

УДК 697.94

Численное исследование влияния геометрии элементов сепаратора для очистки пыли пищевых производств на его эффективность

В. Э. Зинуров, В. В. Харьков*, А. А. Абдуллина, И. Н. Мадышев

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
03.05.2024;

получена
после доработки
03.06.2024;

принята
к публикации
07.06.2024

Ключевые слова:

очистка воздуха,
фракционная
эффективность,
CFD,
сепарация,
газопылевой поток

На современных пищевых предприятиях задача обеспечения качественной воздухоочистки от пыли является актуальной. Предложен оригинальный сепаратор-пылеуловитель, особенностью которого является наличие конструктивных элементов различной формы, размещенных в шахматном порядке. Данное конструктивное решение обеспечивает формирование волнообразной структуры течения газопылевого потока внутри устройства. Сепарация твердых частиц из воздуха происходит за счет инерционных и центробежных сил. Цель работы – оценка фракционной эффективности данного сепаратора с конструктивными элементами различной геометрической формы в процессе пылеулавливания. Рассматриваются двутавровые, П-образные, дугообразные и V-образные конструктивные элементы. Исследование выполняется с помощью численного моделирования при изменении скорости газопылевого потока от 0,5 до 3 м/с и размера твердых частиц от 10 до 200 мкм. Установлено, что форма конструктивных элементов в значительной мере определяет эффективность отделения пылевидного материала из потока газа. Конструктивные элементы V-образного типа показали наибольшую среднюю эффективность сепарации по сравнению с другими формами при прочих равных условиях. Это связано с тем, что в таком сепараторе частицы направляются к своему апоксу, где скорость частиц уменьшается, что способствует их последующему оседанию в накопительный бункер. Максимальная эффективность для V-образных элементов составила в среднем 80,1 % при входной скорости газопылевого потока, равной 0,5 м/с. Наименьшая эффективность наблюдалась у двутавровых элементов, так как частицы возвращаются в воздушный поток после отскока от стенок.

Для цитирования

Зинуров В. Э. и др. Численное исследование влияния геометрии элементов сепаратора для очистки пыли пищевых производств на его эффективность. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 3. С. 437–446. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-3-437-446>.

Numerical study of influencing geometry of separator elements for cleaning dust of food production on its efficiency

Vadim E. Zinurov, Vitaly V. Kharkov*, Azalia A. Abdullina, Ilnur N. Madyshev

*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;
e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Article info

Received
03.05.2024;

received
in revised form
03.06.2024;

accepted
07.06.2024

Key words:

air cleaning,
fractional efficiency,
CFD,
separation,
dusty gas flow

Abstract

At modern food enterprises, the task of providing high-quality air cleaning from dust is relevant. The paper proposes an original dust separator, the peculiarity of which is the presence of structural elements of different shapes, arranged in a chess order. This design solution ensures the formation of a wave-like structure of the gas-dust flow within the device. The separation of solids from air is due to inertial and centrifugal forces. The aim of the work is to evaluate the fractional efficiency of this separator with structural elements of different geometric shape during the dust capture process. The paper considers I-shaped, P-shaped, arc-shaped and V-shaped structural elements. The study is carried out by numerical simulation at a gas dust flow rate of 0.5 to 3 m/s and a particle size of 10 to 200 μm . During the work it has been found that the shape of the structural elements largely determines the efficiency of separation of dust material from the gas stream. The V-shaped design elements have shown the highest average separation efficiency compared to other shapes under other equal conditions. This is due to the fact that in such a separator the particles are directed to their apex, where the velocity of the particles decreases contributing to their subsequent settling into the bunker. The maximum efficiency for V-shaped elements is on average 80.1 % at a gas dust inlet velocity of 0.5 m/s. The lowest efficiency is observed for I-shaped elements, as particles return to the air stream after rebounding from the walls.

For citation

Zinurov, V. E. et al. 2024. Numerical study of influencing geometry of separator elements for cleaning dust of food production on its efficiency. *Vestnik of MSTU*, 27(3), pp. 437–446. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-3-437-446>.

Введение

Сепараторы, работающие в системе газ – твердые частицы, являются обязательным технологическим и вспомогательным оборудованием в пищевой и пищеперерабатывающей промышленности (Штокман и др., 2007). Они используются для очистки пыли приточного и рециркуляционного воздуха в системах общеобменной и местной вентиляции, в производственном процессе для удаления пылевидных материалов технологических выбросов, а также для улавливания мелких частиц в системах пневматического транспорта (Николаев и др., 2015; Турчанинова и др., 2016; Алексеев и др., 2017). Более того, в пищевых производствах запыленность цеховых помещений часто нарушает санитарный режим предприятия и негативно отражается на качестве готовой продукции, поэтому задача разработки и исследования эффективных устройств для сепарации мелких частиц из газового потока является актуальной (Рудыка и др., 2010; Чистяков и др., 2012; 2016; Терехова и др., 2019).

Определяющими физико-химическими характеристиками пылевидных материалов являются дисперсный состав, природа твердых частиц, плотность, удельная площадь поверхности, экстремумы пределов взрываемости, электрические свойства (Ужов, 1962; Коузов, 1974; Титенок и др., 2020). Знание этих основных характеристик позволяет оценить степень опасности пыли (Ведерников и др., 2023) и является важной информацией для выбора метода сепарации и конструкции подходящего устройства для сепарации мелких частиц из газового потока (Акулич и др., 2004; Рудыка и др., 2016; Шувалов и др., 2017).

