



Оценка энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц в сепараторе с соосно расположенными трубами

© В.Э. Зинуров*, А.В. Дмитриев*, Г.Р. Бадретдинова*, Р.Я. Биккулов*, И.Н. Мадышев**

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

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

Резюме: Цель – оценка энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами и эффективности устройства. Для этого было произведено численное моделирование движения газового потока с мелкодисперсными частицами диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами в программном комплексе ANSYS Fluent. В ходе исследований изменялись входная скорость газового потока от 5 до 10 м/с, ширина прямоугольной щели от 2,1 до 8,7 и ее высота от 10 до 30 мм. Показано, что максимальная эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния и минимальные энергетические затраты на прокачку газового потока в устройстве существенным образом зависят от образования устойчивой вихревой структуры в межтрубном пространстве. Результаты исследований показали, что оптимальная входная скорость газового потока составляет 7,5 м/с. При данной скорости эффективность улавливания частиц соответствует более высоким скоростям с отклонением $\pm 6\%$. При этом потери давления составляют в 1,74 раза меньше, чем при более высоких скоростях. Для достижения эффективности не менее 90% и высоте прямоугольной щели от 10 до 30 мм числа Стокса должны соответствовать значениям равным более 50. Рассчитано, что энергетические затраты на прокачку газовой среды с частицами диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами составляют от 1,9 до 31,2 Вт при входной скорости газового потока 7,5 м/с. Параметры прямоугольной щели при этом могут быть: ширина – от 2,1 до 8,7 мм, высота – от 10 до 30 мм. Применение сепараторов с соосно расположенными трубами в технологической линии, в которой используются плазменные технологии, может стать альтернативой аппаратам тонкой очистки газов.

Ключевые слова: энергетические затраты, сепаратор, мелкодисперсные частицы, улавливание частиц, циклон, рукавный фильтр

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-2710.2021.4.

Для цитирования: Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р., Биккулов Р.Я., Мадышев И.Н. Оценка энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц в сепараторе с соосно расположенными трубами. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 196–206. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-196-206>

Estimation of power consumption when trapping finely-dispersed particles in a separator with coaxially-arranged pipes

Vadim E. Zinurov*, Andrey V. Dmitriev*, Guzel R. Badretdinova*,
Rustem Ya. Bikkulov*, Ilnur N. Madyshev**

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Abstract: This article sets out to estimate power consumption when trapping finely-dispersed particles of silicon dioxide using a separator with coaxially-arranged pipes, as well as the efficiency of such an installation. To this end, a numerical simulation of the movement of a gas flow with finely-dispersed particles of silicon dioxide through a separator with coaxial pipes was carried out in the ANSYS Fluent software. During the experiments, the inlet gas flow rate varied from 5 to 10 m/s, while the width and height of the rectangular slit ranged 2.1–8.7 and 10–30 mm, respectively. It was shown that the maximum efficiency of collecting finely-dispersed silicon dioxide particles and the minimum power consumption required for pumping the gas flow through the installation largely depends on the formation of a stable vortex structure in the inter-pipe space. The research showed that the optimal inlet gas flow rate equals 7.5 m/s. At this rate, the efficiency of particle

collection corresponds to higher rates with a deviation of $\pm 6\%$. In this case, the pressure loss is 1.74 times lower than that at higher rates. In order to achieve an efficiency of at least 90% with the height of the rectangular slit from 10 to 30 mm, the Stokes numbers must correspond to values of more than 50. The power consumption required for pumping a gas containing silicon dioxide particles through a separator equipped with coaxial pipes comprises from 1.9 to 31.2 W at the inlet gas flow rate of 7.5 m/s. In this case, the parameters of the rectangular slit are as follows: width – from 2.1 to 8.7 mm, height – from 10 to 30 mm. The use of separators with coaxially-arranged pipes in technological lines based on plasma technologies can become an alternative to installations for fine gas purification.

Keywords: energy costs, separator, fine particles, particle collection, cyclone, bag filter

Acknowledgements: The work is performed at the financial support of the grant of the President of the Russian Federation no. MK-2710.2021.4.

For citation: Zinurov VE, Dmitriev AV, Badretdinova GR, Bikkulov RYa, Madyshev IN. Estimation of power consumption when trapping finely-dispersed particles in a separator with coaxially-arranged pipes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):196–206. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-196-206>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых задач производственных предприятий, относящихся к энергетической, химической, металлургической и другим отраслям, является повышение энергоэффективности, энергосбережения технологических линий. Данная задача получила высокую степень актуальности для относительно нового направления – применения плазменных технологий для производственных целей. В частности, плазматроны, применяемые для обработки кремнеземистого материала для получения аэросила (диоксида кремния) – полупрозрачного порошка, получившего широкое распространение при производстве пластмассы, искусственной кожи, резины и других материалов, используются в технологических линиях, которые работают под создаваемым вентилятором вакуумом [1–4]. Относительно высокое гидравлическое сопротивление технологической линии приводит к работе вентилятора на максимальных мощностях, что является причиной периодических поломок и остановок всей линии, несущих материальный и производственный ущерб предприятию в целом. Ключевыми компонентами такой технологической линии являются плазматрон, загрузочная и реакционная камеры, система улавливания получаемого материала: циклон и рукавный фильтр, вентилятор. Основной вклад в гидравлическое сопротивление всей линии, приводящее к ее высоким энергетическим затратам, вносит система улавливания. Таким образом, для повышения энергоэффективности

и энергосбережения технологической линии при получении диоксида кремния необходима модернизация системы улавливания получаемого материала.

