимальное количество искрений находится в диапазоне 50–125 в 1 мин.

9.2. Вольтамперные характеристики электрофильтров

На рис. 9.2а приведена типичная вольтамперная характеристика (ВАХ) электрофильтра.

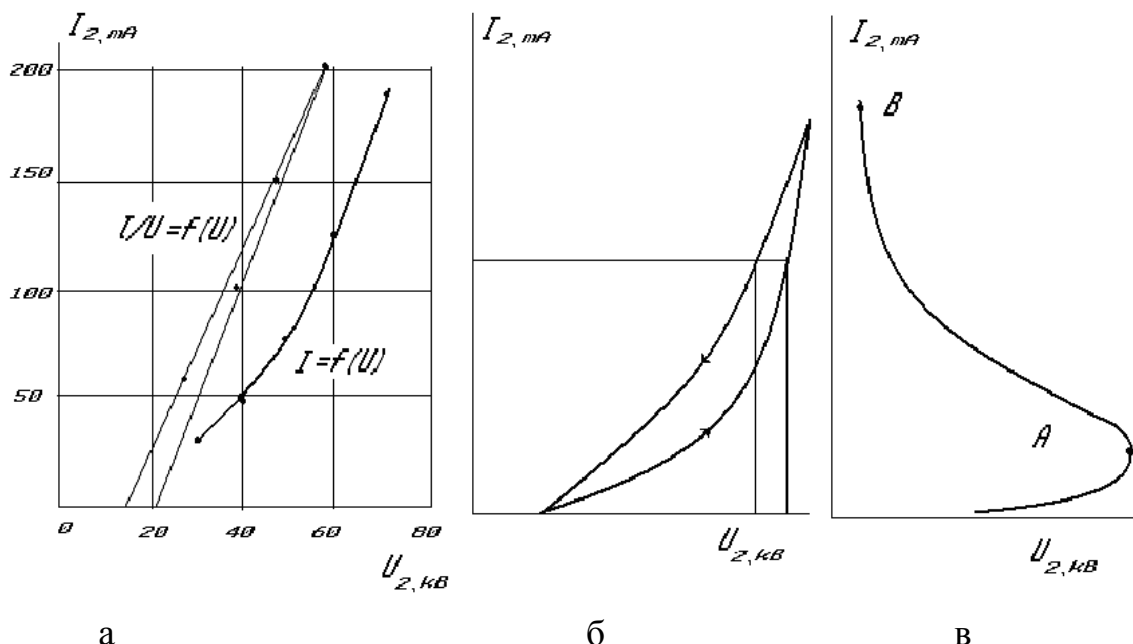


Рис. 9.2. Вольтамперные характеристики электрофильтров (ВАХ).
 а – типичная В.А.Х. электрофильтра и ее редуцированная характеристика;
 б – восходящая и нисходящая ветви В.А.Х. при обратной короне;
 в – ВАХ электрофильтра Сланцевского цементного завода.

Важным элементом ВАХ электрофильтра является величина напряжения зажигания коронного разряда (U_0), определяемая графически [2]. Известно, что графическое определение параметров является наглядным,

однако при этом снижается точность. Графическое определение U_0 , по данным таблицы 9.1, выполненное в крупном масштабе, показывает, что U_0 находится примерно в диапазоне 15–21 кВ.

Таблица 9.1

Типичная зависимость тока от напряжения в электрофилт্রে

$U_2, \text{кВ}$	10,0	20	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0
$I_2, \text{мА}$	-	-	20	40	75	125	210	250
I_2/U_2	-	-	0,67	1,0	1,5	2,08	3,00	3,14

Для уточненного определения U_0 целесообразно использовать аналитическое решение. В общем виде редуцированная характеристика выражается уравнением вида $Y = kX + B$. Уравнение редуцированной В.А.Х. таблицы 9.1, полученное с использованием регрессионного анализа, имеет вид:

$$I_2/U_2 = -1,076 + 0,054 U_0$$

Приравняем это уравнение к нулю. Пересечение редуцированной характеристики с осью «х» дает значение U_0 , равное $1,076/0,054 = 19,9$ кВ. Очевидно, что эта величина будет ближе к истинной.

Уточненное значение U_0 необходимо знать, в частности, для определения величины, на которую произойдет снижение выбросов пыли из электрофилт্রে при замене коронирующих элементов на другие – с пониженным напряжением зажигания.

Оценочное влияние U_0 на степень очистки газов можно проиллюстрировать, например, с помощью следующей формулы:

$$\eta = 1 - \exp \{-k U (U - U_0)\}, \quad (9.1)$$

где k – коэффициент, определяемый по степени очистки газов реконструируемого электрофилт্রে;

U – среднее рабочее напряжение по полям электрофилт্রে.

Этот прикидочный расчет эффективности замены коронирующих элементов может быть выполнен непосредственно персоналом, обслуживающим электрофилт্রে.

Допустим, что степень очистки газов электрофилт্রে, который планируется реконструировать, составляет 98 %. Рабочее напряжение в среднем по полям составляет 50 кВ, напряжение зажигания короны, определенное вышеуказанным способом, составляет 25 кВ.

Тогда, в соответствии с формулой 9.1, имеем:

$$\eta_1 = 0,98 = 1 - \exp \{-k \cdot 50 (50 - 25)\}, \text{ откуда } k = 0,00313$$

Пусть при установке коронирующих элементов типа СФ-1 напряжение зажигания составит 15 кВ. (При междуэлектродном промежутке равном 350 мм.)

Тогда степень очистки газов в реконструированном электрофилт্রে путем замены коронирующих элементов составит:

$$\eta_2 = 1 - \exp \{-0,00313 \cdot 49 (49 - 15)\} = 0,9944$$

Относительное снижение выбросов составит:

$$B_1/B_2 = (1 - 0,98)/(1 - 0,9944) = 3,57$$

Уточненный расчет выполняется по специальным программам на ЭВМ. Для его выполнения требуется целый ряд дополнительных данных по свойствам пыли (удельное электрическое сопротивление, дисперсный состав, влажность и др.), по свойствам газа (хим. состав, температура и др.) и по изменившемуся электрическому режиму питания электрофилт্রে.

На рис. 9.2. б показаны восходящая и нисходящая ветви вольтамперной характеристики, снятой в электрофилт্রে, улавливающем высокоомную (10^{10} – 10^{12} Ом · м) пыль. При достаточно быстром снятии показаний приборов заряд слоя, полученный на восходящем участке, не успевает стечь, и в результате на нисходящей ветви при той же величине тока требуется более высокое напряжение высоковольтного источника. Такой ход ветвей вольтамперной характеристики является признаком наличия обратной короны. На рис. 9.3в приведена ВАХ, снятая на втором поле электрофилт্রে Сланцевского цементного завода, установленного за вращающейся печью, работающей по сухому способу производства. Режим работы выше точки «В» неустойчив – высоковольтный агрегат самопроизвольно переходит в режим работы в точке «А», где происходят непрерывные искровые пробои. Падающий участок ВАХ характеризуется тем, что на нем положительному приращению тока нелинейного сопротивления соответствует отрицательное приращение напряжения на нелинейном сопротивлении.

При работе электрофильтра в режимах, характеризуемых точкой «В», в автоматическом режиме агрегата питания, степень очистки газа составляла 91,9 %, а при переводе агрегата питания в ручной режим в точку «А» вольтамперной характеристики степень очистки газов составила 95,6 %.

9.3. Влияние слоя пыли на электродах на вольтамперные характеристики электрофильтров

Сравнивая вольтамперные характеристики электрических полей электрофильтра, снятые на чистых и запыленных электродах, можно получить информацию о слоях пыли на электродах.

Слои пыли на электродах являются дополнительными резисторами. Они оказываются последовательно соединенными с сопротивлением межэлектродного промежутка. Допустим, что слои пыли, осаждающиеся на осадительных электродах и коронирующих участках коронирующих элементов, являются линейными резисторами. Тогда вольтамперные характеристики, построенные с учетом трех перечисленных резисторов будут иметь вид, приведенный на рис. 9.3.

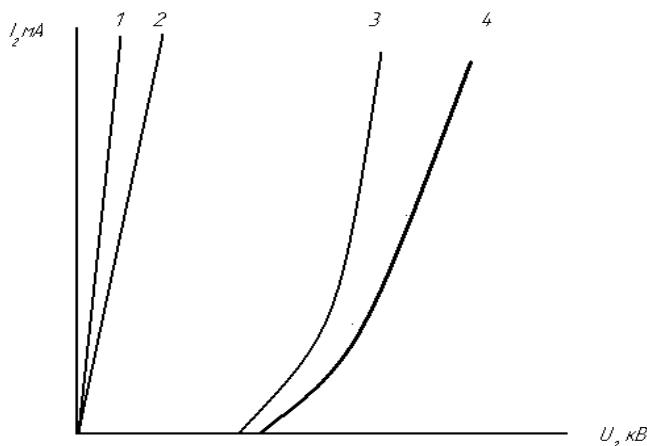


Рис. 9.3. Вольтамперные характеристики электрофильтра с учетом слоя осаждающейся невысокой пыли на электродах.

1 – ВАХ слоя пыли на осадительных электродах; 2 – ВАХ слоя пыли на коронирующих электродах;
3 – ВАХ межэлектродного промежутка; 4 – суммарная ВАХ

Из рис. 9.3, следует, что слои пыли на электродах смещают ВАХ вправо.

При невысоком значении УЭС слоя пыли, осаждающейся на концах коронирующих игл, увеличивается радиус кривизны коронирующего участка (провода, конца иглы). Это приводит к увеличению напряжения зажигания короны и снижению тока в поле. Так, например, на электрофильтре ПГДС цементного завода «Пролетарий», работающего по мокрому способу производства цемента на морской воде ($\rho_v = 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), снижение тока короны при отключении встряхивания коронирующих электродов происходило за 15 мин. на 50 %.

При улавливании высокоомной золы экибастузского угля фиксируемое щитовым прибором снижение величины тока короны на последнем поле электрофильтра УГ происходило более чем через два часа. Это можно объяснить электрическим пробоем слоя пыли на концах игл коронирующих элементов, где напряженность наиболее высока. В результате этого пробоя ионизирующая способность коронирующих элементов поддерживается практически на неизменном уровне длительное время.

Величина линейной плотности тока (А/м) в электрофильтре в зависимости от приложенного к электродам напряжения (В) может быть рассчитана только для простейших случаев, когда ток определяется величиной приложенного напряжения, геометрическими размерами электродов и подвижностью ионов при нормальных параметрах неподвижного воздуха.

Вольтамперная характеристика трубчатого и пластинчатого электрофильтра может быть выражена общей формулой:

$$i = CU(U - U_0), \text{ где}$$

$$C = \frac{2k}{9 \cdot 10^9 R^2 \ln \frac{R_2}{R_1}} \text{ — для трубчатого электрофильтра;}$$

$$C = \frac{4\pi^2 k v}{d^2 9 \cdot 10^9 \left(\pi \frac{H}{d} - \ln \frac{2\pi R_1}{d} \right)} \text{ — для пластинчатого электрофильтра;}$$

R_1 – радиус коронирующего электрода;

R_2 – радиус осадительного электрода.

Для приближенных расчетов при существующих на практике отношениях H/d принимаются [2] следующие значения величины ν , характеризующей взаимное расположение электродов:

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

k – подвижность ионов для воздуха при н.у. $k = 1,58 - 2,48$.

Однако в промышленном электрофилт্রে ток зависит от :

- температуры газов;

- влажности газов;

- давления газов;

- скорости газов;

- запыленности газов;

- УЭС слоя пыли на электродах и др.

