



ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОСТРУКТУРЫ БАЖЕНОВСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПОРОДЫ

Елена Игоревна Ускова^{1,✉}, Александр Александрович Бурухин², Алексей Николаевич Черемисин³

^{1,2,3}Сколковский институт науки и технологии

121205, Москва, тер. инновационного центра Сколково, Большой б-р, д. 30, стр. 1, Россия

^{1,✉}elena.uskova@skoltech.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7169-1347>

²A.Burukhin@skoltech.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3423-8570>

³A.Chermisin@skoltech.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3580-9120>

Аннотация. Проведено исследование пространственной микроструктуры образцов баженовской свиты по данным FIB-SEM для подготовки цифровой модели и расчета фильтрационно-емкостных свойств. Цифровое моделирование ядра направлено на дополнение традиционных лабораторных исследований образцов горных пород возможностями вычислительного эксперимента и позволяет не только прогнозировать количество углеводородов, которые могут быть извлечены из месторождения, но и планировать оптимальные методы его разработки. Возможности технологии цифрового ядра апробированы на высокопроницаемых породах, в то время как для нетрадиционных остаются вопросы к выбору и описанию пористой среды, связанные, в первую очередь, с необходимостью перехода на субмикронный и наномасштаб. В рамках настоящего исследования показаны сложности, связанные с подготовкой цифровой модели на основе FIB-SEM материала баженовской свиты, а также моделированием и валидацией свойств.

Ключевые слова: цифровой ядро, баженовская свита, нетрадиционные коллектора, кероген, FIB-SEM

Для цитирования: Ускова Е.И., Бурухин А.А., Черемисин А.Н. Исследование особенностей микроструктуры баженовских отложений и выбор оптимальной модели для создания цифрового двойника породы // Геофизические технологии. 2024. № 1. С. 83–91. doi:10.18303/2619-1563-2024-1-83.

RESEARCH OF THE MICROSTRUCTURE FEATURES OF BAZHENOV DEPOSITS AND SELECTION OF THE OPTIMAL MODEL FOR CREATING A DIGITAL TWIN OF THE ROCK

Elena I. Uskova^{1,✉}, Aleksandr A. Burukhin², Aleksey N. Cheremisin³

^{1,2,3}Skolkovo Institute of Science and Technology

121205, Moscow, territory of the Skolkovo Innovation Center, Bolshoy b-r, 30, bld. 1, Russia

^{1,✉}elena.uskova@skoltech.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7169-1347>

²A.Burukhin@skoltech.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3423-8570>

³A.Chermisin@skoltech.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3580-9120>

Abstract. The spatial microstructure of the Bazhenov Formation samples was studied according to FIB-SEM data to prepare a digital model and calculate filtration-capacitance properties. Digital core modeling is aimed at complementing traditional laboratory studies of rock samples with computational experiment capabilities and allows not only to predict the

amount of hydrocarbons that can be extracted from a field, but also to plan optimal methods for its development. The possibilities of digital core technology have been tested on highly permeable rocks, while for non-traditional ones there are still questions about the choice and description of a porous medium, primarily related to the need to switch to the submicron and nano scale. The present study shows the difficulties associated with the preparation of a digital model based on FIB-SEM material of the Bazhenov Formation, as well as modeling and validation of properties.

Keywords: digital core, Bazhenov Formation, unconventional reservoirs, kerogen, FIB-SEM

For citation: Uskova E.I., Burukhin A.A., Cheremisin A.N. Research of the microstructure features of Bazhenov deposits and selection of the optimal model for creating a digital twin of the rock // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 1. P. 83–91. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-1-83.

ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование широко используется для анализа процессов разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений. Задачи, которые возникают в этой области, включают, в частности, разработку и обоснование плана разработки месторождения, определение оптимального метода воздействия на пласт с целью увеличения нефтеотдачи, прогноз и оценку технических и экономических рисков [Балашов, Савенков, 2019]. Успех решения этих и других задач во многом зависит от качества входных данных и оценки степени их неопределенности.

Стандартными методами оценки параметров коллектора являются, например, различные каротажные исследования скважин, а также комплекс лабораторных экспериментов с керном. Они являются одними из наиболее значимых исследовательских подходов и позволяют определять наиболее важные свойства образцов породы, включая пористость, абсолютную и относительную фазовую проницаемости.

