Теплофизические основы энергетических процессов

УДК 66.074.2
DOI: 10.33070/etars.4.2019.04

Ращепкин В.А., канд. техн. наук, **Вольчин И.А.**, докт. техн. наук
Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев
ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина; e-mail: ceti@i.kiev.ua

Оценка влияния электрического ветра на эффективность улавливания дисперсных частиц в потоке дымовых газов в электростатических фильтрах

Вопрос влияния электрического ветра на эффективность улавливания дисперсных частиц в потоке дымовых газов в электростатических фильтрах до сих пор недостаточно изучен. Приведены оценки роли и влияния электрического ветра на процессы улавливания частиц в промышленных электрофильтрах, а также результаты экспериментов и расчетов с применением прикладных пакетов вычислительной гидродинамики. Представлены результаты математического моделирования скорости движения частиц пыли разных диаметров под действием электрического ветра в межэлектродном пространстве коронного разряда. Даны оценки влияния на эффективность улавливания частиц пыли турбулизации газового потока, пристенной струи и вероятностного характера удаления твердых частиц из потока запыленного отходящего газа. *Библ. 18, рис. 5.*

Ключевые слова: пылеочистка дымовых газов, электрический ветер, электростатический фильтр, пристенная струя.

Требования документов Европейского Союза по защите окружающей среды от выбросов загрязняющих веществ из промышленных установок становятся все более жесткими [1–3], что заставляет разработчиков газоочистного оборудования и оперативный персонал эксплуатирующих компаний в промышленности и энергетике искать способы дальнейшего повышения эффективности систем очистки отходящих газов от таких загрязняющих веществ, как диоксид серы, оксиды азота и взвешенные частицы (пыль). Поиск решения этих задач связан с более точным изучением физических процессов и механизмов, влияющих на эффективность удаления загрязняющих веществ из многофазных потоков.

Для очистки больших объемов отходящих газов промышленных установок от частиц пыли

наиболее широко используются электростатические фильтры (ЭСФ). На угольных ТЭС взвешенные частицы в уходящих дымовых газах представлены частицами летучей золы. В ЭСФ частицы летучей золы заряжаются в поле коронного разряда, создаваемом коронирующими электродами, и под действием силы электрического поля движутся в направлении осадительных электродов, одновременно находясь в поле действия других сил, способствующих или препятствующих их осаждению и удалению из газового потока.

Всякому направленному движению частиц в газовом потоке противодействует сила сопротивления среды — сила Стокса [4]. Влияние силы тяжести начинает сколько-нибудь заметно сказываться на движении частиц пыли размером более 30–40 мкм [5]. Турбулентная диффу-

зия способствует выравниванию концентрации частиц пыли в поперечном сечении электрофилтра, что улучшает улавливание частиц пыли в ЭСФ [6]. Важным явлением, влияющим на эффективность электрофилтра, представляется возникновение электрического ветра в системе с коронирующими электродами [7].

Несмотря на открытие явления электрического ветра еще в 1709 г. физические механизмы, влияющие на его развитие, до сих пор считаются недостаточно изученными, а аналитические решения задачи об электрическом ветре получены лишь для малого числа весьма упрощенных моделей [8, 9]. Возникновение электрического ветра в газе связывается с увлечением нейтральных молекул газа при передаче им импульса от электронов и ионов плазмы коронного разряда, что порождает направленное течение газа в межэлектродном промежутке. Приведенная масса упругих соударений ионов и молекул газа значительно больше, чем приведенная масса упругих соударений электронов и молекул [10], поэтому электрический ветер часто называют ионным. Однако при более детальном анализе не стоит пренебрегать влиянием электронов, объемного заряда, неупругих соударений (перезарядка) и прочими элементарными процессами [7].

Экспериментальные лабораторные исследования подтверждают существование электрического ветра в системах с коронирующими электродами [7, 11]. Наличие направленного потока газа фиксируется различными способами, включая механические (подвешенная в потоке бусина), шлирен-фотографии, методы лазерной велосиметрии. Даже в покоящемся газе электрический ветер приводит к образованию вихревых структур вблизи коронирующих электродов, причем в положительном коронном разряде такие структуры достаточно регулярны, а в отрицательной короне за единицы секунд распадаются, что обычно объясняют меньшей регу-

лярностью и равномерностью отрицательного коронного разряда [12].

