

Э. И. Салахова, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева,
А. В. Дмитриев, А. А. Абдуллина

ВЛИЯНИЕ СЕПАРАЦИОННОЙ РЕШЕТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В УСТРОЙСТВЕ С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Ключевые слова: сепарационное устройство, твердые частицы, реактор с псевдооживленным слоем, улавливание частиц, сепарация частиц из газа, циклонный сепаратор, сепарационная решетка.

В химической промышленности широкое применение получили установки с движущимся псевдооживленным слоем адсорбента за счет большой интенсивности взаимодействия потоков. При этом частицы, образующиеся в результате соударения друг с другом и со стенкой реактора, требуется удалять из отходящих газов. Такая необходимость обусловлена рядом причин: снижение эффективности эксплуатации последующих установок, эрозийный износ механизмов оборудования, потеря части катализатора и пр. В работе предложена конструкция сепарационного устройства с дугообразными элементами для разделения дисперсных частиц и газа. Представлена его трехмерная модель и описан принцип действия. Показано, что одной из проблем его применения являются восходящие паразитные потоки, возвращающие уловленные частицы обратно в поток. Для решения проблемы предложена сепарационная решетка. Целью работы является исследование влияния исполнения сепарационной решетки на эффективность улавливания твердых частиц в устройстве с дугообразными элементами. Для установления влияния линейных размеров сепарационной решетки на эффективность улавливания частиц было рассмотрено три случая – 1. высота верхней части решетки h_1 увеличивалась от 10 до 60 мм, высота нижней части решетки h_2 уменьшалась от 90 до 40 мм, высота решетки h_{gr} оставалась постоянной, 2. высота h_1 увеличивалась от 10 до 60 мм, высота h_2 оставалась постоянной, высота h_{gr} увеличивалась от 100 до 150 мм, 3. высота h_1 увеличивалась от 10 до 110 мм, высота h_2 уменьшалась от 90 до 40 мм, высота h_{gr} увеличивалась от 100 до 150 мм. Исследование проводилось численным путем в программном комплексе Ansys Fluent. В ходе исследований на входе в устройство задавалась скорость запыленного газа равная 1 м/с, на выходе из устройства задавалось атмосферное давление. На основе проведенных исследований было получено, что применение сепарационной решетки обеспечивает повышение эффективности улавливания частиц, т.к. в большей мере она блокирует восходящие паразитные потоки. Эффективность сепарационного устройства при улавливании частиц размером от 10 до 170 мкм при входной скорости запыленного газа 1 м/с составляет в среднем 88,6%. Максимально высокая эффективность устройства с дугообразными элементами достигается при отношении верхней части сепарационной решетки к нижней части $h_1/h_2 \geq 5/7$.

E. I. Salakhova, V. E. Zinurov, O. S. Dmitrieva,
A. V. Dmitriev, A. A. Abdullina

INFLUENCE OF A SEPARATION GRID ON THE EFFICIENCY OF PARTICULATE MATTER CAPTURE IN A DEVICE WITH ARC-SHAPED ELEMENTS

Keywords: separation device, solid particles, reactor with fluidized bed, collection of particles, separation of particles from gas, cyclone separator, separation grid.