Применение двухступенчатой системы (циклон и рукавный фильтр) для улавливания диоксида кремния в технологической линии обусловлено особенностью плазменных методов: размер получаемых частиц существенно колеблется от 5 нм до 5 мкм. Также в результате коагуляции образуются частицы размером более 5 мкм. Вследствие этого для улавливания относительно крупных частиц размером более 20 мкм в технологической линии применяются циклоны, принцип действия которых основан на возникновении центробежных сил при вращательно-поступательном движении газа с частицами, которые отбрасываются к стенкам циклона и далее падают в бункер [5–9]. Для того чтобы улавливать частицы размером менее 20 мкм, применяются рукавные фильтры, принцип действия которых основан на задержке частиц на фильтровальных материалах, обволакивающих рукава аппарата, при движении газа с частицами через них. Пористость фильтровальных материалов подбирается индивидуально в зависимости от характеристик частиц в газовом потоке. Следует отметить, что использование циклона перед рукавным фильтром позволяет предотвратить преждевременный износ фильтровальных материалов за счет улавливания относительно крупных частиц размером более 20 мкм [10–14]. Ключевыми недостатками



двухступенчатой системы улавливания частиц диоксида кремния из газового потока является высокое гидравлическое сопротивление, приводящее к высоким энергетическим затратам линии, и необходимость в периодической очистке рукавов и замена фильтровальных материалов. Применение других наиболее распространенных аппаратов для улавливания мелкодисперсных частиц, в частности электростатических фильтров и аппаратов мокрой очистки, невозможно из-за температуры газового потока более 100°C [15–17]. Вследствие этого необходима разработка новых устройств для улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния, обладающих относительно небольшим гидравлическим сопротивлением. Целью данной работы является оценка энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами и эффективности устройства.

ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Авторами работы для улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния был разработан сепаратор [7] с соосно расположенными трубами (рис. 1). Устройство обладает простой конструкцией, которая изготавливается из 2 цилиндрических труб и пластины, привариваемой к трубам в межтрубном пространстве. Для движения газового потока в устройстве в нижней части внутренней цилиндрической трубы осесимметрично вырезаются прямоугольные щели и в пластине, расположенной в межтрубном пространстве, вырезаются круглые отверстия. При этом количество круглых отверстий вдвое больше прямоугольных щелей [1–3].

Улавливание мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами осуществляется преимущественно за счет формирования устойчивой завихренной структуры газового потока с частицами в межтрубном пространстве, при которой возникают центробежные силы высоких значений, вследствие чего мелкодисперсные частицы при сильном вращении газа вылетают из структуры его движения в направлении к поверхности внутрен-

ней цилиндрической стенки внешней трубы, при контакте с которой мелкодисперсные частицы прилипают к ней за счет межмолекулярных и электростатических сил.

Сепарацию мелкодисперсных частиц диоксида кремния из газового потока в более общем виде можно описать следующим образом: газ с частицами подается в сепаратор с соосно расположенными трубами через входное отверстие 1, после чего он продвигается в нижнюю часть внутренней цилиндрической трубы 4 по мере достижения плоскости, на которой начинают появляться прямоугольные щели 5, структура движения газа изменяется – она начинает равномерно распределяться в осесимметричном направлении к прямоугольным щелям 5 [10–12]. Таким образом, направление движения газа изменяется на 90°. При данном повороте относительно крупные и средние частицы диоксида кремния, которые коагулировали между собой из мелких частиц в технологической линии после плазматрона, выбиваются из структуры потока и сыпаются в бункер устройства [4]. Остальная часть частиц диоксида кремния с газом проходит через прямоугольные щели 5, и каждая струя газа при выходе из прямоугольной щели в равном соотношении распределяется в две противоположные стороны друг от друга. При разделении струи газа на 2 потока каждая его часть движется под определенным углом в направлении к внутренней стенке внешней цилиндрической трубы, которая позволяет зеркально развернуть поток и придать ему вихревое движение. Далее завихренный газовый поток с частицами движется в верхнюю часть устройства в межтрубном пространстве к пластине с круглыми выходными отверстиями 2. Каждое круглое отверстие позволяет поддерживать вихревую структуру по высоте. При вращении газа в межтрубном пространстве возникают центробежные силы высоких значений, влияющие на сепарацию мелкодисперсных частиц диоксида кремния из газового потока, преимущественно за счет двух факторов [13]: первый – маленький радиус вихря, позволяющий увеличить значения центробежных сил, и второй – ускорение каждого вихря за счет сонаправленного дви-