В простых системах с коронным разрядом разными авторами получены экспериментальные зависимости скорости электрического ветра от напряженности поля (тока) разряда и от расстояния между коронирующим и осадительным электродом [11–14]. Далее при проведении собственных расчетов были использованы экспериментальные данные зависимости скорости электрического ветра V от расстояния между электродами L в системе игла — плоскость с параметрами коронного разряда, близкими к используемым в ЭСФ [11]. График такой зависимости приведен на рис.1.

В последние десятилетия большое значение приобрели методы лазерной велосиметрии частиц, а с развитием мощностей и возможностей вычислительной техники методы вычислительной гидродинамики. Применение прикладных вычислительных пакетов FLUENT, ANSYS и пр. позволило более подробно исследовать явление электрического ветра в двух- и трехмерном измерении, что проливает свет на ряд особенностей развития этого явления в устройствах с применением электрических полей высокой напряженности. В отличие от случая возникновения электрического ветра в покоящейся газовой среде, когда передача импульса от заряженных частиц нейтральным молекулам приводит к образованию «затопленной струи», в реальных промышленных газоочистных установках общая картина усложняется тем, что в них присутствует основной поперечный поток запыленного газа и при обычной сложной геометрии установок пылеочистки взаимодействие этих потоков носит непростой характер, что влияет на результат пылеулавливания.

Удобным параметром, позволяющим оценить степень влияния электрического ветра на характер движения частиц пыли в системе «коронирующий электрод — плоскость», является электрогидродинамическое число [8], определяемое по формуле:

$$N_{\text{ЕНД}} = J h / (\rho \mu v_0^2) = e n_i E h / (\rho v_0^2),$$

где J — плотность тока, А/м^2 ; h — межэлектродное расстояние, м ; ρ — плотность газа, кг/м^3 ; μ — подвижность ионов, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; v_0 — линейная скорость основного газового потока, м/с ; e — элементарный заряд, Кл; $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$; n_i — концентрация ионов, м^{-3} ; E — напряженность электрического поля, В/м .

Число $N_{\text{ЕНД}}$ представляет собой отношение энергии кулоновских сил к кинетической энергии газового потока. Из определения $N_{\text{ЕНД}}$ следует, что значение электрогидродинамического

Рис.1. Зависимость скорости электрического ветра от расстояния между электродами. Подаваемое на коронирующие электроды напряжение электрического поля V_k , кВ: 1 — 70; 2 — 50 [11].

числа меняется от нуля до бесконечности. При малых плотностях тока и больших скоростях основного газового потока $N_{\text{ЕНД}}$ мало, и влияние электрического ветра незначительно. Считается, что при $N_{\text{ЕНД}} < 1$ влиянием электрического ветра на работу ЭСФ можно пренебречь. Это видно из результатов расчетов с использованием метода случайных блужданий, приведенных в статье [8], представленных на рис.2 для различных значений числа $N_{\text{ЕНД}}$.

В статье [8] расстояние между проволочными коронирующими электродами (точки — в поперечном разрезе на рис.2), на которые подавалось напряжение 40 кВ, составляло 5 см, а расстояние между плоскими осадительными электродами — 10 см. Монодисперсные частицы диаметром $d_p = 1,5$ мкм добавлялись в основной поток газа, в котором скорость газа v_0 составляла 0,3–1,8 м/с. Мелкие частицы выбраны ввиду их малой инерционности, что заставляет такие частицы двигаться по линиям тока газового потока и повторять сложную картину взаимодействия основного и вторичного, связанного с электрическим ветром, газовых потоков.

Из рис.2 видно, что при числах $N_{\text{ЕНД}}$, близких к нулю (рис.2, а), частицы следуют линиям тока ламинарного основного потока запыленного газа и влияние электрического ветра практически никак не проявляется. При постоянной напряженности поля с понижением скорости основного потока число $N_{\text{ЕНД}}$ начинает возрастать, картина ламинарного запыленного потока начинает искажаться с появлением неравномерности основного потока и изменением траекторий движения частиц пыли (рис.2, б).

Рис.2. Линии тока потока газа для различных значений числа $N_{\text{ЕНД}}$: а — 0; б — 10,3; в — 15,6 [8].

