

УДК 628.51

Э. И. Дмитроченкова, канд. техн. наук, доц., С. М. Орлов, канд. техн. наук, доц.  
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩЕГО КОМБИНИРОВАННОГО ЦИКЛОНА

*Проведен анализ работы комбинированного циклона с прямоточными элементами, в котором для лучшей концентрации пыли совместно используется центробежная и кулоновская силы. Установлено, что вблизи коронирующего электрода кулоновская сила значительно превосходит центробежную силу, однако по мере удаления интенсивно падает. В случае с центробежной силой ситуация прямо противоположная. Доказано, что совместное действие кулоновских и центробежных сил значительно повышает эффективность прямоточных циклонов.*

### ***Постановка проблемы***

Защита атмосферы социальная и экономическая проблема, неразрывно связанная с задачей создания комфортных условий для жизни и работы человека.

Большинство технологических процессов в металлургии, энергетике, промышленности строительных материалов, машиностроении, химии и нефтехимии сопровождается пылегазовыми выбросами. Большинство промышленных выбросов содержат ценные полупродукты (металлы, химические вещества), которые безвозвратно теряются. Поэтому очистка и обезвреживание промышленных выбросов имеют санитарное и экономическое значение.

Циклоны являются наиболее характерными представителями сухих инерционных пылеуловителей, которые, как правило, имеют простую конструкцию, обладают большой пропускной способностью и несложны в эксплуатации. Ввиду этих преимуществ циклоны получили широкое распространение. Существует два вида циклонов: прямоточные и противоточные. Для обеспыливания больших объемов газа одиночные циклоны объединяются в группы.

Практическое решение задач наилучшего распределения газов, снижения уноса и отвода пыли и т. д. при необходимости установки большого числа циклонов привело к созданию батарейного циклона. В батарее объединяются как прямоточные, так и противоточные циклоны.

Батарейные циклоны с прямоточными элементами дают меньшую степень очистки, чем обычные, поэтому они редко применяются как самостоятельные пылеуловители. Их чаще устанавливают в качестве предвключенных аппаратов перед электрофильтрами, рукавными фильтрами.

У большинства прямоточных батарейных циклонов с целью предотвращения газового обмена между запыленными и очищенными потоками процессы концентраций и отделения пыли конструктивно разделены. На рисунке 1 [1] представлен прямоточный батарейный циклон ЦКТИ. Пылегазовый поток из камеры запыленного газа 1 поступает в оборудованные винтовыми завихрителями элементы 2, в которых под действием центробежных сил происходит перераспределение концентрации пыли по сечению элемента: возрастание у стенок и уменьшение в центральной части. Обеспыленный поток из центральной части элемента отводится в камеру очищенного газа 3. Периферийный слой газа, обогащенный пылью, через торцевое кольцо элемента отсасывается вентилятором 4 и, пройдя пылеуловитель 5, возвращается в камеру запыленных газов. В отличие от обычных (противоточных) циклонов в прямоточных батарейных циклонах элемент часто выполняет роль пылеконцентратора, а улавливание пыли происходит в специально установленных малогабаритных циклонах, тканевых фильтрах и других аппаратах.

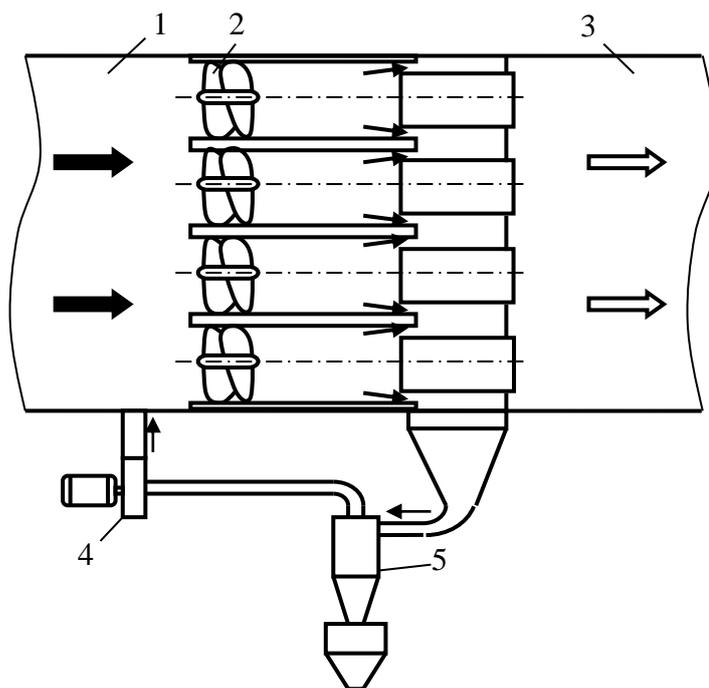


Рисунок 1 – Прямоточный батарейный циклон ЦКТИ

Из вышеперечисленного можно сделать выводы:

