

Исследование возможностей аддитивных технологий на основе термопластичных материалов в лабораторном эксперименте и при изучении ограничения выноса песка в добывающих скважинах

В.Б. Демьяновский*, Д.А. Каушанский, А.С. Дрозд**

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

E-mail: *demian20@yandex.ru, **idrozd1999@gmail.com

Аннотация. В данной работе представлена возможность проектирования противопесочных фильтров в системе автоматизированного проектирования Компас-3D российской компании АСКОН, а также создание внутрипластового фильтра на основе радиационно-сшитого полиэтилена. Экспериментально исследованы фильтрационные свойства фильтров и возможность удержания песка данными моделями.

Ключевые слова: противопесочный фильтр, полиэтилен, Компас-3D, 3D-печать, вынос песка, модель, спекание

Для цитирования: Демьяновский В.Б., Каушанский Д.А., Дрозд А.С. Исследование возможностей аддитивных технологий на основе термопластичных материалов в лабораторном эксперименте и при изучении ограничения выноса песка в добывающих скважинах // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. Вып. 4(43). С. 106–116. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-43.art8>

Введение

В настоящее время существует проблема выноса песка из скважины, которая обуславливается добычей из слабосцементированных коллекторов, высокой депрессией, а также загрязненностью призабойной зоны [1]. В свою очередь песок негативно влияет на темпы отбора пластового флюида и износу подземного и наземного оборудования, что ведет за собой увеличение операционных затрат [2, 3]. Для решения данной проблемы применяют фильтры различных конструкций, их можно разделить на классы: щелевые, перфорированные, каркасно-стержневые, проволочные, сетчатые и фильтр с опорным элементом [1]. Во всем этом разнообразии нет стандартного и многофункционального фильтра, поэтому их конструкции постоянно дорабатываются и появляются новые.

В данной статье речь пойдет о возможности создания внутрипластового фильтра, сформированного по аддитивной технологии из полимерных гранул, – за счет термического спекания происходит формирование проницаемого для пластовых флюидов полимерного фильтра, препятствующего поступлению песка в скважину [4].

Под аддитивной технологией, в большинстве случаев, понимается процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем. Термины и определения, базовые принципы, общие требования к материалам для аддитивных технологических процессов закреплены в национальном и международных стандартах [5, 6].

Этими документами установлено требование к созданию электронной модели перед собственно процессом создания физического объекта и по этой причине термин «аддитивная технология» и 3D-печать становятся синонимами. Однако появилось устройство, названное 3D-ручкой, которое использует те же материалы, что и для 3D-печати, имеет встроенный экструдер (агрегат для формования пластичных материалов, *прим. ред.*) для подогрева филамента (термопластичной полимерной нити) как у 3D-принтера и создает объемный физический объект путем добавления материала слой за слоем, но при этом не считается 3D-принтером и для него не нужно создание электронной модели. С формальной позиции указанных стандартов 3D-ручка не использует аддитивную технологию, что выглядит нелогично. Можно привести и другие примеры, когда технологию изготовления детали формально не относят к аддитивной, но в ней физический объект создается путем добавления материала порциями. При обобщенном толковании термина «аддитивные технологии» можно расширить возможности реализации и компонентную базу для изготовления физических объектов, а не ограничиваться только специально сформированным полупродуктом для 3D-принтеров – филаментом [7].

Практика применения аддитивных технологий в лаборатории

В работе использованы 3D-принтер «Picaso», система автоматизированного проектирования 3D-моделей Компас-3D и Freecad, а также термопластичные материалы: полипропилен, фракция 0,2–0,8 мм гранулированного полиэтилена марки PE-X (сшитый ионизирующим излучением с

дозой 60 и 90 кГр), PETG, термошкаф с регулируемой температурой.

В настоящем исследовании рассмотрены возможности расширенных вариантов аддитивных технологий изготовления из термопластичных материалов изделий, которые необходимы для практического применения в лабораторной практике, а также при добыче газа.

