



Научная статья

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 66.074.2:665.644

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.019



## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛАВЛИВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ КАТАЛИЗАТОРА СЕПАРАЦИОННЫМ УСТРОЙСТВОМ С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Эльмира Ильгизяровна Салахова<sup>1</sup>, Вадим Эдуардович Зинуров<sup>2</sup>,  
Азалия Айратовна Абдуллина<sup>3</sup>, Оксана Сергеевна Дмитриева<sup>4</sup>  
Мадышев Ильнур Наилевич<sup>5</sup>, Вячеслав Владимирович Титенков<sup>6</sup>

<sup>1, 4, 5</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

<sup>2, 3, 6</sup> Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

<sup>1</sup> salahova.elmira@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2915-1980>

<sup>2</sup> vadd\_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

<sup>3</sup> azalkaabdullina69826@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4047-4919>

<sup>4</sup> ja\_deva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6221-0167>

<sup>5</sup> ilnyr\_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

<sup>6</sup> vyacheslavT90@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7314-2194>

**Аннотация.** Механическое разрушение частиц катализатора в псевдооживленном слое значительно сокращает срок их службы и увеличивает эксплуатационные расходы. Процессы дробления и истирания частиц катализатора зависят от множества факторов и приводят к образованию мелкодисперсной пыли, которая будет вынесена из реактора газовым потоком. Главной проблемой на производстве является недостаточная высокая степень очистки выбросов газов от катализаторной пыли с помощью циклонов. В работе авторским коллективом предложена конструкция сепарационного устройства с дугообразными элементами и решеткой, состоящих из множества пластин. Представлена трехмерная модель устройства. Описан механизм улавливания мелкодисперсных частиц в нем. Отмечено конструктивное расположение дугообразных элементов в рядах друг относительно друга. Исследование улавливания твердых частиц пыли сепарационным устройством с дугообразными элементами проводилось численным путем в программном комплексе Ansys-Fluent. В ходе исследований было изучено влияние расходных характеристик потока газа, размер частиц пыли, толщина дугообразных элементов на эффективность работы устройства. Получено, что при меньших толщинах дугообразных элементов (2–3 мм) достигается наибольшая эффективность сепарационного устройства, т.к. волнообразная структура потока близка к идеальной. Наиболее оптимальной скоростью газопылевого потока на входе в сепарационное устройство является 0,5–1 м/с. Эффективность аппарата в среднем составляет 86,5 %. Обработку опытных данных произвели в критериях подобия, построив зависимость  $Eu = f(Re)$ . Установлено, что во время абразивного истирания частиц в качестве аппарата улавливания можно использовать сепарационное устройство с дугообразными элементами, высокая эффективность при низком перепаде давления достигается за счет создания упорядоченной волнообразной структуры газопылевого потока, на основе которой возникают центробежные силы высоких значений при относительно низких скоростях газа на входе в устройство.

**Ключевые слова:** сепарационное устройство, улавливание частиц, мелкодисперсные частицы катализатора, сепарация частиц из газа, центробежный пылеуловитель, циклон, центробежное разделение, инерционный пылеуловитель, численное моделирование движения частиц.

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

---

**Для цитирования:** Численное моделирование улавливания мелкодисперсных частиц катализатора сепарационным устройством с дугообразными элементами / Э. И. Салахова [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 1, С. 161–168. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.019. EDN: <https://elibrary.ru/PGCJVK>.

---

Original article

## NUMERICAL SIMULATION OF THE CAPTURE OF FINE PARTICLES OF A CATALYST BY A SEPARATION DEVICE WITH ARCU-SHAPED ELEMENTS

Elmira I. Salakhova<sup>1</sup>, Vadim E. Zinurov<sup>2</sup>, Azaliya A. Abdullina<sup>3</sup>,  
Oksana S. Dmitrieva<sup>4</sup>, Ilnur N. Madyshev<sup>5</sup>, Vyacheslav V. Titenkov<sup>6</sup>

<sup>1, 4, 5</sup> Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

<sup>2, 3, 6</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>1</sup> [salakhova.elmira@gmail.com](mailto:salakhova.elmira@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2915-1980>

<sup>2</sup> [vadd\\_93@mail.ru](mailto:vadd_93@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

<sup>3</sup> [azalkaabdullina69826@gmail.com](mailto:azalkaabdullina69826@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4047-4919>

<sup>4</sup> [ja\\_deva@mail.ru](mailto:ja_deva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6221-0167>

<sup>5</sup> [ilnyr\\_91@mail.ru](mailto:ilnyr_91@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

<sup>6</sup> [vyacheslavT90@yandex.ru](mailto:vyacheslavT90@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0005-7314-2194>