- прямоточные циклоны лишены некоторых недостатков, присущих обратноточным циклонам;
- циклоны с прямоточными элементами дают меньшую степень очистки, чем обычные;
- у большинства прямоточных батарейных циклонов, с целью предотвращения газового обмена между запыленными и очищенными потоками, процессы концентраций и отделения пыли конструктивно разделены.

### ***Цель статьи и формулирование задачи исследований***

Целью работы является повышение эффективности прямоточного циклона до такой степени, чтобы в камеру 3 (рисунок 1) поступал полностью очищенный газ, что позволит значительно уменьшить объемы газа, подлежащего очистке и, следовательно, получить значительный экономический эффект.

### ***Изложение основного материала исследований***

Для достижения поставленной цели необходимо, чтобы вся пыль, находящаяся в газе, концентрировалась в пристенной зоне циклона. Известно, что при длительном нахождении пыли в криволинейном потоке можно сепарировать пыль любого фракционного состава, однако это повлечет за собой неоправданное увеличение габаритов циклона и повышение гидравлического сопротивления. Целесообразно для более быстрой сепарации пыли использовать электрическое поле. Таким образом, на пыль будут согласованно действовать кулоновская и центробежная силы.

На рисунке 2 показан комбинированный прямоточный циклон. По центру винта через изолятор 1 вставляется электрод 2, на который подается высокое напряжение отрицательной полярности.

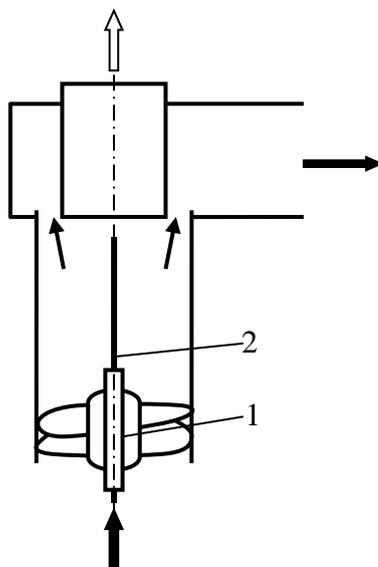


Рисунок 2 – Комбинированный прямооточный циклон

В комбинированном прямооточном циклоне последовательно сочетается центробежный и электрический механизмы сепарации пыли. Анализ работ [2, 3, 4] показал, что выполнены теоретические и экспериментальные исследования движения заряженных аэрозолей, а также физических процессов, протекающих в электрофильтрах. В работе [5] исследован процесс осаждения пыли в трубчатом электрофильтре в условиях турбулентного перемешивания аэрозоля.

Распределение тангенциальной скорости по радиусу корпуса прямооточного циклона по данным экспериментальных исследований носит сложный характер. В центральной части потока, в так называемом ядре вихря, тангенциальная скорость возрастает с увеличением радиуса  $R$  по закону  $V_t = \omega R$  (зона твердого тела), а затем по мере приближения к корпусу прямооточного циклона убывает. Возможность детального анализа закона убывания тангенциальной скорости в пристенной зоне затруднена из-за недостатка экспериментальных данных, однако весь воздух, находящийся в пристенной области, отсасывается вместе с сепарированной пылью. Поэтому распределение тангенциальной скорости по радиусу в корпусе прямооточного циклона принимаем таким же, как и в ядре вихря, то есть считаем, что воздух вращается как твердое тело и отличается постоянной угловой скоростью [6].

Предположим, что по оси прямооточного циклона установлен гладкий цилиндрический коронирующий электрод радиуса  $R_1$ , внутренняя поверхность циклона  $R_2$ , а  $R_3$  – радиус внутренней поверхности центральной части циклона. Если в пространстве между электродами приложить напряжение  $U_0$ , необходимое для зажигания коронного разряда, то напряженность электрического поля  $E$  может быть определена по формуле [7], В/м:

$$E = E_0 \sqrt{\frac{i}{2\pi\epsilon_0 K E_0} \left(1 - \frac{R_1^2}{R^2}\right) + \left(\frac{R_1}{R}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_0 = (4\pi \times 9 \times 10^9)^{-1}$  – электрическая постоянная, Ф/м;

$K$  – подвижность ионов, м<sup>2</sup>/(В·с);

$R$  – текущий радиус, м.

