



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК: 66.074.2

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.006



## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ ПРИ ОБЕСПЫЛИВАНИИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ РАЗЛИЧНОМ УГЛЕ РАСКРЫТИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЩЕЛЕЙ

Вадим Эдуардович Зинуров <sup>1</sup>, Илюза Ильшатовна Насырова <sup>2</sup>,  
Ильнур Наилович Мадышев <sup>3</sup>, Азат Альбиртович Галиев <sup>4</sup>

<sup>1, 2, 4</sup> Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

<sup>3</sup> Казанский национальный исследовательский технологический институт, Казань, Россия

<sup>1</sup> vadd\_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

<sup>2</sup> iyuza2001@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1051-6257>

<sup>3</sup> ilnyr\_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

<sup>4</sup> azat.galiev.1995@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1873-8180>

**Аннотация.** Важной задачей при обеспыливании газовых выбросов на предприятиях химической промышленности является достижение высокой эффективности. Для этого применяется комплекс аппаратов. Крупные частицы удаляются из газов в аппаратах грубой очистки. Мелкие частицы удаляются из газов в аппаратах тонкой очистки. Однако фильтры тонкой очистки быстро забиваются, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления и в некоторых случаях – к снижению эффективности. Актуальной задачей является увеличение их срока службы и повышение эффективности. Для этого в работе предложена конструкция сепаратора с соосно расположенными трубами, который предлагается установить перед фильтрами тонкой очистки. Целью данной работы является численное исследование влияния угла раскрытия прямоугольных щелей на эффективность и гидравлическое сопротивление сепаратора с соосно расположенными трубами. В статье представлена конструкция сепаратора. Описан принцип действия. При численных расчетах на входе в устройство задавалась входная скорость газового потока, которая варьировалась от 3 до 10 м/с, и массовый расход частиц 5 г/с. Плотность частиц изменялась от 1000 до 3000 кг/м<sup>3</sup>. Диаметр частиц варьировался от 1 до 15 мкм. Угол раскрытия щелей варьировался от 16 до 24 °. В ходе расчетов были сделаны следующие основные выводы: структурированность вихрей в межтрубном пространстве определяет степень эффективности сепаратора с соосно расположенными трубами, при угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha = 20^\circ$  достигается максимальная эффективность сепарации мелкодисперсных частиц размером до 10 мкм из запыленного потока, равная в среднем 40,3 %, эффективность сепарации мелкодисперсных частиц из запыленного потока увеличивается при росте входной скорости газа и плотности частиц, т.к. они легче поддаются выбиванию из завихренного газа, потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами составляют не более 626 Па.

**Ключевые слова:** газовые выбросы, сепаратор, улавливание частиц, центробежные силы, центробежный сепаратор, циклонный сепаратор, циклон, мелкодисперсная пыль, мелкая фракция частиц, сепарация частиц из газа, осаждение частиц.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-3577.2022.1.

**Для цитирования:** Оценка эффективности сепаратора с соосно расположенными трубами при обеспыливании газовых выбросов при различном угле раскрытия прямоугольных щелей / В. Э. Зинуров [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 2. С. 39–47. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.006. EDN: <https://elibrary.ru/NVLQUK>.

Original article

## EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A SEPARATOR WITH COAXIALLY ARRANGED PIPES WHEN DEDUSTING GAS EMISSIONS AT DIFFERENT ANGLES OF OPENING RECTANGULAR SLOTS

Vadim E. Zinurov <sup>1</sup>, Ilyuza N. Nasyrova <sup>2</sup>, Ilnur N. Madyshev <sup>3</sup>,  
Azat A. Galiev <sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>1</sup> vadd\_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

<sup>2</sup> iyuza2001@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1051-6257>

<sup>3</sup> ilnyr\_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

<sup>4</sup> azat.galiev.1995@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1873-8180>

**Abstract.** An important task in dedusting gas emissions at chemical industry enterprises is to achieve high efficiency. A complex of devices is used for this. Large particles are removed from gases in coarse cleaning devices. Fine particles are removed from gases in fine cleaning devices. However, fine filters are quickly clogged, which leads to an increase in hydraulic resistance and, in some cases, to a decrease in efficiency. An urgent task is to increase their service life and increase efficiency. For this purpose, the paper proposes the design of a separator with coaxially arranged pipes, which is proposed to be installed in front of fine filters. The aim of this work is to numerically investigate the effect of the angle of opening of rectangular slits on the efficiency and hydraulic resistance of a separator with coaxially arranged pipes. The article presents the design of the separator. The principle of operation is described. During numerical calculations, the inlet velocity of the gas flow was set at the inlet of the device, which varied from 3 to 10 m/s, and the mass flow rate of particles was 5 g/s. The particle density varied from 1000 to 3000 kg/m<sup>3</sup>. The particle diameter varied from 1 to 15 microns. The opening angle of the slits varied from 16 to 24 °. During the calculations, the following main conclusions were made: the structure of vortices in the inter-tube space determines the degree of efficiency of a separator with coaxially arranged pipes, with the angle of opening of rectangular slits  $\alpha = 20^\circ$ , the maximum separation efficiency of fine particles up to 10 microns in size from a dusty stream is equal to an average of 40.3 %, the separation efficiency of fine particles from a dusty stream is achieved. the flow rate increases with an increase in the input gas velocity and particle density, because they are easier to dislodge from the swirling gas, the pressure loss in the separator with coaxially arranged pipes is no more than 626 Pa.

