

В.Э. Зинуров, канд. техн. наук, А.В. Дмитриев, д-р техн. наук, А.А. Абдуллина (Казанский государственный энергетический университет, Россия); Э.И. Салахова, О.С. Дмитриева, канд. техн. наук (Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия) E-mail: ja_deva@mail.ru

Сепарационное устройство для улавливания мелкодисперсных частиц, образующихся при работе реакторов с псевдоожиженным слоем*

Реакторы с псевдоожиженным слоем, широко применяемые в химической отрасли промышленности (например, для проведения гетерогенных каталитических реакций) характеризуются высокой интенсивностью контакта фаз и высокой эффективностью тепло-массообмена. Однако в результате интенсивных движения и перемешивания псевдоожиженного слоя частицы катализатора подвергаются высоким механическим нагрузкам из-за столкновений между частицами и со стенками аппарата [1].

Процесс истирания зависит от многих факторов (свойств частиц, условий псевдоожижения, структуры псевдоожиженного слоя и др.) [2, 3], поэтому гидродинамика слоя со временем изменяется [4, 5].

Основным следствием истирания частиц псевдоожиженного слоя является образование мелкодисперсных частиц, уносимых из реактора газовым потоком, что приводит к уменьшению количества запаса катализатора и снижению эффективности работы реактора. Замена истертого катализатора относится к основным эксплуатационным расходам [6]. Кроме того, унос образовавшейся пыли отходящими газами влияет на работу последующих установок: снижается эффективность их эксплуатации, увеличивается эрозийный износ механизмов оборудования, интенсифицируются процессы коррозии металлов, также унос пыли влияет на загрязнение воздуха и (при определенных концентрациях) — на здоровье людей.

Предупреждение потерь катализатора с выбросами дымовых газов

в атмосферу и возврат катализатора в псевдоожиженный слой обеспечиваются пылеуловителями, среди которых наиболее востребованы циклоны [7]. В большинстве случаев размер исходных частиц катализатора в псевдоожиженном слое находится в диапазоне 10...100 мкм [8], однако значительное количество частиц размерами <20 мкм теряется из циклонов. Низкая эффективность разделения мелких частиц в циклонах объясняется тем, что сила аэродинамического сопротивления при этом значительно превышает центробежную силу [9]. В связи с этим актуальны исследования и разработки новых пылеулавливающих устройств для повышения эффективности очистки газов от мелких частиц катализатора.

Для улавливания мелкодисперсных частиц из газовых потоков предлагается сепарационное устройство с дугообразными элементами (рис. 1), основные составляющие конструкции — размещенные в корпусе 3 дугообразные элементы 2, врезанные в сепарационную решетку 4.

В ходе предыдущих исследований [10, 11] установлено, что гидравлическое сопротивление данного устройства — меньше гидравлического сопротивления циклонного сепаратора.

Принцип действия предлагаемого сепарационного устройства. Запыленный газовый поток при подаче в устройство (через входной патрубок 1) набегае на дугообразные элементы 2, расположенные в сепарационном устройстве в шахматном порядке [12, 13], в результате формируется волнообразная структура газового потока (рис. 2).

