



ОЧИСТКА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ОТ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

А.В. Дмитриев*, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Ву Л. Нгуен

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

Резюме: Высокоэффективная очистка газового потока от твердых частиц малого диаметра при малых потерях давления в аппарате является одним из основных показателей при выборе очистительного устройства. В статье предлагается разработанный авторами прямоугольный сепаратор для эффективной очистки газовых выбросов котельных установок от твердых частиц. Произведен сравнительный анализ сепаратора с циклоном ЦН-11-400. Определены оптимальные размеры элементов внутри прямоугольного сепаратора. Построена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от безразмерного геометрического коэффициента, на ней определен глобальный минимум и соотношение размеров дуэлавровых сепарационных элементов, при которых достигаются минимальные энергетические затраты. Для различных значений длины дуэлавровых элементов получены результаты по эффективности работы предлагаемого сепарационного устройства. В частности, показано, что с уменьшением длины дуэлавровых элементов увеличивается эффективность сепарации частиц небольшого диаметра. В результате численного эксперимента определено, что при длине дуэлавровых элементов равной 13 мм достигается наибольшая эффективность. При объемном расходе $Q = 0,444 \text{ м}^3/\text{с}$ эффективность сепаратора в среднем на 52% выше эффективности циклона ЦН-11-400 при сепарации газа от частиц диаметром до 8 мкм.

Ключевые слова: циклон, осаждение частиц, улавливание твердых частиц, газификация твердого топлива, продукты сгорания, сепаратор.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК–616.2020.8.

Для цитирования: Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Ву Л. Нгуен. Очистка газовых выбросов котельных установок от твердых частиц // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 3-9. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-3-9.

CLEANING OF GAS EMISSIONS OF BOILER INSTALLATIONS OF SOLIDS

AV Dmitriev*, VE Zinurov, OS Dmitrieva, VuL Nguyen

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

Abstract: High performance cleaning of a gas stream of solids of small diameter at small pressure losses in the device is one of key indicators at the choice of the abstersive device. In article, the rectangular separator developed by authors for efficient cleaning of gas emissions of boiler installations of solids is offered. The comparative analysis of a separator with the cyclone CN-11-400 is made. The dependence of hydraulic resistance coefficient from dimensionless geometric factor, it determined the global minimum and the ratio of beam separation elements, which are achieved with minimal energy costs. Results on the efficiency of the proposed separation device are obtained for different values of the length of I-beam elements. In

particular, it is shown that with a decrease in the length of I-beam elements, the efficiency of separation of small-diameter particles increases. As a result of the numerical experiment, it was determined that when the length of I-beam elements is equal to 13 mm, the highest efficiency is achieved. At a volume flow rate of $Q = 0.444 \text{ m}^3/\text{s}$, the efficiency of the separator is on average 52% higher than that of the cyclone CN-11-400 when separating gas from particles up to 8 microns in diameter.

Keywords: cyclone, deposition of particles, catching of solids, gasification of solid fuel, products of combustion, separator.

Acknowledgments: The reported study was funded by grant of the President of the Russian Federation, project number MK–616.2020.8.

For citation: Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, Nguyen VuL. Cleaning of gas emissions of boiler installations of solids. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):3-9. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-3-9.

Введение. Литературный обзор

Мероприятия, осуществляемые для сепарации газовых потоков от мелкодисперсных твердых частиц до 10-20 мкм, становятся более значимыми в настоящее время. Ужесточение экологических требований к предельно допустимым выбросам вредных веществ в атмосферный воздух и увеличение производственных мощностей предприятий, как следствие, использование оборудования на предельных мощностях или подключение дополнительных агрегатов требуют от предприятий более тщательной очистки газовых выбросов [1]. Данная проблема особо актуальна для котельных установок, которые являются основными стационарными источниками вредных веществ на тепловых электростанциях. В ходе горения органического топлива образуются различные вредные вещества, негативно влияющие на организм человека и окружающую среду: оксиды углерода, серы, азота и др. Поэтому проблема очистки эмиссионного газового потока от вредных веществ при сжигании различных видов топлив чрезвычайно актуальна [2, 3].