**Abstract.** Mechanical destruction of catalyst particles in the fluidized bed significantly shortens their service life and increases operating costs. The processes of crushing and abrasion of catalyst particles depend on many factors and lead to the formation of fine dust, which will be carried out of the reactor by the gas stream. The main problem in production is an insufficiently high degree of purification of flue gas emissions from catalyst dust using cyclones. In the work, the team of authors proposed the design of a separation device with arc-shaped elements and a lattice consisting of many plates. A three-dimensional model of the device is presented. The mechanism of capturing fine particles in it is described. The constructive arrangement of arc-shaped elements in rows relative to each other is noted. The study of the capture of solid dust particles by a separation device with arc-different elements was carried out numerically in the Ansys Fluent software package. During the research, the influence of the flow characteristics of the gas flow, the size of dust particles, the thickness of the arc-shaped elements on the efficiency of the device was studied. It is found that with smaller thicknesses of arc-shaped elements (2-3 mm), the greatest efficiency of the separation device is achieved, since the wave-like structure of the flow is close to ideal. The most optimal velocity of the gas-dust flow at the entrance to the separation device is 0.5-1 m / s. The efficiency of the apparatus is on average 86.5%. The experimental data were processed in similarity criteria, constructing the dependence  $Eu = f(Re)$ . It is established that during the abrasive abrasion of particles in the quality of the capture apparatus, a separation device with arc-shaped elements can be used, high efficiency with a low pressure drop is achieved by creating an ordered wave-like structure of the gas-dust flow, on the basis of which centrifugal forces of high values arise at relatively low gas velocities at the inlet to the device.

**Keywords:** separation device, particle trapping, fine catalyst particles, separation of particles from gas, centrifugal dust collector, cyclone, centrifugal separation, inertial dust collector, numerical simulation of particle motion.

**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:** Salakhova, E.I., Zinurov, V.E., Abdullina, A.A., Dmitrieva, O.S., Madyshev, I.N. & Titenkov, V.V. (2024). Numerical simulation of the capture of fine particles of a catalyst by a separation device with arc-shaped elements. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 161-168. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.01.019. EDN: <https://elibrary.ru/PGCJVK>.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Реакторы с кипящим слоем используются для широкого класса каталитических реакций в системах газ–твёрдое тело в химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Важную роль при эксплуатации процесса играет катализатор, который в псевдооживленном слое обычно циркулирует между реакторами и поэтому неизбежно механически повреждается [1, 2].

Основные механизмы, объясняющие разрушение частиц при перемешивании: истирание, фрагментация и декрепитация [3, 4]. Стоит отметить два основных фактора, определяющих скорость истирания материалов: условия процесса (давление, температура, скорость газа и твёрдого тела, время пребывания твёрдого вещества, тип химической реакции, конструкция аппарата) и свойства материала (текстура катализатора, механическая прочность, форма, размер, шероховатость поверхности, твердость и микротрещины) [5]. Что касается влияния размера частиц на их истирание, то наиболее важным фактором является удельная площадь поверхности, однако в нескольких работах показано, что при одинаковой скорости псевдооживления мелкие частицы истираются сильнее, чем более крупные [6].

Частицы, образующиеся при разрушении, обычно имеют небольшой размер и выносятся из системы газовым потоком, что приводит к уменьшению запаса катализатора. В этом случае в реактор с циркулирующим псевдооживленным слоем необходимо подавать свежий катализатор, чтобы обеспечить нормальное функционирование процесса и его активность. При этом затраты промышленности на замену катализатора и остановку процесса могут быть очень высоки. Предметом серьезного беспокойства является не только стабильность катализатора, но и экологические проблемы, связанные с попаданием катализаторной пыли в атмосферу [7].

В верхней части реактора имеются циклоны для улавливания пыли катализатора [8, 9]. В циклонах также происходит истирание частиц при их столкновении друг с другом и о стенки, что приводит к раскалыванию шероховатой поверхности с образованием более мелких частиц с узким распределением по размерам [6, 7]. Большая часть грязной мелочи, образующейся во время абразивного истирания, размером  $\leq 20$  мкм проходит через циклон, что существенно снижает степень

очистки выбросов дымовых газов от катализаторной пыли в атмосферу.

## РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Для улучшения степени очистки от твердых частиц катализаторной пыли в реакторе с псевдооживленным слоем вместо циклона предлагается использовать сепарационное устройство с дугообразными элементами (рис. 1). Основой конструкции являются несколько ряды дугообразных элементов 2 и сепарационная решетка 4, заключенные в корпус 3. Сепарационная решетка 4 состоит из продольных 5 и поперечных V-образных 6 пластин. В нижней части устройства располагается бункер 7.

