

УДК 66.094.187.023

DOI 10.18412/1816-0387-2022-2-57-64

ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЛОКОВ ДЕГИДРИРОВАНИЯ ПАРАФИНОВЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ КАТАЛИЗАТОРА

© 2022 Э.И. Салахова^{1*}, А.В. Дмитриев², В.Э. Зинуров², И.Р. Набиуллин³, И.И. Салахов⁴

¹ Нижнекамский химико-технологический институт (филиал)
Казанский национальный исследовательский технологический университет (НХТИ КНИТУ)

² Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ)

³ ПАО «Нижнекамскнефтехим», Нижнекамск

⁴ АО «Танеко», Нижнекамск

Статья поступила в редакцию 06.10.2021 г., доработана 15.11.2021 г., принята к публикации 18.11.2021 г.

В статье рассмотрена проблема улавливания твердых частиц в технологической линии с протеканием процессов дегидрирования C_4 – C_5 -изопарафинов в изоолефины в псевдоожиженном слое катализатора. Изучен процесс пылеулавливания мелкодисперсных частиц катализатора для блоков дегидрирования парафиновых углеводородов с применением стандартного циклона марки ЦН-15 и нового пылеулавливающего устройства (НПУ) с дугообразными элементами. Представлены результаты численного моделирования ЦН-15 и НПУ. В ходе сравнительных исследований установлено, что применение НПУ более эффективно, чем применение ЦН-15, для улавливания мелкодисперсных твердых частиц размером менее 20 мкм. Показано, что изменение профилей давления и скоростей для НПУ происходит закономерно и каких-либо критических отклонений не наблюдается. Выявлено, что скорость течения газового потока через дугообразные элементы НПУ стабильна в отличие от ЦН-15, в котором создаются высокие скорости по краям циклона, повышающие вероятность проскока пыли в очищаемый поток.

Ключевые слова: катализаторная пыль, циклон, пылеулавливающее устройство, дугообразный элемент, эффективность.

Введение

В нефтехимической промышленности широкое распространение получили процессы дегидрирования C_4 – C_5 изопарафинов в изоолефины в псевдоожи-

женном слое катализатора. В этом процессе используется алюмохромовый катализатор (такой как ИМ-2201 или КДИ), представляющий собой мелкодисперсный порошок, размер частиц варьируется от 10 до 125 мкм. Средний размер частиц составляет от 50 до 60 мкм [1, 2]. Фракционный состав катализатора имеет важное значение, так как он подвержен изменению из-за дробления и истирания частиц при их столкновении между собой и со стенками реактора. При этом изменение фракционного состава катализатора со сдвигом в сторону образования пыли по причине разрушения частиц следует учитывать при расчете аппаратов, так как это может иметь критическое значение [3–5].

В настоящее время одним из «узких» мест блоков дегидрирования парафинов в псевдоожиженном

Салахова Э.И. – ассистент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий» НХТИ КНИТУ.
E-mail: Salahova.elmira@gmail.com

Дмитриев А.В. – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой «Теоретические основы теплотехники» КГЭУ. E-mail: ieremiada@gmail.com

Зинуров В.Э. – ассистент той же кафедры. E-mail: vadd_93@mail.ru

Набиуллин И.Р. – инженер-технолог исследовательской лаборатории углеводородов Научно-технологического центра ПАО «Нижнекамскнефтехим». E-mail: ilgiz-nabiullin@mail.ru

Салахов И.И. – канд. техн. наук, генеральный директор АО «Танеко». E-mail: Salahova.elmira@gmail.com

слое катализатора является низкая эффективность существующих систем пылеулавливания. Этот факт не удовлетворяет возрастающим требованиям снижения расхода катализатора и улучшения экологии процессов [3]. Причем проблема загрязнения воздуха мелкодисперсной пылью (менее 20 мкм), по большей части промышленного происхождения, набирает все большую актуальность.

