

Э. И. Салахова, А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА В СЕПАРАЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Ключевые слова: сепарационное устройство, газодинамика, структура потока, входная скорость

Работа посвящена актуальной проблеме очистки газового потока от мелкодисперсных частиц на различных промышленных предприятиях. Основными недостатками известных пылеуловителей являются: невысокая эффективность улавливания тонкодисперсных частиц, высокое гидравлическое сопротивление, эрозия при эксплуатации. Авторами работы предложена конструкция сепарационного устройства с дугообразными элементами для улавливания мелкодисперсных частиц из газовых выбросов промышленных предприятий. Достоинством данного сепарационного устройства является высокая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц, вследствие возникновения центробежных сил высоких значений, относительно низкое гидравлическое сопротивление и отсутствие движущихся механизмов. С помощью программного обеспечения Ansys Fluent, получена структура потока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами при входной скорости от 3 м/с до 7 м/с. Исследования показали, что определяющим фактором работы сепарационного устройства с дугообразными элементами является волнообразная структура потока, которая зависит от входной скорости газа. Установлено, что при входной скорости газового потока равной 3 м/с создается неупорядоченная структура потока. При скорости равной 7 м/с структура потока приобретает упорядоченный вид. Дугообразные элементы способствуют созданию структуры потока, при которой повышается эффективность инерционного осаждения. С одной стороны, происходит резкое изменение структуры потока, что приводит к выбиванию частиц из нее. С другой стороны, высокие значения центробежных сил позволяют выбивать из газа мелкодисперсные частицы. Потери давления в сепарационном устройстве с дугообразными элементами составляет от 72 до 335 Па при входной скорости газового потока от 3 до 7 м/с.

E. I. Salakhova, A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov

THE GAS FLOW STRUCTURE INVESTIGATION IN SEPARATION DEVICE WITH ARCUATE PARTS

Keywords: separation device, gas dynamics, flow structure, inlet velocity.

The research is devoted to the problem of gas flow purification from micro-fine particles at various industrial enterprises. The main disadvantages of existing dust collectors are: low efficiency of catching micro-fine particles, high hydraulic resistance, erosion during operation. The authors designed a separation device with arcuate parts for trapping micro-fine particles from gas emissions from industrial enterprises. The advantage of this separation device is high efficiency of capturing micro-fine particles, due to the high centrifugal forces, relatively low hydraulic resistance and the absence of moving mechanisms. In Ansys Fluent software the flow structure in a separation device with arcuate parts was obtained at an inlet velocity from 3 m/s to 7 m/s. Studies have shown that the determining factor in the operation of a separation device with arcuate parts is the wavy flow structure which depends on the inlet gas velocity. Studies proved that at an inlet gas flow velocity of 3 m/s a disordered flow structure is created. At a speed equal to 7 m/s the structure acquires an ordered form. The arcuate parts facilitate the creation of a flow structure that improves the efficiency of gravity sedimentation. On the one side, there is a flow structure jump which results in particle knocking-out. On the other side, high values of centrifugal forces allow micro-fine particles to be knocked out of the gas. The pressure loss in the separation device with arcuate parts is from 72 to 335 Pa at the inlet gas flow velocity from 3 to 7 m/s.

Введение

В настоящее время наиболее остро стоит проблема загрязнения воздушного бассейна газовыми выбросами промышленных предприятий. Решение проблемы защиты атмосферы базируется на внедрении малоотходных или замкнутых технологий, однако в данное время эти направления еще не получили достаточного развития, и, поэтому, задача разработки эффективного оборудования для очистки газовых выбросов промышленных предприятий является актуальной [1-3].