жения соседних вихрей в точках контакта, что является особенностью данного устройства – прямоугольные щели проделаны таким образом, чтобы при выходе из них формировались 2 завихрения, при этом каждое завихрение при своем вращении контактирует с соседними завихрениями, в точке контакта вектора скорости сонаправлены, в результате за счет сил инерции в данных точках завихрения придают друг другу дополнительный импульс к движению. Вследствие этого количество круглых отверстий в пластине, которые равны количеству завихрений в устройстве, в 2 раза больше, чем прямоугольных щелей. При выбивании мелкодисперсных частиц диоксида кремния из газового потока в межтрубном пространстве они прилипают к поверхностям стенок сепаратора [7, 8]. Далее газовый поток выходит из устройства через выходные отверстия 2, проделанные в пластине (рис. 1). Следует отметить, что на рис. 1 представлена упрощенная трехмерная модель сепаратора с соосно расположенными трубами, на которой отсутствует изображение бункера в нижней части.

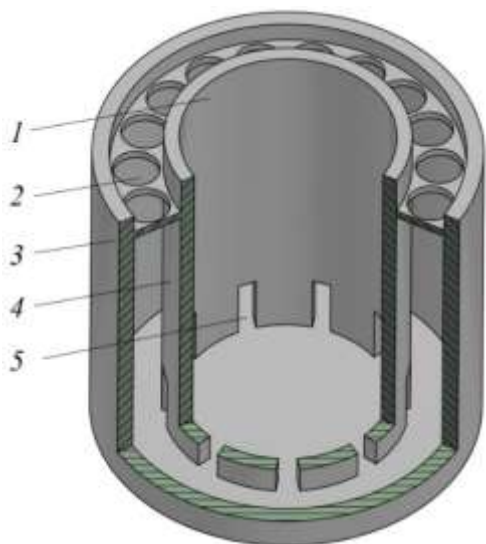


Рис. 1. Упрощенная трехмерная модель с разрезом сепаратора с соосно расположенными трубами: 1 – входное отверстие; 2 – выходные отверстия; 3 – внешняя цилиндрическая труба; 4 – внутренняя цилиндрическая труба; 5 – прямоугольные щели

Fig. 1. Simplified three-dimensional model with the section of the separator with coaxially arranged pipes: 1 – inlet; 2 – outlet; 3 – external cylindrical pipe; 4 – internal cylindrical pipe; 5 – rectangular gaps

Для оценки энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами было произведено численное моделирование в программном комплексе ANSYS Fluent. Расчет производился на основе метода конечных элементов. Моделирование течения жидкостей и газов осуществляется путем решения уравнения Навье – Стокса [18–20]:

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

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 уравнением неразрывности:

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

Процесс получения выборки данных численного моделирования для оценки энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами в программном комплексе ANSYS Fluent включал несколько стадий:

- 1) построение геометрии;
- 2) создание расчетной сетки;
- 3) выбор модели турбулентности и постановка краевых условий;
- 4) обработка результатов.

Построение трехмерной геометрии сепаратора с соосно расположенными трубами, представленного на рис. 1, осуществлялось в программном комплексе Autodesk Inventor, откуда затем импортировалось в ANSYS Fluent. Геометрические размеры основных конструктивных элементов устройства принимались следующими: наружный диаметр внешней и внутренней цилиндрической трубы – 90 и 57 мм, соответственно, толщина внешней и



внутренней цилиндрической трубы – 4 и 3,5 мм, высота внешней и внутренней цилиндрической трубы – 82 и 87 мм, диаметр выходных круглых отверстий, сделанных в пластине – 11 мм. Для получения большой выборки данных размеры прямоугольной щели изменялись. Высота и ширина щели изменялись от 10 до 30 мм и 2,1 до 8,7 мм, соответственно. Количество выходных круглых отверстий составило 18, прямоугольных щелей – 9.

При создании расчетной сетки трехмерной модели сепаратора с соосно расположенными трубами количество ячеек составило 2130420.

В качестве модели турбулентности использовалась модель Transition SST, которая в отличие от классической SST модели дополняется 2 дополнительными уравнениями переноса: для перемежаемости и скоростного напора, который рассчитан для толщины потери импульса. В процессе моделирования на входе в устройство задавалась скорость газового потока 5–10 м/с, на выходе из устройства задавалось атмосферное давление 101325 Па. Плотность мелкодисперсных частиц диоксида кремния принималась равной 2560 кг/м³. Размер частиц варьировался от 1 до 20 мкм. Динамическая вязкость газа принималась равной 18,1 · 10⁻⁶ Па·с. Вследствие отсутствия у трехмерной модели сепаратора бункера на его дне задавалось условие прилипания, так как в реальном устройстве там располагаются каналы для отвода частиц [7, 9].

В ходе исследований также оценивалась эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе по следующему выражению:

$$E = 1 - \frac{n_{out}}{n_{in}}, \quad (3)$$

где n_{in} – количество частиц, запущенное в газовый поток; n_{out} – количество частиц, которое осталось в газовом потоке при его выходе из устройства.

Потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами рассчитывались по выражению (4):

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (4)$$

где p_1 – давление на входе в сепаратор, Па; p_2 – давление на выходе из сепаратора равное атмосферному, Па.

