

## Исследование возможности проектирования и изготовления лабораторных моделей керна методом 3D-проектирования и 3D-печати

**В.Б. Демьяновский**

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия  
E-mail: demian20@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрена тема 3D-проектирования структуры порового коллектора нефти и газа программными пакетами для промышленного дизайна физических объектов, а также проблемы трансляции объектов 3D-проектирования в физические объекты с целью исследования их фильтрационно-емкостных свойств при традиционном физико-химическом исследовании. Приведен пример использования программы параметрического трехмерного моделирования с открытым исходным кодом FreeCAD для создания моделей цифрового керна и изготовления физических копий цифровых 3D-моделей по технологии Fused Deposition Modeling (моделирования методом послойного наплавления), использующей послойное наплавление термопластичной нити на модель. Показано, что одну и ту же 3D-модель можно распечатать как по технологии Fused Deposition Modeling, так и по технологии селективного лазерного наплавления. Рассмотрены преимущества свободного программного обеспечения для изучения физико-химических процессов в коллекторах нефти и газа.

**Ключевые слова:** разработка месторождений нефти и газа, 3D-проектирование, 3D-модель, цифровой керн, коллектор нефти и газа, 3D-печать.

**Для цитирования:** Демьяновский В.Б. Исследование возможности проектирования и изготовления лабораторных моделей керна методом 3D-проектирования и 3D-печати // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. Вып. 4(39). С. 117–125. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-39.art9>

Реализация новых физико-химических технологий повышения добычи нефти и газа на реальном объекте разработки месторождений традиционно проходит через стадию лабораторных испытаний прокачки технологических жидкостей через модель пласта. В простейшем случае в качестве модели пласта применяют трубчатую модель, заполненную кварцевым песком, через которую под давлением фильтруют жидкие углеводороды, определяя при этом гидродинамические параметры пористой среды – проницаемость и гидравлическое сопротивление. Отдельные измерения производят для определения порового объема керна материала. Многообразие термобарических, химико-физических,

геологических и многих других условий в пластах месторождений нефти и газа существенно усложняет моделирование реальных процессов и на практике для моделирования применяется сложное и дорогостоящее оборудование (насосы высокого давления, датчики давления и температуры, кернодержатели, пробоотборники и т. д.). При этом даже при наличии совершенного оборудования имеются неустраняемые проблемы чисто лабораторного моделирования: ограниченная воспроизводимость результатов испытаний на кернах, проблема масштабирования результатов из малого объема лабораторной модели пласта на реальный объект и ряд других ограничений.

Качество измерений во многом определяется возможностью изготовления точных копий керна с заданными фильтрационно-емкостными параметрами, что не всегда удается на практике, особенно при использовании насыпного керна. Однако масштабировать размер керна и пористую структуру коллектора до реальных объемов в условиях лаборатории не представляется возможным. Кроме того, появились эффективные технологии добычи нефти, использующие обработку пласта дисперсными гелями миллиметрового диапазона [1–3], для которых исследование фильтрационных свойств на насыпном керне оказывается недостаточным для прогнозирования наблюдаемых полезных эффектов на промысловом объекте разработки нефтяной залежи.

Указанные ограничения и недостатки существующих лабораторных подходов к моделированию процессов в нефтегазовом пласте вызвали необходимость поиска решений сходных технических задач в других областях.

В данной работе изучена возможность 3D-проектирования структуры и геометрии керна нефтяного месторождения и изготовление его физической копии. Практическая реализация указанного подхода была начата с выбора программного обеспечения (ПО), наиболее подходящего для решения поставленной задачи. К настоящему времени разработано достаточно много программных продуктов для создания 3D-моделей и существует возможность выбора как платного, так и бесплатного ПО [4]. В связи со значительной ролью таких систем в разработке конструкторской документации с использованием средств вычислительной техники установлен стандарт на системы автоматизированного проектирования [5].

Автором была выбрана программа параметрического трехмерного моделирования FreeCAD [6] в соответствии с описанием параметров, изложенным на сайте разработчиков. Если кратко – FreeCAD – это программа параметрического трехмерного моделирования, предназначенная для проектирования объектов реального мира любого размера. Параметрическое моделирование позволяет легко изменять дизайн, возвращаясь к истории модели и изменяя ее параметры.

