

ОБ ОСАЖДЕНИИ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В ЭЛЕКТРОЦИКЛОНЕ

В.А. Петров, Н.В. Инюшкин, С.А. Ермаков

*Кафедра «Процессы и аппараты химической технологии»,
ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»;
biograna@yandex.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: активная зона; коронирующий электрод; летучая зола; скорость осаждения; степень очистки; электроциклон.

Аннотация: Приводится объяснение достижения высокой степени очистки газа от частиц летучей золы экибастузского угля в электроциклоне.

Обозначения	
Ag – критерий Архимеда;	R – радиус вращения газового потока, м;
Ag_m – модифицированный критерий Архимеда;	Re_p – критерий Рейнольдса для частиц;
Ag_{mc} – модифицированный критерий Архимеда для центробежной силы;	Re_g – критерий Рейнольдса для газа;
Ag_{me} – модифицированный критерий Архимеда для электрической силы;	W_g – скорость газа, м/с;
d_p – диаметр частицы, м;	W_a – осевая скорость газа, м/с;
d_{ch} – эквивалентный диаметр канала, м;	W_p – скорость осаждения частицы, м/с;
E_s – напряженность электрического поля осаждения, В/м;	W_p^c – скорость осаждения частицы под действием центробежной силы, м/с;
F_c – центробежная сила, Н;	W_p^e – скорость осаждения частицы под действием электрической силы, м/с;
F_e – электрическая сила, Н;	U – напряжение, кВ;
K_c – фактор разделения для центробежной силы;	μ – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с;
K_e – фактор разделения для электрической силы;	ρ_p – плотность частиц, г/м ³ ;
	ρ_g – плотность газа, г/м ³ .

Проблема эффективной очистки газов от пыли на промышленных предприятиях и тепловых электростанциях, работающих на твердом топливе, является в настоящее время актуальной задачей. Из паровых котлов запыленный газ проходит через циклоны – первую ступень очистки, а затем через электрофильтры. Последние являются громоздкими и капиталоемкими сооружениями из-за особенностей протекания процесса пылеулавливания. В качестве альтернативы представляется возможным использовать электроциклон. Аппарат, имея такую же высокую эффективность пылеулавливания, как и электрофильтр, занимает площадь в 2–3 раза меньше, а энергопотребление для коронирующих электродов снижено в 2 раза. В отличие от электрофильтров, в которых возникают проблемы с улавливанием пыли, обладающей высоким удельным электрическим сопротивлением (более 10^{11} Ом·м), разработанное устройство, за счет рационального сочетания аэродинамики потока и электрического поля высокой напряженности, успешно очищает газы от промышленных пылей с неблагоприятными электрофизическими свойствами.

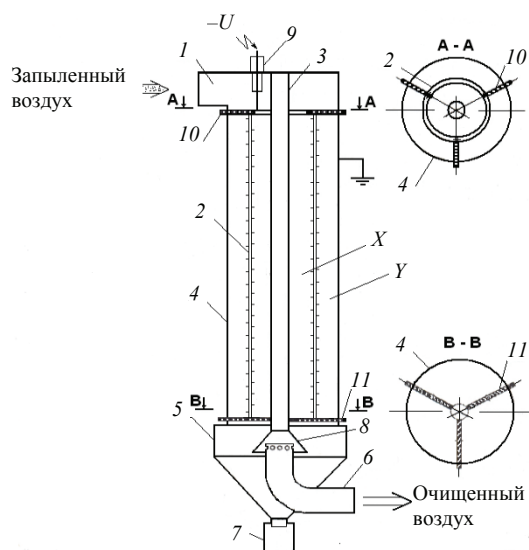


Рис. 1. Электроциклон модели ЭЦВ-I: 1 – улитка; 2 – коронирующий электрод; 3 – центральная труба (внутренний осадительный электрод); 4 – корпус (внешний осадительный электрод); 5 – бункер; 6 – труба, отводящая очищенный газ; 7 – стакан; 8 – насадка; 9 – изолятор; 10, 11 – фторопластовые распорки; X – внутренняя область активной зоны; Y – внешняя область активной зоны

Электроциклон вертикальный (ЭЦВ) с системой электродов (один коронирующий 2 и два осадительных 3 и 4) представлен на рис. 1.