В промышленности для очистки газов применяются различные устройства, такие как вихревые, гравитационные, контактные, инерционные пылеуловители, в том числе циклоны. Циклонные сепараторы для очистки газов от твердых частиц часто используются в промышленных процессах с целью двухфазного разделения потока, т.е. для отделения фазы высокой плотности от несущей фазы более низкой плотности с применением вращающегося потока. Современные конструкции промышленных циклонов позволяют работать при повышенных температурах и объемах загрузки твердых частиц от умеренного до высокого, соответствуя требованиям эффективности сепарации, имея низкий уровень капиталовложений и затрат на техническое обслуживание. Это привело к частому использованию циклонов в качестве предварительной стадии сепарации и процессов очистки по сравнению с другими промышленными сепараторами, такими как мешочный (рукавной) фильтр, электростатический сепаратор и т.д. Примерами востребованного применения циклонного сепаратора в промышленных процессах является очистка газов от твердых частиц в высокотемпературных теплообменниках [1], например в цементной промышленности, газификация и сжигание твердого топлива [2, 3, 6], пиролиз угля [7], очистка газов от твердых частиц в циркулирующих псевдоожиженных слоях (CFBs) [8].

Для того чтобы получить более глубокое представление о протекающих физических процессах и факторах, влияющих на два важных рабочих параметра циклонов, т.е. падение давления и эффективность сепарации, однофазовые потоки и потоки отделения газов от твердых частиц широко изучались в экспериментальных циклонах с использованием экспериментальных методов (например, [2, 9–16]).

В процессах дегидрирования парафинов используются широко распространенные циклоны марки ЦН-15 (рис. 1). Их применяют для грубой и средней степени очистки газов, и в их конструкциях учтены особенности улавливаемой пыли. Однако они имеют недостатки, заключающиеся в сравнительно небольшой эффективности в области фракций пыли разме-

ром до 5–10 мкм. Отмеченный недостаток обусловлен особенностями работы циклонов, в частности турбулизацией потока запыленной среды, которая препятствует сепарации пыли [7]. Также из-за больших размеров аппарата приходится создавать высокие значения фактора разделения — требуется работа в области высоких скоростей, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления и высоким энергозатратам.

Для улучшения эффективности очистки газов от мелких (5–10 мкм) частиц катализатора проводятся исследования и разработки новых пылеулавливающих устройств [8, 17–19]. Например, в работе [3] приведены результаты сравнительного исследования циклонов ЦН-15/ЦН-15 и ЦПКИ/СКЦН для внутренних систем пылеулавливания, расположенных в купольной части реактора и регенератора. Показано, что новые системы пылеулавливания более эффективны по сравнению с ЦН-15 и позволяют снизить удельный расход катализатора, количество шламов и загрязнение оборудования, проскок частиц и количество уносимого катализатора.

Авторами [9] предложен прямоугольный сепаратор с двутавровыми и П-образными элементами, который в сравнении с циклоном ЦН-11-400 пока-

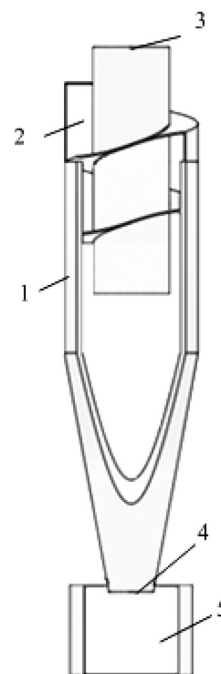


Рис. 1. Циклон марки ЦН-15 в разрезе: 1 – корпус циклона; 2 – входной патрубок для загрязненного катализатором газа; 3 – выход очищенного газа; 4 – выход для частиц катализатора, которые уловились в результате очистки; 5 – бункер

зал свою повышенную эффективность в отношении мелкодисперсных частиц размером 10–20 мкм при снижении гидравлического сопротивления. Поэтому интересным и полезным с точки зрения применения к процессу дегидрирования парафинов было бы проведение исследований подобного сепаратора. Таким образом, решение проблемы по повышению степени очистки оборудования от катализаторной пыли является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является разработка высокоэффективного пылеулавливающего устройства, позволяющего удалять катализаторную пыль из реактора в псевдооживленном слое. Сравнительная оценка нового пылеулавливающего устройства (НПУ) с циклоном ЦН-15 путем моделирования и проведения расчетов позволит оценить, подтвердить целесообразность модернизации оборудования блоков дегидрирования.

Экспериментальная часть

Авторами работы было разработано новое пылеулавливающее устройство (НПУ), представляющее собой несколько рядов дугообразных элементов, заключенных в прямоугольный корпус. При этом для достижения равнопроточности дугообразные элементы расположены в устройстве под углом 30°. Упрощенная модель пылеулавливающего устройства с дугообразными элементами представлена на рис. 2. Дугообразные элементы с одной стороны крепятся к поверхно-

сти корпуса, с другой стороны — к решетке, которая приварена к бункеру 4.

