

А. В. Козлов¹, Ю. А. Таран¹, М. Г. Лагуткин^{1,2}, И. Ю. Голованов²

**АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ АППАРАТОВ С ФИЛЬТРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ
И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДЛЯ НЕФТЕДОБЫЧИ**

¹ МИРЭА – Российский технологический университет

² Московский политехнический университет

ehinokokk@mail.ru, aj_@mail.ru, lag53@yandex.ru, igol95@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Иван Юрьевич Голованов, igol95@yandex.ru

Процесс разделения жидких гетерогенных систем широко используется для производства различных продуктов в химической, нефтехимической, пищевой и смежных отраслях промышленности. Аппараты, используемые для разделения, классифицируются по движущей силе процесса – силе тяжести, разности давления и центробежной силе; по исходному сырью – суспензия или эмульсия; по типу процесса – отстаивание, фильтрование, отстойное центрифугирование, фильтрующее центрифугирование и гидроциклонирование. Одной из актуальных задач современной промышленности является совершенствование оборудования для разделения существующих производств. Разработка новых конструкций оборудования для разделения, а также совершенствование существующих, невозможна без анализа достоинств и недостатков аппаратов, применяемых в промышленности. В статье проанализированы отечественные и зарубежные запатентованные конструкции аппаратов с фильтрующим элементом, используемые для разделения жидких гетерогенных систем. Выявлены наиболее важные и перспективные направления развития в конструировании аппаратов данного типа с учетом значимых технических и экономических аспектов для современной промышленности – энергосбережение при эксплуатации аппарата, ресурсосбережение при изготовлении аппарата, стремление к уменьшению габаритных размеров и упрощению конструкции аппарата. На основании проведенного анализа выявлены перспективные конструкции аппаратов с вращающимся фильтрующим элементом, новизна и практическая значимость которых подтверждаются патентами на полезную модель и изобретение.

Ключевые слова: нефтедобыча, буровые растворы, разделение суспензий, фильтрование, обзор патентов, анализ конструкций фильтров, перспективные конструкции фильтров

A. V. Kozlov¹, Yu. A. Taran¹, M. G. Lagutkin^{1,2}, I. Yu. Golovanov²

ANALYSIS OF THE DESIGNS OF DEVICES WITH A FILTER ELEMENT AND THE PROSPECTS FOR THEIR IMPROVEMENT FOR OIL PRODUCTION

¹MIREA – Russian technological university

²Moscow Polytechnic University

The process of separating liquid heterogeneous systems is widely used to produce various products in chemical, petrochemical, food and related industries. The devices used for separation are classified according to the driving force of the process – gravity, pressure difference or centrifugal force; according to the initial raw material – suspension or emulsion; according to the type of process – settling, filtration, settling centrifugation, filter centrifugation and hydrocyclonation. The improvement of separators of existing production facilities is an urgent task of modern industry. The development of new separator designs, as well as the improvement of existing ones, is impossible without analyzing the advantages and disadvantages of the devices used in industry. The article presents an analysis of domestic and foreign patented designs of separators with a rotating filter element. The most important and promising areas of development in the design of separators have been identified. The analysis takes into account the most important technical and economic aspects for modern industry – energy conservation and resource conservation, the desire to reduce overall dimensions and simplify the design of the separator. Based on the analysis, designs of separators with a rotating filter element are proposed. The novelty and practical significance of the proposed designs are confirmed by the presence of patents.

Keywords: oil production, drilling fluids, suspension separation, filtration, patent review, filter design analysis, promising filter designs

Аппараты и машины для разделения жидких гетерогенных систем применяются во многих отраслях промышленности, в том числе химической и нефтегазовой. Такие устройства, в частности, нашли свое применение для очистки воды и водоподготовки – процессах, без которых не обходится ни одна сфера деятельности современного общества. Отдельно стоит отметить использование данных устройств для очистки жидких сред в нефтедобывающей,

нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности, например для очистки буровых растворов от механических примесей [1; 2].

В промышленности широко известны конструкции аппаратов с неподвижным фильтрующим элементом для разделения жидких гетерогенных систем, в которых поток дисперсионной среды подается перпендикулярно фильтрующей поверхности (рис. 1) [1].

