



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.928.9

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-606-615>

Оценка времени работы пылеуловителя со скругленными сепарационными элементами

© В.Э. Зинуров*, А.В. Дмитриев*, Т.С. Петрова*, О.С. Дмитриева**

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

**Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

Резюме: Цель – разработка новых технических устройств для улавливания из дымовых газов тепловых электростанций частиц пыли размером до 10 мкм, а также создание инженерной методики предлагаемого сепарационного устройства и получение расчетных зависимостей для определения времени его работы до необходимого технического обслуживания. Для определения эффективности осаждения частиц на поверхности сепарационного устройства были использованы ранее апробированные методы математического моделирования, основанного на законах сохранения импульса и тепла, а также на основе решения уравнений гидрогазодинамики. Предложена оригинальная конструкция трапециевидного сепаратора с несколькими рядами дугообразных элементов, на которые в процессе эксплуатации аппарата налипают пыль за счет действия инерционных и центробежных сил. При увеличении входной скорости газового потока от 3 до 11 м/с и значениях эффективности 0,5, 0,7 и 0,9 продолжительность работы сепаратора в среднем снижается в 3,7 раза. Установлено, что минимальная продолжительность работы сепаратора составляет около 50 сут при скорости запыленного потока 11 м/с и концентрации пыли 8 мг/м³; максимальная продолжительность работы сепаратора – около 465 сут при скорости запыленного потока 3 м/с и концентрации пыли 5 мг/м³. Предложенная конструкция трапециевидного сепаратора позволяет улавливать частицы из дымовых газов тепловых электростанций размером более 10 мкм с эффективностью 99,0–99,9% и частицы размером менее 10 мкм с эффективностью в среднем 61,7%, что способствует решению задач по уменьшению выбросов в воздушный бассейн. Разработанная методика позволит определять основные конструктивные размеры предлагаемого сепаратора при заданных параметрах газового потока.

Ключевые слова: сепаратор, пылеочистка, продолжительность работы, эффективность, дымовой газ, центробежная сила

Информация о статье: Дата поступления 11 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 04 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

Для цитирования: Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Петрова Т.С., Дмитриева О.С. Оценка времени работы пылеуловителя со скругленными сепарационными элементами. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 606–615. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-606-615>

Evaluation of operating time for the dust separator with rounded separation elements

© Vadim E. Zinurov, Andrey V. Dmitriev, Tatiana S. Petrova, Oksana S. Dmitrieva

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Abstract: The study is focused at the development of new technical devices for separating dust particles up to 10 microns in size from flue gases of thermal power plants, along with the creation of an engineering methodology for the proposed separation device and obtaining calculated dependences for determining operational maintenance intervals. In order to determine the efficiency of particle deposition on the surface of the separation device, previously verified methods of mathematical modelling were used based on the laws of momentum and heat conservation, as well as a solution to hydrodynamics equations. The proposed original trapezoidal separator design is equipped with several rows of arcuate elements for concentrating dust during the operation of the apparatus due to the action of inertial and centrifugal forces. With an increase in the input velocity of the gas flow from 3 to 11 m/s and efficiency values of 0.5, 0.7 and 0.9, the operation time of the separator is decreased by an average of 3.7 times. The minimum operation time is established to be about 50 days at a dust flow rate of 11 m/s and a dust concentration of 8 mg/m³. The maximum operation time of the separator was determined to be about 465 days at a dust flow rate of 3 m/s and a dust concentration of 5 mg/m³. The proposed design of the trapezoidal separator ensures the separation of particles both larger and smaller than 10 microns

from the flue gases of thermal power plants with an efficiency of 99.0–99.9 and 61.7%, respectively, resulting in reduced atmospheric emissions. Using the developed methodology, the main structural dimensions of the proposed separator can be determined under given gas flow parameters.

Keywords: separator, dust cleaning, operation time, efficiency, flue gas, centrifugal force

Information about the article: Received February 11, 2020; accepted for publication May 04, 2020; available online June 30, 2020.