In the chemical industry, moving fluidized bed adsorbent plants are widely used due to the high intensity of interaction between the streams. In this case, particles formed as a result of collision with each other and with the reactor wall need to be removed from the exhaust gases. Such necessity is caused by a number of reasons: reduction of efficiency of operation of subsequent installations, erosive wear of equipment mechanisms, loss of part of the catalyst, etc. The design of a separation unit is proposed. In this paper we propose a design of a separation device with arc-shaped elements for separation of dispersed particles and gas. Its three-dimensional model is presented and the principle of operation is described. It is shown that one of the problems of its application is upward parasitic flows returning the captured particles back into the flow. To solve the problem, a separation grid is proposed. The aim of the work is to investigate the influence of the separating grid design on the efficiency of solid particles catching in the device with arc-shaped elements. To establish the influence of the linear dimensions of the separation grating on the efficiency of particle capture, three cases were considered – 1. the height of the upper part of the grating h_1 increased from 10 to 60 mm, the height of the lower part of the grating h_2 decreased from 90 to 40 mm, the height of the grating h_{gr} remained constant, 2. the height h_1 increased from 10 to 60 mm, the height h_2 remained constant, the height h_{gr} increased from 100 to 150 mm, 3. the height h_1 increased from 10 to 110 mm, the height of h_2 decreased from 90 to 40 mm, the height of h_{gr} increased from 100 to 150 mm. The study was carried out numerically in the Ansys Fluent software package. During the research, the dusty gas velocity equal to 1 m/s was set at the inlet of the device, we set atmospheric pressure at the outlet of the device. Based on the conducted studies, it was found that the use of a separation grid provides an increase in the efficiency of particle capture, since to a greater extent it blocks ascending parasitic flows. The efficiency of the separation device in capturing particles from 10 to 170 microns in size at an input velocity of 1 m/s of dusty gas is on average 88.6%. The maximum efficiency of the device with arc-shaped elements is achieved with the ratio of the upper part of the separation grate to the lower part, $h_1/h_2 \geq 5/7$.

Реакторы с псевдооживленным слоем широко используются для проведения реакций газ–твердое ве-

щество во многих отраслях промышленности. В результате интенсивного движения твердых частиц катализатора происходит их соударение друг с другом

[1, 2]. Частицы, образующиеся при разрушении, обычно небольшого размера и уносятся из системы газовым потоком, что приводит к уменьшению количества запаса катализатора. В этом случае в реактор необходимо подавать дополнительные катализаторы, чтобы гарантировать, что процесс продолжит функционировать эффективно [3, 4]. Также стоит отметить, что воздействие таких дисперсных частиц может привести к преждевременной эрозии механизмов установки, что может отразиться на эффективности ее функционирования. С целью отделения катализаторной пыли от потоков на первой стадии процесса разделения обычно используют циклоны [5]. После регенератора авторы [6] предлагают устанавливать узел мокрой очистки в скруббере и продувки для удаления катализаторной пыли. Авторами представлена серия пылеулавливающих сепараторов [7–9], работающих по сухому способу. Несмотря на широкое применение, многие аспекты эксплуатации псевдооживленных слоев катализатора, проблемы увеличения эффективности разделения мелких частиц в связи с их вторичным уносом все еще вызывают трудности [10, 11], поэтому исследования в этой области не теряют своей актуальности.

Авторским коллективом для решения указанной проблемы предлагается конструкция сепарационного устройства с рядами дугообразных элементов 3, расположенных в шахматном порядке, и встроенной сепарационной решеткой (рис. 1).

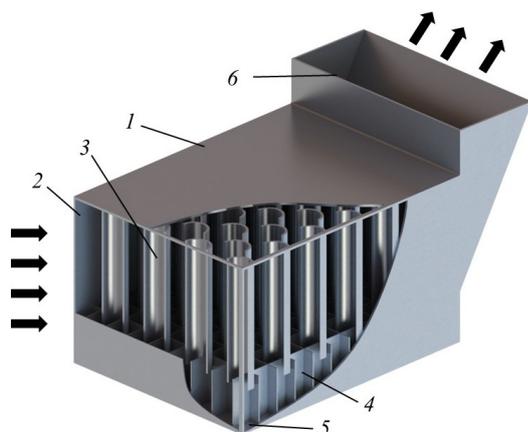


Рис. 1 – Трехмерная модель сепарационного устройства с дугообразными элементами (вид с разрезом): 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – дугообразные элементы; 4 – сепарационная решетка; 5 – бункер; 6 – выходной патрубок

Fig. 1 – Three-dimensional model of a separation device with arc-shaped elements (cross-sectional view): 1 – housing; 2 – inlet pipe; 3 – arc-shaped elements; 4 – separation sieve; 5 – hopper; 6 – outlet pipe

Расстояние между соседними элементами в каждом ряду эквивалентно их двойному радиусу R , м. При этом расстояние между соседними рядами дугообразных элементов рассчитывается по формуле $l = 1,7R$.