Несмотря на отлаженный годами подход к изучению свойств кернового материала текущие изменения в нефтегазовой отрасли, связанные с переходом на разработку нетрадиционных коллекторов, выявили недостаточную применимость разработанных методик к новым объектам, а зачастую и невозможность их прямого использования. Среди причин, в первую очередь, следует отметить переход на значительно низкие проницаемости, коллекторы с иными физико-химическими и фильтрационными свойствами, сложность, а иногда и невозможность получения и обработки высококачественного материала керна в достаточных количествах. В результате все эти факторы приводят к высокой стоимости и к практической невозможности массового применения ряда лабораторных методов исследования, проведения множественных экспериментов на одном образце, воссоздания всего спектра пластовых условий и проведения полноценных параметрических исследований.

В настоящее время все более популярным становится подход к моделированию свойств породы – технология цифровой керн, которая направлена на дополнение традиционных лабораторных исследований образцов горных пород возможностями вычислительного эксперимента. Данная технология должна повысить качество и надежность определения свойств пород-коллекторов и снизить степень неопределенности лабораторных результатов. Цифровое моделирование керна позволяет не только прогнозировать количество углеводородов, которое может быть извлечено из месторождения, но и планировать оптимальные методы его разработки. Существует целый ряд проблемных типов коллекторов, наиболее оптимальное изучение которых представляется методами цифрового

моделирования керна, поскольку экспериментальная работа с этим материалом сложна и часто ненадежна. К этому типу горных пород относятся и отложения баженовской свиты.

ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ

Соответствие цифрового двойника реальной горной породе зависит от качества и точности моделирования исследуемых процессов и модели порового пространства/минерального скелета. Для построения корректной модели цифрового двойника породы необходимо построить модель, которая включает в себя основные характеристики моделируемой среды. В первую очередь следует отметить правильное описание порового пространства с включением элементов структуры на характерных масштабах и выбор области моделирования равной или большей, чем репрезентативный элементарный объем (Representative Elementary Volume, REV). В плотных породах визуализация трехмерного порового пространства становится сложной задачей, поскольку во многих случаях значительная часть пор может находиться на уровне воксельного разрешения или ниже него. Авторы статьи [Mehmani et al., 2020] рассматривают лучшие практики применения методов цифрового моделирования, однако вопросу определения REV уделено недостаточно внимания.

В случае работы с низкопроницаемыми и нетрадиционными породами, например, сланцами, возникает вопрос ограниченности разрешающей способности стандартной микротомографии. Например, для расчета проницаемости авторы статьи [Tahmasebi et al., 2020] рассматривают различные методы изучения проницаемости сланца с использованием технологии цифрового керна. Рассмотрены два стохастических метода: объектно-ориентированное моделирование и моделирование на основе FIB-SEM изображений, проанализированы их преимущества и недостатки, а также оценены возможности их дальнейшего применения, описаны условия использования того или иного метода с учетом разрешающей способности.

В процессе моделирования, в том числе разномасштабных структур, стоит учитывать, что не существует единого способа получить данные о многомасштабной структуре сразу. Необходим комплексный подход, включающий как многомасштабную съемку структур, так и комбинацию нескольких методов. Так, в работе [Ebadi et al., 2022] авторы описывают подход к построению моделей плотных пород, основанный на комбинации микротомографии, дающей информацию о пористости микронного и более размера, FIB-SEM, характеризующей участки с субмикронной и нанопористостью и микротомографии с контрастом, позволяющей локализовать эти области на глобальной модели. Такой подход позволяет строить модели и проводить расчеты, где на обычной микротомографии высокого разрешения не удастся показать связанность порового пространства, а расчет только по FIB-SEM не позволяет адекватно смоделировать свойства макрообъекта. Разработанный подход позволяет создать модель из трех (и более) классов, которая включает поры, минеральный скелет и субмикропористые области, в том числе с разным значением пористости и проницаемости. Результаты показали, что расчетная проницаемость для высокоплотных песчаников близка к экспериментально определяемым значениям.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования в настоящей работе по исследованию структуры порового пространства и моделированию фильтрационно-емкостных свойств были выбраны баженовские отложения как одни из

наиболее перспективных в настоящее время среди трудноизвлекаемых нетрадиционных углеводородов, для которых проблема построения цифровых моделей является актуальной.

