



ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ОЧИСТКЕ ГАЗОВ ЦИКЛОНАМИ

С. М. Орлов

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,

2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.

E-mail: Stanisl.orlov2014@yandex.ru

Получена 05 мая 2021; принята 14 мая 2021.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы электризации пыли в циклонах, как наиболее характерных представителей сухих инерционных пылеуловителей. За счет разделения частиц пыли по фракциям в циклоне формируются ярко выраженные две зоны с разноименными зарядами. По оси циклона формируется зона (пыльный тромб) с отрицательным зарядом, в то время как у внутренней поверхности наружной стенки циклона сформирована зона с положительным зарядом. Проведенные исследования показали, что электрическая емкость пыльного тромба может достигать больших величин, соизмеримых с емкостью Земного шара. Однако, несмотря на большую емкость, а соответственно и заряд пыльного тромба, за счет малой кривизны напряженность электрического поля, создаваемого за счет электризации, редко достигает критических величин для создания коронного разряда. Необходимо провести исследования по поиску методов концентрации электрического поля, что позволит более полно использовать энергию, затраченную на закрутку вихревого потока, а соответственно добиться снижения энергозатрат при очистке газов циклонами.

Ключевые слова: циклон, пыль, электризация, электрическая емкость, электрический заряд, напряженность электрического поля, пыльный тромб.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГО- ВИТРАТ ПРИ ОЧИЩЕННІ ГАЗІВ ЦИКЛОНАМИ

С. М. Орлов

ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,

2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.

E-mail: Stanisl.orlov2014@yandex.ru

Отримана 05 травня 2021; прийнята 14 травня 2021.

Анотація. У статті розглянуті питання електризації пилу в циклонах, як найбільш характерних представників сухих інерційних пиловловлювачів. За рахунок розділення частинок пилу по фракціях, в циклоні формуються яскраво виражені дві зони з різнойменними зарядами. По осі циклона формується зона (пиловий тромб) з негативним зарядом, водночас у внутрішній поверхні зовнішньої стінки циклона сформована зона з позитивним зарядом. Проведені дослідження показали, що електрична ємність пилового тромбу може досягати великих величин, порівнянних з ємністю Земної кулі. Однак, незважаючи на велику ємність, а відповідно і заряд пилового тромбу, за рахунок малої кривизни напруженості електричного поля, що створюється за рахунок електризації, рідко досягає критичних величин для створення коронного розряду. Необхідно провести дослідження з пошуку методів концентрації електричного поля, що дозволить більш повно використовувати енергію, витрачену на закрутку вихрового потоку, а відповідно домогтися зниження енерговитрат при очищенні газів циклонами.

Ключові слова: циклон, пил, електризація, електрична ємність, електричний заряд, напруженість електричного поля, пиловий тромб.

RESEARCH OF METHODS AND MEANS OF REDUCING ENERGY CONSUMPTION DURING GAS PURIFICATION BY CYCLONES

Stanislav Orlov

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavin Str., Makeevka, DPR, 83123.

E-mail: Stanisl.orlov2014@yandex.ru

Received 05 May 2021; accepted 14 May 2021.

Abstract. The article discusses the issues of electricization of dust in cyclones, as the most characteristic representatives of dry inertial dust collectors. Due to the division of dust particles according to fractions, a pronounced two zones with multi-dimensional charges are formed in cyclone. According to the cyclone axis, a zone (dusty thrombus) is formed with a negative charge, while the inner surface of the outer wall of the cyclone is formed a zone with a positive charge. Studies have shown that the electric capacity of the dusty thrombus can reach large values, commensurate with the globe with a container. However, despite the larger capacity, and accordingly the charge of the dusty thrombus, due to the low curvature, the tension of the electric field created by electrification rarely reaches critical quantities to create a corona discharge. It is necessary to conduct research to find methods for the concentration of the electric field, which will make it possible to more fully use the energy spent on swirling the vortex flow, and, accordingly, to reduce energy consumption when cleaning gases by cyclones.

Keywords: cyclone, dust, electrification, electric container, electric charge, electric field strength, dusty thrombus.

Введение

Пути снижения энергозатрат при многоступенчатых схемах очистки газа от пыли, где циклоны применяются в качестве предварительной ступени, целесообразно вести за счет более полного использования энергии, затраченной на закрутку газового потока. Энергия, затраченная на придание вращения восходящего вихря, с которым выносятся неуловленная пыль, не используется из-за не изученности данного вопроса.