Общего уравнения, учитывающего эти параметры, не имеется. Поэтому целесообразно рассмотреть влияние основных технологических параметров на электрические характеристики и степень очистки газов на примерах промышленных электрофилтров.

9.4. Влияние скорости газов в активном сечении электрофилтра на степень очистки газов

Величина скорости газов в активном сечении электрофилтра определяется с помощью пневмометрических трубок. Сечение газоходов на входе и выходе электрофилтра разбивают на равновеликие участки (квадраты – для прямоугольных газоходов или кольца – для круглых газоходов), в которых производится измерение скорости в соответствии с ГОСТ [3] и определяется объем поступающих и отходящих газов. Далее производится расчет скорости газа V с учетом величины сечения F электрофилтра по формуле:

$$Q = \nu F \quad (9.2)$$

Для периодического контроля скорости газа в электрофилтре достаточно после снятия полей скоростей в газоходах производить измерение скоростей в контрольных точках газоходов. Зависимость степени очистки η от скорости газов ν в электрофилтре хорошо изучена:

$$\eta = 1 - \exp(-k / \nu) \quad (9.3)$$

где $k = \omega L / H_0$.

Для конкретного электрофилтра эта зависимость может быть построена следующим образом.

Пусть, например, электрофилтр имеет длину активной зоны $L = 9,6$ м (3,2 x 3), межэлектродное расстояние $H_0 = 0,15$ м, экспериментально найденная, например, при приемочных испытаниях скорость дрейфа $\omega = 0,1$ м/с. Тогда формула (9.3) будет иметь вид:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{0,1 \cdot 9,6}{0,15 \cdot \nu}\right) = 1 - \exp(-6,4 / \nu) \quad ,$$

а зависимость степени очистки от скорости газа имеет вид, представленный в таблице 9.1.

Таблица 9.1

Зависимость степени очистки газов и выбросов пыли от скорости газа в активной зоне электрофилтра.

Скорость газов, V	0,9	0,95	1,0	1,05	1,1
Степень очистки газов, η	0,9992	0,9988	0,9983	0,9977	0,9970
Выбросы пыли ($1 - \eta$)	0,0008	0,0012	0,0017	0,0023	0,0030
Относительные выбросы пыли ($1 - \eta$)	0,47	0,7	1,0	1,35	1,76

Из таблицы 9.1 следует, что снижение скорости газов с 1,0 до 0,9 м/с, т.е. на 10 % , снижает выбросы более чем в два раза; увеличение скорости газов с 1,0 до 1,1 м/с увеличивает выбросы в 1,76 раз. Аналогичным образом применительно к конкретному электрофилтру может быть рассчитано влияние присосов атмосфер-

ного воздуха на степень очистки газов. Отличие здесь будет заключаться в том, что необходимо определить места присоса в электрофильтре. Если возможно допущение равномерного распределения присосов по длине электрофильтра, то расчет степени очистки газов следует производить по полям. Если присос газов по всему электрофильтру составляет, например, 9 %, то принимаем увеличение скорости газов в первом поле на 3 %, во втором на 6 %, в третьем на 9 %. Расчет степени очистки газов, в этом случае, производится для каждого поля отдельно, а суммарная степень очистки газов определяется как для последовательно соединенных аппаратов (полей) по формуле:

$$\eta_{\Sigma} = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)(1 - \eta_3), \quad (9.4)$$

где η_1, η_2, η_3 – степени очистки газов полями электрофильтра.

В качестве примера рассмотрим влияние величины присоса атмосферного воздуха при равномерном распределении его по полям электрофильтра на скорость газов и степень очистки газов в электрофильтре. Пусть величина присосов будет составлять 10, 20, 30 %. Тогда скорости газа по полям электрофильтра будут иметь значения, приведенные в таблице 9.2:

Таблица 9.2

Величина скорости газов при равномерном распределении присосов по полям электрофильтра.

Присос, % № поля	10	20	30
1	1,033	1,07	1,1
2	1,066	1,13	1,2
3	1,1	1,2	1,3

С учетом данных таблицы 9.2 степень очистки газов и выбросы пыли при присосах воздуха до 30 % составят величины, приведенные в таблице 9.3.

Таблица 9.3

Степень очистки газов и величина выбросов пыли в электрофильтре при равномерном поступлении присосов по длине электрофильтра.

Присос, %	0	10	20	30
Степень очистки	0,983	0,9974	0,99652	0,9958
Выбросы, 1-η	0,0017	0,0026	0,0038	0,0042
Относит. выбросы (1-η)	1,00	1,53	2,24	2,47

Из таблицы 9.3 следует, что степень очистки газов за счет присосов атмосферного воздуха снижается с 99,83 до 99,62 %, т.е. на 0,21 %. Однако в данном диапазоне это составляет увеличение выбросов пыли практически в 2,5 раз. Следует отметить, что расчеты в таблице 9.3 выполнены при допущении равенства скорости дрейфа по полям. При этом полученная степень очистки газов несколько занижена.

Кроме средней величины скорости газов в активной зоне электрофильтра на степень очистки газов существенное значение оказывает равномерность распределения скорости газов в активном сечении.

Известно, что увеличение скорости газов в каком-либо сечении электрофильтра вызывает снижение степени очистки газов, которое не компенсируется соответствующим снижением скорости газов в другом сечении. Это связано с нелинейной зависимостью степени очистки газов от скорости. Сказанное можно проиллюстрировать с помощью рис. 9.4, из которого следует, что $\Delta \eta_{1,1} > \Delta \eta_{0,9}$

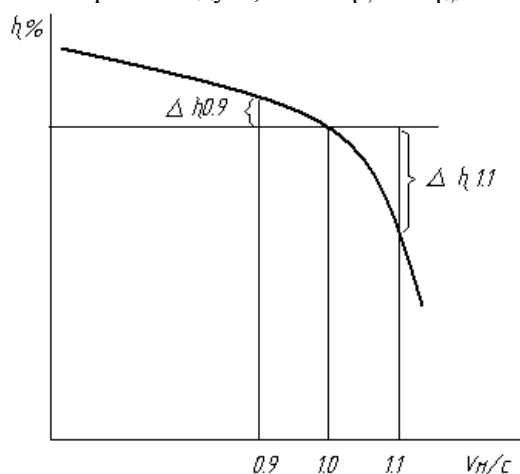


Рис. 9.4. К влиянию неравномерности распределения скорости газа по сечению

Распределение скорости газов в активном сечении электрофильтра может быть измерено, например, с помощью термоанемометра или механического анемометра. Такая операция выполняется на воздухе на входе перед активной зоной, а при необходимости (например, при нестандартном выходном газоходе) и на выходе после активной зоны электрофильтра. При этом скорость газов определяют в центрах отдельных квадратов. Эти измерения выполняются специализированной организацией (лабораторией аэродинамики ЗАО «СФ НИИОГАЗ»). При необходимости эта работа может выполняться при пусконаладочных испытаниях электрофильтра.

В процессе эксплуатации информацию о степени неравномерности газораспределения в электрофильтре в первом приближении можно получить по величине пылевых отложений на газораспределительных решетках. Для этого встряхивание газораспределительных решеток должно быть отключено за некоторый период времени до останова электрофильтра.

Увеличение скорости газов в активном сечении электрофильтра приводит к некоторому увеличению тока короны. С.П. Жебровский [4] объясняет это увеличением температуры газа вблизи коронирующего элемента. Интерпретация приведенных в [4] графических данных позволяет предположить, что увеличение скорости газа в активной зоне электрофильтра на 10 % приводит к изменению тока короны на 0,5 %; эту величину зафиксировать в промышленном электрофильтре с помощью щитовых приборов довольно сложно.

9.5. Влияние температуры очищаемых газов на степень их очистки в электрофильтре

Изменение температуры очищаемых газов, поступающих на очистку в электрофильтр оказывает влияние на степень очистки газов посредством изменения скорости газов, УЭС пыли на электродах, изменения вольтамперных характеристик полей электрофильтра. Влияние изменения скорости рассмотрено в предыдущем разделе.

Влияние ВАХ при изменении температуры приведено на рис 9.5.

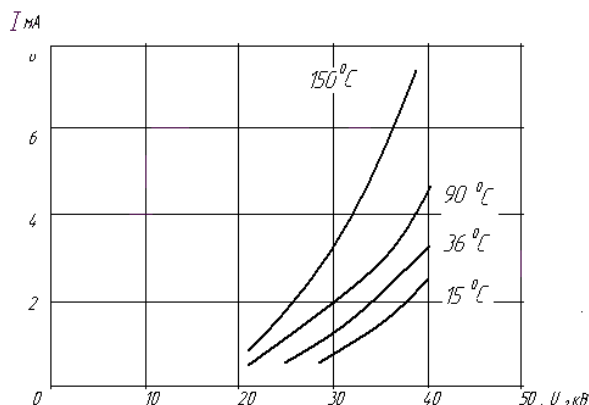


Рис. 9.5. Вольтамперные характеристики электрофильтра в зависимости от температуры газов [2]

При увеличении температуры величина напряжений, при которых будет проходить электрический пробой межэлектродного промежутка, уменьшается по причине снижения электрической прочности. При температуре выше 250°C колебания напряжения даже в небольших пределах вызывают значительное изменение тока. Экспериментально установлено [2], что ВАХ зависит от температуры газов в той мере, в какой эти параметры влияют на плотность газов.

Изменение температуры газов приводит к изменению удельного электрического сопротивления слоя (УЭС) пыли на электродах. Наиболее существенное снижение степени очистки газов происходит при образовании на осадительных электродах обратной короны. При температуре ниже 100°C в слое пыли появляется влага, УЭС пыли снижается. Характер изменения УЭС от температуры имеет вид, приведенный на рис. 9.6. При низкой температуре частицы пыли адсорбируют влагу, и пыль имеет низкое значение УЭС. По мере нагревания пыли адсорбированная влага испаряется, УЭС возрастает. Дальнейшее повышение температуры приводит к уменьшению сопротивления благодаря тепловому возбуждению электронов в частицах, в результате чего возникает электронная проводимость.

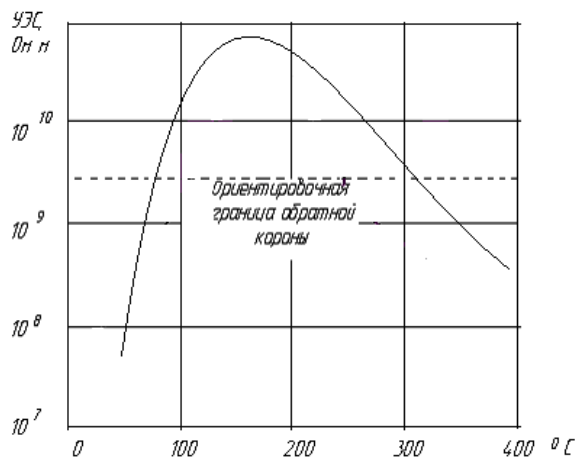


Рис. 9.5. Характер изменения удельного электрического сопротивления пыли в электрофильтре в зависимости от ее температуры

Влияние УЭС пыли на степень очистки газов в литературе оценивают двояко: непосредственно путем построения зависимостей $\eta=f(\rho_v)$ [5] или с помощью зависимости $\eta=f(\omega)$ [6].