For citation: Zinurov VE, Dmitriev AV, Petrova TS, Dmitrieva OS. Evaluation of operating time for the dust separator with rounded separation elements. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):606–615. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-606-615>

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач по охране окружающей среды, вошедшей в энергетическую стратегию Российской Федерации на период до 2030 года¹ при развитии энергетического сектора, является уменьшение негативного влияния транспортировки на окружающую среду, потребление энергоресурсов, климат и здоровье людей. Актуальность задачи обусловлена тем, что многие тепловые электрические станции, используя в качестве основного или резервного топлива уголь, торф и др. виды твердого топлива, загрязняют воздушный бассейн соединениями тяжелых металлов, несгоревшими частицами твердого топлива и различными вредными оксидами. Стоит отметить, что большинство электростанций из-за негативного влияния на окружающую среду были переведены с твердого на жидкое и газообразное топлива. Однако некоторую часть станций экономически нецелесообразно, а иногда и невозможно перевести с одного вида топлива на другое. В связи с добычей в некоторых регионах большого количества природного ископаемого, являющегося основным топливом для местных электрических станций, отказ может привести к экономическому упадку в регионе или из-за географического расположения, где не проложен газопровод. Например, уголь в качестве основного топлива используют на Троицкой гидроэлектростанции, тепловой электростанции ТЭС–1 ОАО «Архангельский целлюлозно-

бумажный комбинат», Бийской теплоэлектростанции (ТЭЦ), Иркутских ТЭЦ–6, 9, 19, 11 и многих других станциях. Поэтому необходимо использовать современные высокоэффективные технологии очистки дымовых газов от частиц пыли при сжигании твердых видов топлива [1–7].

Наиболее распространенными аппаратами, улавливающими несгоревшие частицы топлива и летучую золу из дымовых газов, являются золоуловители, которые устанавливаются между газоотводными каналами котлов и дымососами. Золоуловители в зависимости от принципа работы и конструктивных особенностей подразделяют на 5 групп: механические сухие, мокрые, электрофильтры, тканевые фильтры и комбинированные. В зависимости от конкретного типа золоуловителя варьируется принцип действия аппарата и его эффективность (степень очистки). Например, эффективность сухого золоуловителя составляет до 70–80%, мокрого – до 99%. Однако общим недостатком всех видов золоуловителей является износ корпуса или конструктивных деталей (прутков, сопел и др.), как правило, вследствие абразивности твердых частиц. Еще одной проблемой золоуловителей, кроме мокрых и электрических, является низкая эффективность очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм. Стоит отметить, что использование мокрых и электрических аппаратов возможно не везде по причине сложности в эксплуатации, дороговизны и повышенных требований к

¹Об утверждении Энергетической стратегии России на период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации № 1715-р от 13.11.2009.



улавливаемому материалу, например, при использовании электрофильтров нельзя улавливать взрывоопасные частицы. Таким образом, одной из ключевых задач перед предприятиями, которые используют твердые виды топлив, в частности, уголь, является продление срока службы действующих золоуловителей и повышение эффективности очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц размером до 10 мкм [8–17].

2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Для решения данной проблемы авторами работы был разработан сепаратор, который можно использовать в качестве предварительной насадки золоуловителя. Установка сепаратора позволит продлить срок службы золоуловителя, снизив концентрацию частиц в газовых выбросах, и решить проблему с улавливанием частиц размером менее 10 мкм. Проведенные ранее исследования показали, что эффективность очистки сепаратором газовых выбросов от частиц размером более 10 мкм варьируется в пределах 99–99,9%, для частиц размером менее 10 мкм эффективность в среднем равна 61,7% [18–21].

Сепаратор состоит из 8 рядов дугообразных элементов, которые заключены в трапециевидный корпус. В каждом ряду располагается по 8 элементов под углом 30° к корпусу для обеспечения равнопрочности (рис. 1).

Очистка газовых выбросов от частиц пыли в сепараторе происходит преимущественно за счет инерционных сил. При входе в устройство газовый поток изменяет свое направление, устремляясь в сужении между дугообразными элементами, в ходе данного процесса часть частиц выбивается из потока. Также наблюдается в сепараторе действие центробежных сил, а именно – после прохождения газовыми выбросами первого ряда дугообразных элементов поток приобретает упорядоченную структуру за счет их обтекания. Причем дугообразные элементы расположены относительно друг друга на одинаковом расстоянии и таким образом, чтобы достигалось макси-