Важной задачей технологии цифрового ядра является выбор репрезентативного объема, представляющего свойства материала и построение по нему корректной 3D-модели, включающей в себя характерные особенности поровой микроструктуры. Таким образом, задача исследования и анализа структуры является первостепенной для построения адекватной цифровой модели, описывающей основные свойства пород баженовской свиты.

Поскольку разрешения обычной микротомографии (с геометрическим разрешением в единицы микрометров) часто недостаточно для корректного учета поровой структуры пород баженовской свиты, в данной работе проводилось исследование пространственной микроструктуры с помощью двулучевого сканирующего электронно-ионного микроскопа Helios (Thermo Fisher, США) методом послойного травления сфокусированным ионным пучком (FIB-SEM). На основе полученной трехмерной структуры проводилось сегментирование порового пространства с последующим созданием цифровой модели и проведением моделирования ее фильтрационно-емкостных свойств.

Для подготовки модели и расчета свойств цифровой модели использовалась программа GeoDict (Math2Market GmbH, Германия). Данная программа применяется как для обработки 3D-изображений из набора 2D-снимков FIB-SEM, определения характеристик и анализа материалов, сегментации, визуализации и анализа свойств, так и моделирования фильтрационно-емкостных свойств.

Основные этапы работы приведены на рис. 1.

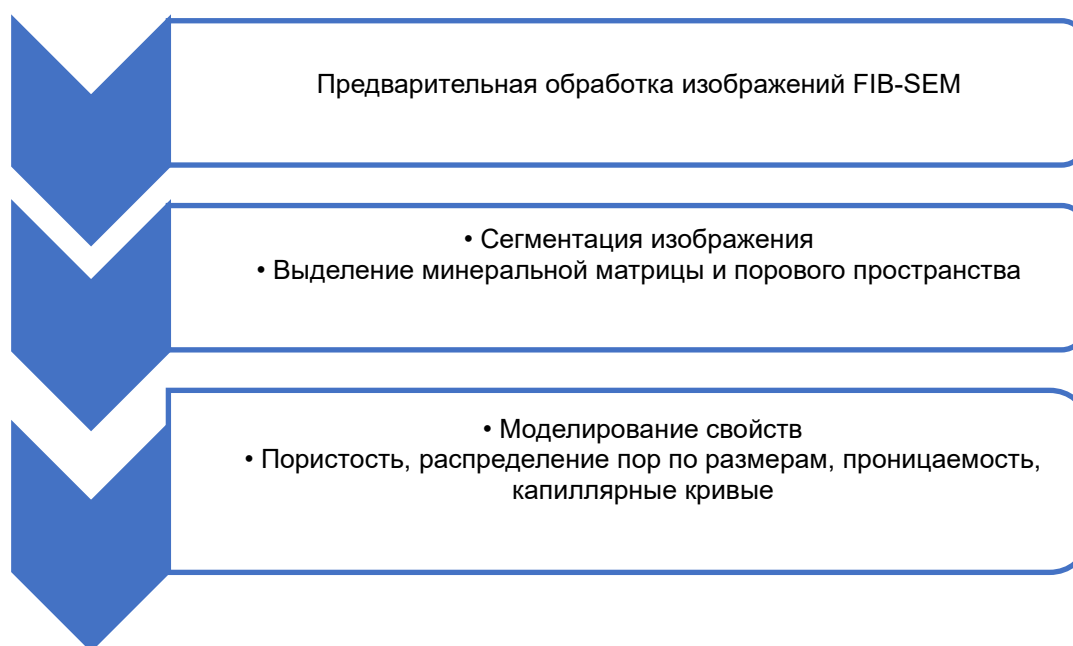


Рис. 1. Этапы работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изображения FIB-SEM образца баженовской свиты были предварительно обработаны в программе GeoDict, которая позволяет выровнять изображения FIB-SEM, удалить артефакты и восстановить изотропный размер вокселя 11.2 нм. Примеры отдельного изображения из набора FIB-SEM и реконструированного 3D-изображения представлены на рис. 2а и б соответственно.