В настоящее время для высокоэффективной очистки газов от содержащихся в нем твердых частиц используются различные модификации инерционных пылеуловителей, фильтров, электрофильтров, мокрых пылеуловителей и пр. [4-6]. При использовании фильтров, электрофильтров, мокрых пылеуловителей большое значение имеют параметры газа: температура, влажность, напряженность электрического поля, движение частиц в электрическом поле, абразивность твердых частиц и др. Такая тщательная подготовка запыленного газа к очистке требует больших экономических вложений, больших площадей и увеличение персонала для настройки и ремонта дополнительного оборудования. Как правило, в реальных условиях осуществить это практически невозможно. Поэтому при выборе очистительного устройства особое внимание уделяется следующим критериям: степень очистки газового потока, ремонтпригодность, малое количество механизмов в аппарате, легкость в использовании, компактность, малая металлоемкость, низкое гидравлическое сопротивление. Наиболее распространенными устройствами, используемыми практически на всех предприятиях и удовлетворяющими большинству данных критериев, являются инерционные пылеуловители. Среди них в большей степени распространены циклоны [7-9], которые характеризуются относительно высокой степенью очистки газового потока до 95-99,7%, простотой устройства и эксплуатации, надежной работой при высоких температурах до 500°C. Основными недостатками циклонов являются низкая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц до 10-20 мкм в зависимости от модификации циклона и высокое гидравлическое сопротивление, достигающее 1250-1500 Па [10-12].

Целью работы является исследование очистки газовых выбросов от мелкодисперсных твердых частиц до 10 мкм. Вследствие возрастания количества выбрасываемых вредных веществ в окружающую среду при сжигании природного топлива и малой эффективности очистки данных выбросов от частиц диаметром менее 10-20 мкм циклонами, возникает необходимость в применении дополнительных очистительных аппаратов. Для решения данной проблемы авторами статьи предлагается использовать разработанный прямоугольный сепаратор. Также данный сепаратор можно рассматривать как замену циклонам, вследствие высокоэффективного очищения газов от

мелкодисперсных твердых частиц диаметром в диапазоне 10–300 мкм на 99,8–100% [13, 14].

Методы исследования

Прямоугольный сепаратор состоит из нескольких рядов двутавровых балок, собранных в прямоугольный корпус (рис. 1). Для обеспечения высокой степени фиксации двутавровых элементов внутри аппарата к его стенкам используются поперечные пластины [15]. Они крепятся к стенкам сепаратора и двутавровым балкам. Принцип работы устройства заключается в следующем: при движении многофазного потока между элементами устройства возникает центробежная сила, отбрасывающая частицы пыли к двутавровым балкам, отделяя их от структурированного потока. Скорость осевших частиц после контакта с двутавровыми элементами становится равной 0 м/с, под собственной силой тяжести они собираются на дне аппарата. Через определенные промежутки времени в зависимости от запыленности газового потока, дно аппарата очищается от осевших частиц при помощи открытия специальных отверстий, проделанных в нижней части корпуса сепаратора.

Исследования проводились для сепаратора, состоящего из пяти рядов стальных балок длиной 192 мм, в каждом из которых находится m двутавров. Корпус аппарата имеет следующие геометрические размеры: ширина – 104 мм, высота – 192 мм, длина – 50-100 мм. Длина и толщина двутаврового элемента принималась 13 и 0,5 мм соответственно. В ходе процесса улавливания мелкодисперсных частиц диаметром до 10 мкм использовался метод конечных элементов в программном комплексе *AnsysFluent*, модель турбулентности – *SST*.

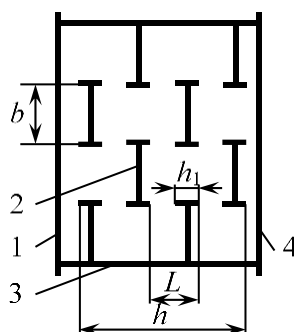


Рис. 1. Двухмерная модель прямоугольного сепаратора (вид сверху): 1 – входной патрубок, соединяющий газопровод с прямоугольным сепаратором, 2 – двутавровый элемент внутри сепаратора, 3 – корпус устройства, 4 – выходной патрубок сепаратора