**Keywords:** gas emissions, separator, particle capture, centrifugal forces, centrifugal separator, cyclone separator, cyclone, fine dust, fine particle fraction, separation of particles from gas, particle deposition.

**Acknowledgements:** The study was carried out with the financial support of the scholarship of the President of the Russian Federation to young scientists and postgraduate's SP-3577.2022.1.

**For citation:** Zinurov, V. E., Nasyrova, I. I., Madyshev, I. N. & Galiev, A. A. (2022). Evaluation of the efficiency of a separator with coaxially arranged pipes when dedusting gas emissions at different angles of opening rectangular slots. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 39-47. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.006. EDN: <https://elibrary.ru/NVLQUK>.

С точки зрения охраны окружающей среды и сокращения объемов, поступающих в атмосферу вредных веществ, качественная очистка газовых выбросов от твердых частиц на предприятиях химической, нефтехимической и другой промышленности имеет перво-степенное значение [1–3]. Для большинства процессов химического производства харак-

терен выброс побочных продуктов в виде взвеси твердых или жидких частиц. Для их удаления из газовых выбросов применяются наиболее эффективные средства пылеуда-ления [4]. Как правило, они делятся на 5 ос-новных способов улавливания или осажде-ния: 1) аппараты гравитационного типа; 2) мокрые аппараты; 3) сухие инерционные

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ ПРИ ОБЕСПЫЛИВАНИИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ РАЗЛИЧНОМ УГЛЕ РАСКРЫТИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЩЕЛЕЙ

системы; 4) контактные пылеуловители; 5) фильтры, например, электростатические. Выбор того или иного способа зависит от множества факторов [5]. К основным относят размер частиц в газовых выбросах, объемный расход, агрессивность пылегазового потока и температуру потока [6, 7].

Например, камеры гравитационного осаждения, как правило, применяются для удаления частиц из запыленных газовых выбросов размером более 100 мкм. Принцип действия заключается в том, что внутри аппарата создается медленное движение запыленной среды, что позволяет частицам определенного размера осесть в результате действия силы тяжести [8]. В зависимости от размера, плотности частиц и других параметров корректируются размеры гравитационной пылеосадительной камеры [9].

Более эффективными аппаратами сухой очистки для удаления твердых частиц считаются циклонные сепараторы, позволяющие за счет центробежных сил сепарировать из запыленной среды частицы размером до 10–20 мкм в зависимости от модификации аппарата [10]. К недостаткам относят высокое гидравлическое сопротивление [11].

Для удаления из запыленных потоков мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм применяются рукавные фильтры, центробежные фильтры, электростатические фильтры, аппараты мокрой очистки и др. К недостаткам данных аппаратов относят высокие капитальные и эксплуатационные затраты, высокое гидравлическое сопротивление, в некоторых случаях особые требования к запыленной среде, например, взрывоопасные порошки нельзя пропускать через электростатические фильтры. Также данные аппараты быстро забиваются, вследствие чего возникает необходимость их очистки или замены расходных материалов [12–14].

В большинстве случаев технологические линии по очистке запыленных газовых выбросов включают аппараты грубой очистки, т.е. для удаления частиц размером до 10–20 мкм и аппараты тонкой очистки для удаления мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм. В связи с тем, что аппараты тонкой очистки относительно быстро забиваются, а это приводит к увеличению гидравлического сопротивления, в некоторых случаях к уменьшению их эффективности и другим негативным факторам производят остановку технологических линий для их восстановления. Актуальной задачей является увеличение срока службы фильтров тонкой очистки.

Авторами работы была разработана конструкция сепаратора с соосно расположенными трубами, которая представлена на рисунке 1. В связи с актуальностью увеличения срока службы фильтров тонкой очистки предлагается ее использовать перед ними. Существенным достоинством устройства является простота конструкции [15]. Основными элементами являются 2 цилиндрические трубы.