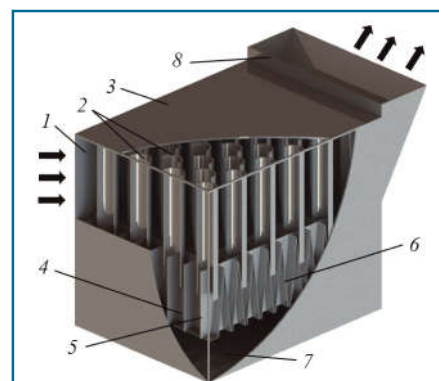
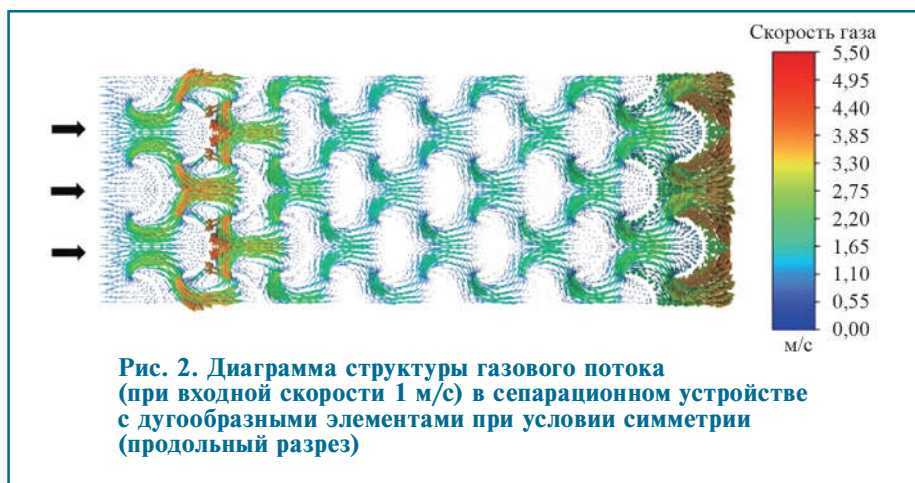


Рис. 1. Трехмерная модель сепарационного устройства с дугообразными элементами (вид с местным разрезом):

- 1 — входной патрубок;
- 2 — дугообразные элементы;
- 3 — корпус;
- 4 — сепарационная решетка;
- 5 — продольные пластины;
- 6 — поперечные V-образные пластины;
- 7 — бункер;
- 8 — выходной патрубок

Диаметр дугообразных элементов относительно небольшой, соответственно, радиус поворота газа также небольшой (так как эти два параметра равны). В результате при движении запыленного потока обеспечиваются высокие значения центробежных сил, действующих на твердые частицы в потоке. Другой значимой силой, действующей на частицы, является сила гравитации. Таким образом, под воздействием указанных сил частицы при искривлении линий тока газа «выбиваются» из потока и перемещаются к дугообразным элементам 2 (см. рис. 1), при контакте с поверхностью элементов 2 частицы отражаются и попадают в застойные

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



зоны с околонулевыми скоростями газового потока (внутри дугообразных элементов и непосредственно за ними, см. рис. 2). Постепенно частицы оседают в бункер 7 сепаратора (см. рис. 1). Относительно малая часть частиц после контакта с дугообразными элементами 2 отражается обратно в движущийся волнообразный поток газа и уносится потоком в направлении последующих рядов дугообразных элементов 2, при этом снижается вероятность уноса таких частиц из сепаратора. Из выходного патрубка 8 поступает очищенный газ. Сепарационная решетка 4 в нижней части сепаратора предусмотрена для разрушения восходящего «паразитного» потока газа, возникающего при обтекании газом дугообразных элементов 2 снизу вверх. Некоторые частицы, поступающие в пространство под дугообразными элементами, уносятся «проскакивающими» снизу потоками газа. При установке V-образных пластин эти потоки существенно снижаются, при этом увеличивается эффективность сепарации устройства. Сепарационная решетка 4 состоит из продольных пластин 5 и поперечных V-образных пластин 6 (см. рис. 1) относительно направления потока газа, при этом продольные пластины 5 выполняют функцию ребер жесткости.