В пищевой промышленности применяются сепараторы-пылеотделители разной конструкции: гравитационные, инерционные, пористые, поглощающие, электрические, акустические и т. д. (Shapiro et al., 2005). Выбор устройства основан на эффективности сепарации в соответствии с характером улавливаемой пыли. Так как параметров, влияющих на фракционную эффективность, множество, то предпочтительно при ее оценке использовать методы численного моделирования (Шваб и др., 2015; Sun et al., 2021; Амосов и др., 2022; Zinurov et al., 2022a; Тукмаков и др., 2022).

В статье предлагается оригинальная конструкция сепаратора для улавливания частиц пыли из отходящего воздуха пищевых производств (рис. 1). Основным интересом при расчете сепараторов данного типа является поиск наиболее эффективной геометрической формы конструктивных элементов, которая может влиять на эффективность очистки для частиц различного размера, гидравлическое сопротивление, а также на эрозионный износ рабочих поверхностей.

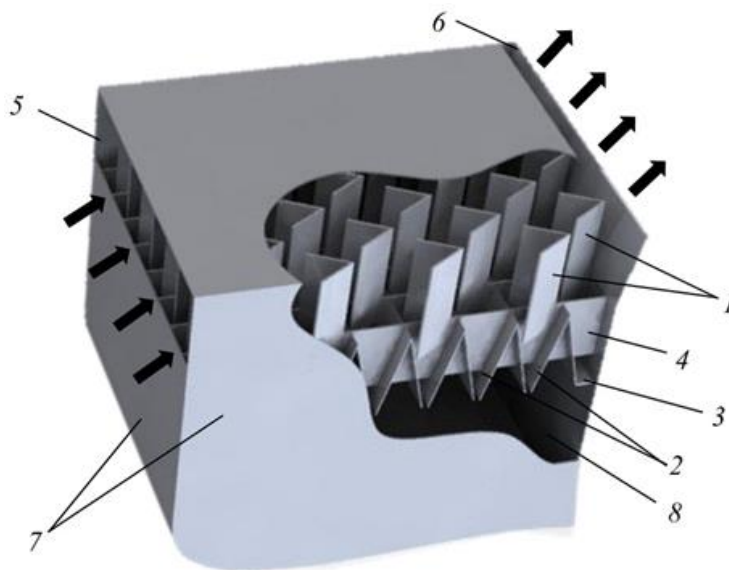


Рис. 1. Сепаратор с V-образными конструктивными элементами (вид с многоступенчатым разрезом):

- 1 – V-образные конструктивные элементы; 2 – наклонные пластины; 3 – выступы;
 4 – прямые пластины; 5 – входное отверстие; 6 – выходное отверстие; 7 – корпус; 8 – бункер
- Fig. 1. Separator with V-shaped structural elements (view with a multi-stage section):
 1 – V-shaped elements; 2 – inclined plates; 3 – flanges; 4 – straight plates; 5 – inlet;
 6 – outlet; 7 – body; 8 – bunker

Целью работы является оценка фракционной эффективности сепаратора с конструктивными элементами различной геометрической формы при очистке газопылевых потоков.

В качестве исследуемых форм конструктивных элементов были приняты двутавровые (Зинуров и др., 2020; Zinurov et al., 2022b), П-образные (Дмитриев и др., 2018), дугообразные (Салахова и др., 2022) и V-образные (рис. 2). Вне зависимости от формы этих элементов устройство сепаратора, принцип работы и механизм улавливания частиц из газопылевого потока сохраняются.

Принцип работы сепаратора с V-образными элементами представлен на рис. 1. Газ с частицами пыли входит в сепаратор-пылеуловитель через входное отверстие 5, далее обтекает конструктивные элементы 1, которые расположены в шахматном порядке в несколько рядов. При их обтекании образуется волнообразная структура газопылевого потока. При этом поток с определенной частотой изменяет свое направление, чередуя его между правой и левой сторонами элементов. Радиус изменения направления газа с частицами соответствует длине стороны элемента V-образной формы, которая может достигать 40 мм. Это приводит к формированию центробежных сил, способных эффективно отделять мелкие частицы от газопылевого потока. Высокие значения центробежных сил могут быть достигнуты при относительно малой скорости на входе в сепаратор, так как радиус поворота небольшой. Также при частой смене направления движения газопылевого потока средние и крупные частицы выбиваются из него за счет инерционных сил. Это приводит к сепарации частиц различного размера из газопылевого потока, которые отлетают к V-образным элементам. В пристеночной области элементов скорость движения газа близка к нулю. Частицы, оказавшиеся в этой области, оседают в бункер 8. Обеспыленный газовый поток покидает сепаратор через выходное отверстие 6. Конструктивно V-образные элементы 1 погружены в пазы, которые проделаны в прямых пластинах 4, выполняющих роль ребер жесткости. К пластинам 4 приварены наклонные пластины 2 и выступы 3, которые предотвращают проскок восходящего газа с частицами.

