

## Совершенствование метода расчета процессов в электрофильтрах для очистки дымовых газов ТЭС от золы

ВЕРЕЩАГИН И.П., СМАГИН К.А., ТИМОФЕЕВ Е.М.

*Пластинчатые электрофильтры являются основным средством очистки от золы отходящих газов ТЭС, работающих на угле. Для оптимизации конструкции и режима работы электрофильтра необходим расчет физических процессов, протекающих внутри фильтра. В настоящее время на практике для расчета эффективности очистки электрофильтров применяется формула Дейча, которая является очень приближенной. В теоретических работах, посвященных расчету процессов в электрофильтре, используются два метода: метод Лагранжа, который основан на расчете траекторий отдельных частиц и принцип Эйлера, который сводится к решению уравнения неразрывности для потока частиц. При траекторном подходе его использование пока ограничено требуемыми очень большими вычислительными ресурсами. В расчетах на основе уравнения неразрывности проблемы возникают с учетом процесса зарядки частиц в турбулентной среде. Предлагаемый вероятностный подход к расчету процессов в электрофильтре позволяет за приемлемое время (до 1 ч) рассчитывать эффективность очистки для реальной длины электрофильтров (до 10 м) и достаточно точно учитывать процесс зарядки частиц. Достоверность метода расчета была подтверждена сопоставлением с расчетами по уравнению неразрывности потока частиц при заданном значении заряда частиц. Проведенные расчеты дают новые данные относительно распределения концентрации частиц в сечениях по длине электрофильтра и функции распределения частиц по зарядам.*

**Ключевые слова:** *теплоэлектростанции, отходящие газы, электрофильтры, заряженные частицы, концентрация частиц, расчет*

Пластинчатые электрофильтры являются основным средством очистки от золы отходящих газов ТЭС, работающих на угле. Несмотря на простоту конструкции процессы в электрофильтрах достаточно сложны. Они характеризуются сложным взаимодействием турбулентного потока газа, коронного разряда и находящихся в них частиц золы. Частицы золы переносятся турбулентным потоком газа вдоль электрофильтра, заряжаются в поле коронного разряда и движутся к осадительному электроду. Стохастический характер скоростей турбулентного потока определяет разброс в зарядах частиц и влияет на распределение концентрации частиц между электродами электрофильтра.

Первые попытки рассчитать распределение концентрации заряженных частиц в турбулентном потоке в поле плоского конденсатора отражены в [1]. Далее работы были продолжены применительно к модели пластинчатого электрофильтра [2, 3]. Основой для расчетов были уравнения неразрывности для потока частиц. К сожалению, принятая в расчетах модель зарядки частиц не позволяла адекватно учесть возможность разброса зарядов частиц.

Обстоятельный анализ влияния характеристик турбулентного потока на движение и распределе-

ние концентрации частиц в электрофильтре был выполнен в [4]. Интерес представляют методическая проработка и сравнительная оценка возможностей для решения рассматриваемой задачи двух базовых методов: метода Лагранжа, который реализуется в виде расчетов траекторий частиц в турбулентной среде, и принципа Эйлера, который сводится к решению уравнения неразрывности для потока частиц. Вероятностный характер зарядки частиц в турбулентной среде и в этих работах не был исследован в достаточной степени. При траекторном подходе его использование пока ограничено требуемыми очень большими вычислительными ресурсами. В расчетах на основе уравнения неразрывности проблемы возникают с учетом процесса зарядки частиц в турбулентной среде. Предлагаемый в статье вероятностный подход к решению задачи лишен этого недостатка.

**Исходные данные.** Схема пластинчатого электрофильтра представлена на рис. 1. Поток газа, содержащий частицы золы, поступает в канал электрофильтра, в котором между проводами и плоскими электродами создается коронный разряд. Частицы заряжаются и под действием поля выводятся из потока, осажаясь на некоронирующих электродах.

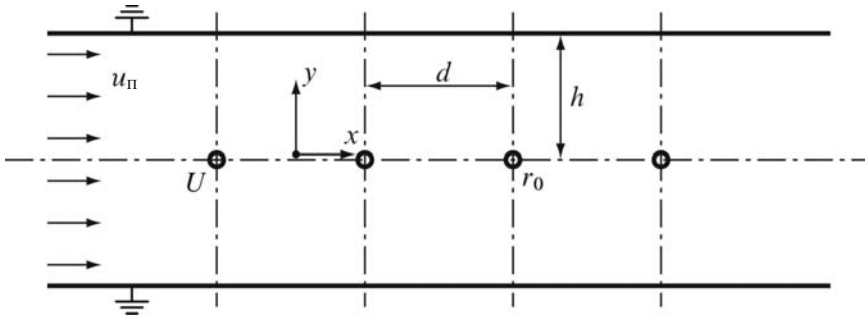


Рис. 1. Схема пластинчатого электрофильтра

Параметры поля коронного разряда для системы «ряд проводов между плоскостями» определялись по методу разложения в ряд [1, 5].