В химической промышленности и смежных с ней отраслях производства для разделения газовых потоков от твердых частиц используются газоочистные аппараты с закрученным движением двухфазной среды, эффективность которых полностью определяется гидродинамическим совершенствованием процесса сепарации [4-7]. Из современных газоочистных аппаратов наиболее

распространены циклоны, скрубберы, вихревые аппараты, которые различаются способом организации закрученных течений или конструкцией узла разделения фаз [8-11]. Основными недостатками известных устройств являются: невысокая эффективность улавливания тонкодисперсных частиц, вторичный унос дисперсной фазы, высокое гидравлическое сопротивление, склонность к залипанию пыли, а самое главное, они подвержены эрозии при эксплуатации. Поэтому создание новых оригинальных технических решений для перехода к современным сепараторам нового поколения, в которых низкие энергетические затраты на газоочистку, эксплуатационная надежность и простота конструктивного оформления, сочетаются с высокой эффективностью процесса сепарации дисперсных частиц.

Из отечественной, зарубежной научно-технической и патентной литературы [12-15] известно немало аппаратов, в которых использованы

различные методы интенсификации эффективности пылеулавливания. При этом интенсификация основана на совершенствовании конфигурации конструктивных частей пылеулавливающих аппаратов, в частности, для циклонов усовершенствуются: корпус, входные и выходные патрубки, верхние крышки циклоны и т.д. [16-19].

Авторами работы была предложена конструкция сепарационного устройства с дугообразными элементами для улавливания мелкодисперсных частиц из газовых выбросов промышленных предприятий. Конструкция разработана на основе сепаратора с двутавровыми элементами [4-7]

Целью представленной работы является изучение особенностей формирования потоков в сепарационном устройстве с дугообразными элементами, которое предложено авторами в качестве нового пылеулавливающего устройства.

Описание устройства

Сепарационное устройство с дугообразными элементами состоит из корпуса, входного и выходных патрубков, бункера, дугообразных элементов, которые расположены в шахматном порядке (рис. 1). Они относительно просты по устройству, удобны в монтаже и эксплуатации, надежны, универсальны и экономичны. В отличие от циклонов, высокая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц при низких скоростях, низкое гидравлическое сопротивление, высокая износостойкость. Это достигается из-за небольшого радиуса вихрей, которые создают большую центробежную силу при невысокой скорости движения запыленного газа.

Принцип работы сепарационного устройства, с дугообразными элементами следующий: запыленный газовый поток поступает в аппарат через входной патрубок (2), после чего движется прямолинейно до дугообразных элементов (3). При движении газа между дугообразными элементами поток приобретает волнообразную структуру. При этом радиус поворота газообразной среды между соседними рядами дугообразных элементов относительно небольшой, вследствие чего возникают центробежные силы больших значений относительно, например, циклонного сепаратора. Под действием центробежных сил частицы выбиваются из структуры потока и попадают на поверхности стенок элементов. Далее твердые частицы постепенно оседают по высоте устройства и попадают в бункер (4). После движения газа через несколько рядов дугообразных элементов он покидает устройство через выходной патрубок (5). Осажденные частицы в бункере высыпаются через выход для осажденных пылеобразных частиц (6). Необходимо отметить, что некоторая часть частиц при оседании в бункер подхватывается несущим потоком. Данная проблема решается увеличением количества дугообразных элементов в сепарационном устройстве.

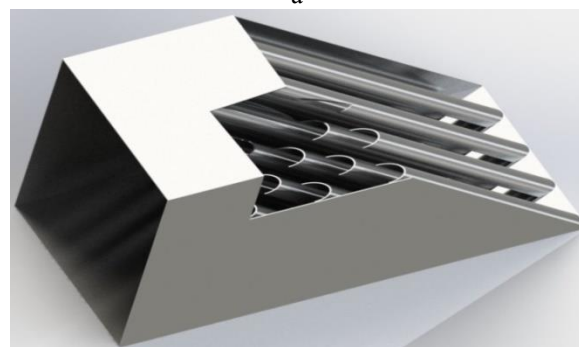
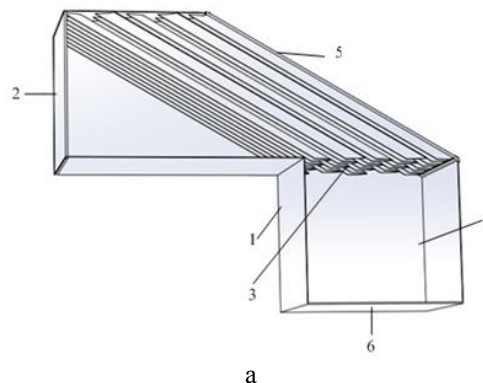


