

ИНЖЕНЕРНЫЕ ЗАМЕТКИ

Оригинальная статья

УДК 553.983

<https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2025.09>**Первые результаты и сравнительный анализ экспериментальных исследований трансформации пустотного пространства черных битуминозных аргиллитов баженовской свиты Салымского месторождения при тепловом и СВЧ-воздействиях****А.А. Пономарев^{1,2} ✉, В.М. Александров^{2,3}, В.С. Корытов^{1,2}, Б.В. Григорьев⁴, К.А. Галинский², А.Е. Кудрявцев²**

1 – ООО «НОВАТЭК Научно-технический центр», Россия, 625026, Тюмень, ул. 50 лет ВЛКСМ, д. 53

2 – Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, Тюмень, ул. Володарского, д. 38

3 – АО «Тандем», Россия, 625000, Тюмень, ул. Республики, д. 57

4 – Тюменский государственный университет, Россия, 625003, Тюмень, ул. Володарского, д. 6

Аннотация. *Актуальность.* Рассмотрена проблема добычи нефти из баженовской свиты, извлекаемые ресурсы которой по оценкам достигают 20 млрд т. *Цель работы.* Проанализировать известные методы увеличения нефтеотдачи в баженовской свите и рассмотреть перспективы использования технологии электромагнитного воздействия сверхвысокой частоты на пласт. *Материалы и методы.* Объект исследования – один из литотипов баженовской свиты – черный битуминозный аргиллит. Проведены эксперименты по термическому и электромагнитному воздействию сверхвысокой частоты с фиксацией изменений качественных и количественных характеристик экспериментальных образцов. *Результаты.* Задokumentированы изменения в структуре пустотного пространства по цифровым моделям. По результатам лабораторных исследований отмечается, что на структуру пустотного пространства могут влиять такие геохимические характеристики как битумоид и органический углерод – их пространственное распределение и количество. Представлены перспективы использования электромагнитного воздействия сверхвысокой частоты на пласт, достоинства и недостатки других методов. *Выводы.* Потенциальные эффекты методов увеличения нефтеотдачи будут контролироваться не только временем и степенью энергетического воздействия на пласт, но и геохимическими характеристиками конкретных отложений. Предлагается развивать промышленную технологию СВЧ-воздействия на целевые интервалы пласта, так как она выглядит более экологичной и энергоэффективной.

Ключевые слова: баженовская свита, трансформация пустотного пространства, компьютерная рентгеновская микротомография, СВЧ-пиролиз в открытой системе, пиролиз в открытой системе, цифровой анализ керн

✉ Пономарев Андрей Александрович, ponomarev94@mail.ru

© Пономарев А.А., Александров В.М., Корытов В.С., Григорьев Б.В., Галинский К.А., Кудрявцев А.Е., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Финансирование: источники финансирования отсутствовали.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за ценные советы, отдельные слова благодарности – ушедшим из жизни ученым: д.г.-м.н., члену-корреспонденту РАН Курчикову Аркадию Романовичу и д.г.-м.н., члену-корреспонденту РАН Нестерову Ивану Ивановичу за сохранение и развитие тюменской геологической школы.

Для цитирования: Пономарев А.А., Александров В.М., Корытов В.С., Григорьев Б.В., Галинский К.А., Кудрявцев А.Е. Первые результаты и сравнительный анализ экспериментальных исследований трансформации пустотного пространства черных битуминозных аргиллитов баженовской свиты Салымского месторождения при тепловом и СВЧ-воздействиях // Актуальные проблемы нефти и газа. 2025. Т. 16, № 2. С. 324–340. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2025.09>

Введение

Реалии сегодняшнего дня в области нефтедобычи заключаются в том, что эпоха «легкой» нефти завершается, многие месторождения сильно обводнены, это обуславливает необходимость поиска эффективных методов воздействия на пласт для увеличения нефтеотдачи.

Цель работы – анализ известных методов увеличения нефтеотдачи при различных подходах к разработке залежей в баженовской свите, в том числе современное состояние и перспективы использования технологии электромагнитного воздействия сверхвысокой частоты (СВЧ) на пласт.

Один из наиболее распространенных методов – использование поверхностно активных веществ (ПАВ) для извлечения оставшихся в мелких капиллярах коллекторов углеводородов (УВ). Преимущество применения ПАВ заключается в том, что стоимость любых мероприятий по повышению нефтеотдачи, производимых на разрабатываемых месторождениях с действующей наземной инфраструктурой значительно ниже, чем поисковые и геологоразведочные работы, освоение запасов, в том числе, трудноизвлекаемых запасов баженовской свиты (оцениваются в 20 млрд т)¹.