Напряженность поля

$$E_{kx} = F \sin \frac{2px}{d}; E_{ky} = F \operatorname{sh} \frac{2py}{d}, \quad (1)$$

где

$$F = \frac{\rho}{2dr^2} \frac{e}{e_0} (E_0 r_0)^2 + \frac{Id^2}{2\rho^3 k e_0} \ln(r^2 + \sqrt{1+r^4}) \frac{U}{d}^{0,5};$$

$$r^2 = \sin^2 \frac{px}{d} + \operatorname{sh}^2 \frac{py}{d}; q = \arctg \frac{e}{e_0} \operatorname{tg} \frac{px}{d} \operatorname{cth} \frac{py}{d} \frac{U}{d}$$

Плотность объемного заряда

$$r = r_0(1 - f \cos 2q), \quad (2)$$

где

$$r_0 = \frac{I(r^4 + 2r^2 \cos 2q + 1)^{0,5}}{(1+r^4)^{0,5} 4kdr^2 F};$$

$$f = \frac{e}{e_0} \frac{\operatorname{sh}(ph/d)}{r} \frac{e}{e_0} A_1 + \lg \frac{r}{\operatorname{sh}(ph/d)} + B \frac{U}{d} + C \frac{U}{d}$$

$$1 - \exp \frac{e}{e_0} \frac{40d}{h} \frac{r}{\operatorname{sh}(ph/d)} \frac{U}{d} + 0,09 \frac{U}{d}$$

Ток коронного разряда на единицу длины провода (при  $h/d \geq 0,75$ )

$$I = 2\rho^3 k e_0 d^{-2} \frac{e}{e_0} \left( 1 + B \sqrt{\frac{r_0}{d}} \frac{U}{d} (U - U_0) \right), \quad (3)$$

где  $k$  – подвижность ионов;  $U_0$  – начальное напряжение;

$$A_1 = 7 \cdot 10^{-2} \exp \frac{e}{e_0} \frac{33}{e_0} \frac{e}{e_0} \frac{U}{d} + 0,06;$$

$$B = -2 \cdot 10^{-4} \frac{e}{e_0} \frac{33}{e_0} \frac{e}{e_0} \frac{U}{d} + 0,06;$$

$$C = 1,14 \cdot 10^{-3} \frac{e}{e_0} \frac{33}{e_0} \frac{e}{e_0} \frac{U}{d} + 0,09.$$

К необходимым исходным данным относятся также гидродинамические характеристики потока газа в канале электрофильтра, прежде всего распределения средней скорости потока по сечению канала  $u_{п}$  и коэффициента турбулентной диффузии  $D_T$ .

Предположим, что во всех сечениях канала распределения скорости одинаковые. В соответствии с

рекомендациями [6] для прямоугольного канала они могут быть приняты:

в ламинарном подслое вблизи осадительного электрода ( $y_+ < 5$ )

$$u/u^* = y_+;$$

в промежуточном (буферном) подслое ( $5 \leq y_+ \leq 30$ )

$$u/u^* = 11,5 \lg \frac{y_+}{5} + 5; \quad (4)$$

в турбулентном ядре потока ( $y_+ \geq 30$ )

$$u/u^* = 5,75 \lg y_+ + 5,5,$$

где  $u^*$  – характерная скорость турбулентных пульсаций скорости в ядре потока;  $y_+ = u y^* / \nu$ ;  $u^* = 0,2 u_{п} / \operatorname{Re}^{1/8}$ ;  $y$  – расстояние до стенки канала;  $\operatorname{Re} = u_{п} 2h / \nu$   $n$  – коэффициент кинематической вязкости газа.

Чем больше значение числа Рейнольдса, тем ближе распределение скорости к равномерному.

Коэффициент турбулентной диффузии  $D_T$  также мало изменяется по сечению канала электрофильтра за исключением ламинарного подслоя у электродов. В результате анализа литературных источников в [1] рекомендуется:

$$\frac{D_T}{n} = \begin{cases} 9,3 y_+^3, & y_+ \leq 26,33; \\ 0,7(1 - y_+^3 / h_+^3), & 26,33 \leq y_+ \leq 0,23h; \\ 0,13 h u^* / n, & y_+ \geq 0,23h. \end{cases} \quad (5)$$

В (5) не учтено влияние проводов как дополнительного возмущающего фактора. Однако этим влиянием можно пренебречь из-за малого диаметра проводов, что подтверждено экспериментами [7]. Важно другое – гидродинамическое влияние коронного разряда, которое получило название «электрический ветер». Экспериментальные данные [8] свидетельствуют, что при скорости потока 1 м/с и напряжении на электрофильтре 50 кВ направленным потоком электрического ветра можно пренебречь, но коэффициент турбулентной диффузии увеличивается в 1,6, 2,1 раза. Об увеличении

$D_T$  свидетельствуют также расчеты, выполненные с помощью программы Fluent 6.1 [4]. Пока данных недостаточно, чтобы точно оценить степень увеличения  $D_T$ , но ясно, что в расчетах процессов это увеличение следует учитывать.

Еще одна особенность связана с влиянием турбулентности – необходимость учета эффекта «скрещенных траекторий» [4]. Он выражается в уменьшении коэффициента турбулентной диффузии для материальных частиц, которые не только переносятся потоком, но и перемещаются одновременно под действием электрического поля в поперечном направлении к осадительным электродам. Наличие скорости дрейфа уменьшает взаимодействие частиц с пульсациями скорости потока [4].

Отметим, что малый размер частиц ( $d \leq 50$  мкм) позволяет пренебречь инерционными свойствами частиц и считать их увлечение турбулентными пульсациями скорости полным.

**Основные соотношения.** Обобщением траекторного подхода и расчетов на основании уравнения неразрывности для потока частиц является стохастическое описание процессов в электрофильтре. Представим в пространстве между электродами прямоугольную сетку с шагом  $\Delta x$  и  $\Delta y$  (рис. 2).