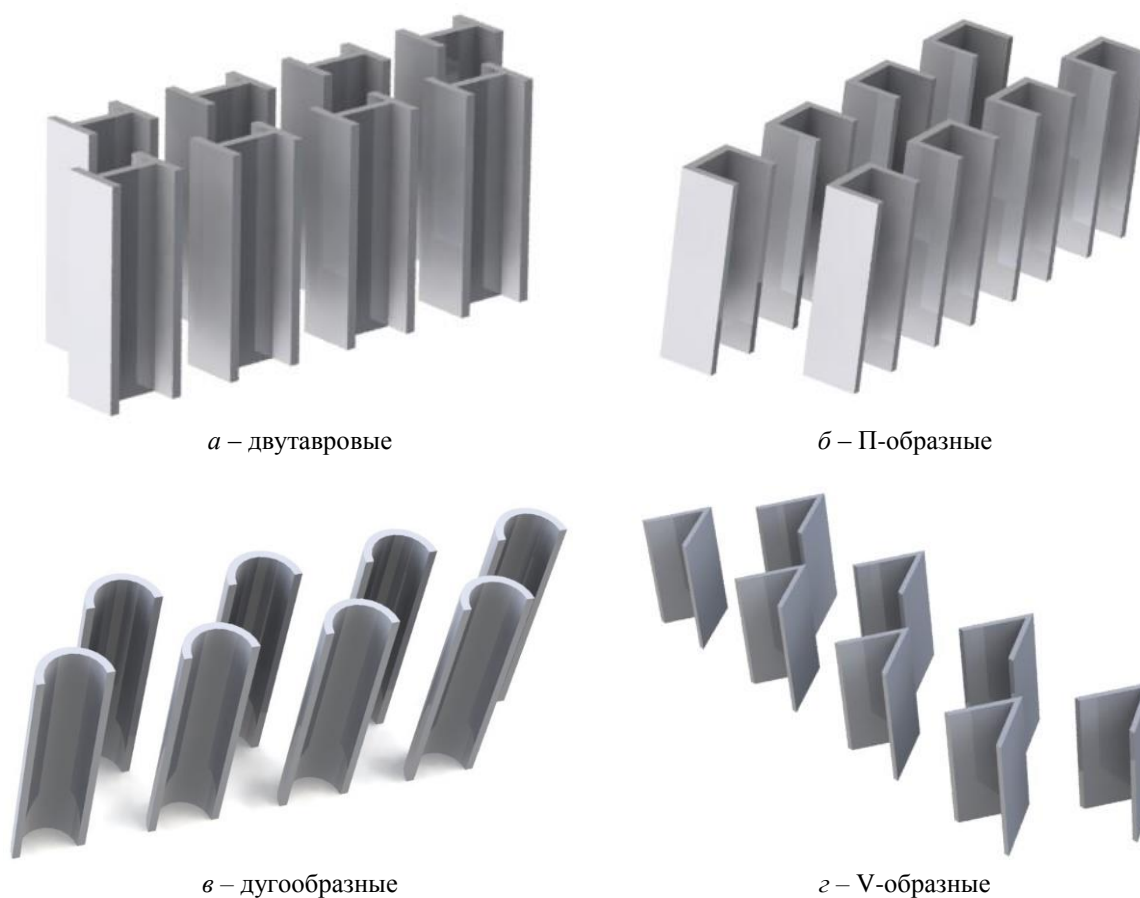


Рис. 2. Формы исследуемых форм конструктивных элементов сепаратора
Fig. 2. Shapes of the studied structural elements of the separator

Материалы и методы

В процессе исследования использовалось численное моделирование в CFD пакете Ansys Fluent, что позволило детально анализировать поведение частиц пыли в сепараторе и оценивать эффективность различных конструктивных решений. Ввиду того что по ширине конструкция не изменяется, применялось условие симметрии. Для упрощения расчетов и имитации реального бункера на нижней стенке (на дне) задавалось условие прилипания частиц. На остальных стенках задавалось условие отражения частиц. Для моделирования движения газового потока применялись уравнения Навье – Стокса. Для расчета турбулентности использовалась модель $k-\omega$ SST, сочетающая преимущества $k-\omega$ модели в пристеночной области и $k-\epsilon$ модели в области, удаленной от стенки. Таким образом, использование модели $k-\omega$ SST позволяет с высокой точностью моделировать поведение потока в углах и у стенок конструктивных элементов сепаратора. Также модель $k-\omega$ SST хорошо адаптируется к режимным изменениям потока, что важно для данной

конструкции сепаратора, работающего с переменными скоростями, вызванными изменением проходного сечения по глубине устройства. Для моделирования динамики дисперсной фазы применялась модель дискретных фаз (DPM), что обеспечивало детальное описание поведения частиц в газопылевом потоке. Взаимодействие между частицами не учитывалось. Моделирование выполнялось в трехмерной постановке. Ключевые геометрические параметры сепаратора согласно рис. 1 включают высоту, длину и количество рядов V-образных конструктивных элементов, составляющих 110 мм, 40 мм и 12 единиц соответственно. Общая высота модели равна 370 мм, глубина погружения конструктивных элементов в пластины составляет 27 мм, а угол между наклонными пластинами – 27°.

В трехмерных моделях других геометрических форм конструктивных элементов изменялись характерные размеры:

для двутавровых – длина элементов и выступов – 40 и 12,5 мм соответственно;

П-образных – длина элементов и выступов – 40 и 12 мм соответственно;

дугообразных – радиус элементов – 20 мм;

V-образных – длина элементов – 40 мм.

В рамках численного моделирования устанавливались граничные условия: скорость газопылевого потока на входе в устройство (W) варьировалась от 0,5 до 3 м/с, а на выходе задавалось атмосферное давление. Размер частиц пыли изменялся в диапазоне от 10 до 200 мкм, а их плотность составляла 3 000 кг/м³.

Для оценки эффективности сепаратора использовалась следующая формула:

$$E = \frac{n_{in} - n_{out}}{n_{in}},$$

где n_{in} – это количество частиц пыли в газовом потоке, поступающем в сепаратор на очистку, шт.; n_{out} – количество частиц пыли в обеспыленном газовом потоке, шт.