Проблема добычи нефти из баженовской свиты (исключая опесчаненный разрез) заключается в том, что углеводороды сосредоточены в гидродинамически изолированных линзах и закрытых порах. Баженовская свита обладает большим количеством керогена, который в случае использования третичных методов увеличения нефтеотдачи способен сгенерировать дополнительные углеводороды.

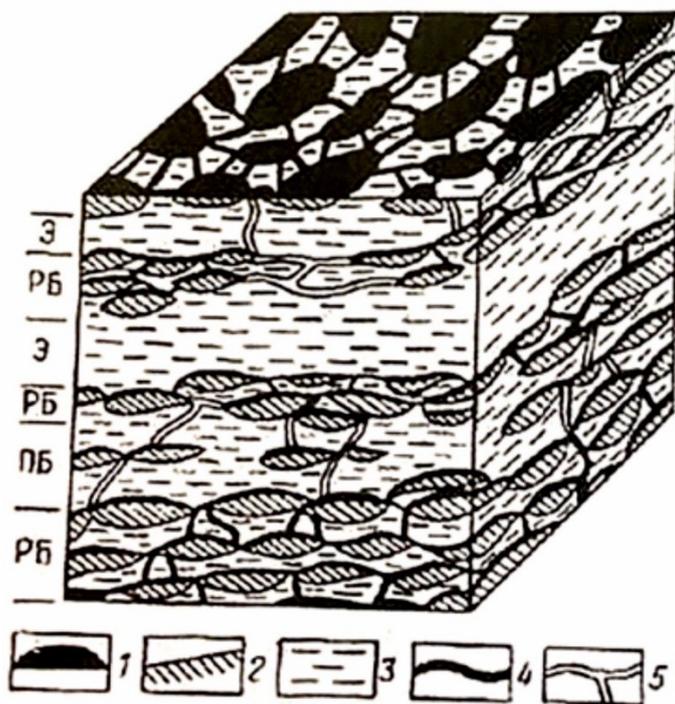
По технологиям добычи нефти из баженовской свиты видятся два решения:

1. По концепции И.И. Нестерова (старшего), модель коллектора «баженит» и дилатантный режим разработки; предлагается проводить межскважинную сейсморазведку для локализации нефтяных линз; бурить скважину именно в эту линзу, проводить испытания в открытом забое, с последующим дилатантным режимом разработки на штуцере 6 мм.

¹ Дифференцированная оценка перспектив нефтеносности баженовской свиты Западно-Сибирской НПП (нетрадиционные источники сланцевой нефти) с выделением перспективных зон и участков на основе разработки и совершенствования критериев ее потенциальной продуктивности и методических подходов к оценке прогнозных ресурсов: Отчет о НИР / Отв. исп. М.Б. Скворцов. М., 2016. Гос. рег. № 643-14-472.

На рис. 1 представлена модель коллектора баженита, промысловый эффект – по мере падения давления в нефтяной линзе, из которой ведется

добыча, происходит гидродинамическое соединение с соседней линзой за счет перепада давления и отсутствия жесткого скелета.



- 1 – нефть;
- 2 – органическое вещество;
- 3 – вмещающие глинистые, глинисто-кремнистые и другие породы;
- 4 – трещины автофлюидоразрыва, образующиеся в процессе формирования залежи и коллектора;
- 5 – трещины флюидоразрыва, образующиеся при разработке залежи;
- РБ и ПБ – соответственно рыхлые и плотные бажениты;
- Э – породы, экранирующие залежи нефти в баженитах

Рис. 1. Модель коллектора в баженитах

Fig. 1. Model of a reservoir in bazhenites

Источник: адаптировано из: Нестеров И.И., Ушатинский И.Н., Малыхин А.Я. и др. Нефтегазоносность глинистых пород Западной Сибири. М.: Недра, 1987. 256 с.

Source: adapted from: Nesterov I.I., Ushatinsky I.N., Malykhin A.Ya. et al. *Oil and Gas Content of Clayey Rocks of Western Siberia*. Moscow: Nedra, 1987. 256 p. (In Russ.)

2. Использование третичных методов увеличения нефтеотдачи. В работе представлены результаты воздействия на черные битуминозные аргиллиты баженовской свиты тепловым полем и СВЧ-излучением. Описаны процессы изменения структуры пустотного пространства в результате воздействия на пласт. Для оценки трансформации пустотного пространства использовался метод компьютерной рентгеновской микротомографии – цифровой анализ зерна.