Необходимо отметить, что программные решения системы FreeCAD реализованы на объектно-ориентированном языке программирования Python, расширяющем функциональные возможности FreeCAD, а открытый код программ позволяет лучше понимать сущность моделируемого этим кодом физического объекта.

Многие возможности FreeCAD очень полезны при моделировании структуры нефтяного и газового пласта. Структуру коллектора нефти и газа, которую часто моделируют массивом песчинок определенного размера и называют ее насыпным керном, можно смоделировать массивом сферических объектов, образующих заданную форму модели пласта.

В настоящей работе рассмотрена возможность создания трехмерной модели порового коллектора нефтяного пласта и возможность ее печати на 3D-принтере.

Целью печати является сопоставление свойств цифровой модели со свойствами ее физической копии и проведения физико-химических и гидродинамических исследований с оценкой фильтрационно-емкостных свойств на лабораторной модели пласта с заданными параметрами в процессе разработки новых методов добычи нефти и газа.

### Экспериментальная часть

Рассмотрим процесс создания цифровой модели керна на примере аналога насыпного керна – массива сцепленных между собой песчинок сферической формы.

Предварительно приведем краткое описание этапов создания 3D-модели в программе FreeCAD.

В главном меню сначала создают новый файл, в который далее предполагается записывать создаваемую 3D-модель. В дальнейшем переходят на работу со специализированными рабочими столами, называемыми «верстаками» или «workbench». Таких верстаков много и каждый предназначен для решения своих задач. Конкретно для создания простейшей модели продуктивного коллектора нефти и газа нам потребуются следующие верстаки:

- Start (начало);
- Part (деталь – главный верстак формирования объектов);
- Draft (верстак преимущественно для 2D-моделирования с возможностью создания

массивов из трехмерных объектов при помощи функции «array»).

Последовательность операций создания модели керна состоит из ряда шагов и выглядит следующим образом:

На первом шаге создается сферический примитив, в котором указывается радиус сферы и ее геометрическое положение относительно выбранных осей в пространстве. Далее производится смена верстака на Draft и из сферических примитивов формируется массив по трем координатным осям – X, Y, Z. Количество сфер и их положение задается в опциях.

Результат моделирования для массива сфер диаметром 1 мм и пересечением их друг с другом на глубину 0,2 мм, общим количеством сфер по осям: X = 10, Y = 10, Z = 40 представлен на рис. 1 в виде окна программы FreeCAD.

Разработанную модель экспортируют в формат STL – формат для работы с 3D-принтерами.