Результаты и обсуждение

Исследования подтвердили, что форма конструктивных элементов оказывает значительное влияние на эффективность отделения частиц из газопылевого потока. Определено, что фракционная эффективность сепараторов с различными конструктивными элементами – двутавровыми, П-образными, дугообразными и V-образными – составляет соответственно 50,5 % (рис. 3), 61,1 % (рис. 4), 64,8 % (рис. 5) и 69,2 % (рис. 6) при входной скорости газопылевого потока от 0,5 до 3 м/с и размере частиц от 10 до 200 мкм. Такое изменение эффективности можно объяснить различным характером движения частиц после отскока от стенок конструктивных элементов. Как было отмечено ранее, при выбивании частиц из газопылевого потока, они отлетают к стенкам конструктивных элементов. В зависимости от скорости движения газопылевого потока, размера и плотности частиц они обладают различным начальным импульсом. В случае если начальный импульс частиц был относительно высоким, то существует большая вероятность, что после отскока от конструктивных элементов они попадут обратно в несущую фазу. В противном случае, частицы, отскочив от конструктивных элементов, перемещаются на короткое расстояние – в пристеночную зону, где скорости движения газа близки к нулю. В этой зоне частицы постепенно оседают в бункер. Минимальная эффективность при использовании двутавровых конструктивных элементов связана с тем, что частицы, отскакивая от стенок, направляются обратно в направлении волнообразного газопылевого потока. П-образные, дугообразные и V-образные конструктивные элементы имеют большее внутреннее пространство, поэтому при отскоке частиц от стенок они обычно остаются в пределах внутреннего пространства элементов, не покидая границ. Такое удержание частиц объясняется многократным рикошетом внутри каждого конструктивного элемента, что препятствует их выходу, способствуя увеличению эффективности. Различная геометрическая форма конструктивных элементов создает различную траекторию частиц внутри них. В П-образных и дугообразных конструктивных элементах изгибы и кривизна стенок способствуют созданию дополнительных вихревых потоков. Эти вихри действуют как ловушки для частиц, удерживая их внутри элемента на более длительное время, что увеличивает вероятность их осаждения. V-образные элементы обеспечивают наибольшую эффективность за счет своей остроугольной формы, которая направляет частицы к вершине угла, где они теряют скорость и эффективно осаждаются из-за снижения кинетической энергии. Также установлено, что максимальная эффективность сепаратора достигается при относительно низких входных скоростях ($W \leq 1$ м/с). С увеличением скорости газопылевого потока эффективность E снижается ввиду отскока частиц от конструктивных элементов обратно в поток.

Фракционная эффективность сепаратора с двутавровыми конструктивными элементами составляет в среднем 75,1, 67,1, 43,6 и 16,2 % при скорости газа на входе в него 0,5, 1, 2 и 3 м/с соответственно. При входной скорости газопылевого потока $W \leq 1$ м/с отмечается мгновенный рост эффективности, а с увеличением скорости рост фракционной эффективности при увеличении размера частиц замедляется (рис. 3).

Использование П-образных конструктивных элементов в сепараторе демонстрирует следующую среднюю фракционную эффективность – 74,6, 72,5, 57,4 и 39,8 % при скорости газопылевого потока

на входе в него 0,5, 1, 2 и 3 м/с соответственно. В отличие от двутавровых элементов при равных условиях кривые эффективности на рис. 4 при скорости газопылевого потока $W > 1$ м/с имеют несколько пиков, что объясняется более сложной траекторией частиц во внутреннем пространстве элементов.

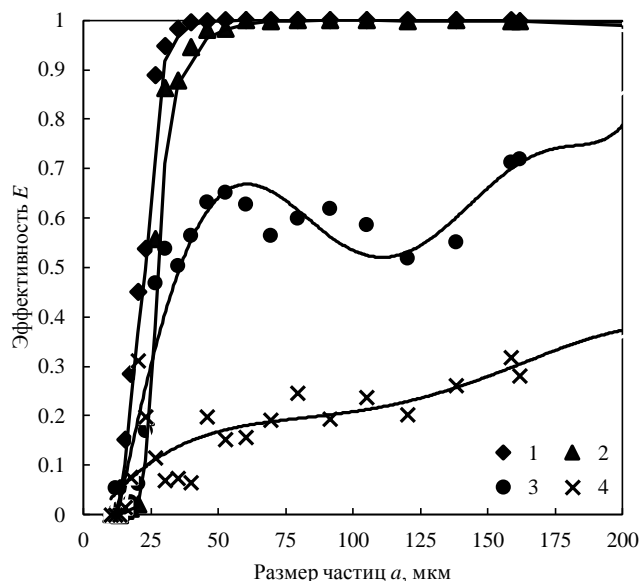


Рис. 3. Фракционная эффективность сепаратора с двутавровыми конструктивными элементами при разных скоростях входящего газопылевого потока W : 1 – 0,5 м/с; 2 – 1 м/с; 3 – 2 м/с; 4 – 3 м/с
Fig. 3. Fractional efficiency of separator with I-shaped structural elements at different inlet velocity of dusty gas flow W : 1 – 0.5 m/s; 2 – 1 m/s; 3 – 2 m/s; 4 – 3 m/s