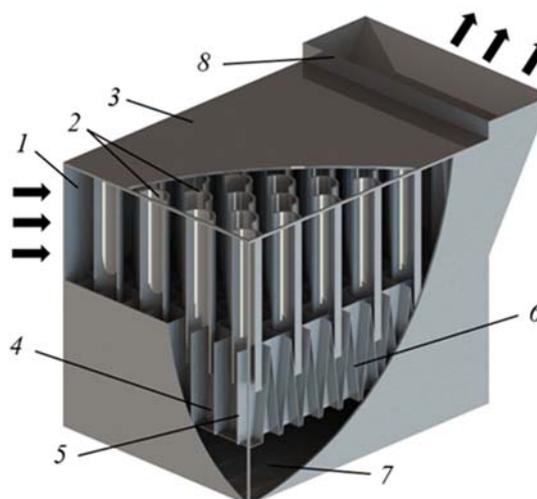


Рисунок 1 – 3D модель сепарационного устройства с дугообразными элементами (вид с разрезом): 1 – входной патрубок; 2 – дугообразные элементы; 3 – корпус; 4 – сепарационная решетка; 5 – продольные пластины; 6 – поперечные V-образные пластины; 7 – бункер; 8 – выходной патрубок

Figure 1 – 3D model of a separation device with arc-shaped elements (split view): 1 - inlet pipe; 2 - arc-shaped elements; 3 - housing; 4 - separation grate; 5 - longitudinal plates; 6 - transverse V-shaped plates; 7 - hopper; 8 - outlet pipe

Улавливание частиц в сепарационном устройстве осуществляется за счет инерционных, центробежных и гравитационных сил [10–12]. Запыленный газ входит в устройство через входной патрубок 1 и набегаем на дугообразные элементы 2, которые расположены относительно направления движения газа вогнутой стороной. В ходе огибания запыленным газом дугообразных элементов возникают центробежные силы, действующие на частицы, что приводит к их выбиванию из структурированного движущегося потока к поверх-

ности элементов 2 [13, 14]. Так, за счет геометрической формы дугообразных элементов 2 внутри них и непосредственно за ними образуются слабовыраженные завихрения, которые создают застойные зоны. Таким образом, большинство частиц после контакта с дугообразными элементами 2 отскакивает в застойные зоны и постепенно, находясь в них под действием сил гравитации, оседают в бункер 7. Наиболее крупные частицы не успевают двигаться в сепарационном устройстве по искривленным линиям тока газа и за счет сил инерции выбиваются из запыленного потока. Очищенный газ от частиц покидает сепарационное устройство через выходной патрубок 8 в верхней его части (рис. 1).

Важным конструктивным элементом предлагаемого устройства является сепарационная решетка 4. Во-первых, ее продольные пластины 5 играют роль ребер жесткости для закрепления дугообразных элементов 2 в нижней части с помощью имеющихся прорезей в них. Во-вторых, сепарационная решетка 4 позволяет минимизировать количество восходящих потоков газа, которые возвращают уловленные частицы из нижней части устройства обратно в волнообразную структуру газа. В частности, V-образные пластины решетки 6 расположены относительно друг друга таким образом, что в нижней части образуются щели небольших размеров до 10 мм, предназначенные для ссыпания уловленных частиц в бункер. При этом обратное течение газа, т.е. образование восходящих потоков, сведено к минимуму при данном конструктивном исполнении.

Расстояние между рядами дугообразных элементов  $l$ , м определяется по формуле:

$$l = \sqrt{0,75d}, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр линии, проходящей через середину стенки дугообразных элементов, м (рис. 2).

Необходимо отметить, что выбор параметра  $d$  обусловлен возможностью исключения учета толщины дугообразных элементов  $\delta$  в формуле (1).

Расстояние между соседними дугообразными элементами в каждом ряду соответствует диаметру  $d$ . Элементы в соседних рядах располагаются таким образом, что находятся посередине между двумя дугообразными элементами переднего и заднего рядов, образуя шахматную компоновку элементов в корпусе устройства (рис. 2).

Расстояние между рядами дугообразных элементов  $l$ , которое вычисляется по формуле (1), было получено на основании общеиз-

вестной формулы для прямоугольного треугольника  $\triangle FCE$ . Видно, что расстояние  $l$  соответствует длинам отрезков  $AB$  и  $FC$ . В свою очередь длина отрезка  $FE$  соответствует  $d/2$ , длина отрезка  $EC$  соответствует диаметру большей окружности и, соответственно, диаметру дугообразного элемента  $d$  (рис. 2).

