

РГБ ОМ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

ГУО Цзэпин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДКИ И ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ПОЛЕ ДВУХЗОННОГО  
МАЛОГАБАРИТНОГО ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА С ЦЕЛЮ ВЫБОРА  
ЕГО ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Специальность 05.09.13—техника сильных электрических  
и магнитных полей

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

郭洁萍

Москва 1994

Работа выполнена на кафедре Техники и электрофизики высоких напряжений Московского энергетического института.

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор И.П.Верещагин

---

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор В.И.Переводчиков;  
кандидат технических наук,  
И.К.Решидов

Ведущее предприятие - Научно-Производственная Фирма  
Электронно-Ионная Технология и  
Экология

Защита диссертации состоится "18" ноября 1994 г. в  
аудитории 1-201 в 13 час. \_\_\_ мин. на заседании специализиро-  
ванного совета К.053.16.07 Московского энергетического института.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью,  
просим присылать по адресу: 105835, ГСП, Москва, Е-250, Красно-  
казарменная ул., д.14, Совет МЭИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ.

Автореферат разослан " \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

К.053.16.07

к.т.н.

*Т-28*

Тарасова Т.Н.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время широкое распространение в промышленности получила электрическая очистка газов. Известен ряд способов электрогазоочистки и реализующих их конструкций, постоянно появляются новые. Среди них широкое применение находят двухзонные малогабаритные конструкции.

Положительными свойствами электрофильтров этого типа являются низкие массогабаритные и высокие технические характеристики: небольшое, 5-10 Па, гидравлическое сопротивление; высокая, до 99% и выше, степень очистки для частиц до 0,01-1 мкм. Применение малогабаритных электрофильтров не требует капитального строительства и специального обслуживания.

Однако возможности двухзонных малогабаритных электрофильтров не реализуются в полной мере. Главной причиной является то, что конструирование и выбор режима работы таких электрофильтров ведутся на эмпирической основе, на базе технологической практики без глубокого обобщения и исследования физических основ процесса.

Имеется небольшое количество литературных данных по вопросам, посвященным исследованию физических закономерностей в двухзонных малогабаритных электрофильтрах. Большая информация по крупногабаритным фильтрам не может быть использована в силу существенного их конструктивного отличия.

Прогресс в области разработки двухзонных малогабаритных электрофильтров требует дополнительного изучения основных физических процессов: зарядки и движения частиц в поле коронного разряда (к.р.), лежащих в основе их работы. Таким образом, поставленная задача является актуальной.

Целью работы является создание математической модели процесса очистки газов от частиц в двухзонном малогабаритном электрофильтре и обоснование на ее основе его улучшенных конструктивных параметров.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

- разработка математической модели, учитывающей совместное влияние основных конструктивных и электрических параметров электрофильтра, характеристик газовой воздушного потока и удаляемых частиц на эффективность газоочистки и позволяющей определить улуч-

шенные конструктивные параметры электрофильтра:

- провести экспериментальное исследование основных физических процессов, лежащих в основе процесса очистки газов от частиц в двухзонном малогабаритном электрофильтре с целью обоснования и подтверждения математической модели:

- на основе математической модели и экспериментальных данных дать уточненное представление об организации процесса очистки газа от частиц в двухзонном малогабаритном электрофильтре:

- разработать принципы конструирования малогабаритных двухзонных электрофильтров и инженерную методику выбора конструктивных и режимных параметров и расчета эффективности очистки газов в ДМЭ:

- разработать усовершенствованные варианты конструкции двухзонного малогабаритного электрофильтра.

Метод исследования. В работе использовался комплексный метод, заключающийся в сочетании теоретического анализа, натурного и математического экспериментального исследования основных физических процессов, лежащих в основе электрогазоочистки, выявления закономерностей и их обобщении с привлечением расчетов на ЭВМ. Экспериментальное исследование проводилось в широком диапазоне параметров и режимов работы электрофильтра и выделяемых частиц с привлечением разных методов измерения. При обработке экспериментов применялся статистический анализ результатов.

Научная новизна работы. 1. Разработана математическая модель процесса очистки газов от частиц в двухзонном малогабаритном электрофильтре, включающая

-научно обоснованный подход к траекторному анализу процессов в двухзонном малогабаритном электрофильтре:

-методику расчета распределения плотности тока по поверхности коронирующего электрода зарядного устройства электрофильтра:

-научно обоснованный учет совместного действия ударного и диффузионного механизмов зарядки частиц в нестационарных условиях процесса:

-программное обеспечение расчетов на ЭВМ процессов зарядки и движения частиц в электрических полях зон зарядки и осаждения электрофильтра.

2. Разработан и применен для анализа метод исследования

процесса газоочистки в двухзонном малогабаритном электрофилт্রে, включающий натурное и математическое экспериментирование в широком диапазоне параметров электрофилтра, газовоздушного потока и характеристик выделяемых частиц.

3. На основе математической модели и экспериментального исследования дан анализ эффективности зарядки частиц и предложено уточненное представление о протекании процессов зарядки и движения частиц, лежащих в основе газоочистки.