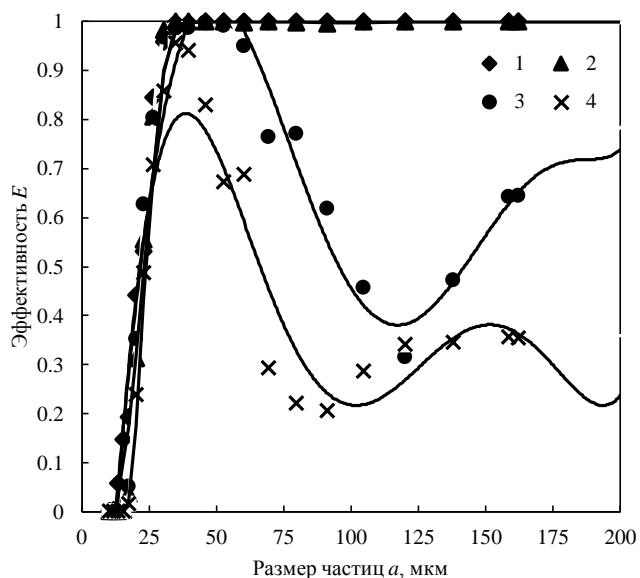


Рис. 4. Фракционная эффективность сепаратора с П-образными конструктивными элементами при разных скоростях входящего газопылевого потока W : 1 – 0,5 м/с; 2 – 1 м/с; 3 – 2 м/с; 4 – 3 м/с
Fig. 4. Fractional efficiency of separator with U-shaped structural elements at different inlet velocity of dusty gas flow W : 1 – 0.5 m/s; 2 – 1 m/s; 3 – 2 m/s; 4 – 3 m/s

При использовании дугообразных конструктивных элементов в сепараторе фракционная эффективность в среднем составляет 77,8, 69,2, 62,7 и 49,4 % при входной скорости газопылевого потока 0,5, 1, 2 и 3 м/с соответственно. В отличие от П-образных конструктивных элементов эффективность для дугообразных элементов, представленных на рис. 5, характеризуется плавными изогнутыми линиями, которые обусловлены естественными вихревыми потоками во внутреннем пространстве. Эти вихри увеличивают время пребывания частиц внутри элемента, повышая вероятность их осаждения.

При использовании V-образных конструктивных элементов в сепараторе фракционная эффективность в среднем составляет 80,1, 76,1, 65,4 и 55,1 % при входной скорости газопылевого потока 0,5, 1, 2 и 3 м/с соответственно. При скорости газопылевого потока $W = 2$ м/с первый и второй пики соответствуют размеру частиц 52 мкм ($E = 99,9\%$) и 138 мкм ($E = 63,7\%$) соответственно. При $W = 3$ м/с первый и второй пики соответствуют размеру частиц 39 мкм ($E = 92,6\%$) и 138 мкм ($E = 25,7\%$). Можно отметить, что при использовании V-образных (рис. 6) относительно П-образных (рис. 4) и дугообразных (рис. 5) конструктивных элементов пики на кривых при входной скорости газопылевого потока $W \geq 2$ м/с располагаются на графиках выше.

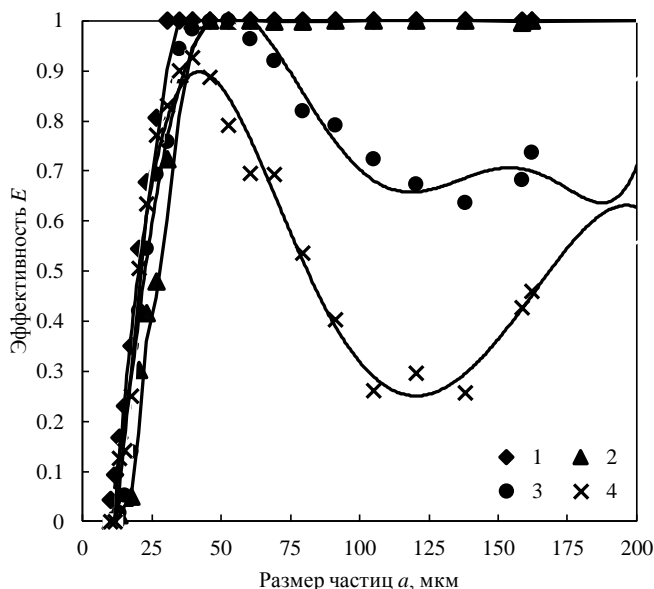


Рис. 5. Фракционная эффективность сепаратора с дугообразными конструктивными элементами при разных скоростях входящего газопылевого потока W : 1 – 0,5 м/с; 2 – 1 м/с; 3 – 2 м/с; 4 – 3 м/с
 Fig. 5. Fractional efficiency of separator with arc-shaped structural elements at different inlet velocity of dusty gas flow W : 1 – 0.5 m/s; 2 – 1 m/s; 3 – 2 m/s; 4 – 3 m/s