Принцип действия заключается в возникновении множества упорядоченных вихревых потоков в межтрубном пространстве сепаратора [16], за счет которых происходит сепарация мелкодисперсных частиц из запыленного газа. Запыленная среда входит в сепаратор с соосно расположенными трубами через входное отверстие 1. Далее газ и мелкодисперсные частицы движутся по внутренней цилиндрической трубе до прямоугольных щелей 3. После чего часть потока устремляется в щели 3. При прохождении запыленного газа через них каждая струя разделяется на 2 потока, каждый из которых движется в противоположные относительно друг друга стороны, т.е. вправо и влево. За счет того, что прямоугольные щели проделаны в осесимметричном направлении, каждые отдельные потоки при выходе из них формируют вихри, которые «подпирают» соседние, т.е. не дают им развалиться. Таким образом, вместо хаотического восходящего потока создается множество упорядоченных вихрей в межтрубном пространстве устройства (рис. 2). При их вращении создаются центробежные силы высоких значений, которые позволяют выбивать из потока мелкодисперсные частицы в направлении цилиндрических поверхностей внутренней и внешней труб. Очищенный газ движется к выходным отверстиям 2, которые проделаны в пластине. Следует отметить, что количество выходных отверстий 2 в пластине соответствует количеству вихрей в межтрубном пространстве. Наличие отверстий 2 в пластине также позволяет поддерживать целостность вихрей в сепараторе. Вторая часть основного запыленного потока, которая не устремляется в прямоугольные щели 3, проходит через сквозное отверстие внутренней цилиндрической трубы. После чего разворачивается на 180 ° и движется в сторону к выходным отверстиям 2 через межтрубное пространство. Необходимость в его наличии обусловлена исключением забивания внутренней трубы средними и крупными частицами, которые могут оказаться в потоке ввиду несовершенства аппаратов грубой очистки в технологической линии или агломерации частиц.

Важной задачей является интенсификация сепарации мелкодисперсных частиц из газового потока в сепараторе с соосно расположенными трубами. Одним из решений данной задачи является исследование влияния конструктивных параметров на работу устройства.

В связи с этим целью данной работы является численное исследование влияния угла раскрытия прямоугольных щелей на эффективность и гидравлическое сопротивление сепаратора с соосно расположенными трубами.

Для численного моделирования использовался программный комплекс Ansys Fluent. Сперва была создана твердотельная модель сепаратора с соосно расположенными трубами, которая представлена на рисунке 1. На основе нее создавался проточный объем, который разбивался на полиэдрические элементы. Геометрические размеры трехмерной модели: внутренний и внешний диаметр внешней трубы – 82 и 90 мм соответственно, внутренний и внешний диаметр внутренней трубы – 50 и 57 мм соответственно, диаметр круглых отверстий 2 в пластине – 11 мм, высота прямоугольных щелей 3 – 15 мм, высота внутренней трубы – 90 мм, глубина погружения внутренней трубы относительно выходных отверстий 2 – 30 мм, общая длина внутренней трубы – 90 мм (рис. 1).

При численном моделировании расчетная сетка состояла из 1 млн ячеек. Следует отметить, что при 2 и 4 млн ячеек результаты не изменялись. В ходе расчетов задавались начальные и граничные условия. На входе в устройство задавалась входная скорость газового потока, которая варьировалась от 3 до 10 м/с, и массовый расход частиц – 5 г/с. Плотность частиц изменялась от 1000 до 3000 кг/м<sup>3</sup>. Диаметр частиц варьировался от 1 до 15 мкм. На выходе из сепаратора задавалось атмосферное давление  $p_1$ , равное 101 325 Па.

Первоначально конструктивные размеры сепаратора с соосно расположенными трубами были рассчитаны по методике, которая представлена в работе [17]. Было установлено, что для создания 18 упорядоченных вихрей необходимо 9 прямоугольных щелей с углом раскрытия каждой, равным 20°. Однако данная расчетная методика не была подтверждена численными или физическими экспериментами. Вследствие этого в данном исследовании угол раскрытия прямоугольных щелей 3 (рис. 1) изменялся от 16 до 24° при постоянных остальных конструктивных параметрах для оценки поведения вихревой

структуры в межтрубном пространстве, эффективности сепарации и гидравлического сопротивления.

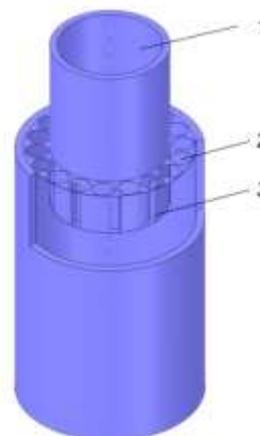


Рисунок 1 – Трехмерная модель сепаратора с соосно расположенными трубами: 1 – входное отверстие для подачи запыленного потока; 2 – выходные отверстия для очищенного газового потока; 3 – прямоугольные щели

Figure 1 - Three-dimensional model of a separator with coaxially arranged pipes: 1 - inlet for the supply of dusty flow, 2 - outlet openings for the purified gas flow, 3 - rectangular slots

Эффективность сепарации частиц из газового потока в сепараторе с соосно расположенными трубами определялась по формуле:

$$E = 1 - \frac{n_k}{n}, \quad (1)$$

где  $n_k$  – количество мелкодисперсных частиц, которые покинули сепаратор с газом через выходные отверстия 2 (рис. 1);  $n$  – общее количество мелкодисперсных частиц, которые поступили в сепаратор.

Следует отметить, что на стенках задавалось условие прилипания частиц. Влияние твердых мелкодисперсных частиц на несущую фазу в расчетах не учитывалось.

Гидравлическое сопротивление сепаратора рассчитывалось по формуле (2):

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (2)$$

где  $p_1$  – давление на входе в сепаратор с соосно расположенными трубами, Па (рис. 1).