Рис. 1 – Сепарационное устройство с дугообразными элементами, где а) каркасный вид справа, б) трехмерная модель (вид с разрезом): 1 – корпус, 2 – входной патрубок для загрязненного газа, 3 – дугообразные пылеулавливающие элементы, 4 – бункер, 5 – выход для очищенного газа, 6 – выход для осажденных частиц пыли
Fig. 1 - Separation device with arcuate elements, where a) a frame view on the right, b) a three-dimensional model (sectional view): 1 - housing, 2 - inlet pipe for contaminated gas, 3 - arcuate dust collecting elements, 4 - bunker, 5 - outlet for purified gas, 6 - outlet for settled dust particles

Исследования проведены с помощью программного инструмента Ansys Fluent. В качестве модели турбулентности была выбрана $k-w$ SST, так как в предыдущих исследованиях данная модель показала адекватные результаты [20, 21]. Важной особенностью модели $k-w$ SST является объединение двух других стандартных моделей: $k-w$ и $k-\epsilon$. В ходе численного моделирования в Ansys Fluent применяется метод конечных элементов, представляющий собой сеточный метод. В зависимости от выбранной модели турбулентности задаются дифференциальные уравнения в частных производных (уравнение Навье-Стокса).

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (1)$$

где ∇ - оператор набла; Δ - векторный оператор Лапласа; t - время, с; ν - коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ - плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; p - давление, Па; \vec{v} - векторное поле скорости; \vec{f} - векторное поле массовых сил.

Уравнение Навье-Стокса дополняется уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Сеточная модель представлена на рисунке 2. Общее количество элементов в сеточной модели составило 987329 шт.

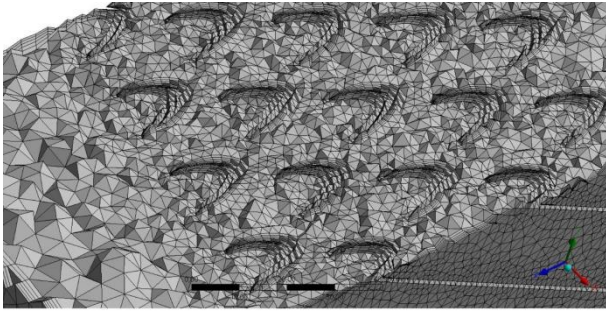


Рис. 2 – Сеточная модель сепарационного устройства с дугообразными элементами
Fig. 2 - Grid model of a separation device with arcuate elements

Граничные условия: на входе – давление, которое варьировалось в диапазоне от 58889,9 до 59839,9Па, на выходе условие принято максимально приближенное к промышленному (дегидрирование изобутана) – давление 58839,9Па (0,6кгс/см²).

Результаты исследований и их обсуждения

С помощью программного обеспечения Ansys Fluent при заданных граничных условиях получены входные скорости варьирующие от 2,43 до 11,65м/с и результаты движения потока в виде линий тока. На рисунках 3, 4 представлены линии тока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами при входной скорости 2,43м/с и 11,65м/с соответственно. Результаты расчета показали, что число Re при входной скорости 2,43м/с – 1133,72, при 11,65м/с – 5437,09, что соответствует ламинарному и переходному режиму течения запыленного газового потока. Как видно из рисунков 3, 4 при варьировании входной скоростью определяется характер течения. Видно, что структура потока имеет волнообразный характер, что коррелирует с конструктивными особенностями устройства, а именно с дугообразной поверхностью сепарационных элементов.