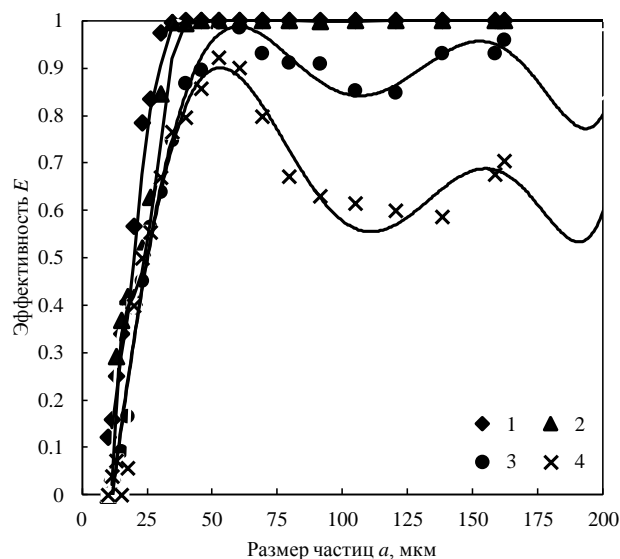


Рис. 6. Фракционная эффективность сепаратора с V-образными конструктивными элементами при разных скоростях входящего газопылевого потока W : 1 – 0,5 м/с; 2 – 1 м/с; 3 – 2 м/с; 4 – 3 м/с
 Fig. 6. Fractional efficiency of separator with V-shaped structural elements at different inlet velocity of dusty gas flow W : 1 – 0.5 m/s; 2 – 1 m/s; 3 – 2 m/s; 4 – 3 m/s

Следовательно, П-образные и дугообразные элементы имеют преимущества за счет создания замедленного потока во внутреннем пространстве, что улучшает условия для осаждения частиц. V-образные элементы демонстрируют наивысшую эффективность благодаря своей угловатой форме, которая направляет частицы к апексу, где они замедляются и эффективно оседают из-за уменьшения кинетической энергии. Двухавровые элементы менее эффективны из-за того, что частицы при отскоке от их стенок быстро возвращаются в направление основного потока, что снижает вероятность их осаждения и уменьшает общую эффективность сепарации. Отличия в геометрической форме конструктивных элементов и динамике газопылевого потока внутри них приводят к заметным различиям в эффективности улавливания частиц сепаратором.

Таким образом, рекомендуется использовать разработанный сепаратор в системах пневматической аспирации различных отраслей пищевой и пищеперерабатывающей промышленности, в частности:

- на масложировых предприятиях, где происходит интенсивное пылеобразование во время технологических операций, связанных с очисткой семян, отделением ядер от лузги, а также при транспортировке и хранении шрота;
- в помещениях мукомольных предприятиях и хлебозаводов, в которых совершаются технологические операции с мукой;
- на предприятиях сахарной промышленности, где пылевыведение наблюдается при сушке сахара и его расфасовке по фракциям, а также при транспортировке и упаковке. Более того, на сахарных заводах также присутствует необходимость очистки воздуха от известковой пыли и пыли жома;
- на крахмало-паточных предприятиях, в которых имеются различные по своим свойствам пыли органического происхождения: сухой крахмал, модифицированный крахмал, глюкоза, декстрин, сухие корма и др.

Заключение

На основе проведенной работы можно сделать следующие основные выводы:

1) геометрическая форма конструктивных элементов играет ключевую роль при улавливании частиц из газопылевого потока. При анализе сравнения двухавровых, П-образных, дугообразных и V-образных конструктивных элементов было выявлено, что V-образные элементы оказываются наиболее эффективными;

2) средняя эффективность сепаратора с использованием двухавровых, П-образных, дугообразных и V-образных элементов составляет 50,5, 61,1, 64,8 и 69,2 % соответственно при скорости газопылевого потока от 0,5 до 3 м/с и размере частиц от 10 до 200 мкм;

3) увеличение скорости газопылевого потока на входе в сепаратор приводит к снижению эффективности вследствие отскока частиц от конструктивных элементов обратно в поток;

4) максимальная эффективность сепаратора достигается при использовании V-образных конструктивных элементов и входной скорости газопылевого потока, равной 0,5 м/с, которая составляет в среднем 80,1 %.

В дальнейших исследованиях планируется сравнить эрозионный износ поверхностей сепаратора при использовании конструктивных элементов различной геометрической формы.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20061, URL: <https://rscf.ru/project/24-29-20061/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Акулич А. В., Лустенков В. М. Исследование гидродинамики вихревого спирально-конического пылеуловителя для разделения газодисперсных потоков пищевых производств // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2004. № 2–3(279–280). С. 99–101. EDN: QCVVRX.
- Алексеев Г. В., Сергачева Е. С., Лей А. Г., Гончаров М. В. Оценка работоспособности новых рабочих органов оболочечного типа для очистки и измельчения пищевого сырья // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 3. С. 533–540. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-3-533-540>.
- Амосов П. В., Бакланов А. А., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Численное моделирование загрязнения атмосферы в подходах случайного выбора дискретных участков пыления и поинтервального распределения размера пыли // Вестник МГТУ. 2022. Т. 25, № 1. С. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>. EDN: YVINJK.
- Ведерников С. А., Романюк Е. В., Рассадников Д. Н. Разработка и использование инерционных пылеуловителей для взрывопожароопасных производств // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4(49). С. 129–135. EDN: OBTBJV.