Улавливание твердых частиц в сепарационном устройстве происходит за счет того, что, попадая

внутри через патрубок 2 газ набегает навстречу дугообразным элементам 3 [12, 13]. Их шахматное расположение внутри корпуса 1 обеспечивает возникновение волнообразного движения газового потока. За счет частой смены направления запыленного газа крупнодисперсные частицы выбиваются из него и постепенно оседают в бункер 5 устройства. Также возникает центробежное поле. При огибании запыленным газом каждого дугообразного элемента радиус поворота любой частицы равен не более, чем R . Учитывая, что радиус дугообразных элементов R составляет несколько десятков мм, то создается поле с высокими значениями центробежных сил, позволяющее выбивать из запыленного газа мелко- и среднелдисперсные частицы. Они отлетают к дугообразным элементам, ударяются о них и отскакивают в приграничные зоны элементов – зона внутри элементов и непосредственная зона за впереди расположенными элементами [12]. В них образуются застойные зоны в виде слабо циркулирующих вихрей. Твердые частицы, попадая в них, постепенно оседают в бункер устройства. Таким образом, сепарация твердых частиц из запыленного газа в устройстве происходит за счет инерционных и центробежных сил. Очевидно, что больший эффект на сепарацию частиц из газа оказывают центробежные силы [13, 14]. Очищенный газ от твердых частиц выходит из сепарационного устройства через выходной патрубок 6. В ходе ранее проведенных исследований [15] было установлено, что эффективность улавливания частиц является более высокой при относительно невысоких скоростях газа на входе в сепарационное устройство, составляющих до 2 м/с. Это вызвано физическими свойствами твердых частиц катализатора и условиями протекания процессов в реакторе с псевдооживленным слоем. В частности, частицы отскакивают от стенок сепарационных аппаратов при непосредственном контакте с ними. В данном сепарационном устройстве при скоростях запыленного газа более 2 м/с частицы после сепарации из него отлетают с большим импульсом в сторону дугообразных элементов и отскакивают от них не в застойные зоны, а обратно в движущийся поток газа, что приводит к их уносу из устройства. Поэтому особую роль при улавливании частиц из газа играет сепарационная решетка 4 за счет устранения уноса частиц из сепарационного устройства восходящим потоком. При ее отсутствии некоторая часть запыленного газа проходит под дугообразными элементами 3 и часть частиц уносится из устройства с потоком газа. Причем движущийся газ под элементами 3 подхватывает отсепарированные частицы из газа в верхней части устройства, которые в это время постепенно движутся вниз по застойным зонам, и возвращает их в основной поток (рис. 1) [15].

Целью данной работы является исследование влияния конструктивных характеристик сепарационной решетки на эффективность улавливания твердых частиц в устройстве с дугообразными элементами.

Сепарационная решетка (рис. 2) состоит из продольных пластин 2 относительно движения запыленного газа, в которые на определенную глубину вставляются дугообразные элементы 1 для исключения их расшатывания во время эксплуатации устройства, и из

поперечных пластин 3, предотвращающих формирование паразитного потока под дугообразными элементами 1. Исследование проводилось численным путем в программном комплексе Ansys Fluent. В рамках упрощения задачи в трехмерной геометрии модели были исключены нижняя часть устройства и бункер 6. В частности, сепарационная решетка в нижней части перекрывалась пластиной, имитирующая бункер 6 устройства. В ходе моделирования на данной пластине задавалось условие прилипания частиц. Таким образом, можно было оценить количество уловленных частиц сепарационным устройством и, соответственно, эффективность его работы. Недостатком такого упрощения является формирование множества восходящих потоков в ячейках, образованных продольными и поперечными пластинами сепарационной решетки, которые могут искусственно занижить эффективность устройства при численном моделировании. Вероятнее всего, большое количество таких восходящих потоков не будет обладать достаточной подъемной силой для возврата значимого количества осевших частиц в устройство обратно в поток. Однако, эффективность реальной конструкции сепарационного устройства с дугообразными элементами будет выше, чем при численном моделировании.