4. Обоснованы принципы конструирования двухзонных малогабаритных электрофилтров, включающие рациональное соотношение способа расположения электродов и режима их питания высоким напряжением в различных зонах электрофилтра.

Практическая значимость. 1. Разработаны инженерная методика рациональной организации процесса электрогазоочистки и выбора режима работы двухзонного малогабаритного электрофилтра.

2. Предложено устройство, позволяющее повысить эффективность работы электрофилтра или при определенной эффективности уменьшить металлоемкость и габариты за счет рационального использования получаемых в зарядной зоне зарядов частиц при их улавливании в зоне осаждения.

На защиту выносятся. 1. Уточненное представление о протекании процессов зарядки и движения частиц, лежащих в основе процесса газоочистки в двухзонном малогабаритном электрофилт্রে.

2. Математическая модель процесса очистки газов от частиц в двухзонном малогабаритном электрофилт্রে.

3. Принципы организации процесса очистки газов от частиц в двухзонном малогабаритном электрофилт্রে и инженерные методики выбора конструктивных и режимных параметров и эффективности двухзонного малогабаритного электрофилтра.

4. Обоснование усовершенствованной конструкции двухзонного малогабаритного электрофилтра.

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры Техники и электрофизики высоких напряжения МЭИ.

Публикации. По теме диссертационной работы выпущены 2 научно-исследовательских отчета, подана заявка на патент.

Объем и структура работы. Диссертация общим объемом 258 страниц, состоит из введения, шести глав, списка литературы (87

наименования), содержит 127 страниц основного текста, 92 рисунка, 20 таблиц, 5 приложения.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность проблемы исследования основных процессов в двухзонных малогабаритных электрофильтрах и определена цель работы.

---

В первой главе анализируются литературные данные о двухзонных малогабаритных электрофильтрах (ДМЭ), рассмотрены основные физические процессы, состояние и развитие в области теоретического и экспериментального исследований. Показано, что основным подходом к выбору режимов и конструированию ДМЭ является эмпирический подход, основанный на технологических опытах. Отсутствуют надежные способы и теоретические методы конструирования и выбора режимов работы ДМЭ. Такой подход не дает уверенности, что разработанные процессы и аппараты обеспечивают разделение оптимальным образом. Дальнейший прогресс в области разработки ДМЭ требует дополнительного изучения основных процессов, т.е. процессов зарядки и движения частиц в зарядном устройстве (ЗУ) и процесса осаждения в осадительном устройстве (ОУ). В качестве конкретной конструкции для исследования выбран наиболее распространенный на практике ДМЭ (см. рис. 1), имеющий диффузор 1, конфузор 2, между которыми расположены предфильтр 3 механической очистки воздуха от крупных частиц, зарядное коронирующее устройство 4 с коронирующими проводами 8, электростатическое осадительное устройство 5 и на выходе дополнительный механический фильтр 6. Внутри конфузора предусматривается газораспределительное приспособление 7.

На основе обзора и анализа литературы сформулированы задачи, заключающиеся в усовершенствовании конструкции ДМЭ на основе исследования закономерностей зарядки и движения частиц в электрическом поле электрофильтра.

Во второй и третьей главах рассмотрены вопросы, связанные с экспериментальными исследованиями.

Во второй главе рассматривается методика проведения экспериментальных исследований и созданный для ее реализации экспериментальный стенд. Основу экспериментального стенда составляет лабораторный электрофильтр. Выбраны экспериментальные методы измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), плотности тока по плоскости, заряда и эффективности осаждения частиц. Эти парамет-

ры полностью определяют работоспособность электрофильтра.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям основных процессов, лежащих в основе ДМЭ. На экспериментальном стенде по выбранным методам проводились исследования систем электродов "гладкий провод между плоскостями" и "провод с иглами между плоскостями". Иглы закреплялись на проводе большого диаметра попарно и были направлены навстречу потоку газа. При сравнении экспериментальных результатов заметно, что система провода с иглами имеет большую плотность тока, заряд и эффективность ЗУ. Кроме этого, для данной системы, за счет принятой ориентации игл, влияние ОУ на поле зарядного мало и можно сократить расстояние между ними. Это приведет к уменьшению габаритов ДМЭ. Экспериментальные результаты также использовались для обоснования и подтверждения математической модели.

В электрофильтре основной процесс проявляется через воздействие электрического поля на частицы, поэтому для построения математической модели необходимы данные о характеристиках поля коронного разряда (к.р.). Этим вопросам посвящена четвертая глава.

Для расчета поля использовался метод Дэйча-Попкова (Д-П). При применении этого метода были трудности с расчетом коэффициента распределения плотности тока по поверхности коронирующего провода для разных систем электродов.

В работе получена обобщенная зависимость коэффициента для разных силовых линий в виде

$$k = 1.29 + 1.10 \times 10^{-9} \theta - 2.06 \times 10^{-4} \theta^2 + 1.56 \times 10^{-6} \theta^3 - 6.47 \times 10^{-9} \theta^4,$$

где  $\theta$  - полярный угол в плоскости конформного отображения.