мальное значение центробежной силы, действующей на поток. При закручивании частицы выбиваются из структуры потока и прилипают к поверхностям дугообразных элементов или оседают на дно. Стоит отметить, что в днище сепаратора имеется несколько круглых отверстий для отвода частиц пыли, выбившихся из структуры потока. Более мелкие частицы пыли прилипают к поверхностям дугообразных элементов. Через определенные промежутки времени внутренние элементы сепаратора забиваются пылью, это обстоятельство влияет на эффективность работы и гидравлическое сопротивление аппарата, что требует чистки устройств, приводящей к остановке технологического процесса. Очевидно, что наиболее идеальным вариантом является совместная чистка сепаратора и золоуловителя. Для этого необходимо правильно спрогнозировать остаточный ресурс сепаратора. Поэтому целью работы является исследование продолжительности работы сепаратора при различных физических и технологических условиях – при изменении концентрации пыли в газовом потоке, входной скорости газового потока и размера частиц пыли.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения расчетных зависимостей между физическими и технологическими параметрами в работе задавалась площадь входного сечения, которая остается постоянной по всей длине, исходя из размеров входного патрубка золоуловителя. Также задавалось количество рядов $n = 8$. Длина дугообразных элементов находится по формуле:

$$b = \frac{\sqrt{F}}{2n_k}, \text{ м}, \quad (1)$$

где F – площадь входного сечения сепаратора, м^2 ; n_k – количество дугообразных элементов в одном ряду.



Рис. 1. Трехмерная модель сепаратора (вид с разрезом). Движение газовых выбросов происходит справа налево
 Fig. 1. 3-D model of a separator (sectional view). Gas emissions move from right to left

Продолжительность работы сепаратора первоначально зависит от критической степени забивки дугообразных элементов, при которой устройство можно будет рентабельно использовать, т.е. эффективность очистки запыленного газового потока и потери давления в сепараторе будут удовлетворять требуемым производственным значениям. Для определения критической степени забивки дугообразных элементов сперва был проанализирован процесс постепенного налипания пыли на поверхности элементов. Очевидно, что через некоторый промежуток времени дугообразные элементы заполнятся пылью и будут напоминать полуокружности при рассмотрении элементов сверху. Впоследствии данные полуокружности начнут приобретать конусообразные формы из-за структуры газового потока, которая устанавливается при обтекании им дугообразных элементов. Стоит отметить, что установление конусообразной формы элементов позволит улучшить аэродинамику потока, по сравнению с первоначальной формой, вследствие отсутствия обратных потоков газа при его вылете из внутренней части дугообразных элементов. Однако после приобретения конусообразной формы элементами дальнейшее налипание пыли будет приводить к хаотической прямоугольной форме, что существенно меняет структуру газового потока и снизит значение центробежной силы на поток, следовательно снизится и

эффективность работы. Таким образом, было принято, что критическая степень забивки дугообразных элементов наступает в момент времени, когда форма дугообразных элементов изменяется на конусообразную. Тогда максимальный объем пыли в одном элементе определится как

$$V_1 = \left[\frac{\pi b^2}{8} + 2 \left(\frac{b^2}{4} - \int_0^{0.5b} \sqrt{b^2 - x^2} dx \right) \right] \times \frac{H}{\sin \alpha}, \text{ м}^3, \quad (2)$$

где α – угол наклона дугообразных элементов в сепараторе, °; H – высота сепаратора, м; x – координата окружности, м.

Суммарный максимальный объем пыли в сепараторе определялся по следующему выражению:

$$V = V_1 n n_k, \text{ м}^3. \quad (3)$$

С учетом формулы (3) и заданной плотности частиц пыли $\rho_a = 1075 \text{ кг/м}^3$ определялась критическая масса сепаратора:

$$m = V \rho_a, \text{ кг}. \quad (4)$$

Время, характеризующее продолжительность работы сепаратора, вычислялось по выражению:



$$\tau = \frac{m}{CEFW}, \text{ с}, \quad (5)$$

где C – концентрация пыли в газовом потоке, кг/м^3 ; E – эффективность очистки газового потока от частиц пыли; W – входная скорость газового потока, м/с .

Эффективность очистки газового потока от частиц пыли сепаратором рассчитывалась по следующей формуле:

$$E = 1 - (1 - E_0)(1 - E_1)^{n-2}, \quad (6)$$

где E_0 – эффективность первых двух рядов сепаратора; E_1 – эффективность одной ступени сепаратора.

Эффективность нулевой ступени сепаратора рассчитывалась по следующей формуле:

$$E_0 = 0,5 - 0,4e^{-0,033Stk}, \quad (7)$$

где Stk – число Стокса.