Принцип работы устройства с пылеулавливающими элементами следующий: запыленный газовый поток поступает в аппарат через входной патрубок 2, после чего движется прямолинейно до дугообразных элементов 3, достигая их, запыленный газовый поток устремляется в сужения между сепарационными элементами. Вследствие того, что дугообразные элементы расположены в шахматном порядке, структура запыленного газового потока приобретает волнообразную форму. Особое влияние на образование волновой структуры движения газового потока внутри устройства имеют конструктивные параметры. В частности, для достижения максимального значения центробежных сил, возникающих при огибании газом дугообразных элементов, необходимо выполнение следующего условия: сепарационные элементы должны располагаться таким образом, чтобы из центральной точки окружности, которая представляла бы собой два объединенных дугообразных элемента, можно было провести окружность, равную двум ее диаметрам, проходящую через центральные точки прямых крайних кромок — соседних элементов, расположенных в предшествующем и последующем рядах.

Таким образом, при движении запыленного потока между дугообразными элементами формировались центробежные силы, под действием которых частицы выбивались из структуры потока и попада-

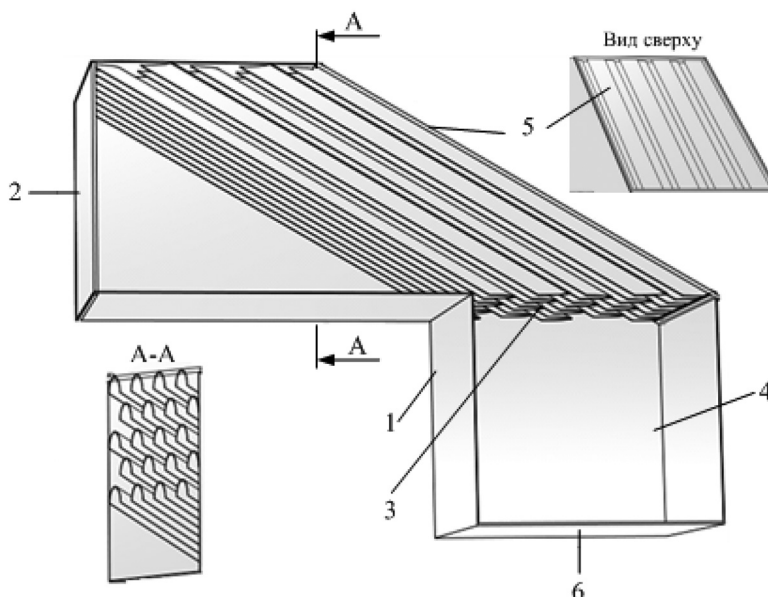


Рис. 2. Новое устройство с пылеулавливающими элементами: 1 – корпус; 2 – входной патрубок для загрязненного газа; 3 – пылеулавливающие элементы; 4 – бункер; 5 – выход для очищенного газа; 6 – выход для осажденных частиц пыли

ли на поверхности стенок элементов. Далее твердые частицы постепенно оседали по высоте устройства и попадали в бункер 4. После движения газа через несколько рядов дугообразных элементов он покидал устройство через выходной патрубок 5. Осажденные частицы в бункере высыплются через выход для осажденных пылеобразных частиц 6.

Для получения сравнительных данных циклона ЦН-15 и предложенного устройства с пылеулавливающими элементами в программном комплексе SolidWorks были проведены расчеты численного моделирования. Для этого были построены трехмерные модели исследуемых аппаратов. Циклон ЦН-15 построен по известным размерам, а предложенное новое устройство проектировалась методом подбора размеров. В предложенном устройстве (см. рис. 2) дугообразные элементы имеют неизменяющуюся геометрическую форму. Радиус и длина дугообразных элементов — 6 и 176 мм соответственно.

Процесс течения газового потока стационарен, концентрация твердых частиц мала, поэтому их взаимодействие между собой не учитывалось. Граничные условия: на входе задавалась скорость, которая варьировалась в диапазоне от 5 до 25 м/с, на выходе — давление 0,6 кгс/см². В качестве исследуемых частиц выбран материал плотностью 1400 кг/м³, диаметром частиц от 5 мкм до 80 мкм. Число точек на входе в аппарат — 1000. На поверхностях циклона ЦН-15 и предложенного устройства с дугообразными элементами задавалось условие отражения, а на дне бункера — условие прилипания.