Все дугообразные элементы 2 вставляются в пластины 5 на определенную глубину, что позволяет исключить расшатывание пластин при работе сепаратора. V-образные пластины 6 расположены относи-

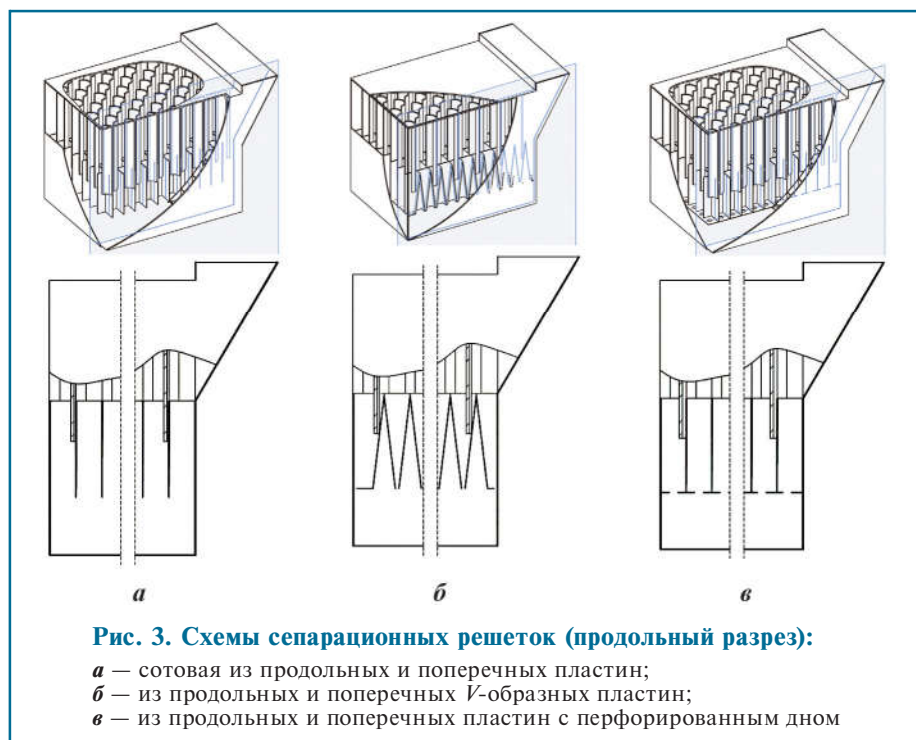
тельно друг друга так, что в нижней части пластин образуются небольшие щели (размером до 10 мм), предназначенные для подачи частиц в бункер 7 сепаратора (см. рис. 1). Образование щелей малого размера необходимо также для разрушения восходящего потока газа. В нижней части первой V-образной пластины приварены прямые пластины небольшого размера, направленные в сторону внутренней стенки корпуса сепаратора (для исключения формирования соответственно нисходящего и восходящего потоков газа).

При этом между корпусом 3 и пластиной, приваренной к V-образной пластине 6, имеется щель (шириной до 10 мм), перпендикулярная направлению газового потока, для исключения «мертвых» областей, в которых могут скапливаться частицы (рис. 3, б).

Расстояние между рядами дугообразных элементов l [м] определяется по формуле $l = \sqrt{0,75d_{m,1}}$ (где $d_{m,1}$ — диаметр линии, проходящей через середину стенки дугообразных элементов, м), которая получена на основании теоретических расчетов.

Ранее [12] было установлено, что эффективность сепаратора снижается ввиду наличия «паразитных» потоков, что приводит к возврату частиц обратно в структурированный газовый поток после сепарации частиц. Одним из эффективных решений для устранения паразитных восходящих потоков является применение сепарационных решеток.

Цель данной работы — исследование влияния конструктивного оформления сепарационной решетки разработанного устройства с дугообразными элементами на эффективность улавливания твердых частиц.



Рассмотрены три основных вида сепарационной решетки: сотовая решетка из продольных и поперечных пластин (см. рис. 3, а), решетка из продольных и поперечных V-образных пластин (см. рис. 3, б), решетка из продольных и поперечных пластин со сплошным перфорированным дном (см. рис. 3, в).

На схемах рис. 3 местный разрез различных сепарационных решеток произведен на определенной глубине, на которой продольные пластины не видны, так как во всех предложенных конструкциях продольные пластины не отличаются друг от друга и выполняют функцию ребер жесткости.