Эффективность одной ступени сепаратора рассчитывалась по выражению:

$$E_1 = 1 - 0,795e^{-0,63Stk}. \quad (8)$$

Число Стокса определялось по формуле:

$$Stk = \frac{\rho_a a^2 W}{\mu b}, \quad (9)$$

где a – размер частиц пыли, мкм ; μ – коэффициент динамической вязкости газа, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Следует отметить, что формула (7) была введена для оценки эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц первыми двумя рядами вследствие того, что очистка в данной области происходит преимущественно за счет резкого изменения направления движения потока. После прохождения газом двух рядов дугообразных элементов движение газового потока приобретает структуру за счет действия на газ центробежных сил. Поэто-

му было введено понятие «ступень очистки сепаратора» – это ряд дугообразных элементов, где газовый поток очищается под воздействием центробежных сил, т.е. ряды, расположенные после первых двух.

Для получения результатов одни показатели изменялись в заданных диапазонах, другие принимались постоянным базовым значением. Диапазоны изменения параметров – входная скорость газового потока W от 3 до 11 м/с , концентрация пыли в потоке C от 2 до 8 мг/м^3 , эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц E от 0,5 до 0,9, размер частиц a от 1 до 9 мкм . Базовые значения – входная скорость газового потока $W = 9 \text{ м/с}$, размер частиц $a = 4 \text{ мкм}$, концентрация пыли в потоке $C = 5 \text{ мг/м}^3$.

Проведенные исследования показали, что продолжительность работы сепаратора зависит от требуемой эффективности. Чем выше ее значение, тем ниже эксплуатационный срок. Также было выявлено, что продолжительность работы сепаратора уменьшается в зависимости от увеличения следующих параметров: скорости газового потока (рис. 2), концентрации частиц пыли в газовом потоке (рис. 3), размера частиц пыли (рис. 4).

При увеличении входной скорости газового потока от 3 до 11 м/с и значениях эффективности 0,5, 0,7 и 0,9 продолжительность работы сепаратора в среднем снижается в 3,7 раза. Это объясняется тем, что при более высоких скоростях через устройство проходят большие объемы запыленного потока, чем при низких скоростях, что приводит к забивке дугообразных элементов внутри сепаратора пылью. Стоит отметить, что в производственных условиях значение входной скорости газового потока является непостоянным значением, поэтому продолжительность работы устройства необходимо усреднять. При значениях эффективности 0,5, 0,7 и 0,9 продолжительность работы сепаратора составляет в среднем 45, 58 и 81 сут, соответственно, при скорости газового потока на входе в устройство от 3 до 11 м/с (см. рис. 2).

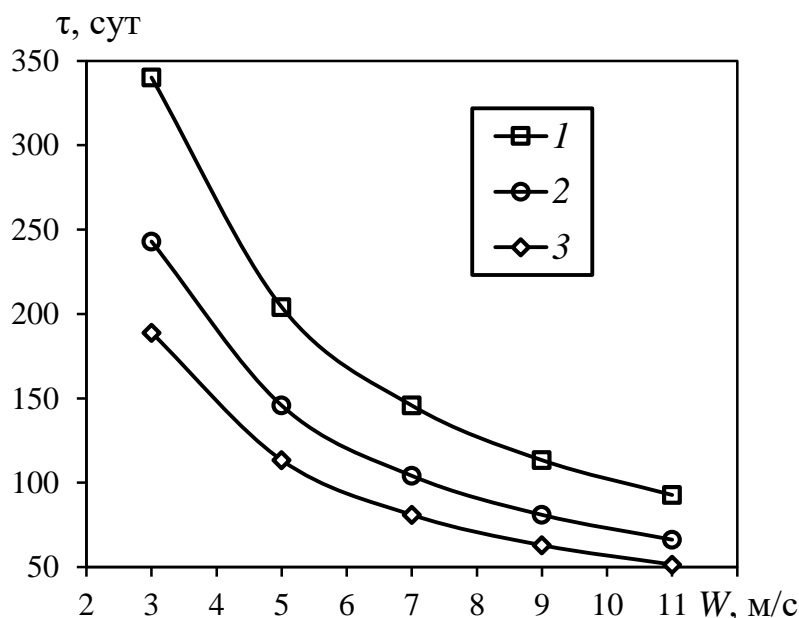


Рис. 2. Зависимость продолжительности работы сепаратора от входной скорости газового потока при различных значениях эффективности очистки газа от мелкодисперсных частиц E : 1 – 0,5; 2 – 0,7; 3 – 0,9
Fig. 2. Separator operation time vs gas flow input velocity at various values of efficiency E of gas purification from fine particles: 1 – 0.5; 2 – 0.7; 3 – 0.9