Совместное рассмотрение лабораторного и промыслового экспериментов основывается на общем исходном материале исследований – термопластичных полимерах. Несомненно, что среди аддитивных технологий 3D-печать по цифровой модели предоставляет наибольшие возможности для лабораторного эксперимента. Теоретически в лаборатории экспериментатор может изготовить методом 3D-печати многое из применяемого в настоящее время оборудования, включая приборы для исследования, колбы, стаканы и т. п., которые традиционно приобретались от сторонних производителей. С этой точки зрения 3D-печать может возродить существовавшую ранее практику изготовления лабораторного оборудования самими экспериментаторами, т. е. «своими руками». Существенным аргументом в выборе вариантов путей приобретения оборудования являются его стоимость, доступность и ряд специфических свойств используемого термопластичного полимера. Анализ используемого оборудования в лаборатории, технике, строительстве и быту позволил сделать вывод о том, что особое положение в этих областях занимают продукты большой химии – полиэтилен и полипропилен, отличающиеся низкой стоимостью, химической инертностью, экологичностью и возможностью вторичной переработки.

Особенности применения полиэтилена и полипропилена при 3D-печати. Несмотря на схожесть химического состава, печать полиэтиленом не используется, так как печать обычным полиэтиленом не позволяет получить качественное изделие. Иначе обстоит дело с полипропиленом, который выпускается также в виде расходных материалов для 3D-принтеров, хотя и уступает по популярности таким полимерам как PLA, PETG, ABS. В свою очередь, популярные пластики не обладают такой химической инертностью, какой обладают изделия из полипропилена. По этой причине изделие, полученное в лабораторных условиях, может быть использовано также в промысловых условиях.

В лабораторных условиях возможна реализации «полимерной экосистемы», в которой реализуется кругооборот пластика и расширяется база компонентов для аддитивных технологий, включающих не только 3D-печать. Одна из таких технологий, рассматриваемая ниже, – это создание внутрипластавого фильтра. Также перспективно использовать в лаборатории совмещенные технологии, предполагающие совмещение в одном изделии элементов, полученных по разным аддитивным технологиям. Примером этого могут быть фрагменты лабораторной установки для гидродинамических исследований, изготовленные из стандартных фитингов и кранов из полипропилена и переходников, изготовленных по технологии 3D-печати тоже из полипропилена и скрепленных методом термической сварки. Лабораторное применение полипропилена в данном случае позволяет повысить надежность герметизации трубопроводных коммуникаций за счет отказа от традиционных резьбовых соединений из металла.

Изготовление противопесочных фильтров из термопластичных материалов в лаборатории и на газовой скважине

На многих газовых месторождениях существует проблема выноса песка в скважину. Существует два похода к ее решению. Первый состоит в установке в скважину противопесочного фильтра. Наиболее эффективными устройствами для решения проблем с выносом песка считаются гравийные фильтры, но их недостатком являются высокие затраты на установку и эксплуатацию. Кроме того, установка фильтров в скважине не позволяет проводить стандартные геофизические исследования скважины без его демонтажа.

Второй подход к ограничению выноса песка состоит в укреплении породы в призабойной зоне скважины скрепляющими химическими реагентами при сохранении проницаемости породы для газа и создания, таким образом, внутрипластавого фильтра. Одним из достоинств этого подхода является сохранение пространства скважины для ее исследования.

Возможности 3D-проектирования и 3D-печати позволяют спроектировать и изготовить геометрические аналоги гравийных фильтров из термопластичных материалов по технологии FDM FFM.

Однако, создание фильтров за пределами скважины – в призабойной зоне нельзя выполнить методом 3D-печати. При этом следует отметить, что существует возможность заполнения призабойной зоны или ее части проницаемой структурой из термопластичного материала, выполняющей функции внутрипластавого фильтра. Эти структуры можно рассматривать одновременно и аналогом технологии укрепления призабойной зоны, в которой создается искусственный коллектор с более высокими механическими свойствами, чем у пластовой породы.

Указанная возможность реализована в технологии ИПНГ РАН, разработанной по аддитивной технологии в расширенной интерпретации с применением термопластичных полимеров. Технология имеет много общих черт с технологией 3D-печати, так как использует одни и те же материалы, и температурный профиль формования фильтров в обоих случаях имеет близкие значения температуры. Предполагается, что технологическая схема создания внутрипластового фильтра будет включать стадию приготовления суспензии полимера в жидкости–носителе для транспортировки гранул полимера с поверхности на забой скважины и в пласт [4]. В простом случае предполагается в качестве носителя использовать воду, но при этом необходимо учитывать всплытие гранул полимера в воде и образование суспензии с большой концентрацией полимера.