Формулировка проблемы

В настоящее время при производстве строительных материалов выделяется большое количество пыли. Защита атмосферы – социальная и экономическая проблема, связанная с задачей создания комфортных условий для жизни и работы человека. Поэтому очистка промышленных выбросов имеют санитарное и экономическое значение. Ввиду ряда преимуществ циклоны получили широкое распространение [1–4]. Однако циклоны не эффективно улавливают мелкодисперсную пыль, и поэтому они зачастую исполь-

зуются в качестве предварительной ступени, перед аппаратами тонкой очистки.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время имеется большое количество исследований, направленных на повышение эффективности циклонов [5–6]. Анализ существующих направлений исследования показывает, что основное внимание сосредоточено на нисходящем вихревом потоке, в то время как неуловленная пыль выносятся из циклона восходящим вихревым потоком. В работе [7] проведено исследование гидродинамических характеристик восходящего вихря, которое показало, что в связи со сложностью процессов в полной мере использовать центробежную силу в вихревом восходящем потоке затруднительно.

Цель

Исследование электрических потенциалов, возникающих в циклоне, за счет электризации частиц пыли, находящихся в интенсивном вихревом

потоке позволит существенно повысить сепарирующую способность восходящего вихря за счет совместного использования центробежных и кулоновских сил.

Основной материал

Предыдущие исследования показали, что совместное использование центробежных и кулоновских сил в циклонах оказывает существенное влияние на повышение эффективности циклонов. Однако в этом случае необходимо иметь источник высокого напряжения, что не всегда возможно. Для исключения высоковольтного источника питания, более полного использования энергии затраченной на закрутку газа и повышения электробезопасности целесообразно использовать трибоэлектрический эффект, возникающий в пылевом аэрозоле, при движении пыли в интенсивном воздушном потоке [8–10]. Пылевая, как и другая аэрозольная частица, может иметь один или несколько электрических зарядов или быть нейтральной. Аэрозольная система может иметь в своем составе частицы, заряженные положительно, отрицательно, нейтральные. Соот-

ношение этих частиц определяет суммарный заряд системы. До недавнего времени полагали, что знак получаемого заряда определяется химическим составом пыли, однако исследования Ленинградского института охраны труда ВЦСПС не подтвердили этого предположения. По этим данным, исследованная пыль несла заряды обоих знаков. Указанное положение хорошо иллюстрируется данными А. И. Косенко и Е. С. Белкина о процентном содержании в различных аэрозолях нейтральных и заряженных частиц (табл.) [11].

Как видно из таблицы, наибольшая электризация пыли наблюдается при дроблении, транспортировке элеватором и пескоструйной очистке отливок. Причем количество частиц с положительным и отрицательным зарядом приблизительно равно. Исследования, проведенные многими учеными, показывают, что мелкие частицы при взаимодействии с крупными, отнимают у крупных электроны и заряжаются отрицательно, в то время как крупные частицы получают положительный заряд [12]. Чаще всего статическое электричество несет в себе негативное влияние, как на здоровье человека, так и на многие технологические процессы [13].

Таблица. Электрозаряженность пылевых частиц в производственных условиях

Производственный процесс	Количество частиц	Содержание частиц, %			
		Всего заряженных	Положительно заряженных	Отрицательно заряженных	Нейтральных
До начала бурения	272	82,0	37,9	44,1	18,0
Сухое бурение по кварцитам	745	93,8	49,8	44,0	6,2
Мокрое бурение по кварцитам	2 162	90,0	46,7	43,3	10,0
Бурение с сухим пылеулавливанием	1 546	87,1	45,4	41,7	12,9
Через 3 часа после взрыва	174	85,1	34,5	50,6	14,9
Пескоструйная очистка отливок	650	97,2	48,7	48,5	2,8
Измельчение гипса в мельнице	409	98,5	59,4	39,1	1,5
Измельчение гипса в дробилках	100	99,0	60,0	39,0	1,0
Транспортировка гипса элеватором	248	97,7	55,7	42,0	2,3

В циклоне происходит сепарация пыли по фракциям. Крупнодисперсная пыль с положительным зарядом сосредоточена у внутренней поверхности наружной стенки циклона, в то время как мелкодисперсная пыль, имеющая отрицательный заряд, концентрируется по центру циклона, в восходящем вихре циклона.