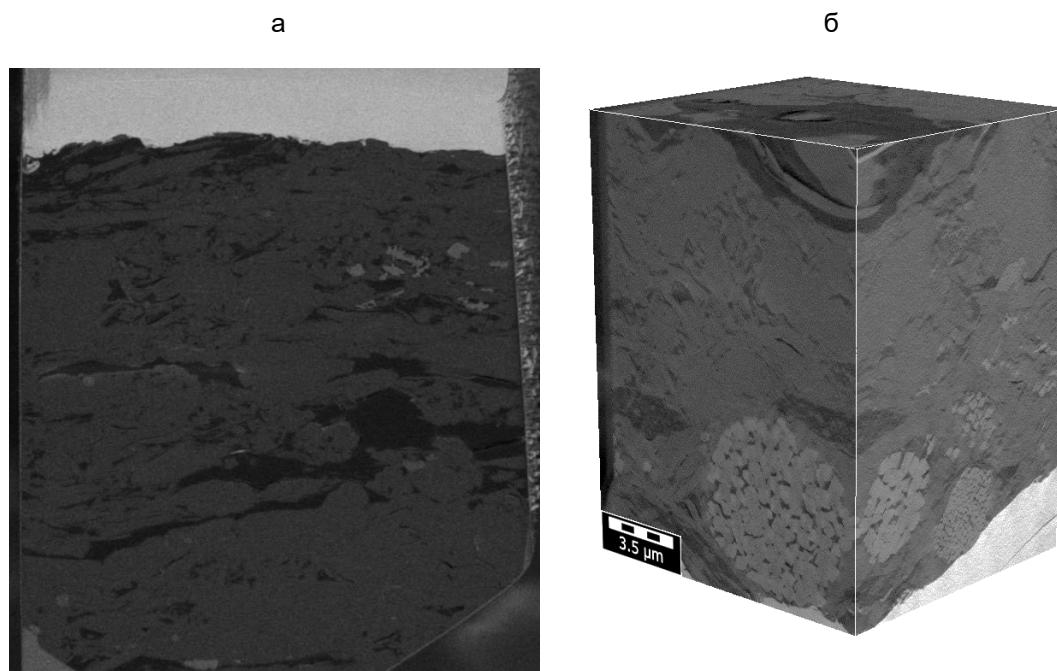


Рис. 2. а – Единичное изображение в электронном микроскопе, получаемое при послойном травлении образца; б – реконструированное FIB-SEM 3D-изображение образца баженовской свиты.

Второй этап связан с сегментацией изображения на поры и непроницаемый каркас. Сегментация была выполнена методом глобальной сегментации вручную по выбранному пороговому значению. Следует отметить, что на исследуемом участке объем пор составил менее 1 % при отсутствии связности пор. Для возможности проведения последующих этапов моделирования при сегментации в поровое пространство были включены области с плотным органическим компонентом – керогеном. Такое модельное поровое пространство может в определенной степени сформироваться при преобразовании керогена, например, после термической обработки. Отсутствие связанного порового пространства на исследуемом участке может быть связано с различными причинами, например, локальной неоднородностью, отсутствием на данном участке пористости, пористостью ниже предела разрешения (~15–75 нм в плоскости сканирования и по глубине соответственно) и другими. Данный опыт говорит о необходимости правильного подбора образца баженовской свиты и необходимости исследования нескольких участков/образцов. Структура была проанализирована на наличие открытой, связанной пористости и закрытой пористости вдоль оси Z, которая расположена вдоль напластования. Результаты определения общей, связанной (открытой) и закрытой пористости, а также информация о размере проанализированного объема представлены в табл. 1.

Таблица 1

Размер образца и пористость

Размер выборки в вокселях	1026 × 1030 × 1054
Размер образца в μm	11.53 × 11.58 × 11.80
Общая пористость (включая кероген)	7.70 %
Открытая пористость	6.00 %
Закрытая пористость	1.70 %

Структура порового пространства с разделением открытой и закрытой пористости вдоль оси Z представлена на рис. 3.