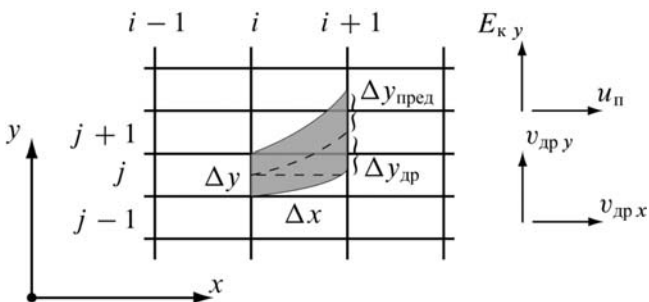


Рис. 2. Схема распространения турбулентной струи от элемента  $\Delta y$  на интервале  $\Delta x$

Пусть для произвольного интервала  $\Delta y_{i,j}$  частицы размером  $2r$  имеют концентрацию  $N_{i,j}$  и заряд  $q_{i,j}$ . Двигаясь в турбулентном потоке вдоль оси  $x$  и в поле коронного разряда вдоль оси  $y$  частицы смещаются на шаг  $\Delta x$  и распределяются по элементам  $\Delta y$  слоя  $i+1$ . Соответственно, если частицы обладают начальным зарядом  $q_{i,j}$ , то для каждого интервала  $\Delta y_{i+1,j}$  в результате дополнительной зарядки частиц будет иметь место распределение частиц по значению заряда.

В основу метода положено распределение концентрации частиц в струе, распространяющейся от линейного источника в турбулентном потоке газа [9]:

$$\frac{N(x,y)}{N_0} = \frac{a}{\sqrt{\rho}} \exp(-a^2 y^2), \quad (6)$$

где  $a = \sqrt{u_n / 4D_T x}$ ;  $N_0$  – начальная концентрация.

Если в качестве источника рассматривается интервал  $\Delta y$ , то распределение концентрации частиц определяется как

$$\frac{N(x,y)}{N_0} = \int_{-0,5\Delta y}^{0,5\Delta y} \frac{a}{\sqrt{\rho}} \exp(-a^2 y^2) dy.$$

В результате интегрирования

$$\frac{N(x,y)}{N_0} = 0,5\{\text{erf}[a(y + 0,5\Delta y)] - \text{erf}[a(y - 0,5\Delta y)]\}. \quad (7)$$

Если кроме потока газа в направлении оси  $x$  имеется поперечная составляющая – скорость дрейфа частиц  $v_{дрy}$ , то необходима корректировка значения коэффициента турбулентной диффузии  $D_T$ . В (7) следует также предусмотреть смещение распределения на  $\Delta y_{др} = v_{дрy} \Delta x / u_n$  (рис. 2). Тогда

$$\frac{N(x,y)}{N_0} = 0,5\{\text{erf}[a(y + \Delta y_{др} + 0,5\Delta y)] - \text{erf}[a(y + \Delta y_{др} - 0,5\Delta y)]\}. \quad (8)$$

Поскольку на большом расстоянии от оси струи концентрация пренебрежимо мала, то распределение частиц в струе можно ограничить интервалом  $[\Delta y_{пред}, \Delta y_{пред}]$ :

$$\Delta y_{пред} = \frac{1}{a} \sqrt{\ln \frac{a\Delta y}{K_m \sqrt{\rho}}}, \quad (9)$$

где  $K_m = \frac{N_{пред}(x,y)}{N(x,0)}$ .

Смещение частиц  $\Delta y_{др}$  в формуле (8) определяется скоростью дрейфа в поле коронного разряда с учетом подзарядки их на интервале  $\Delta x$ . Движение частиц предполагается безынерционным. Скорость  $v_{дрy}$  определяется из уравнений:

$$E_{ky} q = F_c,$$

где  $F_c = \frac{24}{\text{Re}} \frac{\rho g}{6} \frac{2r}{\phi} \frac{v_{дрy}^2}{2} S$ ;  $\text{Re} = \frac{n_{дрy} 2r}{\nu}$ ;  $\nu$  –

коэффициент кинематической вязкости газа;  $g$  – плотность газа;  $S = \pi r^2$  – площадь поперечного сечения частицы.

Заряд частиц определяется по его значению в начале интервала  $\Delta x$  и приращению заряда на интервале:

$$\frac{dq}{dt} = \begin{cases} \frac{q_{пр} \rho}{t_q} \left( 1 - \frac{q}{q_{пр}} \right)^2 + a(\tilde{E}) \frac{8\rho e_0 k_B T d}{e t_q}, & \text{если } q \leq q_{пр}; \\ \frac{4a(\tilde{E})}{t_q} \frac{q - q_{пр}}{\exp\left\{ \frac{(q - q_{пр}) e \tilde{E}}{2\rho e_0 k_B T d} \right\} - 1}, & \text{если } q > q_{пр}, \end{cases}$$

где  $q_{пр} = 3\pi e_0 \frac{e}{e+2} d^2 E$ ;  $t_q = \frac{4e_0}{\gamma k}$ ;

$$a(\tilde{E}) = \begin{cases} (\tilde{E} + 0,457)^{-0,575}, & \text{если } \tilde{E} \geq 0,525; \\ 1, & \text{если } \tilde{E} < 0,525; \end{cases}$$

$$\tilde{E} = \frac{d E e}{2 k_B T}; k_B - \text{постоянная Больцмана}; T - \text{абсолютная температура}; e - \text{элементарный заряд}; d - \text{диаметр частицы}.$$

Формулы хорошо согласуются с численным решением задачи [4].