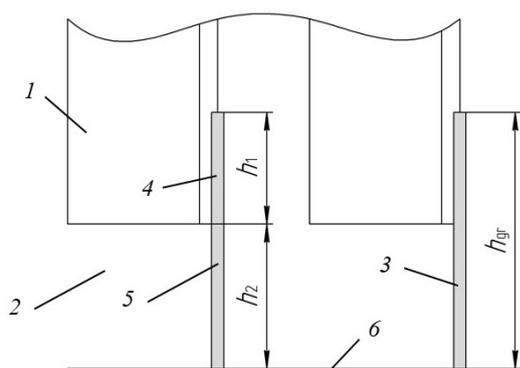


Рис. 2 – Вид слева на сепарационную решетку (в разрезе): 1 – дугообразные элементы; 2 – продольная пластина решетки; 3 – поперечная пластина решетки; 4 – верхняя часть решетки; 5 – нижняя часть решетки; 6 – бункер; h_{gr} – высота сепарационной решетки, h_1 , h_2 – высота верхней и нижней частей сепарационной решетки

Fig. 2 – Left view of the separation grate (in section): 1 – arc-shaped elements; 2 – longitudinal plate of the grate; 3 – transverse plate of the grate; 4 – upper part of the grate; 5 – lower part of the grate; 6 – hopper; h_{gr} – height of the separation grate, h_1 , h_2 – height of the upper and lower parts of the separation grate

При проведении данного исследования было выделено три линейных размера сепарационной решетки: ее высота h_{gr} , высота верхней части h_1 , в которой сделаны прорезы для вставки дугообразных элементов, высота нижней части h_2 , характеризующая расстояние между концом дугообразных элементов и условным бункером (рис. 2). Для установления влияния данных линейных размеров на эффективность улавливания частиц в сепарационном устройстве часть из

них принималась постоянной, другая – варьировалась в определенном диапазоне.

Размеры сепарационного устройства с дугообразными элементами были приняты следующие: наружный диаметр 57 мм, толщина дугообразных элементов 4,5 мм, количество рядов элементов 12 шт., высота элементов 250 мм. Базовые размеры сепарационной решетки: $h_{gr} = 100$ мм, $h_1 = 10$ мм и $h_2 = 90$ мм. В ходе исследований было рассмотрено три случая исполнения решетки:

1. высота h_1 увеличивалась от 10 до 60 мм, высота h_2 уменьшалась от 90 до 40 мм, высота h_{gr} оставалась постоянной;

2. высота h_1 увеличивалась от 10 до 60 мм, высота h_2 оставалась постоянной, высота h_{gr} увеличивалась от 100 до 150 мм;

3. высота h_1 увеличивалась от 10 до 110 мм, высота h_2 уменьшалась от 90 до 40 мм, высота h_{gr} увеличивалась от 100 до 150 мм.

При численном моделировании скорость на входе в сепарационное устройство задавалась равной 1 м/с, на выходе из него задавалось атмосферное давление 101325 Па. Размер частиц a изменялся от 10 до 170 мкм, их плотность составляла 3400 кг/м³.

Эффективность сепарационного устройства с дугообразными элементами оценивалась по формуле:

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

где n_k – количество частиц, которые были не уловлены сепарационным устройством, т.е. его покинули, n – количество частиц, которые были в начальном газовом потоке на входе в устройство.

Результаты исследований показали, что наличие сепарационной решетки в устройстве обеспечивает повышение эффективности улавливания частиц, т.к. в большей мере она блокирует восходящие паразитные потоки газа. Также было установлено, что вставка дугообразных элементов в прорезы, сделанные в продольных пластинах решетки, помимо увеличения прочностных характеристик конструкции сепарационного устройства способствует повышению его эффективности. Так, с увеличением глубины погружения дугообразных элементов в сепарационную решетку увеличивается эффективность улавливания частиц. При исследовании 3 случаев, описанных выше, было установлено, что в среднем эффективность сепарационного устройства для частиц размером от 10 до 170 мкм составляет 88,6 %. При этом для 1-ого, 2-ого и 3-ого случая эффективность устройства в среднем составляет 87,7, 88,8 и 89,5 % соответственно.