Для удобства оценки поведения вихревой структуры в межтрубном пространстве были получены векторные поля скоростей в поперечном сечении сепаратора с соосно расположенными трубами, которые были выполнены на плоскости, располагающейся по-

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ ПРИ ОБЕСПЫЛИВАНИИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ РАЗЛИЧНОМ УГЛЕ РАСКРЫТИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЩЕЛЕЙ

середине прямоугольных щелей при входной скорости газового потока 3 м/с (рис. 2).

Результаты исследований показали, что на эффективность сепарации частиц из запыленного газового потока и на гидравлическое сопротивление сепаратора с соосно расположенными трубами влияет угол раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$ , что вызвано изменением поведения вихревой структуры в межтрубном пространстве устройства (рис. 2).

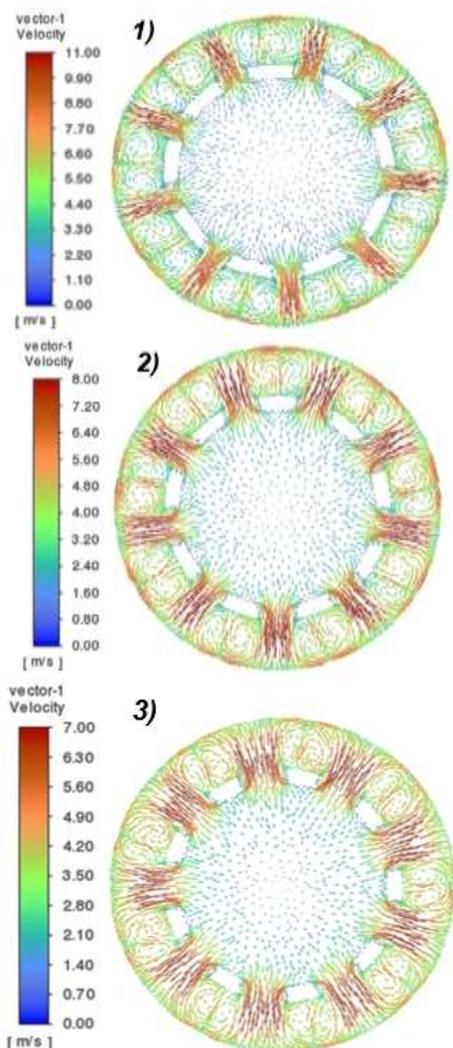


Рисунок 2 – Векторное поле скоростей в поперечном сечении сепаратора с соосно расположенными трубами при различном угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$ : 1 – 16°, 2 – 20°, 3 – 24°

Figure 2 - Vector velocity field in the cross section of a separator with coaxially arranged pipes at different angles of opening of rectangular slots  $\alpha$ : 1 - 16°, 2 - 20°, 3 - 24°

Наиболее упорядоченная структура наблюдается при угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$ , равным 16 и 20°. При увеличении угла  $\alpha$  до 24° вихревая структура становится нестабильной, т.к. в некоторых областях соседние вихри разрушают друг друга в точках контакта, что приводит к появлению зон, в которых потоки хаотичны, что приводит к снижению эффективности. Также было установлено, что по мере увеличения угла раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$  от 16 до 24° снижается максимальная скорость в рассматриваемых сечениях сепаратора от 11 до 7 м/с (рис. 2). При этом эффективность сепарации мелкодисперсных частиц из запыленной среды размером от 1 до 10 мкм в сепараторе составляет в среднем 30,5, 40,3 и 23,3% при угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$  16, 20 и 24° соответственно (рис. 3). Это свидетельствует о том, что при более упорядоченной вихревой структуре достигается максимальная эффективность сепарации, т.к. турбулентность газа сведена к минимуму. При размере частиц более 10 мкм наблюдается высокая эффективность при любом угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$ .

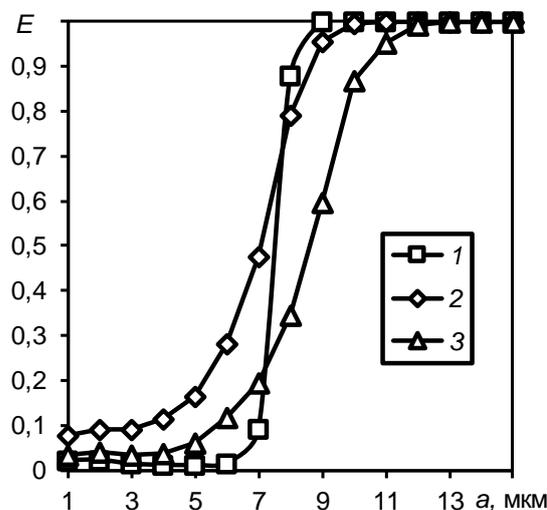


Рисунок 3 – Зависимость эффективности сепаратора с соосно расположенными трубами от диаметра частиц при различном угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$ : 1 – 16°, 2 – 20°, 3 – 24°. Входная скорость газового потока 3 м/с. Плотность частиц 1000 кг/м<sup>3</sup>

Figure 3 - Dependence of the efficiency of a separator with coaxially arranged pipes on the diameter of particles at different angles of opening of rectangular slits  $\alpha$ : 1 - 16°, 2 - 20°, 3 - 24°. The inlet velocity of the gas flow is 3 m/s. Particle density 1000 kg/m<sup>3</sup>