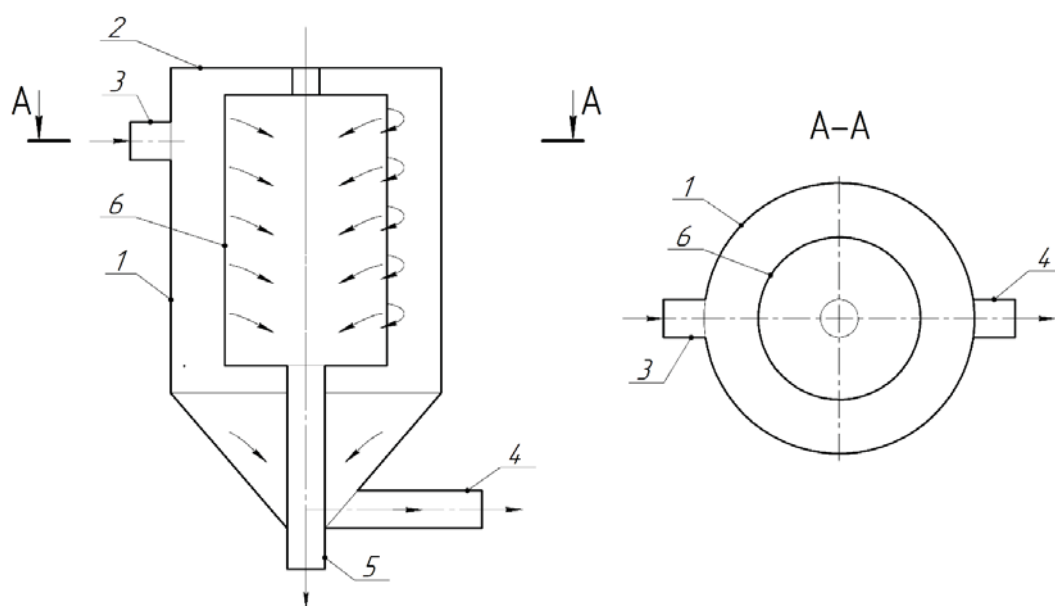


Рис. 1. Пример конструкции аппарата с неподвижным фильтрующим элементом и перпендикулярным вводом исходной жидкости:

1 – цилиндроконический корпус; 2 – крышка; 3 – патрубок ввода фильтруемой жидкости; 4 – патрубок вывода осадка; 5 – патрубок вывода фильтрата; 6 – фильтрующий элемент

К достоинствам данных конструкций стоит отнести их простоту и малые габаритные размеры. Недостатком таких аппаратов является необходимость регулярной очистки или замены фильтрующего элемента. Связано это с тем, что частицы, соизмеримые или превышающие размер ячеек фильтрующего элемента, постепенно забивают ячейки. Таким образом происходит загрязнение фильтрующего элемента и потеря

им фильтрующих свойств. Также можно отметить, что фильтрующий элемент омывается потоком исходной жидкости неравномерно, что ухудшает показатели его работы.

Для решения недостатков конструкций с перпендикулярным вводом исходной жидкости предложен ее тангенциальный ввод, в частности, в конструкции по авторскому свидетельству СССР 1349792 (рис. 2).

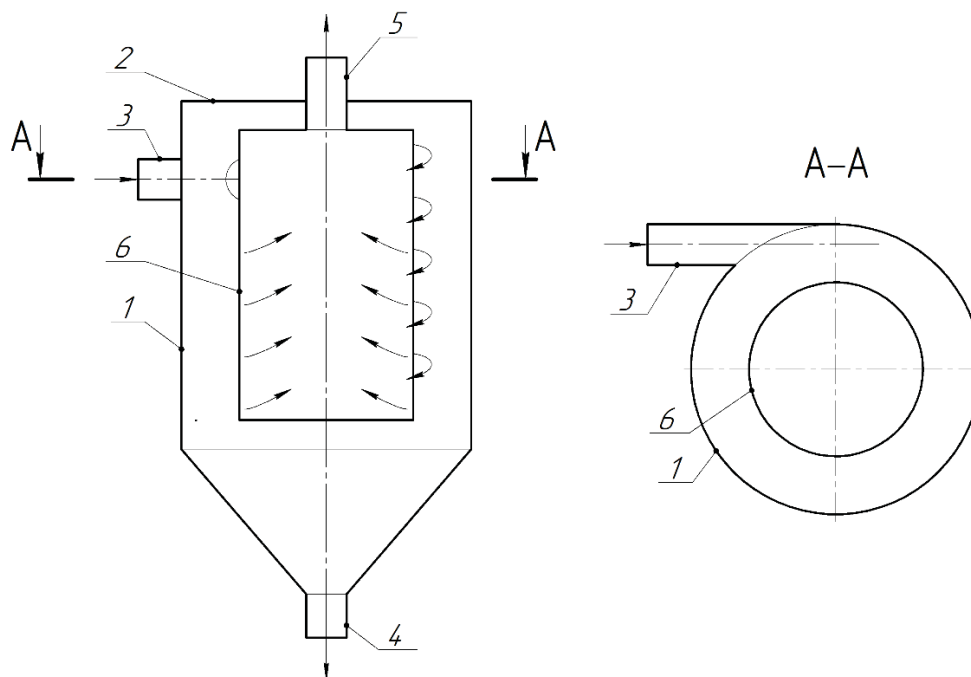


Рис. 2. Конструкция аппарата с неподвижным фильтрующим элементом и тангенциальным вводом исходной жидкости по авторскому свидетельству СССР 1349792:

1 – цилиндроконический корпус; 2 – крышка; 3 – патрубок ввода фильтруемой жидкости; 4 – патрубок вывода осадка; 5 – патрубок вывода фильтрата; 6 – фильтрующий элемент

К достоинствам таких конструкций можно также отнести простоту и малые габаритные размеры. Частично решена проблема загрязнения фильтрующего элемента – поток жидкости смывает загрязнения с его поверхности, происходит некоторое самоочищение фильтрующего элемента в процессе эксплуатации аппарата. Тем не менее, полного самоочищения фильтрующего элемента, а следовательно и непрерывности работы аппарата, такая конструкция достичь не позволяет. За счет тангенциального расположения входного патрубка исходная жидкость закручивается в аппарате, и фильтрующий элемент омывается вращающимся потоком суспензии, что может привести к повышению энергетических затрат при эксплуатации аппарата. Кроме того, при движении фильтрата внутри фильтрующего элемента снизу вверх, преодоление гидростатического дав-

ления приводит к необходимости повышения напора фильтруемой жидкости, подаваемой в цилиндроконический корпус, и следовательно увеличиваются энергозатраты при эксплуатации аппарата.

Пример конструкции аппарата с тангенциальным вводом для фильтрации транспортируемой по трубопроводу жидкости, которая может использоваться в системах теплоснабжения, промышленных водооборотных системах, а также на любых водоочистных сооружениях и установках в качестве предварительной ступени очистки любой технической воды, представлен в патенте РФ 207906.

Для решения проблемы загрязнения фильтрующего элемента были предложены два основных направления в конструировании: самоочистка фильтрующего элемента вибрацией или вращением в процессе эксплуатации аппарата.

К аппаратам с вибрационным устройством можно отнести конструкции по авторским свидетельствам СССР 344877, 1247045 и 297376 (рис. 3).

Работа таких аппаратов эффективна только с жидкостями невысокой вязкости. Проблема загрязнения фильтрующего элемента решается в ограниченной сфере применения данных аппаратов. Фильтрация сред с содержанием пластичных или липких частиц твердой фазы

ограничивает срок службы фильтрующего элемента, так как вследствие низкого напора фильтруемой жидкости на внешнюю поверхность фильтрующего элемента перепад давлений снаружи и внутри элемента недостаточен для эффективного процесса фильтрования. Такие конструкции увеличивают затраты на изготовление аппарата, а также энергетические затраты при его эксплуатации, в сравнении с конструкциями, представленными на рис. 1 и рис. 2.

