

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСА СИЛ В ВЫХЛОПНОЙ ТРУБЕ ЦИКЛОНА

С. М. Орлов к.т.н., доцент; Б. Р. Романенко

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Аннотация. В связи с огромными объемами очищаемых газов в промышленности, а также удорожанием энергоносителей вопросы экономики очистки газов становятся чрезвычайно актуальными. Производство строительных материалов вносит значительный негативный вклад в общий экологический показатель региона, так как большинство технологических процессов неразрывно связано с образованием пылей и последующим выбросом их в атмосферу. Следует так же учитывать, что затраты на очистку ложатся на себестоимость выпускаемой продукции, а соответственно, на конкурентную способность выпускаемой продукции. Однако в первую очередь, защита атмосферы – социальная проблема, неразрывно связанная с задачей создания комфортных условий для жизни и работы человека. С экономической точки зрения, помимо экономии энергоресурсов, необходимо учитывать, что во многих промышленных выбросах содержатся ценные продукты, которые безвозвратно теряются.

Ключевые слова: циклон, центробежная, градиентная, кулоновская силы, сила сопротивления среды, торнадо.



**Орлов
Станислав Михайлович**



**Романенко
Борис Романович**

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Циклоны являются наиболее востребованными при очистке газов от пыли за счет многих их преимуществ перед другими аппаратами. Однако у циклонов имеется и существенный недостаток, заключающийся в неспособности улавливать мелкодисперсную, менее 10 мкм, пыль. Поэтому циклоны крайне редко применяются в самостоятельном исполнении, а чаще всего, как предварительная ступень перед аппаратами тонкой очистки [1, 2]. Весь газ после циклона направляется на аппараты тонкой очистки (рукавные, электрофильтры и др.), которые требуют значительных капитальных и эксплуатационных затрат.

В предыдущих работах авторы рассматривали вопрос снижения энергетических затрат при двухступенчатых схемах очистки, где циклоны используются в качестве предварительной ступени [3, 4]. Достижение поставленной цели может идти двумя путями: повышения эффективности циклонов и снижения нагрузки на последующие ступени; разработка новой конструкции циклона и компоновочных схем, где на аппараты тонкой очистки подается не весь объем газа, прошедшего через циклон, а только его часть [5, 6].

Цель исследования: провести анализ сил, действующих на частицы в выхлопной трубе, и концентрации пыли по сечению выхлопной трубы при аксиальном расположении коронирующего электрода.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В настоящее время большое развитие получает способ сочетания различных механизмов осаждения или улавливания пыли в комбинированном аппарате. Известны также комбинированные аппараты, называемые центробежными электрофильтрами или электроциклонами. В общем корпусе размещен центробежный пылеуловитель-циклон и электрофильтр.

Различают 2 вида электроциклонов по месту расположения электрической части. В некоторых конструкциях коронирующие электроды размещены в цилиндрической части циклона (рис. 1), а в аппаратах второго типа коронирующие электроды размещены в выхлопной трубе (рис. 2).

Анализ работ, посвященных центробежным электрофильтрам, позволяет сделать вывод о том, что более предпочтительными являются электрофильтры второго типа [7].

Восходящий вихрь в циклоне вращается как твердое тело с радиусом, равным радиусу выхлопной трубы [8]. Угловая скорость восходящего вихря может достигать больших величин, а соответственно, в вихре будет присутствовать сила, обусловленная действием градиента давления [9]. Таким образом, на частицу будут действовать

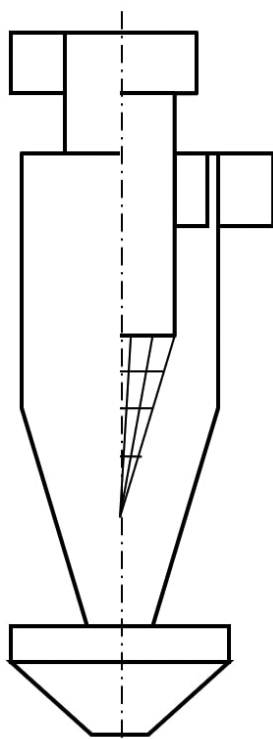


Рис. 1. Схема центробежного электрофильтра с размещением электродов в цилиндрической части