Исследование структуры лабораторных образцов фильтрующих материалов, изготовленных методом 3D-печати по цифровой модели фиктивного грунта из массива сферических элементов миллиметрового диапазона, и образца фильтрующего материала, полученного спеканием гранул термопластичного материала, показало принципиальную возможность получения фильтрующего материала методом спекания из полимерных гранул. В процессе работы установлено, что при спекании полимерных гранул имеется риск полного расплавления гранул и образования сплошного массива полимера, который не является фильтром. Для снижения отмеченного риска было решено использовать опыт, полученный в производстве сшитого гранулированного полимера под маркой «Темпоскрин», в котором сшитая структура макромолекул обеспечивается обработкой гранул полимера ионизирующим излучением [8].

Среди разных типов термопластичных материалов выбор был остановлен на полиэтилене, так как он наиболее эффективно поддается сшиванию под действие ионизирующего излучения, но может быть приготовлен и другим способом, и в товарном виде выпускается в виде гранул различного размера. Сшитый полиэтилен обладает повышенной термической стабильностью и по этой причине находит достаточно широкое применение в других областях и маркируется индексом PE-X [9].

Исследования по приготовлению фильтров из термопластичных материалов были проведены в двух направлениях. Первое направление предполагало изготовление материала фильтра по технологии 3D-печати полимерной нитью. Второе направление исследовало возможность приготовления фильтра из термопластичного материала методом спекания при температурах, близких к температурам экструзии полимера в 3D-принтере. В качестве цифровой модели материала фильтра была использована модель фиктивного грунта, спроектированная в системе автоматизированного проектирования Компас-3D. Сама модель представляла собой массив шаров диаметром 1,5 мм, упакованный в кубическую решетку с зацеплением между шарами на 0,1 мм, материал печати – пластик PETG, температура экструдера 3D-принтера – 220 °C.

По второму направлению приготовление фильтров произведено методом спекания гранул сшитого полиэтилена диаметром 0,2–0,8 мм спеканием в цилиндрическом контейнере диаметром 22 мм в термическом шкафу с регулируемой температурой при 120–140 °C в течение 2-х часов.

Кроме сшитого полимера в качестве контрольного образца исследован фильтр из гранул несшитого полиэтилена.

Результаты исследований и образцов полученных фильтров представлены на рис. 1.

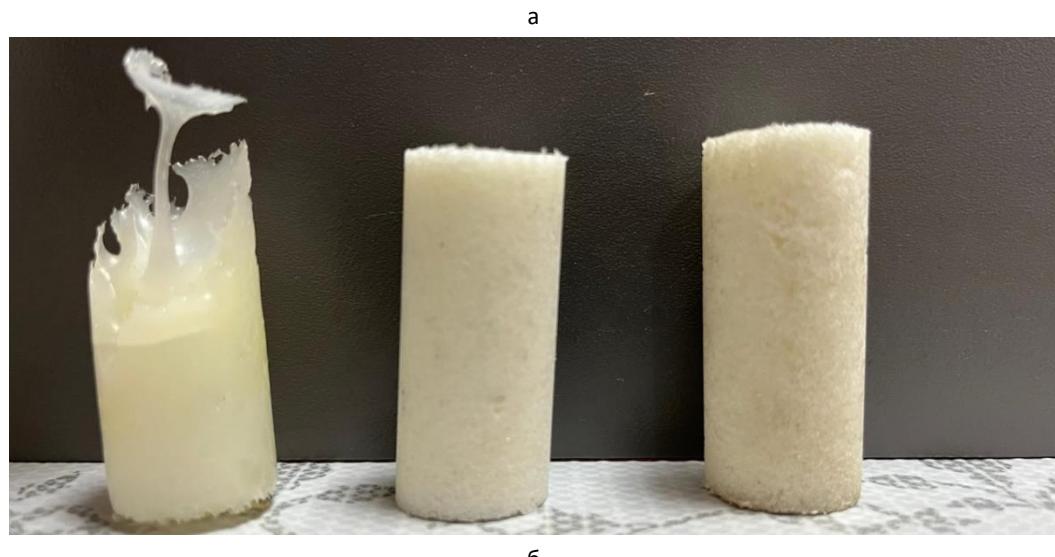
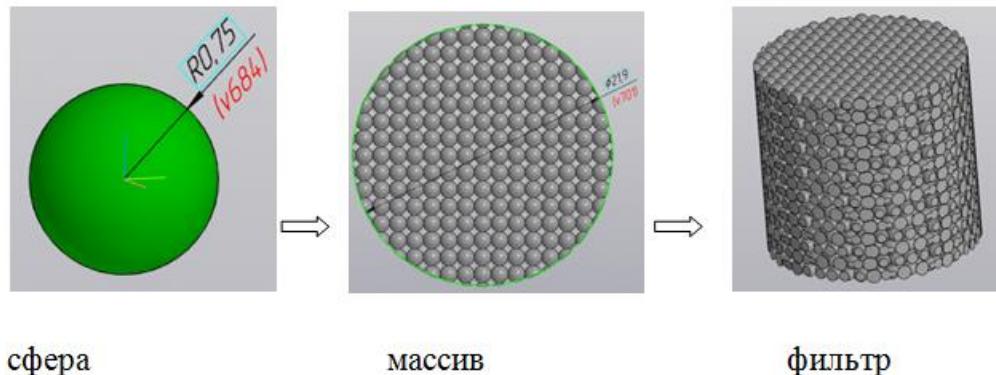