С дальнейшим увеличением числа $N_{\text{ЕНД}}$ до 15,6 при малых значениях скоростей основного потока за коронирующими и вблизи осадительных электродов возникают вихри (рис.2, в), и влияние электрического ветра становится весьма заметным. Вихри возникают на некотором удалении от коронирующих электродов, захваченные ими мелкие частицы в силу сохранения завихренности [15] на определенное время оказываются «в ловушке», что препятствует их миграции к осадительному электроду и отрицательно сказывается на эффективности улавливания частиц пыли в ЭСФ.

При заданной напряженности поля, которая определяется агрегатом питания ЭСФ, желательно, чтобы скорость основного потока запыленного газа не была слишком малой во избежание образования вихрей, но и не слишком большой во избежание сильной турбулизации основного газового потока. Оптимальная скорость основного потока лежит в пределах 0,8–1,2 м/с. Для типичных параметров промышленных электростатических фильтров ($E = 250$ кВ/м, $n_i = 10^{14}$ м $^{-3}$, $h = 0,2$ м, $\rho = 0,96$ кг/м 3 , $v_0 = 1$ м/с) значение электрогидродинамического числа $N_{\text{ЕНД}} = 0,64$, то есть выполняется условие малости числа $N_{\text{ЕНД}}$. Следовательно, для промышленных электрофильтров влияние электрического ветра является незначительным и не принимается в расчет при проектировании ЭСФ.

Запыленный поток реальных промышленных отходящих газов содержит широкий спектр размеров частиц, которые в сильных электрических полях в присутствии электрического ветра движутся по-разному. Наиболее мелкие, наименее инерционные, субмикронные частицы и вообще частицы класса PM2.5 в центральной области межэлектродного пространства оказываются захваченными вихрями [5]. Кроме того, такие частицы несут небольшой электрический заряд и медленнее мигрируют к осадительному электроду. Более крупные частицы несут больший заряд, но в скрещенных потоках газа в присутствии электрического ветра их направленное движение к осадительным электродам искажено, и осаждение таких частиц приобретает вероятностный характер.

Для изучения движения частиц разных размеров под действием электрического ветра было проведено математическое моделирование, в котором по данным рис.1 была аппроксимирована зависимость скорости V электрического ветра (рис.1, кривая 2) от расстояния от коронирующего электрода. В такой постановке задачи предполагалось, что скорость основного потока газа v_0 равна нулю, и частицы пыли движутся со скоростью V_p только под действием гидродинамических сил вторичного потока, вызванного

Рис.3. Соотношение скоростей электрического ветра и частиц пыли разного размера (d_p , мкм: а — 2,5; б — 10; в — 35; г — 90) вдоль межэлектродного промежутка: 1 — скорость электрического ветра V ; 2 — скорость частицы V_p ; x — расстояние от коронирующего электрода.

электрическим ветром. Частицы пыли считаются незаряженными для того, чтобы проследить исключительно механическое влияние электрического ветра на движение частиц. Начальные скорость частиц и их расстояние от коронирующего электрода считались равными нулю.

Данные результатов расчета приведены на рис.3 для частиц пыли различного диаметра d_p .

Из рис.3 видно, что под действием электрического ветра мелкие, низко инерционные частицы класса PM10, находящиеся в непосредственной близости к коронирующему электроду, быстро приобретают скорость электрического ветра (рис.3, а, б) и с такой скоростью движутся в сторону основного газового потока и осадительных электродов. Скорость более инерционных частиц, диаметром примерно 35 мкм, сначала достигает скорости электрического ветра, некоторое время несколько превосходит ее и на расстояниях, приближающихся к размеру межэлектродного промежутка (рис.3, в), сравнивается со скоростью электрического ветра. Еще более тяжелые частицы сначала быстро разгоняются, а затем превышают скорость ветра, заметно отклоняясь от линий тока вторичного потока газа, вызванного электрическим ветром (рис.3, г), однако их скорость при этом остается относительно

невысокой по сравнению со скоростью электрического ветра у коронирующих электродов.

Расчеты показали, что мелкие частицы PM10, находящиеся на удалении от коронирующего электрода, за счет малости скорости индукции быстро приобретают скорость вторичного потока газа под действием электрического ветра, однако величина этой скорости на удалении от коронирующего электрода намного меньше скорости ветра вблизи коронирующего электрода. Удаленные от электрода более крупные, инерционные, частицы при также малой скорости индукции быстро достигают скорости электрического ветра и даже в несколько раз превышают ее с разгоном по мере приближения этих частиц к осадительному электроду. Следовательно, гидродинамическое воздействие электрического ветра более способствует осаждению в электрофильтрах крупных, нежели мелких частиц.