Следовательно, в циклоне формируется ярко выраженные две зоны с разноименными зарядами. По оси циклона формируется зона с отрицательным зарядом, в то время как у внутренней поверхности наружной стенки циклона сформирована зона с положительным зарядом [8].

Таким образом, циклон можно представить как цилиндрический конденсатор сложной формы. Внутренняя обкладка этого конденсатора (пыльный тромб) представляет собой границу зоны с радиусом равным [7]:

$$R_s = \frac{m_q a_q}{m_q \omega^2} = 0,25DK_2 = 0,5R_2. \quad (1)$$

Определим структуру пыльного тромба. Имеется зависимость, удовлетворительно описывающая распределение по массам естественных атмосферных аэрозолей [14]:

$$\frac{dN_\Sigma}{dm} = \frac{A_\Sigma}{m^2}, \quad (2)$$

где N_Σ – количество частиц в заданном объеме;

m – масса частиц, кг;

A_Σ – коэффициент, кг.

Следовательно, общее число N_Σ частиц в заданном объеме равно:

$$N_\Sigma = \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \frac{dN_\Sigma}{dm} dm = \frac{A_\Sigma}{m_{\min}}, \quad (3)$$

где m_{\max} – масса максимальной частицы, которая определяется по фракционной эффективности циклона, кг;

m_{\min} – масса минимальной частицы, которая определяется по фракционному составу пыли, кг.

Полная масса этих частиц M_Σ в заданном объеме:

$$M_\Sigma = \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} m \frac{dN_\Sigma}{dm} dm = A_\Sigma \ln \frac{m_{\max}}{m_{\min}}. \quad (4)$$

Тогда, применительно к циклону, масса частиц, находящихся на выходе из циклона, равна в объеме 1 м^3 :

$$C_{\text{ex}} (1 - \eta_y) = A_\Sigma \ln \frac{m_{\max}}{m_{\min}}, \quad (5)$$

где C_{ex} – концентрация пыли на входе в циклон, $\text{кг}/\text{м}^3$;

η_y – КПД циклона.

Тогда, коэффициент A_Σ будет равен:

$$A_\Sigma = \frac{M_{\text{ex}} (1 - \eta)}{\ln \frac{m_{\max}}{m_{\min}}}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (4), получим количество частиц на выходе из циклона в объеме 1 м^3 :

$$N_{\Sigma, \text{вых}} = \frac{M_{\text{ex}} (1 - \eta)}{m_{\min} \ln \frac{m_{\max}}{m_{\min}}}. \quad (7)$$

Зная массовую концентрацию на выходе из циклона и количество частиц в 1 м^3 можем вычислить частицу со средней массой m_{cp} , которая равна:

$$m_{\text{cp}} = \frac{M_{\text{ex}} (1 - \eta)}{N_{\Sigma, \text{вых}}} = m_{\min} \ln \frac{m_{\max}}{m_{\min}}. \quad (8)$$

Диаметр частицы со средней массой будет равен:

$$d_{\text{ч.ср}} = \sqrt[3]{\frac{6m_{\min} \ln \frac{m_{\max}}{m_{\min}}}{\pi \rho_{\text{ч}}}}. \quad (9)$$

Количество частиц пыли в выхлопной трубе циклона будет равно:

$$N_{\text{вых}} = N_{\Sigma, \text{вых}} \frac{\pi D^3 K_2^2 K_3}{4}. \quad (10)$$

Емкость частицы пыли с размером $d_{\text{ч.ср}}$ равна:

$$C_{\text{ч.ср}} = 2\pi \epsilon_0 \epsilon d_{\text{ч.ср}}. \quad (11)$$

Тогда суммарная емкость пыльного тромба состоит из суммы емкостей всех частиц пыли, находящихся в выхлопной трубе:

$$C_m = 0,5 N_{\Sigma, \text{вых}} \pi^2 D^3 K_2^2 K_3 \epsilon_0 \epsilon d_{\text{ч.ср}}. \quad (12)$$

На рис. 1 показаны зависимости емкости пыльного тромба в зависимости от типа и диаметра циклона.