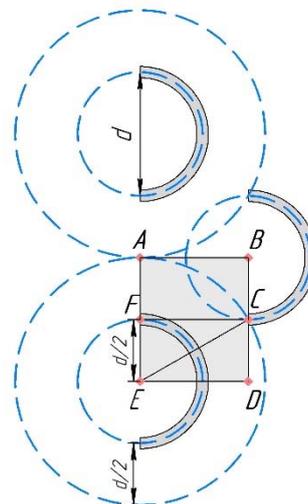


Рисунок 2 – Концепция расположения дугообразных элементов относительно друг друга (вид сверху)

Figure 2 – The concept of the arrangement of arc-shaped elements relative to each other (topview)

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является исследование разработанного сепарационного устройства для очистки газов от катализаторной пыли. Задачи исследования заключаются в проведении численного исследования улавливания мелкодисперсных частиц в сепарационном устройстве с дугообразными элементами, изучении влияния расходных характеристик потока, размера частиц на эффективность работы устройства.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Численное моделирование выполнялось в программном продукте Ansys Fluent. На первом этапе была создана трехмерная твердотельная модель сепарационного устройства. Далее в ней был выделен проточный объем, на основе которого была сгенерирована расчетная сетка, состоящая из элементов полиэдрической формы.

При моделировании газодинамики в программном комплексе решалось уравнение Навье-Стокса, которое дополнялось уравне-

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛАВЛИВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ КАТАЛИЗАТОРА СЕПАРАЦИОННЫМ УСТРОЙСТВОМ С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

нием неразрывности потока. В качестве модели турбулентности была выбрана  $k-\omega$ SST.

Основные размеры твердотельной модели сепарационного устройства: диаметр и высота дугообразных элементов – 30 и 250 мм соответственно, высота и длина сепарационного устройства – 480 и 440 мм соответственно, высота сепарационной решетки – 250 мм, размеры входного патрубка – 148×315 мм, размеры выходного патрубка – 25×315 мм, угол наклона выходного патрубка – 10°, расстояние от нижней части сепарационной решетки до бункера – 100 мм.

При численном моделировании на дне устройства задавалось условие прилипания, на всех остальных стенках задавалось условие отпрыгивания частиц. Учитывая, что геометрия по ширине устройства не изменяется, для упрощения расчетов использовалось условие симметрии. Также варьировались некоторые параметры: входная скорость газопылевого потока  $W$  от 0,5 до 5 м/с, размер частиц от 10 до 170 мкм и толщина дугообразных элементов  $\delta$  от 2 до 4,5 мм. На выходе из сепарационного устройства задавалось атмосферное давление  $p_a$ , равное 101325 Па, плотность частиц составляла 3400 кг/м<sup>3</sup>, плотность воздуха принималась равной 1,204 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент кинематической вязкости воздуха  $\nu$  составлял  $15,06 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством с дугообразными элементами  $E$  рассчитывалась по формуле:

$$E = \frac{n_p}{n}, \quad (2)$$

где  $n_p$  – количество частиц, которые были уловлены сепарационным устройством;  $n$  – количество частиц, которые были запущены в сепарационное устройство.

Для определения гидравлического сопротивления рассчитывался критерий Эйлера  $Eu$ , характеризующий соотношение сил давления и сил инерции:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho W_h^2}, \quad (3)$$

где  $\Delta p$  – потери давления в сепарационном устройстве с дугообразными элементами, Па;  $W_h$  – скорость в сужении между дугообразными элементами, м/с.

Потери давления  $\Delta p$  в устройстве рассчитывались по выражению:

$$\Delta p = p - p_a, \quad (4)$$

где  $p$  – давление на входе в сепарационное устройство с дугообразными элементами, Па.

Скорость в сужении между дугообразными элементами  $W_h$  рассчитывалась по выражению:

$$W_h = 2W, \quad (5)$$

которое было получено на основе уравнения неразрывности:

$$\rho WF = \text{const}, \quad (6)$$

где  $F$  – площадь сечения, через которое протекает газопылевой поток, м<sup>2</sup>.

В расчетах использовался критерий Рейнольдса, характеризующий отношение сил инерции к силам трения:

$$Re = \frac{W_h d}{\nu}. \quad (7)$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований показали, что сепарационное устройство с дугообразными элементами способно улавливать частицы 20 мкм и более с достаточно большой эффективностью (рис. 3–5).