Рис. 1. Создание и вид образцов фильтров, изготовленных по технологии 3D-печати: а – проектирование в системе Компас-3Д; б – методом спекания гранул полиэтилена, несшитого и сшитого лазером 60 и 90 кГц

Проницаемость и пескоудерживающие свойства материалов фильтров испытывали на установке, представленной на рис. 2. Установка представляет собой гидродинамическую цепь в виде U-образной трубы из прозрачного материала с включением в одно из ее колен испытуемого образца цилиндрической формы диаметром 25 мм. Трубка заполнялась водой до середины высоты. В колена трубы вставлены входной и выходной

патрубки циркуляционного перистальтического насоса с регулируемой скоростью. В процессе циркуляции воды измеряли скорость циркуляции и перепад уровней воды в коленах трубки. Эти данные использовались для расчета проницаемости по уравнению Дарси. Определение пескоудержания проводилось на той же установке на фильтре с добавлением слоя стандартного песка [10].

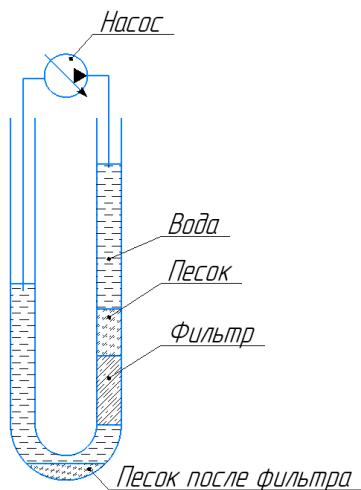


Рис. 2. Лабораторная установка для изучения фильтрационных и фильтрующих свойств фильтров

Результаты лабораторных испытаний образцов фильтров, полученных методом 3D-печати и методом спекания гранул полимера, проведенные на установке рис. 2, сведены в табл. 1. Из таблицы видно, что обе технологии позволяют получить фильтры со сходными параметрами как по проницаемости, так и по удержанию песка при фильтрации флюида.

Дополнительная информация была получена при микроскопическом исследовании структуры фильтров, полученных по рассмотренным технологиям (рис. 3).

Таблица 1

Свойства фильтров, изготовленных по технологии 3D-печати и спекания гранул полимера

Размер гранул, мм	Проницаемость, Д	Технология	Материал	Удержание песка, %
1	35,3	3D-печать	PETG	100
1,5	130,9	3D-печать	PETG	98
2	202,8	3D-печать	PETG	86
0,2–0,8	97,6	Спекание гранул	PE-X (60 кГр)	100
0,2–0,8	92,7	Спекание гранул	PE-X (60 кГр)	100
0,2–0,8	89,5	Спекание гранул	PE-X (90 кГр)	100
0,2–0,8	95,1	Спекание гранул	PE-X (90 кГр)	100