Критическая напряженность поля (формула Пика) вблизи поверхности коронирующего электрода, В/м:

$$E_0 = 3,03\delta_n \left(1 + 0,0298\sqrt{\delta_0 R_1}\right), \quad (2)$$

где  $\delta_n$  – отношение действительной плотности воздуха к его плотности при нормальных условиях;

Линейная плотность тока короны, А/м:

$$i = \frac{2K4\pi\epsilon_0}{R_2^2 \ln(R_2/R_1)} U(U - U_0), \quad (3)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к электродам, В.

Критическое напряжение для трубчатого электрофилтра с коронирующими электродами, выполненными из гладкой проволоки [7], В:

$$U_0 = E_0 R_2 \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (4)$$

Частицы пыли в поле коронного заряда практически мгновенно приобретают электрический заряд, определяемый по формуле Понтье

$$Q = 4\pi\epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E r_q^2 \frac{K e n_0 t}{4\epsilon_0 + K e n_0 t} \quad (5)$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость частицы пыли;

$r_q$  – радиус частицы пыли, м;

$e$  – заряд электрона, Кл;

$n_0$  – начальная концентрация ионов, м<sup>-3</sup>;

$t$  – время зарядки, с.

Тогда действующая на частицы пыли при  $\epsilon = 4$  кулоновская сила может быть определена следующим образом:

$$\begin{aligned} F_\kappa = QE = 2\pi\epsilon_0 E^2 d^2 &= 2\pi\epsilon_0 d^2 \left\{ \frac{2i}{4\pi\epsilon_0 K} \left[ 1 - \left( \frac{R_1}{R} \right)^2 \right] + \left( E \frac{R_1}{R} \right)^2 \right\} = \\ &= \frac{id^2}{K} \left[ 1 - \left( \frac{R_1}{R} \right)^2 \right] + 2\pi\epsilon_0 d^2 \left( E \frac{R_1}{R} \right)^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $d$  – диаметр частиц пыли, м.

Из формулы (6) следует, что сила, действующая на частицы пыли со стороны электрического поля, быстро убывает по мере их приближения к осадительному электроду.

Будем считать, что газовый поток вместе с находящимися в нем частицами пыли вращается в корпусе прямоточного циклона с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Это предположение с достаточной точностью выполняется для частиц пыли размером менее 10 мкм. Поэтому центробежная сила инерции может быть определена по формуле

$$F_\omega = \frac{\pi d^3 \rho \omega^2 R}{6}. \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), центробежная сила инерции в отличие от электрической силы (6) увеличивается с ростом расстояния частицы от оси потока.

Таким образом, электрическая и центробежная силы, будучи одинаково направленными, взаимно дополняют друг друга.

Отсюда следует принципиальная возможность повышения эффективности очистки газа путем оптимального сочетания центробежного и электростатического механизмов сепарации пыли.

В качестве данных для конкретного расчета возьмем прямоточный циклон ПО «Газоочистка» ЦБ-254Р с диаметром корпуса 250 мм, типичные параметры трубчатого

электрофилтра соответствующего размера и физико-химические свойства пыли, характерных для производства строительных материалов:  $\omega = 240 \text{ с}^{-1}$ ;  $R_1 = 10 \text{ м}^{-3}$ ;  $R_2 = 0,125 \text{ м}$ ;  $\varepsilon = 4$ ;  $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $E_0 = 5,8 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ ;  $i = 1,34 \cdot 10^3 \text{ А/м}$ ;  $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ .

Размеры частиц изменяли от 0,2 мкм до 10 мкм.

Зависимость силы центробежной инерции  $F_y$  и кулоновской силы  $F_k$ , действующих на частицы пыли, от расстояния для размеров частиц в интервале  $d = (1 - 3) \text{ мкм}$  представлена на рисунке 3.

Из рисунка 3 следует, что для частиц определенного размера существует расстояние от коронирующего электрода  $R_k$ , на котором кулоновская и центробежная силы уравниваются.