Для проведения сравнительного анализа циклона и прямоугольного сепаратора по эффективности улавливания частиц и по гидравлическому сопротивлению были заданы одинаковые параметры: площадь входного патрубка, объемный расход газа на входе в аппарат, термодинамические параметры окружающей среды – давление и температура, одинаковые теплофизические свойства рабочего тела – воздуха и частиц, находящихся в нем. Среди циклонов был выбран ЦН-11-400 без улитки. Данный аппарат является одним из самых распространенных устройств, используемых на предприятиях, для очистки воздуха. Входной патрубок аппарата ЦН-11-400 имеет прямоугольную форму высотой 192 мм и шириной 104 мм, который присоединяется к газопроводу, по которому движется запыленный газ с объемным расходом Q . Вследствие этого прямоугольный сепаратор получил такие же геометрические размеры внешнего корпуса, как и у рассматриваемого циклона. При исследованиях принималось, что сепаратор присоединяется к линии подачи воздуха, заменяя циклон. Таким образом, движущийся многофазный поток газа входил в сепаратор через входной патрубок, по мере движения газа внутри сепаратора, обтекая и контактируя с двутавровыми элементами, газ очищался и выходил из устройства через выходной патрубок (рис. 1).

Ранее проведенные исследования показали, что для высокоэффективной очистки газа достаточно 5 рядов двутавровых балок. Для повышения эффективности сепарации газа двутавровые элементы расположены внутри аппарата таким образом, чтобы достигалось максимальное значение центробежной силы, действующей на частицы, при прохождении газа между двумя соседними рядами балок. Для этого необходимо выполнение следующего условия: окружность, проведенная из центра двутавра, должна проходить через крайние

точки выступов двутавровых элементов соседних рядов. Иными словами, расстояние между соседними рядами двутавровых элементов L можно определить по формуле:

$$L = \frac{b(k+1)}{2}, \quad (1)$$

где b – длина двутавра, м; k – безразмерный коэффициент, зависящий от размеров двутавра.

Безразмерный коэффициент k был введен для удобства оценки влияния размеров двутаврового элемента на потери давления в аппарате и на его эффективность:

$$k = \frac{h_1}{b}, \quad (2)$$

где h_1 – длина выступа двутаврового элемента, м.

В ходе исследований параметры окружающей среды на выходе из устройств были заданы нормальными: атмосферное давление 101325 Па, температура воздуха 273,15 К. Также постоянными оставались такие параметры, как начальная скорость частиц $w_0 = 0$ м/с; число частиц, находящихся в газе, $n = 1000$; массовый расход частиц $G = 10$ г/с. Для получения зависимостей изменялся объемный расход на входе в устройства $Q = 0,05-0,444$ м³/с, диаметр частиц, находящихся в газе, $a = 1-10$ мкм.

Эффективность E улавливания мелкодисперсных частиц на пяти рядах балок прямоугольного сепаратора определялась по формуле:

$$E = \frac{n - n_k}{n}, \quad (3)$$

где n_k – число, осевших частиц на двух рядах балок. Эффективность циклона определялась по этой же формуле, под n_k принималось количество частиц, уловленных циклоном.

Коэффициент гидравлического сопротивления в прямоугольном сепараторе рассчитывалось по формуле:

$$\xi = \frac{1}{2} \Delta p \frac{b}{h} \frac{1}{\rho w^2}, \quad (4)$$

где Δp – потери давления в сепараторе, Па; h – расстояние между первым и последним рядом двутавровых элементов, м (рис. 1); ρ – плотность газа, кг/м³; w – скорость в сужении прямоугольного сепаратора, м/с.

Изменение расположения двутавровых элементов, их количество в одном ряду, длина и ширина каждого двутавра может влиять на эффективность сепарации газового потока и на гидравлическое сопротивление аппарата. В связи с этим также были произведены исследования для определения оптимальных параметров b , k и числа двутавров в одном ряду. При этом ширина и высота входного патрубка всегда оставались постоянными.

Результаты и их обсуждение

Результаты численных исследований были представлены графически на рис. 2-4. Проведенные численные исследования показали, что использование прямоугольного сепаратора для улавливания мелкодисперсных частиц диаметром 1-10 мкм позволяет очистить многофазный газовый поток эффективнее циклона. При этом сепаратор обладает меньшим гидравлическим сопротивлением относительно циклона.