Увеличение концентрации пыли в дымовых газах от 2 до 8 мг/м³ приводит к сокращению работы трапециевидного сепаратора в среднем в 4 раза при входной скорости газового потока в диапазоне от 3 до 11 м/с. Стоит отметить, что при более низких скоростях газового потока в диапазоне от 3 до 7 м/с продолжительность работы сепаратора в среднем в 3,5 раза больше, чем при скорости газа от 9 до 11 м/с. При росте скорости газового потока в диапазонах 3–5, 5–7, 7–9 и 9–11 м/с продолжительность работы сепаратора уменьшается на 57, 69, 76 и 81%, соответственно. При увеличении концентрации пыли в газовом потоке от 2 до 8 мг/м³ время работы прямоугольного сепаратора в среднем составляет 236, 135, 93, 71 и 58 сут при скорости газа 3, 5, 7, 9 и 11 м/с, соответственно (см. рис. 3).

Продолжительность работы сепаратора уменьшается с увеличением размера мелкодисперсных частиц в очищаемом газовом потоке. Это вызвано тем, что скорость забивки дугообразных элементов пылью повышается, что приводит к понижению эффективности сепарации, следова-

тельно возникает необходимость в очистке элементов. Также на продолжительность работы сепаратора влияет входная скорость запыленного газового потока. С увеличением скорости повышается производительность аппарата, следовательно необходимо чаще производить очистку поверхностей дугообразных элементов. Продолжительность работы сепаратора в среднем составляет 192, 79 и 49 сут при входной скорости запыленного газового потока 3, 7 и 11 м/с, соответственно, при размере мелкодисперсных частиц в диапазоне от 1 до 9 мкм (см. рис. 4).

В ходе проделанной работы была получена формула (5), позволяющая спрогнозировать продолжительность работы сепаратора. В ходе ее анализа и варьирования параметров мелкодисперсных частиц (плотность, диаметр и концентрация) и скорости газового потока было выявлено, что продолжительность работы сепаратора с увеличением числовых значений данных параметров уменьшается вследствие повышения производительности трапециевидного сепаратора и относительно быстрой забивки дугообразных элементов пы-

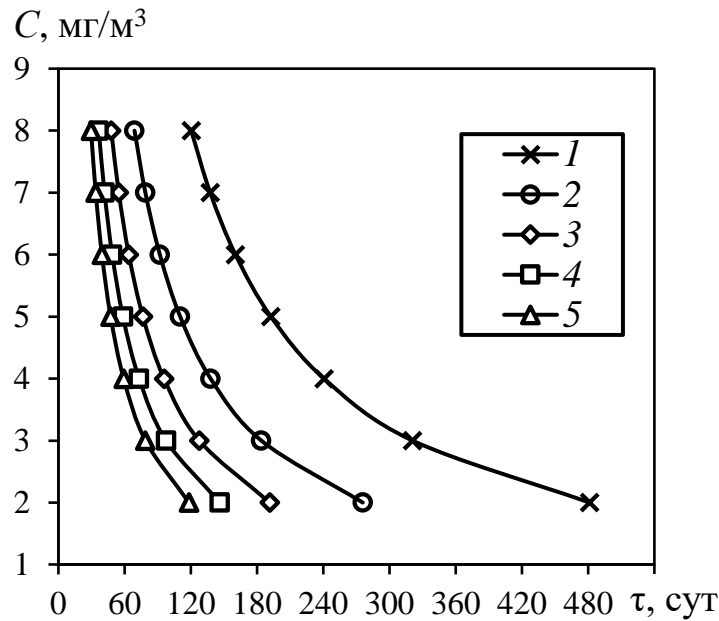


Рис. 3. Зависимость концентрации мелкодисперсных частиц в газовом потоке от продолжительности работы сепаратора при входной скорости газа W , м/с: 1 – 3; 2 – 5; 3 – 7; 4 – 9; 5 – 11
Fig. 3. Fine particle concentration in gas flow vs separator operation time at input gas velocity W , m/s: 1 – 3; 2 – 5; 3 – 7; 4 – 9; 5 – 11