Энергетические затраты на прокачку газового потока в сепараторе с соосно расположенными трубами определялись по выражению (5):

$$N = \Delta p G_v, \quad (5)$$

где G_v – объемный расход газового потока, м³/с.

В ходе обработки выборки данных численного моделирования рассчитывалось число Стокса:

$$Stk = \frac{\rho a^2 w_s}{\mu h_s}, \quad (6)$$

где ρ – плотность частиц диоксида кремния, кг/м³; a – диаметр частиц, м; w_s – скорость газа в прямоугольной щели, м/с; μ – динамическая вязкость газа, Па·с; h_s – высота прямоугольной щели, м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По завершении расчетов была получена картина формирования завихрений на плоскости в межтрубном пространстве сепаратора с соосно расположенными трубами (рис. 2). Как было описано выше, каждая струя газа при выходе из прямоугольной щели распадается на 2 струи, которые вследствие конструктивных особенностей сепаратора завихряются.

Результаты исследований показали, что на эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния и энергетические затраты в сепараторе с соосно расположенными трубами влияет изменение входной скорости и конструктивных размеров прямоугольной щели внутренней цилиндрической трубы: высота и ширина (рис. 3–6). Изменение данных параметров приводит к установлению определенной структуры движения потока в проточной части сепаратора.

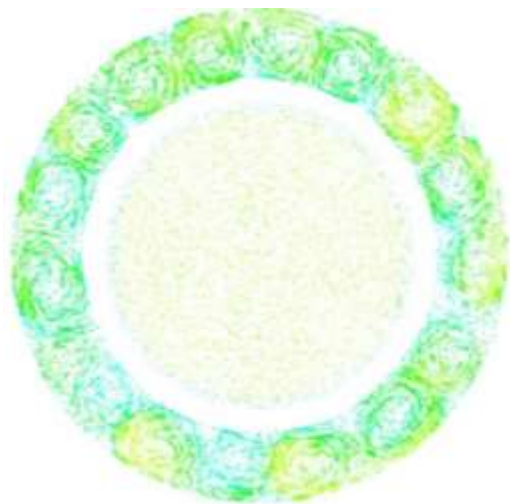


Рис. 2. Формирование завихрений на плоскости в межтрубном пространстве сепаратора с соосно расположенными трубами (вид сверху)
Fig. 2. Vortex formation on the plane in the inter-pipe space of the separator with coaxially arranged pipes (top view)

Для достижения максимальной эффективности улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния и минимальных значений потери давления в устройстве, влияющих на энергетические затраты, необходимо образование устойчивой вихревой структуры в межтрубном пространстве (см. рис. 2). В том случае, если вихревая структура нарушается, например, из-за саморазрушения вихрей, вследствие наложения соседних вихрей друг на друга, то эффективность устройства будет уменьшаться, а потери давления станут увеличиваться [15–19]. Нарушение вихревой структуры может быть вызвано неправильной компоновкой устройства, эксплуатацией сепаратора при относительно высоких или низких скоростях газового потока и др.

При входной скорости газового потока 5, 7,5 и 10 м/с эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния при числах Стокса 0,1–15 в среднем составляет 21,5, 39,8 и 46,5%, соответственно. Максимальная эффективность достигается при числах Стокса 10–15, она равна не менее 90% (рис. 3). Потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами при входной скорости газового потока 5, 7,5 и 10 м/с составляют 51,8, 130,7 и 227,9 Па, соответственно. Очевидно, что наиболее рационально создавать входную скорость газового

потока равную 7,5 м/с, при которой достигается высокая эффективность и умеренные потери давления. В ходе исследований было установлено, что наибольшее влияние на эффективность улавливания мелкодисперсных частиц оказывает варьирование размеров ширины щели [14]. При увеличении ширины прямоугольной щели в 2 и 3 раза от начального значения (равного 2,1 мм), эффективность возрастает на 10–15% при числах Стокса в диапазоне 10–44 (рис. 4). При размере ширины щели от 2,1 до 8,7 мм потери давления составляют не более 1 кПа (рис. 6). Изменение высоты прямоугольной щели от 10 до 30 мм сепаратора приводит к изменению эффективности улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния не более чем на 5%. Наиболее высокая эффективность (не менее 90%) достигается при числах Стокса более 50 (рис. 5). При этом потери давления в сепараторе при изменении высоты прямоугольной щели от 10 до 30 мм составляют 0,1 до 2,1 кПа (рис. 6).