На рис. 2 проиллюстрирована зависимость эффективности сепарации газа циклоном и прямоугольным сепаратором для разного диаметра частиц. При объемном расходе $Q = 0,444$ м³/с эффективность сепаратора в среднем на 52% выше эффективности циклона ЦН-11-400 при сепарации газа от частиц диаметром до 8 мкм. Для частиц диаметром более 9 мкм эффективность сепаратора и циклона практически одинакова 99,7-100%. Уменьшение объемного расхода Q от 0,888 до 0,222 м³/с влечет существенное снижение эффективности сепарации газового потока циклоном до 15%. Поддержание высоких значений объемного расхода на входе в циклон нерентабельно, вследствие высокого гидравлического сопротивления в аппарате. Поэтому для повышения эффективности циклона и уменьшения его гидравлического сопротивления используют батарейные циклоны – аппараты, состоящие из нескольких параллельно включенных циклонов. Однако использование

батарейных циклонов влечет увеличение занимаемых производственных площадей, также повышается металлоемкость аппарата и его стоимость. Уменьшение входного объемного расхода Q с 0,444 до 0,05 м³/с в прямоугольном сепараторе уменьшает его эффективность сепарации всего на 4 %, при этом существенно снижается гидравлическое сопротивление аппарата, потери давления составляют 360 Па. При прочих аналогичных параметрах потери давления в циклоне составляют 540 Па.

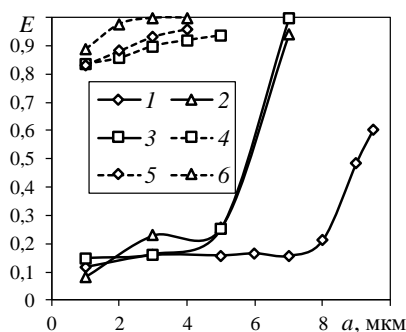


Рис. 2. Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц от их диаметра при Q , м³/с: 1 – 0,222, 2 – 0,444, 3 – 0,888, 4 – 0,05, 5 – 0,111, 6 – 0,444; штрих пунктирные линии – прямоугольный сепаратор, сплошные линии –циклон

Прямоугольный сепаратор можно использовать по принципу батарейного циклона. Для этого несколько сепараторов собираются в одном корпусе, где включаются параллельно друг другу. Такая компоновка позволит достичь высокой эффективности улавливания твердых частиц при низком гидравлическом сопротивлении. При этом габариты данного устройства будут в несколько раз меньше габаритов батарейного циклона.

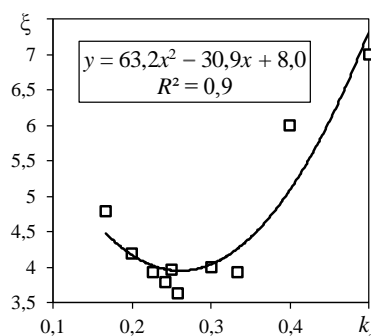


Рис. 3. Коэффициент гидравлического сопротивления прямоугольного сепаратора при разных значениях безразмерного коэффициента

Серия численных исследований позволила установить, что размеры выступов двутавровых элементов существенно влияют на гидравлические потери в прямоугольном сепараторе и на его эффективность. При $k = 0,24$ достигается наименьшее значение коэффициента гидравлического сопротивления сепаратора $\xi = 3,8$ (рис. 3). По формуле (2) можно определить, что оптимальными размерами двутаврового элемента являются: $h_1 = 3,12$ мм при $b = 13$ мм.

Установив, оптимальное значение безразмерного коэффициента $k = 0,24$ (рис. 3), было произведено исследование для нахождения оптимальной длины двутаврового элемента при данном значении k (рис. 4). Таким образом, при необходимости сепарации газового потока от мелкодисперсных частиц любого диаметра максимальная эффективность прямоугольного сепаратора достигается при значении длины двутаврового элемента $b = 13$ мм. Стоит отметить, что в ходе данного исследования (рис. 4), для изменения длины двутаврового элемента изменялось количество двутавров в одном ряду, чтобы сохранить неизменность геометрических размеров внешнего корпуса прямоугольного сепаратора. Это позволило сопоставить прямоугольный сепаратор с циклоном ЦН-11-400. Установлено, что использование прямоугольного сепаратора позволяет улавливать до 100% частиц малого диаметра в диапазоне 1-10 мкм.