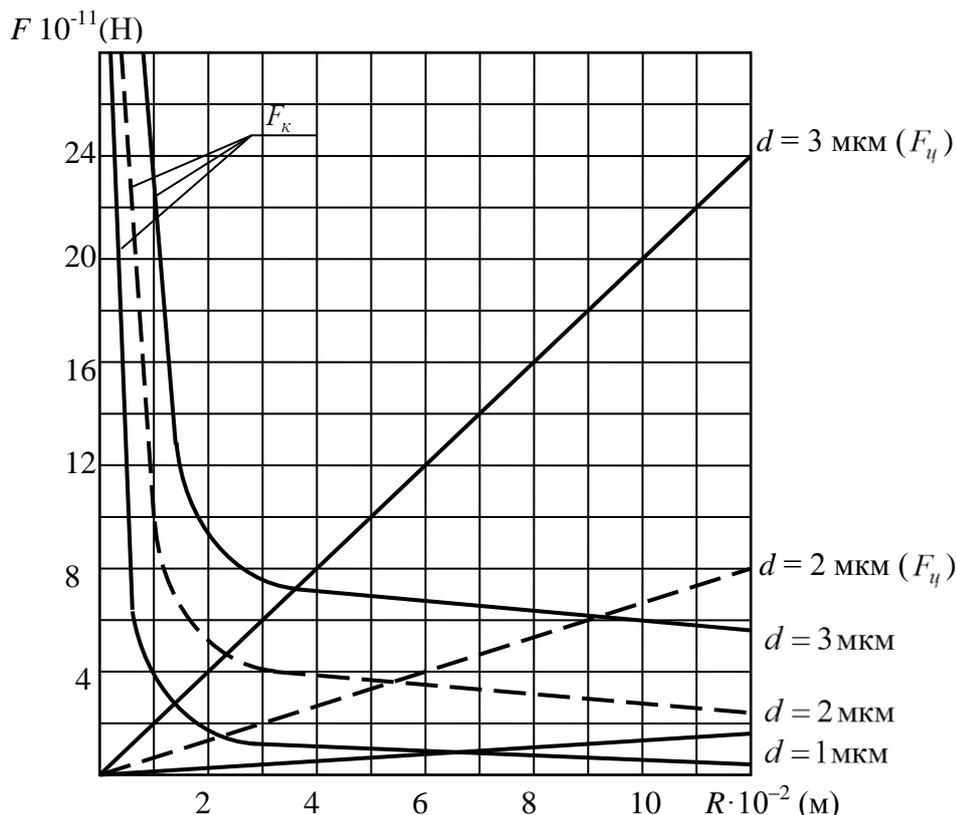


Рисунок 3 – Зависимость кулоновской силы ( $F_k$ ) и силы центробежной инерции ( $F_y$ ) от расстояния

На расстоянии  $R < R_k$ , т. е. в центральной части корпуса проточного циклона преобладает электростатический механизм сепарации пыли. На расстояниях больших  $R_k$  центробежная сила инерции значительно превышает кулоновскую силу.

С уменьшением размера частиц величина  $R_k$  растет. Так для частиц размером  $d < 1 \text{ мкм}$  кулоновская сила преобладает во всем межэлектродном пространстве.

На рисунке 4 приведена зависимость результирующей силы  $F = F_k + F_y$ , действующей на частицы пыли, от расстояния  $R$ . Наличие минимума результирующей силы  $F$  позволяет существенно упростить теоретическое рассмотрение механизма сепарации пыли, считая величину  $F$  постоянной во всем межэлектродном промежутке и равной  $F_{\min}$ . Однако следует отметить, что  $F_{\min}$  как минимум в 2 раза превышает силы  $F_k$  и  $F_y$ , взятые по отдельности.