При угле  $\alpha = 16^\circ$ , с одной стороны, наблюдаются как структурированные вихри, так и относительно высокая скорость, приводящая к более высокой центробежной силе; с другой стороны, область между прямоугольными щелями увеличивается относительно  $\alpha = 20^\circ$ , что приводит к увеличению диаметра вихрей, т.е. центробежная сила уменьшается. По-видимому, центробежная сила при угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha = 16^\circ$  в совокупности всех факторов ниже, чем при  $\alpha = 20^\circ$ . Также при  $\alpha = 16^\circ$  наблюдается менее равномерное распределение потока при выходе из щелей относительно  $\alpha = 20^\circ$ . В частности, при  $\alpha = 20^\circ$  большая часть потока при выходе из щелей сразу распределяется в зону завихрений. При  $\alpha = 16^\circ$  большая часть потока упирается во внутреннюю цилиндрическую стенку внешней трубы и далее распределяется по зонам завихрений, вследствие чего могут возникать дополнительные очаги турбулентности, приводящие к снижению эффективности сепарации (рис. 2).

При этом, если рассматривать изменение гидравлического сопротивления сепаратора с соосно расположенными трубами при различном угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$ , то результаты более очевидные: увеличение угла  $\alpha$  от  $16$  до  $24^\circ$  приводит к уменьшению потери давления  $\Delta p$  (рис. 6). Это обусловлено тем, что при увеличении проходного сечения для газового потока сопротивление снижается.

Ввиду того, что максимальная эффективность была определена у сепаратора с соосно расположенными трубами с углом  $\alpha = 20^\circ$ , были исследованы при данном конструктивном оформлении устройства зависимости эффективности сепарации от входной скорости газа (рис. 4) и от плотности мелкодисперсных частиц (рис. 5). В ходе проведения исследований было установлено, что при увеличении входной скорости газового потока эффективность сепаратора с соосно расположенными трубами возрастает, т.к. достигаются более высокие значения центробежных сил (рис. 4).

С увеличением плотности мелкодисперсных частиц также возрастает эффективность сепаратора, т.к. наиболее тяжелые частицы легче поддаются выбиванию из завихренного потока (рис. 5).

Анализ векторных полей скоростей показал, что при угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$ , равным  $16$ ,  $20$  и  $24^\circ$ , скорость движения запыленной среды изменяется до  $11$ ,  $8$  и  $7$  м/с соответственно (рис. 2).

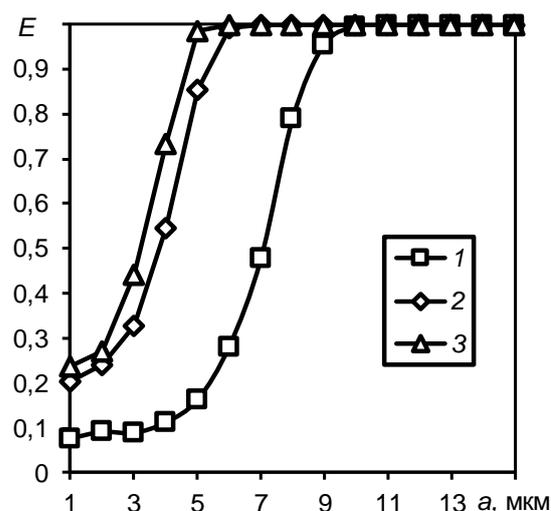


Рисунок 4 – Зависимость эффективности сепаратора с соосно расположенными трубами от диаметра частиц при различной входной скорости газа, м/с: 1–3, 2–7, 3–10. Угол раскрытия прямоугольных щелей  $20^\circ$ . Плотность частиц  $1000 \text{ кг/м}^3$

Figure 4 - Dependence of the efficiency of a separator with coaxially arranged pipes on the diameter of particles at different gas inlet velocity, m/s: 1-3, 2-7, 3-10. The angle of opening of rectangular slits is  $20^\circ$ . Particledensity  $1000 \text{ kg/m}^3$

Эффективность сепаратора с соосно расположенными трубами свыше  $99\%$  достигается при диаметре частиц более  $9$ ,  $10$  и  $12$  мкм при угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$ , равным  $16$ ,  $20$  и  $24^\circ$  соответственно. При этом эффективность ниже  $10\%$  была определена для диаметра частиц менее  $8$ ,  $4$  и  $6$  мкм при угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$ , равным  $16$ ,  $20$  и  $24^\circ$  соответственно. Следует отметить, что при угле  $\alpha$ , равным  $16^\circ$  при диаметре частиц  $7$  мкм, эффективность резко возрастает с  $8,9\%$  до  $87,8\%$ . Такая конструкция может применяться в качестве сепаратора – классификатора (рис. 3).