Как видно из графиков (рис. 1) емкость пыльного тромба достигает больших величин. Так у циклонов типа ЦН, при диаметре $D = 1,5\text{ м}$, емкость пыльного тромба и емкость Земного шара практически равны. Это говорит о том, что даже при малом заряде частиц пыли, суммарный заряд будет достигать больших величин. Пыльный тромб можно представить как коронирующий электрод, тогда напряженность электрического поля для создания критической напряженности поля составит (формула Пика) [1]:

$$E_{кр} = 3,04 \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{0,25D - K_2}} \right) \times 10^6, (13)$$

где β – отношение действительной плотности воздуха к его плотности в нормальных условиях.

Напряжение, которое должно быть создано за счет трибоэлектрического эффекта, между пыль-

ным тромбом и стенкой выхлопной трубы можно определить [1]:

$$\begin{aligned} U_{кр} &= E_{кр} 0,25DK_2 \ln \frac{0,5DK_2}{0,25DK_2} = \\ &= E_{кр} 0,25DK_2 \ln 2 \end{aligned} \quad (14)$$

На рисунке 2 показаны зависимости критической напряженности от диаметра циклонов

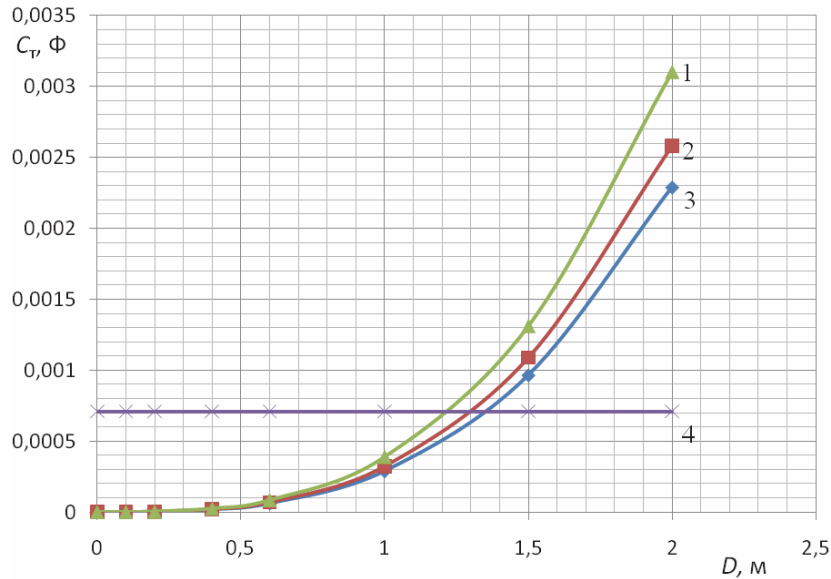


Рисунок 1. Зависимости емкости пыльного тромба от диаметра циклона $C_m = f(D)$ при: $d_{min} = 1 \text{ мкм}$; $d_{max} = 10 \text{ мкм}$; $M_{вх} = 300 \text{ г/м}^3$; $\eta = 0,95$; 1 – ЦН24; 2 – ЦН15; 3 – ЦН11; 4 – емкость Земли.

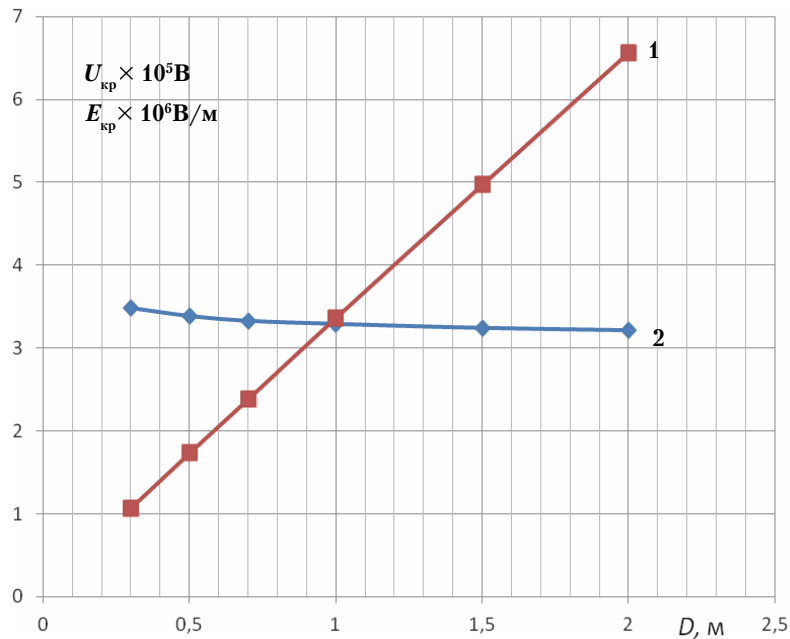


Рисунок 2. Зависимости для циклонов типа ЦН: 1 – критического напряжения на пыльном тромбе $U_{кр} = f(D)$; 2 – критической напряженности электрического поля от диаметра циклонов $E_{кр} = f(D)$.