- Дмитриев А. В., Зинуров В. Э., Дмитриева О. С., Данг С. В. Моделирование процесса разделения водонефтяной эмульсии в прямоугольном сепараторе // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 3(39). С. 65–71. EDN: ITHYXX.
- 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. DOI: 10.34831/EP.2020.23.49.008. EDN: OJKKGX.
- Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л. : Химия. Ленингр. отд-ние, 1974. 279 с.
- Николаев А. Н., Нуртдинов Н. М., Харьков В. В. Эффективность инерционного осаждения частиц на каплях жидкости в полых вихревых аппаратах при очистке выбросов пищевых производств // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18, № 3. С. 294–296. EDN: TJUMNB.
- Рудыка Е. А., Батурина Е. В. Анализ пылеочистного оборудования, используемого при производстве растворимых порошков // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 2(68). С. 193–196. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-2-193-196>.
- Рудыка Е. А., Батурина Е. В., Семенихин О. А., Матющенко И. Н. Модернизация аппаратов очистки отработанного воздуха в пищевой промышленности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6, № 8. С. 40–41. EDN: MTGMGJ.
- 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. EDN: MFFMIT.
- Терехова О. Н., Глебов А. А., Дуюнова Я. С. Тонкая воздушная сепарация дисперсных частиц в процессах переработки зерна // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 5(175). С. 140–147. EDN: KNRGUK.
- Титенок А. В., Амелин А. В., Каценко Е. Н. Производственная пыль // Вестник Брянской ГСХА. 2020. № 4(80). С. 62–72. EDN: HGAAWB.
- Тукмаков А. Л., Харьков В. В., Ахунов А. А. Пневматическая сепарация фракций полидисперсной газозвеси в низкоскоростном потоке // Инженерно-физический журнал. 2022. Т. 95, № 4. С. 918–924. EDN: QESYGG.
- Турчанинова Т. П., Гречанников М. В., Ейвин П. С. Высокоэффективная система очистки технологического воздуха для мукомольных, хлебопекарных и других пищевых предприятий // Пищевая промышленность. 2016. № 6. С. 24–26. EDN: WDG CWJ.
- Ужов В. Н. Борьба с пылью в промышленности. М. : Госхимиздат, 1962. 184 с.
- Чистяков Я. В., Махнин А. А., Невский А. В. Разделение газопылевого потока в центробежно-инерционном пылеуловителе с позиций эколого-экономического подхода // Вестник МИТХТ им. М. В. Ломоносова. 2012. Т. 7, № 3. С. 92–96. EDN: PBNCEJ.
- Чистяков Я. В., Муратова К. М., Володин Н. И. Основы сепарации мелкодисперсной пыли в центробежно-инерционном пылеуловителе // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20, № 8. С. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-8-20-27>. EDN: WHOGAR.
- Шваб А. В., Евсеев Н. С. Исследование процесса сепарации частиц в турбулентном закрученном потоке // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49, № 2. С. 197. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0040357115020128>. EDN: TLOTBF.
- Штокман, Е. А., Шилов В. А., Новгородский Е. Е., Скорик Т. А. [и др.]. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности. М. : АСВ, 2007. 632 с.
- Шувалов С. И., Новосельцева С. С., Веренин А. А., Ворошилов О. А. Математическая модель пылесистемы с шаровой барабанной мельницей для анализа схем классификации // Вестник ИГЭУ. 2017. № 5. С. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2017.5.010-018>. EDN: ZOFLDV.
- Shapiro M., Galperin V. Air classification of solid particles: A review // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2005. Vol. 44, Iss. 2. P. 279–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.02.022>.
- Sun Z., Liang L., Liu C., Zhu Y. CFD simulation and performance optimization of a new horizontal turbo air classifier // Advanced Powder Technology. 2021. Vol. 32, Iss. 4. P. 977–986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.01.041>.
- Zinurov V. E., Kharkov V. V., Salakhova E. I., Vakhitov M. R. [et al.]. Numerical simulation of collection efficiency in separator with inclined double-T elements // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022b. Vol. 981. Article number: 042024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/4/042024>. (Chemical, Ecological, Oil-and-Gas Engineering and Natural Resources).
- Zinurov V., Kharkov V., Pankratov E., Dmitriev A. Numerical study of vortex flow in a classifier with coaxial tubes // International Journal of Engineering and Technology Innovation. 2022a. Vol. 12, N 4. P. 336–346. DOI: <https://doi.org/10.46604/ijeti.2022.9568>.