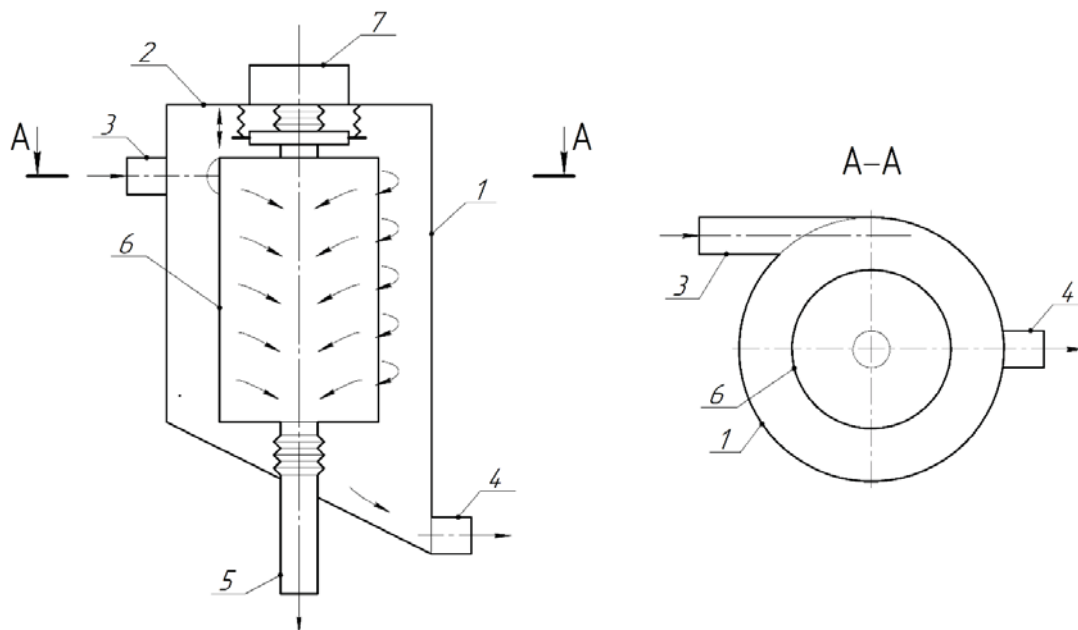


Рис. 3. Конструкция аппарата с вибрационным устройством по авторскому свидетельству СССР 297376:

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – патрубок ввода фильтруемой жидкости; 4 – патрубок вывода осадка; 5 – патрубок вывода фильтрата; 6 – фильтрующий элемент; 7 – вибрационное устройство

Отдельно стоит отметить, что решения по снабжению конструкции вибрационным устройством и тангенциальным вводом исходной жидкости могут найти свое применение в других аппаратах для разделения жидких гетерогенных систем – емкостных криоконцентраторах, одна из современных конструкций которых представлена в патенте РФ 219187 и подробно описана в статьях [3; 4]. Подобные решения применяются и при конструировании биореакторов, которые используются, в частности, для биохимической очистки сточных вод. Например, вибрационный биореактор представлен в патенте РФ 157532, биореакторы с тангенциальным вводом исходной жидкости – в патентах РФ 2135579 и 2245915. Несмотря на меньшую интенсивность разделения жидких гетерогенных систем, в сравнении с аппаратами с фильтрующим элементом, емкостные криоконцентраторы и биореакторы могут эксплуатироваться и с любым

другим типом рабочей среды – твердой, газожидкостной и газовой. Одним из направлений использования таких аппаратов является обезвреживание и очистка нефтезагрязненных суспензий, почв и грунтов, например конструкция по патенту CN 149931. Учитывая тенденции к созданию автоматизированных, автономных и мобильных устройств для проведения энерго- и ресурсосберегающих процессов во всех отраслях промышленности [5–7], развитие данных аппаратов перспективно при создании мобильных установок [8–10] для устранения последствий локальных экологических катастроф, например для обезвреживания почв и сточных вод в местах разлива нефти. При этом конструктивные решения для создания таких аппаратов и устройств могут быть взяты из известных аппаратов с фильтрующим элементом. Одна из конструкций мобильного биореактора представлена в патенте US 20130101982.

К аппаратам с вращающимся фильтрующим элементом можно отнести конструкции по патентам US 4551242, 5401422, 29532989 и 5160633, патентам РФ 2363517, 204652, а также по авторскому свидетельству СССР 797720 и патенту ЕР 1044713. К общим элементам таких конструкций относятся: цилиндроконический корпус; крышка; патрубки ввода фильтруемой жидкости, вывода осадка, патрубок вывода фильтрата; выполненный с возможностью вращения цилиндрический фильтрующий элемент; установленный на цилиндрическом фильтрующем элементе полый приводной вал. Фильтруемая жидкость подается в кольцевое пространство между цилиндрической частью цилиндро-

конического корпуса и вращающимся цилиндрическим фильтрующим элементом. В результате действия разности центробежной силы инерции, центростремительной силы Архимеда и силы сопротивления потока жидкости крупные частицы движутся к стенке цилиндрического корпуса и отводятся через патрубок вывода осадка. Мелкие частицы под действием указанных сил вместе с потоком жидкости движутся к цилиндрическому фильтрующему элементу и оседают на его поверхности. Фильтрат, содержащий частицы меньше размера ячеек фильтрующего элемента, поступает внутрь фильтрующего элемента, откуда выводится через полый приводной вал (рис. 4).