типа ЦН $E_{кр} = f(D)$ и критического напряжения на пыльном тромбе $U_{кр} = f(D)$.

Как видно из графиков (рис. 2), напряженность электрического поля мало зависит от диаметра циклона, в то время как критическое напряжение, необходимое для создания такой напряженности, растет довольно значительно, пропорционально росту диаметра циклона.

Так, критическая напряженность пыльного тромба для циклона ЦН-300 составит $E_{кр} = 3,49 \times 10^6$ В/м, при этом критическое напряжение на пыльном тромбе должно быть $U_{кр} = 107$ кВ. С увеличением диаметра циклона критическое напряжение значительно возрастает, и для циклона ЦН-2000 составит $U_{кр} = 656,4$ кВ, что абсолютно не реально, чтобы такое напряжение возникло за счет трибоэлектрического эффекта, несмотря на большую емкость пыльного тромба.

Необходимо провести поиск рациональных методов концентрации электростатического поля.

В электрофильтрах для создания коронного разряда используются специальные коронирующие электроды, изготовленные из металла с выступами малого радиуса. На выступах с малым радиусом скругления наблюдается высокая напряженность электростатического поля, отчего коронный разряд наступает при меньших напряжениях.

Как было принято ранее, выхлопную трубу циклона с объемными зарядами пыли представляем как цилиндрический конденсатор. Наружная обкладка представляет собой внутреннюю стенку выхлопной трубы циклона, имеющую нулевой потенциал, однако по отношению к внутреннему пыльному тромбу имеет положительный потенциал, (рис. 3а). Силовые линии расположены по радиусу, а эквипотенциалы напряженности электростатического поля представляют собой концентрические окружности.

При расположении изолированного от земли проводника по оси циклона, где имеется объемный заряд, проводник, практически сразу, приобретает этот же заряд (рис. 3б) [15].

Напряженность электростатического поля, созданного равномерно заряженным длинным цилиндром, или нитью вне ее границ равна [15]:

$$E_R = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0\epsilon R}, \quad (15)$$

где $\sigma = dq / dS$ – поверхностная плотность зарядов.

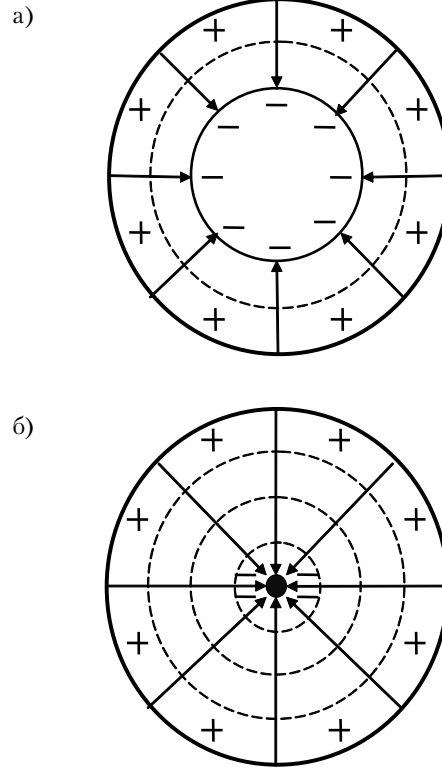


Рисунок 3. Силовые линии и эквипотенциалы электростатического поля в поперечном сечении циклона: а) при отсутствии проводника по оси циклона; б) изолированный проводник, расположенный по оси циклона.

Аналогично, как и ранее, критическая напряженность поля вблизи поверхности коронирующего электрода, выполненного из гладкой проволоки [15]:

$$E_{кр} = 3,04 \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{r_k}} \right) \cdot 10^6, \quad (16)$$

где r_k – радиус коронирующего электрода, м.