Для исследований методом численного моделирования в программном комплексе Ansys Fluent были построены несколько трехмерных моделей сепаратора с разными решетками.

Основные размеры трехмерных моделей сепарационных устройств с дугообразными элементами: диаметр средней линии дугообразных элементов $d_{m.l}$ — 52,5 мм; толщина элементов — 4,5 мм; толщина пластин сепарационной решетки — 2 мм; число рядов дугообразных элементов — 12.

Эффективность сепарационного устройства рассчитывалась по формуле $E = 1 - G_{out}/G_{in}$ (где G_{out} , G_{in} — массовый расход частиц соответственно на выходе и на входе устройства, г/с).

В ходе исследований варьировались скорость газового потока W на входе сепарационного устройства (от 1 до 7 м/с), размер частиц a (от 10 до 170 мкм), расход частиц G_{in} (от 3,3 до 39,3 г/с). Плотность частиц ρ_a в ходе исследований принята равной 3400 кг/м³. Ранее [11] было определено, что при проведении процессов дегидрирования изопарафинов (с применением алюмохромового катализатора) размеры более 98 % частиц в псевдооживленном слое — от 25 до 100 мкм.

При численном моделировании в рамках упрощения принято условие симметрии, так как по ширине устройства не изменяются геометрия дугообразных элементов и геометрия сепарационной решетки.

Отметим, что при определении оптимальной входной скорости газового потока (рис. 4) возвратные потоки со стороны сепарационной решетки не учитывались, т.е. в модели нижняя часть решетки перекрывалась пластиной и на ней задавалось условие прилипания частиц (в предположении, что возвратные

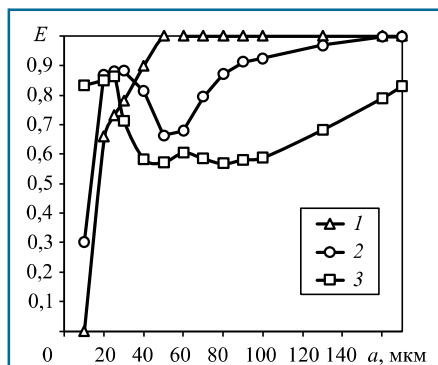


Рис. 4. Зависимости эффективности улавливания твердых частиц сепарационным устройством с сотовой решеткой и дугообразными элементами от диаметра частиц a при скорости газа на входе (нижняя часть решетки перекрывалась пластиной с условием прилипания частиц):

1 — $W = 1$ м/с; 2 — $W = 3$ м/с; 3 — $W = 7$ м/с

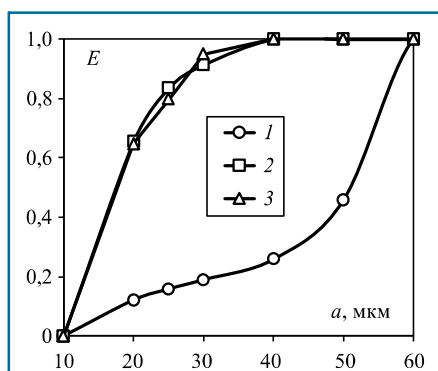


Рис. 5. Зависимости эффективности улавливания твердых частиц сепарационным устройством с дугообразными элементами от диаметра частиц a . Конструкция решетки:

1 — сотовая из продольных и поперечных пластин;
2 — из продольных и поперечных V-образных пластин;
3 — из продольных и поперечных пластин с перфорированным дном

«паразитные» потоки, влияющие на унос частиц, будут устранены).

По результатам моделирования (см. рис. 4, рис. 5) установлено: на процесс улавливания твердых частиц в сепарационном устройстве с дугообразными элементами значимо влияют технологические параметры и конструктивное оформление сепарационной решетки.