Рисунки 3а,б и 4а,б отчетливо демонстрируют ранее приведенное утверждение, что при движении потока через ряды дугообразных элементов возникает волнообразная структура. При этом упорядоченность волнообразной структуры газового потока зависит от входных параметров газового потока. При малых входных скоростях (2,43м/с) поток движется более хаотично и волнообразно – движение неустойчивое (рис. 3в), чем при входной скорости 11,65м/с. На первых двух рядах, в области дугообразных элементов, скорость газа около нулевая. Можно предположить, что те частицы, которые попадают в данные области будут улавливаться с эффективностью близкой к 100%, так как вероятность подхватывания частиц несущим потоком низка. Из-за образования встречных потоков между вторым, третьим, четвертым, пятыми рядами

дугообразных элементов наблюдается образование дополнительных вихрей (рис. 3в) – при 2,43м/с, а при 11,65м/с образование дополнительных вихрей наблюдается только между третьим, четвертым, пятыми рядами (рис. 4в).

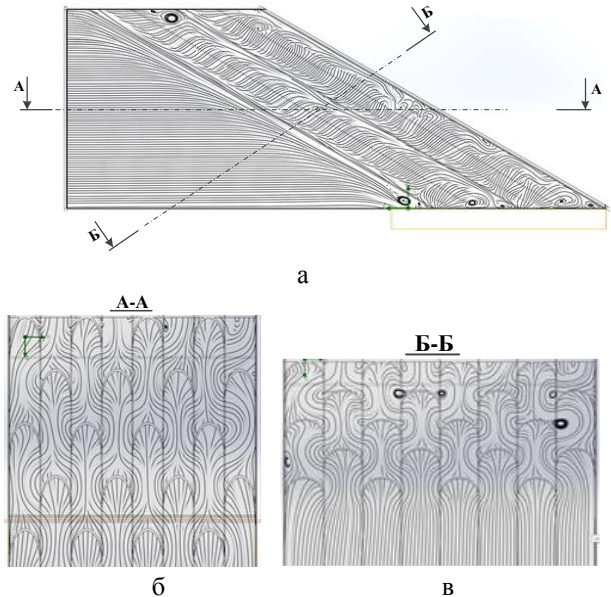


Рис. 3 – Линии тока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами при входной давлении равной 58889,9Па: а) вид справа; б) вид сверху разрез А-А; в) вид сверху разрез Б-Б
Fig. 3 - Stream lines in a separation device with arcuate elements at an inlet pressure of 58889.9 Pa: a) right side view; b) top view section A-A; c) top view section B-B

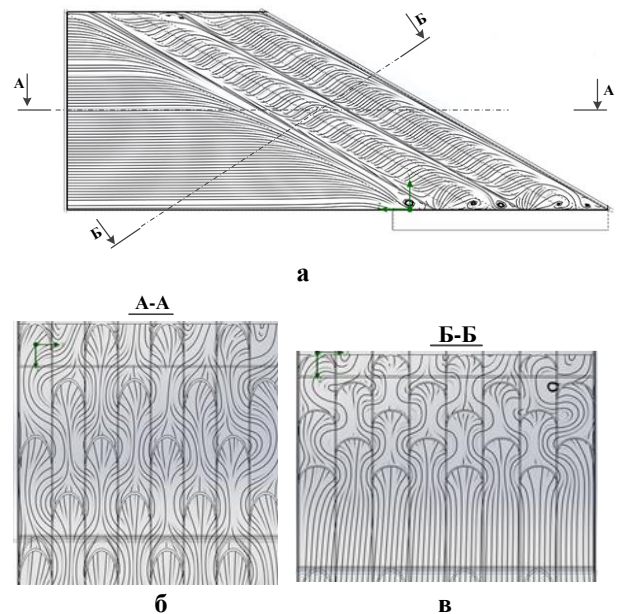


Рис. 4 – Линии тока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами при входной давлении равной 59839,9Па: а) вид справа; б) вид сверху разрез А-А; в) вид сверху разрез Б-Б
Fig. 4 - Stream lines in a separation device with arcuate elements at an inlet pressure of 59839.9 Pa: a) right side view; b) top view section A-A; c) top view section B-B