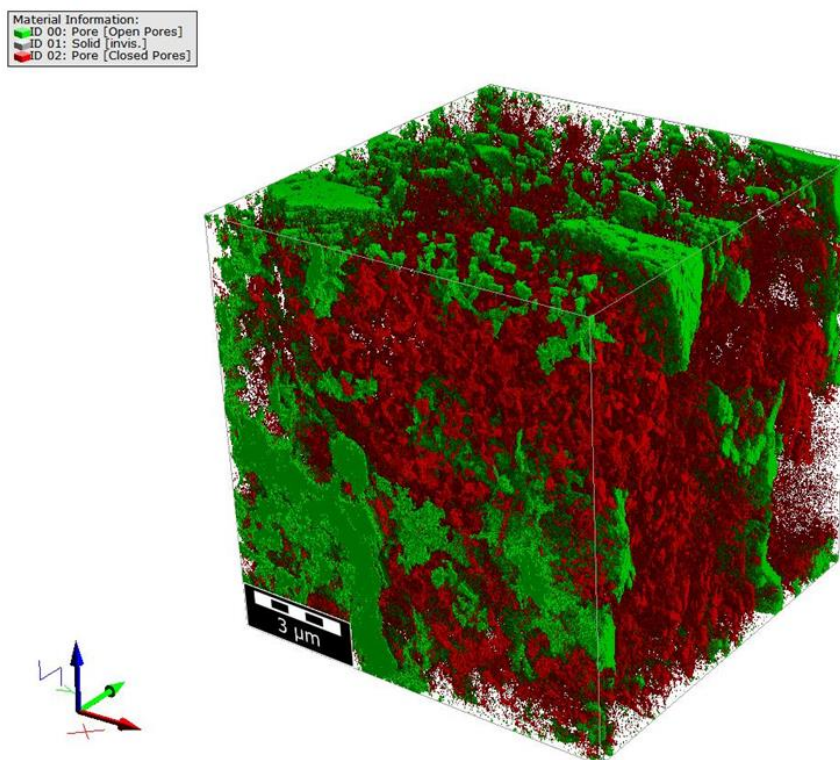


Рис. 3. Открытая (зеленым цветом) и закрытая (красным цветом) пористость исследованной области.

Одной из важных характеристик порового пространства является распределение пор и горловин пор по размерам. Эти параметры были рассчитаны для полученной модели и представлены на рис. 4 и 5. Как видно, основной размер пор располагается на первом значении гистограммы, что говорит о необходимости повышения разрешающей способности, поскольку не все поры могут быть сегментированы.

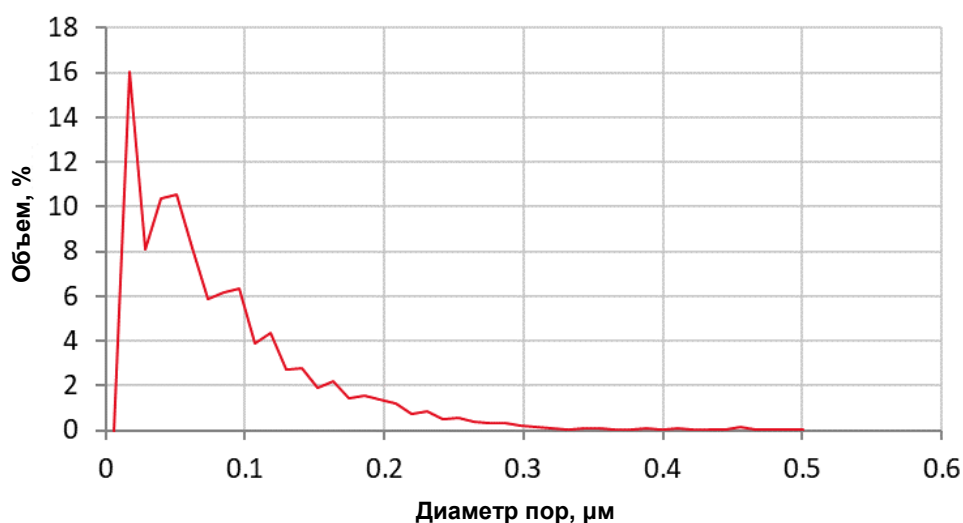


Рис. 4. Распределение пор по размерам.