Данная конструкция обеспечивает более высокую производительность по сравнению с существующими аналогами [1–3] с системой электродов «один коронирующий (центральный) и один осадительный (внешний)» благодаря криволинейному каналу, содержащему две области активной зоны – внешнюю и внутреннюю. Электроциклон вертикальный оснащен нижним выводом очищенного газа, что позволяет улучшить аэродинамику газового потока внутри электроциклона [4] вследствие однонаправленного прямоочного движения запыленного и очищенного газа. Одновременно снижается гидравлическое сопротивление пылеулавливающей установки. Запыленный газовый поток поступает в аппарат по улитке 1. За счет вращения газового потока с окружной скоростью 10...20 м/с взвешенные частицы под действием центробежной и электрической сил отбрасываются к корпусу и далее под действием силы тяжести и движущегося вниз вихря увлекаются в бункер 5. Уловленная пыль сыпается из бункера в стакан 7. Очищенный воздух выводится наружу по трубе 6, проходящей через бункер. Для ионизации среды аппарат снабжен коронирующим электродом 2 типа «беличье колесо», к которому подводится электрический ток высокого напряжения. Аппарат оснащен двумя осадительными электродами диаметрами: 54 (центральная труба) и 206 мм (корпус). Коронирующий электрод подключен к отрицательному полюсу источника питания. Корпус аппарата заземлен. Коронирующий электрод центрируется и фиксируется фторопластовыми распорками 10. В промышленном аппарате регенерацию осадительных электродов можно осуществлять с помощью ударно-молотковых механизмов. Коронирующие электроды с коронирующими элементами ленточно-зубчатого типа с ориентировкой лент и зубьев, расположенными параллельно осадительным электродам, самоочищаются, поскольку окружная скорость движения газового потока в криволинейных каналах высокая (16...18 м/с), и осаждающаяся пыль на них будет сдуваться.

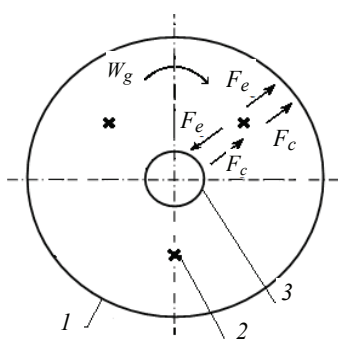


Рис. 2. Поперечное сечение кольцевого канала электроциклона со схематическим изображением направления центробежной и электрической сил: 1 – внешний «вогнутый» осадительный электрод; 2 – коронирующий электрод; 3 – внутренний «выпуклый» осадительный электрод; F_e – сила электрического поля; F_c – центробежная сила; W_g – окружная скорость газа

В ходе исследований закономерностей процесса осаждения частиц золы в криволинейном канале электроциклона было обращено внимание на явление, которое заключается в том, что во внутренней области активной зоны X аппарата (рис. 2) силы F_e и F_c , действующие на частицы, направлены противоположно, вследствие чего, казалось бы, не может достигаться высокая степень очистки. Однако во внешней области активной зоны Y между коронирующими электродами 2 и наружным осадительным электродом 1 силы электрического F_e и центробежного F_c поля совпадают по направлению, что способствует достижению высокой суммарной степени очистки [5–11]. Это подтверждено результатами многочисленных опытов: степень очистки в электроциклоне достигает 99,5...99,7 %.

С целью объяснения высказанного противоречия и установления реального механизма были проведены математические расчеты, высказаны гипотезы о траектории движения частиц и действию на частицы разного размера комплекса сил с выявлением доминирующей составляющей на основе математических данных и дальнейшем экспериментальном подтверждении высказанного предположения.

Для сопоставления величин сил, действующих на частицы различного размера во внутренней и внешней областях активной зоны, произведен расчет скоростей осаждения под действием центробежной и электрической сил при разных входных скоростях газопылевой смеси при одном и том же напряжении электрического тока.