С увеличением давления на входе, поток становится более устойчивым (рис.4а, б). Скорости газового потока в пограничных слоях стенок дугообразных элементов в первых трех рядах уменьшаются, что может привести к повторному уносу частиц из «мертвых зон», где должна осуществляться седиментация частиц. Также наблюдается образование различных по силе и площади завихрений над третьим рядом дугообразных элементов и образование неустойчивых вихрей между третьим и четвертыми рядами (рис. 4в). В этих областях будет наблюдаться захватывание потока с третьего ряда дугообразных элементов и поток с дугообразных элементов четвертого ряда.

При инерционном осаждении важно резкое изменение вектора скорости, чтобы осаждаемые твердые частицы продолжали движение по инерции в бункер, а газовый поток уходил. Результаты исследования показали, что дугообразные элементы создают условия для резкого изменения вектора скорости направления линии тока, что способствует интенсификации.

Так же расчеты показали, с увеличением входной скорости увеличивается гидравлическое сопротивление (рис. 5).

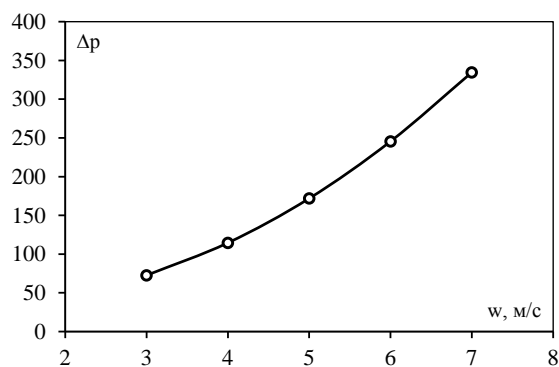


Рис. 5 – Зависимость гидравлического сопротивления от входной скорости потока
Fig. 5 - Dependence of hydraulic resistance on the input flow rate

Это объясняется тем, что при увеличении скорости, увеличивается центробежная сила, что приводит к более интенсивным турбулентным движениям потока, с одной стороны, и образованию устойчивых вихрей, с другой. Потери давления в сепарационном устройстве составили от 50 до 1000 Па при входной скорости газового потока от 2,43 до 11,65 м/с. Следует отметить, что при увеличении давления на входе эффективность улавливания мелкодисперсных частиц уменьшается, так как происходит увеличение скорости, что способствует истиранию частиц между собой. Вследствие чего, образуются новые более мелкие частицы, которые уловить аппаратами сухой очистки практически невозможно.

Заключение

Таким образом, в ходе работы, для предложенного сепарационного устройства с дугообразными элементами, получены газодинамические структуры движения потоков при различных входных давлениях. Определены скорости при заданных давлениях. Изучив газодинамику в сепарационном устройстве с дугообразными элементами, следует отметить, что более эффективная работа будет при малых скоростях. Этому способствуют возникшие около нулевые скорости в области дугообразных элементов.

На основе проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1) определяющим фактором работы сепарационного устройства с дугообразными элементами является волнообразная структура потока, которая зависит от входной скорости газа. Данный параметр характеризует течение потока, соответственно, и упорядоченность волнообразной структуры;

2) установлено, что при входной давлении газового потока равной 58889,9 Па создается вихревые области. При давлении равной 59839,9 Па структура приобретает упорядоченный вид. Это объясняется тем, что при низких входных давлениях образуются завихрения, которые разрушают структуру потока. При увеличении входного давления, увеличивается и входная скорость, что приводит к поглощению данных вихрей основного потока;

2) дугообразные элементы способствуют созданию структуры потока, при которой повышается эффективность инерционного осаждения. С одной стороны, происходит резкое изменения структуры потока, что приводит к выбиванию частиц из нее. С другой стороны, высокие значения центробежных сил позволяют выбивать из газа мелкодисперсные частицы;

3) Потери давления в сепарационном устройстве с дугообразными элементами составляют от 50 до 1000 Па при входном давлении газового потока от 58889,9 до 59839,9 Па;

Достоинством сепарационного устройства с дугообразными элементами является высокая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц, вследствие возникновения центробежных сил высоких значений, относительно низкое гидравлическое сопротивление и отсутствие движущихся механизмов.