Критическое напряжение, которое необходимо подать на коронирующий электрод, чтобы создать критическую напряженность [15]:

$$U_{кр} = E_{кр} r_k \ln \frac{0,5DK_2}{r_k}. \quad (17)$$

На рисунке 4 показаны зависимости критического напряжения для создания коронного разряда от диаметра циклона $U_{кр} = f(D)$, при постоянном диаметре коронирующего электрода $d_{кор} = \text{const}$ для циклонов ЦНИИГАЗА.

Как видно из графиков (рис. 4) при внесении изолированного проводника диаметром $d_k = 2$ мм критическая напряженность поля для циклона

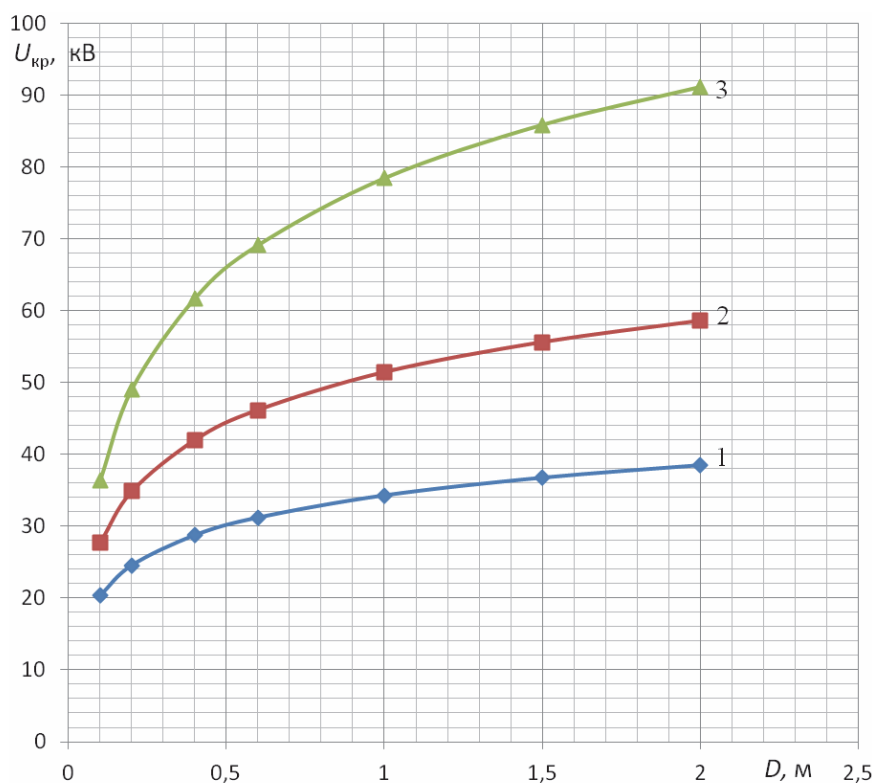


Рисунок 4. Зависимости критического напряжения $U_{кр} = f(D)$, при $d_{кор} = \text{const}$, для циклонов ЦНИИГАЗА: 1 – $d_{кор} = 2\text{ мм}$; 2 – $d_{кор} = 4\text{ мм}$; 3 – $d_{кор} = 8\text{ мм}$.

ЦН-1000 составит: $E_{кр} = 6,03 \cdot 10^6 \text{ В/м}$, а $U_{кр} = 34,3 \text{ кВ}$, что вполне реально. Здесь следует отметить, что, помещая в циклон коронирующий электрод, который в той или иной мере будет создавать условие для лучшего процесса выделения пыли из вихревого потока, этим будет достигаться поставленная цель, более полного использования энергии, затраченной на очистку газа в циклоне.

Выводы

1. Установлено, что совместное использование центробежных и кулоновских сил в циклонах оказывает существенное влияние на повышение эффективности циклонов, однако в этом случае необходимо иметь источник высокого напряжения, что не всегда возможно.
2. Показано, что для исключения высоковольтного источника питания, более полного использования энергии, затраченной на закрутку газа, и повышения электробезопасности целесообразно использовать трибоэлектрический эффект, возникающий в пылевом аэро-

золе, при движении пыли в интенсивном воздушном потоке.