Скорость осаждения частиц под действием центробежной силы определяется выражением

$$W_p^c = \frac{d_p^2 \rho_p W_g^2}{18 \mu R} \quad (1)$$

и под действием электрической силы

$$W_p^e = \frac{0,059 \cdot 10^{-10} E_s^2}{\mu} d_p. \quad (2)$$

Закон Стокса применим в случае, если критерий Рейнольдса для частиц $Re_p < 0,2$, а критерий Архимеда $Ar < 3,6$. Для учета влияния центробежной и электрической сил вводится фактор разделения K_c и K_e соответственно, представляющий собой отношение действующей силы на частицы к силе тяжести. Произведение фактора разделения K_c и K_e на критерий Архимеда, рассчитываемый по формуле (3), будет являться модифицированным критерием Архимеда для электрической Ar_{me} (4а) и центробежной Ar_{mc} (4б) сил соответственно. Из зависимости $Re_p = f(Ar_m)$ [12] находится величина критерия Re_p , из которого выражается скорость осаждения частиц (5):

$$Ar = \frac{d_p^3 g \rho_g (\rho_p - \rho_g)}{\mu^2}; \quad (3)$$

$$Ar_{mc} = ArK_c = Ar \frac{W_g^2}{gR}; \quad (4a)$$

$$Ar_{me} = ArK_e = \frac{Ar 5,9 \cdot 10^{-12} E_s^2}{d_p \rho_p g}; \quad (4b)$$

$$W_p = \frac{Re_p \mu}{d_p \rho_g}. \quad (5)$$

Результаты расчета скоростей осаждения W_p^e и W_p^c частиц золы экибаствозского угля, в частности, для входной скорости $W_g = 11$ м/с, с напряжением $U = 17,5$ кВ и межэлектродным расстоянием 0,038 м, представлены на рис. 3, из которого, видно, что для частиц размером менее 5 мкм преобладающее влияние на скорость осаждения оказывает электрическая сила, для частиц крупнее 10 мкм основной силой осаждения является центробежная. Данная зависимость сохраняется и при других значениях входной скорости газа и напряжения.

Важно отметить, что поток газа в активной зоне электроциклона сильно турбулизирован [13–15], причем турбулентность потока газа усиливается электрическим ветром, создаваемым ионами газа, движущимися с большой скоростью от коронирующего к осадительному электроду и обратно. Величина критерия Рейнольдса при условной (осевой) скорости газа $W_a = 1,6 \dots 1,8$ м/с в кольцевом канале электроциклона с эквивалентным диаметром канала равным $d_{ch} = 0,156$ м, рассчитываемая по формуле (6), составляет около 18000, что значительно больше критического значения, равного 2300,

$$Re_g = \frac{W_a d_{ch} \rho_g}{\mu}. \quad (6)$$

В этих условиях о скорости осаждения частиц можно говорить только в условно-ламинарном пограничном слое у поверхности осадительных электродов [16, 17].

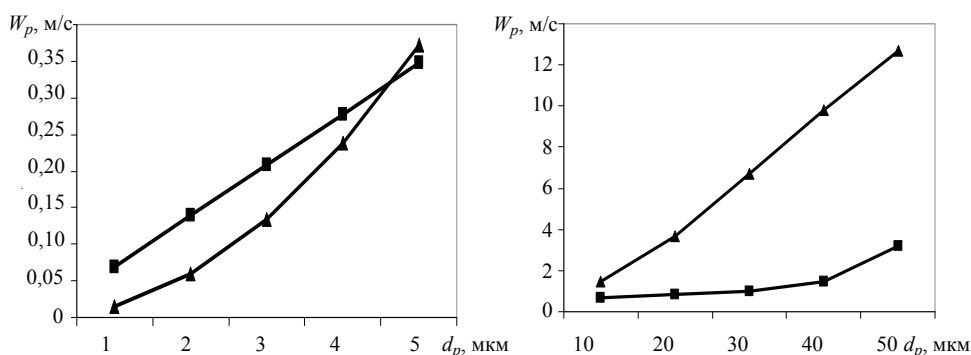


Рис. 3. Функциональная зависимость электрической (■) и центробежной (▲) скоростей осаждения частиц от их диаметра