Для параметров электрофильтра (радиус провода  $r_0 = 0.05 \pm 0.2$  мм, межэлектродное расстояние  $b = 20 \pm 30$  мм, напряжение  $U = 7 \pm 15$  кВ) данная формула дает погрешность не больше 6%. Это обеспечивает точность расчета напряженности поля  $E$  и плотности объемного заряда  $\rho$  не хуже 10%.

В качестве критерия точности расчета брались формулы, полученные по методу разложения в ряд (Р.Р.). Наибольшие погрешности имеют место для силовых линий, далеких от оси симметрии электродной системы. Однако в этих точках абсолютные значения характеристик поля малы. Поэтому погрешности в начальные моменты времени движения частиц не приводят к большой погрешности при расчете процесса в целом. При расчете поля для систем с гладкими

проводами метод Д-П использовался в прямом виде. Для проводов с иглами поле рассчитывалось путем эквивалентирования цилиндрическим проводом. Эквивалентный радиус провода выбирался из экспериментальных данных по начальному напряжению. Проведено сравнение результатов расчета поля по данному методу с экспериментальными данными и с результатами расчетов по методу силовых трубок, разработанному И.П.Верещагиным и А.А.Белогловским. Получено хорошее (в пределах 15%) совпадение данных. Однако, результаты расчета применимы только для сечения, в котором расположены иглы. С учетом несимметричности этого трехмерного поля результаты усредняются по длине провода с помощью экспериментальных или расчетных данных.

По данной методике было проанализировано поле коронного разряда в ЗУ. Выявлено, что в центральной области канала (вблизи центральной силовой линии) имеются большие значения напряженности поля и плотности объемного заряда, а в области около входа и выхода их значения малы. Такой характер позволяет разделить зарядное устройство на эффективную и неэффективную зоны. При конструировании неэффективную зону можно сократить.

Метод расчета поля является составной частью математической модели процесса очистки газов в электрофильтре, вопросам построения которой посвящена пятая глава. В электрофильтре основными процессами являются движение и зарядка частиц. При построении математической модели принят траекторный подход. Суть его заключается в том, что движение частиц можно рассматривать по отдельным траекториям независимо друг от друга. Такое движение частиц существует в ламинарном потоке, где число Рейнольдса меньше 2000 или в неламинарном, в котором отношение скорости направленного движения к скорости перемещения под действием турбулентной диффузии, больше 100. Такое движение частиц является в основном направленным.

Кроме этого, переход к турбулентному течению происходит на определенном расстоянии. Поэтому область направленного движения частиц можно расширить. Для конструкции ДМЭ при диапазонах параметров, которые встречаются на практике, движение частиц является направленным и не зависит друг от друга, т.е. можно принять траекторный подход.

Исходя из траекторного подхода построена математическая мо-



дель. По математической модели приняты следующие допущения: частица имеет сферическую форму; частица движется поступательно; поток очищаемого воздуха равномерно распределен по каналам и равномерен по сечению каждого канала; частицы полностью увлекаются потоком.

Математическая модель включает в себя вместе с характеристиками поля систему уравнений движения и зарядки частиц и начальные условия. В уравнении движения учитываются сила электрического поля, сила сопротивления среды и сила тяжести. В уравнении зарядки учитывается совместное действие ударного и диффузионного механизмов. В системе относительных единиц при следующих базисных данных:

$$v_0 = v_0 - 1 \text{ г} = 1 \text{ г} / \text{см}^3, \quad v_0 = 1 \text{ м} / \text{с}, \quad E_0 = m v_0 / (t_0 q_0), \quad C_0 = 2\pi / (r_0 v_0 \gamma_0 a^2)$$

$$R_{00} = 2V_0 \gamma_0 a / \mu, \quad q_0 = \pi q_0 t_0 (4\pi \epsilon_0)^{-1} e m v_0 a^2 / t_0, \quad \rho_0 = 4\epsilon_0 / (t_0^2 \gamma_0), \quad \epsilon = 1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}$$

математическая модель имеет следующий вид:

$$\frac{dx}{dt} = v_x + u_x, \quad \frac{dy}{dt} = v_y + u_y,$$

$$\frac{dv_x}{dt} = E_x q - C_x v_x v_x, \quad \frac{dv_y}{dt} = E_y q - C_x v_y v_x - C_{12},$$

$$\frac{dq}{dt} = \rho q_m (1 - q_{YA} / q_m)^2, \quad \frac{dq_{диф}}{dt} = C_{10} \frac{\rho q_{диф}}{\epsilon \pi r_0 (C_{12} q_{диф} - 1)},$$

$$q = q_{YA} + q_{диф},$$

$$C_x = \frac{C_0}{Re} + \frac{C_7}{Re^{1/3}}, \quad Re = v \cdot \rho_m = E,$$

$$E = E(x, y, U, h, r_0), \quad \rho = \rho(x, y, U, h, r_0),$$

$$C_0 = \frac{24}{C_{x0} Re_0 (1 + A) / a}, \quad C_7 = \frac{4}{Re_0^{1/3} (1 + A) / a},$$

$$C_{10} = \frac{q_0}{0.1 \pi \epsilon_0 a}, \quad C_{12} = \frac{9.8 t_0}{V_0},$$

где  $v_x, v_y$  - составляющие скорости частиц;  $u_x, u_y$  - составляющие скорости потока газов;  $E$  - напряженность поля;  $\rho$  - плотность объемного заряда;  $q_{YA}, q_{диф}$  и  $q$  - ударный, диффузионный и суммарный заряд частиц;  $a$  и  $m$  - радиус и масса частицы;  $\gamma_0$  - плот-

ность газа:  $\mu$  - вязкость газа;  $\mu_i$  - подвижность ионов.