Приведенная выше модельная задача дает возможность оценить исключительно механическое влияние электрического ветра на эффективность улавливания частиц пыли разного диаметра. При этом считалось, что зарядка частиц пыли в поле коронного разряда отсутствует. В реальных электростатических фильтрах зарядка частиц имеет определяющее влияние на скорость, осаждение и

Рис.4. Массовая концентрация частиц в межэлектродном промежутке: а — $d_p = 2 \text{ мкм}$, $c_p = 1 \text{ г/м}^3$; б — $d_p = 5 \text{ мкм}$, $c_p = 1,9 \text{ г/м}^3$ [6].

эффективность ЭСФ. Крупные частицы, несущие больший заряд, в поле кулоновских сил и без помощи воздействия электрического ветра эффективно улавливаются на осадительных электродах. Ввиду сложной геометрии электрофильтров и траекторий движения частиц улавливание частиц из запыленного потока газа носит вероятностный характер. Однако электрический ветер оказывает определенное влияние на характер распределения частиц в межэлектродном пространстве коронного разряда.

Основное падение напряжения в коронном разряде приходится на узкую область вблизи коронирующих электродов разряда, где частицы быстро приобретают максимальный заряд и под действием сильных электрического поля и электрического (ионного) ветра вытесняются в сторону основного потока и осадительных электродов. Частицы, проходящие далее от коронирующего электрода, медленнее приобретают заряд и, следовательно, медленнее мигрируют в сторону осадительного электрода. В результате образуется область повышенной концентрации частиц, которая при развитости электрического ветра может приходиться на зону активного образования вихрей и препятствовать осаждению частиц.

Распределение массовой концентрации частиц пыли в системе с тремя коронирующими электродами, полученное с применением прикладного пакета FLUENT, представлено на рис.4, по данным работы [6], для разных размеров частиц d_p и начальной плотности запыленности потока отходящих газов c_p . Скорость основного газового потока составляла 1 м/с , расстояние между коронирующими и осадительными электродами — $h = 10 \text{ см}$, между коронирующими электродами — 15 см , потенциал на коронирующих электродах $V = 70 \text{ кВ}$.

Из рис.4 видно, что более крупные частицы, несущие больший электрический заряд, активно

оттесняются от коронирующих электродов и в сильном кулоновском поле осаждаются быстрее. При проведении расчетов авторами [6] было учтено влияние большинства механизмов и процессов, происходящих в ЭСФ, включая искажение электрического поля и плотности тока коронного разряда объемным зарядом частиц пыли.

Еще одну особенность в движение частиц пыли в ЭСФ вносит наличие пристенной струи, которая представляет пример пограничного слоя смешанного типа, объединяющего вязкий пристенный слой на плоской поверхности со свободной струей [4]. Концентрация частиц пыли в пристенной струе заметно выше, чем в области основного газового потока (рис.5). Здесь скорость основного газового потока $v_0 = 1 \text{ м/с}$; расстояние между коронирующими и осадительными электродами — 24 см ; потенциал на коронирующих электродах $V = 70 \text{ кВ}$; массовый расход частиц летучей золы составлял $0,0001 \text{ кг/с}$.

Видно заметное повышение концентрации частиц пыли вблизи стенки (осадительного электрода) и при наличии, и при отсутствии электростатического поля в системе, что подтверждает постоянное присутствие пристенной струи в ЭСФ. Наличие вязкого пограничного слоя и пристенной струи с высокой концентрацией в ней частиц пыли, в том числе разогнанных электрическим ветром инерционных частиц (см. рис.3), препятствует эффективному осаждению частиц, поскольку напряженность поля и скорость электрического ветра у осадительных электродов невелики, а пристенная струя вызывает эрозию слоя осажденных частиц, тем самым приводя к нетехнологическому (не связанному с периодическим встряхиванием осадительных электродов) вторичному уносу пыли. В таких условиях эффективность улавливания частиц пыли определяется протяженностью ЭСФ, ско-

Рис.5. Зависимость концентрации частиц пыли от расстояния до коронирующего электрода на выходе системы «игла — плоскость» с тремя коронирующими электродами: 1 — концентрация частиц в присутствии электростатического поля; 2 — концентрация без электростатического поля [9].