Для отечественных электрофильтров зависимость скорости дрейфа от УЭС ориентировочно может быть представлена следующей таблицей:

Таблица 9.4

$\rho_v, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$	10^6	10^7	10^8	$2 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^8$	10^9	$4 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^9$	10^{10}	$2 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$	10^{11}	10^{12}	10^{13}
$\omega, \text{ см/с}$	12	10,7	7,8	7,3	5,8	5,0	4,2	4,1	4,0	3,9	3,8	3,75	3,6	3,5	3,4	3,3

9.6. Влияние размера улавливаемых частиц на степень очистки газов электрофильтром

Простейшую теоретическую зависимость степени очистки газов от размера улавливаемых частиц можно проиллюстрировать с помощью формулы, показывающей, что скорость дрейфа пропорциональна радиусу частиц:

$$\omega_n = 0,118 \cdot 10^{-10} \frac{E^2}{\mu} r, \text{ м/с}$$

Эта формула применима для частиц размером 2–50 мкм. Для частиц радиусом 0,05–1 мкм при расчете скорости дрейфа берется поправка Каннинггеяма:

$$\omega' = \omega(1 - AS_m/r),$$

где $A = 0,815 - 1,63$

S_m – средний путь свободного пробега молекулы, м для газов $S_m = 10^{-7}$ м.

Таблица 9.5

Скорость движения заряженных частиц в электрическом поле коронного разряда

Радиус частицы, мкм	Скорость движения ω_n , м/с при	
	$E = 15 \cdot 10^4 \text{ В/м}$	$E = 30 \cdot 10^4 \text{ В/м}$
0,2	0,012	0,025
0,5	0,013	0,030
1,0	0,015	0,060
5,0	0,0715	0,300
10,0	0,15	0,600

Из таблицы 9.5 следует, что расчетная скорость движения частиц радиусом 1 мкм и более прямо пропорциональна их размеру, а частиц радиусом менее 1 мкм мало зависит от их размера и изменяется с изменением напряженности поля. Очевидно, что увеличение содержания мелких частиц будет снижать степень очистки газов. При скоростях газов в активной зоне электрофильтра, превышающих 1 м/с улавливание крупных частиц происходит преимущественно на первых полях и сопровождается эрозией слоя, что может снижать степень очистки газов.

Установлено, что унос пыли при осаждении приводит к уменьшению общей степени очистки газов электрофильтром в том случае, если основная масса пыли (90 – 95 %) на входе не мельче, чем 20–30 мкм. Влияние уноса при этом можно оценить с помощью коэффициента k_1 в числителе формулы Дэйча:

$$k_1 = \left(\frac{L_i \omega}{H_0 V} \right)^{-0.65} \exp(-0,65) \quad \text{при} \quad \left(\frac{L_i \omega}{H_0 V} \right)^{-0.65} = 0 - 3,15$$

При величинах $\left(\frac{L_i \omega}{H_0 V} \right)^{-0.65}$ больших 3,15 эрозией слоя можно пренебречь.

9.7. Влияние содержания дисперсной фазы на степень очистки газов электрофильтром

Качественное влияние содержания дисперсной фазы на степень очистки газов электрофильтром можно изобразить зависимостью приведенной на рис. 9.6.



Рис. 9.6. Характер зависимости степени очистки газов от концентрации дисперсной фазы

Величина степени очистки газов электрофильтром определяется для заданных технологических условий типоразмером выбранного аппарата. При умеренной концентрации дисперсной фазы примерно в диапазоне 5-10...40-90 г/м³ степень очистки может быть представлена прямолинейным участком «В» на рис. 9.6.

При малой концентрации дисперсной фазы степень очистки характеризуется участком «А». Здесь снижение степени очистки обусловлено тем, что в большинстве технологических процессов малые концентрации пыли содержат частицы малого размера.

В случае высокой концентрации дисперсной фазы (участок «С»), снижение степени очистки газов обусловлено запирающим действием объемного заряда пылевых частиц. При этом основная часть носителей заряда осаждается на пылевых частицах.

Особенности работы электрофильтров при высокой концентрации дисперсной фазы рассмотрены Мирзабеяном Г.З. и Чекаловым Л.В. [7,8].

9.8. Влияние влажности газов на степень очистки газов электрофильтром

Увеличение влажности очищаемых газов приводит к снижению тока короны в электрофильтре. Зависимость степени очистки газов от содержания влаги имеет вид, приведенный на рис. 9.7. Повышение эффективности электрофильтров, связанное с увеличением влагосодержания газов объясняется абсорбцией влаги на частицах пыли, что приводит к снижению УЭС пыли в слое.

Кроме того, водяные пары оказывают непосредственное воздействие на коронный разряд. Исследования показывают, что присутствие водяных паров снижает ток коронного разряда на 7 % на каждый добавленный процент водяных паров [9].

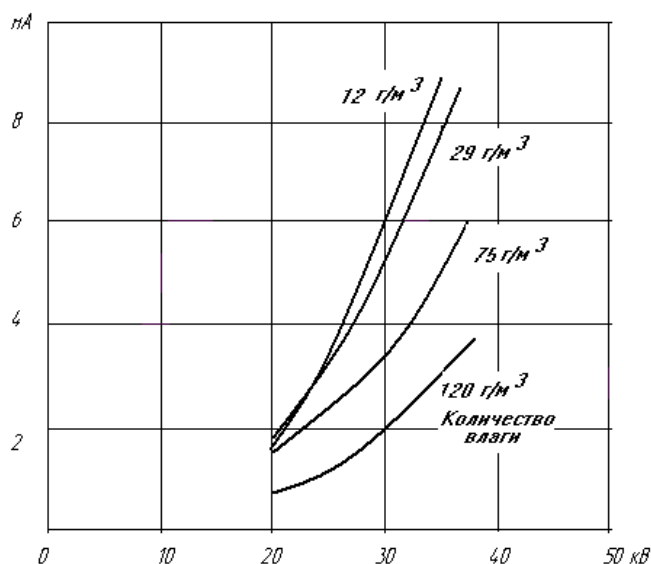


Рис. 9.7. Вольтамперные характеристики электрофильтра в зависимости от влажности газа

9.9 Учет совместного влияния нескольких параметров на степень очистки газов электрофильтром

Для учета влияния изменения условий работы электрофильтра на степень очистки газов разрабатывают гарантийные (корректировочные) зависимости, которые позволяют прогнозировать изменение эффективности работы электрофильтра. В качестве примера рассмотрим такие зависимости для электрофильтра, улавливающего золу экибастузского угля, очищающего $341 \text{ м}^3/\text{с}$ газа при температуре 140°C . Размер улавливаемых частиц – 17 мкм , среднеквадратичное отклонение размера частиц – $2,4$, входная запыленность – $50 \text{ г}/\text{м}^3$, степень очистки газов при оптимизированных интервалах встряхивания составляет $0,995$, а выходная запыленность – $0,25 \text{ г}/\text{м}^3$.

Величина измененной степени очистки газов рассчитывается по формуле:

$$\eta = 1 - \exp(-5,2984 \cdot k_v \cdot k_{d50} \cdot k_\sigma \cdot k_t \cdot k_z \cdot k_\tau)$$

После расчета изменений степени очистки газов изменение выходной запыленности может быть определено по формуле:

$$Z_{\text{вых}} = Z_{\text{вх}} \cdot (1 - \eta)$$

1. Зависимость k_v от скорости газов в активно зоне электрофильтра:

k_v	1,12	1,09	1,06	1,00	0,993	0,989	0,986	0,979	0,975	0,9688	0,9625	0,9534
$V, \text{ м/с}$	0,6	0,65	0,7	0,8	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,88	0,9

2. Зависимость k_t от температуры газов на входе электрофильтра:

k_t	1,040	1,020	1,00	0,982	0,966	0,950
$t^\circ\text{C}$	130	135	140	145	155	160

3. Зависимость k_{d50} от размера улавливаемых частиц d_{50} :

k_{d50}	1,094	1,078	1,046	1,016	1,000	0,982	0,945	0,902	0,959	0,806
d_{50}	24	22	20	18	17	16	14	12	10	8

4. Зависимость k_σ от среднеквадратичного размера частиц σ :

k_σ	1,116	1,052	1,000	0,959	0,929	0,900	0,879	0,860	0,844	0,830
σ	2	1,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8

5. Зависимость k_τ от τ_ϕ / τ_0 – соотношения фактических и оптимальных интервалов встряхивания осадительных электродов:

k_τ	0,98	1,00	0,99	0,978	0,969	0,959	0,950
τ_ϕ	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1

0,1 – непрерывное вращение молоткового вала со скоростью 1 оборот за 3 – 4 мин.

Расчетные оптимальные интервалы встряхивания осадительных электродов τ_0 по полям 1, 2, 3, 4, составят соответственно 3, 6, 20, 60 мин.

6. Зависимость k_z от $Z_{вх}$, г/м³:

k_z	0,982	0,985	0,989	0,993	0,996	1,000	1,001	1,006	1,008	1,009	1,01
$Z_{вх}$	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40

При изменении входной запыленности учет изменения выходной запыленности производится по формуле:

$$Z_{вых} = 0,005 \cdot Z_{вх}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА, ВЛИЯЮЩИХ НА СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

Режимные параметры

1. Режим встряхивания осадительных электродов.
2. Режим встряхивания коронирующих электродов.
3. Высота подъема бойков механизмов встряхивания.
4. Количество искровых пробоев в полях.
5. Величина тока, напряжения короны по полям.
6. Режим управления агрегатами питания.
7. Режимы чистки, обогрева изоляторов.

Технологические параметры

8. Скорость газов.
9. Присосы (выбивание) газов.
10. Температура газов.
11. Размер частиц, их средне-геометрическое отклонение.
12. Влажность газов.

13. Содержание дисперсной фазы в газах.
14. Содержание недожога в пыли.
15. Содержание серы в пыли.
16. Удельное электрическое сопротивление пыли.
17. Способ сжигания топлива.

Конструктивные параметры

18. Состояние центровки электродной системы, величина пробивных напряжений по полям.
19. Напряжение зажигания короны, вольтамперные характеристики по полям.
20. Количество недостающих коронирующих элементов.
21. Высота электродной системы.
22. Суммарная площадь осаждения электрофильтра.
23. Площадь осаждения одного поля.
24. Тип коронирующих электродов.
25. Ориентация острий коронирующих элементов.
26. Тип осадительных элементов.
27. Межэлектродное расстояние.
28. Расстояние между полями.

Проектные параметры

29. Тип предварительной ступени очистки разов.
30. Тип и количество газораспределительных устройств.
31. Тип и производительность устройств удаления пыли.
32. Устройства кондиционирования газов.
33. Устройства предварительной зарядки и (или) коагуляции частиц.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ РАСЧЕТ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАМИ

Степень очистки газов рассчитывается по формуле Дэйча:

$$\eta = 1 - e^{-\omega f},$$

где η – степень очистки газов, д.ед.;
 e – основание натуральных логарифмов;
 ω – скорость дрейфа частиц, м/с;
 f – параметр Дэйча.

Величина параметра Дэйча может быть определена следующим образом:

$$f = \frac{L}{H_0 V_z} = \frac{t}{H_0} = \frac{S}{Q},$$

где L – длина активной зоны электрофильтра, м;
 H_0 – межэлектродное расстояние, м;

V_r – скорость газов в активном сечении, м/с;
 t – время пребывания газов в активной зоне, с;
 S – площадь осаждения электрофильтра, м²;
 Q – количество очищаемых газов, м³/с;

Последнее равенство с геометрической точки зрения является точным. Однако при подсчете площади осаждения электрофильтра и площади его поперечного сечения различные фирмы делают неодинаковые допущения, поэтому на практике равенства не являются строгими.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ОЦЕНОЧНЫЙ РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОО- ФИЛЬТРА ЭГА-2-56-12-6-4

Исходные данные для расчета:

Суммарная длина полей – $L=3,84 \cdot 4=15,36$ м;
Межэлектродное расстояние – $H = 0,1375$ м;
Скорость газа в активном сечении – $V_r= 1,5$ м/с;
Активное сечение электрофильтра – $F = 181$ м²;
Площадь осаждения – $S = 2100$ м²;
Время пребывания газов – $t = 10,24$ с;
Количество очищаемых газов – $Q = 375$ м³/с.