Основным фактором, который нужно учитывать при расчете сепарационного устройства, является скорость газового потока. Она должна быть невысокой и равной 0,5–1 м/с, причем стоит помнить, что скорость потока должна быть ниже скорости уноса осевшей в бункер пыли для предотвращения ее возврата в основной поток. Для частиц пыли размером 20–25 мкм достигается степень улавливания 80 % при скорости движения потока 0,5 м/с (рис. 3).

Изучено влияние толщины дугообразных элементов на эффективность работы устройства по очистке газового потока от мелкодисперсных твердых частиц, результаты представлены графически на рис. 3–5. В среднем эффективность сепарационного устройства при улавливании частиц размером от 10 до 170 мкм при толщине дугообразных элементов 2, 3 и 4,5 мм составляет 86,7, 88,9 и 83,8 % соответственно. Видно, что при меньших толщинах дугообразных элементов (2–3 мм) достигается наибольшая эффективность сепарации частиц из запыленного газа. Это объясняется тем, что при данных толщинах структура потока близка к идеальной. При увеличении толщины дугообразных элементов, начиная с определенного размера, она начинает влиять на структуру потока. Появляются дополнительные точки вихреобразования, которые отрицательно влияют на сепарацию частиц из газового потока.

Отличительной особенностью сепарационного устройства является низкое гидравлическое сопротивление. Характер движения потока преимущественно турбулентный. При

входной скорости газопылевого потока 0,5 – 1 м/с гидравлическое сопротивление устройства составляет от 14 до 100 Па при различных вариантах изготовления толщины дугообразных элементов.

Эффективность сепарационного устройства при улавливании частиц от 10 до 170 мкм при входной скорости запыленного газа 0,5, 1, 3 и 5 м/с составляет в среднем 90,2, 83,8, 85,3 и 87,4 % соответственно при толщине дугообразных элементов 2 мм. При скорости 0,5 м/с частицы размером более 25 мкм улавливаются с эффективностью близкой к 100 % (рис. 3).

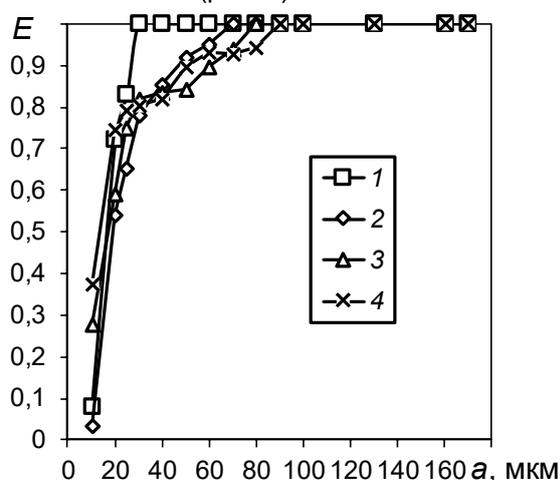


Рисунок 3 – Зависимость эффективности улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством от их диаметра при различной входной скорости запыленного газа  $W$ , м/с: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 3; 4 – 5. Толщина дугообразных элементов 2 мм

Figure 3 – Dependence of efficiency of catching fine particles by separation device on their diameter at different input velocity of dusty gas  $W$ , m/s: 1 - 0,5; 2 - 1; 3 - 3; 4 - 5. Thickness of arc-shaped elements 2 mm

При увеличении толщины дугообразных элементов до 3 мм эффективность сепарационного устройства составляет в среднем 89,2, 84,7, 91,3 и 90,7 % при скорости 0,5, 1, 3 и 5 м/с соответственно. По мере увеличения скорости повышается эффективность улавливания частиц размером до 25 мкм, т.к. центробежные силы увеличиваются. Однако эффективность улавливания более крупных частиц может снижаться, т.к. вероятность их отскока от стенок дугообразных элементов обратно в поток увеличивается (рис. 4).

Эффективность сепарационного устройства при улавливании частиц от 10 до 170 мкм при входной скорости запыленного газа 0,5, 1, 3 и 5 м/с составляет в среднем 87,9, 85,1, 80,7 и 81,4 % соответственно при толщине дугообразных элементов 4,5 мм.

При этом эффективность улавливания частиц размером до 25 мкм составляет в среднем 22,5, 18,2, 37,3 и 48,4 при входной скорости газа 0,5, 1, 3 и 5 м/с соответственно (рис. 5).