Изменение высоты верхней части h_1 сепарационной решетки в большую сторону приводило к увеличению высоты погружения дугообразных элементов (согласно 1-ому случаю) в решетку. Учитывая, что при течении газопылевого потока застойные зоны образуются внутри дугообразных элементов и непосредственно за ними по их высоте, по которым частицы опускаются и оседают в бункер, соответственно, также увеличивается эффективность улавливания частиц сепарационным устройством, т.к. вероятность уноса частиц из области между концом дугообразных элементов и дном устройства, характеризу-

ющаяся размером h_2 , уменьшалась. Однако, при достижении высоты верхней части h_1 сепарационной решетки равной 30 мм (иными словами, при $h_1/h_2 = 3/7$) дальнейшее ее увеличение приводило к изменению эффективности улавливания частиц устройством незначительно. Эффективность сепарационного устройства с дугообразными элементами составляла в среднем 86,2, 86,9, 88,3, 88,4, 88,2, 88,4% при высоте верхней части h_1 решетки 10, 20, 30, 40, 50 и 60 мм соответственно. Рассмотрение отдельного диапазона частиц от 10 до 50 мкм, для которого эффективность E постепенно повышается от 0 до близкой к 100%, показывает, что при высоте верхней части h_1 решетки равной 10, 20, 30, 40, 50 и 60 мм эффективность устройства E составляла в среднем 67,9, 69,6, 72,7, 73,1, 72,5 и 72,9% соответственно (рис. 3).

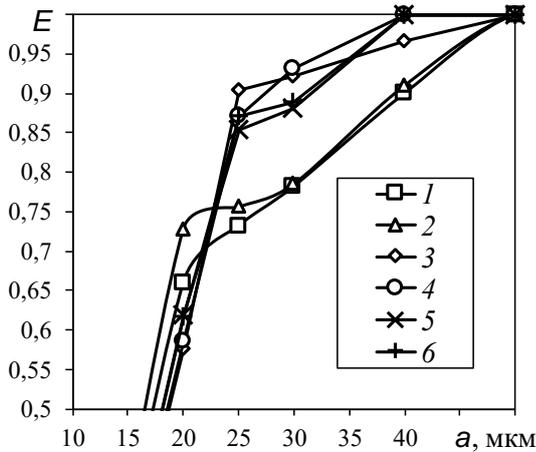


Рис. 3 – Эффективность сепарационного устройства от диаметра частиц при различной высоте верхней части решетки h_1 , мм: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50; 6 – 60

Fig. 3 – The efficiency of the separation device depends on the particle diameter at different heights of the upper part of the lattice h_1 , mm: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50; 6 – 60

При исследовании 2-ого случая изменение конструктивных размеров сепарационной решетки приводило также к увеличению высоты дугообразных элементов аналогично 1-ому случаю (рис. 4), но область между концом дугообразных элементов и дном устройства, характеризующаяся размером h_2 , оставалась постоянной. Визуально видно, что эффективность сепарационного устройства повышается с ростом параметров h_1 и h_{gr} при $h_2 = const$. Иными словами, увеличение высоты застойных зон способствует росту эффективности устройства. В среднем степень улавливания частиц размером от 10 до 170 мкм сепарационным устройством с дугообразными элементами для кривых 1, 2, 3, 4, 5 и 6 на рисунке 4 составляет 86,2, 88,6, 88,8, 89,9, 89,3 и 89,9% соответственно. Рассмотрение отдельного диапазона частиц от 10 до 50 мкм, для которого эффективность E постепенно повышается от 0 до близкой к 100%, показывает, что для кривых 1, 2, 3, 4, 5 и 6 на рисунке 4 эффективность E составляла в среднем 67,9, 73,5, 74,1,

76,5, 75,2 и 76,6% соответственно. Сравнение результатов на рисунках 3 и 4 показывает, что эффективность улавливания частиц сепарационным устройствам с дугообразными элементами в среднем различается на 2,5%. На основе этого можно сделать вывод, что для роста эффективности E необходимо стремиться к большему погружению дугообразных элементов в сепарационную решетку, т.к. это способствует увеличению высоты застойных зон, т.е. каналов, по которым отсепарированные частицы из запыленного потока газа падают в бункер.