При скорости дрейфа равной, например, 0,05 м/с:

$$\eta = 1 - e^{-0,05 \cdot 74,47} = 0,9758$$

При отсутствии микроЭВМ с функцией e^{-x} , расчет может быть выполнен с помощью таблицы или

графиков приложений 4,5.

Недостатком этого метода расчета является ориентировочный выбор параметра ω (Приложение 6). Для исключения этого недостатка скорость дрейфа для конкретных условий определяется по формуле:

$$\omega = \frac{HV_z}{L} \ln \frac{1}{1-\eta} = \frac{0,1375 \cdot 1,5}{15,36} \cdot \ln \frac{1}{1-0,975} = 0,05 ,$$

где η – инструментально измеренная степень очистки газов, д.ед.

При известной величине скорости дрейфа с приемлемой для предварительных расчетов точностью можно определить влияние на степень очистки газов величины присосов, площади осаждения, размера улавливаемых частиц и ряда других параметров работы электрофильтров.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица значений функции $\eta = 1 - \exp(-\omega \cdot f)$

$\omega \cdot f$	$1 - \exp(-\omega \cdot f)$	$\omega \cdot f$	$1 - \exp(-\omega \cdot f)$
1.00000	0.63212	5.00000	0.99326
1.10000	0.66713	5.10000	0.99390
1.20000	0.69880	5.20000	0.99448
1.30000	0.72747	5.30000	0.99501
1.40000	0.75340	5.40000	0.99548
1.50000	0.77687	5.50000	0.99591
1.60000	0.79810	5.60000	0.99630
1.70000	0.81732	5.70000	0.99665
1.80000	0.83470	5.80000	0.99697
1.90000	0.85043	5.90000	0.99726
2.00000	0.86466	6.00000	0.99752
2.10000	0.87754	6.10000	0.99776
2.20000	0.88920	6.20000	0.99797

2.30000	0.89974	6.30000	0.99816
2.40000	0.90928	6.40000	0.99834
2.50000	0.91791	6.50000	0.99850
2.60000	0.92573	6.60000	0.99864
2.70000	0.93274	6.70000	0.99877
2.80000	0.93929	6.80000	0.99888
2.90000	0.94498	6.90000	0.99899
3.00000	0.95021	7.00000	0.99909
3.10000	0.95495	7.10000	0.99917
3.20000	0.95924	7.20000	0.99925
3.30000	0.96312	7.30000	0.99932
3.40000	0.96663	7.40000	0.99939
3.50000	0.96980	7.50000	0.99945
3.60000	0.97258	7.60000	0.99950
3.70000	0.97528	7.70000	0.99956
3.80000	0.97753	7.80000	0.99959
3.90000	0.97975	7.90000	0.99963
4.00000	0.98167	8.00000	0.99966
4.10000	0.98343	8.10000	0.99969
4.20000	0.98500	8.20000	0.99973
4.30000	0.98643	8.30000	0.99975
4.40000	0.98772	8.40000	0.99977
4.50000	0.98889	8.50000	0.99980
4.60000	0.98995	8.60000	0.99982
4.70000	0.99090	8.70000	0.99983
4.80000	0.99177	8.80000	0.99985
4.90000	0.99255	8.90000	0.99986

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Зависимость степени очистки газов в электрофилт্রে от параметра ωf

Параметр ωf		

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Ориентировочные значения УЭС и эффективной скорости дрейфа некоторых пылей

Теплоэнергетика		
Тип сжигаемого угля	УЭС золы, Ом · м	Эффективная скорость дрейфа, см/с

Экибастузский СС	$2,1 \cdot 10^{12}$	4,5 – 5
Донецкий ГСШ	$9,5 \cdot 10^9$	6,0 – 6,5
Донецкий АШ	$1,8 \cdot 10^{10}$	7,0
Львовско-волинский	10^8	10
Пыли некоторых других отраслей промышленности		
Тип пыли	УЭС золы, Ом · м	Эффективная скорость дрейфа, см/с
Магнезитовая	$3,0 \cdot 10^{12}$	4,5 – 5,5
Доломитовая	$4,0 \cdot 10^{10}, 3,0 \cdot 10^{11}$	6,0
Шамотная	10^{10}	8,5
Известковая	10^9	8,0
Агломерационная	10^8	10

УЭС промышленных пылей в теплоэнергетике

Вид сжигаемого топлива	Температура газа, °С	УЭС, Ом · м
Смесь Назаровского и Ирша-Бородинского углей	110	$6,5 \cdot 10^{10}$
Уголь Ирша-Бородинского месторождения	120	$2,3 \cdot 10^9$
Уголь бурый марки Б1р	150	$2,8 \cdot 10^{10}$
Уголь бурый Харанорского месторождения	195	$5,0 \cdot 10^9$
Уголь марки БСШ	180	$3,7 \cdot 10^9$
Уголь бурый Ангреновского месторождения	200	$1,5 \cdot 10^{10}$
Уголь марки СС	120	$5,0 \cdot 10^8$
Уголь бурый Бикинского месторождения	160	$8,3 \cdot 10^9$
Подмосковный уголь	160	$2 \cdot 10^{10}$
Уголь донецкий марки ГСШ	150	$1,8 \cdot 10^{10}$
Уголь Донецкий марки Т	140	$1,0 \cdot 10^{11}$
Уголь марки ПЖ Воркутинского месторождения	100	$4,5 \cdot 10^{10}$
Смесь донецких углей марок ДМСШ, ГР, ГСШ, Д	170	$3,0 \cdot 10^9$
Уголь донецкий Междуреченского месторождения	170	$8,5 \cdot 10^9$
Уголь Донецкий марки АШ	130	$1,7 \cdot 10^9$
Уголь Экибастузский марки СС	140	$2,1 \cdot 10^{11}$
Смесь кузнецких углей марок ГССи ТР в соотношении 85:15 (по весу)	150	$6,5 \cdot 10^7$
Высокосернистый мазут	150	$2,5 \cdot 10^7$

УЭС промышленных пылей вращающихся печей цементного производства

Мокрый способ производства		
Наименование цем. заводов,	Температура, °С	
	180	220
Подольский	$5 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$
Карагандинский, известняк	$7 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^9$
Брянский, мел	10^9	$3,8 \cdot 10^9$
Ангарский, мрамор	$1,2 \cdot 10^8$	$9 \cdot 10^8$
Себряковский, мел	$3,0 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$
Пунане-Кунда, известняк	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^8$
Пролетарий, мергель	10^7	$8 \cdot 10^7$
Чимкентский	$9 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^7$
Воскресенский, известняк	$8 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^7$
Сухой способ производства		
Сланцевский	$1,5 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^{10}$
Спасский, известняк	$3, \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$
Катав-Ивановский, мергель	10^{10}	$2,5 \cdot 10^{10}$
Днепродзержинский	$2 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$
Липецкий, известняк	$2 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^9$
Первомайский, мергель	10^8	$2 \cdot 10^8$

УЭС пылей цементного производства

Технологический агрегат	Вид сырья	Температура, °С	УЭС, Ом · м
Печи длиной до 100 м	известняк,	220 – 385	$10^8 – 2,1 \cdot 10^9$
	мергель	220 – 385	$1,2 \cdot 10^9$

Печи длиной 100 – 127 м	известняк	180 – 300	$1,8 \cdot 10^7 - 2,3 \cdot 10^8$
Печи длиной 128 – 150 м	известняк	170 – 260	$1,4 \cdot 10^8 - 8,7 \cdot 10^9$
	мел	170 – 260	$2,5 \cdot 10^7$
	мергель	170 – 260	$2 \cdot 10^9$
Печи длиной 170 м	известняк	195 – 250	$2,5 \cdot 10^7 - 1,2 \cdot 10^8$
	мел	195 – 250	$3,3 \cdot 10^7 - 3,3 \cdot 10^8$
Печи длиной 185 м	известняк	180 – 250	$5 \cdot 10^7 - 2,1 \cdot 10^9$
	мел	180 – 250	$(1,8 - 6,5) \cdot 10^7$
Печи с концентратом шлака	известняк	175 – 250	$2,7 \cdot 10^9 - 8,1 \cdot 10^{10}$
Печи с конверторным кальциниатором	известняк	110 – 210	$3,9 \cdot 10^7 - 4 \cdot 10^9$
Печи с циклонными теплообменниками	известняк	190 – 380	$3,9 \cdot 10^7 - 4 \cdot 10^9$
Полые вращающиеся печи сухого способа производства	известняк	200 – 250	$2,8 \cdot 10^8 - 1,3 \cdot 10^9$
Колосниковые холодильники		90 – 290	$(0,4 - 1,8) \cdot 10^{10}$
Цементные мельницы открытого типа		70 – 170	$2 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^{10}$
Цементные мельницы сепараторные		65 – 90	$10^7 - 10^{10}$
Сырьевые мельницы открытого цикла		60 – 100	$10^8 - 6 \cdot 10^{10}$
Сырьевые мельницы сепараторные		50 – 70	$10^8 - 6 \cdot 10^{10}$
Сушильные барабаны		70 – 150	$1,2 \cdot 10^7 - 2,8 \cdot 10^{10}$
Реакторные и вихревые сушилки		100 – 150	$10^7 - 3 \cdot 10^{10}$

УЭС промышленных пылей цветной металлургии

Вид завода	Вид технологических газов	Температура газов, °С	УЭС, Ом · м
Свинцовый	газы спекательных машин, газы шахтных печей	100	$10^9 - 10^{11}$
		100 – 110	$10^9 - 10^{11}$
Цинковый	газы обжиговых печей кипящего слоя (КС)	220 – 240	$10^8 - 10^{10}$
Медь-Плавильный	газы печей взвешенной плавки	350	$10^9 - 10^9$
Оловянный	газы отражательных печей, газы электропечей, газы шахтных и обжиговых печей	150 – 200	10^{11}
		180 – 250	10^{11}
		150 – 250	10^{11}
Ртутный	газы обжиговых трубчатых печей	220	$10^{10} - 10^{11}$
		300 – 350	10^9

УЭС промышленных пылей черной металлургии

Вид производства	Вид технологических газов	Температура газов, °С	УЭС, Ом · м
Доменное	газы от колошниковой пыли	100 – 200	10^{10}
Мартеновское	газы от мартеновских печей	200 – 250	$10^5 - 10^8$
Агломерационное	газы агломерационных фабрик	150 – 200	$10^8 - 10^5$
Производство окатышей	газы обжиговых машин	100 – 120	$10^7 - 10^8$
Ферросплавное	газы открытых ферросплавных печей	78 – 100	$10^9 - 10^{11}$
Прокатное	газы машин огневой зачистки	70 – 100	$10^8 - 10^9$
Производство огнеупоров			
ГЛИНА	газы вращающихся печей, газы шахтных печей	200	$2 \cdot 10^{10}$
		200	10^{10}
ДОЛОМИТ	газы вращающихся печей, газы шахтных печей, газы вагранок	200	$4 \cdot 10^{10}$
		200	$4 \cdot 10^{10}$
		200	$3 \cdot 10^{11}$

УЭС промышленных пылей химической и нефтеперерабатывающей промышленности

Вид производства	Вид технологических газов	Температура газов, °С	УЭС, Ом · м
Производство Серной кислоты	печные газы от огарковой пыли	350 – 425	$10^8 - 10^9$
Сажевые заводы	газы в производстве ламповой сажи, газы в производстве форсуночной сажи, газы в производстве печной газовой сажи	220 – 250	$4 \cdot 10^2$
		180 – 230	10^2
		170 – 180	10^2
Нефтеперерабатывающие заводы	газы от пылевидных катализатор	220 – 250	10^8

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНТЕРВАЛОВ РЕГЕНЕРАЦИИ ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

(упрощенный вариант)

Оптимизация интервалов регенерации осадительных электродов электрофильтра позволяет снизить безвозвратный пылеунос в 1,3–2,5 раза по сравнению с непрерывным режимом встряхивания осадительных электродов, повысить надежность и срок службы узлов встряхивания.