Таким образом, на основе выполненных расчетов следует отметить, что в области встречного действия электрической и центробежной сил на частицы размером менее 5 мкм доминирующее действие оказывает электрическая сила, что должно обеспечивать наиболее полное осаждение мелких частиц на внутреннем осадительном электроде. Скорость осаждения более крупных частиц под действием центробежной силы F_c значительно больше, чем под действием электрической F_e . Поэтому такие частицы пыли должны быстро отбрасываться к внешнему осадительному электроду и осажаться на нем. В случае однонаправленности сил во внешней области активной зоны Y частицы всех размеров с высокой эффективностью осаждаются под совместным действием F_e и F_c .

С целью экспериментального подтверждения гипотезы были проведены опыты на модели электроциклона диаметром 206 мм при различной входной скорости пылегазовой смеси и начальной концентрации пылевоздушной смеси $3,5 \text{ г/м}^3$. По результатам этих опытов были получены зависимости количества осевшей золы на осадительных электродах и фракционных составов осевшей пыли на внутреннем и внешнем осадительных электродах.

Данные экспериментов подтверждают высказанное предположение, заключающееся в том, что с увеличением диаметра частиц начинает превалировать центробежная сила над электрической, поскольку видно, что на внутреннем осадительном электроде преобладают частицы размером менее 5 мкм, а на внешнем – частицы с диаметром более 10 мкм (рис. 4 а, б).

Анализ данных фракционного состава, представленного на рис. 5, золы осажденной на внешнем и внутреннем осадительных электродах электроциклона ЭЦВ-I при различных входных скоростях воздуха выявил следующие факты:

- частицы размером менее 5 мкм составляют значительное количество от общего числа осажденных частиц на внутреннем электроде;
- с увеличением входной скорости газа возрастает процентное содержание (по массе) частиц размером менее 5 мкм, осажденных на электродах.

С целью окончательного подтверждения гипотезы и выявления реального механизма осаждения частиц была разработана и испытана конструкция электроциклона типа «один осадительный электрод и одна система коронирующих электродов» – ЭЦВ-II, представленная на рис. 6. Очистка газа в этой модели происходит под действием электрических и центробежных сил, направленных противоположно.

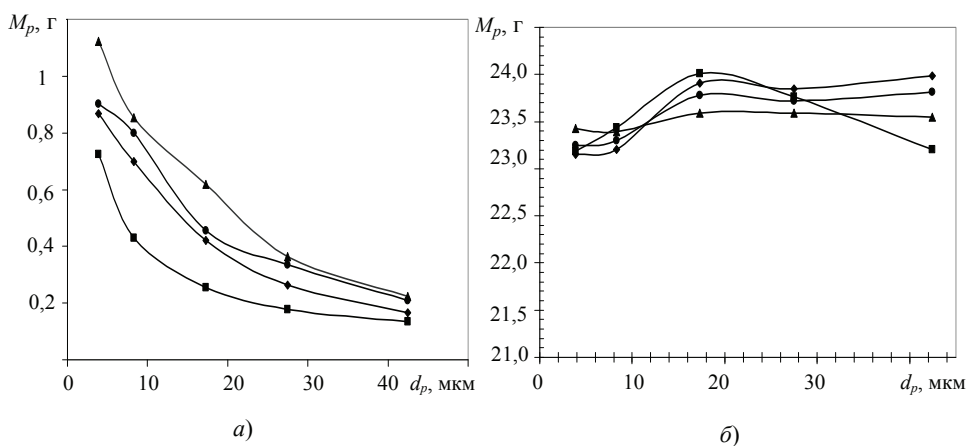


Рис. 4. Зависимость количества осевшей золы на осадительном электроде от диаметра частиц при разной входной скорости газа, м/с: ▲ – 10,72; ● – 12,71; ◆ – 15,16; ■ – 17,18; а – внутренний электрод; б – внешний электрод