Эффективность очистки запыленного газового потока от мелкодисперсных частиц вычислялась по следующему выражению:

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

где n_k — число частиц в газе, которые остались в нем после его очистки в сепараторном устройстве.

Перепад давления в ЦН-15 и НПУ определялся по выражению

$$\Delta p = p_{\text{inlet}} - p_{\text{outlet}}, \quad (2)$$

где p_{inlet} — давление на входе в устройство, Па; p_{outlet} — давление на выходе из устройства, равное атмосферному, Па.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований по сравнительной оценке эффективности E моделей циклона ЦН-15 и НПУ

представлены в графическом виде на рис. 3 и 4. Как видно из результатов, эффективность очистки для циклона ЦН-15 высокая и его конструкция позволяет удалять частицы с размером 15–20 мкм и более, что подтверждает литературные данные [3]. Видно, что для стандартных условий работы (скорость газа 17 м/с) частицы с размером 15–80 мкм улавливаются с $E = 100\%$. С понижением скорости газа до 5 м/с работа ЦН-15 ухудшается, частицы размером 20–30 мкм уже улавливаются с эффективностью 70–80%, а пыль размером 5–15 мкм практически не удаляется. Таким образом, полная очистка запыленных потоков от твердых частиц в циклоне при скорости

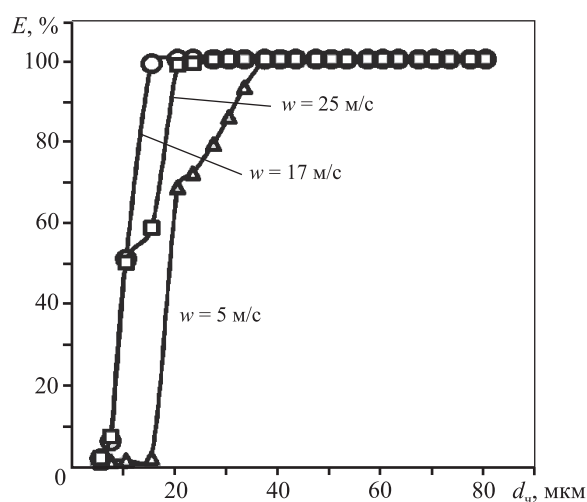


Рис. 3. Зависимости степени очистки газа одноступенчатой компоновки циклона (ЦН-15) от размера частиц пыли на входе при скоростях газа 5; 17 и 25 м/с

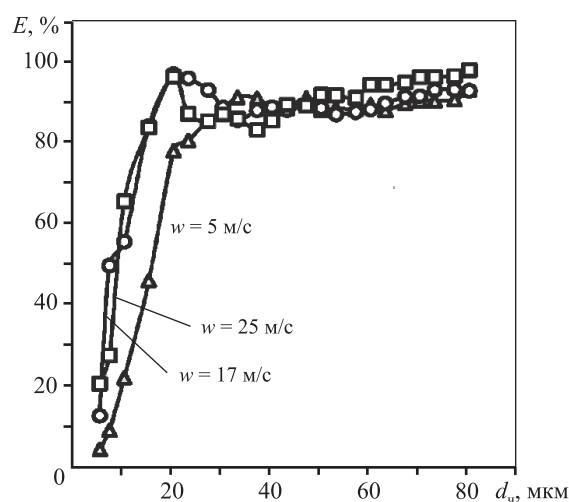


Рис. 4. Зависимости степени очистки газа одноступенчатой компоновки НПУ от размера частиц пыли на входе при скоростях газа 5; 17 и 25 м/с

газа 5; 17 и 25 м/с достигается при размере частиц более 40; 20 и 19 мкм соответственно. При этом эффективность циклона в среднем составляет 50,2 % (при скорости 5 м/с), 39,1 % (при скорости 17 м/с) и 65,9 % (при скорости 25 м/с) при размере частиц менее 40; 20 и 19 мкм соответственно (см. рис. 3).

Проведенные результаты численных расчетов пылеулавливающего устройства показали, что эффективность НПУ при скоростях газа 5–17 м/с и диаметре частиц 30–80 мкм ниже ($E = 80 \div 99 \%$), чем для циклона ЦН-15, но при росте скорости до 25 м/с работа НПУ улучшается. В тоже время для мелких частиц (5–20 мкм) эффективность улавливания в НПУ выше, чем для ЦН-15. В среднем эффективность НПУ при улавливании частиц размером до 20 мкм при скорости газового потока 5; 17 и 25 м/с составляет 31,4; 57,2 и 58,2 % соответственно (см. рис. 4). Полученные результаты исследований коррелируют с данными, представленными в работе [10].