Данная методика позволяет определять интервалы встряхивания расчетным путем.

Длительность паузы для любого поля электрофильтра определяется по следующей формуле:

$$\tau = \frac{16,7 \cdot L_n \cdot m_0 \cdot C_u}{H_0 \cdot V_r \cdot Z_{вх} \cdot \eta_n}, \text{ мин}$$

где L_n – длина поля электрофильтра, м;

m_0 – оптимальная пылеемкость осадительного электрода, кг/м² (количество пыли на 1 м² осадительной поверхности в момент, предшествующий удару молотка при оптимальном встряхивании,

$m_0 = 3,14 - 0,25 \lg \rho_v$;

ρ_v – удельное электрическое сопротивление пыли (определяется экспериментально или по таблицам приложения б);

H_0 – расстояние между осями осадительного и коронирующего электродов (для электрофильтров УГ – 0,137, ЭГА – 0,150, ЭГБМ – 0,175, ЭГВ – 0,230 м);

V_r – скорость газа в активной зоне электрофильтра, м/с;

$Z_{вх}$ – массовая концентрация пыли в газах на входе в электрофильтр;

η_n – степень очистки **газов полем электрофильтра (где?)** (определяется опытным путем или рассчитывается по формуле:

$$\eta_n = 1 - \sqrt[n]{1 - \eta},$$

где η – степень очистки газов электрофильтром при оптимальном режиме регенерации осадительных электродов;

N – число полей электрофильтра;

C_u – соотношение интервалов встряхивания для любого поля электрофильтра может быть определено по следующей формуле:

$$C_u = \frac{1}{(1 - \eta_n)^{n-1}} = \frac{1}{\sqrt[n]{(1 - \eta)^{n-1}}},$$

где n – порядковый номер поля электрофильтра.

Таблица

Расчетные соотношения интервалов встряхивания электрофильтров
(при допущении равенства степени очистки газов по полям)

Кол-во	№№ по-	Степень очистки газов в электрофильтре													
		0,8	0,85	0,9	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,995	0,999	0,9999
2	1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	2	2,24	2,42	3,16	5,54	3,78	4,08	4,47	5,0	5,77	7,07	10,0	14,14	31,62	-
3	2	1,71	1,88	2,15	2,32	2,42	2,55	2,71	2,92	3,22	3,68	4,64	5,85	10,0	-
	3	2,92	3,54	4,64	5,38	5,89	6,52	7,37	8,55	10,36	13,6	21,5	34,2	100,0	-
4	2	1,50	1,61	1,78	1,88	2,0	2,02	2,11	2,24	2,40	2,66	3,16	3,76	5,62	10
	3	2,24	2,42	3,16	3,54	3,78	4,08	4,47	5,00	5,77	7,07	10,0	14,14	31,6	100
	4	3,34	4,15	5,62	6,65	7,35	8,25	9,46	11,2	13,9	18,8	31,6	53,2	177,8	1000

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНТЕРВАЛОВ РЕГЕНЕРАЦИИ
КОРОНИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ**

(упрощенный вариант)

Данная методика позволяет определить интервалы встряхивания коронирующих электродов расчетным путем. Длительность паузы для любого поля электрофильтра определяется в соответствии с зависимостью:

$$\tau_k = \frac{\mu_0 \cdot L_k \cdot C_u}{Q_{вх} \cdot Z_{вх} \cdot K},$$

где μ_0 – оптимальное количество пыли на одном погонном метре поверхности коронирующего электрода в момент, предшествующий удара молотка; μ_0 – является функцией удельного электрического сопротивления пыли (УЭС), определяется по формуле: $\mu_0 = 13 \lg \rho_v - 77$;

ρ_v – удельное электрическое сопротивление пыли, Ом · м (величина удельного электрического сопротивления пыли определяется опытным путем или из таблицы приложения 7);

L_k – длина коронирующих электродов для одного поля электрофильтра (определяется проектом), м;

$Q_{вх}$ – количество газов, проходящее через электрофильтр (определяется опытным путем или на основании исходных данных), м³/с (р.у.);

$Z_{вх}$ – концентрация частиц в газах на входе в электрофильтр (определяется опытным путем или на основании исходных данных);

K – коэффициент улавливания пыли на коронирующих электродах, $K = 0,01$;

C_u – соотношение интервалов встряхивания для любого поля электрофильтра.

1. Площадь активного сечения электрофильтра – F, м²

$$F = K_1 \cdot n (H + 0,2), \quad (1)$$

где K₁ – коэффициент, учитывающий толщину профиля осадительного электрода, уменьшающую активное сечение электрофильтра в соответствии с таблицей:

Тип электрофильтра	Межэлектродное расстояние, Нмэ	Величина коэффициента K ₁ = Нмэ – b ₁
ЭГА	300	0,266
ЭГБ	350	0,316
ЭГБМ	400	0,366
ЭГВ	460	0,426

Для осадительных элементов СЧС–640 – b₁ = 0,034 мм;

n – количество газовых проходов,

H – высота осадительного электрода;

0,2 – условное увеличение высоты осадительных электродов за счет полуактивных зон (по 0,1 м сверху и снизу). Для аппаратов разных конструкций эта величина может иметь другое значение.

2. Площадь осаждения осадительных электродов, м²

$$F_{oc} = 1,28 \cdot n \cdot K (H + 0,2) N \quad (2)$$

K – количество элементов в осадительном электроде.

3. Объем одновременно очищаемого газа, м³

(Активный объем электрофильтра).

$$V_a = 0.64 F_a \cdot N \cdot K \quad (3)$$

4. Производительность по очищаемому газу, м³/ч

$$Q = 3600 \cdot F_a \cdot V_g, \quad (4)$$

где V_г – скорость газов в активном сечении (в каталогах величина V_г обычно условно принята равной 1 м/с).

5. Энергетические затраты (Э) на 1000 м³ очищаемого газа, кВт·ч.,

Состоит из затрат на питание электрофильтра током высокого напряжения, электродвигателей механизмов встряхивания, электрических нагревателей и преодоления гидравлического сопротивления активной зоны и диффузора с конфузуром.

$$\mathcal{E} = \frac{(N_1 \cdot T + N_2 \cdot t_1 + N_3 \cdot t_3 + N_4 \cdot T_4) \cdot 10^3}{T \cdot Q}, \quad (5)$$

где N₁ – мощность питания системы коронирующих электродов в кВт:

$$N_1 = \frac{V_{max} \cdot J_{cp} \cdot K_2 \cdot \cos \varphi \cdot F_0}{K_U \cdot \eta_a \cdot 10^3}, \quad (6)$$

где V_{max} – амплитуда питающего напряжения, кВ;

J_{cp} – средняя величина плотности тока короны, мА/м²;

K₂ – коэффициент формы тока, K₂ = 1,26;

cos φ – коэффициент мощности, cos φ = 0,7;

K_U – коэффициент формы напряжения, K_U = 1,41;

η_a – КПД агрегата питания, η_a = 0,9;

T – расчетный период эксплуатации электрофильтра за один год, ч;

$$T = 8760 \cdot K_{ти}, \quad (7)$$

где K_{ти} – коэффициент технического использования;

N₂ – мощность питания электродвигателей механизмов встряхивания, кВт:

$$N_2 = K_{\text{дв}} \cdot N_{\text{дв}} \cdot n_{\text{дв}} , \quad (8)$$

где $K_{\text{дв}}$ – коэффициент использования установленной мощности электродвигателей;
 $N_{\text{дв}}$ – мощность одного электродвигателя, кВт;
 $n_{\text{дв}}$ – количество электродвигателей, шт.;
 t_1 – продолжительность работы электродвигателей в течение расчетного периода, ч:

$$t_1 = T \cdot K_{\text{тд}} ,$$

где $K_{\text{тд}}$ – коэффициент технического использования электродвигателей;
 N_3 – мощность питания электронагревателей, кВт:

$$N_3 = N_n \cdot n_n ,$$

где N_n – мощность одного электронагревателя, кВт;
 n_n – количество электронагревателей;
 t_3 – время работы электронагревателей в течении расчетного периода эксплуатации (Т), ч;
 N_4 – мощность, потребляемая на преодоление гидравлического сопротивления, кВт:

$$N_4 = \frac{Q \cdot \Delta P}{3600 \eta_0} , \quad (9)$$

где ΔP – максимальное гидравлическое сопротивление, Па;
 η_0 – КПД тягодутьевого устройства.

ПРИМЕР РАСЧЕТА СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНУЮ СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

Исходные данные:

Имеются 2 параллельно работающих электрофильтра типа ЭГА2-96-2-6-4.

Площадь осаждения, м ²	2098
Поперечное сечение, м ²	181,7
Входная запыленность, г/м ³	20
Степень очистки ЭФ №1, % (после капитального ремонта)	99
Степень очистки ЭФ №2, %	92
Расход газов по электрофильтрам одинаковый, составляет при скорости газов в активной зоне, м/с	по 254,4 м ³ /с, 1,4

Запыленность на выходе электрофильтров:

$$Z_{\text{вых1}} = Z_{\text{вх}} (1 - \eta) = 20 \cdot 0,01 = 0,2 \text{ г/м}^3$$

$$Z_{\text{вых2}} = 20 \cdot 0,08 = 1,6 \text{ г/м}^3$$

Суммарные выбросы из электрофильтров при $Q_1 = Q_2$ составляют:

$$M_{\Sigma} = Q_1 \cdot Z_{\text{вых1}} + Q_2 \cdot Z_{\text{вых2}} = Q_1 (Z_{\text{вых1}} + Z_{\text{вых2}}) = Q_1 \cdot 1,8 = 254,4 \cdot 1,8 = 457, \text{ г/с.}$$

Необходимо определить:

Соотношение скоростей газов в электрофильтрах, при котором суммарные выбросы пыли из них будут минимальными.