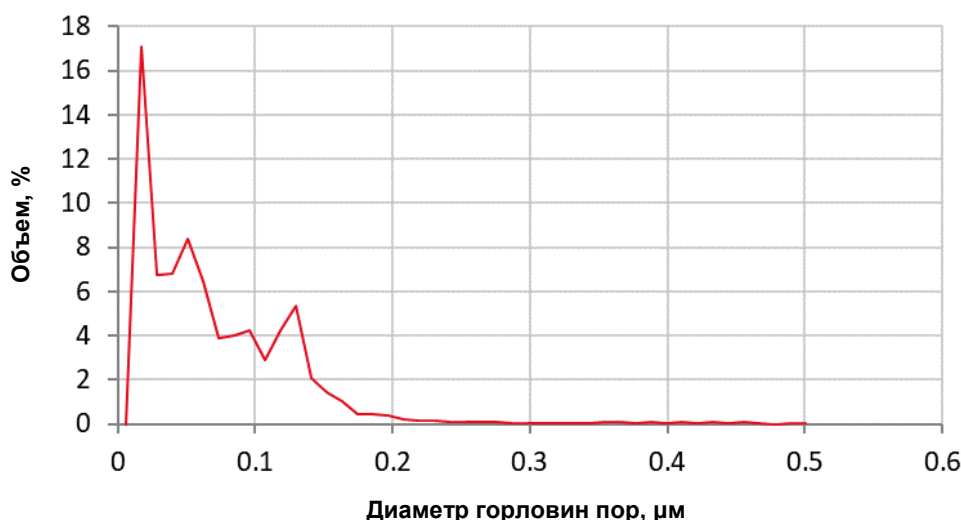


Рис. 5. Распределение пор по размерам горловин.

Следующим этапом моделирования был расчет абсолютной проницаемости образца с помощью стационарного уравнения Стокса. Расчет проводился с использованием программного пакета GeoDict_2023, модуль FlowDict. Абсолютная проницаемость по оси Z была оценена в 50.8 нД.

Капиллярные кривые были рассчитаны для пары вода–воздух для дренирования воды воздухом. Поверхностное натяжение вода/воздух было установлено равным 70 мН/м, а краевой угол смачивания скелета флюидами – 40/140 градусов для смачиваемой (вода) и не смачиваемой фаз (воздух) соответственно. Результирующая капиллярная кривая, рассчитанная в GeoDict_2023 (модуль SatuDict), представлена на рис. 6.

Величина остаточной воды составила 70 %, что объясняется структурой данного участка и размерностью поровых каналов.

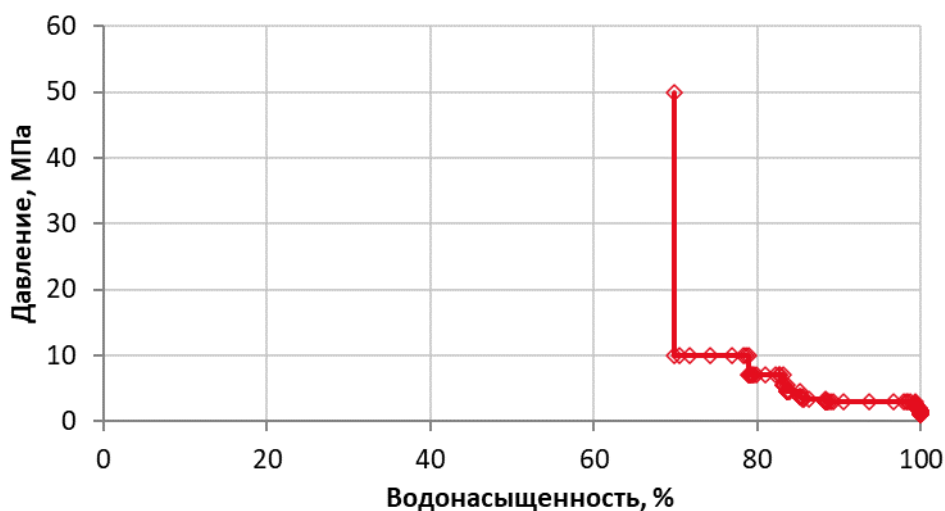


Рис. 6. Кривая капиллярного давления для дренирования воды воздухом.

Следует отметить, что такие стандартные характеристики, которые оцениваются с помощью моделирования, в случае отложений баженовской свиты являются очень сложными для измерения в лаборатории. Помимо трудоемкости и неоднозначности получаемых на таком материале данных, образец

часто разрушается во время лабораторных испытаний, что делает невозможным анализ на том же образце других свойств.