Анализ полученных данных показал, что перепад давления в НПУ с ростом входной скорости от 1 до 17 м/с увеличивается от 10,8 до 300 Па. При этом полученную зависимость перепада давления в НПУ от входной скорости газового потока можно разделить на 3 области: первая область ограничена диапазоном значений входной скорости газового потока от 1 до 5 м/с, при этом потери давления составляют от 10,8 до 26,38 Па, вторая область ограничена диапазоном значений входной скорости газового потока от 5 до 10 м/с, при этом перепад давления в устройстве составляет от 26,38 до 103,87 Па, третья область ограничена диапазоном значений входной скорости газа от 10 до 17 м/с, при этом потери давления составляют от 103,87 до 300 Па. Очевидно, что при переходе в область с более высокими скоростями рост перепада давления в НПУ увеличивается. Это вызвано нарушением структуры потока при прохождении газа между рядами дугообразных элементов и возникновением дополнительных завихрений (рис. 5).

Следует отметить, что по мере забивки дугообразных элементов во внутренних полостях будет уменьшаться свободное пространство, вследствие чего количество обратных токов будет уменьшаться, соответственно перепад давления в НПУ тоже будет падать [9]. При этом потери давления в циклонном сепараторе составляют до 1 кПа.

Для проверки адекватности численного моделирования была изготовлена экспериментальная установка (рис. 6). Ее основными элементами являются вентилятор 1, ресивер 2, имеющий несколько рядов круглых отверстий со всех сторон, труба Вентури 3,

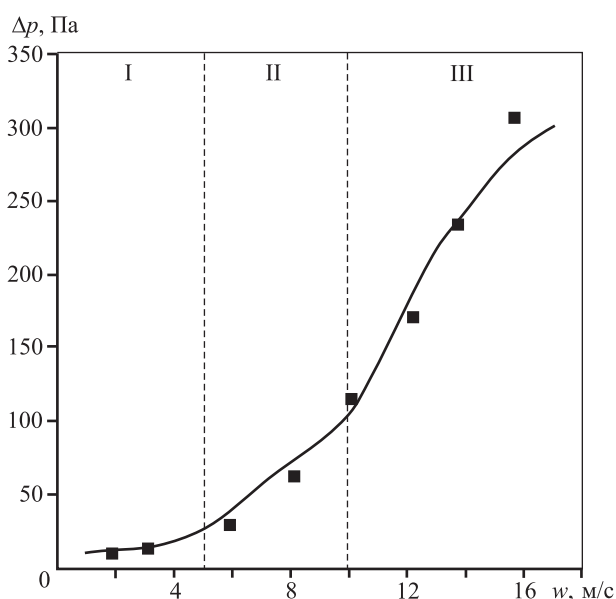


Рис. 5. Зависимость потери давления в НПУ от входной скорости газового потока: сплошная линия – численное моделирование, точки – экспериментальные данные

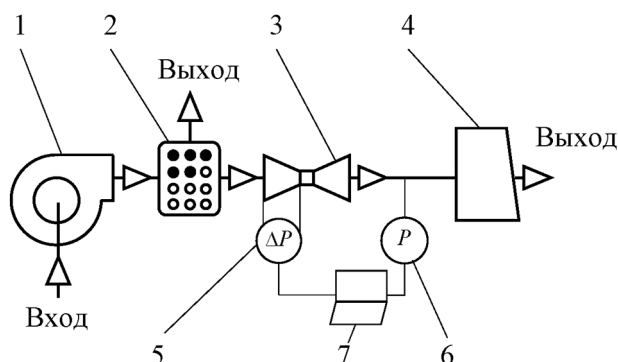


Рис. 6. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования сопротивления сепаратора с наклонными сепарационными элементами: 1 – вентилятор; 2 – ресивер; 3 – труба Вентури; 4 – сепаратор с наклонными сепарационными элементами; 5, 6 – дифференциальные манометры; 7 – компьютер

исследуемый сепаратор 4 с наклонными сепарационными элементами, дифференциальные манометры 5 и 6, компьютер 7 для фиксации данных. Газовый поток нагнетался с помощью вентилятора 1, далее газ проходил через ресивер 2. В ходе эксперимента отверстия в ресивере 2 последовательно открывались для снижения скорости газа. После ресивера 2 газ попадал в трубу Вентури 3, к которой был подключен первый дифференциальный манометр 5, фиксировавший разницу давлений между широкой и узкой частями трубы, в свою очередь данные в режиме ре-