Для решения систем уравнений составлена программа расчета на ЭВМ. Время расчета одного варианта 0.5-2 часа.

В работе встречались трудности, связанные с учетом одновременного действия ударного и диффузионного механизмов зарядки частиц при нестационарных условиях. В литературе принято, что при стационарных условиях следует суммировать заряды. Для нестационарных условий этот вопрос не исследовался. Рассчитать заряды можно двумя способами: путем сложения зарядов или сложения потоков ионов. В данной работе рассмотрены оба эти способа. При стационарных условиях применение метода суммирования потока ионов дает погрешность в 40%. При переменных условиях различие для двух подходов остается на этом же уровне. Проведенный количественный анализ зарядки частиц с учетом характера их движения показал, что при переменных условиях также следует использовать метод сложения зарядов.

Для проверки математической модели и программы решались тестовые задачи. Эти расчеты сравнивались с результатами аналитических расчетов. Получено практически полное совпадение данных.

Для сложных условий результаты расчетов заряда и эффективности осаждения частиц в ЗУ сравнивались с экспериментальными данными. Получено хорошее совпадение. Различие не превышает 10%.

Все это подтвердило правильность метода "сложения" зарядов" при учете двух механизмов при нестационарных условиях. Также подтверждена работоспособность созданной модели и программы расчетов.

В шестой главе рассмотрены вопросы, связанные с анализом поведения частиц в ДМЭ и на их основе разработаны принципы конструирования и предложено усовершенствование конструкции ДМЭ.

В начале главы рассмотрены методики оценки конструкции зарядного, осадительного устройств и электрофильтра в целом. Оценка ЗУ проводилась на основе среднего заряда. В ОУ суммарная длина осадительной плоскости или траектория движения частиц позволяет оценить эффективность его конструкции. Для оценки ДМЭ в целом был предложен метод расчета эффективности в целом по разработанной математической модели.

Расчет эффективности ДМЭ можно осуществить по следующему алгоритму.

1. Рассчитывается заряд и траектория движения частиц в ЗУ и ОУ электрофильтра для определенного размера частиц. С помощью анализа траектории движения частиц рассчитывается фракционная эффективность электрофильтра по формуле

$$\eta(\cdot) = \frac{n_{\text{ос}}}{n_{\text{ос}} + n_{\text{вых}}}, \text{ где } n_{\text{ос}} - \text{число частиц, оседающих на осадительных плоскостях; } n_{\text{вых}} - \text{число частиц, выходящих за пределы ОУ.}$$

2. Строится зависимость фракционной эффективности от размера частиц  $\eta(\cdot)$ .

3. Для данного распределения частиц по размерам  $f(\cdot)$  рассчитывается суммарная эффективность по формуле

$$\eta = \int_0^{\infty} f(\cdot) \eta(\cdot) d\lambda$$

В качестве примера была рассчитана эффективность электрофильтра, который взят из литературы. Фракционная эффективность при разных радиусах проводов показана на рис.2.

Результаты расчетов эффективности ДМЭ в целом сравнивались с экспериментальными данными, которые взяты из данной литературы. Получено совпадение результатов в пределах 5%.

Из рис.2 видно, что для частиц диаметром 0.3 мкм, имеется минимальная эффективность ДМЭ. Это согласуется с теоретическим анализом. Известно, что частицы диаметром 0.3 мкм имеют минимальные подвижности в электрическом поле. Это означает, что эти частицы будут наиболее трудно оседать в ОУ, поэтому для них ДМЭ имеет минимальную эффективность. Также заметно, что при разных условиях, зависимости эффективности от размеров частиц имеют одинаковые закономерности. Это дает возможность обобщения этой зависимости и обоснования инженерной методики расчета ДМЭ.

Проведены исследования поведения частиц в ЗУ и ОУ при использовании созданной математической модели.

Заряд частиц в ЗУ (см.рис.3) в области около входа ( $x=44$  мм) и выхода ( $x=44$  мм) растет медленно, а в области около провода быстро. Это означает, что центральная часть наиболее эффективна. Это согласуется с зонами по характеристикам электрического поля. Результаты расчетов показали, что при сокращении протяженности ЗУ на неэффективную область, заряд частиц практически не уменьшился (сравни зависимости 3 и 4 на рис.3).