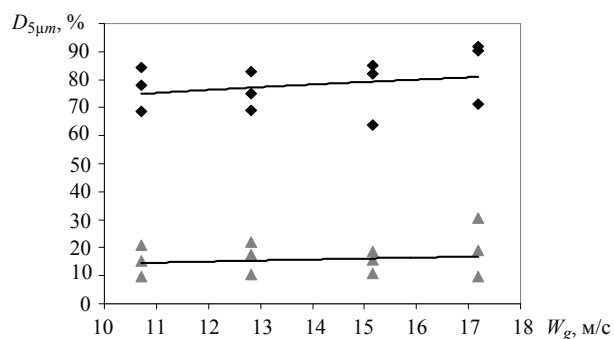


Рис. 5. Зависимость $D_{5\mu m}$ от входной скорости газа ЭЦВ-I:
 ◆ – внутренний; ▲ – внешний осадительные электроды

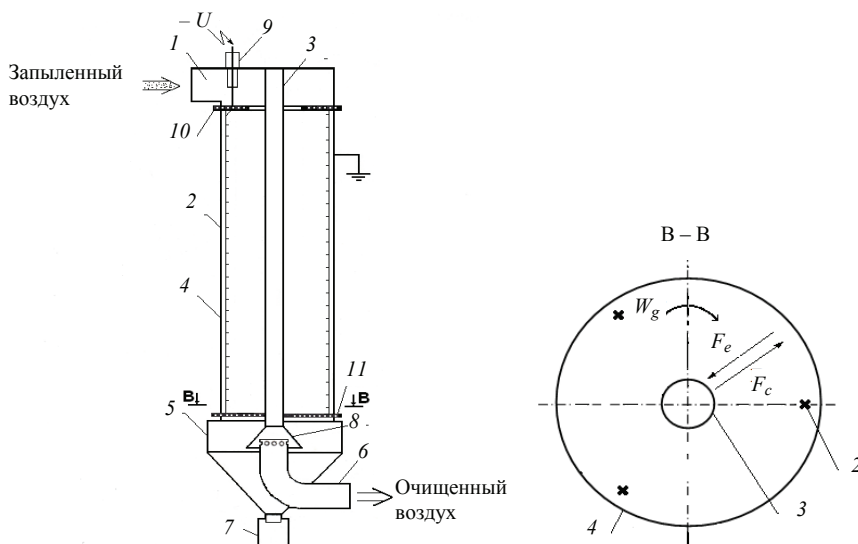


Рис. 6. Электроциклон модели ЭЦВ-II: 1 – улитка; 2 – коронирующий электрод; 3 – центральная труба; 4 – корпус; 5 – бункер; 6 – труба, отводящая очищенный газ; 7 – стакан; 8 – насадка; 9 – изолятор; 10, 11 – фторопластовые распорки

Значительное преобладание частиц размером менее 5 мкм по массе на внутреннем осадительном электроде диаметром 54 мм модели ЭЦВ-II (рис. 7), в которой электрическая сила направлена от периферии к центру аппарата и, действуя на частицы, осаждает их на внутреннем электроде, а центробежная сила направлена от центра к периферии и осаждает частицы на внешнем электроде, свидетельствует о правильности гипотезы, заключающейся в том, что на мелкие частицы преобладающее влияние оказывает электрическая частица.

Зависимость степени очистки газа η от скорости воздуха для моделей ЭЦВ-I и ЭЦВ-II представлена на рис. 8. Полученные данные свидетельствуют о том, что разнонаправленность действующих на частицы сил в электроциклоне не оказывает существенное влияние на общую степень очистки.

Эксперименты по улавливанию высокоомной летучей золы экибастузского угля проведены на стенде, схема которого представлена на рис. 9, при атмосферном давлении и комнатной температуре.

Зола подается золоподатчиком 1 в дезагрегированном виде по коллектору 6 в электроциклоне 14. Уловленная зола собирается в бункере электроциклона и сыпается в стакан 15.