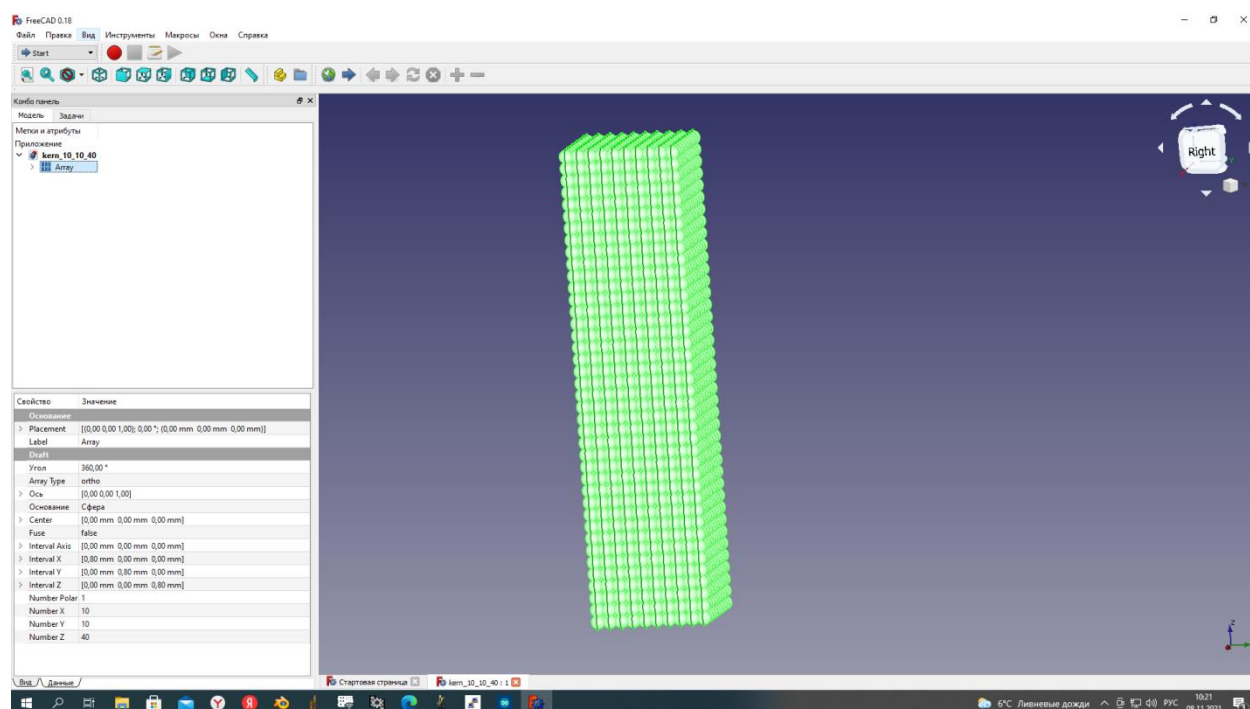


Рис. 1. Изображение 3D-модели коллектора в окне программы FreeCAD

### Принтеры для 3D-печати

Из множества известных 3D-принтеров [4], способных распечатать созданную модель, автором были отобраны и проанализированы несколько принтеров с различными технологиями печати.

Исходя из реальных возможностей для моделирования образцов керна были отобраны следующие материалы: глина, стекло, бетон, металл и полимерные материалы на основе ABS, PLA, PETG (см. табл. 1).

Таблица 1

Материалы для 3D печати и принтеры

Материал	Описание	Технология печати
ABS	ABS (акрилонитрилбутадиенстирол, АБС) - ударопрочная техническая термопластическая смола. В 3D-печати является одним из самых популярных материалов	Печать FDM (Fused Deposition Modeling) – моделирование методом послойного наплавления
PLA	PLA-пластик (полилактид, ПЛА) — биоразлагаемый термопластичный алифатический полиэфир, структурная единица которого — молочная кислота. ПЛА-пластик производят из кукурузы, сахарного тростника, картофельного или кукурузного крахмала и целлюлозы	Печать FDM
PETG	PETG (полиэтилентерефталат-гликоль, ПЭТГ) – высоко ударопрочный пластик, благодаря модифицированию гликолем не кристаллизуется, а объединяет в себе положительные качества множества остальных полимеров	Печать FDM
глина	Печать специальным филаментом Lay-Ceramic. Для печати глиной также подходит технология LDM	Печать FDM (филамент на основе глины для производства керамики при помощи 3D-печати). Вариант печати по технологии LDM (лазерное спекание), но необходим обжиг
стекло	Разработан метод 3D-печати, позволяющий печатать стеклянные предметы со сложной структурой	Используются вспомогательные вещества – прекурсоры, необходим специальный принтер
бетон	В настоящее время изготовлены пробные образцы 3D-принтеров для печати бетоном, представляющие собой огромные печатающие устройства	Строительный принтер для домов
металл	Используются порошки металлов: титан, нержавеющая сталь, медь и др.	SLM (Selective Laser Melting)

В настоящей работе печать цифровой модели керна производилась на 3D-принтере марки Longer 3D PRO, работающем по технологии FDM – печать пластиковой термопластичной нитью. Фото принтера представлено на рис. 2.



Рис. 2. 3D-принтер марки Longer 3D PRO

Изготовление моделей производится методом послойного наплавления (англ. Fused Deposition Modeling). Для реализации этого метода для 3D-принтера необходима специальная программа Slicer, которая «разрезает» цифровую модель на слои и транслирует ее в G-код программу, дающую принтеру инструкции по послойному наплавлению пластика в физической модели.

В качестве материала для печати физической модели керна выбран полиэтилентерефталат (PETG), свойства полимера определены стандартом ГОСТ Р 51695-2000. Полиэтилентерефталат представляет собой продукт поликонденсации: терефталевой кислоты или диметилтерефталата с этиленгликолем (гомополимер); терефталевой кислоты или диметилтерефталата с этиленгликолем и диэтиленгликолем (сополимер).

Полиэтилентерефталат представляет собой продукт поликонденсации: терефталевой кислоты или диметилтерефталата с этиленгликолем (гомополимер); терефталевой кислоты или диметилтерефталата с этиленгликолем и диэтиленгликолем (сополимер).