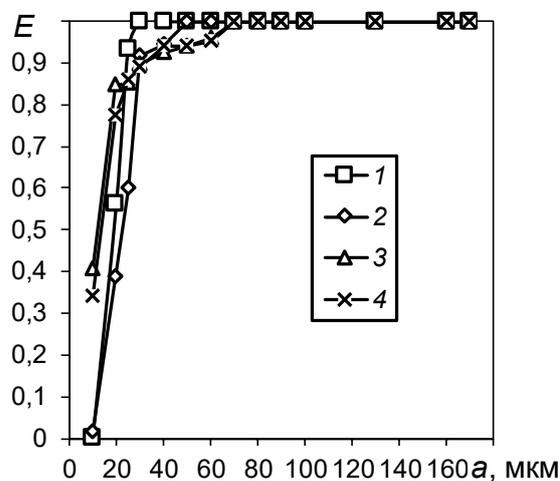


Рисунок 4 – Зависимость эффективности улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством от их диаметра при различной входной скорости запыленного газа  $W$ , м/с: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 3; 4 – 5. Толщина дугообразных элементов 3 мм

Figure 4 – Dependence of efficiency of catching fine particles by separation device on their diameter at different input velocity of dusty gas  $W$ , m/s: 1 - 0,5; 2 - 1; 3 - 3; 4 - 5. Thickness of arc-shaped elements 3 mm

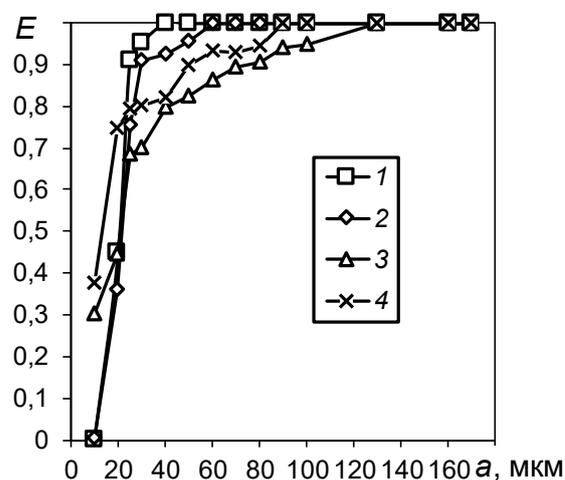


Рисунок 5 – Зависимость эффективности улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством от их диаметра при различной входной скорости запыленного газа  $W$ , м/с: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 3; 4 – 5. Толщина дугообразных элементов 4,5 мм

Figure 5 – Dependence of efficiency of catching fine particles by separation device on their diameter at different input velocity of dusty gas  $W$ , m/s: 1 - 0,5; 2 - 1; 3 - 3; 4 - 5. Thickness of arc-shaped elements 4,5 mm

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛАВЛИВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ КАТАЛИЗАТОРА СЕПАРАЦИОННЫМ УСТРОЙСТВОМ С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Подтверждением того, что при увеличении толщины дугообразных элементов волнообразная структура запыленного газового потока в устройстве претерпевает изменение, приводящее к появлению дополнительных точек вихреобразований, является рост коэффициента давления (критерия Эйлера). Так, при увеличении толщины дугообразных элементов от 2 до 4,5 мм числовое значение критерия Эйлера изменяется от 11,5 до 20,4. При этом числовое значение критерия Рейнольдса варьируется от 1693,2 до 18592,3 (рис. 6).

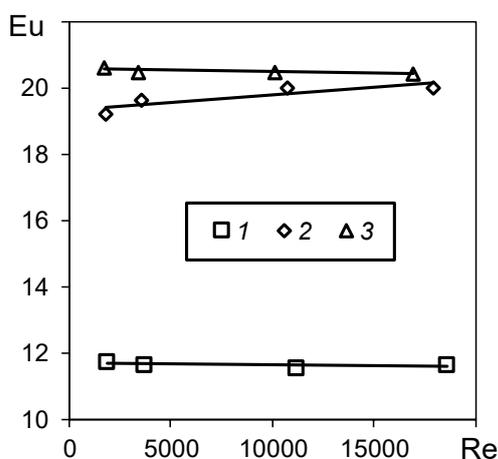


Рисунок 6 – Зависимость критерия Эйлера от критерия Рейнольдса при различной толщине дугообразных элементов  $\delta$ , мм: 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4,5

Figure 6 – Dependence of the Euler criterion on the Reynolds criterion for different thicknesses of arcuate elements  $\delta$ , mm: 1 - 2; 2 - 3; 3 - 4,5

Таким образом, использование сепарационного устройства с дугообразными элементами является целесообразным в качестве альтернативы использования циклонов для очистки газа или же после них для повышения общей эффективности работы, что позволит уменьшить эксплуатационные расходы на загрузку свежего катализатора и останов процесса эксплуатационный срок службы, а также снизить абразивный износ поверхности используемого оборудования.