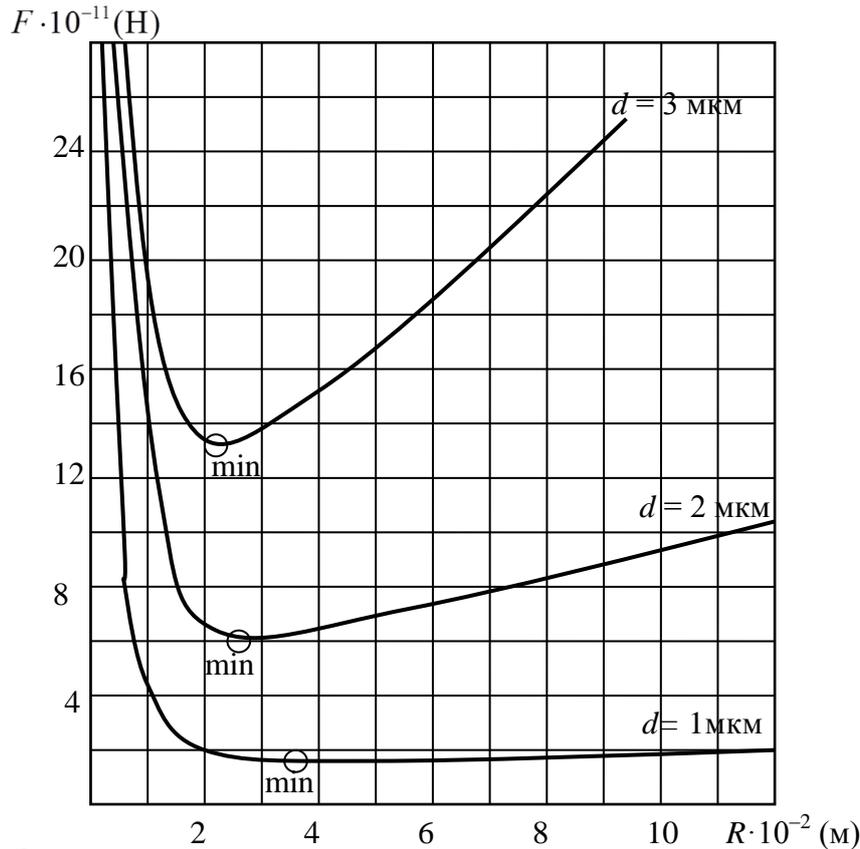


Рисунок 4 – Зависимость результирующей силы, действующей на частицу пыли, от расстояния

Практика показала, что прямоточные циклоны хорошо улавливают крупнодисперсную пыль даже без использования электростатического поля, поэтому особое внимание следует уделить концентрации мелкодисперсной пыли  $d < 10$  мкм.

Из рисунка 4 следует, что для частиц определенного размера существует расстояние от коронирующего электрода  $R_{\min}$ , на котором результирующая сила  $F$  становится минимальной. Так, для частиц пыли  $d = (0,2 - 10)$  мкм;  $R_{\min} \approx (0,15 - 0,5) \cdot R_2$ . Для частиц пыли;  $R_{\min} \approx (0,2 - 0,4) \cdot R_2$ , поэтому в расчетах эффективности прямоточного комбинированного циклона берем  $R_{\min} = 0,3R_2$ . Следовательно, с учетом вышеизложенного  $F$  равно:

$$F = F_{\kappa} + F_{\eta} = \frac{id^2}{K} \left[ 1 - \left( \frac{R_1}{0,3R_2} \right)^2 \right] + 2\pi\epsilon_0 d^2 \left( E \frac{R_1}{0,3R_2} \right)^2 + \frac{\pi d^3 \rho \omega^2 0,3R_2}{6}. \quad (8)$$

Под действием суммарной силы  $F$  частица пыли движется в радиальном направлении к стенке циклона со скоростью  $\omega_p$ . Этому движению газовая среда оказывает сопротивление, величину которого определяют по формуле [8]

$$F_c = 3\pi\omega_p d\mu, \quad (9)$$

где  $\omega_p$  – радиальная скорость частицы пыли, м/с;

$\mu$  – вязкость газовой среды, (Н·с)/м<sup>2</sup>.

После входа в циклон суммарная сила  $F$  значительно превышает силу сопротивления среды  $F_c$ , так как начальное значение скорости пылинки в радиальном направлении было равно нулю. Но по мере возрастания этой скорости, практически через сотые доли секунды, эти силы становятся равными, и с этого момента частица продолжает двигаться в

радиальном направлении с постоянной скоростью, которую определяют из равенства  $F_c = F$ , тогда радиальная скорость  $\omega_p$  будет равна:

$$\omega_p = \frac{id}{3\pi\mu K} \left[ 1 - \left( \frac{R_1}{0,3R_2} \right)^2 \right] + \frac{2\varepsilon_0 d}{3\mu} \left( E \frac{R_1}{0,3R_2} \right)^2 + \frac{d^2 \rho \omega^2 0,3R_2}{18\mu}. \quad (10)$$

На рисунке 5 показаны зависимость минимальной радиальной скорости от диаметра частиц пыли для условий: 1 – взаимодействия электростатических и центробежных сил; 2 – воздействия только центробежных сил. Как видно из графика, с увеличением размера частиц радиальная скорость резко возрастает, однако радиальная скорость частиц пыли при воздействии только центробежных сил значительно меньше, чем при воздействии электростатических и центробежных сил.