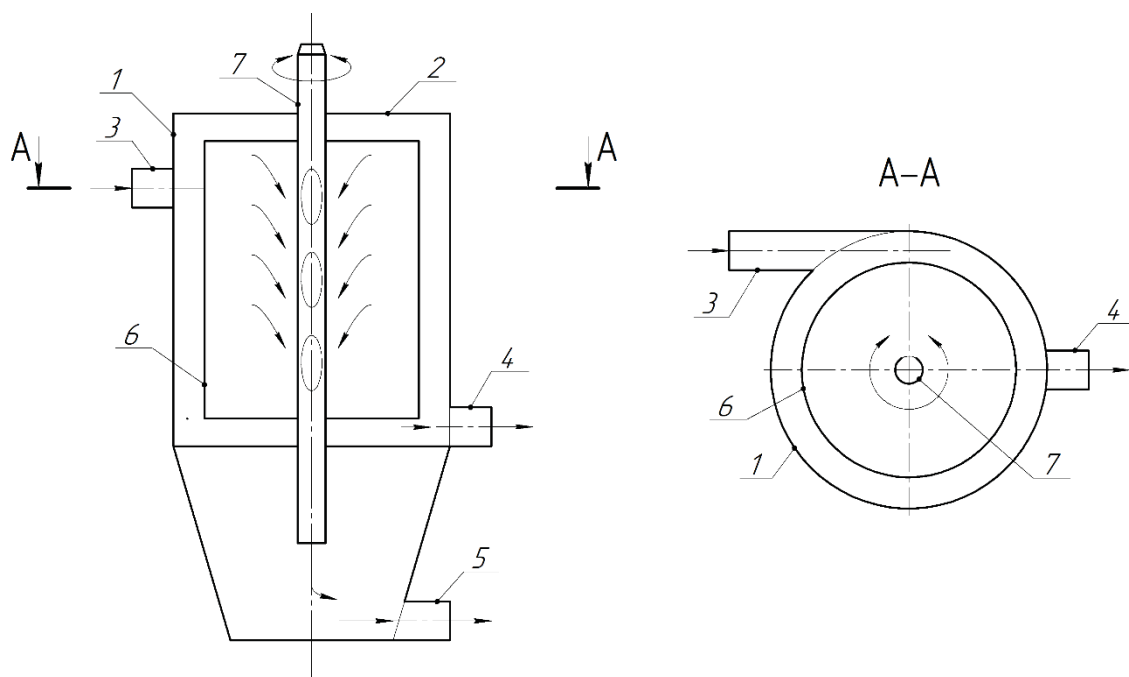


Рис. 4. Пример конструкции аппарата с вращающимся фильтрующим элементом:

1 – цилиндроконический корпус; 2 – крышка; 3 – патрубок ввода фильтруемой жидкости; 4 – патрубок вывода осадка; 5 – патрубок вывода фильтрата; 6 – фильтрующий элемент; 7 – приводной вал

Фильтрующие элементы таких аппаратов обладают большим сроком эксплуатации без падения производительности аппарата, ввиду эффективной самоочистки фильтрующего элемента, в сравнении с рассмотренными ранее конструкциями. Однако полного самоочищения фильтрующего элемента в процессе эксплуатации таких конструкций также не наблюдается. Такие конструкции увеличивают затраты на изготовление аппарата и энергетические затраты при его эксплуатации, в сравнении с конструкциями, представленными на рис. 1 и рис. 2, но при этом и обеспечивают значительно больший срок безотказной работы. Таким образом, совокупные затраты при долгосрочном использовании таких

аппаратов ниже, чем при использовании конструкций, представленных на рис. 1 и рис. 2.

В целях повышения производительности аппаратов предлагаются как комбинирование вращающегося фильтрующего элемента с вибрационным устройством (что оказывает положительный эффект только с жидкостями невысокой вязкости), так и снабжение конструкции дополнительными элементами и устройствами очистки.

К примеру, в патенте US 4551242 описана конструкция с установленными внутри корпуса ребрами. Такое решение позволяет интенсифицировать процесс самоочистки фильтра, однако при этом увеличиваются энергозатраты.

Конструкция по патенту ЕР 1044713 снабжена ультразвуковыми излучателями для обеспечения вибрации осадка и дальнейшего его смыывания потоком фильтруемой жидкости с поверхности фильтрующего элемента. Дополнительно конструкция включает моечные форсунки, которые направлены тангенциально к фильтрующему элементу и предназначены для удаления осадка с его поверхности струями моеющей жидкости под высоким давлением. При этом использование моечных форсунок возможно только при остановке процесса фильтрации. Движение фильтрата внутри фильтрующего элемента осуществляется снизу вверх, как и у конструкции по авторскому свидетельству СССР 1349792. Также в данной конструкции предусмотрены установленные внутри корпуса ребра для повышения турбулентности потока жидкости, как и в конструкции по патенту US 4551242. Таким образом, данную конструкцию можно считать сложной и требующей как высоких затрат ресурсов, так и энергозатрат.