ростом миграции заряженных частиц и формой осадительных электродов. При использовании электродов неплоской формы, обычно применяемых в промышленных ЭСФ, и относительно больших скоростях основного потока отходящего газа форма пристенной струи будет меняться.

Большинство встречающихся в литературе расчетных моделей ЭСФ с использованием методов вычислительной гидродинамики имеет тот недостаток, что в них рассматривается ограниченное число секций «игла (провод) — плоскость», поэтому такие модели обычно охватывают лишь начальный участок ЭСФ [5, 6, 8, 9, 16–18]. Хотя подобные модели позволяют оценить движение частиц под действием электрического ветра, вероятностный характер движения частиц различного размера в скрещенных потоках электрического ветра и основного газового потока при сложной геометрии протяженного электрофильтра заставляет предположить, что истинное влияние электрического ветра в промышленных электрофильтрах оценить сложнее. Поэтому настройка работы промышленных ЭСФ производится в процессе пуско-наладочных работ.

Выводы

При расчете и проектировании ЭСФ процессы в электростатических фильтрах, связанные с электрогазодинамикой запыленного потока: появлением электрического ветра, миграцией заряженных частиц в кулоновском поле, влиянием объемного заряда и возможным блокированием коронного разряда в сильно запыленных потоках, турбулентной диффузии частиц пыли, пристенной струи — неотделимы друг от друга. Однако одновременный учет перечисленных факторов сильно усложняет задачу.

Влияние электрического ветра при захвате мелких частиц вихрями в межэлектродном пространстве может скорее негативно сказываться на эффективности электрофильтров, а разгон крупных, инерционных, частиц электрическим ветром вносит лишь незначительное улучшение в их улавливание в ЭСФ, которое и без того является весьма эффективным в поле кулоновских сил. Поэтому при расчете и проектировании ЭСФ влиянием электрического ветра можно пренебречь.

В общем случае траектории движения частиц различного диаметра в скрещенных потоках электрического ветра и основного запыленного потока отходящих газов становятся нерегулярными, что весьма характерно для эксплуатации ЭСФ угольных энергоблоков в маневренных режимах, а улавливание частиц в различных условиях приобретает вероятностный характер.

Повышение скорости основного потока очищаемых газов может предотвратить возникновение вихрей, связанных с влиянием электрическо-

го ветра. Скорость основного потока отходящих газов при заданной напряженности электрического поля в электрофильтре не должна быть слишком низкой, чтобы избежать турбулизации потока благодаря действию электрического ветра, и не очень высокой, чтобы не вызвать турбулизацию основного потока газа. Поэтому величина оптимальной скорости основного потока газа в ЭСФ находится в пределах 0,8–1,2 м/с.

Исследование более тонкого влияния перечисленных процессов в условиях ужесточения требований к эффективности газоочистного оборудования остается актуальным, но сложным вопросом.

Список литературы

1. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. *Official Journal of the European Communities*, L 309/1, 27.11.2001.
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). *OJ L 334*, 17.12.2010.
3. COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2017/1442 of 31 July 2017 establishing best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for large combustion plants. *Official Journal of the European Union*. L 212/1. 17.08.2017.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа : Учеб. для вузов. М. : Наука, 1987. 840 с.
5. Ning Z.Y., Chen J.W., Yan K. Numerical analysis of ionic wind induced EHD turbulence flow inside ESP. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*. 2017. Vol. 11, № 1. P. 64–68.
6. Choi B.S., Fletcher C.A.J. Turbulent particle dispersion in an electrostatic precipitator. *Applied Mathematical Modelling*. 1998. Vol. 22. pp. 1009–1021.
7. Sanghoo P., Cvelbar U., Wonho Choe, Se Youn Moon. Creation of electric wind due to the electrophydrodynamic force. *Nature Communications*. DOI: 10.1038 / s41467-017-02766-9. 2018. 9:371. — <https://www.nature.com/naturecommunications>.
8. Xing Mao, Guo Baoyu, Yu Aibing. Effect of electrohydrodynamic secondary flow on the particle collection in a wire-plate electrostatic precipitator. *Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. CSIRO, Melbourne, Australia, 10–12 December 2012. — https://www.cfd.com.au/cfd_conf12/PDFs/043XIN.pdf
9. Shah M.E. Haque, Rasul M.G., Khan M.M.K., Deev A.V., and Subaschandar N. A Numerical Model of an Electrostatic Precipitator. *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*. Crowne Plaza, Gold Coast, Australia, 2–7 December 2007, pp. 1050–1054. — https://www.cfd.com.au/cfd_conf12/PDFs/043XIN.pdf
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.