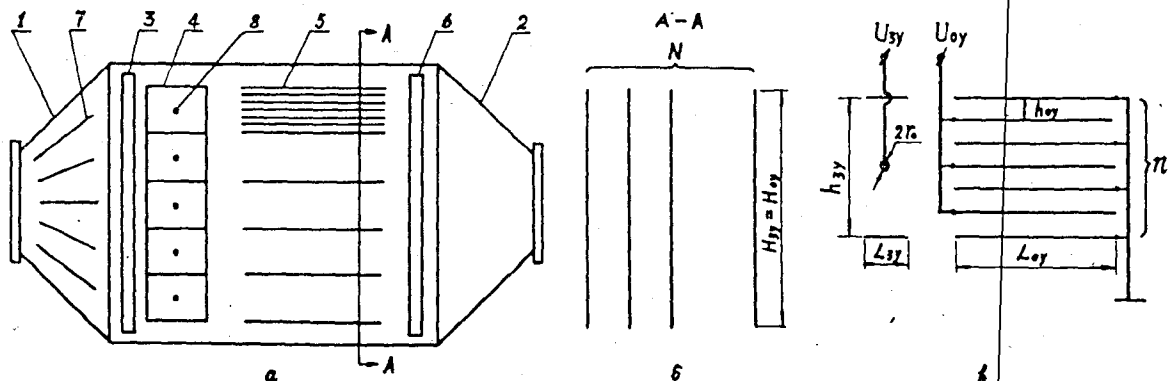


Рис.1 Конструкция ДМС: а-вид сверху, б-поперечное сечение, в-продольное сечение

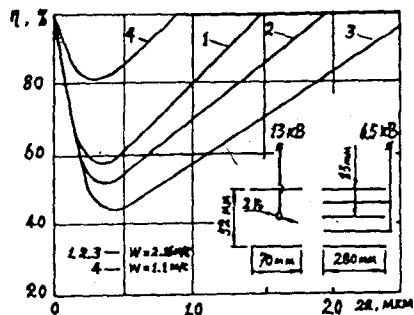


Рис.2 Фракционная эффективность ДМС:  $w=2.16$  м/с,  $1-\zeta=0.1$  мм,  $2-\zeta=0.2$  мм,  $3-\zeta=0.3$  мм;  $w=1.1$  м/с,  $4-\zeta=0.2$  мм

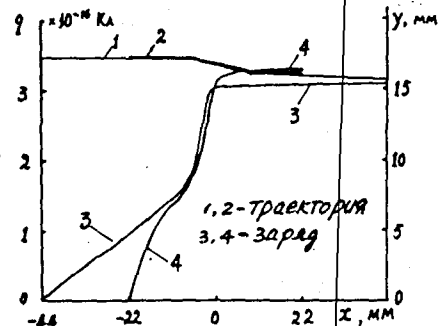


Рис.3 Траектории и зависимости зарядов от пути в ЗУ:  $U_{zy}=13$  кВ,  $\zeta=0.15$  мм,  $h_{zy}=41$  мм,  $w=2.6$  м/с

Частицы уходят из ЗУ с определенными зарядами. Распределение заряда по сечению канала на выходе из ЗУ не равномерно (рис.4). В центральной области заряд частиц имеет большее значение. Ранее в конструкциях электрофильтров этот факт не учитывался.

Было исследовано влияние радиуса, межэлектродного расстояния и напряжения на средний заряд при условиях постоянной производительности или постоянной скорости очищаемого газа. Количественные данные позволяют оценить очередность степени влияния. Увеличение среднего заряда можно достичь путем увеличения напряжения или уменьшения межэлектродного расстояния и радиуса провода.

В ОУ исследовалось поведение частиц диаметром 0.3 мкм, которые хуже всего улавливаются электрофильтром. Траектория имеет почти линейный характер. Для определенного размера частиц и условий движения имеется эквивалентная длина ОУ. Увеличение числа каналов приводит к уменьшению межэлектродного расстояния, при этом длина канала может быть уменьшена, однако, суммарная длина остается постоянной. Это позволяет правильно учесть неравномерность распределения заряда по сечению при выборе конструкции ОУ.

На основе анализа поведения частиц в ЗУ и ОУ были сформулированы принципы конструирования ДМЭ. Они учитывают физические закономерности и количественные данные расчетов.

Основными принципами являются следующие.

Для ЗУ - максимальная зарядка:

- увеличение напряжения;
- уменьшение межэлектродного расстояния;
- уменьшение радиуса провода - использования провода с иглами.

Для ОУ - максимальное осаждение и минимальные габариты:

- симметричное расположение электродов;
- обеспечение одноименного знака потенциалов коронирующего провода ЗУ и центрального электрода ОУ;
- применение электродов с переменными длинами или с переменными межэлектродными расстояниями.

На основе принципов конструирования и анализа поведения частиц были разработаны инженерные методики расчета эффективности и конструирования электрофильтра.

Особенностью методики расчета эффективности является обоб-

щная зависимость для фракционной эффективности. Сутью этой методики является определение эффективности для частиц диаметром 0.3 мкм и для частиц радиусом  $a$ , которые оседают со 100% вероятностью. Расчет выполняется следующим образом.

1. Расчет среднего заряда по формуле

$$\lg q_{CP} = (\lg q_{CP1.5} - \lg q_{CPO.15}) \cdot (\lg a + 5.823) + \lg q_{CP1.5}$$

где  $q_{CP1.5}$ ,  $q_{CPO.15}$  и  $q_{CP}$  - средние заряды частиц радиусом 1.5 мкм, 0.15 мкм и  $a$ . Средние заряды  $q_{CP1.5}$  и  $q_{CPO.15}$  находятся из графиков рис.5 для диапазонов параметров ДМЗ:  $r_0 = 0.05-0.2$  мм,  $n_{ав} = 20-60$  мм,  $U_{ав} = 10-15$  кВ.