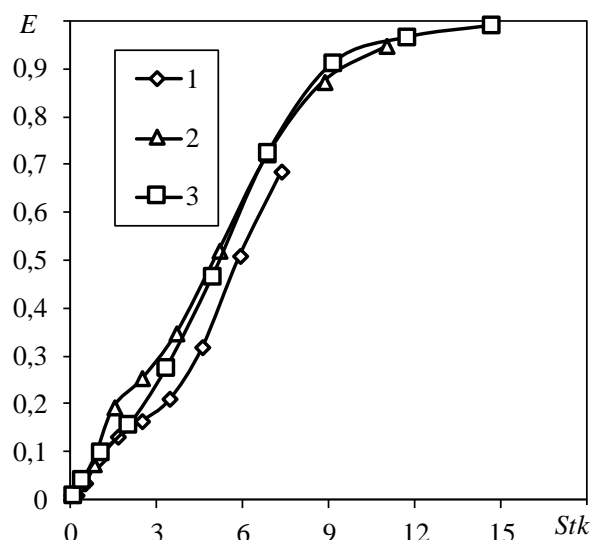


Рис. 3. Зависимость изменения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от чисел Стокса при различных значениях скорости газового потока, м/с: 1 – 5; 2 – 7,5; 3 – 10
Fig. 3. Dependence of fine particle collection efficiency variation on the Stokes numbers at different values of the gas flow velocity, m/s: 1 – 5; 2 – 7.5; 3 – 10

Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния сепаратором с соосно расположенными трубами в среднем составляет 33,2, 35,8 и 39,8% при

ширине прямоугольной щели 2,1, 4,3 и 8,7 мм, соответственно, при числе Стокса 0,1–44 и входной скорости газового потока 7,5 м/с. Следует отметить, что уменьшение ширины щели приводит к существенному сдвигу «эффективной области» чисел Стокса в больший диапазон. Для улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с эффективностью не менее 50% при ширине щели 2,1, 4,3 и 8,7 мм числа Стокса должны соответствовать значению не менее 23,12 и 5 (рис. 4).

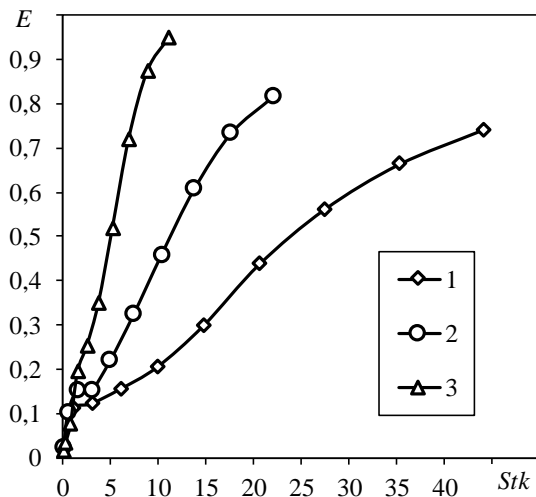


Рис. 4. Зависимость изменения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от чисел Стокса при различных значениях ширины щели, мм: 1 – 2,1; 2 – 4,3; 3 – 8,7

Fig. 4. Dependence of fine particle collection efficiency variation on the Stokes numbers at different values of the gap width, mm: 1 – 2.1; 2 – 4.3; 3 – 8.7

Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами составляет в среднем 71,9, 61,4, 51,1 и 35,8% при высоте прямоугольной щели 10, 15, 20 и 30 мм, соответственно, при числе Стокса от 0,1 до 198,2 и входной скорости газового потока 7,5 м/с (рис. 5).

Потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами при входной скорости газового потока 7,5 м/с и высоте щели 30 мм составляют 130,7, 324,9 и 973,2 Па при ширине щели 2,1, 4,3 и 8,7 мм, соответственно. При этом при изменении высоты прямоугольной щели до значений 10, 15, 20 и 30 мм потери давления в сепараторе составля-

ют 2115,8, 1005,3, 617,4 и 130,7 Па, соответственно, при ширине щели 4,3 мм (рис. 6). Подставив потери давления и объемный расход газа в формулу (6), возможно определить энергетические затраты на прокачку газа в сепараторе с соосно расположенными трубами. Анализ формулы показывает, что при использовании одного сепаратора с соосно расположенными трубами энергетические затраты на прокачку газа в устройстве будут составлять от 1,9 до 31,2 Вт при входной скорости газового потока 7,5 м/с, ширине прямоугольной щели от 2,1 до 8,7 мм и ее высоте от 10 до 30 мм.

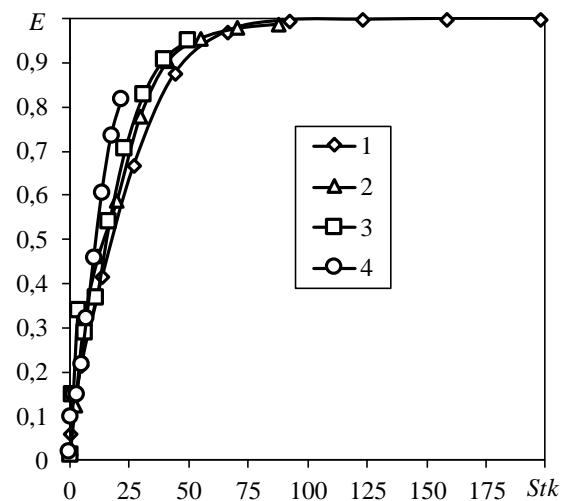


Рис. 5. Зависимость изменения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от чисел Стокса при различной высоте прямоугольной щели, мм: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20; 4 – 30

Fig. 5. Dependence of fine particle collection efficiency variation on the Stokes numbers at different heights of the rectangular gap, mm: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20; 4 – 30