К общим недостаткам конструкций по патентам US 4551242, 5401422, 29532989, 5160633,

авторскому свидетельству СССР 797720, патентам ЕР 1044713 и РФ 2363517 можно отнести: 1) сложность конструкции и высокие затраты на изготовление аппарата; 2) недостаточную для обеспечения непрерывности эксплуатации аппарата очистку фильтрующего элемента при работе с вязкими жидкостями или содержащими пластичные и липкие частицы твердой фазы (малую турбулентность потока жидкости); 3) малую поверхность фильтрующего элемента относительно габаритных размеров аппарата.

Конструкция по патенту РФ 204652 направлена на обеспечение непрерывности эксплуатации аппарата при работе с вязкими жидкостями, содержащими липкие частицы твердой фазы, при сохранении простоты конструкции. Для дополнительного повышения турбулентности потока жидкости разработана усовершенствованная конструкция данного аппарата. Разработанный аппарат включает цилиндрический фильтрующий элемент, ось вращения которого не коаксиальна его оси симметрии, при этом она также может быть наклонена относительно оси симметрии фильтрующего элемента (рис. 5) [11].

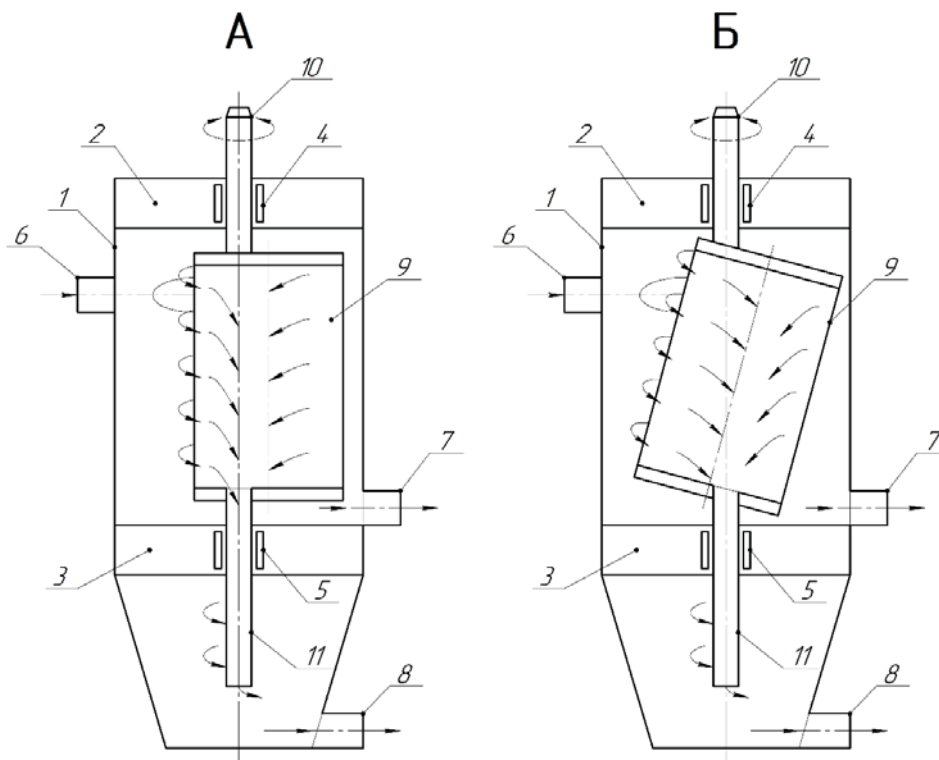


Рис. 5. Разработанная конструкция аппарата по патенту РФ 222589:

1 – цилиндрический корпус; 2 – обеспечивающая герметичность цилиндрического корпуса верхняя центрирующая пластина; 3 – обеспечивающая герметичность цилиндрического корпуса нижняя центрирующая пластина; 4 – верхний блок подшипников; 5 – нижний блок подшипников; 6 – тангенциальный патрубок ввода фильтруемой жидкости; 7 – патрубок вывода осадка; 8 – патрубок вывода фильтрата; 9 – фильтрующий элемент; 10 – приводной вал; 11 – выводная труба; А – ось вращения фильтрующего элемента параллельна оси его вращения; Б – ось вращения фильтрующего элемента наклонена относительно оси его вращения

При приведении во вращение цилиндрического фильтрующего элемента посредством вращения приводного вала, где ось вращения цилиндрического фильтрующего элемента не коаксиальна его оси симметрии, увеличивается тангенциальная составляющая скорости потока жидкости вблизи цилиндрического фильтрующего элемента и следовательно увеличивается турбулентность потока. За счет

турбулентности потока фильтруемой жидкости уменьшится слой образующегося осадка на поверхности цилиндрического фильтрующего элемента.