ального времени передавались на компьютер 7. Далее газ по линии движения воздуха поступал в сепаратор 4 с наклонными сепарационными элементами. Перед сепаратором был установлен второй дифференциальный манометр 6, который фиксировал избыточное давление в линии и передавал данные на компьютер 7. Гидравлическое сопротивление сепаратора с наклонными сепарационными элементами рассчитывалось как разница между давлением, который показывал дифференциальный манометр 6, и давлением окружающей среды на выходе из сепаратора 4. Перепад давления в трубе Вентури и давление на входе в исследуемое устройство измерялось дифференциальным манометром TESTO 510i, имеющим погрешность измерения $\pm 5,0\%$ в диапазоне измерений 0–100 Па и $\pm 3,5\%$ в диапазоне измерений 100–1000 Па.

При проведении численного моделирования применялась $k-\omega$ SST модель турбулентности. При решении данной модели также задавались дифференциальные уравнения в частных производных (уравнение Навье — Стокса):

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (3)$$

где ∇ — оператор набла; Δ — векторный оператора

Лапласа; t — время, с; p — давление, Па; \vec{v} — векторное поле скорости; \vec{f} — векторное поле массовых сил.

Уравнение Навье — Стокса дополнялось уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0. \quad (4)$$

Результаты экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются с результатами численного моделирования. Отклонение — не более 10 %, что приемлемо для инженерных расчетов.

На рис. 7 и 8 приведены сравнительные данные по прогнозируемым профилям скорости и давления. Из представленных данных видно, что изменение профилей давления и скоростей для НПУ происходит закономерно и каких-либо критических отклонений не наблюдается.

При обтекании сепарационных элементов наблюдается упорядоченное течение, по структуре более близкое к ламинарному режиму, так как между сепарационными элементами относительно небольшое расстояние. Скорость течения газового потока в НПУ стабильна в отличие от ЦН-15, где создаются вихревые повышенные скорости по краям циклона, приводя к износу и турбулентному течению потока газа, что и повышает вероятность проскока мелких частиц.