Значения концентрации и зарядов частиц на каждом элементе  $Dy$  слоя  $i+1$  вычисляются как сумма вкладов от всех элементов слоя  $i$ . В результате для каждого элемента нового слоя определяются концентрация частиц и распределение их по значению заряда. По статистическим параметрам распределений далее следует найти три характерных значения:  $q_{ср}$ ;  $q_{ср} + s$ ;  $q_{ср} - s$ . Эти значения используются как начальные на следующем шаге  $Dx$ . Поток частиц на осадительный электрод на интервале  $Dx$

$$F_{осi} = N_{осi} v_{дрyi} Dx_i.$$

Достоверность методики была подтверждена при сопоставлении с расчетами по уравнению неразрывности потока частиц при заданном значении заряда частиц.

**Алгоритм расчета** процессов в электрофильтре представлен на рис. 3. Начало расчета относится к сечению, проходящему посередине между проводами ( $x=0$ ). Значение  $y=0$  соответствует плоскости симметрии, проходящей через провода. Общее число интервалов  $i$  по  $x$  и  $j$  по  $y$  составляет  $P_x, P_y$ . Кроме того, используется параметр  $n$ , принимающий значения  $1, \dots, M$  ( $M$  – число зарядов, аппроксимирующих функцию распределения значений зарядов по частицам для каждого интервала  $Dy$ ).

Из-за отталкивающего действия коронирующих проводов для некоторых слоев  $i$  начальное значение  $j$  следует принять  $j = j_1 > 0$ . Значение  $j_1$  определяется из условия равенства скорости дрейфа частицы вдоль направления  $x$  ( $v_{дрx} = q_{i+1} E_{xi+1,j} B$ , где  $B$  – механическая подвижность частиц) скорости потока газа  $u_{п}$ .

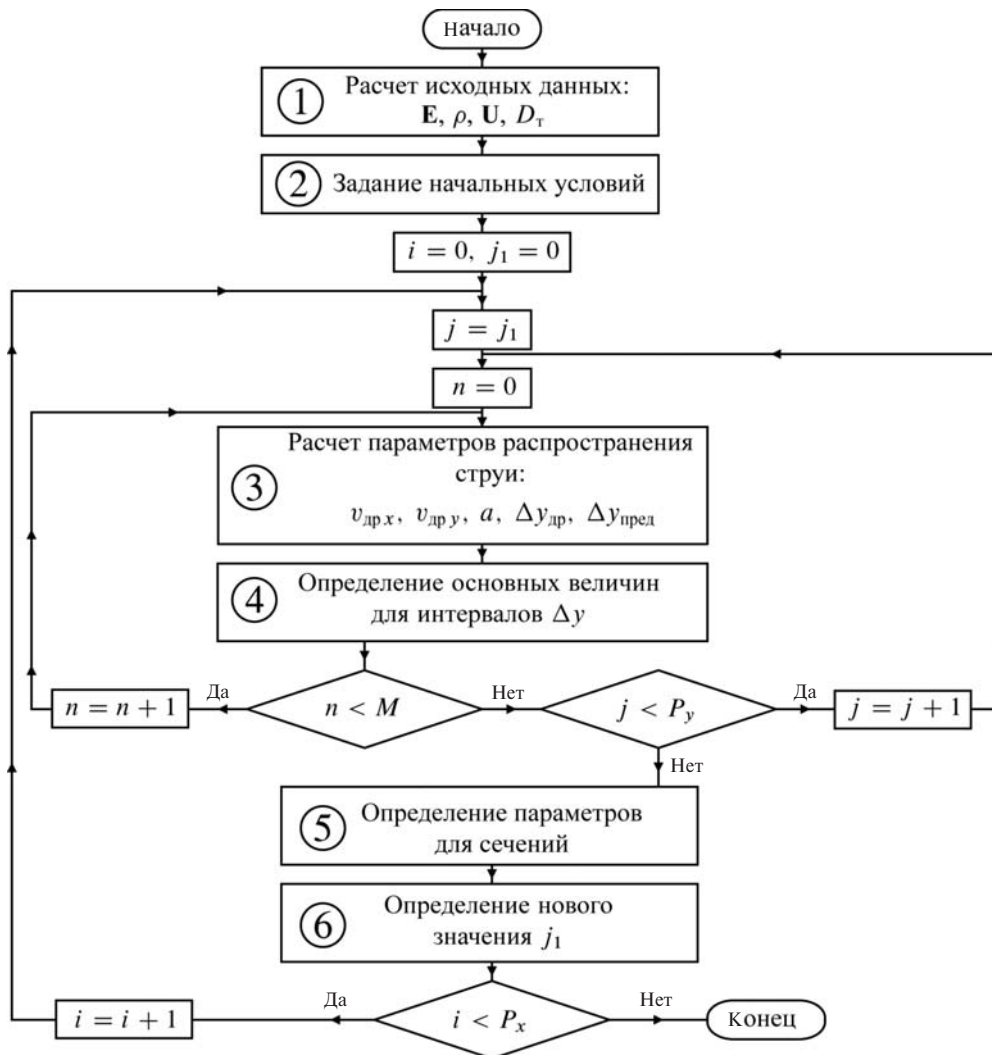


Рис. 3. Структурная схема алгоритма расчетов по методу струй



Для области вблизи плоскости ( $D_T \gg 0$ ) необходима корректировка расчета с использованием метода траекторий. Из-за того что используется ограничение  $y \leq y_{\text{пред}}$  при определении концентрации по (7), появляется погрешность. Поэтому предусмотрена нормировка потока частиц для каждого элемента  $Dy$ . Вторая нормировка относится к потоку частиц для каждого сечения  $i$ , в которых необходимо учитывать отталкивающее действие коронирующих проводов.