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что максимальная эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния и минимальные энергетические затраты на прокачку газового потока в устройстве существенно зависят от образования устойчивой вихревой структуры в межтрубном пространстве. В ходе исследований было установлено, что на 2 данных параметра в большей степени влияют конструктивные параметры: ширина и высота прямоугольной щели. При увеличении ширины щели повышается эффективность сепарации частиц

диоксида кремния из газа и снижаются энергетические затраты на прокачку газа. Это вызвано тем, что поток при выходе из щели равномерно распределяется в разные стороны, образуя стабильные завихрения. При уменьшении ширины щели скорость в сужениях увеличивается, и струи газа вылетают из щелей с относительно высокой скоростью, вследствие чего центры вихрей смещаются, и они начинают друг друга разрушать, что сказывается на повышении потери давления и снижении эффективности сепарации частиц из газа [20]. При уменьшении высоты прямоугольной щели повышаются эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния и энергетические затраты на прокачку газа. Это вызвано тем, что уменьшение высоты щели приводит к увеличению области, в которой вращается газ. Таким образом, увеличение данной области, с одной стороны, приводит к повышению эффективности сепарации частиц из газа, с другой – к увеличению энергетических затрат.

В ходе исследований было установлено, что оптимальной входной скоростью газового потока является значение 7,5 м/с. При данной скорости эффективность улавливания мелкодисперсных частиц соответствует более высоким скоростям с отклонением $\pm 6\%$. При этом потери давления составляют в 1,74 раза меньше, чем при скорости 10 м/с. Повышению эффективности сепарации частиц диоксида кремния из газового потока и уменьшению энергетических затрат на прокачку газа в устройстве способствует увеличение ширины щели, приводящее к образованию стабильной завихренной структуры газа в межтрубном пространстве. Уменьшение высоты прямоугольной щели приводит к увеличению области движения вихрей, что повышает эффективность сепарации частиц из газа и энергетические затраты на прокачку газа в устройстве. Для достижения эффективности не менее 50% и ширины щели 2,1, 4,3 и 8,7 мм числа Стокса должны соответствовать значению не менее 23, 12 и 5, соответственно, при входной скорости газового потока 7,5 м/с и высоте прямоугольной щели 30 мм. Для достижения эффективности не менее 90% и высоты прямоугольной щели от

10 до 30 мм числа Стокса должны соответствовать значениям равным более 50. Энергетические затраты на прокачку газовой среды, содержащей мелкодисперсные частицы диоксида кремния, в сепараторе с соосно расположенными трубами составляют от 1,9 до 31,2 Вт при входной скорости газового потока 7,5 м/с, ширине прямоугольной щели от 2,1 до 8,7 мм и ее высоте от 10 до 30 мм.

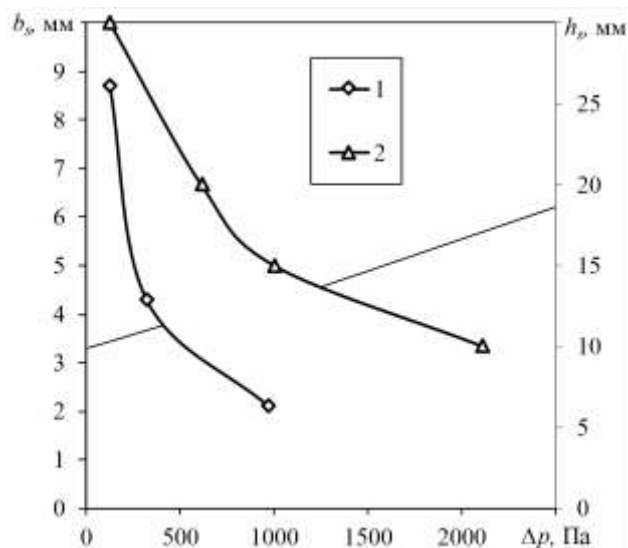


Рис. 6. Зависимость изменения потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами от конструктивных размеров прямоугольных щелей: 1 – ширина щели b_s (входная скорость газового потока и высота щели – 7,5 м/с и 30 мм), 2 – высота щели h_s (входная скорость газового потока и ширина щели – 7,5 м/с и 4,3 мм)

Fig.6. Dependence of pressure loss variations in the separator with coaxially arranged pipes on the design dimensions of the rectangular gaps: 1 – gap width b_s (inlet gas flow velocity and gap height – 7.5 m/s and 30 mm), 2 – gap height h_s (inlet gas flow velocity and gap width – 7.5 m/s and 4.3 mm)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение сепаратора с соосно расположенными трубами в технологической линии, в которой используются плазменные технологии, вместо аппаратов тонкой очистки является целесообразным мероприятием. Помимо высокой эффективности улавливания мелкодисперсных частиц, устройство обладает простой конструкцией и отсутствием движущихся механизмов. В результате затрачиваются минимальные энергетические затраты на прокачку газового потока с частицами диоксида кремния в нем. Вследствие



этого для повышения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц возможно применение нескольких сепараторов с соос-

но расположенными трубами, последовательно подключенными друг к другу.