3. Установлено, что мелкие частицы при взаимодействии с крупными, отнимают у крупных частиц электроны и заряжаются отрицательно, в то время как крупные частицы, отдавая электроны, приобретают положительный заряд.
4. За счет сепарации пыли по фракциям в циклоне формируются ярко выраженные две зоны с разноименными зарядами: по оси циклона формируется зона с отрицательным зарядом (пыльный тромб); в то время как у внутренней поверхности наружной стенки циклона сформирована зона с положительным зарядом.
5. Проведенный анализ показал, что электрическая емкость пыльного тромба может достигать больших величин, соизмеримых с емкостью Земного шара, а соответственно, электрический заряд пыльного тромба может достигать больших величин.
6. Установлено, что за счет малой кривизны пыльного тромба критическое напряжение для создания коронного разряда достигает

очень больших величин, которые маловероятно получить за счет трибоэлектрического эффекта, поэтому необходимо провести поиск рациональных методов концентрации электростатического поля.

7. Показано, что при внесении по оси циклона изолированного от земли проводника, на нем

практически мгновенно возникает заряд, равный заряду пыльного тромба, при этом напряженность поля за счет малого диаметра проводника пропорционально увеличивается, а напряжение коронного разряда уменьшается, и может быть наведено за счет трибоэлектрического эффекта.

Литература

1. Гурвиц, А. А. Пылеулавливание в металлургии / А. А. Гурвиц. – Москва : Металлургия, 1984. – 336 с. – Текст : непосредственный.
2. Луговский, С. И. Совершенствование систем промышленной вентиляции / С. И. Луговский. – Москва : Стройиздат, 1991. – 136 с. – Текст : непосредственный.
3. Горелкин, Д. Н. Комплексные решения в области пылегазоочистки на примере проектов, реализованных ЗЛО «СовНлим» / Д. Н. Горелкин. – Текст : непосредственный // ПЫЛЕГАЗООЧИСТКА – 2014 : сборник докладов VII международной конференции, 23–24 сентября 2014. – Москва : ООО «ИНТЕХЭКО», 2014. – С. 32–35.
4. Алиев, Г. М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок / Г. М. Алиев. – Москва : Металлургия, 1988. – 368 с. – Текст : непосредственный.
5. Повышение эффективности обеспыливания воздуха рабочих зон металлообрабатывающих и деревообрабатывающих производств / Ю. И. Булыгин, О. С. Панченко, В. А. Романов, О. В. Денисов. – Текст : непосредственный // Вестник ДГТУ. – 2013. – № 7/8 (75). – С. 49–57.
6. Логачёв, И. Н. Аэродинамические основы аспирации : [монография] / И. Н. Логачёв, К. И. Логачев. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2005. – 659 с. – Текст : непосредственный.
7. Орлов, С. М. Исследование гидродинамических характеристик восходящего вихря циклона / С. М. Орлов. – Текст : электронный // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2019. – Том 15, № 4. – С. 171–178. – URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2019-4/03_orlov.pdf (дата публикации: 16.12.2019).
8. Орлов, С. М. Влияние на энергоэффективность электрических процессов в циклонах при очистке газов от пыли / С. М. Орлов. – Текст : непосредственный // Энергетические системы : сборник трудов 2-й Международной научно-технической конференции, Белгород, 23–24 ноября 2017 ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

Reference

1. Gurvits, A. A. Dust collection in metallurgy. – Moscow : Metallurgy, 1984. – 336 p. – Text : direct. (in Russian)
2. Lugovsky, S. I. Improvement of industrial ventilation systems. – Moscow : Stroiizdat, 1991. – 136 p. – Text : direct. (in Russian)
3. Gorelkin, D. N. Complex solutions in the field of dust and gas cleaning on the example of projects implemented ZLO «SovNlim». – Text : direct. – In: *DUST AND GAS CLEANING – 2014: collection of reports of the VII international conference*. – Moscow : LLC «INTECHECO», 2014. – P. 32–35. (in Russian)
4. Aliyev, G. M. Construction and maintenance of gas-cleaning and dust-collecting installations. – Moscow : Metallurgy, 1988. – 368 p. – Text : direct. (in Russian)
5. Bulygin, Yu. I.; Panchenko, O. S.; Romanov, V. A.; Denisov, O. V. Improving the efficiency of dedusting the air in the working areas of metalworking and woodworking industries. – Text : direct. – In: *DSTU Bulletin*. – 2013. – № 7/8 (75). – P. 49–57. (in Russian)
6. Logachev, I. N.; Logachev K. I. Aerodynamic bases of aspiration : [monograph]. – St. Petersburg : Himizdat, 2005. – 659 p. – Text : direct. (in Russian)
7. Orlov, S. M. Investigation of hydrodynamic characteristics of an ascending cyclone vortex. – Text : electronic. – In: *Modern industrial and civil construction*. – 2019. – Volume 15, № 4. – P. 171–178. – URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2019-4/03_orlov.pdf (date of publication: 16.12.2019). (in Russian)
8. Orlov, S. M. Influence on energy efficiency of electrical processes in cyclones when cleaning gases from dust. – Text : direct. – In: *Energy Systems : proceedings of the 2nd International Scientific and Technical Conference* ; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, V. G. Shukhova Belgorod State Technological University [et. al.]. – Belgorod : BSTU named after V. G. Shukhova, 2017. – P. 337–342. (in Russian)
9. Marceau, M. L.; Caffero, A. M. Data analysis of electrostatic charge in a finish ball mill. – Washington : PCA R&D Serial № 2855, 2005. – 132 p. – Text : direct. (in English)