(Для упрощения расчетов условно принимаем, что скорость дрейфа в электрофильтрах при изменении газовой нагрузки остается неизменной)

Тогда:

$$W_1 = \frac{Q_1}{S} \ln \left(\frac{1}{1 - \eta_1} \right) = 0,0557, \text{ м/с}$$

$$W_2 = \frac{Q_1 = Q_2}{S} \ln \left(\frac{1}{1 - \eta_2} \right) = 0,0307, \text{ м/с}$$

$$\eta_1 = 1 - e^{-\frac{\omega_1 \cdot S}{Q_1}}; \quad \eta_2 = 1 - e^{-\frac{\omega_2 \cdot S}{Q_2}}$$

$$B_1 = 1 - \eta_1; \quad B_{\Sigma} = B_1 + B_2; \quad B_2 = 1 - \eta_2$$

η_1	Q_1	Q_2	η_2	B_{Σ}
95,32	381,6	127,2	99,37	373
96,25	359	148	98,89	300
97,07	331	178	97,81	272
97,87	305,56	203,4	95,79	301
98,48	279,18	228,9	94,00	359
98,99	254,38	254,38	92,02	457

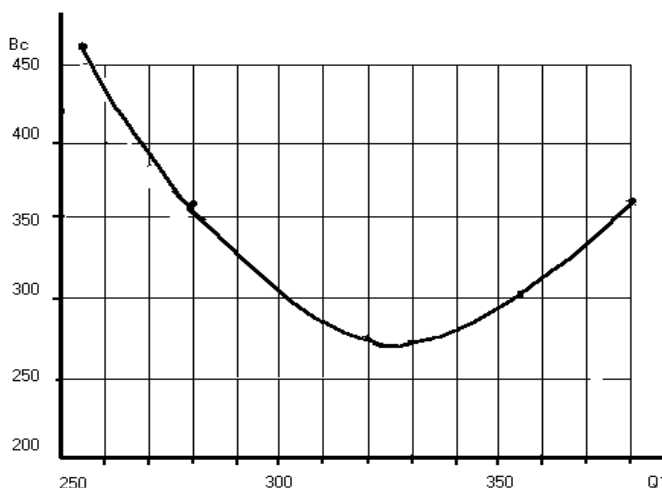


Рис. Зависимость суммарных выбросов из электрофильтров (B_c) от количества газов, пропускаемых через электрофильтр №1

Таким образом, из таблицы и из рисунка следует, что для принятых условий суммарные выбросы пыли при одинаковой нагрузке на электрофильтры составляют 457 г/с, а при $Q_1 = 331 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_2 = 178 \text{ м}^3/\text{с}$ выбросы составляют 272 г/с, т.е. в 1,68 раз.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАМИ

Успешное функционирование электрофилтра в значительной мере обеспечивается регулярным его обслуживанием. Своевременная диагностика состояния электрофилтра – одна из первоочередных предпосылок для обеспечения его проектной эффективности.

Определение степени очистки газов электрофилтром производят в соответствии с ГОСТ с использованием метода внешней или внутренней фильтрации пыли. Один из основных недостатков этих методов – большая трудоемкость и значительные затраты времени.

Известные отечественные и зарубежные пылемеры имеют высокую стоимость, требуют тарировки, имеют недостаточную стабильность показаний.

Качественные и нередко количественные данные о эффективности полей электрофилтра можно получить относительно простым методом [1]. В исправном электрофилтре распределение уловленной пыли по длине электрофилтра происходит близко к экспоненциальному закону и выражается формулой:

$$P_{ул} = e^{-\omega f} \quad (1)$$

где ω – скорость дрейфа; f – параметр Дейча.

Из формулы (1) следует, что степень очистки газов (η) может быть выражено формулой:

$$\eta = 1 - C \frac{N}{1-n} \quad (2)$$

где C – соотношение количеств уловленной в бункерах пыли;

N – количество полей в электрофилтре;

n – порядковый номер поля электрофилтра.

Формула (2) получена при условии, что для каждого поля электрофилтра имеется один бункер. Однако аналогичные зависимости могут быть получены для любого количества бункеров.

В качестве примера ниже приведены таблицы для двух-, трех- и четырехпольных электрофилтров, показывающие зависимость между степенью очистки газов и соотношением количеств уловленной пыли.

Таблица 1

Соотношение количества уловленной пыли по полям для трехпольного электрофилтра для различной степени очистки газов (η)

№№	η					
	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,999
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,368	0,342	0,311	0,271	0,215	0,10
3	0,137	0,117	0,0965	0,0737	0,0764	0,01

Таблица 2

Соотношение количеств уловленной пыли по полям для двухпольного и четырехпольного электрофилтров при различной степени очистки газов

№№	η							
	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,995	0,999	0,999
I	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
II	0,474	0,447	0,417	0,376	0,316	0,266	0,178	0,100
III	0,224	0,200	0,173	0,141	0,110	0,071	0,032	0,010
IV	0,106	0,089	0,072	0,053	0,032	0,018	0,006	0,001

Приведенные в таблицах соотношения количеств уловленной пыли рассчитаны для исправных электрофилтров. Наличие неисправностей в каком-либо поле приводит к изменению приведенных соотношений. Очевидно, что в неисправном поле будет меньшее количество уловленной пыли, что приведет к соответствующему изменению соотношений количеств уловленной пыли по полям.

Регулярное сравнение соотношений количеств уловленной пыли позволит получать ценную информацию как об эффективности электрофилтра в целом, так и об эффективности отдельных полей.

Следует особо отметить, что здесь достаточно иметь сведения о соотношении количества уловленной по бункерам пыли (без знания абсолютной величины). Это удобно при наличии гидрозолаудаления на ГРЭС, а также на всех других предприятиях, когда бункера электрофилтров оснащены уровнемерами.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

Известно, что увеличение мощности, расходуемой на питание электрофилтра, приводит к увеличению степени очистки газов. Это положение справедливо для восходящих участков зависимости $\eta=f(\frac{P}{Q})$ (см. рис.).

На практике существуют режимы питания, когда увеличение мощности, потребляемой полем электрофилтра, приводит к снижению степени очистки газов. Это объясняется тем, что начиная с некоторой величины, значительная все увеличивающаяся доля мощности расходуется на создание искровых разрядов. При этом мощность, расходуемая непосредственно на зарядку и осаждение частиц уменьшается. Этим и объясняется снижение степени очистки газов.

При улавливании высокоомной пыли искровые разряды в межэлектродном промежутке инициируются искровыми пробоями в высокоомном слое пыли на осадительном электроде. Поэтому перегиб кривой 1 происходит при меньшей мощности, чем при улавливании низкоомной пыли.

Естественно, что при эксплуатации электрофилтров необходимо учитывать это явление.

Безусловно, самым эффективным средством контроля оптимальной величины мощности является установка прибора управления агрегатом питания, отслеживающего режим повышенных искровых пробоев и не допускающего снижения степени очистки газов по этой причине.

Эффективным средством контроля оптимальной величины мощности является датчик контроля выходной запыленности, передающий показания на самопишущий прибор. При этом для повышения точности настройки питания первых полей может оказаться целесообразным кратковременное (на период определения оптимальной величины электрического режима) отключение последующих полей.

Возможны и другие методы контроля. Так, например, при улавливании высокоомной пыли можно использовать последующее поле электрофилтра как датчик запыленности коронного типа. (Чем больше запыленность газа, поступающего в поле, тем меньше ток короны. При этом напряжение несколько возрастает.) Для проведения этих измерений необходимо оснастить агрегат питания более чувствительными измерительными приборами на стороне высокого напряжения.

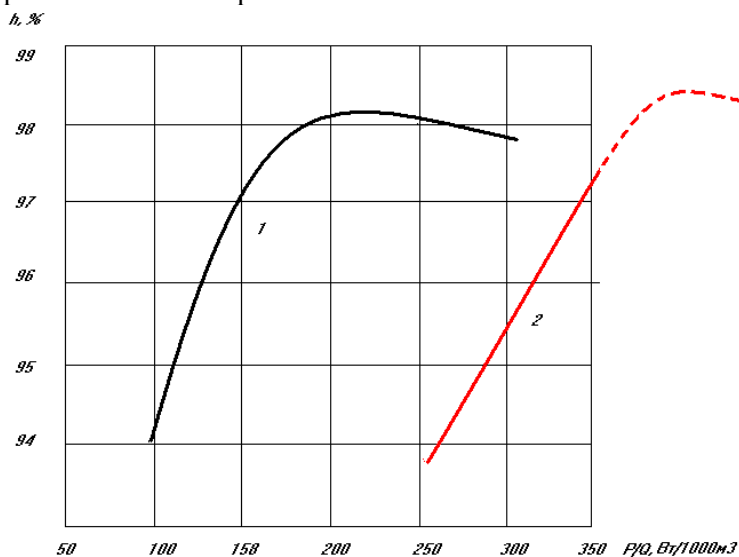


Рис. Зависимость степени очистки газов $h, \%$ от удельной мощности коронного разряда в электрофилтре $P/Q, \text{Вт}/1000\text{м}^3$.

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

1. Часто встречающиеся числовые значения

$$\begin{aligned} \pi &= 3,14 & g &= 9,81 & 1/M &= \ln 10 = 2,3 \\ \frac{\pi}{4} &= 0,785 & \sqrt{g} &= 3,13 & \lg \pi &= 0,497 \\ M = e &= 2,718 & \sqrt{e} &= 4,42 & \ln \pi &= 1,1447 \\ \lg e &= 0,437 & 1/e &= 0,368 & 1/g &= 0,1019 \end{aligned}$$

2. Плотность различных веществ, тонн/м³

Алюминий	2,5 – 2,7	Гравий	1,2 – 2,0
Ванадий	5,5	Гранит	2,4 – 3,0
Вольфрам	19,1	Бетон	1,8 – 2,45
Дюралюминий	2,6 – 2,8	Известь гаш.	2,3
Золото	19,33 – 19,5	Кирпич кладка	1,42 – 1,7
Железо	7,8 – 7,85	Камен. кладка	2,4 – 2,8
Латунь	8,1 – 8,7	Песчаник	2,2 – 2,5
Медь	8,3 – 8,93	Песок сухой	1,4 – 1,6
Победит	14	Песок влажн.	1,9 – 2,0
Ртуть	13,6	Дуб в суш.	0,69 – 1,03
Свинец	11,3	Дуб св. срубл.	0,77 – 1,28
Чугун белый	7,58 – 7,75	Сосна в суш.	0,31 – 0,76
Чугун серый	7,03 – 7,13	Сосна св. срубл.	0,4 – 1,10
Молибденовая сталь	8,1	Стекло	2,6 – 2,7
Никель	8,35 – 8,9	Клен. в. суш.	0,33 – 0,41
Цинк	6,9 – 7,3	Целлулоид	1,34 – 1,40

3. Температура плавления

Алюминий	660,7	Константан	1260
Вольфрам	3387	Латунь	1000
Железо	1539	Медь	1084,5
Золото	1064,4	Нихром	1400
Цинк	419	Олово	232
Молибден	2620	Платина	1772

4. Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha = 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Алюминий	24	Золото	12	Олово	26
Бронза	13 – 21	Латунь	17 – 19	Свинец	29
Железо	23	Медь	17	Цинк	32

Множители и приставки СИ для образования десятичных и кратных единиц:

мега	м	м	$1000000 = 10^6$	миллион
кило	к	к	$1000 = 10^3$	тысяча
гекто	г	г	$100 = 10^2$	сто
дека	да	da	$10 = 10^1$	десять
деца	д	d	$0,1 = 10^{-1}$	одна десятая
санти	с	c	$0,01 = 10^{-2}$	одна сотая
милли	м	m	$0,001 = 10^{-3}$	одна тысячная
микро	мк	μ	$0,000001 = 10^{-6}$	одна миллионная
нано	н	n	$0,00000001 = 10^{-9}$	одна миллиардная
пико	п	p	$0,000000000001 = 10^{-12}$	одна триллионная

$$1 \text{ кгс} = 100 \text{ кПа}$$

1 атмосферного давления $101325 \text{ па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$
 энергия $1 \text{ Дж} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 10^7 \text{ эрг.} = 0,239 \text{ кал.} = 2,78 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{ч}$
 мощность $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт} = 102 \text{ кгс} \cdot \text{м/с} = 10^{10} \text{ эрг/с} = 1,36 \text{ л.с.}$
 средняя скорость движения молекул $\text{O}_2 - 440 \text{ м/с}$

$\text{CO}_2 - 376$ при 20°C
 $\text{O}_2 - 556$
 $\text{CO}_2 - 475$

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ, ИХ РАЗМЕРНОСТИ И ПЕРЕВОДНЫЕ МНОЖИТЕЛИ

Исторически использовались различные системы единиц: электростатическая (СГСЭ), электромагнитная (СГСМ), система Гаусса (СГСГ или просто СГС), практическая (МКСА) – рационализированная и нерационализированная. С 1964 г. введена международная система СИ.