Эффективность сепаратора с соосно расположенными трубами свыше  $99\%$  достигается при диаметре частиц более  $9$ ,  $5$  и  $4$  мкм при входной скорости газового потока  $3$ ,  $7$  и  $10$  м/с соответственно. При входной скорости газового потока  $3$  м/с эффективность составляет около  $10\%$  для диапазона размеров частиц от  $1$  до  $5$  мкм. При входной скорости газового потока  $7$  и  $10$  м/с минимальная эффективность составляет не более  $27\%$  для частиц размером до  $2$  мкм (рис. 3).

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ ПРИ ОБЕСПЫЛИВАНИИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ РАЗЛИЧНОМ УГЛЕ РАСКРЫТИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЩЕЛЕЙ

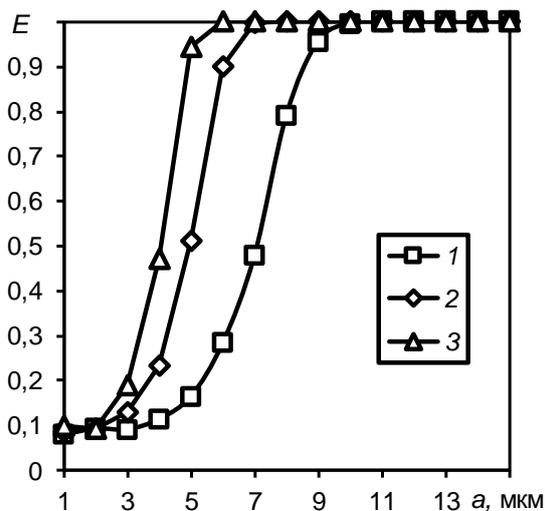


Рисунок 5 – Зависимость эффективности сепаратора с соосно расположенными трубами от диаметра частиц при различной плотности частиц, кг/м<sup>3</sup>: 1 – 1000, 2 – 2000, 3 – 3000. Угол раскрытия прямоугольных щелей 20°. Входная скорость газа 3 м/с

Figure 5 - Dependence of the efficiency of a separator with coaxially arranged tubes on the particle diameter at different particle densities, kg/m<sup>3</sup>: 1 - 1000, 2 - 2000, 3 - 3000. The opening angle of the rectangular panels is 20°. Gas inlet velocity 3 m/s

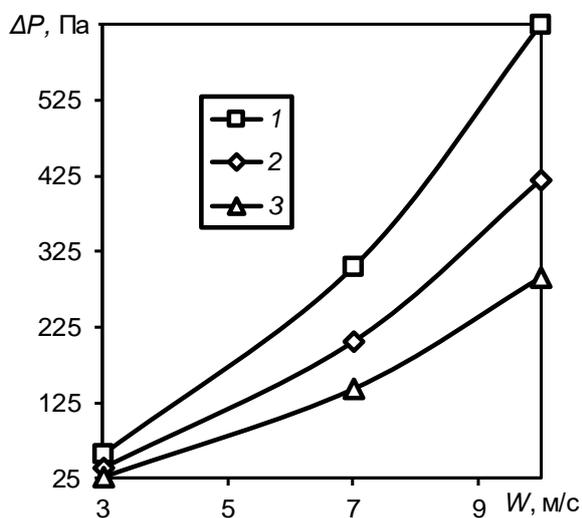


Рисунок 6 – Зависимость потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами от входной скорости газового потока при различном угле раскрытия прямоугольных щелей α: 1– 16°; 2– 20°; 3 – 24°

Figure 6 - Dependence of pressure loss in a separator with coaxially arranged tubes on the inlet velocity of the gas flow at different opening angles of rectangular slots α: 1-16°, 2-20°, 3-24°

Таким образом, эффективность сепаратора с соосно расположенными трубами свыше 99 % достигается при диаметре частиц более 10, 6 и 5 мкм при их плотности, равной 1000, 2000 и 3000 кг/м<sup>3</sup> соответственно. Можно отметить, что наиболее наглядный рост эффективности был определен для диапазона размеров частиц 4–9, 3–7 и 3–5 мкм при их плотности, равной 1000, 2000 и 3000 кг/м<sup>3</sup> соответственно. При этом для частиц меньших размеров эффективность практически не изменялась и составляла около 10 % (рис. 5).

С увеличением входной скорости газового потока от 3 до 10 м/с потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами возрастают в диапазоне 55–625, 37–419 и 25–290 Па при угле раскрытия прямоугольных щелей α, равным 16, 20 и 24° соответственно (рис. 6).

Проведенные исследования показали, что поведение вихревой структуры в межтрубном пространстве сепаратора с соосно расположенными трубами во многом определяет степень эффективности сепарации мелкодисперсных частиц из запыленных потоков. В свою очередь, на поведение вихревой структуры непосредственным образом влияет угол раскрытия прямоугольных щелей α. При оптимальном угле α формируется структура вихревой структуры, близкой к идеальной, т.е. возникновение отрицательных факторов сведено к минимуму: создание хаотических восходящих потоков, существенное смещение вихрей и др., что может привести к снижению эффективности сепаратора. Наиболее эффективный угол α = 20. Можно отметить, что приведенная методика по определению конструктивных параметров сепаратора, которая упоминалась выше, позволяет определять наиболее эффективные параметры, что подтверждено данными исследованиями.