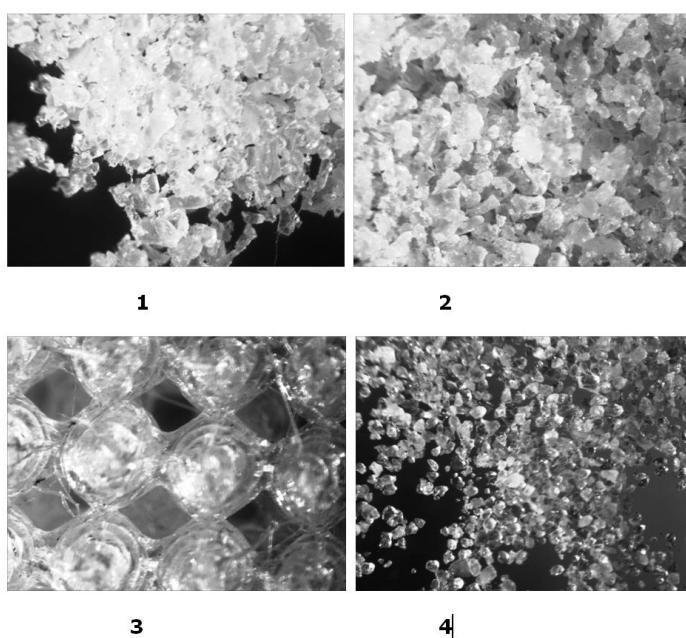


Рис. 3. Микрофотографии в формате 7×4 мм структур: 1 – фильтра из гранул полиэтилена, 2 – массива гранул полиэтилена, 3 – фильтра, изготовленного методом 3D-печати по модели фиктивного грунта из сфер диаметром 1,5 мм, 4 – кварцевого песка фракции 0,2–0,4

По микрофотографиям установлено, что при использовании метода 3D-печати модели фиктивного грунта на стандартном принтере минимальный размер структурных сферических элементов ограничивается 1 мм. Структура фильтра, полученного методом спекания, сохраняет форму исходных гранул полимера. Размер пор близок к размеру частиц кварцевого песка размером 0,2–0,4 мм.

Оценка технической возможности реализации технологии создания внутрипластового фильтра

Полученные лабораторные результаты позволили подобрать материалы для фильтров и температурные режимы их применения. При реализации технологии на реальной скважине, кроме проведенных лабораторных исследований, необходимо выполнить следующие условия:

1. Обосновать выбор скважин и объемы закачки гранул на основе геологотехнического анализа работы скважины;
2. Приготовить сшитый полиэтилен в гранулах;

3. Подобрать жидкость–носитель для гранул полиэтилена;

4. Выбрать технологическое оборудование для приготовления и закачки суспензии в скважину;

5. Выбрать оборудование для временной термической обработки массива гранул в пластовых условиях.

Технология предполагает наличие в призабойной зоне скважины свободного пространства (каверн) и заполнение его полностью или частично искусственным фильтром. Признаком наличия свободного пространства является отрицательный скин-фактор, определяемый при гидродинамических испытаниях [11].

В качестве исходных материалов можно выбрать промышленные гранулы стандартных размеров 3–4 мм и порошкообразный полиэтилен, используемый в технологии ротационного формования с размером гранул 0,2–0,8 мм. Принципиальная схема создания внутрипластового фильтра представлена на рис. 4.