При варьировании скорости газопылевого потока на входе устройства (в диапазоне 1...7 м/с) выявлено: оптимальная скорость — 1 м/с, так как при этом обеспечивается высокая эффективность улавливания частиц — в среднем 86,2 %. При увеличении скорости газопылевого потока на входе устройства эффективность улавливания (в среднем для диапазона частиц 10...170 мкм) снижается, так как усиливается центробежное поле, действующее на частицы в потоке газа, т.е. выбивание частиц из структуры потока происходит с большей силой (при этом импульс частиц — высокий). В результате частицы ударяются о стенки дугообразных элементов и отражаются обратно в движущийся газопылевой поток, т.е. частицы не попадают в застойные зоны с околонулевыми скоростями (внутри дугообразных элементов и непосредственно за ними) и не успевают осесть в бункер.

Из данных рис. 4 следует, что чем больше скорость газопылевого потока, тем ниже эффективность улавливания частиц размером более 30 мкм. При высокой скорости газопылевого на входе устройства обеспечивается возможность улавливания мелкодисперсных частиц (размером менее 20 мкм) с высокой эффективностью. Однако дисперсность основной фракции частиц в исследуемом потоке газа — 25...100 мкм, поэтому целесообразно проведение настройки скорости подачи газопылевого потока в сепарационное устройство с учетом характеристик пыли и размера частиц. С другой стороны, при низкой входной скорости потока возможно обеспечение небольшого гидравлического сопротивления сепарационного устройства и снижение интенсивности абразивного изнашивания дугообразных элементов.

Эффективность сепарационного устройства с дугообразными элементами составляет в среднем 86,2; 82,5; 68,9 % при входной скорости газопылевого потока, равной 1; 3; 7 м/с соответственно.

Следует отметить, что наблюдения минимумов на кривой эффективности (см. рис. 4) обычно интерпретируется как свидетельство агломерации частиц, однако возникновением агломерации в аппарате не гарантируется наличие минимумов на кривой.

С точки зрения конструктивного оформления сепарационной решетки наиболее эффективна решетка из продольных и поперечных *V*-образных пластин (см. рис. 3, б) — эффективность составляет в среднем 88,6 % (см. рис. 5).

С одной стороны, соседние *V*-образные пластины (между вершинами которых формируются сужающиеся сверху вниз каналы) являются направляющими для отведения сепарированных из газопылевого потока частиц в бункер устройства.

С другой стороны, при применении *V*-образных пластин исключается образование «мертвых» зон, в которых могут удерживаться частицы, что может приводить к уносу частиц из устройства или забиванию сепарационной решетки в целом.

Кроме того, в каналах между *V*-образными пластинами создается значимое лобовое сопротивление движению «паразитного» восходящего потока газа.

Применением сепарационной решетки из продольных и поперечных пластин с перфорированным дном (см. рис. 3, в) также обеспечивается высокая эффективность сепарационного устройства — в среднем 88,5 % (см. рис. 5).

Днищем с отверстиями перекрывается большая часть проходного сечения в нижней части сепарационной решетки, поэтому исключается формирование нисходящего потока.

Отверстиями небольшого диаметра в днище сепарационной решетки (см. рис. 3, в) обеспечивается та же ключевая функция, что и каналами между соседними *V*-образными пластинами (рис. 3, б), а именно —

перекрывается часть сечения для прохода газа с частицами для разрушения «паразитного» восходящего потока, однако недостатком сепарационной решетки из продольных и поперечных пластин с перфорированным дном является формирование множества «мертвых» зон (например, на стыках дугообразных элементов и поверхности дна без отверстий), в которых (с большой вероятностью) возможно скопление частиц.

При применении сотовой сепарационной решетки (см. рис. 3, а) эффективность сепарационного устройства — наименьшая, в среднем 65,6 % (см. рис. 5). Сепарационная решетка является открытой снизу, поэтому нет препятствий формированию нисходящего потока газа в области первых рядов дугообразных элементов и восходящего потока газа в области последних рядов дугообразных элементов.

По мере огибания восходящим потоком газа сепарационной решетки снизу подхватываются и уносятся сепарированные частицы, падающие в бункер.