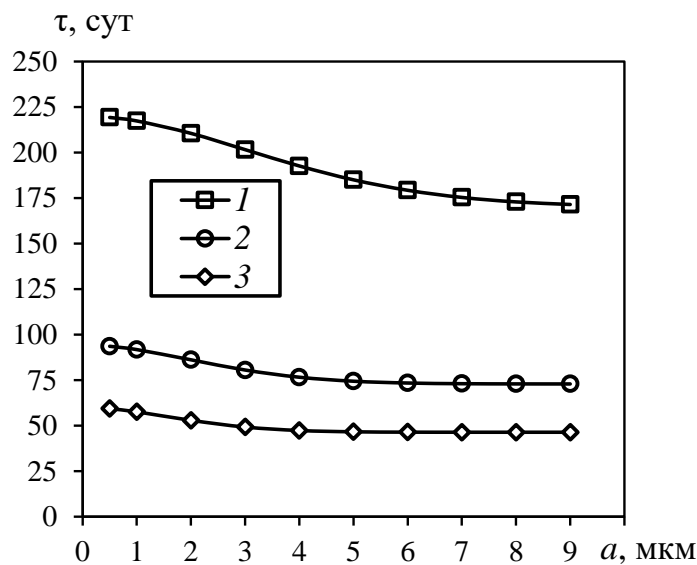


Рис. 4. Зависимость продолжительности работы сепаратора от диаметра мелкодисперсных частиц при входной скорости газа W , м/с: 1 – 3; 2 – 7; 3 – 11
Fig. 4. Separator operation time vs diameter of fine particles at input gas velocity W , m/s: 1 – 3; 2 – 7; 3 – 11

лью, приводящей к изменению структуры движения потока, из-за которой понижается эффективность очистки газового потока сепаратором от мелкодисперсных частиц. Минимальная продолжительность работы сепаратора составляет около 50 сут при

входной скорости движения запыленного потока 11 м/с и концентрации пыли в нем 8 мг/м³. Максимальная продолжительность работы составляет около 465 сут при начальной скорости запыленного потока 3 м/с и концентрации пыли 5 мг/м³.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, прогнозирование продолжительности работы сепаратора позволяет определить необходимый срок службы устройств, чтобы момент времени его очистки совпадал со временем обслу-

живания других аппаратов технологической линии очистки газовых потоков. Достоинствами сепаратора являются простота сборки и разборки, что позволяет в минимальные временные сроки произвести очистку устройства, высокая эффективность и легкость в использовании.

Библиографический список

1. Темникова Е.Ю., Богомолов А.Р., Тиунова Н.В., Лапин А.А. Перспективы использования золы уноса тепловых электростанций Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 1. С. 90–96.
2. Севостьянов В.С., Уральский В.И., Севостьянов М.В. Ресурсо-энергосберегающее оборудование и комплексы для переработки природных и техногенных материалов. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. 315 с.
3. Удилов Т.В., Кузнецов К.Л. Постановка задач исследования возможности создания порошковых огнетушащих композиций на основе зол уноса факельного сжигания углей // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 42-5. С. 65–67. <https://doi.org/10.18411/lj-09-2018-102>
4. Пат. № 2645980, Российская Федерация, В01D 47/06. Центробежный пылеуловитель / Ю.С. Кочетов; заявитель и патентообладатель Ю.С. Кочетов. Заявл. 29.06.2017; опубл. 28.02.2018. Бюл. № 7.
5. Подпороинов Б.Ф., Семенов А.С. Пути повышения эффективности пылеулавливающих аппаратов в системах очистки вентиляционных выбросов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 104–107. <https://doi.org/10.12737/22434>
6. Росляков П.В. Современные воздухоохранные технологии на тепловых электростанциях (Обзор) // Теплоэнергетика. 2016. № 7. С. 46–62. <https://doi.org/10.1134/S0040363616070079>
7. Сергина Н.М., Абулджалил М.С.А., Абрамова Л.М. Пылеуловители со встречными закрученными потоками в системах очистки пылевых выбросов в производстве строительных материалов // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3. [Электронный ресурс]. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/136N3y15__sergina.pdf_f1a0f0f9c5.pdf (27.01.2020).
8. Муратова К.М., Чистяков Я.В., Махнин А.А. Пылеулавливание и классификация в центробежно-инерционных аппаратах // Известия Тульского государственного университета // Науки о Земле. 2014. Вып. 4. С. 47–57.