ВЫВОДЫ

Данные FIB-SEM образца баженовской нефтеносной свиты были использованы для анализа структуры и подготовки цифровой модели материала.

Исследованный образец имеет очень низкую истинную сегментируемую пористость – менее 1 %, поэтому модель порового пространства для построения цифрового двойника была выбрана как включающая органический материал – кероген. Таким образом, показана важность выбора репрезентативного образца и участка исследования FIB-SEM.

Общая пористость модели была оценена в 7.70 % при открытой 6.00 %. Кривые распределения пор и устьев пор по размерам имеют пик на первой корзине гистограммы, что говорит о недостаточности использованного разрешения для учета полного объема пор.

Абсолютная проницаемость исследованной области образца составила всего 50 нД.

Для построенной модели были получены капиллярные кривые дренирования воды воздухом со значением остаточной воды 70 %.

Основной вывод по исследованию микроструктуры порового пространства образца баженовской свиты и анализа подходов к построению цифрового двойника связан с проблемой выбора и подготовки репрезентативного образца и исследуемых участков, выбора подходящего размера модели и потенциальной подготовки многоуровневой модели для учета не только структур на наноуровне, но и микро- и мезомасштабах. Все это указывает на необходимость глубокого фундаментального исследования баженовской свиты, прежде чем приступить к подготовке ее корректной модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Балашов А.В., Савенков Е.Б. Цифровой керн. Моделирование кернотечений в поровом пространстве пород коллекторов // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2019. № 7. С. 80–85.

Ebadi M., Orlov D., Alekseev V., Burukhin A., Krutko V., Koroteev D. Lift the veil of secrecy in sub-resolved pores by Xe-enhanced computed tomography. Fuel. 2022. Vol. 328. Article 125274. doi:10.1016/j.fuel.2022.125274.

Mehmani A., Kelly S., Torres-Verdín C. Leveraging digital rock physics workflows in unconventional petrophysics: A review of opportunities, challenges, and benchmarking // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 190. Article 107083. doi:10.1016/j.petrol.2020.107083.

Tahmasebi P., Javadpour F., Enayati S.F. Digital rock techniques to study shale permeability: A mini-review // Energy and Fuels. 2020. Vol. 34 (12). P. 15672–15685. doi:10.1021/acs.energyfuels.0c03397.

REFERENCES

Balashov A.V., Savenkov E.B. Digital core. The modeling of micro-flows in the pore space of reservoir rocks // Neftegaz.RU. 2019. Vol. 7. P. 80–85.

Ebadi M., Orlov D., Alekseev V., Burukhin A., Krutko V., Koroteev D. Lift the veil of secrecy in sub-resolved pores by Xe-enhanced computed tomography. Fuel. 2022. Vol. 328. Article 125274. doi:10.1016/j.fuel.2022.125274.

Mehmani A., Kelly S., Torres-Verdín C. Leveraging digital rock physics workflows in unconventional petrophysics: A review of opportunities, challenges, and benchmarking // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 190. Article 107083. doi:10.1016/j.petrol.2020.107083.

Tahmasebi P., Javadpour F., Enayati S.F. Digital rock techniques to study shale permeability: A mini-review // Energy and Fuels. 2020. Vol. 34 (12). P. 15672–15685. doi:10.1021/acs.energyfuels.0c03397.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

УСКОВА Елена Игоревна – магистр Сколковского института науки и технологии. Основные научные интересы: цифровой керн, многофазная фильтрация, моделирование горных пород, физика, рентгеновская компьютерная томография, электронная микроскопия.

БУРУХИН Александр Александрович – старший научный сотрудник Сколковского института науки и технологии. Основные научные интересы: рентгеновская компьютерная томография, многофазная фильтрация, цифровой керн, моделирование течений флюидов в пористой среде.

ЧЕРЕМИСИН Алексей Николаевич – профессор Сколковского института науки и технологии. Основные научные интересы: многофазная фильтрация в пористых средах, цифровой керн, повышение нефтеотдачи пластов, микрофлюидика, физика пласта.

*Статья поступила в редакцию 15 декабря 2023 г.,
одобрена после рецензирования 29 января 2024 г.,
принята к публикации 2 февраля 2024 г.*