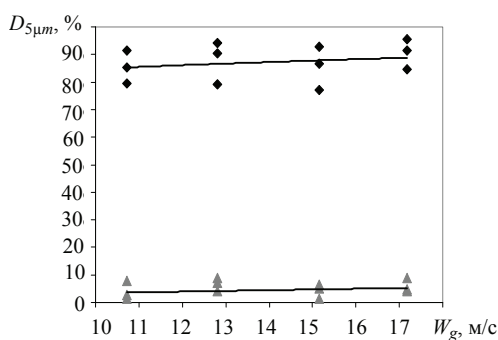


Рис. 7. Зависимость $D_{5\mu m}$ от входной скорости газа ЭЦВ-II: ♦ – внутренний; ▲ – внешний осадительные электроды

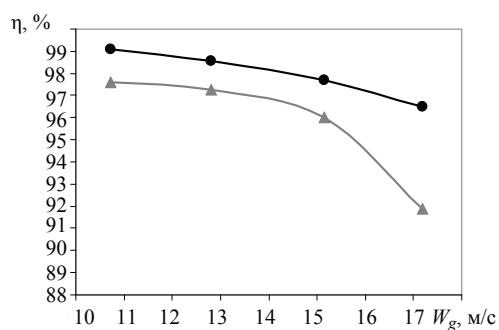


Рис. 8. Зависимость степени очистки газа η от входной скорости воздуха: ● – ЭЦВ-I; ▲ – ЭЦВ-II

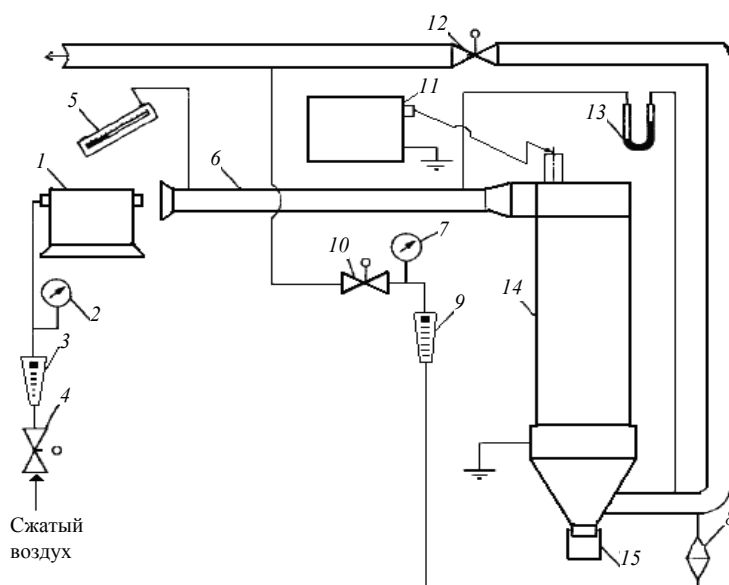


Рис. 9. Схема установки для улавливания высокоомной летучей золы экибастузского угля: 1 – золоподатчик; 2 – манометр; 3, 9 – ротаметр; 4 – вентиль регулировки подачи сжатого воздуха в золоподатчик; 5 – тягонапоромер жидкостный; 6 – коллектор; 7 – вакуумметр; 8 – фильтродержатель; 10 – вентиль регулировки скорости отбора пробы; 11 – выпрямительная установка ВС-20-10; 12 – вентиль регулировки скорости воздуха в аппарате; 13 – дифференциальный манометр; 14 – электроциклон (ЭЦВ-I, ЭЦВ-II); 15 – стакан

На электроды электроциклона подается высокое напряжение от выпрямительной установки 11.

Необходимая скорость воздуха во входном патрубке золоуловителя настраивается с помощью вентилья 12 по перепаду давления на тягонапоромере 5, подключенному к коллектору на воздуховоде 6. Гидравлическое сопротивление золоуловителя измеряется дифференциальным манометром 13.