В абсолютных системах единиц Гаусса (СГС); электростатической (СГСЭ) и электромагнитной (СГСМ) исходными являются единицы: массы – грамм (g), длины – сантиметр (cm), времени – секунда (s).

В Международной системе единиц СИ исходными являются единицы: массы – килограмм (kg), длины – метр (m), времени – секунда (s) и силы тока – ампер (A). Ампер рассматривается как независимая единица.

Для введения производных электрических единиц:

- в системах СГС и СГСЭ исходят из взаимодействия зарядов, определяя единицу заряда из закона Кулона;
- в системах СИ и СГСМ исходят из взаимодействия токов;
- в системе СИ единица тока введена как независимая, и закон взаимодействия токов используется для определения магнитной постоянной μ_0 ;
- в системе СГСМ закон взаимодействия токов используется для определения силы тока.

Абсолютная гауссова система базируется на системе СГС (сантиметр, грамм, секунда). Сила измеряется в производных единицах – динах ($1 \text{ дин} = 1 \text{ г см/с}^2$), основанных на выборе коэффициента пропорциональности во втором законе Ньютона, равном единице.

Положим аналогично равным единице и коэффициент пропорциональности в законе Кулона, т.е. напишем:

$$F_{1,2} = \frac{q_1 q_2}{\epsilon \cdot r_{1,2}^2},$$

тогда этот закон определит СГС единицу заряда. При $\epsilon=1$, т.е. в вакууме, и при $r_{1,2}=1$ заряды $q_1=q_2$ должны быть выбраны так, чтобы $F_{1,2} = 1$. Следовательно, СГС единица заряда есть такое количество электричества, которое действует на равный ему заряд, помещенный в вакуум на расстоянии 1 см, с силой равной 1 дин. (оба заряда точечные). Отсюда следует размерность заряда в системе Гаусса:

$$[q] = [F]^{1/2} [r^3]^{1/2} = g^{1/2} \text{ см}^{3/2} \text{ с}^{-1}$$

В системе СИ для измерения электрических величин вводится не производная, а независимая четвертая единица. В качестве основной электрической единицы выбрана практическая единица тока ампер (А). Единицей заряда в системе СИ является кулон (К), т.е. количество электричества, протекающее за одну секунду через поперечное сечение проводника при токе в цепи, равном 1А:

$$1 \text{ К} = 1 \text{ А с} = 2,998 \cdot 10^9 (\approx 3 \cdot 10^9) \text{ СГЕ ед. заряда.}$$

При введении независимой единицы заряда закон Кулона должен содержать коэффициент пропорциональности, имеющий определенную величину и размерность. Если записать этот коэффициент в виде отношения двух величин k_0 и ϵ_0 , т.е. положим:

$$F_{1,2} = \frac{k_0 q_1 q_2}{\epsilon_0 \epsilon \cdot r_{1,2}^2}$$

Величина ϵ_0 носит название *электрической постоянной*, а множитель k_0 – коэффициент рационализации. Поверхность шара $S = 4\pi r^2$ и полный телесный угол равен 4π .

Поэтому в системе СИ для так называемой рационализации записи формул во все соотношения, описывающие сферически симметричные взаимодействия, вводится дополнительный множитель рационализации

$k_0 = \frac{1}{4\pi}$. Этот множитель вводится в закон Кулона, запись которого в системе СИ принимает вид:

$$F_{1,2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 \epsilon \cdot r_{1,2}^2}$$

Произведение $\epsilon_0 \cdot \epsilon = \epsilon_a$ носит название абсолютной диэлектрической проницаемости данной среды. Величины ϵ_0 и ϵ_a в системе СИ являются размерными. Из последней формулы следует, что:

$$[\epsilon_a] = [\epsilon_0] = \frac{[q]^2}{[F] [r]^2} = \frac{\text{К}^2}{\text{НМ}^2},$$

где, как известно, $-1 \text{ н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2 = 10^5 \text{ дин}$. – единица силы в системе СИ (ньютон).

В таблице для краткости приведены следующие обозначения для величин, не имеющих наименований:

СГС – единицы заряда \equiv СГС (q)

СГСЭ – единицы напряженности электрического поля \equiv СГСЭ (В) и т.д.

Везде принято приближение $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м}/\text{с} = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}/\text{с}$

Таблица 1

Физическая величина,	Физические величины, их размерности			
	СИ международная	СГС Гауссова	Соотношение единиц СИ и СГС	СГСЭ
Электростатический заряд, q	Кулон (к) [q] = а с	[q] = $\text{см}^{3/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}$	$1 \text{ к} = 3 \cdot 10^9 \text{ СГС}(q)$	Совпадает с СГС
Напряженность электрического поля, E	Ньютон/кулон = = 1 вольт/метр [E] = $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{а}$	[E] = $\frac{\text{см}^{-1/2}}{\text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}}$	$1 \text{ В}/\text{м} = 1/3 \cdot 10^4 \text{ СГС}(E)$	Совпадает с СГС
Индукция электрического поля, D	1 кулон/(метр) ² [D] = $\text{м}^{-2} \cdot \text{с} \cdot \text{а}$	[D] = $\frac{\text{см}^{-1}}{\text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}}$	$1 \text{ к}/\text{м}^2 = 4\pi \cdot 3 \cdot 10^5 \text{ СГС}(D)$	Совпадает с СГС
Потенциал электрического поля φ, U	Вольт(В) [V] = $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{а}^2$	[V] = $\frac{\text{см}^{1/2} \cdot \text{г}^{1/2}}{\text{с}^{-1}}$	$1 \text{ В} = 1/300 \text{ СГС}(V)$	Совпадает с СГС
Электрическая емкость, С	Фарада (Ф) [C] = $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{а}^2$	Сантиметр (см) [C] = см	$1 \text{ ф} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см}$	Совпадает с СГС
Электрический ток, I	Ампер (А) [I] = А	[I] = $\frac{\text{см}^{3/2} \cdot \text{г}^{1/2}}{\text{с}^{-2}}$	$1 \text{ А} = 3 \cdot 10^9 \text{ СГС}(I)$	Совпадает с СГС
Электрическое сопротивление R	Ом (Ом) [R] = $\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{а}^{-2}$	[R] = $\text{см}^{-1} \cdot \text{с}$	$1 \text{ Ом} = 1/9 \cdot 10^{11} \text{ СГС}(R)$	Совпадает с СГС

Соотношения некоторых единиц

Мощность

Мощность 1 эрг/с = $1 \cdot 10^7 \text{ Вт}$ 1 гс·см/с = $9,80665 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$ 1 кгс·м/с = $9,80665 \text{ Вт}$
1 т.е. м/с = $9,80665 \cdot 10^3 \text{ Вт}$ 1 л.с. = $735,449 \text{ Вт}$ 1 кал/час = $1,163 \text{ Вт}$

Динамическая вязкость

1 кг/(см·с) = $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ (Па·с) 1 П (пуаз) = $1 \text{ г}/(\text{см} \cdot \text{с}) = 1 \text{ дин} \cdot \text{с}/\text{см} \cdot \text{с}^2 = 10^{-1} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ (Па·с)
1 кгс с/м² = $9,80665 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ (Па·с)

Кинематическая вязкость 1 см²/с = 1 Ст(Стокс) = $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$

Электрические величины

Количество электричества, заряд 1 ед.заряда СГС, СГСЭ, СГС_{ε₀} = $3,33564 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$

Заряд электрона = $1,60206 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, напряженность электрического поля 1Н/Кл = 1В/м; 1 ед. напр. эл. поля = СГС, СГСЭ, СГС_{ε₀} = $2,997925 \cdot 10^4 \text{ В}/\text{м}$; удельное электр. сопротивление 1 Ом мм²/м = $10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

подвижность ионов 1 см²/(В·с) = $10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$

ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ВСТРЯХИВАНИЯ ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА

Известно (1), что оптимизация интервалов встряхивания осадительных электродов электрофильтра позволяет снизить выбросы пыли в 1,3–2,5 раз по сравнению с таковыми при непрерывном режиме встряхивания. Представляет практический интерес на какую величину могут быть снижены выбросы в конкретных случаях эксплуатации.

ПРИМЕР

Пусть степень очистки газов в электрофильтре при непрерывном встряхивании составляет 0,97. Удельное электрическое сопротивление пыли составляет 10^8 Ом · м.

Тогда в соответствии с (1):

$$\eta_0 = 1 - \frac{1 - \eta_\phi}{1 - K \cdot \frac{m_\phi}{m_0}},$$

где η_0 , η_ϕ – степень очистки газов в электрофильтре, соответственно, при оптимизированном и фактическом (до оптимизации) режимах встряхивания осадительных электродов;
 m_0 , m_ϕ – оптимальная и фактическая пылеемкость;

$$m_{cp} = \frac{\tau_\phi \cdot H_0 \cdot Z_{вх} \cdot V_r \cdot \eta_\phi}{16,7 \cdot L_n},$$

где τ_ϕ – фактический интервал встряхивания;
 H_0 – межэлектродное расстояние;
 $Z_{вх}$ – входная запыленность;
 V_r – скорость газов в активной зоне;
 L_n – длина поля.

$$m_0 = 3,14 - 0,251 \lg \rho_v,$$

где ρ_v – УЭС пыли Ом · м.

$$K = 2,37 - 0,16 \lg \rho_v$$

Величина $\frac{m_\phi}{m_0} = \frac{\tau_\phi}{\tau_0}$ поэтому в формуле можно сразу подставлять значения соотношений интервалов встряхивания, что сокращает расчеты. При непрерывном встряхивании $\tau_0 \approx 3-5$ мин.

Величина τ_0 – рассчитывается в соответствии с приложением 7.

Пусть при непрерывном встряхивании $\tau_{cp} = 3$ мин., а при оптимальном встряхивании $\tau_0 = 10$ мин.

При оптимальном встряхивании $m_\phi = m_0$, тогда:

$$\eta_0 = 1 - \frac{1 - 0,97}{1 + 1,09 \cdot 1} = 1 - \frac{0,03}{1 + 1,09} = 0,986$$

$$K = 2,37 - 0,16 \lg \cdot 10^8 = 2,37 - 0,16 \cdot 8 = 1,09$$

Снижение выбросов составит $\frac{1 - 0,97}{1 - 0,986} = 2,1$ раз.

ПРИЛОЖЕНИЕ 16

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА С УЧЕТОМ ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ ГАЗОВ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА

При известном объеме газов и скорости дрейфа улавливаемых частиц представляет практический интерес выбор типоразмера электрофильтра на базе времени пребывания очищаемого газа в активной зоне электрофильтра.

Известно, что:

$$\frac{L_{аз}}{H_0 V_r} = \frac{S}{Q} = \frac{t_{пр}}{H_0}, \quad (1)$$

где $L_{аз}$ – длина активной зоны электрофильтра;

H_0 – межэлектродное расстояние;

V_r – скорость газа в активной зоне электрофильтра;

S – площадь осаждения электрофильтра;

Q – объем очищаемых газов;

$t_{пр}$ – время пребывания газов в электрофильтре.

Из формулы Дэйча с учетом (1) получим:

$$t_{пр} = H_0 / \omega \ln(1 - \eta_{пр}), \quad (2)$$

где $\eta_{пр}$ – требуемое значение степени очистки газов;

ω – скорость дрейфа.