- [и др.]. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2017. – С. 337–342.
9. Marceau, M. L. Data analysis of electrostatic charge in a finish ball mill / M. L. Marceau, A. M. Caffero. – Washington : PCA R&D Serial No. 2855, 2005. – 132 p. – Текст : непосредственный.
 10. Glukharev, N. Dry grinding and electro-physics. – Текст : непосредственный / N. Glukharev // *Zement Lime Gypsum*. – 2007. – № 5. – P. 48–49.
 11. Электрические свойства пыли. – Текст : электронный // *STROITELSTVO-NEW.RU* : [сайт]. – 2006–2021. – URL: <http://www.stroitelstvo-new.ru/gigiena-truda/elektricheskie-svoystva-pyli.shtml> (дата обращения: 12.03.2021).
 12. The role of the atmospheric electric field in the dust-lifting process / F. Espozito, R. Molinaro, C. I. Popa [et. al.]. – doi 10.1002/2016GL068463. – Текст : электронный // *American Geophysical Union*. – 2016. – P. 5501–5508. – URL: <http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016GL068463> (дата обращения: 12.03.2021).
 13. Glukharev, N. ECOFOR neutralization technology for intensification of dry grinding / N. Glukharev. – Текст : непосредственный // *European cement conference, 2001, Dresden*. – Dresden. – P. 28.1–28.4.
 14. Адамчук, Ю. В. Электрические процессы и образование молний в вулканическом аэрозоле / Ю. В. Адамчук, В. В. Титов. – Текст : электронный : [сайт]. – [1984]. – URL: <http://anataz.narod.ru/science/lightning/lightning.html> (дата обращения: 12.02.2021).
 15. Трофимова, Т. И. Курс физики : учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с. – Текст : непосредственный.
 10. Glukharev, N. Dry grinding and electro-physics. – Text : direct. – In: *Zement Lime Gypsum*. – 2007. – № 5. – P. 48–49. (in English)
 11. Electrical properties of dust. – Text : electronic. – In: *STROITELSTVO-NEW.RU* : [website]. – 2006–2021. – URL: <http://www.stroitelstvo-new.ru/gigiena-truda/elektricheskie-svoystva-pyli.shtml> (date of access: 12.03.2021). (in Russian)
 12. Espozito, F.; Molinaro, RC.; Popa, I. [et al.]. The role of the atmospheric electric field in the dust-lifting process. – doi 10.1002/2016GL068463. – Text : electronic. – In: *American Geophysical Union*. – 2016. – P. 5501–5508. – URL: <http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016GL068463> (date of access: 12.03.2021). (in English)
 13. Glukharev, N. ECOFOR neutralization technology for intensification of dry grinding. – Text : direct. – In: *European cement conference*. – Dresden. – P. 28.1–28.4. (in English)
 14. Adamchuk, Yu. V.; Titov, V. V. Electrical processes and lightning formation in volcanic aerosol. – Text : electronic : [website]. – [1984]. – URL: <http://anataz.narod.ru/science/lightning/lightning.html> (date of access: 12.02.2021). (in Russian)
 15. Trofimova, T. I. Physics course : textbook for universities. – Moscow : Publishing Center «Academy», 2006. – 560 p. – Text : direct. (in Russian)

Орлов Станислав Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и электроснабжения в строительстве ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: автоматизация процессов и аппаратов систем ТГВ.

Орлов Станіслав Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та електропостачання в будівництві ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: автоматизація процесів і апаратів систем ТГВ.

Orlov Stanislav – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Automation and Power Supply in Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: automation of processes and devices of TGV systems.