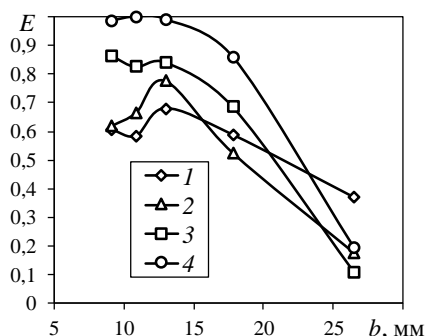


Рис. 4. Эффективность прямоугольного сепаратора от длины балки двутаврового элемента при a , мкм:
1 – 1, 2 – 3, 3 – 5, 4 – 7

Заключение

Вследствие высокой эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц диаметром до 10 мкм прямоугольным сепаратором и его низкого гидравлического сопротивления, его можно использовать как альтернативу циклону, либо в качестве дополнительного устройства для первичной очистки газов. Максимальные значения эффективности сепаратора и минимальные значения его гидравлического сопротивления достигаются при длине двутаврового элемента $b = 13$ мм и при длине его выступов $h_1 = 3,12$ мм. Достоинства прямоугольного сепаратора: малая металлоемкость, высокая степень улавливания мелкодисперсных частиц, простота изготовления.

Литература

1. Yu B., Shen C. Environmental regulation and industrial capacity utilization: An empirical study of China // Journal of Cleaner Production. 2020. V.246. pp. 118986.
2. Fan S., Wang X., Lang X., et al. Energy efficiency simulation of the process of gas hydrate exploitation from flue gas in an electric power plant // Natural Gas Industry B. 2017. N6. pp. 470-476.
3. Страус В. Промышленная очистка газов. М.: Химия, 1981. 616 с.
4. Sagot B., Forthomme A., Ait Ali Yahia L., et al. Experimental study of cyclone performance for blow-by gas cleaning applications // Journal of Aerosol Science. 2017. V.110. pp. 53-69.
5. Ren H., Koshy P., Chen W.-F., et al. Photocatalytic materials and technologies for air purification // Journal of Hazardous Materials. 2017. V.325. pp. 340-366.
6. GacJ M., Jackiewicz A., Werner L., et al. Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters // Separation and Purification Technology. 2016. V. 170. pp. 234-240.
7. Иванков Д.И., Гритчин Р.Д., Тюрин А.Н. Анализ работы циклонов для пылеулавливания // Молодой ученый. 2016. №13(117). С. 165-168.
8. Фадин Ю.М., Богданов В.С., Юрьева М.В., и др. Возвратно-поточные циклоны истоки возникновения и направления совершенствования // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2017. №5. С. 104-109.
9. Веригин А.Н., Федоров В.Н., Малютин М.С. Конструкция современных циклонов для пылеулавливания. СПб:Издат. С.-Петербургского университета, 2000. 336с.
10. Асламова В.С., Асламов А.А., Ляпустин П.К., Гендин Д.В. Промышленные испытания группового прямооточного циклона с промежуточным отбором пыли // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2007. № 2-1 (30). С. 6-8.
11. Baltrenas P., Pranskevicius M., Venslovas A. Optimization of the New Generation Multichannel Cyclone Cleaning Efficiency // Energy Procedia. 2015. V.72. pp. 188-195.
12. Беляева Г.И., Замалиева А.Т. Исследование возвратно-поточного элемента мультициклона для очистки газа на газораспределительных станциях // Газовая промышленность. 2017. № 6 (753). С. 118-122.
13. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., и др. Улавливание частиц из дымовых газов прямоугольными сепараторами // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 15. С. 78-80.
14. Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., и др. Устройство для тонкой пылегазоочистки. Патент РФ на полезную модель № 171615. 07.06.2017. Бюл. № 16. Доступно по: https://www1.fips.ru/ofpstorage/BULLETIN/IZPM/2017/06/10/INDEX_RU.HTM
15. Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Данг С.В., и др. Сепаратор для улавливания мелкодисперсных капель из газовых потоков промышленных предприятий // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. Т.55. № 4. С. 37-39.