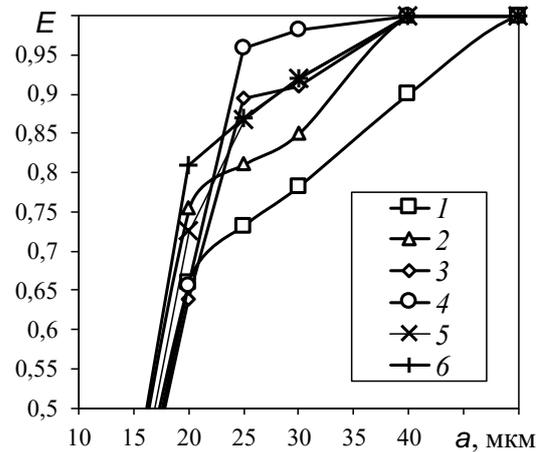


Рис. 4 – Эффективность сепарационного устройства с дугообразными элементами от диаметра частиц при высоте верхней части решетки h_1 и ее полной высоте h_{gr} , мм: 1 – $h_1 = 10$, $h_{gr} = 100$; 2 – $h_1 = 20$, $h_{gr} = 110$; 3 – $h_1 = 30$, $h_{gr} = 120$; 4 – $h_1 = 40$, $h_{gr} = 130$; 5 – $h_1 = 50$, $h_{gr} = 140$; 6 – $h_1 = 60$, $h_{gr} = 150$

Fig. 4 – The efficiency of the separation device with arc-shaped elements depends on the particle diameter at the height of the upper part of the lattice h_1 and its full height h_{gr} , mm: 1 – $h_1 = 10$, $h_{gr} = 100$; 2 – $h_1 = 20$, $h_{gr} = 110$; 3 – $h_1 = 30$, $h_{gr} = 120$; 4 – $h_1 = 40$, $h_{gr} = 130$; 5 – $h_1 = 50$, $h_{gr} = 140$; 6 – $h_1 = 60$, $h_{gr} = 150$

В ходе серии исследований, отнесенных к 3-ому случаю (рис. 5), шаг погружения дугообразных элементов в сепарационную решетку составлял 20 мм, т.е. вдвое больше, чем при исследованиях, отнесенных к 1-ому (рис. 3) и 2-ому (рис. 4) случаям. Соответственно, эффективность сепарационного устройства с дугообразными элементами возросла. В среднем степень улавливания частиц размером от 10 до 170 мкм устройством для кривых 1, 2, 3, 4, 5 и 6 на рисунке 5 составляет 86,2, 87,1, 90,4, 90,9, 90,8 и 91,3% соответственно. Рассмотрение отдельного диапазона частиц от 10 до 50 мкм, для которого эффективность E постепенно повышается от 0 до близкой к 100%, показывает, что для кривых 1, 2, 3, 4, 5 и 6 на рисунке 5 эффективность E составляла в среднем 67,9, 75,1, 77,6, 78,8, 78,7 и 79,8% соответственно. Можно отметить, что для 3-6 кривых эффективность устройства практически одинакова, т.е. максимально высокая эффективность устройства достигается при отношении верхней части сепарационной решетки h_1 к нижней части h_2 равной $5/7$ и выше (рис. 5).

Потери давления в сепарационном устройстве с дугообразными элементами при входной скорости запыленного газа равной 1 м/с не превышают 100 Па.

Таким образом, паразитные восходящие потоки, возвращающие уловленные частицы обратно в поток запыленного газа, могут быть эффективно разрушены сепарационной решеткой. Применение сепарационного устройства с дугообразными элементами при относительно малых входных скоростях запыленного газа для улавливания абразивных частиц в реакторах с псевдоожиженным слоем позволяет значительно снизить изнашивание его стенок относительно использования, например, циклонных сепараторов.