В блоке 3 (рис. 3) проводится расчет параметров распространения струи:  $a$ ,  $Dy_{\text{др}}$ ,  $Dy_{\text{пред}}$ , скорости дрейфа  $v_{\text{др}x}$ ,  $v_{\text{др}y}$ . В блоке 4 для каждого нового интервала  $Dy$  определяются сумма составляющих концентрации частиц  $N$ , заряда частиц  $q$ , потока частиц  $F$  от интервалов предыдущего слоя, проводится первая нормировка. Далее следуют (блок 5) вычисление общего потока частиц в сечении, вторая нормировка потока, корректировка концентрации и вычисление потока осаждения. В завершающем блоке 6 определяется параметр  $j_1$ , с которого начинаются расчеты для следующего слоя.

**Результаты расчетов.** В качестве примера расчетов по предлагаемой методике выбран пластинчатый электрофильтр с проволочными коронирующими электродами, имеющий параметры:  $r_{\text{пр}} = 0,5$  мм,  $h = d = 120$  мм,  $U = 50$  кВ,  $u_{\text{п}} = 1,0$  м/с,  $r_{\text{ч}} = 2,0$  мкм; 10 мкм. Условия расчетов: шаг сетки  $Dx = Dy = 0,5$  мм, начальное сечение ( $x = 0$ ) принято посередине между проводами, концентрация частиц  $N_0 = 1,0$  при  $x = 0$ . Начальное значение заряда частиц принималось близким к нулю. Характерное компьютерное время расчета до сечения  $x = 120$  мм составило 5 с.

Результаты расчетов представлены на рис 4–10. Распределение относительной концентрации частиц в сечениях в зависимости от длины электрофильтра представлено на рис. 4. На начальном участке, когда происходит зарядка частиц (до  $x = 60$  мм), частицы более или менее равномерно распределены между электродами. Второй участок связан с появлением области, свободной от частиц вблизи провода, связанной с отталкивающим действием коронирующего электрода на частицы. Распределения имеют максимум, который с ростом  $x$  смещается к плоскости. Для частиц размером 4 мкм протяженность участка составляет примерно 500 мм.

Зависимости относительного потока частиц на выходе и количества осажденных частиц в зависи-

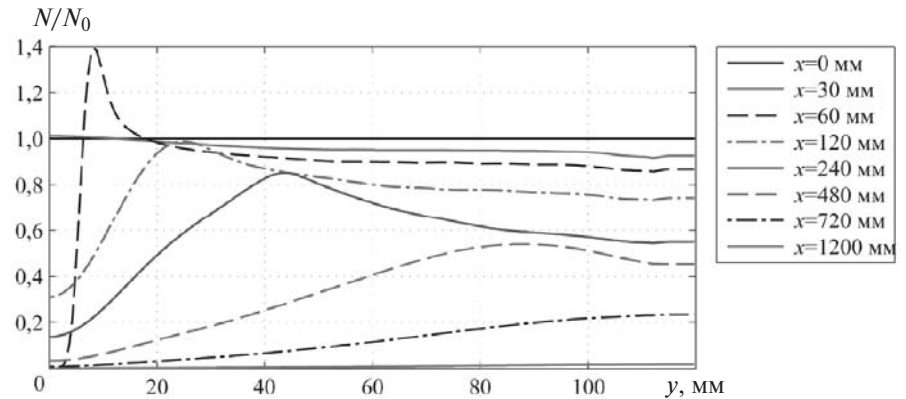


Рис. 4. Распределение концентрации частиц в сечениях при разных  $x$  ( $r_{\text{ч}} = 2$  мкм)

мости от длины электрофильтра представлены на рис 5. Зависимость  $F_{\text{ос}} / F_{\text{нач}}$  в логарифмических координатах представляет собой два линейных участка, причем второй соответствует более крутому спаду (максимум концентрации частиц имеет место вблизи осадительного электрода).