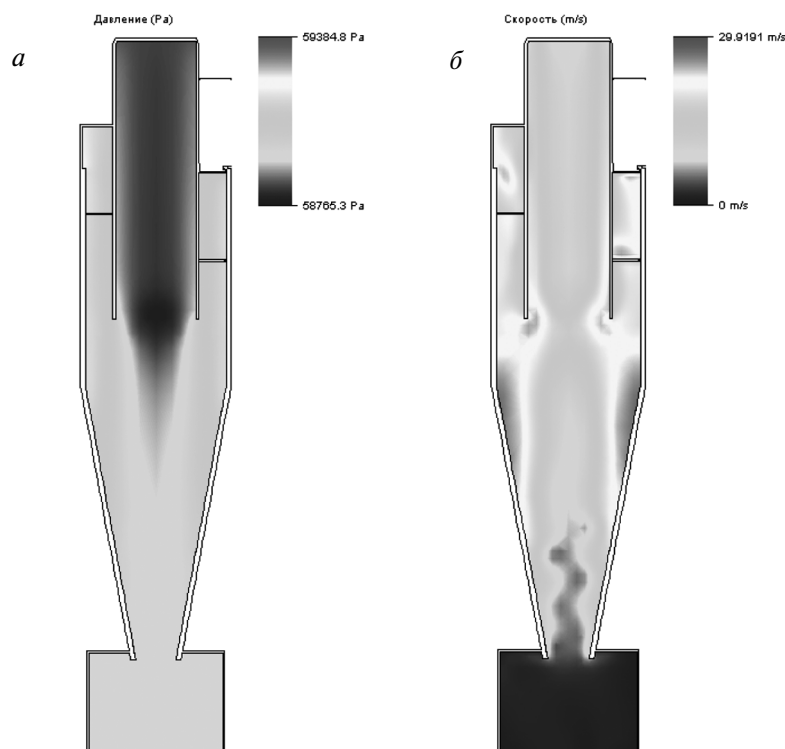


Рис. 7. Профили изменения: давления (а) скорости (б) для циклона ЦН-15

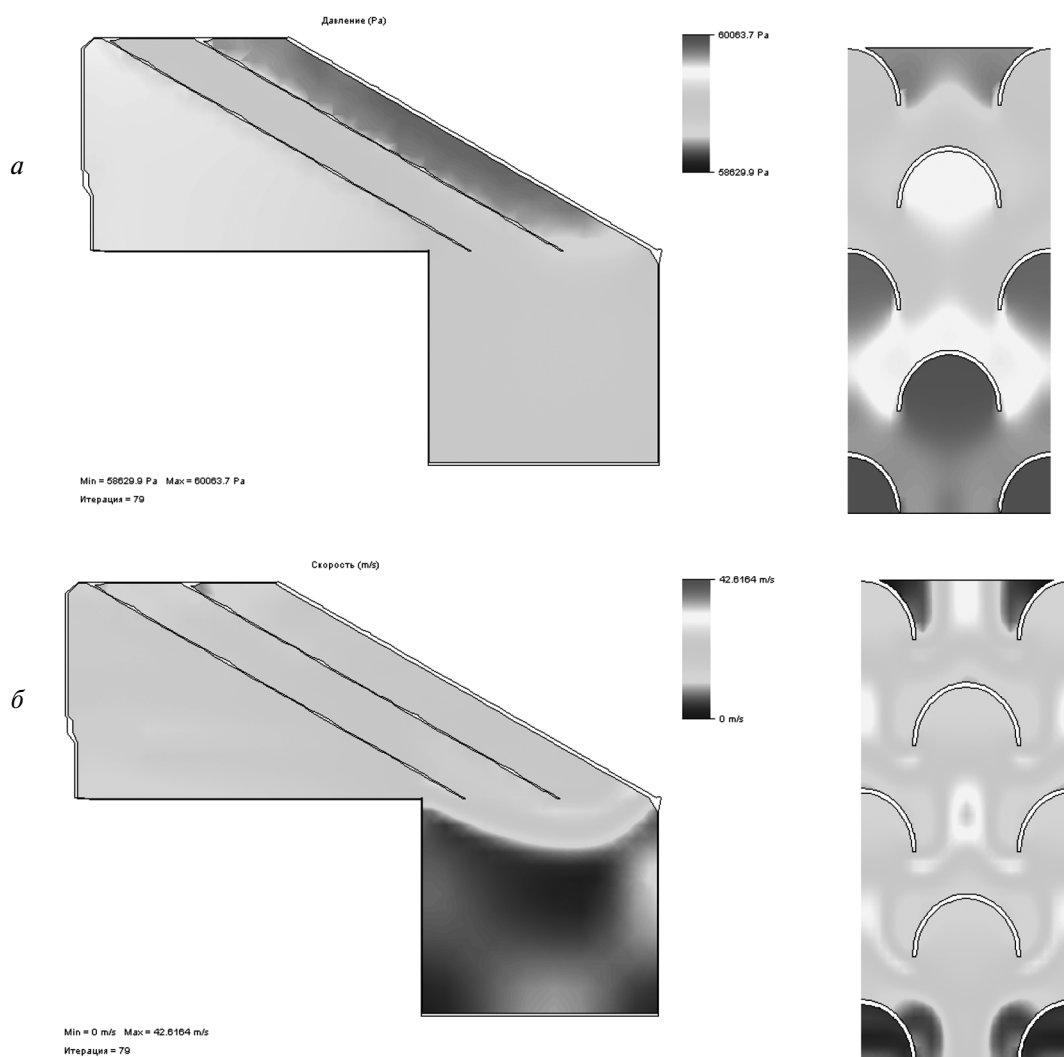


Рис. 8. Профили изменения: давления (а) (вид сбоку, вид слева) и скорости (б) (вид сбоку, вид слева) для

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение НПУ для улавливания частиц в технологических линиях с протеканием процессов дегидрирования C_4 — C_5 -изопарафинов в изоолефины в псевдооживленном слое катализатора является целесообразным, так как повышается эффективность улавливания мелкодисперсных частиц размером менее 20 мкм относительно применения циклона ЦН-15 в среднем на 21,2 %. Для повышения эффективности улавливания твердых частиц размером более 20 мкм возможно применение дополнительно ряда дугообразных элементов. В ходе исследований было установлено, что применять НПУ целесообразно при скоростях газового потока до 10 м/с, так как перепад давления в устройстве составляет не более 103,87 Па. При увеличении скорости появляется нарушение

структуры газового потока, вследствие чего рост перепада давления в устройстве существенно повышается.