Ось вращения цилиндрического фильтрующего элемента может быть наклонена относительно оси цилиндрического корпуса для дополнительного повышения турбулентности потока фильтруемой жидкости.

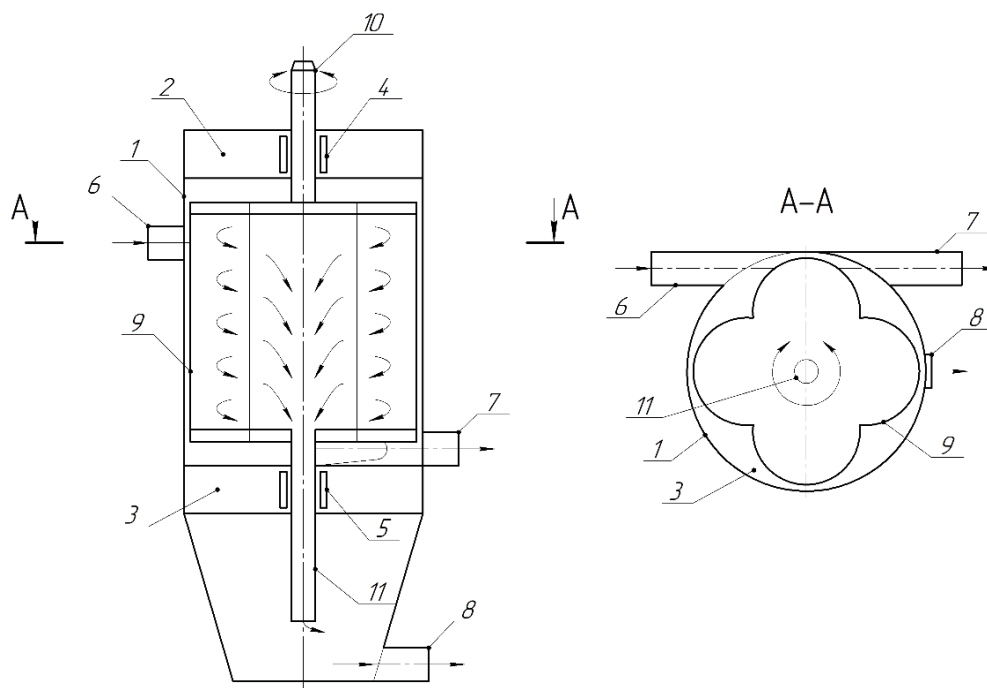


Рис. 6. Разработанная конструкция аппарата по патенту РФ 2817866:

1 – цилиндрический корпус; 2 – обеспечивающая герметичность цилиндрического корпуса верхняя центрирующая пластина; 3 – обеспечивающая герметичность цилиндрического корпуса нижняя центрирующая пластина; 4 – верхний блок подшипников; 5 – нижний блок подшипников; 6 – тангенциальный патрубок ввода фильтруемой жидкости; 7 – патрубок вывода осадка; 8 – патрубок вывода фильтрата; 9 – фильтрующий элемент; 10 – приводной вал; 11 – выводная труба

Конструкция аппарата по патенту РФ 204652 может быть усовершенствована увеличением поверхности фильтрующего элемента при сохранении габаритных размеров аппарата и простоты его конструкции. Разработанная конструкция представлена в патенте (рис. 6) [12].

Отличительной особенностью такой конструкции является выполнение фильтрующего элемента с поперечным сечением в форме эписциклоиды (на рис. 5 представлен пример при количестве каспов эписциклоиды, равном 4). За счет приведения во вращение эписциклоидного фильтрующего элемента будет увеличиваться турбулентность потока и уменьшаться слой образующегося осадка на поверхности фильтрующего элемента. При этом периметр эписцик-

лоиды (с количеством каспов не менее 4) всегда больше, чем длина окружности, в которую вписана эписциклоида. Следовательно, такая конструкция фильтрующего элемента будет обладать большей площадью поверхности фильтрования в сравнении с фильтрующим элементом цилиндрической формы (при равных габаритных размерах). Увеличение количества каспов эписциклоиды будет увеличивать площадь поверхности фильтрования, но при этом снижать турбулентность потока фильтруемой жидкости.

Эффективность процесса разделения может быть повышена при снижении энергетических затрат на процесс разделения, за счет определения рациональных соотношений геометрических параметров аппаратов [13].

Выводы

1. Проведен анализ различных отечественных и зарубежных конструкций фильтров для разделения жидких гетерогенных систем, отмечены их преимущества и недостатки, возможность использования для очистки буровых растворов.