9. Yan Jinpei, Chen Liqi, Lin Qi. Removal of fine particles in WFGD system using the simultaneous acoustic agglomeration and supersaturated vapor condensation // Powder Technology. 2017. Vol. 315. P. 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.03.056>
10. Rosa B., Parishani H., Ayala O., Wang Lian-Ping. Settling velocity of small inertial particles in homogeneous isotropic turbulence from high-resolution DNS // International Journal of Multiphase Flow. 2016. Vol. 83. P. 217–231. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.04.005>
11. Saarnio K., Frey A., Niemi J.V., Timonen H., Rönkkö T., Karjalainen P., et al. Chemical composition and size of particles in emissions of a coal-fired power plant with flue gas desulfurization // Journal of Aerosol Science. 2014. Vol. 73. P. 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.03.004>
12. Jingjing Bao, Linjun Yang, Jinpei Yan, Guilong Xiong, Bin Lu, Chengyun Xin. Experimental study of fine particles removal in the desulfurated scrubbed flue gas // Fuel. 2013. Vol. 108. P. 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.037>
13. Richardson Y., Blin J., Julbe A. A short overview on purification and conditioning of syngas produced by biomass gasification: Catalytic strategies, process intensification and new concepts // Progress in Energy and Combustion Science. 2012. Vol. 38. Issue 6. P. 765–781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.12.001>
14. Anh Ho Chi, Sommerfeld M. Modelling of micro-particle agglomeration in turbulent flows // Chemical Engineering Science. 2002. Vol. 57. Issue 15. P. 3073–3084. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00172-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00172-0)
15. Jiang Wen-ming, Chen Yi-mei, Chen Ming-can, Liu Xiao-li, Liu Yang, Wang Tianyu, et al. Removal of emulsified oil from polymer-flooding sewage by an integrated apparatus including EC and separation process // Separation and Purification Technology. 2019. Vol. 211. P. 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.069>
16. Wang Shuo, Qin Wei, Dai Youyuan. Separation of Oil Phase from Dilute Oil/Water Emulsion in Confined Space Apparatus // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2012. Vol. 20. Issue 2. P. 239–245. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(12\)60384-X](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(12)60384-X)
17. Kou Jie, Chen Yi, Wu Junqiang. Numerical study and optimization of liquid-liquid flow in cyclone pipe // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2020. Vol. 147. P. 107725. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107725>
18. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Галиев А.А. Влияние конструктивного оформления элементов прямоугольного сепаратора на эффективность очистки газа от твердых частиц // Вестник технологического университета. 2018. Т. 21. № 9. С. 58–61.
19. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С.,