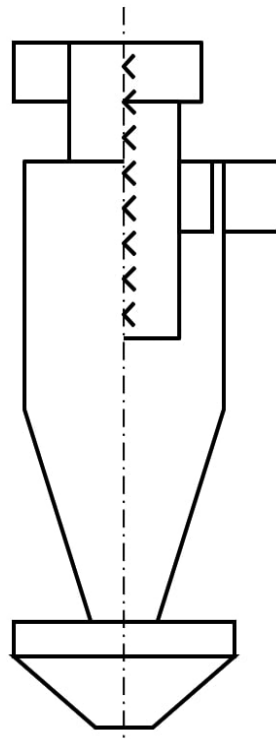


Рис. 2. Схема центробежного электрофильтра с размещением электродов в выхлопной трубе

в выхлопной трубе три силы: F_k – сила кулона; $F_{ц}$ – центробежная сила; F_p – сила, обусловленная действием градиента давления [9, 10].

Из трех сил неизвестна только F_k – сила кулона, которая равна [7]:

$$F_k = q_u E \quad (1)$$

где q_u – заряд частицы, Кл;

E – напряженность электрического поля, В/м.

В формуле (1) первоисточником является заряд частицы, который она получает за счет трибоэлектрического эффекта. Пыльный тромб, состоящий из множества наэлектризованных частиц, создает электрическое поле. При помещении в центр восходящего вихря изолированного проводника на нем возникает электрический заряд, пропорциональный напряженности электрического поля тромба. Здесь уместно вспомнить опыт из школьной программы. Наэлектризованная эбонитовая палочка притягивает клочки бумаги, которые получив заряд, отталкиваются от эбонитовой палочки. Что-то похожее происходит и здесь. Наэлектризованная пыль создает электростатическое поле, которое наводит заряд в проводнике, пропорциональный внешнему полю, но противоположно направленный.

Будем полагать, что поле, сконцентрированное в проводнике, имеет критическое значение, как при коронном разряде. Тогда, напряженность поля, при которой зажигается коронный разряд, можно определить по формуле Пика [11].

$$E_{кр} = 3,04 \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{2\beta}{d_k}} \right) \cdot 10^6, \frac{В}{м} \quad (2)$$

где d_k – диаметр коронирующего электрода, м;
 β – отношение плотности газа в рабочих условиях к плотности в нормальных условиях.

Частицы пыли, несущие заряд и попавшие в зону действия коронного разряда, если имеют недостаточный заряд, то получают дополнительный заряд, и полный заряд частицы можно определить по формуле Потенье [11]:

$$E_{кр} = 3,04 \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{2\beta}{d_k}} \right) \cdot 10^6, \frac{В}{м}, Кл \quad (3)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, Ф/м;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость частицы;

d – диаметр частицы, м.

Напряженность электростатического поля в межэлектродном пространстве при коронном разряде равна [11]:

$$E(R) = \sqrt{\left(E_{кр} \frac{R_k}{R} \right)^2 + \frac{i}{2\pi\epsilon_0 k} \left[1 - \left(\frac{R_k}{R} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

где i – линейная плотность тока короны, А/м;

k – подвижность ионов, м²/В×с.

Подставив в (1) (3) и (4), произведя преобразования и адаптировав формулу применительно к циклону, получим:

$$F_k = \pi\epsilon_0 K_4 d_u^2 \left\{ \left(\frac{E_{кр} d_k}{DK_2 n} \right)^2 + \frac{i}{2\pi\epsilon_0 k} \left[1 - \left(\frac{d_k}{DK_2 n} \right)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

где n – доля радиуса в межэлектродном пространстве $d_k \leq n \leq 1$.