Для того чтобы по имеющейся 3D-модели распечатать образец, необходимо

при помощи специальной программы сформировать файл G-кода, который и загружается в принтер. Меню этой программы для принтера Longer 3D PRO представлено на рис. 3. Печать продолжается от нескольких минут до многих часов в зависимости от объема работы.

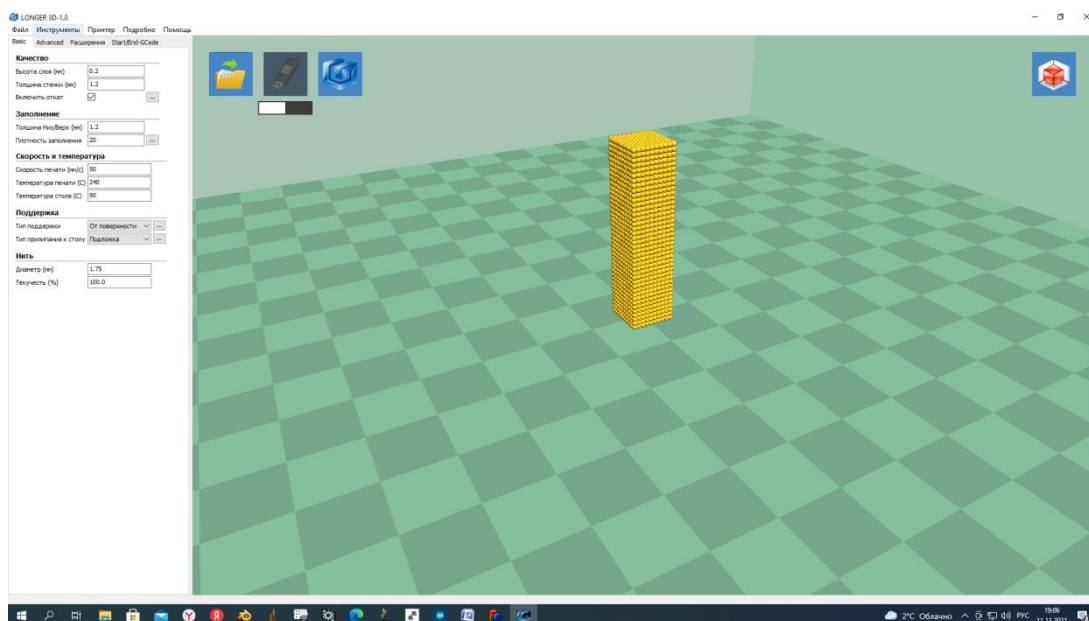


Рис. 3. Меню для работы с 3D-принтером Longer

#### Свойства физического керна, изготовленного по 3D-модели

Результатом печати является физическая копия цифрового керна.

Для исследования его свойств автором проведено изучение некоторых его параметров – плотности, объема, массы, пористости. Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Свойства керна, изготовленного методом 3D-печати из материала PETG и 3D-модели

Модель	Геометрические размеры керна в форме прямоугольника измеренные, мм	Размер структурного элемента, мм	Объем керна, см <sup>3</sup>	Масса керна, г	Плотность керна, г/см <sup>3</sup>	Плотность полимера, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %
Физическая	8×8×30	1	1,920	2,117	1,1026	1,28	13,8
3D	8×8×30	1	1,920	-	-	-	-

Кроме того, произведено фотографирование при различном разрешении. Результаты представлены на рис. 4, 5.

Исследование показало принципиальную возможность проектирования структуры цифрового керна и изготовления его физической копии.

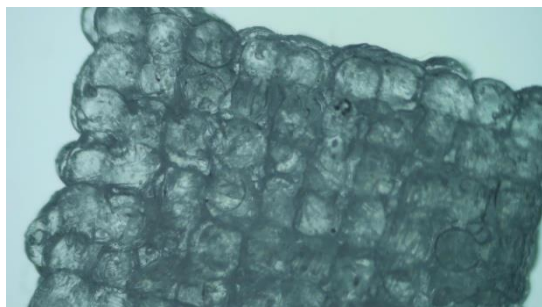


Рис. 4. Фото структуры физического керна (масштаб 1 см)