В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть изменение поведения вихревой структуры в межтрубном пространстве сепаратора с соосно расположенными трубами при изменении высоты внутренней трубы и высоты прямоугольных щелей. При этом угол раскрытия прямоугольных щелей α будет приниматься равным 20°.

На основе проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Структурированность вихрей в межтрубном пространстве определяет степень эффективности сепаратора с соосно расположенными трубами;

2. При угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha = 20^\circ$  достигается максимальная эффективность сепарации мелкодисперсных частиц размером до 10 мкм из запыленного потока, равная в среднем 40,3 %;

3. При сепарации мелкодисперсных частиц размером более 10 мкм эффективность сепаратора близка к 100 % при любом угле раскрытия прямоугольных щелей  $\alpha$ ;

4. Эффективность сепарации мелкодисперсных частиц из запыленного потока увеличивается при росте входной скорости газа и плотности частиц, т.к. они легче поддаются выбиванию из завихренного газа;

5. Потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами составляют не более 626 Па при входной скорости газового потока до 10 м/с.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметшин, М.Р. Антропогенные газовые выбросы при сжигании суспензионных топлив и отходов нефтепереработки / М.Р. Ахметшин, Г.С. Няшина, В.В. Медведев // Кокс и химия. – 2021. – № 4. – С. 36–43. – DOI 10.52351/00232815\_2021\_04\_36.
2. Орелкина, Д.И. Газовые выбросы металлургических предприятий. Зоны влияния в приземных слоях атмосферы / Д.И. Орелкина, А.Л. Петелин, И.Э. Дмитриев, Г.С. Подгородецкий, Ю.С. Юсфин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 4–6. – С. 1062–1068.
3. Shtripling, L.O. Content definition of suspended particles of small size in the petrochemical company location / L.O. Shtripling, V.V. Merkulov, V.V. Bazhenov, A.E. Gagloeva, S.V. Belkova, N.S. Varakina, N.P. Kupriyanova // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2018. – Т. 2007. – № 1. – P. 050014.
4. Peukert, W. Industrial separation of fine particles with difficult dust properties / W. Peukert, C. Wadenpohl // Powder technology. – 2001. – Т. 118. – № 1–2. – P. 136–148.
5. Zinurov, V. Design of High-Efficiency Device for Gas Cleaning from Fine Solid Particles / V. Zinurov, A. Dmitriev, V. Kharkov // 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020): Springer International Publishing, 2021. – P. 378–385. – DOI 10.1007/978-3-030-54817-9\_44.
6. Баранов, Д.А. Процессы и аппараты химической технологии : учеб. пособие / Д.А. Баранов. – СПб. : Изд-во «Лань», 2016. – 408 с.
7. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учеб. для вузов: учебник для студентов химико-технологических специальностей вузов / А.Г. Касаткин; А.Г. Касаткин. – Изд. 15-е, стер. – Москва : Альянс, 2009. – 750 с.
8. Кулакова, И.М. Автоматизированная система технологического расчета пылеосадительных камер / И.М. Кулакова, А.Ю. Кулаков, В.С. Ас-ламова // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 74–77.
9. Шаптала, В.Г. Моделирование очистки газов в пылеосадительных камерах цементных печей / В.Г. Шаптала, В.В. Шатала // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 4. – С. 132–137. – DOI 10.12737/article\_58e613384b6612.68398784.
10. Zhang, P. Experimental evaluation of separation performance of fine particles of circulatory circumfluent cyclone separator system / P. Zhang, G. Chen, J. Duan, W. Wang // Separation and Purification Technology. – 2019. – V. 210. – pp. 231–235.
11. Wang, S. Effect of the inlet angle on the performance of a cyclone separator using CFD-DEM / S. Wang, H. Li, R. Wang, X. Wang, R. Tian, Q. Sun // Advanced Powder Technology. – 2019. – V. 30. – № 2. – pp. 227–239.
12. Казюта, В.И. Электростатические явления при фильтрации промышленных газов в рукавных фильтрах / В.И. Казюта // Сталь. – 2013. – № 8. – С. 85–89.
13. Усманова, Р.Р. Аппаратурное оформление системы очистки промышленных выбросов / Р.Р. Усманова, Г.Е. Заиков // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 5. – С. 41–46.
14. Кошкарев, С.А. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита / С.А. Кошкарев, В.Н. Азаров // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 2(54). – С. 18–32. – DOI 10.5862/MCE.54.3.
15. Зинуров, В.Э. 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 // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25. – № 2. – С. 196–206. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-196-206>.
16. Зинуров, В.Э. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления упрощенной модели мультивихревого классификатора с соосно расположенными трубами / В.Э. Зинуров, И.Н. Мадышев, А.А. Каюмова, К.С. Моисеева // Ползуновский вестник. – 2022. – № 2. – С. 108–116. DOI: 10.25712.
17. Зинуров, В.Э. Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля / В.Э. Зинуров, И.Н. Мадышев, А.Р. Ивахненко, И.В. Петрова // Ползуновский вестник. – 2021. – № 2. – С. 205–211.