Список литературы

1. Космачев П.В., Власов В.А., Волокитин Г.Г. Наноразмерный SiO_2 , полученный плазменно-дуговым методом // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2018. № 2-3. С. 15–19. <https://doi.org/10.18101/2306-2363-2018-2-3-15-19>
2. Постнов В.Н., Мельникова Н.А., Свистунова О.С., Постнов Д.В., Мурын И.В. Нанокompозиты на основе нафтона, содержащие модифицированный аэросил // Журнал общей химии. 2016. Т. 86. № 10. С. 1756–1758. <https://doi.org/10.1134/S1070363216100273>
3. Ab Rahman I., Ghazali N.A.M., Bakar W.Z.W., Masudi S.A. Modification of glass ionomer cement by incorporating nanozirconia-hydroxyapatite-silica nano-powder composite by the one-pot technique for hardness and aesthetics improvement // Ceramics international. 2017. Vol. 43. Iss. 16. P. 13247–13253. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.022>
4. Cho Y.–S., Moon J.–W. Collection of industrial oil using nanoparticles and porous powders of silica // Archives of Metallurgy and Materials. 2017. Vol. 62. No. 2B. P. 1371–1375. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0211>
5. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Мубаракшина Р.Р. Повышение эффективности аспирационных систем при обработке крахмалистого сырья // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 18–22. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.004>
6. Tofighian H., Amani E., Saffar-Avval M. A large eddy simulation study of cyclones: the effect of sub-models on efficiency and erosion prediction // Powder Technology. 2020. Vol. 360. P. 1237–1252. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.091>
7. 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.
8. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Сепарационная и энергетическая эффективность насадочных аппаратов очистки газов от аэрозолей // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 5. С. 491–498.
9. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Дмитриева О.С. Улавливание мелкодисперсных капель из газового потока в сепарационном устройстве с двутавровыми элементами // Промышленная энергетика. 2020. № 12. С. 47–53. <https://doi.org/10.34831/EP.2020.23.49.008>
10. Song Chengming, Pei Binbin, Jiang Mengting, Wang Bo, Xu Delong, Chen Yanxin. Numerical analysis of forces exerted on particles in cyclone separators // Powder Technology. 2016. Vol. 294. P. 437–448. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.02.052>
11. Mazyan W.I., Ahmadi A., Ahmed H., Hoorfar M. Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers // Journal of Aerosol Science. 2017. Vol. 110. P. 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.007>
12. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Intensification of gas flow purification from finely dispersed particles by means of rectangular separator // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 451. P. 012211. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012211>
13. Gao Sihong, Zhang Dandan, Fan Yiping, Lu Chunxi. A novel gas-solids separator scheme of coupling cyclone with circulating granular bed filter (C-CGBF) // Journal of Hazardous Materials. 2019. Vol. 362. P. 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.065>
14. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Influence of elements thickness of separation devices on the finely dispersed particles collection efficiency // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. P. 02073. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402073>
15. Sagot B., Forthomme A., Ait Ali Yahia L., De La Bourdonnaye G. Experimental study of cyclone performance for blow-by gas cleaning applications // Journal of Aerosol Science. 2017. Vol. 110. P. 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.009>
16. Tsareva O.V., Balyberdin A.S., Vakhitov M.R., Khar'kov V.V., Dubkova N.Z. Investigation of filter materials for gas cleaning from sulfuric acid // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2020. Vol. 421. Iss. 7. P. 072014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/7/072014>
17. Zhang Mingxing, Chen Haiyan, Yan Cuiping, Li Qianqian, Qiu Jie. Investigation to rectangular flat pleated filter for collecting corn straw particles during pulse cleaning // Advanced Powder Technology. 2018. Vol. 29. Iss. 8. P. 1787–1794. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.04.014>
18. Le Dang Khoi, Yoon Joon Yong. Numerical investigation on the performance and flow pattern of two novel innovative designs of four-inlet cyclone separator // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2020. Vol. 150. P. 107867. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107867>
19. Parvaz F., Hosseini S.H., Elsayed K., Ahmadi G. Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators // Separation and Purification Technology. 2018. Vol. 201. P. 223–237. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.001>
20. Venkatesh S., Sakthivel M. Numerical investigation and optimization for performance analysis in Venturi inlet cyclone separator // Desalination and Water Treatment. 2017. Vol. 90. P. 168–179. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21444>