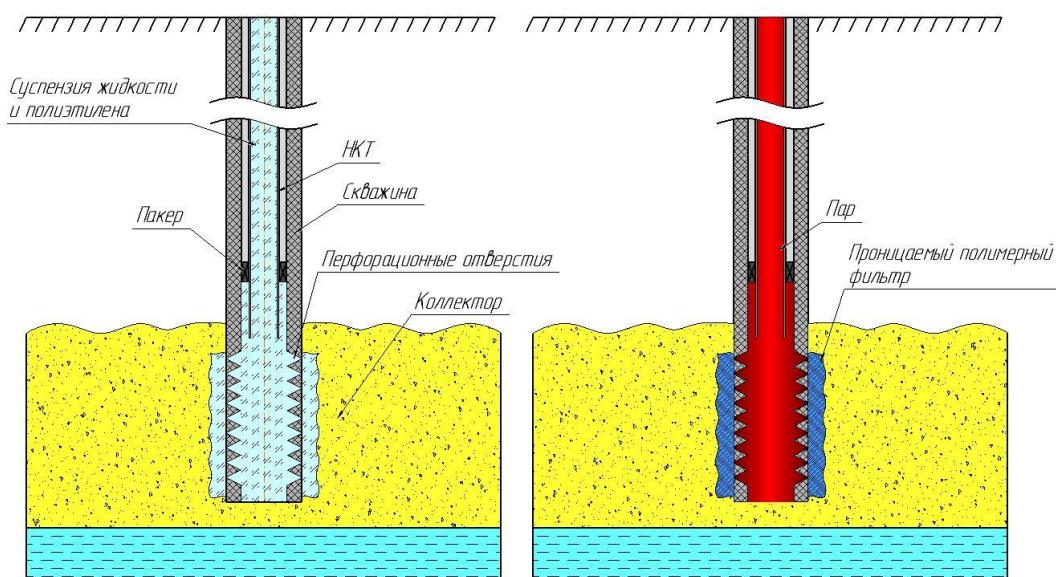


Рис. 4. Схема создания внутрипластового фильтра

Указанную схему предлагается реализовать по следующим этапам:

1. Доставка оборудования (ЦА-320 м, ППУ, технологических емкостей) и обвязка этого оборудования со скважиной.
2. Приготовление суспензии полимера и закачка полимера в призабойную зону.
3. Обработка гранул полимера в призабойной зоне до температур 140–150 °C
4. Охлаждение полимера водой до пластовой температуры.

5. Пуск скважины в эксплуатацию.

Выводы

Исследована возможность применения аддитивных технологий для лабораторных исследований и создания внутрипластового фильтра из сшитого полиэтилена. Предложена вероятная технологическая схема реализации технологии с привязкой к стандартному промысловому оборудованию.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания ИПНГ РАН (тема «Фундаментальный базис энергоэффективных, ресурсосберегающих и экологически безопасных, инновационных и цифровых технологий поиска, разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, исследование, добыча и освоение традиционных и нетрадиционных запасов и ресурсов нефти и газа; разработка рекомендаций по реализации продукции нефтегазового комплекса в условиях энергоперехода и политики ЕС по декарбонизации энергетики (фундаментальные, поисковые, прикладные, экономические и междисциплинарные исследования)», № 122022800270-0).

Литература

1. Малюков В.П., Старовойтова Ю.И. Совершенствование технологий ограничения выноса частиц породы при разработке месторождений углеводородов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. №3. С. 61–68. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-3-0-61-68>
2. Емельянов Д.В. Проблемы с выносом механических примесей и пути решения при эксплуатации на месторождениях ОАО «Удмуртнефть» // Инженерная практика. 2010. № 2. С. 49–55.
3. Камалетдинов Р.С., Лазарев А.Б. Обзор существующих методов борьбы с мехпримесями // Инженерная практика. 2010. № 2. С. 6–13.
4. Демьяновский В.Б., Каушанский Д.А. Пат. RU 2784877 С1. Способ ограничения выноса песка в добывающие скважины. № 2022105377; Заявл. 01.03.2022; Опубл. 30.11.2022 // Изобретения. Полезные модели. 2022. Бюл. № 34. 6 с. <http://www1.fips.ru>
5. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.
6. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2017. 8 с.
7. ГОСТ Р 59100-2020. Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2020. 8 с.

8. Каушанский Д.А., Демьяновский В.Б. А.с. SU 1669404 А3. Добавка к закачиваемой в пласт воде «Темпоскрин» и способ получения добавки. № 4713456/03; Заявл. 03.04.1989; Опубл. 10.06.1999 // Изобретения. Полезные модели. 1999. Бюл. № 16. <http://www1.fips.ru>
9. ГОСТ Р 59112-2020 (ИСО 10147:2011). Трубы и фитинги из сшитого полиэтилена (PE-X). Оценка степени сшивки по содержанию гель-фракции. М.: Стандартинформ, 2020. 6 с.
10. ГОСТ 22551-77. Песок кварцевый. Молотые песчаник, кварцит и жильный кварц для стекольной промышленности. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1979. 14 с.
11. Dusseault M.B., Waterloo A.S., Tronvoll J. et al. Skin self-cleaning in high-rate oil wells using sand management // SPE International Symposium on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, 23–24 February 2000. Paper SPE-58786-MS. <https://doi.org/10.2118/58786-MS>