11. Аэродинамика в технологических процессах : Справ. химика. Под ред. В.В.Струминского. М. : Наука, 1981. 681 с.
12. Kim S.H., Lee K.W. Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models. *Journal of Electrostatics*. 1999. Vol. 48. P. 3–25.
13. Козлов Б.А., Соловьев В.И. Исследование «электрического ветра» в электродных системах с коронирующими остриями. *Журн. техн. физики*. 2007. Т. 77, вып. 7. С. 70–76.
14. Mizeraczyk J., Kocik M., Dekowski J., Dors M., Podliski J., Ohkubo T., Kanazawa S., Kawasaki T. Measurement of the velocity field of the flue gas flow in an electrostatic precipitator model using PIV method. *Journal of Electrostatics*. 2001. Vol. 51–52. P. 272–277.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI: Гидродинамика. М. : Наука, 1986. 736 с.
16. Feng Zhuangbo, Zhengwei Long, Shiqi Cao, K. Adamiak. Characterization of electrohydrodynamic (EHD) flow in electrostatic precipitators (ESP) by numerical simulation and quantitative vortex analysis. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 91. P. 70–80. — <https://www.researchgate.net/.../322865600>
17. Zouzou N., Dramane B., Moreau E., Touchard G. EHD Flow and Collection Efficiency of a DBD ESP in Wire-to-Plane and Plane-to-Plane Configurations. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011. Vol. 47. Iss. 1. P. 336–343. — <https://ieeexplore.ieee.org/document/5629361>
18. Yamamoto T., Okuda M., and Okubo M. Three-dimensional ionic wind and electrohydrodynamics of tuft/point corona electrostatic precipitator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2002. Vol. 39. P. 1602–1607.

Поступила в редакцию 10.07.19

Ращепкін В.А., канд. техн. наук, **Вольчин І.А.,** докт. техн. наук,
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
 вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна; e-mail: ceti@i.kiev.ua

Оцінка впливу електричного вітру на ефективність уловлювання дисперсних частинок у потоці димових газів в електростатичних фільтрах

Питання впливу електричного вітру на ефективність уловлювання дисперсних частинок у потоці димових газів в електростатичних фільтрах досі недостатньо вивчене. Наведено оцінки ролі та впливу електричного вітру на процеси уловлювання частинок у промислових електрофільтрах, а також результати експериментів та розрахунків із застосуванням прикладних пакетів обчислювальної гідродинаміки. Представлено результати математичного моделювання швидкості руху частинок пилу різних діаметрів під дією електричного вітру в міжелектродному просторі коронного розряду. Надано оцінки впливу на ефективність уловлювання частинок пилу турбулізації газового потоку, пристінного струменя та ймовірного видалення твердих частинок з потоку запиленого відхідного газу. *Бібл. 18, рис. 5.*

Ключові слова: пилоочистка димових газів, електричний вітер, електростатичний фільтр, пристінний струмінь.

Raschepkin V.A., Candidate of Technical Sciences,
Volchyn I.A., Doctor of Technical Sciences
Coal Energy Technology Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
 19, Andriivska Str., 04070 Kyiv, Ukraine; e-mail: ceti@i.kiev.ua

Evaluation of the Influence of Electric Wind on the Efficiency of Dispersed Particles Removal from the Flue Gas Stream in Electrostatic Precipitators

The question of influence of the electric wind on efficiency of dispersed particles removal from a flue gas stream in electrostatic filters has not been studied well enough. Estimates are given of the role and influence of electric wind on the particle trapping processes in industrial electrostatic precipitators, as well as the results of experiments and calculations using

applied computational fluid dynamics packages. The results of mathematical modeling of the speed of dust particles of different diameters under the action of electric wind in the inter-electrode space of a corona discharge are presented; and the effects of turbulence of a gas flow on the particles capturing, the influence of the near-wall jet and the probabilistic nature of the removal of solid particles from the dusted exhaust gas flow are evaluated. *Ref. 18, Fig. 5.*

Key words: flue gas dedusting, electric wind, electrostatic filter, wall jet.