References

- Akulich, A. V., Lustenkov, A. V. 2004. Study of the hydrodynamics of a vortex spiral-conical dust collector for separating gas-dispersed flows of food production. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3(279–280), pp. 99–101. EDN: QCUVRX. (In Russ.)
- Alekseev, G. V., Sergacheva, E. S., Leu, A. G., Goncharov, M. V. 2017. Assessment of the performance of new shell-type working bodies for cleaning and grinding food raw materials. *Vestnik of MSTU*, 20(3), pp. 533–540. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-3-533-540>. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Baklanov, A. A., Makarov, D. V., Masloboev, V. A. 2022. Numerical modeling of atmospheric pollution in the approaches of random selection of discrete dust areas and interval distribution of dust size. *Vestnik of MSTU*, 25(1), pp. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>. EDN: YBIHJK. (In Russ.)
- Vedernikov, S. A., Romanyuk, E. V., Rassadnikov, D. N. 2023. Development and use of inertial dust collectors for fire and explosion hazardous industries. *Modern Problems of Civil Protection*, 4(49), pp. 129–135. EDN: OBTBJV. (In Russ.)
- Dmitriev, A. V., Zinurov, V. E., Dmitrieva, O. S., Dang, S. V. 2018. Modeling of the separation process of oil-water emulsion in a rectangular separator. *Bulletin of the Kazan State Energy University*, 3(39), pp. 65–71. EDN: ITHYXX. (In Russ.)
- Zinurov, V. E., Dmitriev, A. V., Dmitrieva, O. S. 2020. Collecting fine droplets from a gas flow in a separation device with I-beam elements. *Industrial Power Engineering*, 12, pp. 47–53. DOI: 10.34831/EP.2020.23.49.008. EDN: OJKKGX. (In Russ.)
- Kouzov, P. A. 1974. Fundamentals of analysis of the dispersed composition of industrial dusts and crushed materials. Leningrad. (In Russ.)
- Nikolaev, A. N., Nurtdinov, N. M., Kharkov, V. V. 2015. Efficiency of inertial deposition of particles on liquid drops in hollow vortex devices when cleaning emissions from food production. *Herald of Technological University*, 18(3), pp. 294–296. EDN: TJUMNB. (In Russ.)
- Rudyka, E. A., Baturina, E. V. 2016. Analysis of dust cleaning equipment used in the production of soluble powders. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2(68), pp. 193–196. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-2-193-196>. (In Russ.)
- Rudyka, E. A., Baturina, E. V., Semenikhin, O. A., Matyushchenko, I. N. 2010. Modernization of exhaust air purification devices in the food industry. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 6(8), pp. 40–41. EDN: MTGMGJ. (In Russ.)
- Salakhova, E. I., Dmitriev, A. V., Zinurov, V. E. 2022. Study of the structure of the gas flow in a separation device with arc-shaped elements. *Herald of Technological University*, 25(5), pp. 60–64. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_5_60. EDN: MFFMIT. (In Russ.)
- Terekhova, O. N., Glebov, A. A., Duyunova, Ya. S. 2019. Fine air separation of dispersed particles in grain processing processes. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 5(175), pp. 140–147. EDN: KNRGUK. (In Russ.)
- Titenok, A. V., Amelin, A. V., Katsenko, E. N. 2020. Industrial dust. *Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy*, 4(80), pp. 62–72. EDN: HGAAWB. (In Russ.)
- Tukmakov, A. L., Kharkov, V. V., Akhunov, A. A. 2022. Pneumatic separation of polydisperse gas suspension fractions in a low-speed flow. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 95(4), pp. 918–924. EDN: QESYGG. (In Russ.)
- Turchaninova, T. P., Grechannikov, T. V., Eyvin, P. S. 2016. Highly efficient process air purification system for flour mills, bakeries and other food enterprises. *Food Industry*, 6, pp. 24–26. EDN: WDGWCWJ. (In Russ.)
- Uzhov, V. N. 1962. Fighting dust in industry. Moscow. (In Russ.)
- Chistyakov, Ya. V., Makhnin, A. A., Nevsky, A. V. 2012. Separation of gas and dust flow in a centrifugal inertial dust collector from the standpoint of an environmental and economic approach. *Vestnik MITHT im. M. V. Lomonosova*, 7(3), pp. 92–96. EDN: PBNCEJ. (In Russ.)
- Chistyakov, Ya. V., Muratova, K. M., Volodin, N. I. 2016. Fundamentals of separation of fine dust in a centrifugal-inertial dust collector. *Ecology and Industry of Russia*, 20(8), pp. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-8-20-27>. EDN: WHOGAP. (In Russ.)
- Shvab, A. V., Evseev, N. S. 2015. Study of the process of particle separation in a turbulent swirling flow. *Theoretical foundations of chemical technology*, 49(2), pp. 197. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0040357115020128>. EDN: TLOTBF. (In Russ.)
- Shtokman, E. A., Shilov, V. A., Novgorodsky, E. E., Skorik, T. A. et al. 2007. Ventilation, air conditioning and air purification at food industry enterprises. Moscow. (In Russ.)
- Shuvalov, S. I., Novoseltseva, S. S., Verenin, A. A., Voroshilov, O. A. 2017. Mathematical model of a dust system with a ball drum mill for the analysis of classification schemes. *Bulletin of the Ivanovo State Energy University*, 5, pp. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2017.5.010-018>. EDN: ZOFLDV. (In Russ.)

- Shapiro, M., Galperin, V. 2005. Air classification of solid particles: A review. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(2), pp. 279–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.02.022>.
- Sun, Z., Liang, L., Liu, C., Zhu, Y. 2021. CFD simulation and performance optimization of a new horizontal turbo air classifier. *Advanced Powder Technology*, 32(4), pp. 977–986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.01.041>.
- Zinurov, V. E., Kharkov, V. V., Salakhova, E. I., Vakhitov, M. R. et al. 2022b. Numerical simulation of collection efficiency in separator with inclined double-T elements. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 981. Article number: 042024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/4/042024>. (Chemical, Ecological, Oil-and-Gas Engineering and Natural Resources).
- Zinurov, V., Kharkov, V., Pankratov, E., Dmitriev, A. 2022a. Numerical study of vortex flow in a classifier with coaxial tubes. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 12(4), pp. 336–346. DOI: <https://doi.org/10.46604/ijeti.2022.9568>.

Сведения об авторах

Зинуров Вадим Эдуардович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук;
e-mail: vadd_93@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

Vadim E. Zinurov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering);
e-mail: vadd_93@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

Абдуллина Азалия Айратовна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, студент;
e-mail: azalkaabdullina69826@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4047-4919>

Azalia A. Abdullina – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Student;
e-mail: azalkaabdullina69826@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4047-4919>

Харьков Виталий Викторович – ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Россия, 420015;
Казанский национальный исследовательский технологический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Vitaly V. Kharkov – 68 Karl Marx Str., Kazan, Russia, 420015; Kazan National Research Technological University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Мадьшев Ильнур Наилевич – ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Россия, 420015;
Казанский национальный исследовательский технологический университет, канд. техн. наук;
e-mail: ilnur_91@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

Ilnur N. Madyshev – 68 Karl Marx Str., Kazan, Russia, 420015;
Kazan National Research Technological University, Cand. Sci. (Engineering);
e-mail: ilnur_91@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>