Информация об авторах

Владимир Борисович Демьяновский – к.х.н., старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, demian20@yandex.ru

Давид Аронович Каушанский – к.т.н., заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, dak@ipng

Александр Сергеевич Дрозд – ведущий инженер, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, idrozd1999@gmail.com

Поступила в редакцию 01.12.2023

Study of the possibilities of additive technologies based on thermoplastic materials in a laboratory experiment and in studying the limitation of sand production in production wells

V.B. Demyanovskiy*, D.A. Kaushanskiy, A.S. Drozd**

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: *demian20@yandex.ru, **idrozd1999@gmail.com

Abstract. This paper presents the possibility of designing sand filters using the Compass-3D computer-aided design system of the Russian company ASCON, as well as creating an in-situ filter based on radiation cross-linked polyethylene. The filtration properties of filters and the possibility of sand retention by these models are experimentally studied.

Keywords: sand filter, polyethylene, Kompas-3D, 3D printing, sand removal, model, sintering

Citation: Demyanovskiy V.B., Kaushanskiy D.A., Drozd A.S. Study of the possibilities of additive technologies based on thermoplastic materials in a laboratory experiment and in studying the limitation of sand production in production wells // Actual Problems of Oil and Gas. 2023. Iss. 4(43). P. 106–116. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-43.art8> (In Russ.).

References

1. Malyukov V.P., Starovoitova Yu.I. Improving technologies that limit production of solids in hydrocarbon recovery // Mining Information and Analytical Bulletin. 2018. No. 3. P. 61–68. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-3-0-61-68> (In Russ.).
2. Emelyanov D.V. Problems with the removal of mechanical impurities and solutions during operation at the fields of Udmurtneft OJSC // Engineering Practice. 2010. No. 2. P. 49–55. (In Russ.).
3. Kamaletdinov R.S., Lazarev A.B. Review of existing methods for combating mechanical impurities // Engineering Practice. 2010. No. 2. P. 6–13. (In Russ.).
4. Demyanovskij V.B., Kaushanskij D.A. Pat. RU 2784877 C1. Method for limiting sand production in production wells. No. 2022105377; Appl. 01.03.2022; Publ. 30.11.2022 // Inventions. Utility models. 2022. Bull. No. 34. 6 p. <http://www1.fips.ru> (In Russ.).
5. GOST R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Additive manufacturing processes. General principles. Part 1. Terms and definitions. Moscow: Standardinform, 2017. 12 p. (In Russ.).
6. GOST R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Additive processes. Basic principles. Part 2. Materials for additive manufacturing processes. General requirements. Moscow: Standartinform, 2017. 8 p. (In Russ.).
7. GOST R 59100-2020. Plastics. Filaments for additive technologies. General technical requirements. Moscow: Standartinform, 2020. 8 p. (In Russ.).
8. Kaushanskij D.A., Demyanovskij V.B. A.c. SU 1669404 A3. Additive to the water injected into the formation Temposcreen and a method for obtaining an additive. No. 4713456/03; Appl. 03.04.1989; Publ. 10.06.1999 // Inventions. Utility models. 1999. Bull. No. 16. <http://www1.fips.ru> (In Russ.).

9. GOST R 59112-2020 (ISO 10147:2011). Pipes and fittings made of crosslinked polyethylene (PE-X). Estimation of the degree of crosslinking by determination of the gel content. Moscow: Standartinform, 2020. 6 p. (In Russ.).
10. GOST 22551-77. Quartz sand. Ground sandstone, quartzite and veiny quartz for glass industry. Specifications. Moscow: Standards Publishing House, 1979. 14 p. (In Russ.).
11. Dusseault M.B., Waterloo A.S., Tronvoll J. et al. Skin self-cleaning in high-rate oil wells using sand management // SPE International Symposium on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, 23–24 February 2000. Paper SPE-58786-MS. <https://doi.org/10.2118/58786-MS>

Information about the authors

Vladimir B. Demyanovskiy – Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, d_surnachev@mail.ru

David A. Kaushanskiy – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Leading Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, dak@ipng

Aleksandr S. Drozd – Leading Engineer, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, idrozd1999@gmail.com

Received 01.12.2023