Нгуен Ву Линь. Эффективность прямоугольного сепаратора в зависимости от оформления элементов внутри аппарата // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. Т. 10. № 1. С. 74–81.

20. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Соловьева О.В., Латыпов Д.Н. Влияние загрязнения пылеочистительного сепаратора мелкодисперсной пылью на

энергетические затраты в ходе его эксплуатации // Вестник технологического университета. 2019. Т. 22. № 8. С. 33–37.

21. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Поляков А.И. Эффективность входной ступени прямоугольных сепараторов // Вестник технологического университета. 2018. Т. 21. № 11. С. 66–69.

References

1. Temnikova EY, Bogomolov AR, Tiunova NV, Lapin AA. Prospects of Using Fly Ash Produced at Thermal Power Plants of Kuzbas. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2017;1:90–96. (In Russ.)
2. Sevost'yanov VS, Ural'skij VI, Sevost'yanov MV. *Resource and Energy-Saving Equipment and Complexes for Natural and Technogenic Material Recycling*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2017, 315 p. (In Russ.)
3. Udilov TV, Kuznecov KL. Setting Research Objectives on Creation Possibility of Powder Fire Extinguishing Compositions based on Fly Ash of Coal Flaring. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2018;42-5:65–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.18411/lj-09-2018-102>
4. Kochetov YS. *Centrifugal dust collector*. Patent RF, no. 2645980; 2018. (In Russ.)
5. Podporinov BF, Seminenko AS. Ways of Increase of Efficiency of Dust Removal Devices in Cleaning Systems for Exhaust Air. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova* = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016;11:104–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/22434>
6. Roslyakov PV. Modern Air Protection Technologies at Thermal Power Plants (Review). *Teploenergetika*. 2016;7:46–62. <https://doi.org/10.1134/S0040363616070079>
7. Sergina NM, Abuldzhalil MSA, Abramova LM. Dust Collectors with Counter Swirl Flows in Dust Emission Cleaning Systems in the Production of Building Materials. *Inzhenernyj vestnik Dona* = Engineering Journal of Don. 2015;3. Available from: ivdon.ru/uploads/article/pdf/136N3y15_sergina.pdf_f1a0f0f9c5.pdf [Accessed 27th January 2020]. (In Russ.)
8. Muratova KM, Chistyakov YV, Makhnin AA. Centrifugal-Inertial Dust Extractors for Dry Air Cleaning. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2014;(4):47–57. (In Russ.)
9. Yan Jinpei, Chen Liqi, Lin Qi. Removal of Fine Particles in WFGD System using The Simultaneous Acoustic Agglomeration and Supersaturated Vapor Condensation. *Powder Technology*. 2017;315:106–113. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.03.056>
10. Rosa B, Parishani H, Ayala O, Wang Lian-Ping. Settling Velocity of Small Inertial Particles in Homogeneous Isotropic Turbulence from High-Resolution DNS. *International Journal of Multiphase Flow*. 2016;83:217–231. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.04.005>
11. Saarnio K, Frey A, Niemi JV, Timonen H, Rönkkö T, Karjalainen P, et al. Chemical Composition and Size of Particles in Emissions of a Coal-Fired Power Plant with Flue Gas Desulfurization. *Journal of Aerosol Science*. 2014;73:14–26. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.03.004>
12. Jingjing Bao, Linjun Yang, Jinpei Yan, Guilong Xiong, Bin Lu, Chengyun Xin. Experimental Study of Fine Particles Removal in the Desulfurated Scrubbed Flue Gas. *Fuel*. 2013;108:73–79. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.037>
13. Richardson Y, Blin J, Julbe A. A Short Overview on Purification and Conditioning of Syngas Produced by Biomass Gasification: Catalytic Strategies, Process Intensification and New Concepts. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2012;38(6):765–781. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2011.12.001>
14. Anh Ho Chi, Sommerfeld M. Modelling of Micro-Particle Agglomeration in Turbulent Flows. *Chemical Engineering Science*. 2002;57(15):3073–3084. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00172-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00172-0)
15. Jiang Wen-ming, Chen Yi-mei, Chen Ming-can, Liu Xiao-li, Liu Yang, Wang Tianyu, et al. Removal of Emulsified Oil from Polymer-Flooding Sewage by an Integrated Apparatus Including EC and Separation Process. *Separation and Purification Technology*. 2019;211:259–268. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.069>
16. Wang Shuo, Qin Wei, Dai Youyuan. Separation of Oil Phase from Dilute Oil/Water Emulsion in Confined Space Apparatus. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2012;20(2):239–245. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(12\)60384-X](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(12)60384-X)
17. Kou Jie, Chen Yi, Wu Junqiang. Numerical Study and Optimization of Liquid-Liquid Flow in Cyclone Pipe. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2020;147:107725. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107725>
18. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, Galiev AA. Influence of Structurally Designing the Elements of a Rectangular Separator upon the Efficiency of Gas Cleaning from Solid Particles. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018;21(9):58–61. (In Russ.)
19. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, Nguen Vu Lin'. Efficiency of a Rectangular Separator depending on the Design of Elements inside the Apparatus. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo*

universiteta. 2018;10(1):74–81. (In Russ.)
20. Zinurov VE, Dmitriev AV, Solov'eva OV, Latypov DN. Impact of Polluting a Dust Separator with Fine Dust upon the Energy Consumption during its Operation. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*.

Критерии авторства

Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Петрова Т.С., Дмитриева О.С. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Зинуров Вадим Эдуардович,
аспирант,
Казанский государственный энергетический университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
e-mail: vadd_93@mail.ru

Дмитриев Андрей Владимирович,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники»,
Казанский государственный энергетический университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
✉ e-mail: ieremiada@gmail.com

Петрова Татьяна Сергеевна,
студент,
Казанский государственный энергетический университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
e-mail: tony-sh@mail.ru

Дмитриева Оксана Сергеевна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Химическая технология переработки нефти и газа»,
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, Россия;
e-mail: ja_deva@mail.ru

2019;22(8):33–37. (In Russ.)
21. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, Polyakov AI. Performance of the Inlet Stage of Rectangular Separators. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018;21(11):66–69. (In Russ.)

Authorship criteria

Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Petrova T.S., Dmitrieva O.S. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim E. Zinurov,
Postgraduate Student,
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: vadd_93@mail.com

Andrey V. Dmitriev,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering,
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
✉ e-mail: ieremiada@gmail.com

Tatiana S. Petrova,
Student,
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: tony-sh@mail.ru

Oksana S. Dmitrieva,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing, Kazan National Research Technological University,
68 Karl Marx St., Kazan 420015, Russia;
e-mail: ja_deva@mail.ru