Каждому из 12 рядов дугообразных элементов в устройстве соответствует ряд ячеек сепарационной решетки (так называемых сот), через которые возможно прохождение как нисходящего потока, так и восходящего потока. В ходе исследования распределения потоков газа по данным ячейкам было установлено: основной нисходящий поток газа проходит через 1-й, 2-й, 3-й ряды ячеек; восходящий поток газа более выражен в 10-м, 11-м, 12-м рядах ячеек; через 4–9-й ряды ячеек сепарационной решетки нисходящие и восходящие потоки газа — минимальны.

С целью разрушения паразитных нисходящих и восходящих потоков в нижней части сепарационных решеток некоторые полости были перекрыты прямыми пластинами, приваренными к поперечным пластинам (аналогично пластинам, приваренным к первой и последней *V*-образным пластинам решетки на рис. 3, б). При этом во избежание забивания полостей частицами предусмотрены щели размером до 10 мм.

По результатам моделирования (рис. 6) выявлено, что перекрытием ячеек 1-го, 2-го, 11-го, 12-го рядов обеспечивается разрушение основных нисходящих и восходящих потоков, при этом эффективность устройства возрастает в 1,3 раза.

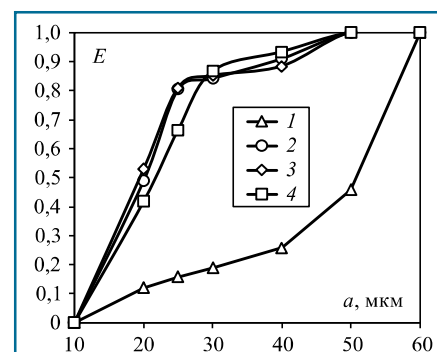


Рис. 6. Зависимости эффективности улавливания твердых частиц сепарационным устройством с дугообразными элементами и сотовой решеткой от диаметра частиц *a* при перекрытии определенных рядов квадратных выходных ячеек:

- 1 — все ячейки открыты (см. рис. 3, а);
- 2 — 1-й, 12-й ряды перекрыты;
- 3 — 1-й, 11-й, 12-й ряды перекрыты;
- 4 — 1-й, 2-й, 11-й, 12-й ряды перекрыты

Также установлено, что для значимого увеличения эффективности необходимо перекрытие (как минимум) 1-го и 12-го рядов.

Гидравлическое сопротивление сепарационного устройства с дугообразными элементами при входной скорости газопылевого потока 1 м/с при применении сотовой сепарационной решетки из продольных и поперечных пластин составляет 57,2 Па, при применении решетки из продольных и поперечных пластин с перфорированным дном — 94,5 Па.

Эффективность сепарационного устройства с дугообразными элементами при улавливании частиц размерами 25...100 мкм при применении сотовой сепарационной решетки из продольных и поперечных

пластин составляет в среднем 67,3 %, при применении решетки из продольных и поперечных V-образных пластин — 97,2 %, при применении решетки из продольных и поперечных пластин с перфорированным дном — 97,1 % (см. рис. 5).

Эффективность сепарационного устройства с дугообразными элементами при применении сотовой сепарационной решетки в зависимости от перекрытия ячеек (см. рис. 6) составляет в среднем 65,6 % (все ячейки открыты); 86,1 % (1-й и 12-й ряды ячеек закрыты); 86,2 % (1-й, 11-й и 12-й ряды ячеек закрыты); 84,9 % (1-й, 2-й, 11-й и 12-й ряды ячеек закрыты).

Таким образом, паразитный восходящий поток газа в нижней части сепарационного устройства с дугообразными элементами существенно влияет на эффективность улавливания частиц.

Установкой сепарационной решетки в корпусе устройства в большей мере нивелируются паразитные нисходящие и восходящие потоки, что обеспечивает значительное увеличение эффективности устройства.