Здесь K_4 – коэффициент, определяющий электрические свойства пыли и равен [11]:

$$K_4 = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) \quad (6)$$

Подавляющее большинство пыли строительного производства, имеют относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 4$, тогда для строительной пыли имеем:

$$F_k = 2\pi\epsilon_0 d_u^2 \left\{ \left(\frac{E_{кр} d_k}{DK_2 n} \right)^2 + \frac{i}{2\pi\epsilon_0 k} \left[1 - \left(\frac{d_k}{DK_2 n} \right)^2 \right] \right\} \quad (7)$$

Применительно к циклонам, значение в квадратных скобках имеет ничтожно малое влияние, не превышает 2 %, и поэтому в дальнейшем может не учитываться.

Центробежная сила [10], преобразованная применительно к циклону, будет иметь вид:

$$F_u = \frac{\pi\rho_u d_u^3 \omega^2}{12} DK_2 n \quad (8)$$

Сила действия градиента давления равна:

$$F_p = \frac{\pi d_u^3 \rho_u V_{ax}^2 (1 - K_2)}{6DK_2^3 \left(\ln \frac{1}{K_2} \right)} \quad (9)$$

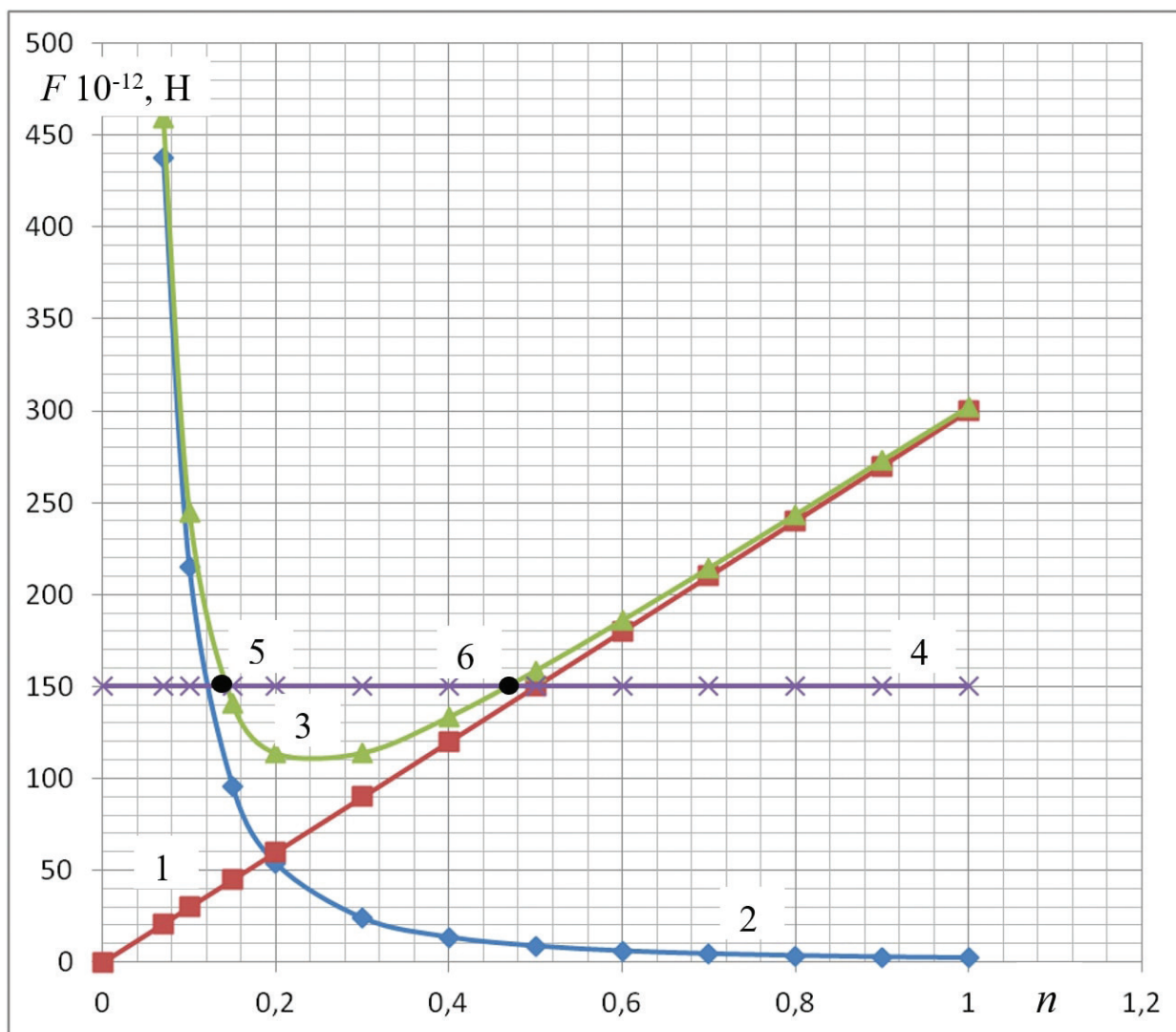
где ρ_u – плотность частицы, кг/м³;
 D – диаметр циклона, м;
 $V_{вх}$ – скорость газа во входном патрубке, м/с;
 K_2 – отношение диаметра выхлопной трубы к диаметру циклона.