2. Расчет фракционной эффективности  $\eta(a)$ .

Фракционная эффективность  $\eta(a)$  рассчитывается по формулам

$$\eta(a) = \begin{cases} 1 - \frac{a}{0.15 \times 10^{-6}} (1 - \eta(0.15)), & \text{при } a \leq 0.15 \text{ мкм} \\ 1 + \frac{1 - \eta(0.15)}{a - 0.15 \times 10^{-6}} (a - a_1), & \text{при } 0.15 \text{ мкм} < a < a_1 \\ 1, & \text{при } a \geq a_1 \end{cases}$$

где  $\eta(0.15)$  - эффективность для частиц радиусом 0.15 мкм,  $a_1$  - предельный размер частиц, которые полностью оседают в ДМЗ.

Этот размер определяется путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} q_{CPa_1} = \frac{6.67 \pi \mu w h_{OY}^2 a_1}{U_{OY} L_{OY}} \\ 100 q_{CPa_1} = (\lg q_{CP1.5} - \lg q_{CPO.15}) \cdot (\lg a_1 + 5.823) + \lg q_{CP1.5} \end{cases} \quad (I)$$

где  $h_{OY}$ ,  $U_{OY}$ ,  $L_{OY}$  - межэлектродное расстояние, напряжение и длина плоскости OY,  $\mu$  - вязкость газов,  $w$  - скорость потока газов.

Расстояние  $L_{OY}$  определяется формулой

$$L_{OY} = \frac{\pi \mu w h_{OY}^2 \eta(0.15) \times 10^6}{U_{OY} q_{CPO.15}} \quad (2)$$

где величина  $\eta(0.15)$  по формуле

$$\eta(0.15) = \frac{a_1 q_{CPO.15}}{0.15 \times 10^{-6} q_{CPa_1}} \quad (3)$$

Решением системы уравнения (1)-(3) определяется фракционная эффективность  $\eta(a)$ .

### 3. Расчет эффективности $\eta$ ДМЭ.

Из полученной фракционной эффективности  $\eta(a)$  эффективность ДМЭ рассчитывается по формуле

$$\eta = \int_{a_1}^{\infty} f(a) \cdot \eta(a) \cdot da.$$

Сравнение результатов расчета с данными эксперимента дает ошибку не больше 10%.

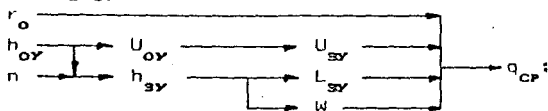
Методика конструирования во многом зависит от конкретной задачи. Наиболее часто встречается задача, когда даны: размеры частиц  $f(a)$ , эффективность ДМЭ  $\eta$  и объемная скорость газа. К конструкции относятся (см. рис.1) для ЗУ: радиус коронирующего провода  $r_o$ , высота  $h_{zy}$ , расстояние между плоскостями  $h_{oy}$ , длина канала  $L_{zy}$  и число каналов  $N$ ; для ОУ: высота  $h_{oy}$ , расстояние между плоскостями  $h_{oy}$ , длина каналов  $L_{oy}$  и число промежутков  $n$ , соответствующее одному каналу ЗУ.

При выборе конструкции важное значение имеют параметры, связанные с режимом работы ДМЭ, такие как напряжение в ЗУ ( $U_{zy}$ ) и в ОУ ( $U_{oy}$ ), скорость потока  $w$ .

В предложенной методике сначала выбираются параметры канала ЗУ, по ним определяется средний заряд. Далее выбираются параметры канала ОУ и габариты всего электрофилтра.

Алгоритм решения данной задачи следующий:

в ЗУ



в ОУ

$$h_{oy}, q_{cp}, w, \eta, f(a) \rightarrow L_{oy};$$

в целом ДМЭ

$$L_{zy}, L_{oy} \rightarrow L_{DMZ};$$



Подробно рассмотрим эту задачу.

1. Выбор радиуса коронирующего провода  $r_0$ .

Радиус провода выбирается с учетом электрических характеристик и механической прочности материала провода. Исходя из этого, радиус провода можно уменьшать до 0,05 мм. Дальнейшее уменьшение радиуса кривизны может идти по пути применения игольчатых электродов.

2. Выбор числа каналов  $n$ .

Число каналов выбирается с учетом симметричности поля к.р., обеспечения безопасности работы электрофильтра и уменьшения величины  $u_{\text{эв}}$ . Выбираем минимальное значение  $n=3$ .

3. Выбор  $h_{\text{эв}}$ .

Выбирать  $h_{\text{эв}}$  необходимо так, чтобы доля неиспользованной площади по сечению была минимальной. В этом случае,  $h_{\text{эв}}=5+8$  мм.

4. Выбор  $u_{\text{эв}}$  и  $u_{\text{эп}}$ .