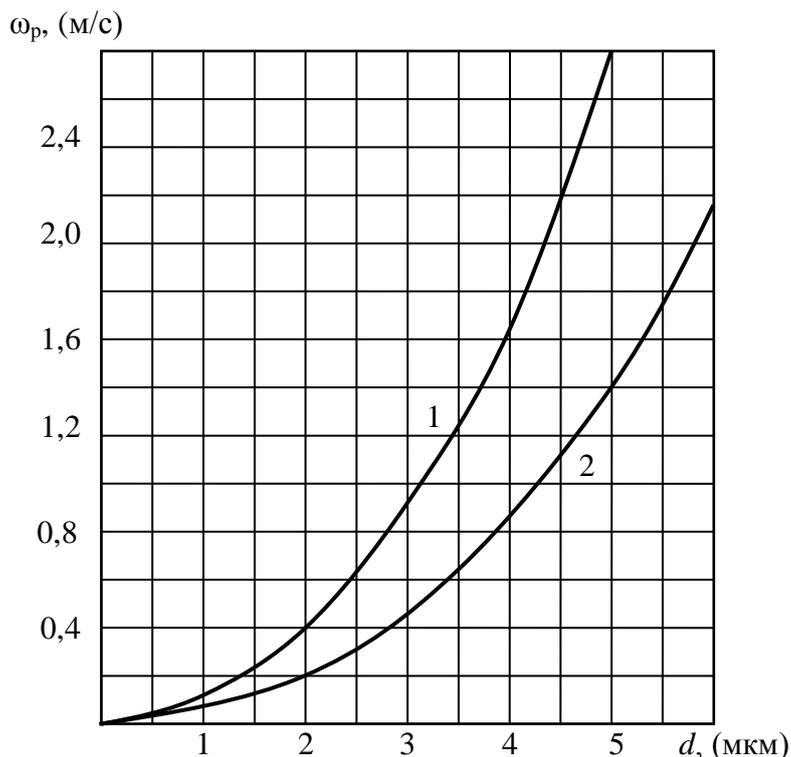


Рисунок 5 – Зависимость радиальной скорости частиц пыли от их диаметра:

1 – с использованием электростатических и центробежных сил; 2 – с использованием только центробежных сил

### **Выводы:**

1. Установлено, что вблизи коронирующего электрода кулоновская сила значительно превосходит центробежную силу.

2. Показано, что для частиц определенного размера существует расстояние от коронирующего электрода  $R_{\min}$ , на котором результирующая сила  $F$  (действие кулоновских и центробежных сил) становится минимальной. Это определение может существенно упростить расчет эффективности прямоточного циклона, в котором используется взаимодействие кулоновских и центробежных сил.

3. Установлено, что совместное действие кулоновских и центробежных сил значительно повышают эффективность прямоточных циклонов, поэтому дальнейшие исследования в данном направлении являются перспективными.