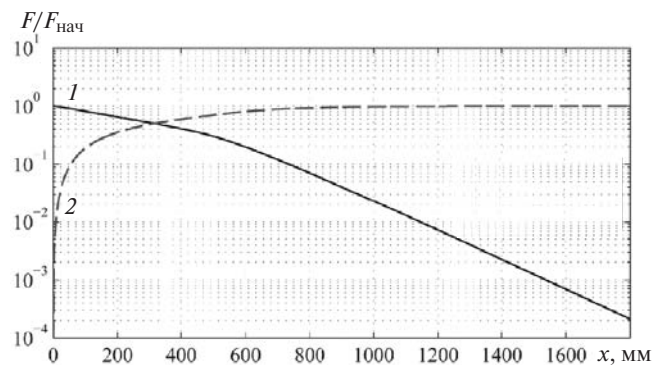
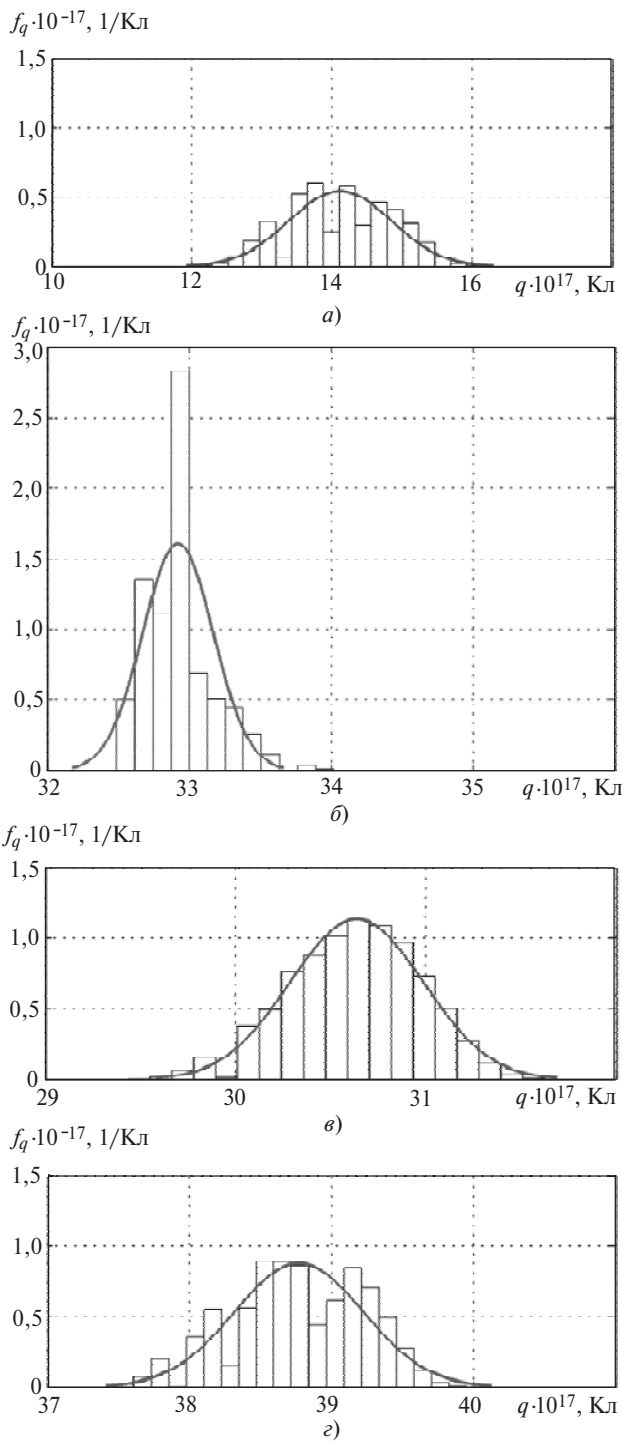
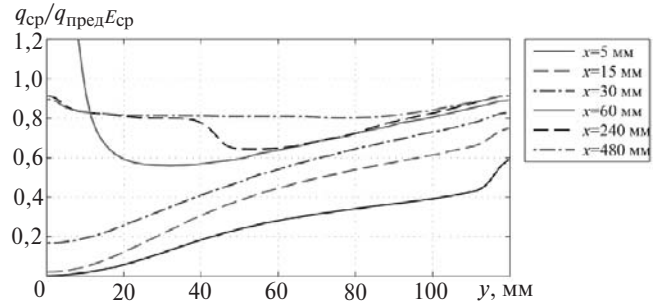


Рис. 5. Зависимость потока частиц в сечении  $F / F_{\text{нач}}$  (1) и потока осаждения  $F_{\text{ос}} / F_{\text{нач}}$  (2) от  $x$  ( $r_{\text{ч}} = 2$  мкм)

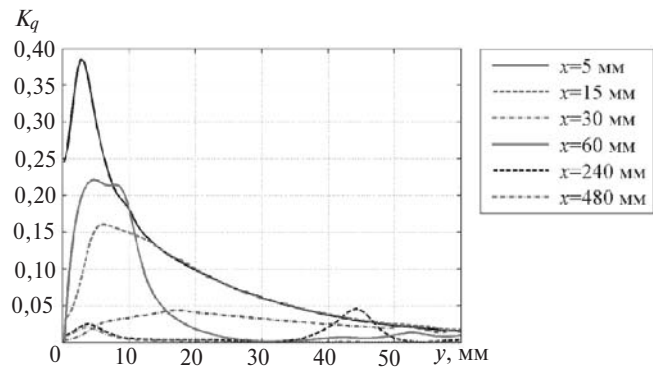
Для каждого интервала  $Dy$  получено распределение частиц по значению заряда. Расчетное ступенчатое распределение хорошо соответствует нормальному закону с соответствующими параметрами  $q_{\text{ср}}$  и  $s_q$  (рис. 6). Распределение относительного значения среднего заряда частиц  $q_{\text{ср}}/q_{\text{пред}E_{\text{ср}}}$  ( $q_{\text{пред}E_{\text{ср}}}$  – предельный заряд частицы при  $E_{\text{ср}} = U/h$ ) для интервалов  $Dy$  в сечениях в зависимости от длины электрофильтра представлены на рис. 7. Распределения в сечениях с ростом  $x$  стремятся к равномерным. Следует отметить, что в сечениях вблизи проводов частицы практически отсутствуют. Соответствующие зависимости для коэффициента вариации  $K_q = s_q / q_{\text{ср}}$  (рис. 8) свидетельствуют, что статистический разброс зарядов частиц приобретает наибольшее значение на начальном участке, когда происходит основное изменение заряда. При  $x > 50$  мм разброс зарядов практически отсутствует.



**Рис. 6.** Функции распределения частиц по значению заряда в различных точках канала электрофильтра ( $r_{\text{ч}} = 2$  мкм); сплошная кривая соответствует нормальному распределению, построенному по расчетным значениям  $q_{\text{ср}}$  и  $s_q$ : а-  $x = 20,0$  мм;  $y = 29,75$  мм;  $q_{\text{ср}} \cdot 10^{17} = 14,1$  Кл;  $s_q \cdot 10^{17} = 0,7$  Кл;  $q_{\text{пред}} \cdot 10^{17} = 23,9$  Кл; б -  $x = 110,0$  мм;  $y = 29,75$  мм;  $q_{\text{ср}} \cdot 10^{17} = 32,9$  Кл;  $s_q \cdot 10^{17} = 0,2$  Кл;  $q_{\text{пред}} \cdot 10^{17} = 21,0$  Кл; в -  $x = 20,0$  мм;  $y = 71,75$  мм;  $q_{\text{ср}} \cdot 10^{17} = 30,6$  Кл;  $s_q \cdot 10^{17} = 0,4$  Кл;  $q_{\text{пред}} \cdot 10^{17} = 43,3$  Кл; г -  $x = 100$  мм;  $y = 71,75$  мм;  $q_{\text{ср}} \cdot 10^{17} = 38,8$  Кл;  $s_q \cdot 10^{17} = 0,5$  Кл;  $q_{\text{пред}} \cdot 10^{17} = 42,8$  Кл