С учетом максимальной напряженности поля не больше 10кВ/см, получено:  $u_{\text{эв}} \leq 5+8$  кВ, отсюда,  $u_{\text{эп}} = 2u_{\text{эв}} = 10+16$  кВ.

5. Выбор  $h_{\text{эп}}$ .

Выбирается  $h_{\text{эп}}$  по формуле

$$h_{\text{эп}} = n \cdot h_{\text{эв}} \approx 30+50 \text{ мм.}$$

6. Выбор  $L_{\text{эп}}$ .

С учетом эффективной зоны  $L_{\text{эп}}=20+35$  мм.

7. Выбор скорости  $w$ .

Для того, чтобы в ДМЭ существовал ламинарный поток скорость потока должна быть меньше 2,5 м/с, т.е.  $w \leq 2,5$  м/с.

8. Выбор  $L_{\text{эв}}$ .

Проводится на основе базового размера частиц диаметром 0,3 мкм. Для них ДМЭ имеет минимальную эффективность. Используется формула (2) для расчета длины плоскости ОУ, где  $n(0,15)$  и  $a_{\text{эф.0,15}}$  связаны с заданными  $\eta$  и  $f(a)$  и могут получиться по приведенной выше методике расчета эффективности.

8. Выбор  $n$  и  $h_{\text{эп}}(n_{\text{эп}})$ .

С учетом минимизации габаритов электрофильтра поперечное сечение целесообразно выбрать в виде квадрата, т.е.,  $h_{\text{эп}} = n \cdot h_{\text{эв}}$ . Отсюда получим

$$n = \sqrt{\frac{D}{w \cdot h_{\text{эв}}^2}} \quad \text{и} \quad h_{\text{эп}} = n \cdot h_{\text{эв}} = H_{\text{эп}}.$$

Таким образом, геометрические параметры конструкции ДМЭ и



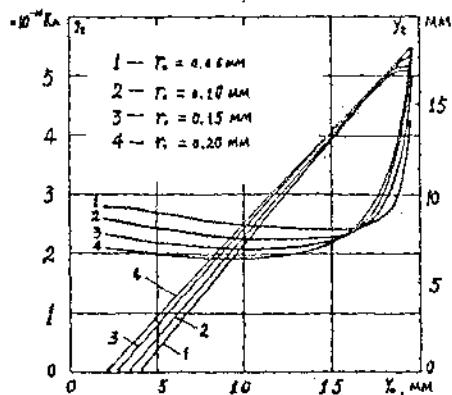


Рис. 4 Зависимости конечных заряда и координаты от начальной координаты  $y_0$  при  $U_{пр} = 13 \text{ кВ}$ ,  $h_{пр} = 52 \text{ мм}$ ,  $w = 2.6 \text{ мм/с}$ ,  $\alpha = 1.5 \text{ нКл/м}$

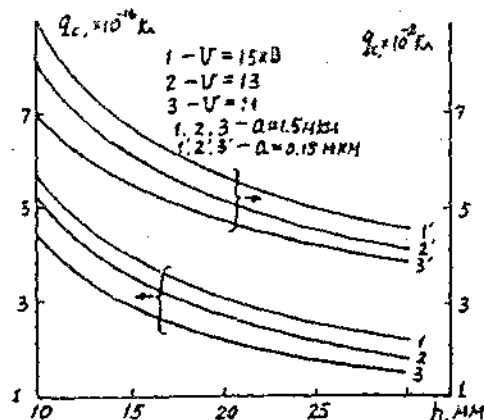


Рис. 5 Средний заряд частиц,  $r_0 = 0.05 \text{ мм}$

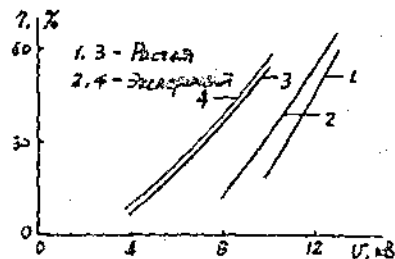
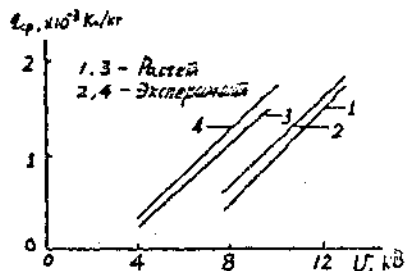


Рис. 6 Зависимости среднего заряда и эффективности ЗУ от напряжения для системы с гладкими проводниками (1, 2) и с игольчатными (3, 4),  $\alpha = 1.5 \text{ нКл/м}$ ,  $h_{пр} = 56 \text{ мм}$ ,  $w = 3.04 \text{ м/с}$

режимов работы выбраны.

В результате работы предложены усовершенствованные конструкции электрофильтров. В ЗУ по сравнению с традиционными использована система "провод с рядом игл". Эквивалентный радиус такого провода мал, поэтому в сильной степени увеличивается заряд. Это подтверждается экспериментами по измерению зарядов и эффективности ЗУ (см.рис.6). Для этой системы влияние ОУ на поле ЗУ мало, что позволяет сократить расстояние между ними и уменьшить габариты электрофильтра. В ОУ, с целью максимального учета заряда частиц, электроды расположены с переменной длиной или с переменным межэлектродным расстоянием. В результате длина ОУ сокращается до 93 % для конструкции с переменной длиной или до 76% для конструкции с переменными межэлектродными расстояниями.