### Список литературы

1. Алиев Г. М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок / Г. М. Алиев. – М.: Metallurgiya, 1988. – 368 с.  
Aliyev G. M. Ustroystvo i obsluzhivaniye gazoочisnykh i pyleulavliyayushchikh ustanovok (Construction and Servicing of Gas-Cleaning and Dust-Collecting Units) / G. M. Aliyev. – М.: Metallurgiya, 1988. – 368 s.
2. Верещагин И. П. Уравнение движения шарообразных частиц в потоке воздуха при малых числах Рейнольдса / И. П. Верещагин // Сильные электрические поля в технологических процессах. – 1969. – Вып. 1. – С. 60–79.  
Vereshchagin I. P. Uravneniye dvizheniya sharoobraznykh chastits v potoke vozdukha pri malykh chislakh Reynoldsa (Equation of Motion of Ball-Shaped Particles in the Air Flow at Low Reynolds Numbers) / I. P. Vereshchagin // Silnyye elektricheskkiye polya v tekhnologicheskikh protsessakh. – 1969. – Vyp. 1. – S. 60–79.
3. Верещагин И. П. Основы электрогазодинамики и дисперсных систем / И. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Мирзабекян. – М.: Энергия, 1974. – 480 с.  
Vereshchagin I. P. Osnovy elektrogazodinamiki i dispersnykh sistem (Basic Principles of Electrogasdynamics and Disperse Systems) / I. P. Vereshchagin, V. I. Levitov, G. Z. Mirzabekyan. – М.: Energiya, 1974. – 480 s.
4. Верещагин И. П. Движение частиц аэрозоля в электрических полях при числах Рейнольдса, превышающих единицу / И. П. Верещагин, В. С. Морозов // Энергетика и транспорт. – 1987. – № 1. – С. 40–45.  
Vereshchagin I. P. Dvizheniye chastits aerozolya v elektricheskikh polyakh pri chislakh Reynoldsa, prevyshayushchikh yedinitu (Airborne Particle Motion in Electric Fields at Low Reynolds Numbers which Are Greater than One) / I. P. Vereshchagin, V. S. Morozov // Energetika i transport. – 1987. – № 1. – S. 40–45.
5. Мирзабекян Г. З. Уравнение кинетики зарядки и осаждения частиц в электрофильтре с учетом турбулентного перемешивания / Г. З. Мирзабекян, И. Н. Григорьев // Энергетика и транспорт. – 1988. – № 2. – С. 51–58.  
Mirzabekyan G. Z. Uravneniye kinetiki zaryadki i osazhdeniya chastits v elektrofiltre s uchedom turbulentnogo peremeshivaniya (Equation of Kinetics of Charging and Settling of the Particles in Electric Precipitator Considering Turbulent Mixing) / G. Z. Mirzabekyan, I. N. Grigoryev // Energetika i transport. – 1988. – № 2. – S. 51–58.
6. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха / А. И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.  
Pirumov A. I. Obespylivaniye vozdukha (Dust Control in the Air) / A. I. Pirumov. – М.: Stroyizdat, 1981. – 296 s.
7. Пылеулавливание в металлургии: справочник / под ред. А. А. Гурвица. – М.: Metallurgiya, 1984. – 336 с.  
Pyleulavlivaniye v metallurgii: spravochnik (Dust Collecting in Metallurgy: Reference Book) / pod red. A. A. Gurvitsa. – М.: Metallurgiya, 1984. – 336 s.
8. Гордон Г. М. Пылеулавливание и очистка газов / Г. М. Гордон, И. Л. Пейсахов. – М.: Стройиздат, 1968. – 499 с.  
Gordon G. M. Pyleulavlivaniye i ochistka gazov (Dust Collecting and Gas Purification) / G. M. Gordon, I. L. Peysakhov. – М.: Stroyizdat, 1968. – 499 s.
9. Ужов В. Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами / В. Н. Ужов. – М.: Химия, 1987. – 344 с.  
Uzhov V. N. Ochistka promyshlennykh gazov elektrofilytrami (Industrial Gas Purification with Electric Precipitators) / V. N. Uzhov. – М.: Khimiya, 1987. – 344 s.
10. Шаптала В. Г. О влиянии закона сопротивления среды на скорость дрейфа частиц в электрофильтре / В. Г. Шаптала, Л. А. Кушев // Химическая технология строительных материалов. – 1980. – С. 170–175.  
Shaptala V. G. O vliyaniy zakona soprotivleniya sredy na skorost dreyfa chastits v elektrofiltre (Concerning Environment Resistance Law Effect on Particle Drift Rate in Electric Precipitator) / V. G. Shaptala, L. A. Kushchev // Khimicheskaya tekhnologiya stroitelnykh materialov. – 1980. – S. 170–175.
11. Кисилев Н. Д. Очистка воздуха от высокодисперсной пыли методом искусственной ионизации / Н. Д. Кисилев. – М.: Машиностроение, 1966. – 72 с.  
Kisilev N. D. Ochistka vozdukha ot vysokodispersnoy pyli metodom iskustvennoy ionizatsii (Air Purification from High-Dispersed Dust Using the Artificial Ionization Method) / N. D. Kisilev. – М.: Mashinostroyeniye, 1966. – 72 s.
12. Ужов В. Н. Очистка промышленных газов от пыли / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальтберг. – М.: Химия, 1981. – 392 с.  
Uzhov V. N. Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli (Industrial Gas Purification from Dust) / V. N. Uzhov, A. Yu. Valtberg. – М.: Khimiya, 1981. – 392 s.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. П. Висоцкий, АДІ ДонНТУ  
Стаття надійшла до редакції: 15.04.2013