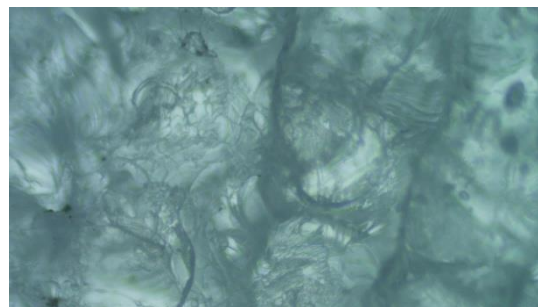


Рис. 5. Фото структуры физического керна (масштаб 3 мм)

Представленный выше материал описывает возможность изготовления гидродинамической модели породы коллектора с использованием 3D-печати термопластичной нитью. Возможно изготовление физической копии образца из материала, по химическому составу приближенного к химическому составу породы пласта. Близким по химическому составу к пластовой породе образец может быть изготовлен из глины или стекла. Полезной дополнительной возможностью изучения механизмов фильтрации в пласте может оказаться исследование физико-химических процессов фильтрации пластовых флюидов через электропроводящую пористую среду.

При этом следует учитывать высокую стоимость изготовления образцов.

Для изучения возможности и приобретения опыта изготовления физических моделей из различных материалов по разным технологиям 3D-печати по одной 3D-модели использованы

две технологии – печать термопластичной нитью и методом лазерного сплавления. С целью снижения расходов на 3D-печать титановым порошком методом послойного лазерного наплавления SLM (Selective Laser Melting) в качестве объекта печати использована малообъемная деталь – шестерня стойки вискозиметра Брукфилда, расходы на изготовление которой были отнесены на статью ремонта вискозиметра. Стоимость изготовления шестерни массой 0,825 г составила 3000 руб. (\$40). По текущим ценам 2021 г. стоимость изготовления 1 г изделия примерно равна стоимости одного грамма золота (\$58 за грамм). Для сравнения стоимость изготовления 1 г изделия термопластичной нитью по технологии FDM составляет \$0,1 за грамм. На рис. 6 представлена фотография дефектной детали и ее физические аналоги, изготовленные по одной 3D-модели. На образцах видна детализация печати изделия при использовании разных технологий печати.

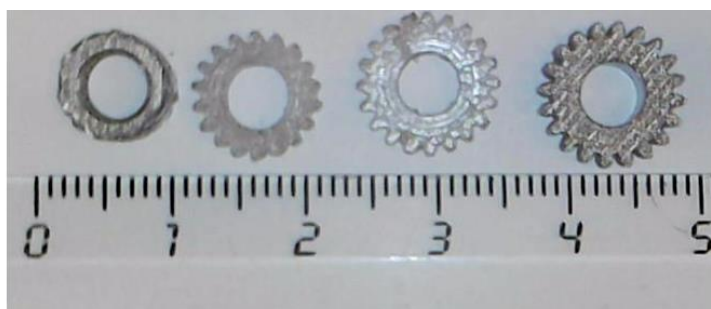


Рис. 6. Фотографии дефектной шестерни, полимерных прототипов и шестерни из титана для стойки ротационного вискозиметра

Пример ремонта шестерни вискозиметра показал возможность использования одной 3D-модели для печати по разным технологиям и разнообразными материалами, в том числе печати мелких структурных элементов с детализацией менее 0,1 мм.

### Заключение

Следует отметить, что кроме программ типа FreeCAD, ориентированных на автоматизированное проектирование в 3D-пространстве (CAD – Computer-aided design) и имеющих в своем составе графический интерфейс пользователя (GUI), имеется группа программ также с графическим 3D-интерфейсом для работы с геологическими и гидродинамическими компьютерными моделями в сфере разработок нефтяного и газового пласта. Примерами таких программ являются TimeZYX, HydroGeo, t-Navigator, Eclipse [7]. Последняя программа входит в обширный пакет программ компании Schlumberger.

Указанные программы позволяют снизить производственные издержки за счет

оптимизации технологических процессов, являются платными (проприетарными) продуктами, доступными при покупке лицензии на их использование. Программы для 3D-моделирования с открытым исходным кодом имеют преимущество перед платными программами и могут занять свою отдельную нишу в области изучения физико-химических процессов, происходящих в пластах в процессе реализации технологий добычи нефти и газа.