Концентрацию пыли в воздухе после пылеуловителя определяли с использованием аэрозольного фильтра, закрепленного в фильтродержателе 8. Объем пропускаемого через фильтр воздуха измеряли с помощью ротаметра 9, настраивая с помощью вентилья 10 нужный расход отбираемого воздуха.

Дезагрегация золы достигается подачей сжатого воздуха через ротаметр 3 в эжекторное устройство золоподатчика 1 с тарельчатым питателем. Расход воздуха регулируется вентилем 4.

Замеры в газоходах производились до и после аппарата по единой методике, разработанной и утвержденной для проведения пылегазовых замеров. Анализ дисперсного состава исходной и уловленной золы проводился с помощью сканирующего фотоседиментографа.

Опыты проведены на моделях электроциклонов ЭЦВ-I и ЭЦВ-II при различных входных скоростях пылегазовой смеси. В качестве твердых частиц использовалась фракция золы экибастузского угля с размером частиц менее 10 мкм. После проведения каждого опыта зола собиралась отдельно с внутреннего и внешнего осадительных электродов путем поочередного смыва ее водой. Полученная суспензия отфильтровывалась, осадок подвергался сушке в сушильном шкафу.

Таким образом, расчетным путем установлена и экспериментально подтверждена правомерность ожидания высокой степени очистки воздуха от полидисперсных частиц летучей золы экибастузского угля в электроциклоне.

Показано, что в криволинейном канале электроциклона существуют две области между осадительным и коронирующим электродами: внутренняя, примыкающая к выпуклой поверхности осадительного электрода, и внешняя, примыкающая к вогнутой поверхности осадительного электрода.

На выпуклой поверхности осаждаются преимущественно мелкие частицы (менее 5 мкм), поскольку силы электрического поля преобладают над центробежными. На вогнутой поверхности с высокой эффективностью осаждаются частицы всех размеров, поскольку на них электрическая и центробежная силы действуют совместно, причем на частицы крупнее 10 мкм преобладающее влияние оказывает центробежная сила.

Осаждение пыли в криволинейном канале электроциклона происходит в условиях высокотурбулизированного потока газа. Как было доказано ранее [16–18] положительное влияние турбулентности газа преобладает над отрицательным.

Высокая степень очистки газа от частиц пыли, достигаемая в электроциклоне (99,5...99,9 %), объясняется благоприятным взаимодействием обоих силовых полей, а разработанная конструкция аппарата (ЭЦВ-I) обеспечивает высокую производительность.

Список литературы

1. Patent US4352681 (P.W. Dietz), Electrostatically augmented cyclone apparatus, 1982.
2. Patent EP0500752 (J. DEYSSON), Electrocyclone for gas cleaning, 1990.
3. Пат. 2306182 Российская Федерация, МПК⁷ В 03 С 3/15 Электроциклон / Кочетов О.С., Кочетова М.О. ; заявитель и патентообладатель Кочетов О.С. – № 2006112924/15 ; заявл. 19.04.2006 ; опубл. 20.09.2007, Бюл № 18. – 5 с.
4. Циклон НВГК для грубо-средней очистки газа в системах пылеулавливания / Л.М. Новиков [и др.] // Материалы IV регион. науч.-практич. конф. «Алюминий Урала-99», Краснотурьинск, 2000 г. / Краснотурьинск, 2000. – С. 44–46.
5. Li, J. Study of the cut diameter of solid-gas separation in cyclone with electrostatic excitation / J. Li, W. Cai // J. Electrostat. – 2004. – Vol. 60. – P. 15–23.
6. Li, J. Theory and application of cyclone with impulse electrostatic excitation for cleaning molecular gas / J. Li, W. Cai // J. Electrostat. – 2006. – Vol. 64. – P. 254–258.
7. Zhen, Huang. Research on the models of straight-through flow electrocyclone precipitation / Huang Zhen, Wang Wenliang // J. Southeast Univ. – 1996. – Vol. 26. – P. 119–123.