Как видно из формулы (7) кулоновская сила быстро уменьшается с увеличением расстояния от коронирующего электрода, в то время как центробежная сила линейно увеличивается (8). Сила градиента

давления постоянная во всем межэлектродном пространстве.

Для наглядности проведем расчет для конкретных условий. В качестве объекта для расчета на ПЭВМ возьмем характеристики циклона НИИОГАЗа ЦН11-300 и физические параметры пыли, характерные для производства строительных материалов: $V_{вх} = 20$ м/с; $\omega = 298$ с⁻¹; $d_k = 0,002$ м; $\varepsilon = 4$; $\rho_u = 2700$ кг/м³; $E_{кр} = 5,8 \times 10^6$ В/м; $i = 1,34 \times 10^{-3}$ А/м, $k = 2 \times 10^{-4}$ м²/с·В; $d_u = (1-20) \times 10^{-6}$ м.

Как видно из графика (рис. 3), между точками 5 и 6 имеется мертвая зона. То есть суммарная сила $F_u + F_k$ меньше градиентной силы F_p и поэтому частицы, попавшие в эту зону, останутся в ней и будут вынесены из циклона.

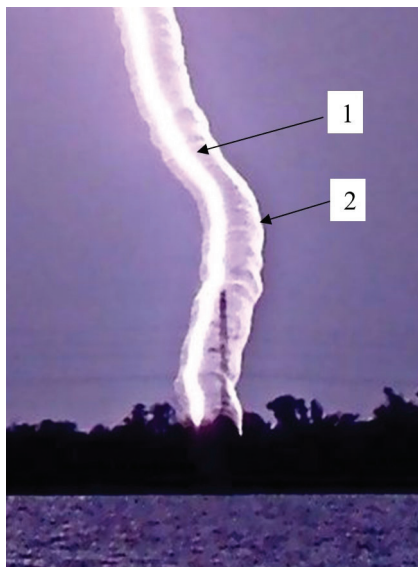


1 – центробежная сила F_u ; 2 – кулоновская сила F_k ; 3 – суммарная сила $F_u + F_k$;
 4 – сила, обусловленная действием градиента давления F_p ; диаметр частицы $d_u = 3$ мкм