### Выводы

Показана принципиальная возможность применения технологии 3D-проектирования и 3D-печати для создания цифровых и физических моделей пород коллекторов нефти и газа. Обоснованы преимущества применения технологии 3D-проектирования цифрового ядра с применением программы FreeCAD и 3D-печати физических моделей в сравнении с коммерческим программным обеспечением.

*Автор выражает признательность заведующему лабораторией физико-химических технологий в нефтегазодобыче, к.т.н. Д.А. Каушанскому за поддержку в реализации 3D-печати 3D-моделей, а также за ценные критические замечания при обсуждении статьи и анализе ее результатов.*

*Статья написана в рамках выполнения государственного задания (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. *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. Полез. модели. 1999. Бюл. № 16. <http://www1.fips.ru>
2. *Каушанский Д.А., Демьяновский В.Б., Бакиров Н.Р.* и др. Результаты опытно-промысловых испытаний технологии «Темпоскрин-Плюс» для ограничения водопритока в добывающих скважинах ООО «РН-Пурнефтегаз» // Нефтяное хозяйство. 2019. № 6. С. 78–82. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-6-78-82>
3. *Bai B., Li L., Liu Yu.* et al. Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and application // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. 2007. Vol. 10, No. 4. P. 415–422. <https://doi.org/10.2118/89389-PA>
4. *Шкуро А.Е., Кривоногов П.С.* Технологии и материалы 3D-печати: Учеб. пособие. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2017. 100 с.
5. ГОСТ 23501.101-87. Системы автоматизированного проектирования. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 1988. 10 с.
6. *Ибрагимов Е.А.* Разработка оборудования и технологии формирования изделий из медного порошка методом селективного лазерного плавления: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2018. 18 с.
7. *Гладков Е.А.* Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 99 с.



## Study of the possibility of designing and manufacturing laboratory models of the core by the method of 3D design and 3D printing

**V.B. Demyanovskiy**

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: demian20@yandex.ru

**Abstract.** The article deals with the topic of 3D design of the structure of the pore reservoir of oil and gas with software packages for industrial design of physical objects, as well as the problems of translation of 3D design objects into physical objects in order to study their filtration-capacitive properties in traditional physical and chemical research. An example of using the open-source program FreeCAD to create models of a digital core and make physical copies of digital 3D models using Fused Deposition Modeling technology – using layer-by-layer deposition of thermoplastic filament on the model – is given. It is shown that the same 3D model can be printed both by Fused Deposition Modeling technology and by Selective Laser Melting technology. The advantages of free software for studying physicochemical processes in oil and gas reservoirs are considered.

**Keywords:** oil and gas field development, 3D design, 3D model, digital core, oil and gas reservoir, 3D printing.

**Citation:** *Demyanovskiy V.B.* Study of the possibility of designing and manufacturing laboratory models of the core by 3D design and 3D printing // Actual Problems of Oil and Gas. 2022. Iss. 4(39). P. 117–125. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-39.art9> (In Russ.).

### References

1. *Kaushansky D.A., Demyanovsky V.B.* A.c. SU 1669404 A3. Temposcreen additive to the water injected into the formation and a method for obtaining an additive. No. 4713456/03; Appl. 03.04.1989; Publ. 10.06.1999 // Inventions. Useful models. 1999. Bull. No. 16. <http://www1.fips.ru> (In Russ.).
2. *Kaushanskiy D.A. Demyanovskiy V.B., Bakirov N.R.* et al. Field trial results of water shut-off in oil producing wells using the Temposcreen-Plus technology in RN-Purneftegaz LLC // *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*. 2019. No. 6. P. 78–82. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-6-78-82> (In Russ.).
3. *Bai B., Li L., Liu Yu.* et al. Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and application // *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. 2007. Vol. 10, No. 4. P. 415–422. <https://doi.org/10.2118/89389-PA>
4. *Shkuro A.E., Krivonogov P.S.* Technologies and materials of 3D printing: Textbook. Yekaterinburg: Ural State Forestry University, 2017. 100 p. (In Russ.).
5. GOST 23501.101-87. Computer-aided design systems. Main provisions. Moscow: Standards Publishing House, 1988. 10 p. (In Russ.).
6. *Ibragimov E.A.* Development of equipment and technology for the formation of products from copper powder by selective laser melting: Synopsis of Ph.D. thesis. Tomsk, 2018. 18 p. (In Russ.).
7. *Gladkov E.A.* Geological and hydrodynamic modeling of oil and gas fields. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2012. 99 p. (In Russ.).