2. Наиболее перспективным направлением при совершенствовании аппаратов с фильтрующим элементом является создание конструкции, обеспечивающей очистку фильтрующего элемента, достаточную для организации непрерывного процесса фильтрации и развитую площадь поверхности фильтрующего элемента без увеличения его габаритных размеров. Таким критериям наиболее близко соответствуют аппараты с вращающимся фильтрующим элементом и тангенциальным вводом фильтруемой жидкости.

3. На основании проведенного анализа конструкций аппаратов с вращающимся фильтрующим элементом предложены конструкция с цилиндрическим фильтрующим элементом, ось вращения которого не коаксиальна его оси симметрии (дополнительно ось вращения может быть наклонена относительно оси симметрии фильтрующего элемента), и конструкция с фильтрующим элементом, поперечное сечение которого выполнено в форме эпициклоиды. Разработанные конструкции позволяют увеличивать турбулентность потока жидкости и уменьшать слой образующегося осадка на поверхности фильтрующего элемента. Конструкция с эпициклоидным фильтрующим элементом дополнительно позволяет увеличить площадь поверхности фильтрующего элемента без увеличения его габаритного размера. Новизна и практическая значимость разработанных конструкций подтверждены патентами на полезную модель и изобретение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимонин, А. С. Оборудование нефтегазопереработки, химических и нефтехимических производств / А. С. Тимонин, Е. Ю. Баранова, Г. В. Божко. – М.: Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 948 с.
2. Атачкина, Н. А. Анализ целесообразности использования вихревого гидроразделителя для очистки буровых растворов / Н. А. Атачкина, Е. Ю. Баранова, М. Г. Лагут-

кин, Д. Е. Суханова // Техника и технология добычи нефти. – 2018. – № 4. – С. 49–55.

3. Ugolnikova, M. A. Dynamics of Water Ice Formation during the Operation of Vessel Cryoconcentrators / M. A. Ugolnikova, V. V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 57. – P. 561–566.

4. Sapozhnikov, V. B. Evaluating the Performance of Low-Temperature Liquid Separation Devices with Two-Stage Refrigeration and Pre-Cooling / V. B. Sapozhnikov, M. A. Ugolnikova, V. V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2023. – Vol. 59. – P. 134–138.

5. Албагачиев, А. Ю. Необходимость применения автоматизированных систем в 21 веке. Предпосылки появления цифрового производства / А. Ю. Албагачиев, А. С. Краско, Д. А. Радайкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2023. – № 2. – С. 62–74.

6. Краско, А. С. Повышение производительности автоматизированных технологических комплексов путем применения групповых приспособлений / А. С. Краско, М. А. Филин // Главный механик. – 2021. – № 5. – С. 34–43.

7. Краско, А. С. Использование цифровых моделей технологических систем для оценки эффективности проектных решений / А. С. Краско, Н. С. Баранова, Т. Н. Боровик // Инновационные технологии в электронике и приборостроении: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием Физико-технологического института РТУ МИРЭА, Москва, 16-17 апреля 2020 года. Том 2. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2020. – С. 102–103.

8. Албагачиев, А. Ю. Модель загрузки транспортно-загрузочного средства гибкой производственной системы / А. Ю. Албагачиев, А. С. Краско // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 4. – С. 77–82.

9. Сулима, С. И. Перспективы использования аммиака в мобильных силовых установках с двигателем внутреннего сгорания / С. И. Сулима, А. П. Савостьянов // Результаты исследований – 2020: Материалы V Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ), Новочеркасск, 15 мая 2020 года. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, 2020. – С. 165–166.

10. Shabelskaya, N. Study of the Possibility of Using Sol-Gel Technology to Obtain Magnetic Nanoparticles Based on Transition Metal Ferrites / N. Shabelskaya [et al.]. // Gels. – 2023. – Vol. 9, № 3. – P. 217.

11. Патент РФ на полезную модель № 222589, B01D33/11. Устройство для разделения суспензий / А. В. Козлов, М. Г. Лагуткин, И. Ю. Голованов. Оpubл. 11.01.2024. Бюл. № 2.

12. Патент РФ на изобретение № 2817866, B01D17/0217, B01D33/11. Устройство для разделения суспензий / А. В. Козлов, М. Г. Лагуткин, И. Ю. Голованов. Оpubл. 22.04.2024. Бюл. № 12.

13. Lagutkin, M. G. Reduction of energy consumption for suspension separation process implementation in hydrocyclones / M. G. Lagutkin, A. N. Shulyak, E. Yu. Baranova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2023. – Vol. 59. – P. 449–456.