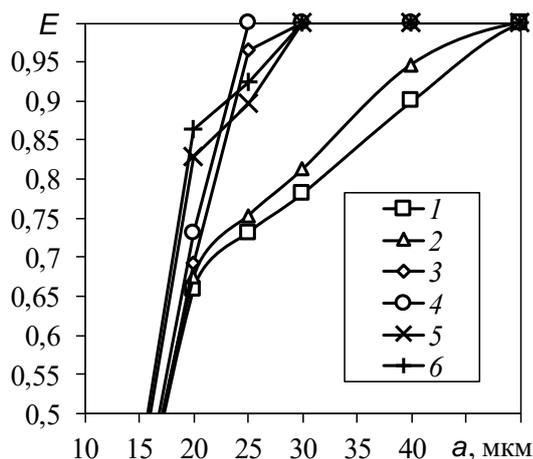


Рис. 5 – Эффективность сепарационного устройства от диаметра частиц при высоте верхней части решетки h_1 , высоте нижней части решетки h_2 и ее полной высоте h_{gr} , мм: 1 – $h_1 = 10$, $h_2 = 90$ и $h_{gr} = 100$; 2 – $h_1 = 30$, $h_2 = 80$ и $h_{gr} = 110$; 3 – $h_1 = 50$, $h_2 = 70$ и $h_{gr} = 120$; 4 – $h_1 = 70$, $h_2 = 60$ и $h_{gr} = 130$; 5 – $h_1 = 90$, $h_2 = 50$ и $h_{gr} = 140$; 6 – $h_1 = 110$, $h_2 = 40$ и $h_{gr} = 150$

Fig. 5 – The efficiency of the separation device depends on the particle diameter at the height of the upper part of the lattice h_1 , the height of the lower particles of the lattice h_2 and its total height h_{gr} , mm: 1 – $h_1 = 10$, $h_2 = 90$ и $h_{gr} = 100$; 2 – $h_1 = 30$, $h_2 = 80$ и $h_{gr} = 110$; 3 – $h_1 = 50$, $h_2 = 70$ и $h_{gr} = 120$; 4 – $h_1 = 70$, $h_2 = 60$ и $h_{gr} = 130$; 5 – $h_1 = 90$, $h_2 = 50$ и $h_{gr} = 140$; 6 – $h_1 = 110$, $h_2 = 40$ и $h_{gr} = 150$

На основе проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**.

1. Наличие сепарационной решетки в устройстве обеспечивает повышение эффективности улавливания частиц, т.к. в большей мере она блокирует восходящие паразитные потоки газа.

2. Эффективность сепарационного устройства при улавливании частиц размером от 10 до 170 мкм при входной скорости запыленного газа 1 м/с составляет в среднем 88,6%.

3. С увеличением глубины погружению дугообразных элементов в сепарационную решетку повышается эффективность улавливания частиц устройством, т.к. высота застойных зон внутри элементов и непосредственно за ними, по которым частицы оседают в бункер, тоже увеличивается.

4. Максимально высокая эффективность устройства с дугообразными элементами достигается при отношении верхней части сепарационной решетки к нижней части h_1/h_2 равной 5/7 и выше.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ СП – 3577.2022.1.

This work was supported by the scholarship of the President of the Russian Federation SP - 3577.2022.1.

Литература

1. M.J. Rhodes, *Introduction to particle technology*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2008. 450 p.
2. R. Cocco, S.R. Karri, T. Knowlton, *Chemical Engineering Progress*, **110**, 11, 21-29 (2014).
3. F.H. Wu, W. Dongfang, *Powder Technol.*, **305**, 289-296 (2017).
4. J.M. Whitcombe, I.E. Agranovski, R.D. Braddock, *Powder Technol.*, **137**, 3, 120-130 (2003).
5. J. Reppenhagen, J. Werther, *Powder Technol.*, **113**, 1-2, 55-69 (2000).
6. Е.И. Черкасова, А.Х. Хакимов, *Вестник технологического университета*, **20**, 17, 59-62 (2017).
7. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.И. Поляков, *Вестник технологического университета*, **21**, 11, 66-69 (2018).
8. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, М.О. Уткин, *Вестник технологического университета*, **22**, 10, 68-71 (2019).
9. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.В. Соловьева, Д.Н. Латыпов, *Вестник технологического университета*, **22**, 8, 42-46 (2019).
10. L. Yang, C. Song, L. Ai, F. Liu, C. Li, D. Zhu, C. Guo, *Fuel Processing Technology*, **243**, 107654 (2023).
11. V. Francia, K. Wu, M.-O. Coppens, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **159**, 108143, (2021).
12. Э.И. Салахова, А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, И.Р. Набиуллин, И.И. Салахов, *Катализ в промышленности*, **22**, 2, 57-64 (2022).
13. Э.И. Салахова, А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, *Вестник технологического университета*, **25**, 5, 60-64 (2022).
14. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, В.В. Харьков, Т.С. Петрова, *Вестник технологического университета*, **23**, 2, 82-85 (2020).
15. E.I. Salakhova, V.E. Zinurov, V.V. Kharkov, A.A. Abdullina, T.V. Pham, *E3S Web of Conf.*, **389**, 02018 (2023).