Литература

1. Р. Гудериан, *Загрязнение воздушной среды*. Мир, Москва, 1967. 248 с.
2. А.Н. Веригин, В.Н. Федоров, М.С. Малютин, *Конструкция современных циклонов для пылеулавливания*. С.-Петербургский университет, Санкт-Петербург, 2000. 336 с.
3. А.Г. Ветошкин, *Процессы и аппараты пылеочистки*. Пенз. гос. ун-т, Пенза, 2005. 210 с.
4. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.И. Поляков, *Вестник технологического университета*, **21**, 11, 66-69 (2018).

5. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, *Вестник технологического университета*, **23**, 3, 85-88 (2020).
6. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.А. Галиев, *Вестник технологического университета*, **21**, 9, 58-61 (2018).
7. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Ю.О. Семенова, *Вестник технологического университета*, **21**, 12, 109-112 (2018).
8. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Д.Н. Латыпов, О.В. Соловьева, *Вестник технологического университета*, **22**, 8, 33-37 (2019).
9. 12 Jiake Pan, Qisong Shen, Xin Cui, Jiwei Wu, Liang Ma, Tian Chengcheng, Pengbo Fu, Hualin Wang, *Journal of Cleaner Production*, **280**, 2, 1-12 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124379>.
10. 13. Li Qiang, Wang Jianjun, Xu Weiwei, Zhang Meng, *Advanced Powder Technology*, **31**, 3706-3714 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.07.006>.
11. Fu Pengbo, Yu Hao, Li Qiqi, Cheng Tingting, Zhang Fangzheng, Huang Yuang, Lv Wenjie, Xiu Guangli, Wang Hualin, *Chemical Engineering Journal Advances*, **8**, 1-13 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2021.100176>.
12. Патент РФ 1679709 (1996).
13. Патент РФ 2509609 (2014).
14. Патент РФ 2132750 (2014).
15. Jun-Hyung Lim, Sung-Hyeon Oh, Sukkyung Kang, Kyung-Joo Lee, Se-Jin Yook, *Separation and Purification Technology*, **276**, 1-9 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119397>.
16. Pengbo Fu, Jingyi Zhu, Qiqi Li, Tingting Cheng, Fangzheng Zhang, Yuang Huang, Liang Ma, Guangli Xiu, Hualin Wang, *Powder Technology*, **394**, 290-299 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.059>.
17. Yuge Yao, Wenshi Huang, Yuxin Wu, Yang Zhang, Man Zhang, Hairui Yang, Junfu Lyu, *Powder Technology*, **393**, 12-22 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.044>.
18. Guoyin Yu, Sijie Dong, Linna Yang, Di Yan, Kejun Dong, Yi Wei, Bo Wang, *Chemical Engineering Science*, **236**, 1-14 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116537>.
19. Zeyu Li, Zhenbo Tonga, Aibing Yua, Hao Miaoc, Kaiwei Chud, Hao Zhange, Gang Guoa, Jiang Chen, *Particuology*, **62**, 36-46 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.06.002>.
20. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Н.Ф. Сахибгареев, Д.Н. Латыпов, М.Г. Гарипов, *Вестник технологического университета*, **24**, 12, 128-132 (2021).
21. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, А.Р. Галимова, Г.Х. Гумерова, *Вестник технологического университета*, **23**, 11, 82-86 (2020).
3. A.G. Vetoshkin, Processes and devices for dust cleaning. Penz. state un-t, Penza, 2005. 210 p.
4. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, A.I. Polyakov, Bulletin of the Technological University, 21, 11, 66-69 (2018).
5. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, V.V. Kharkiv, Bulletin of the Technological University, 23, 3, 85-88 (2020).
6. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, A.A. Galiev, Bulletin of the Technological University, 21, 9, 58-61 (2018).
7. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, Yu.O. Semenova, Bulletin of the Technological University, 21, 12, 109-112 (2018).
8. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, D.N. Latypov, O.V. Solovieva, Bulletin of the Technological University, 22, 8, 33-37 (2019).
9. 12 Jiake Pan, Qisong Shen, Xin Cui, Jiwei Wu, Liang Ma, Tian Chengcheng, Pengbo Fu, Hualin Wang, Journal of Cleaner Production, 280, 2, 1-12 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124379>.
10. 13. Li Qiang, Wang Jianjun, Xu Weiwei, Zhang Meng, Advanced Powder Technology, 31, 3706-3714 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.07.006>.
11. Fu Pengbo, Yu Hao, Li Qiqi, Cheng Tingting, Zhang Fangzheng, Huang Yuang, Lv Wenjie, Xiu Guangli, Wang Hualin, Chemical Engineering Journal Advances, 8, 1-13 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2021.100176>.
12. RF patent 1679709 (1996).
13. RF patent 2509609 (2014).
14. RF patent 2132750 (2014).
15. Jun-Hyung Lim, Sung-Hyeon Oh, Sukkyung Kang, Kyung-Joo Lee, Se-Jin Yook, Separation and Purification Technology, 276, 1-9 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119397>.
16. Pengbo Fu, Jingyi Zhu, Qiqi Li, Tingting Cheng, Fangzheng Zhang, Yuang Huang, Liang Ma, Guangli Xiu, Hualin Wang, Powder Technology, 394, 290-299 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.059>.
17. Yuge Yao, Wenshi Huang, Yuxin Wu, Yang Zhang, Man Zhang, Hairui Yang, Junfu Lyu, Powder Technology, 393, 12-22 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.044>.
18. Guoyin Yu, Sijie Dong, Linna Yang, Di Yan, Kejun Dong, Yi Wei, Bo Wang, Chemical Engineering Science, 236, 1-14 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116537>.
19. Zeyu Li, Zhenbo Tonga, Aibing Yua, Hao Miaoc, Kaiwei Chud, Hao Zhange, Gang Guoa, Jiang Chen, Particuology, 62, 36-46 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.06.002>.
20. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, N.F. Sakhibgareev, D.N. Latypov, M.G. Garipov, Bulletin of the Technological University, 24, 12, 128-132 (2021).
21. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, A.R. Galimova, G.Kh. Gumerova, Bulletin of the Technological University, 23, 11, 82-86 (2020).

References

1. R. Guderian, Air pollution. Mir, Moscow, 1967. 248 p.
2. A.N. Verigin, V.N. Fedorov, M.S. Malyutin, Design of modern cyclones for dust collection. St. Petersburg University, St. Petersburg, 2000. 336 p.

© Э. И. Салахова – ассистент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий» Нижнекамского химико-технологического института (филиал) ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ»); А. В. Дмитриев – д.т.н., доцент, должность – заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет (ФГБОУ ВО «КГЭУ»); В. Э. Зинуров – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет (ФГБОУ ВО «КГЭУ»), Romanova_rg@mail.ru.

© E. I. Salakhov, Assistant lecturer of the Processes and Devices of Chemical Technologies department, Nizhnekamsk Institute of Chemistry and Technology (branch of Kazan National Research Technological University); A. V. Dmitriev, Doctor of Sciences (Technical Sci.), Head of the Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering, Kazan State Power Engineering University; V. E. Zinurov, Assistant lecturer of the Theoretical Foundations of Heat Engineering department, Kazan State Power Engineering University, Romanova_rg@mail.ru.