### Информация об авторах

В. Э. Зинуров – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.

И. И. Насырова – студент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Ка-

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ ПРИ ОБЕСПЫЛИВАНИИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ РАЗЛИЧНОМ УГЛЕ РАСКРЫТИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЩЕЛЕЙ

занского государственного энергетического университета.

*И. Н. Мадышев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Оборудование пищевых производств» Казанского национального исследовательского технологического университета.*

*А. А. Галиев – аспирант кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.*

## REFERENCES

1. Akhmetshin, M.R., Nyashina, G.S. & Medvedev, V.V. (2021). Anthropogenic gas emissions during combustion of suspension fuels and oil refining waste. *Coke and chemistry*. (4). 36-43. DOI 10.52351/00232815\_2021\_04\_36. (In Russ.).
2. Orelkina, D.I., Petelin, A.L., Dmitriev, I.E., Podgorodetsky, G.S. & Yusfin, Yu.S. (2016). Gas emissions of metallurgical enterprises. Zones of influence in the surface layers of the atmosphere. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. (4-6). 1062-1068. (In Russ.).
3. Shtripling, L.O., Merkulov, V.V., Bazhenov, V.V., Gagloeva, A.E., Belkova, S.V., Varakina, N.S. & Kupriyanova, N.P. (2018). Content definition of suspended particles of small size in the petrochemical company location. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, T. No. 1. C. 050014.
4. Peukert, W. & Wadenpohl, C. (2001). Industrial separation of fine particles with difficult dust properties. *eukert. Powder technology*. 118. (1-2). 136-148.
5. Zinurov, V., Dmitriev, A. & Kharkov, V. (2021). Design of High-Efficiency Device for Gas Cleaning from Fine Solid Particles. 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020): Springer International Publishing, 2021. P. 378-385. DOI 10.1007/978-3-030-54817-9\_44.
6. Baranov, D.A. (2016). Processes and apparatuses of chemical technology: A textbook. St. Petersburg: Publishing House "Lan", 408 p. (In Russ.).
7. Kasatkin, A.G. (2009). Basic processes and devices of chemical technology: textbook for universities: textbook for students of chemical and technological specialties of universities. Moscow: Alliance. (In Russ.).
8. Kulakova, I.M., Kulakov, A.Y., Aslamova, V.S. (2010). Automated system of technological calculation of dust-settling chambers. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University*. 317 (5). 74-77. (In Russ.).
9. Shaptala, V.G., Shatala, V.V. (2017). Modeling of gas purification in dust-settling chambers of cement furnaces. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. (4). 132-137. DOI 10.12737/article\_58e613384b6612.68398784 (In Russ.).

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.*

*The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.*

10. Zhang, P., Chen, G. Duan, J. & Wang, W. (2019). Experimental evaluation of separation performance of fine particles of circulatory circumfluent cyclone separator system. *Separation and Purification Technology*. (210). 231-235.

11. Wang, S., Li, H., Wang, R., Wang, X., Tian, R. & Sun, Q. (2019). Effect of the inlet angle on the performance of a cyclone separator using CFD-DEM / S. Wang, *Advanced Powder Technology*. 30(2), 227-239.

12. Kazyuta, V.I. (2013). Electrostatic phenomena in the filtration of industrial gases in bag filters. *Steel*. No. 8. 85-89. (In Russ.).

13. Usmanova, R.R., Zaikov, G.E. (2009). Hardware design of the industrial emissions purification system. *Chemical industry today*. 5. 41-46. (In Russ.).

14. Koshkarev, S.A. & Azarov, V.N. (2015). Evaluation of the effectiveness of the wet cleaning apparatus for dedusting emissions of expanded clay kilns. *Engineering and Construction Magazine*. 2(54). 18-32. DOI 10.5862/MCE.54.3.

15. Zinurov, V.E. Dmitriev, G.R., Badretdinova, R.Ya. Bikkulov, I.N. Madyshev (2021). Estimation of energy costs when capturing fine particles in a separator with coaxially arranged pipes. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 25(2). 196-206. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-2-196-206 (In Russ.).

16. Zinurov, V.E. Manyshev, I.N. Kayumova, A.A. Moiseeva, K.S. (2022). Experimental determination of hydraulic resistance of a simplified model of a multi-vortex classifier with coaxially spaced pipes. *Polzunovskiy vestnik*. (2). 108-116. DOI: 10.25712 (In Russ.).

17. Zinurov, V.E. (2021). Development of a classifier with coaxially arranged pipes for separating a silicate-based material. *Polzunovskiy vestnik*. (2). 205-211. (In Russ.).

## Information about the authors

*V. E. Zinurov - assistant of the Department "Theoretical foundations of heat engineering" of Kazan State Power Engineering University.*

*I. I. Nasyrova - graduate student of the Department "Theoretical foundations of heat engineering" of Kazan State Power Engineering University.*

*I. N. Madyshev - candidate of technical Sciences, senior researcher of the Department "Equipment for food industry" of Kazan National Research Technological University.*

*A. A. Galiev - postgraduate student of the Department "Theoretical foundations of heat engineering" of Kazan State Power Engineering University.*