8. Lim, K.S. An experimental study of the performance factors affecting particle collection efficiency of the electrocyclone / K.S. Lim, K.W. Lee, M.R. Kuhlman // *Aerosol Science and Technology*. – 2001. – Vol. 35. – P. 969–977.
9. Chen, C.J. Study on the Collection Efficiency of Fly Ash by Electrocyclone / C.J. Chen // Master Thesis. Taichung, Taiwan : National Chung-Hsing University, 1994 / National Chung-Hsing University. – Taiwan, 1994. – P. 139–144.
10. Chen, C.J. Enhanced total collection efficiency of fly ash by combining cyclone with electrostatic precipitator / C.J. Chen, L.F.S. Wang, M.T. Chang // *Industr. Pollut. Preven. Control*. – 1999. – № 18(1). – P. 40–60.
11. Исследование процесса очистки аспирационного воздуха на установке шоопирования алюминием титановых плит на верхне-сальдинском титановом комбинате / Н.В. Инюшкин [и др.] // Сб. докл. ЗАО «Уральские выставки», Екатеринбург, 2005 г. / Екатеринбург, 2005. – С. 58–63.
12. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – Л. : Химия, 1987. – 573 с.
13. Schmid, H.J. On the Modeling of the Electro-Hydrodynamic Flow Field in Electrostatic Precipitators / H.J. Schmid, S. Stolz, H. Buggisch // *Flow Turb. Combust.* – 2002. – Vol. 68. – P. 63–89.
14. Choi, B.C. Turbulent Particle Dispersion in an Electrostatic Precipitator / B.C. Choi, C.A.J. Fletcher // *Appl. Math. Model.* – 1998. – Vol. 22. – P. 1009–1021.
15. Shi, L. Numerical Investigation of the Flow Profiles in the Electrically Enhanced Cyclone / L. Shi // *J. Air&Waste Manage. Assoc.* – 2007. – Vol. 57. – P. 489–496.
16. Инюшкин, Н.В. Влияние режима движения газового потока на улавливание пыли в электрическом поле / Н.В. Инюшкин, Я.Д. Авербух // *Цветные металлы*. – 1962. – № 7. – С. 37–41.
17. Инюшкин, Н.В. Вопросы расчета осаждения пыли в электрофильтрах из турбулентного потока газа / Н.В. Инюшкин, Я.Д. Авербух // *Изв. вузов. Химия и химич. технология*. – 1963. – Т. 6, № 6. – С. 15–17.
18. Инюшкин, Н.В. Влияние собственной турбулентности газового потока на электростатическую очистку газа. / Н.В. Инюшкин // Сб. тр. УНИХИМа по процессам и аппаратам. – Свердловск, 1971. – Вып. 20. – С. 5–13.

Dust Particles Precipitation in Electro Cyclone

V.A. Petrov, N.V. Inyushkin, S.A. Ermakov

*Department “Processes and Devices Chemical Engineering”
Ural State Technical University - Ural Polytechnic Institute named after First President
of Russia B.N. Eltsin, Ekaterinburg; biograna@yandex.ru*

Key words and phrases: active zone; discharge electron; electro cyclone; flying ash; precipitation velocity; purification degree.

Abstract: The paper presents the explanation of the achievements of highly efficient achievement of gas purification of flying ash particles of Ekibastuz coal in the electro cyclone.

Über die Fällung der Staubteilchen im Elektrozyklon

Zusammenfassung: Im Artikel wird die Erklärung der Erreichung des hohen Grades der Gasreinigung von den Teilchen der Flugasche der Ekibastyzkohle im Elektrozyklon angeführt.

Sur la précipitation des particules de la poussière dans un électroyclone

Résumé: Dans l'article est donnée l'explication de l'obtention du degré du haut niveau de l'épuration du gaz des particules des cendres volatives du charbon ékibastusien dans un électroyclone.

Авторы: *Петров Валентин Анатольевич* – аспирант кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; *Инюшкин Николай Васильевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; *Ермаков Сергей Анатольевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», ГОУ ВПО «УГТУ – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химическая инженерия», ГОУ ВПО «ТГТУ».