Авторы публикации

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р. техн. наук, заведующий кафедрой Теоретические основы теплотехники, Казанский государственный энергетический университет.

Зинуров Вадим Эдуардович – магистрант, Казанский государственный энергетический университет.

Дмитриева Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры Теоретические основы теплотехники, Казанский государственный энергетический университет.

Нгуен Ву Линь – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Yu B, Shen C. Environmental regulation and industrial capacity utilization: An empirical study of China. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 246:118986. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118986.
2. FanS, WangX, LangX, et al. Energy efficiency simulation of the process of gas hydrate exploitation from flue gas in an electric power plant. *Natural Gas Industry B*. 2017;(6):470-6. doi: 10.1016/j.ngib.2017.09.009.
3. Strauss W. *Industrial gas cleaning*. Oxford, USA; New York, USA: University of Melbourne, Pergamon Press, 1976(Russ. ed.: Straus V. Promyshlennaya ochestka gazov. Moscow: Himiya Publ.,1981; 616 p.
4. Sagot B, Forthomme A, Ait Ali Yahia L, et al. Experimental study of cyclone performance for blow-by gas cleaning applications. *Journal of Aerosol Science*. 2017; 110:53-69. doi: 10.1016/j.jaerosci.2017.05.009.
5. Ren H, Koshy P, Chen W-F, et al. Photocatalytic materials and technologies for air purification. *Journal of Hazardous Materials*. 2017; 325:340-66. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.08.072.
6. Gac JM, Jackiewicz A, Werner L, et al. Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters. *Separation and Purification Technology*. 2016; 170:234-40. doi: 10.1016/j.seppur.2016.06.057
7. Ivankov DI, Gritchin RD, Tyurin AN. Analiz raboty ciklonov dlya pyleulavlivaniya. *Molodojuchenyj*. 2016;117(13):165-8.
8. Fadin YM, Bogdanov VS, Yur'eva MV, et al. Vozvratno-potochnyeciklony. Istok i voznikoveniya i napravleniya sovershenstvovaniya. *Vestnik BGTU imeni V.G. Shuhova*. 2017;(5):104-9. doi: 10.12737/article_590878fb4a9c99.71247127.
9. Verigin AN, Fedorov VN, Malyutin MS. *Konstrukciya sovremennyh ciklonov dlya pyleulavlivaniya*. Sankt-Peterburg: Izdat. S.-Peterburgskogouniversiteta; 2000.
10. Aslamova VS, Aslamov AA, Lyapustin PK, et al. Promyshlennye ispytaniya gruppovogo pryamotochnogo ciklona s promezhutochnym otborom pyli. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2007;30(2-1):6-8.
11. Baltrenas P, Pranskevicius M, Venslovas A. Optimization of the new generation multichannel cyclone cleaning efficiency. *Energy Procedia*. 2015; 72:188-95. doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.027.
12. Belyaeva GI, Zamalieva AT. Issledovanie vozvratno-potochnogo elementa mul'ti tsiklona dlya ochestki gaza na gazoraspredivitel'nykh stantsiyakh. *Gazovaya promyshlennost'*. 2017;753(6):118-22.
13. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, et al. Ulavlivanie chastic iz dymovyh gazov pryamougol'nymi separatorami. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2017;20(15):78-80.
14. Dmitriev AV, Dmitrieva OS, Madyshev IN, et al. *Ustrojstvo dlya tonkoj pylegazoochestki*. Patent RUS N 171615. 07.06.2017. Byul. N16. Available at: https://www1.fips.ru/ofpstorage/BULLETIN/IZPM/2017/06/10/INDEX_RU.HTM.
15. Dmitriev AV, Dmitrieva OS, Dang SV, et al. Separator for separation of finely dispersed droplets from gas flows generated by industrial enterprises. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019;55(4):37-39. doi: 10.1007/s10556-019-00623-8.

Authors of the publication

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: iremiada@gmail.com.

Vadim E. Zinurov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Oksana S. Dmitrieva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vu Linh Nguyen – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

10 апреля 2018 г.