На сегодняшний день нет технологий, на 100% адаптированных ко всем

литологическим типам баженовской свиты. При проектировании разработки месторождений в баженовской свите необходимо, прежде всего, детально изучать литологические, геохимические и термобарические условия конкретного месторождения. В работе [1] отмечается, что для разработки баженовской свиты могут быть использованы вторичные и третичные методы воздействия на пласт. Вторичные методы воздействия на пласт – закачка в пласт воды, газа или иных реагентов для извлечения уже сформировавшихся УВ.

Применение третичных методов направлено на преобразование в пластовых условиях органического вещества в подвижные УВ [2]. В литературе встречается достаточно много работ по лабораторному моделированию вторичных и третичных методов увеличения нефтеотдачи в баженовской свите, например, [1]. Промысловые испытания термогазового воздействия на пласт баженовской свиты требуют углубленной проработки и выявления закономерностей его применения в зависимости от физико-химических характеристик пласта.

Применение наклонно-направленного бурения, бурения горизонтальных скважин и проведения гидроразрыва пласта не дают положительных, продолжительных результатов в увеличении добычи нефти из баженовской свиты, предполагается, что скважины с высокими дебитами нефти попали в зоны естественной трещиноватости отложений.

В диссертационной работе В.Т. Литвина отмечается, что добычу нефти можно осуществлять и из отложений баженовской свиты других литологических типов (рис. 2).

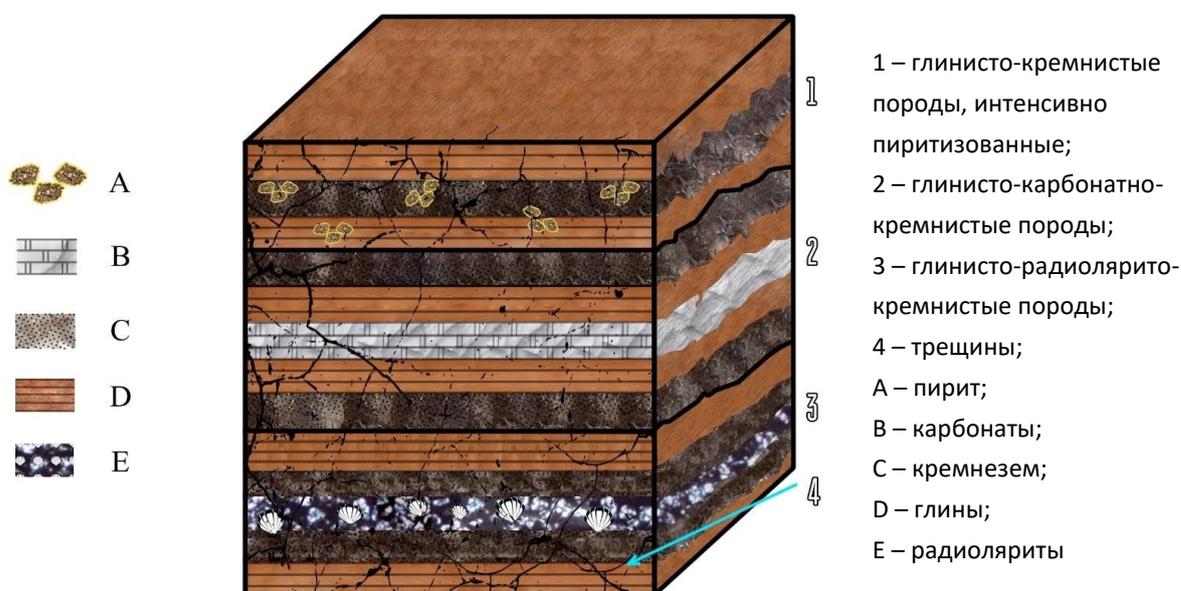


Рис. 2. Упрощенная литолого-емкостная модель тутлеймской (баженовской) свиты Пальяновской площади

Fig. 2. Simplified lithological and capacitance model of the Tutleim (Bazhenov) Formation of the Palyanovskaya area

Источник: адаптировано из: Литвин В.Т. Обоснование технологии интенсификации притока нефти для коллекторов баженовской свиты с применением кислотной обработки: Автореф. дис. канд. техн. наук. СПб., 2016. 20 с.

Source: adapted from: Litvin V.T. Substantiation of oil inflow intensification technology for Bazhenov Formation reservoirs using acid treatment. Cand. Sci. diss. abstr. St. Petersburg, 2016. 20 p. (In Russ.)