References

1. Kosmachev PV, Vlasov VA, Volokitin GG. Nanosized SiO₂ obtained by plasma-arc method. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Himiya. Fizika = Dorji Banzarov Buryat State University Bulletin. Chemistry. Physics.* 2018;2-3:15–19. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18101/2306-2363-2018-2-3-15-19>
2. Postnov VN, Mel'nikova NA, Svistunova OS, Postnov DV, Murin IV. Nafion nanocomposites containing a modified aerosil. *Zhurnal obshchej himii = Russian Journal of General Chemistry.* 2016;86(10):1756–1758. (In Russ.)
<https://doi.org/10.1134/S1070363216100273>
3. Ab Rahman I, Ghazali NAM, Bakar WZW, Masudi SA. Modification of glass ionomer cement by incorporating nanozirconia-hydroxyapatite-silica nanopowder composite by the one-pot technique for hardness and aesthetics improvement. *Ceramics International.* 2017;43(16):13247–13253.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.022>
4. Cho Y–S, Moon J–W. Collection of industrial oil using nanoparticles and porous powders of silica. *Archives of Metallurgy and Materials.* 2017;62(2B):1371–1375.
<https://doi.org/10.1515/amm-2017-0211>
5. Zinurov VE, Dmitriev AV, Mubarakshina RR. Improving aspiration systems efficiency in processing of starchy raw materials. *Polzunovskiy vestnik.* 2020;2:18–22. (In Russ.)
<https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.004>
6. Tofighian H, Amani E, Saffar-Avval M. A large eddy simulation study of cyclones: the effect of sub-models on efficiency and erosion prediction. *Powder Technology.* 2020;360:1237–1252.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.091>
7. Zinurov VE, Dmitriev AV, Solovjova OV, Latypov DN. Impact of polluting a dust separator with fine dust upon the energy consumption during its operation. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta.* 2019;22(8):33–37. (In Russ.)
8. Laptev AG, Basharov MM, Lapteva EA. Separation and energy efficiency of packed apparatuses for purifying gases from aerosols. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii = Theoretical Foundations of Chemical Engineering.* 2017;51(5):491–498. (In Russ.)
9. Zinurov VE, Dmitriev AV, Dmitrieva OS. Catching fine droplets of a gas flow in an I-type separator. *Promyshlennaya energetika.* 2020;12:47–53. (In Russ.)
<https://doi.org/10.34831/EP.2020.23.49.008>
10. Song Chengming, Pei Binbin, Jiang Mengting, Wang Bo, Xu Delong, Chen Yanxin. Numerical analysis of forces exerted on particles in cyclone separators. *Powder Technology.* 2016;294:437–448. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.02.052>
11. Mazyan WI, Ahmadi A, Ahmed H, Hoorfar M. Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers. *Journal of Aerosol Science.* 2017;110:36–42.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.007>
12. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS. Intensification of gas flow purification from finely dispersed particles by means of rectangular separator. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series.* 2018;451:012211.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012211>
13. Gao Sihong, Zhang Dandan, Fan Yiping, Lu Chunxi. A novel gas-solids separator scheme of coupling cyclone with circulating granular bed filter (C-CGBF). *Journal of Hazardous Materials.* 2019;362:403–411.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.065>
14. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS. Influence of elements thickness of separation devices on the finely dispersed particles collection efficiency. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences.* 2018;224:02073.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402073>
15. Sagot B, Forthomme A, Ait Ali Yahia L, De La Bourdonnaye G. Experimental study of cyclone performance for blow-by gas cleaning applications. *Journal of Aerosol Science.* 2017;110:53–69.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.009>
16. Tsareva OV, Balyberdin AS, Vakhitov MR, Kharkov VV, Dubkova NZ. Investigation of filter materials for gas cleaning from sulfuric acid. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series.* 2020;421(7):072014.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/7/072014>
17. Zhang Mingxing, Chen Haiyan, Yan Cuiping, Li Qianqian, Qiu Jie. Investigation to rectangular flat pleated filter for collecting corn straw particles during pulse cleaning. *Advanced Powder Technology.* 2018;29(8):1787–1794. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.04.014>
18. Le Dang Khoi, Yoon Joon Yong. Numerical investigation on the performance and flow pattern of two novel innovative designs of four-inlet cyclone separator. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification.* 2020;150:107867.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107867>
19. Parvaz F, Hosseini SH, Elsayed K, Ahmadi G. Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators. *Separation and Purification Technology.* 2018;201:223–237.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.001>
20. Venkatesh S, Sakthivel M. Numerical investigation and optimization for performance analysis in Venturi inlet cyclone separator. *Desalination and Water Treatment.* 2017;90:168–179. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21444>



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

Бадретдинова Гузель Рамилевна,
магистрант,
Казанский государственный энергетический университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
e-mail: nice.badretdinova@mail.ru

Биккулов Рустем Ядкарлович,
ассистент кафедры «Теоретические основы
теплотехники»,
Казанский государственный энергетический университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
e-mail: bikkulov@tnpc.ru

Мадышев Ильнур Наилович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник кафедры «Оборудование
пищевых производств»,
Казанский национальный исследовательский
технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, Россия;
e-mail: ilnyr_91@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.12.2020; одобрена после рецензирования 29.01.2021; принята к публикации 29.04.2021.

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 Thermal Engineering,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
✉ e-mail: ieremiada@gmail.com

Guzel R. Badretdinova,
Master's Degree Student,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: nice.badretdinova@mail.ru

Rustem Ya. Bikkulov,
Assistant Professor of the Department of Theoretical
Foundations of Thermal Engineering, Kazan State Power
Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: bikkulov@tnpc.ru

Ilnur N. Madyshev,
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department
of Food Production Equipment, Kazan National Research
Technological University,
68 Karl Marx St., Kazan 420015, Russia;
e-mail: ilnyr_91@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 02.12.2020; approved after reviewing 29.01.2021; accepted for publication 29.04.2021.