### ВЫВОДЫ

1. Сепарационная решетка из множества пластин способствуют повышению эффективности улавливания частиц в аппарате путем удерживания уловленных частиц в бункере, что предотвращает возврат частиц обратно в несущий поток.

2. При меньших толщинах дугообразных элементов (2–3 мм) достигается наибольшая эффективность сепарационного устройства,

т.к. волнообразная структура потока близка к идеальной.

3. Наиболее оптимальной скоростью газопылевого потока на входе в сепарационное устройство является 0,5–1 м/с. Эффективность аппарата в среднем составляет 86,5 %.

4. Коэффициент давления (критерий Эйлера) изменяется от 11,5 до 20,4 при толщине дугообразных элементов от 2 до 4,5 мм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрисониди В.А., Басманова В.Р. Современные методы регенерации катализаторов, используемых в нефтегазовом синтезе // TheScientificHeritage. 2020. № 50-3. С. 41–44.

2. Collision characteristics and breakage evolution of particles in fluidizing processes / L. Yang [et al.] // Fuel Processing Technology. 2023. V. 243. P. 107654. DOI10.1016/j.fuproc.2023.107654.

3. Scala F., Chirone R., Salatino P. 6 - Attrition phenomena relevant to fluidized bed combustion and gasification systems : In Woodhead Publishing Series in Energy, Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification. Abington : Woodhead Publishing, 2013. P. 254–315. DOI 10.1533/9780857098801.1.254.

4. Плотникова Н.В. Влияние фрагментации и репликации частиц на молекулярно-массовые характеристики 1,4-транс-полиизопрена при кратковременной полимеризации на титан-магниево катализаторе // Известия Уфимского научного центра РАН. 2020. № 2. С. 35–40. DOI 10.31040/2222-8349-2020-0-2-35-40.

5. Математическое моделирование изменения фракционного состава катализаторов дегидрирования в реакторе с кипящим слоем / А.Н. Катаев [и др.] // Катализ в промышленности. 2015. Т. 15. № 3. С. 60–66. DOI 10.18412/1816-0387-2015-3-60-66.

6. Attrition characteristics of limestone in gas-solid fluidized beds / P. Asiedu-Boateng [et al.] // Powder Technology. 2023. V. 419. P. 118342. DOI 10.1016/j.powtec.2023.118342.

7. Reppenhagen J., Werther J. Catalyst attrition in cyclones // Powder Technology. 2000. V. 113. № 1–2. P. 55–69. DOI 10.1016/S0032-5910(99)00290-9.

8. Асламов А.А., Асламова В.С., Мартинюк В.В. Замена противоточных циклонов на циклоны ПЦПО в блоке каталитического крекинга установки ГК-3 // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2016. № 10. С. 83–86.

9. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова К.В. Усовершенствованная конструкция циклона для очистки промышленных газов от дисперсных примесей // Ползуновский вестник. 2009. № 3. С. 104–106.

10. Влияние конструктивного оформления элементов прямоугольного сепаратора на эффективность очистки газа от твердых частиц / А.В. Дмитриев [и др.] // Вестник технологического университета. 2018. Т. 21. № 9. С. 58–61.

11. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Collecting of finely dispersed particles by means of a separator with the arc-shaped elements // E3S Web of Conferences. 2019. V. 126. P. 00007. DOI 10.1051/e3sconf/201912600007.

12. Салахова Э.И., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э. Исследование структуры газового потока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами // Вестник технологического университета. 2022. Т. 25. № 5. С. 60–64. DOI 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_5\_60.

13. Пылеулавливающее устройство для блоков дегидрирования парафиновых углеводородов с кипящим

слоем катализатора / Э.И. Салахова [и др.] // Катализ в промышленности. 2022. Т. 22. № 2. С. 57–64. DOI 10.18412/1816-0387-2022-2-57-64.

14. Numerical simulation of collection efficiency in separator with inclined double-T elements / V.E. Zinurov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 981(4). P. 042024. DOI 10.1088/1755-1315/981/4/042024.

### Информация об авторах

Э. И. Салахова – старший преподаватель кафедры «Процессы и аппараты химических технологий» НХТИ Казанского национального исследовательского технологического университета.

В. Э. Зинуров – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика» Казанского государственного энергетического университета.

А. А. Абдуллина – студент кафедры «Экономика и организация производства» Казанского государственного энергетического университета.

О. С. Дмитриева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование пищевых производств» Казанского национального исследовательского технологического университета.

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

В. В. Титенков – студент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» Казанского государственного энергетического университета.