Заключение

Предложено новое пылеулавливающее устройство (НПУ) для сепарации широкой фракции частиц, которое может быть применено в промышленных процессах удаления катализаторной пыли в блоках дегидрирования парафиновых углеводородов.

В циклоне ЦН-15 частицы размером менее 20 мкм при низких скоростях не улавливаются — происходит проскок. Показано, что в среднем эффективность НПУ выше эффективности ЦН-15 на 21,2 % при улавливании частиц размером до 20 мкм и скорости газа 5—25 м/с.

Показано, что изменение профилей давления и скоростей для НПУ происходит закономерно и каких-либо критических отклонений не наблюдается. Выявлено, что скорость течения газового потока через дугообразные элементы НПУ стабильна в отличие от ЦН-15, в котором создаются высокие скорости по краям циклона, повышающие вероятность проскока пыли в очищаемый поток.

Достоинством нового устройства является простота изготовления, высокая степень улавливания мелкодисперсных частиц.

Новизной нового пылеулавливающего устройства относительно других центробежных сепараторов является возникновение центробежных сил более высоких значений. Вследствие того, что при огибании газом дугообразных элементов возникает множество точек образования вихрей, радиус которых имеет сравнительно маленькое значение, достигаются высокие значения центробежных сил, что позволяет производить сепарацию из газовых потоков частиц размером менее 20 мкм.

Данное устройство может быть рассмотрено для использования в системе с ЦН-15, которое в комплексе могло увеличить эффективность промышленного процесса дегидрирования C₄–C₅-изопарафинов в изоолефины в псевдооживленном слое катализатора.

Литература

1. *Nakhaei, M., Lu, B., Tian, Y., Wang, W., Dam-Johansen, K., Wu, H.* CFD Modeling of Gas–Solid Cyclone Separators at Ambient and Elevated Temperatures. *Processes* 2020, 8, 228. (<https://doi.org/10.3390/pr8020228>).
2. *Катаев А.Н., Егоров А.Г., Егорова С.Р., Ламберов А.А.* // Катализ в промышленности. 2015. Т. 15. № 3. С. 60–66.
3. *Комаров С.М., Котельников Г.Р., Рогозина Н.П., Смирнов Б.К., Никитина В.М., Магсумов И.А.* // Катализ в промышленности. 2005. № 3. С. 38–43.
4. *Haig, C., Hursthouse, A., McIlwain, S., Sykes, D.* // *Powder Technol.* 2014. № 258, 110–124.
5. *Fassani, F., Goldstein, L.* // *Powder Technol.* 2000. № 107. P. 60–65.
6. *Калаева С.З., Муратова К.М., Чистяков Я.В., Чеботарев П.В.* // *Известия Тульского гос. ун-та. Науки о Земле.* 2016. Вып. 3. С. 40–63.
7. *Ветошкин А.Г.* Процессы и аппараты пылеочистки. Учебное пособие. Пенза: Пензенского гос. ун-та, 2005. 210 с.
8. Патент РФ 1679709; опубл. 1996.
9. *Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Латыпов Д.Н., Соловьева О.В.* // *Вестник технологич. ун-та.* 2019. Т. 22. № 8. С. 33–37.
10. *Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Нгуен В.Л.* // *Вестник Казанского гос. энергетич. ун-та.* 2018. Т. 10. № 1(37). С. 74–81.
11. *Калаева С.З., Муратова К.М., Чистяков Я.В., Чеботарев П.В.* // *Известия Тульского гос. ун-та.* 2016. Вып. 3. С. 40–63.
12. Патент РФ 2509609; опубл. 2014.
13. Патент РФ 2132750; опубл. 2014.
14. *Xiong, Z., Ji, Z., Wu, X.* // *Powder Technol.* 2014. № 253. P. 644–649.
15. *Qian, F., Zhang, J., Zhang, M.* // *J. Hazard. Mater.* 2006. № 136. P. 822–829.
16. *Huang, Y., Mo, X., Yang, H., Zhang, M., Lv, J.* // *In Clean Coal Technology and Sustainable Development.* 2016. P. 301–307.
17. *Cortés, C., Gil, A.* // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2007. № 33. P. 409–452.
18. *Towler, G., Sinnott, R.* // *Chem. Eng. Des.* 2013. P. 937–1046.
19. *Trefz, M., Muschelknautz, E.* // *Chem. Eng. Technol.* 1993. № 16. P. 153–160.