References

1. M.J. Rhodes, *Introduction to particle technology*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2008. 450 p.
2. R. Cocco, S.R. Karri, T. Knowlton, *Chemical Engineering Progress*, 110(11):21-29 (2014).
3. F.H. Wu, W. Dongfang, *Powder Technol.*, 305:289-296 (2017).
4. J.M. Whitcombe, I.E. Agranovski, R.D. Braddock, *Powder Technol.*, 137(3):120-130 (2003).
5. J. Reppenhagen, J. Werther, *Powder Technol.*, 113(1-2):55-69 (2000).
6. E.I. Cherkasova, A.H. Hakimov, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 20(17):59-62 (2017).
7. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, A.I. Polyakov, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 21(11):66-69 (2018).
8. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, M.O. Utkin, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 22(10):68-71 (2019).
9. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, O.V. Solov'eva, D.N. Latypov, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 22(8):42-46 (2019).
10. L. Yang, C. Song, L. Ai, F. Liu, C. Li, D. Zhu, C. Guo, *Fuel Processing Technology*, 243:107654 (2023).
11. V. Francia, K. Wu, M.-O. Coppens, *Chemical Engineering*

and Processing - Process Intensification, 159:108143, (2021).
12. E.I. Salahova, A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, I.R. Nabiullin, I.I. Salahov, *Kataliz v promyshlennosti*, 22(2):57-64 (2022).
13. E.I. Salahova, A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 25(5):60-64 (2022).

14. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, V.V. Har'kov, T.S. Petrova, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 23(2):82-85 (2020).
15. E.I. Salakhova, V.E. Zinurov, V.V. Kharkov, A.A. Abdullina, T.V. Pham, *E3S Web of Conf.*, 389:02018 (2023).

© **Э. И. Салахова** – ст. препод. кафедры ПАХТ НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ», salahova.elmira@gmail.com, **В. Э. Зинуров** – к.т.н., ассистент кафедры ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru, **О. С. Дмитриева** – к.т.н., доцент кафедры ОПП ФГБОУ ВО «КНИТУ», ja_deva@mail.ru, **А. В. Дмитриев** – д.т.н., зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com, **А. А. Абдуллина** – студент кафедры ЭОП ФГБОУ ВО «КГЭУ», azalkaabdullina69826@gmail.com.

© **E. I. Salakhova** – Senior Lecturer of the department of Processes and Apparatuses of Chemical Technologies, Nizhnekamsk Chemical Technological Institute branch of Kazan National Research Technological University (KNRTU), salahova.elmira@gmail.com, **V. E. Zinurov** – PhD (Technical Sci.), Assistant of the department of Theoretical Bases of Heat Engineering (TBHE), Kazan State Power Engineering University (KSPEU), vadd_93@mail.ru, **O. S. Dmitrieva** – PhD (Technical Sci.), Assistant Professor of the Food Processing Equipment department, KNRTU, ja_deva@mail.ru, **A. V. Dmitriev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Head of the TBHE department, KSPEU, ieremiada@gmail.com, **A. A. Abdullina** – Student, department of Economics and Organization of Production, KSPEU, azalkaabdullina69826@gmail.com.