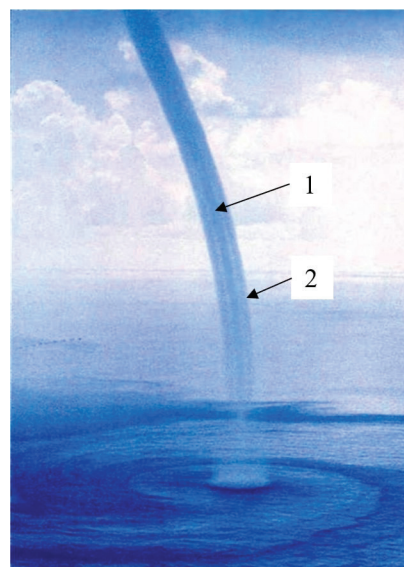
Рис. 3. Зависимости сил от доли радиуса выхлопной трубы

Данная картина наблюдается при всех прочих условиях. Изменяются только абсолютные значения, а характер картины не изменяется. Таким образом, можно сделать вывод, что восходящий вихрь в циклоне, как и в торнадо, состоит из трех зон [12,13]:

– осевой, где кулоновская сила значительно превосходит все остальные силы, а разряжение принимает наибольшую величину, в этой зоне формируется, так называемый, пыльный или водяной шнур (рис. 4, 5);



1 – область оси, где разряжение принимает наибольшую величину; 2 – наружная область, где центробежная сила равна силе действия радиального градиента давления
Рис. 4. Фотография торнадо в начальной стадии



1 – область оси, где разряжение принимает наибольшую величину; 2 – наружная область, где центробежная сила равна силе действия радиального градиента давления
Рис. 5. Фотографии смерча в начальной стадии

– в мертвой зоне (точки 5 и 6) концентрируется пыль или брызги воды, образуя по форме трубу (рис. 4, 5);

– зона, расположенная за границей половины радиуса твердого тела, где центробежная сила превосходит силу градиента давления и потому не видима.

Особенно наглядно строение торнадо иллюстрирует рисунок 4. Эта фотография торнадо была сделана в сумерках, когда все электрические процессы проявлялись более наглядно. Делается предположение, что молнии и торнадо обладают одной природой и представляют собой проявления атмосферного электричества. Ко всему прочему, – это еще и своеобразный электростатический генератор [14]. Трубчатая структура торнадо позволяет предположить, что торнадо и молния – явление одного порядка. Можно утверждать, что торнадо – это «замедленная молния». Делается предположение, что торнадо является как бы каналом передачи электрической энергии между грозовым облаком и землей [14], вследствие этого у торнадо не редки случаи возникновения плазмоедов [15].

Гидравлические процессы в циклоне и торнадо очень схожи [16]. Различие только в масштабах. Электрические процессы в торнадо также аналогичны электрическим процессам в циклонах. Различие состоит, как и в первом случае, в масштабах процесса и ограничении заряженных частиц пыли в вихревом потоке заземленными металлическими стенками циклона и отсутствии сильно электризованного материнского облака, поэтому электрические процессы в циклоне необходимо рассматривать как движение заряженных частиц в вихре. На основании последнего можно предположить, что можно обойтись без внешнего источника высокого напряжения, а наводить постоянное высокое напряжение на коронирующий электрод за счет наэлектризованной пыли [17]. Однако при аксиальном расположении коронирующего электрода, как

было показано ранее, формируется «мертвая зона», поэтому нужно найти другую конфигурацию коронирующих электродов, исключающую появление «мертвой зоны».

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при аксиальном расположении коронирующего электрода на частицу пыли действует три силы: центробежная, градиентная, кулоновская силы.

2. Показано, что центробежная и кулоновская силы действуют согласованно, усиливая действие друг друга, и направлены на периферию потока. Градиентная сила направлена встречно действию центробежной и кулоновской сил.

3. Установлено, что имеется зона, где сила градиента давления превышает сумму центробежной и кулоновской сил, препятствуя сепарации частиц на периферию.