Скорость дрейфа в первом приближении при увеличении межэлектродного расстояния со 150 до 230 мм возрастает примерно на 10–15 %.

$$t_{пр} = SH_0 / Q \quad (3)$$

Учитывая, что

$$S = 2 \cdot 0,64 n_{прох} n_{эл} (h + 0,2) N, \quad (4)$$

где $n_{прох}$ – количество газовых проходов в электрофильтре;

h – высота электродов;

N – количество полей.

Подставив (3) в (4) получим:

$$t_{пр} = (L_{аз} n_{прох} (h + 0,2) 2H_0) Q \quad (5)$$

Таким образом, для обеспечения требуемого времени пребывания газов в активной зоне электрофильтра можно изменять длину активной зоны (L), ширину электрофильтра – количество газовых проходов – ($n_{прох}$), и высоту электродов (h).

При этом необходимо иметь в виду, что габаритная ширина электрофильтров включает в себя также промежутки между электродами и корпусом, толщину стенки корпуса и ширину привода (приводов) встряхивания осадительных электродов.

Кроме того, следует также учитывать, что для отечественных энергетических углей максимум зависимости скорости дрейфа от скорости газов находится в диапазоне примерно 0,8–1,2 м/с и эту величину скорости газов в активной зоне целесообразно выбирать при проектировании установок электрогазоочистки в теплоэнергетике при сжигании энергетических углей.

Для электрофильтров, сжигающих экибастузские угли и другие, дающие интенсивную обратную корону скорость газов, как правило, (с учетом установки коронирующих элементов типа СФ-1, СФ-2) не должна превышать 0,8–1,0 м/с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Глава 1

1. Гордон Г.М., Пейсахов И.Л. Контроль пылеулавливающих установок. М., «Металлургия», 1973.
2. Идельчик И.Е. Аэродинамика технологических аппаратов. М., «Машиностроение», 1983.
3. Страус В. Промышленная очистка газов. М., «Химия», 1981.
4. Функе Г. Линейная скорость газов в активной зоне электрофильтра. // Zement, Kalk, Gips, 1959, v, 12p / 189.
5. Функе Г., Котама Р.Л. Доклад № 29. // Zement, Kalk, Gips, 1959, v, 12
6. Чекалов Л.В., Ткаченко В.М. Пути интенсификации работы электрофильтров. // Электрические станции, № 3, 2005.

Глава 2

1. Райст П. Аэрозоли. М., «Мир», 1987.
2. Глинка Н.А. Общая химия. М., «Химия», 1977.
3. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М., «Химия», 1967.
4. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. М., «Химия», 1987.
5. Верецагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М., «Энергия», 1974.
6. Скрябин Г.М. Ротационные анализаторы дисперсного состава промышленной пыли. // Промышленная и санитарная очистка газов, ЦНИИТ, М., «Энефтехим», 1973.
7. Авдеев Н.Я. Расчет гранулометрических характеристик полидисперсных систем. Ростов-на-Дону, «Ростовское книжное издательство», 1966.
8. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955.
9. Ромашов Г.И. Основные принципы и методы определения дисперсного состава промышленных пылей. Л., «ЛИОТ», 1938.

Глава 3

1. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. М., «Мир», 1987.
2. White H.J. Industrial Electrostatic Precipitation. Addison. New York, Wesley, 1963.
3. Боровой А.А. и др. Законы электромагнетизма. М., «Наука», 1970.
4. Страус В. Промышленная очистка газов. М., Химия, 1981.
5. Верецагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М., «Энергия», 1974.
6. Dalmon J., Lowe H.J. Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique Grenoble. 27th Sept, 1960.
7. Busby H.G.T., Darby K. Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique Grenoble. 27th Sept, 1960.
8. Санаев Ю.И., Курицын Н.А., Морозов Ю.М. Электрофильтр. Патент на изобретение № 2304470.
9. Санаев Ю.И. Экспериментальное исследование уноса пыли в электрофильтрах и разработка методов его снижения/Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, М., 1978.
10. Forrest T.S., Lowe H.J. Mechanical Engineer' contribution to clean air. Inst. Mech.Engrs. h42, 1957.
11. Little A. Trans. Instn Chem. Engrs. London, 1956.
12. Lean K.I. Electr. Engng. Trans. Inst. Engrs, Austral, 1968. Influence of contaminated collecting plates on the performance of electrostatic precipitators.
13. Brandt H. Der Entwicklungstand der electrostatischen Staubabschneider unter besonderer Berücksichtigung der Abreinigungprobleme. Staub 21, 9, 1961.
14. König W. Zum Verhalten des Staubes im Elektrofilter. Dis. TH, Stuttgart, 1965.
15. Жебровский С.П. Электрофильтры. М., «Госэнергоиздат», 1950.
16. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М., «Химия», 1967.
17. Уайт П., Смит Е. Высокоэффективная очистка воздуха. М., «Атомиздат», 1967.
18. Rose H.E., Wood A.J. The Introduction to the Elektrostatic Precipitations in the Theory and Practice, London, Constable and Co, 1956.
19. Детри Н. Атмосфера должна быть чистой. М., «Мир», 1973.
20. Уоткинс Э., Дарби К. Применение электростатического осаждения пыли в чёрной металлургии./Очистка газов в металлургии. М., «Металлургия», 1968.
21. Heinrich D.O. Die Elektrische Gasregirung, Brennsteff – Warme-Krafte, 7, № 8, 1955.
22. Anderson J.R. Chemical Engineering practice, v.3, 1663, 1972.
23. Санаев Ю.И. Влияние изменения параметров пылегазовой среды по длине электрофильтра на степень очистки газов. // Химическое и нефтяное машиностроение. № 7, 2006.
24. Вальдберг А.Ю. Экологические требования при утилизации пылей. Госстандарт России, «Наука», 2006.

Глава 4

1. *Биргер М.И., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И.* Справочник по пылезолоулавливанию. М., «Энергоатомиздат», 1983.
2. *Санаев Ю.И.* Экспериментальное исследование уноса пыли в электрофильтрах и разработка методов его снижения./Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 1978.
3. Каталог пылеулавливающего оборудования./Под ред. Чекалова Л.В., Ярославль, ЗАО «Кондор-Эко», 2006.
4. *Чекалов Л.В., Гузаев В.А., Курицын Н.А., Санаев Ю.И.* Элемент коронирующего электрода электрофильтра. Патент на изобретение № 2229939.
5. *O. Gupner* Richtigungen und Moglichkeiten der Entwicklung des Klassisehen elektrichen Enstaubers. Tagung der VDI Fashgruppe Staub, № 12, 1963.
6. *Санаев Ю.И.* Влияние числа полей в электрофильтрах на унос пыли при встряхивании.//Химическое и нефтяное машиностроение. М., № 8, 1988.
7. *Санаев Ю.И.* Влияние изменения параметров пылегазовой среды по длине электрофильтра на степень очистки газов/Химическое и нефтегазовое машиностроение. М., № 7, 2006.
8. Экотехника./Под ред. Чекалова Л.В. Ярославль, «Русь», 2004.
9. *Пикулик Н.В., Евсюков В.Н., Дудкин Н.И. и др.* Автоматизация нестационарных процессов электрической очистки газов. Обзорная информация. Серия ХМ-14. М., «ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ», 1989.
10. Патент № 59-24862 (Япония)
11. Патент № 59-50383 (Япония)
12. Патент № 59-18954 (Япония)
13. Патент № 4831927 (США)
14. Патент № 41194164. (США)
15. Патент № 57-45621 (Япония)
16. Авторское свидетельство № 584449 (СССР)
17. *Верещагин И.П., Ткаченко В.М., Панев С.Н.* Промышленная и санитарная очистка газов. М., «ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ», № 4, 1985.
18. *Верещагин И.П., Ткаченко В.М., Панев С.Н.* Промышленная и санитарная очистка газов. М., «ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ», № 5, 1985.
19. *Катица П.Л.* Эксперимент, теория, практика. Электроника больших мощностей. М., «Наука», 1981.
20. *Санаев Ю.И.* Электрофильтры: монтаж, наладка, испытание, эксплуатация./Обзорная информация. Серия ХМ-14. М., «ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ», 1984.

Глава 5

1. *Акбурт А.И.* Методика испытаний золоулавливающих установок для котельных агрегатов. Уральское отделение ОРГРЭС, Свердловск, 1978.
2. *Алиев Г.М., Гоник А.Е.* Прибор для измерения удельного электрического сопротивления промышленных пылей «Циклоном-1». М., ГосИНТИ, 1968.
3. Руководящий технический материал РТМ26-14-07-77. Управление газоочистки Министерства химического и нефтяного машиностроения. Семибратово, 1977.

Глава 6

1. *Л.В.Чекалов.* Научные основы создания электрогазоочистного оборудования нового поколения./Автореферат диссертации на соискание степени доктора технических наук. М, 2007.

Глава 7

1. *Rose H., Wood A.* An Introduction to Electrostatic Precipitation in Theory and Practice. Lond., Constable, 1953.
2. *Ужов В.Н.* Очистка промышленных газов электрофильтрами. М., «Химия», 1967.
3. *Белевицкий А.М.* Проектирование газоочистных сооружений. Л., «Химия», 1990.
4. Каталог пылеулавливающего оборудования/Под ред. Чекалова Л.В. Ярославль, ЗАО «Кондор-Эко», 2006.
5. *Санаев Ю.И.* Влияние изменения параметров пылегазовой среды по длине электрофильтра на степень очистки газа/Химическое и нефтегазовое машиностроение. № 7, 2006.
6. *Страус В.* Промышленная очистка газов. М., «Химия», 1981.
7. *Robinson M.* The Role of turbulense in electrostatic presipitation? Paper №67 – 34, 60th Ann. Meeting , Air Polut. Control Ass., Cleveland, 11th 0 16th June, 1967.
8. *Frieland S.K.* Principles of gas – solid separation in dry systems, Chem. Engng Prop. Symp. Ser., 55, 139-49, 1959.

9. *Williams J.L., Jackson R.* Third Cong. Of European Federation of Chemical Engineering – Section «The Interaction Between Fluids and Particles», P.C. 51, 22nd June, 1962.
10. *Инюшкин Р.В., Авербух Я.Д.* Химия и химические технологии. № 6, 10, 31, 1963.
11. *Cooperman P.* Turbulent gas flow and electrostatic precipitation, Am. Inst. Elecn Engrs, Winter Gerneral Meeting, N.Y., 1960.
12. *Санаев Ю.И.* Экспериментальное исследование уноса пыли в электрофильтрах и разработка методов его снижения./Кандидатская диссертация. М., 1978.
13. *Аладжалов И.А.* Расчет степени очистки газов в сухих электрофильтрах/ Цветная металлургия. № 4, 1989.
14. *Гурвиц А.А.* Пылеулавливание в металлургии. Справочник. М., «Металлургия», 1984.
15. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., «Машиностроение», 1975.

Глава 8

Глава 9

1. ГОСТ 17.24.06.. Определение скоростей по измерительному сечению. ГОССТАНДАРТ РОССИИ. М.
2. *Ужов В.Н.* Очистка промышленных газов электрофильтрами. М.Химия, 1976
3. ГОСТ Р 50820-95. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков. ГОССТАНДАРТ России., М.
4. *Жебровский С.П.* Электрофильтры. М., «Госэнергоиздат», 1950.
5. *Алиев Г.М.* Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. М., «Металлургия», 1986.
6. *Страус В.* Промышленная очистка газов. М., «Химия», 1981.
7. *Верецагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.Э., Пашин М.М.* Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М., «Энергия», 1974.
8. *Чекалов Л.В.* Научные основы создания электрогазоочистного оборудования нового поколения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Семибратово, 2007.
9. *Жебровский С.П.* Физический журнал № 33, 1932.
- 10.