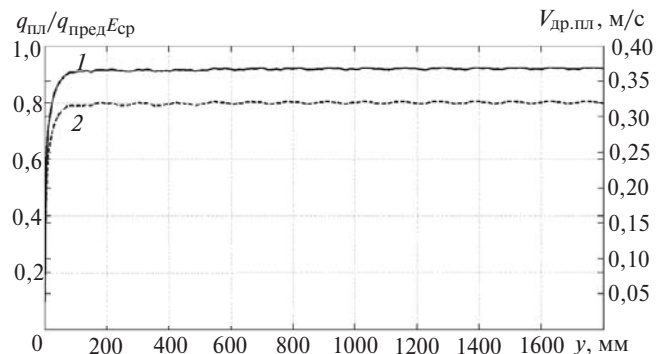
**Рис. 7.** Распределение среднего заряда частиц  $q_{\text{ср}}/q_{\text{пред}} E_{\text{ср}}$  для интервалов  $\Delta y$  в сечениях при разных  $x$  ( $r_{\text{ч}} = 2$  мкм)



**Рис. 8.** Распределение коэффициента вариации зарядов частиц для интервалов  $\Delta y$  в сечениях при разных  $x$  ( $r_{\text{ч}} = 2$  мкм)

Важной характеристикой процесса в электрофильтре являются зависимости заряда и скорости частиц вблизи плоскости от длины электрофильтра (рис. 9) и коэффициента неравномерности распределения частиц в сечениях электрофильтра  $s = N_{\text{ос}} / N_{\text{ср}}$ , равного отношению концентрации частиц у плоскости к средней концентрации частиц в сечении (рис. 10).

То обстоятельство, что заряд частиц у плоскости за исключением начального участка остается практически постоянным по длине электрофильтра и равным 0,93 предельного заряда при средней напряженности, а также то, что коэффициент неравномерности  $s$  имеет простое ступенчатое изменение, открывает путь для разработки упрощенной методики расчета степени очистки газа в электрофильтре.



**Рис. 9.** Распределение по длине электрофильтра заряда  $q_{\text{ср}}/q_{\text{пред}} E_{\text{ср}}$  (1) и скорости дрейфа частиц у плоскости  $v_{\text{др.пл}}$  (2) ( $r_{\text{ч}} = 2$  мкм)

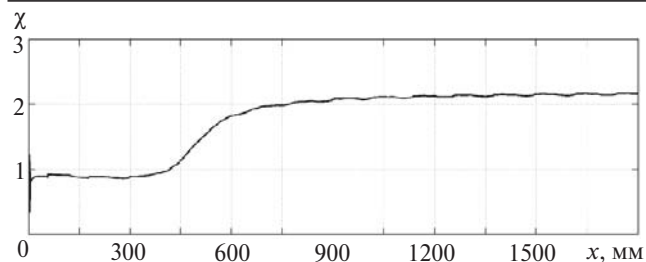


Рис. 10. Распределение отношения концентрации у плоскости к средней по длине электрофильтра ( $r_{\text{ч}} = 2$  мкм)

**Заключение.** Предложенная новая методика расчета процессов в электрофильтрах позволяет учесть вероятностный разброс зарядов частиц, имеет сравнительно небольшое время расчета процессов в электрофильтрах реальной длины (до 1 ч). Разброс зарядов частиц имеет место только в начальной части электрофильтра, в основной части коэффициент вариации составляет менее 0,05. Скорость дрейфа частиц у осадительного электрода постоянна по длине электрофильтра, распределение концентрации частиц в сечениях на разном расстоянии от входа изменяется от равномерного до существенно переменного, когда максимум концентрации имеет место у плоскости. Соответствующий коэффициент неоднородности с близок к единице в начальной части и ступенчато изменяется до некоторого значения, зависящего, прежде всего, от размера частиц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. — М.: Энергия, 1974, 480 с.

2. Мирзабекян Г.З., Григорьев И.Н. Уравнение кинетики зарядки и осаждения частиц в электрофильтрах с учетом турбулентного перемешивания аэрозоля. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1975, №2, с. 51–60.

3. Ермилов И.В., Мирзабекян Г.З. Расчет степени очистки в электрофильтрах. — Электричество, 1976, № 3, с. 36–40.

4. Schmid H.-J., Vogel L. On the modelling of the particle dynamics in electro-hydrodynamic flow-fields: I. Comparison of Eulerian and Lagrangian modelling approach. — Powder Technol., 2003, vols. 135–136, pp. 118–135.

5. Верещагин И.П., Семенов А.В. Электрические поля в установках с коронным разрядом. — М.: МЭИ, 1984, 100 с.

6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. — М.: Дрофа, 2003, 846 с.

7. Suda J.M., Ivancsy T., Kiss I. Turbulent flow field of the model esp influenced by the inlet conditions—comparison of experimental and CFD results. — Proc. Int. Conf. microCAD'05, 2005, pp. 9–11.