В совокупности эти усовершенствования использованы в новой конструкции электрофильтра (см.рис.7). Он имеет металлоемкость и габариты примерно в два раза меньше, чем традиционные. На данные конструкции подана заявка на патент.

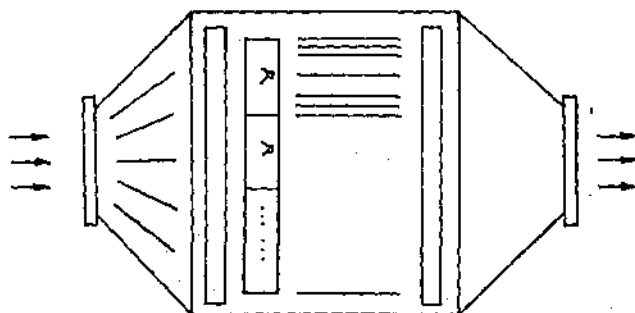


Рис.7 Схема усовершенствованной конструкции ДМЭ

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

I. На основании обзора и анализа литературных данных о двухзонных малогабаритных электрофильтрах (ДМЭ) сформулированы цель и задачи, заключающиеся в усовершенствовании конструкции ДМЭ на основе исследования закономерностей зарядки и движения частиц в электрическом поле электрофильтра.

2. Созданы экспериментальные методики измерения эффективности очистки газов, зарядов частиц и характеристик поля коронного разряда зарядного устройства ДМЭ. Разработан экспериментальный стенд.

3. Получены экспериментальные данные по вольт-амперным характеристикам, по распределениям плотности тока по плоскости, значениям заряда и эффективности для разных конструкций ЗУ. Эти результаты использованы для сопоставления с результатами расчета по математической модели процессов в ДМЭ.

4. Показано, на основании экспериментальных результатов, что ЗУ с коронирующей системой электродов, состоящей из цилиндрических проводов с рядом пар игл между плоскостями, имеет большие значения плотности тока по плоскости, заряда и эффективности.

5. Разработана, в результате сравнения методов расчета поля к.р. и анализа расчетных и экспериментальных данных, методика расчета электрических характеристик коронирующих электродов с фиксированными точками к.р. для различных систем электродов, включающая эквивалентирование электродов цилиндрическими проводами, алгоритм расчета характеристик на базе метода Д-П и способ расчета распределения плотности тока по поверхности коронирующего электрода.

6. В результате анализа структуры поля коронного разряда зарядного устройства ДМЭ выделена эффективная зона поля, которая играет определяющую роль в зарядке частиц. Эта зона сосредоточена перед коронирующим электродом по ходу движения очищаемого газа непосредственно вблизи электрода.

7. Впервые показано, что при значениях геометрических размеров и расходов газа, характерных для реально используемых ДМЭ, возможно использование траекторного подхода к анализу процессов в ДМЭ.

8. Показано, что в нестационарных условиях зарядки и движения частиц в ДМЭ заряд частиц можно вычислять как сумму зарядов, определяемых по ударной и диффузионной зарядки частиц отдельно.

9. Создана математическая модель процесса очистки газов в ДМЭ, включающая описания зарядки и движения частиц в ДМЭ и разработан пакет программ расчета на ЭВМ. В результате решения тестовых задач показана достоверность математической модели и рабо-

тоспособность программ.

10. Разработаны критерии оценки эффективной работы зарядного и осадительного устройств. Для ЗУ таким критерием является средний заряд частиц, для ОУ - суммарная по каналам эквивалентная длина траекторий движения частиц.

11. В работе показано на основе анализа с помощью математической модели поведения частиц в зарядном и осадительном устройствах в широком диапазоне конструктивных и режимных параметров ДМЭ, что при условии постоянства скорости газа (объемной или линейной) увеличить средний заряд ЗУ можно путем: увеличения напряжения на электродах, уменьшения межэлектродного расстояния и уменьшения радиуса провода.

12. В работе впервые сформулированы принципы конструирования ДМЭ, заключающиеся в формулировке соотношения между параметрами конструкции, режимами работы и характеристиками выделяемых частиц.

13. Разработана на основе принципов конструирования и анализа процессов с помощью математической модели инженерная методика выбора конструктивных и режимных параметров ДМЭ и расчета его эффективности. Экспериментально подтверждена ее работоспособность и соответствие результатов расчетов экспериментальным данным.

14. Предложены усовершенствованные конструкции ДМЭ. Эти усовершенствованные конструкции ДМЭ позволяют уменьшить суммарную длину ОУ до 50-60% и примерно в той же степени снизить металлоемкость и объем конструкции при обеспечении одинаковой степени очистки.

На данные варианты конструкции электрофильтра подана заявка на патент.

15. Создан опытный образец ДМЭ. Его испытания показали, что при эффективности 93% он имеет примерно в 2 раза меньшую металлоемкость.

Подписано к печати

Печ. л. 125

Л--

Тираж 100

Заказ 897