4. Установлено, что при аксиальном расположении коронирующего электрода действие кулоновских и центробежных сил компенсируется градиентной силой, образуя «мертвую зону».

5. Показано, что для усиления действия центробежной силы, и компенсации действия градиентной силы, конфигурацию коронирующих электродов нужно изменить.

Список литературы

1. Луговский, С. И. Совершенствование систем промышленной вентиляции [Текст] / С. И. Луговский, Г. К. Дымчук – М.: Стройиздат, 1991. – 136с., ил.
2. Алиев, Г. М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок [Текст] / Г. М. Алиев. – М.: Металлургия, 1988. – 368с., ил.

3. Орлов, С. М. Анализ работы циклона как первой ступени очистки газа от пыли [Текст] / С. М. Орлов, Э. И. Дмитриченкова, А. Я. Орлова // *Макеевка, ДонНАСА, Журнал «Инженерни системи та техника безпеки»*. – Випуск 2010 – 6(86). – С. 10-14.
4. Орлов, С. М. Исследование усовершенствованного циклона как первой ступени очистки газа от пыли [Текст] / С. М. Орлов, Э. И. Дмитриченкова // *Вісті автомобільно-дорожнього інституту Горлівка, ДонНТУ, № 1, 2011 р.* – С. 188-195.
5. Патент №29593 Україна МПК B01D45/00./ Заявлено 05.03.2007; Опубл. 25.01.2008.
6. Патент №63893 Україна МПК B01D45/00./ Заявлено 18.03.2011; Опубл. 25.10.2011.
7. Куцев, Л. А. Интенсификация процессов улавливания твердой и жидкой фазы аэрозолей при использовании силовых полей [Текст] / Л. А. Куцев // Автореф. дис., д-ра техн. наук. – Белгород: 2004 – 41 с.
8. Bart, W. Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern auf Grund neuerer untersuchungen. – *Brennstoff-Warmekraft, 1956, № 8, s. 1-9.*
9. Орлов, С. М. Исследование гидродинамических характеристик восходящего вихря циклона [Текст] / С. М. Орлов // *Журнал «Современное промышленное и гражданское строительство» 2019, том 15, выпуск 4.*
10. Орлов, С. М. Анализ работы циклона как первой ступени очистки газа от пыли [Текст] / С. М. Орлов, Б. Р. Романенко, А. Я. Орлова // *Макеевка, ДонНАСА, Вестник «Научно технические достижения студентов строительно-архитектурной отрасли» 2019-4 (138).*
11. Левитов, В. И. Дымовые электрофильтры. – М.: Энергия, 1980. – 448 с.
12. Боев, А. Г. Электромагнитная теория смерча. I ч. Электродинамика вихря [Текст] / А. Г. Боев // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2009 – т. 14 № 2 – С.121-149.
13. Glaser, A. H. The structure of tornado vortex according to observation data // *Cumulus Dynamics Proceedings of the First Conference on Cumulus Convection, Portsmouth. 19-22 May, 1959.*
14. Krasilnikov, E. Y. Electromagnetohydrodynamic Nature of Tropical Cyclones, Hurricanes and Tornadoes // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102. – P. 13.571-13.580.
15. Ratis, Yu. L. Ball lightning as macroscopic quantum phenomenon // *Universidad Politecnica de Valencia, Editoria UPV, Ref. 2005. 2538, 112 p.*
16. Орлов, С. М. Исследование целесообразности применения циклонов «правого» и «левого» направления вращения в северном полушарии Земли [Текст] / С. М. Орлов, А. Я. Орлова // *Вісник ДонНАБА. Інженерні системи та техногенна безпека. Вип. 2014-5 (109).* – с. 29-35.
17. Орлов, С. М. Влияние статического электричества на эффективность работы циклона [Текст] / С. М. Орлов, А. Я. Орлова // *Вісник ДонНАБА. Інженерні системи та техногенна безпека. Вип. 2015-5 (115).* – с. 29-35.