Однако при этом необходим рациональный выбор конструкции сепарационной решетки с учетом обеспечения не только эффективного ссыпания уловленных частиц в бункер устройства (без образования «мертвых» зон, в которых возможно скапливание частиц), но и создания сопротивления движению восходящего потока газа.

Выводы

Разработано сепарационное устройство с дугообразными элементами (с различными вариантами сепарационной решетки) для улавливания мелкодисперсных частиц из газовых потоков.

По результатам моделирования оптимальная скорость газа на входе сепарационного устройства с дугообразными элементами составляет 1 м/с.

Разрушение нисходящих и восходящих газовых потоков с приме-

нением сепарационных решеток в нижней части устройства — возможность существенного снижения уноса уловленных частиц и повышения эффективности устройства.

Наиболее эффективна сепарационная решетка из продольных и поперечных V-образных пластин — эффективность сепарационного устройства с такой решеткой составляет в среднем 88,6 %.

Гидравлическое сопротивление сепарационного устройства с решеткой из продольных и поперечных V-образных пластин составляет 43,9 Па.

Основные достоинства сепарационного устройства с дугообразными элементами: высокая эффективность улавливания частиц при относительно малой скорости газа; низкое гидравлическое сопротивление; большой срок службы (вследствие слабого абразивного изнашивания конструктивных элементов сепаратора).

Список литературы

1. Zhang H.L., Degève J., Baeyens J., Wu S.Y. Powder attrition in gas fluidized beds // *Powder Technology*. 2016. V. 287. P. 1—11.
2. Wu D., Gu Z., Li Y. Attrition of catalyst particles in a laboratory-scale fluidized-bed reactor // *Chemical Engineering Science*. 2015. V. 135. P. 431—440.
3. Yang L., Song C., Ai L. et al. Collision characteristics and breakage evolution of particles in fluidizing processes // *Fuel Processing Technology*. 2023. V. 243. Article 107654.
4. Alobaid F., Almohammed N., Farid M.M. et al. Progress in CFD Simulations of Fluidized Beds for Chemical and Energy Process Engineering // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2022. V. 91. Article 100930.
5. Liao J., Zhu L., Luo Z. Heterogeneity analysis of gas—solid flow hydro-

dynamics in a pilot-scale fluidized bed reactor // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2022. V. 50. P. 117—129.

6. Werther J., Reppenhagen J. Handbook of Fluidization and Fluid—Particle Systems. New York, Marcel Dekker, 2003. P. 201—238.

7. Reinking Z., Whitty K.J., Lighty J.A.S. Design of a gas-solid-solid separator to remove ash from circulating fluidized bed reactors // *Powder Technology*. 2022. V. 404. Article 117467.

8. Пахомов Н.А., Парахин О.А., Немыкина Е.И. и др. Разработка и опыт промышленной эксплуатации микросферического алюмохромового катализатора КДМ дегидрирования изобутана в кипящем слое // *Катализ в промышленности*. 2012. № 3. С. 65—75.

9. Мисюля Д.И., Кузьмин В.В., Марков В.А. Сравнительный анализ технических характеристик циклонных пылеуловителей // *Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ*. 2012. № 3. С. 154—163.

10. Salakhova E.I., Dmitriev A.V., Zinurov V.E. et al. Dust Collector for Paraffin Dehydrogenation Units with a Fluidized Catalyst Bed // *Catalysis in Industry*. 2022. V. 14. N. 4. P. 369—375.

11. Salakhova E.I., Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Salakhov I.I. Modeling of Erosion in a Cyclone and a Novel Separator with Arc-Shaped Elements // *Processes*. 2023. V. 11. N. 1. Article 156.

12. Zinurov V.E., Dubkova N.Z., Popkova O.S., Dmitrieva O.S. Efficiency of different separation elements for removal of fine particles from gas // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1745. Article 012090.

13. Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Kharkov V.V. Influence of process parameters on capturing efficiency of rectangular separator // *IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology*. 2020. P. 1—4.