References

1. Directive 2001/80 / EC on the European Parliament of 23 October 2001 on polluting emissions. Official Journal of the European Communities, L 309/1, 11/27/2001.
2. Directive 2010/75/ EU on November 10, 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). OJ L 334, 12/17/2010.
3. COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2017/1442 of 31 July 2017 establishing the best available methods (BAT) for the European Parliament. *Official Journal of the European Union*. L 212/1. 17.8.2017.
4. Loitsyansky L.G. [Fluid and gas mechanics]. Moscow : Nauka, 1987. 840 p. (Rus.)
5. Ning Z.Y., Chen J.W., Yan K. Numerical analysis of ionic wind induced EHD turbulence flow inside ESP. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*. 2017. Vol. 11, No. 1. pp. 64–68. — https://www.iesj.org/.../IJPEST_Vol11_No1_13_pp064-068.pdf
6. Choi B.S., Fletcher C.A.J. Turbulent particle dispersion in an electrostatic precipitator. *Applied Mathematical Modeling*. 1998. Vol. 22. pp. 1009–1021. — <https://www.sciencedirect.com/science/.../S0307904X981003>
7. Sanghoo P., Cvelbar U., Wonho Choe, Se Youn Moon. Creation of electric wind due to the electrohydrodynamic force. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/s41467-017-02766-9. 2018. 9:371. — <https://www.nature.com/naturecommunications>.
8. Xing Mao, Guo Baoyu, Yu Aibing. Electro hydrodynamic precipitation of electrohydrodynamic precipitator. *Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. CSIRO, Melbourne, Australia, 10–12 December 2012. — https://www.cfd.com.au/cfd_conf12/PDFs/043XIN.pdf
9. Shah M.E. Haque, Rasul, M.G., Khan, M.M.K., Deev A.V., and Subaschandrar N. A Numerical Model of an Electrostatic Precipitator. *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*. Crowne Plaza, Gold Coast, Australia, 2–7 December 2007, pp. 1050–1054. — https://espace.library.uq.edu.au/.../Haque_afmc_16_07.pdf
10. Raiser Yu.P. [Physics of gas discharge]. Moscow : Science, 1987. 591 p. (Rus.)
11. [Aerodynamics in technological processes. Chemist Handbook. Ed. V.V.Struminsky]. Moscow: Nauka, 1981. 681 p. (Rus.)
12. Kim S.H., Lee K.W. Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models. *Journal of Electrostatics*. 1999. Vol. 48. pp. 3–25. — <https://www.lorentzcenter.nl/.../1-s2.0-S0304388699000443-main>
13. Kozlov B.A., Soloviev V.I. The study of «electric wind» in the electrode systems with corona tips. *Journal of Technical Physics*. 2007. 77 (7). pp. 70–76. (Rus.)
14. Mizeraczyk J., Kocik M., Dekowski J., Dors M., Podlinski J., Ohkubo T., Kanazawa S., Kawasaki T. Measurement of the velocity field of the flue gas flow in an electrostatic precipitator model using PIV method. *Journal of Electrostatics*. 2001. Vol. 51–52. pp. 272–277. — <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.472.1774&rep=rep1&type=pdf>
15. Landau L.D., Lifshitz E.M. [Course of Theoretical Physics. Vol. 6: Fluid mechanics]. Pergamon Press, 1987. XIV, 539 p. ISBN 0-08-033933-6. (Rus.)
16. Feng Zhuangbo, Zhengwei Long, Shiqi Cao, K. Adamiak. Characterization of electrohydrodynamic (EHD) flow in electrostatic precipitators (ESP) by numerical simulation and quantitative vortex analysis. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 91. pp. 70–80. — <https://www.researchgate.net/.../322865600>
17. Zouzou N., Dramane B., Moreau E., Touchard G. EHD Flow and Collection Efficiency of a DBD ESP in Wire-to-Plane and Plane-to-Plane Configurations. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011. Vol. 47. Iss. 1. pp. 336–343. — <https://ieeexplore.ieee.org/document/5629361>
18. Yamamoto T., Okuda M., and Okubo M. Three-dimensional ionic wind and electrohydrodynamics of tuft/point corona electrostatic precipitator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2002. Vol. 39. pp.1602–1607. — <https://www.researchgate.net/.../322865600>

Received July 10, 2019