### REFERENCES

1. Khrononidi, V.A. & Basmanova, V.R. (2020). Modern methods of regeneration of catalysts used in oil and gas synthesis. *The Scientific Heritage*, 50(3), 41-44. (In Russ.).
2. Yang, L., Song, C., Ai, L., Liu, F., Li, C., Zhu, D. & Guo, C. (2023). Collision characteristics and breakage evolution of particles in fluidizing processes. *Fuel Processing Technology*, 243, 107654. DOI 10.1016/j.fuproc.2023.107654.
3. Scala, F., Chirone, R. & Salatino, P. (2013). *6 - Attrition phenomena relevant to fluidized bed combustion and gasification systems*. Abington: Woodhead Publishing. DOI 10.1533/9780857098801.1.254.
4. Plotnikova, N.V. (2020). Influence of particle fragmentation and replication on molecular mass characteristics of 1,4-transpolyisoprene in short-term polymerization on a titanium-magnesium catalyst. *News of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2, 35-40. (In Russ.). DOI 10.31040/2222-8349-2020-0-2-35-40.
5. Kataev, A.N., Egorov, A.G., Egorova, S.R. & Lamberov, A.A. (2015). Mathematical Modeling of Changes in Particle Size Distribution of Dehydrogenation Catalysts in a Fluidized Bed Reactor. *Catalysis in industry*, 15(3), 60-66. (In Russ.). DOI 10.18412/1816-0387-2015-3-60-66.
6. Asiedu-Boateng, P., Asiedu, N.Y., Zivkovic, V. & Patience, G.S. (2023). Attrition characteristics of limestone in gas-

solid fluidized beds. *Powder Technology*, 419, 118342. DOI 10.1016/j.powtec.2023.118342.

7. Reppenhagen, J. & Werther, J. (2000). Catalyst attrition in cyclones. *Powder Technology*, 113(1-2), 55-69. DOI 10.1016/S0032-5910(99)00290-9.

8. Aslamov, A.A., Aslamova, V.S. & Martinyuk, V.V. (2016). Replacing the cyclones countercurrent cyclone PTSP block catalytic cracker GK-3. *Bulletin of the Angara State Technical University*, 10, 83-86. (In Russ.).

9. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V. & Shalunova, K.V. (2009). Advanced cyclone design for cleaning industrial gases from dispersed impurities. *Polzunovskiy vestnik*, 3, 104-106. (In Russ.).

10. Dmitriev, A.V., Zinurov, V.E. & Dmitrieva, O.S. (2018). The influence of the design of rectangular separator elements on the efficiency of gas purification from solid particles. *Bulletin of the Technological University*, 21(9), 58-61. (In Russ.).

11. Dmitriev, A.V., Zinurov, V.E. & Dmitrieva, O.S. (2019). Collecting of finely dispersed particles by means of a separator with the arc-shaped elements. *E3S Web of Conferences*, 126, 00007. DOI 10.1051/e3sconf/201912600007.

12. Salakhova, E.I., Dmitriev, A.V. & Zinurov, V.E. (2022). Investigation of the structure of the gas flow in a separation device with arc-shaped elements. *Bulletin of the Technological University*, 25(5), 60-64. (In Russ.). DOI 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_5\_60.

13. Salakhova, E.I., Dmitriev, A.V., Zinurov, V.E., Nabiullin, I.R. & Salakhov, I.I. (2022). A dust-collecting device for dehydrogenation of paraffin hydrocarbons with a fluidized catalyst bed. *Catalysis in industry*, 22(2), 57-64. (In Russ.). DOI 10.18412/1816-0387-2022-2-57-64.

14. Zinurov, V.E., Kharkov, V.V., Salakhova, E.I., Vakhitov, M.R. & Kuznetsov, M.G. (2022). Numerical simulation of collection efficiency in separator with inclined double-T elements. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 981(4), 042024. DOI 10.1088/1755-1315/981/4/042024.

### Information about the authors

E.I. Salakhova - senior lecturer of the Department "Processes and Apparatuses of Chemical Technologies", NCTI of Kazan National Research Technological University.

V.E. Zinurov - candidate of technical Sciences, Assistant Professor of the Department "Engineering graphics" of Kazan State Power Engineering University.

A.A. Abdullina - student of the Department "Economics and organization of production" of Kazan State Power Engineering University.

O.S. Dmitrieva - candidate of technical Sciences, Assistant Professor of the Department "Equipment for food industry" of Kazan National Research Technological University.

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

V.V. Titenkov - student of the Department "Nuclear and thermal power plants" of Kazan State Power Engineering University.

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

Статья поступила в редакцию 26 мая 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 05 марта 2024.

The article was received by the editorial board on 26 May 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 05 Mar 2024.