8. Верещагин И.П., Гоник А.Е. Экспериментальное исследование влияния электрического ветра на величину коэффициента турбулентной диффузии. — Труды МЭИ, 1975, вып. 224, с. 72–76.

9. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. — М.: Изд-во АН СССР, 1955, 351 с.

[24.02.15]

Авторы: **Верещагин Игорь Петрович** окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ — ныне Научно-исследовательский университет «МЭИ» — НИУ «МЭИ») в 1955 г. В 1975 г. защитил в МЭИ докторскую диссертацию «Методы расчета электрического поля и поведения частиц в униполярном коронном разряде». Профессор кафедры техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) НИУ «МЭИ».

**Смагин Кирилл Анатольевич** окончил в 2014 г. НИУ «МЭИ». Аспирант, младший научный сотрудник кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

**Тимофеев Евгений Михайлович** окончил в 2003 г. МЭИ (Технический университет). Аспирант кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

*Elektrichestvo (Electricity)*, 2015, No. 6, pp. 12–19.

## Sophisticating the Method for Calculating the Processes in Electric Precipitators for Separating Ash from Flue Gases at Thermal Power Plants

I.P. VERESHCHAGIN, K.A. SMAGIN, and E.M. TIMOFEYEV

Plate-type electric precipitators are used as the main means for separating ash from flue gases at coal-fired thermal power plants. For optimizing the electric precipitator design and mode of its operation, it is necessary to calculate the physical processes proceeding in the filter. At present, the Deutsch formula is used in practical applications for calculating the precipitator separation efficiency, which, however, is a very approximate one. In theoretical works devoted to calculating the processes in an electric precipitator, the following two methods are used: the Lagrange method, which is based on calculating the trajectories of individual particles, and the Euler principle, which boils down to solving the continuity equation for a flow of particles. The use of the trajectory approach imposes too heavy demands on the computation capacities. In calculations carried out using the continuity equation, difficulties concerned with taking into account the particle charging process in a turbulent medium are encountered. The proposed probabilistic approach to calculating the processes in an electric precipitator allows the separation efficiency to be calculated within an

acceptable time (up to 1 h) for a real length of electric precipitators (up to 10 m) taking into account the particle charging process with sufficient accuracy. The validity of the proposed calculation method has been confirmed by comparison with the calculations based on the particle flow continuity equation at a specified value of particle charge. The performed calculations yield new data on the distribution of particle concentration in different sections over the electric precipitator length as a function of particle distribution by charges.

**Key words:** thermal power plants, flue gases, electric precipitators, charged particles, concentration of particles, calculation

## REFERENCES

1. Vereshchagin I.P., Levitov V.I., Mirzabekyan G.Z., Pashin M.M. *Osnovy elektrogazodinamiki dispersnykh system* (Basics of the electrodynamic and gas dynamics of disperse systems). Moscow, Publ. «Energiya», 1974, 480 p.
2. Mirzabekyan G.Z., Grigor'yev I.N. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport – in Russ. (Proc. of USSR Academy of Sciences. Power Engineering and Transport)*, 1975, No. 2, pp. 51–60.
3. Yermilov I.V., Mirzabekyan G.Z. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1976, No. 3, pp. 36–40.
4. Schmid H.-J., Vogel L. On the modelling of the particle dynamics in electro-hydrodynamic flow-fields: I. Comparison of Eulerian and Lagrangian modelling approach. – *Powder Technol.*, 2003, vols. 135–136, pp. 118–135.
5. Vereshchagin I.P., Semenov A.V. *Elektricheskiye polya v ustanovkakh s koronnym razryadom* (Electric fields in installation with corona). Moscow, Publ. Moscow Power Engineering Institute, 1984, 100 p.
6. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* (Fluid and Gas Mechanics). Moscow, Publ. «Drofa», 2003, 846 p.
7. Suda J.M., Ivancy T., Kiss I. Turbulent flow field of the model esp influenced by the inlet conditions—comparison of experimental and CFD results. – *Proc. Int. Conf. microCAD'05*, 2005, pp. 9–11.
8. Vereshchagin I.P., Gonik A.Ye. *Trudy Moskovskogo energeticheskogo instituta – in Russ. (Proc. of the Moscow Power Engineering Institute)*, 1975, iss. 224, pp. 72–76.
9. Fuks N.A. *Mekhanika aerazolei* (Mechanics aerosols). Moscow, Publ. USSR Academy of Sciences, 1955, 351 p.

*Authors: Vereshchagin Igor' Petrovich (Moscow, Russia) – Dr. Sci. (Eng.), Professor in the Department of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»).*

*Smagin Kirill Anatol'yevich (Moscow, Russia) – Ph.D. Student of the NRU «MPEI».*

*Timofeyev Yevgenii Mikhailovich (Moscow, Russia) – Ph.D. Student of the NRU «MPEI».*

\* \* \*

**Если Вы работаете в области энергетики или электротехники, позаботьтесь о том, чтобы Ваше предприятие, лаборатория, кафедра не опоздали с подпиской на**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

старейший отечественный теоретический и научно-практический журнал Российской Академии наук и Российского научно-технического общества энергетиков и электротехников.

выходит ежемесячно, предназначен для высококвалифицированных специалистов в области-энергетики и электротехники;

публикует теоретические и научно-практические работы отечественных и зарубежных ученых и инженеров, освещает работу российских и международных конференций, рецензирует учебники и монографии по тематике журнала, помещает материалы по истории электротехники, статьи о выдающихся отечественных и зарубежных ученых.

*Подписка в России и странах СНГ  
осуществляется в отделениях связи  
и подписных агентствах*

*Зарубежные читатели могут подписаться на «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»  
во всех крупных международных подписных агентствах*