Как отмечает В.Т. Литвин, обычно при разработке низкопроницаемых коллекторов повышение коэффициента извлечения нефти пытаются достичь за счет модификации системы заводнения. В случае с баженовской

свитой этот подход не работает в связи со сложно предсказуемой гидродинамической связью отложений, поэтому отмечается важность выбора методов интенсификации притока пласта Ю₀.

В своих исследованиях В.Т. Литвин приводит результаты кислотной обработки призабойной зоны, которая обеспечила дополнительную добычу 754 т нефти за период с 01.09.2015 по 17.02.2016. Важным инструментом оценки эффективности применения кислотной обработки призабойной зоны пласта в лабораторных условиях выступил метод компьютерной рентгеновской микро-томографии. В.Т. Литвин исследовал каналы фильтрации, которые появились после воздействия на керн баженовской свиты кислотой, и получил положительный результат промышленного применения кислотной обработки.

Также В.Т. Литвин со своими соавторами отмечают необходимость отбора ориентированного по сторонам света керна с целью выявления направления естественной трещиноватости. Эта рекомендация встречается в работе [3].

Что касается промышленных испытаний применения термогазового воздействия на баженовскую свиту, существует положительный опыт у компании РИТЭК, которая использовала технологию термогазового воздействия в комплексе с бурением горизонтальной скважины, накопленная добыча нефти увеличилась на 10 тыс. т.

Бурение горизонтальных скважин, как отмечалось выше, является малоэффективным, так как в баженовской свите отсутствует жесткий скелет, в связи с этим происходят обвалы стенок горизонтальных скважин. Интересное решение было предложено компанией ООО «АТЛАС» – заполнять горизонтальные скважины обычным песком, что позволит избежать обвалов ствола горизонтальных скважин и при этом сохранит хорошие фильтрационные свойства, однако для внедрения подобного подхода необходимо

дополнительно разрабатывать технологию заполнения скважины песком во время бурения [4].

Материалы и методы

Было осуществлено два эксперимента по воздействию на образцы баженовской свиты: 1) тепловое воздействие, 2) СВЧ-воздействие.

Для проведения эксперимента были подготовлены образцы керна баженовской свиты – 6 черных битуминозных аргиллитов из скважины № 301 Салымского месторождения (инт. отбора 3005–3008 м), Содержание органического углерода из этого интервала составило от 2,7% до 6,3%, в среднем 4,8% [5]. Важно отметить, что даже внутри одного литотипа – черных битуминозных аргиллитов – на расстоянии 0,5–1,0 см концентрация органического вещества (ОВ) может в значительной степени отличаться. Учитывая это, о степени трансформации пустотного пространства в результате воздействий можно судить, опираясь на теоретические представления о том, что чем больше органического вещества при достаточно высоких температурах (больше 320 °С), тем сильнее трансформация. Также на трансформацию могут влиять микронеоднородности внутри образца, так как трещины распространяются по пути наименьшего сопротивления.

Для пиролиза было использовано 5 экспериментальных образцов, которые были помещены в муфельную печь. Удаление из муфельной печи происходило по достижению температуры 100–200–300–400–500 °С соответственно для каждого образца. Скорость нагрева составила 10 °С в минуту. Температура фиксировалась с помощью промышленного термометра. Фотография экспериментальных образцов после термического воздействия представлена на рис. 3.



Рис. 3. Экспериментальные образцы после прогрева

Fig. 3. Experimental samples after heating

Далее по всем 6 образцам без термического воздействия были получены цифровые модели методом компьютерной рентгеновской микротомографии, (модель рентгеновского микротомографа – SkyScan 1172).

Были выбраны оптимальные настройки сканирования: диаметр образца составил 12 мм; разрешающая способность съемки 3,3 мкм/пиксель; тип фильтра – алюминий+медь (стандартный для микротомографа SkyScan 1172), шаг сканирования – 0,3 °C; количество кадров – 5; количество случайных кадров – 30; сканирование производилось на 360°.

Для оценки эффектов трансформации пустотного пространства за счет воздействия СВЧ-излучения использовался один и тот же образец, который не был подвержен термическому воздействию. В качестве СВЧ-излучателя использовалась бытовая микроволновая печь со следующими характеристиками: частота – 2450 МГц, мощность – 700 Вт. Исследовался один и тот же образец, который подвергался прерывистому воздействию СВЧ-излучения. Изменения в структуре пустотного пространства во время эксперимента при прерывистом СВЧ-воздействии были задокументированы.

Далее с помощью компьютерной рентгеновской микротомографии были получены цифровые модели:

- 1 – образец без воздействия;
- 2 – воздействие 4 минуты, далее остывание 60 минут, повторное воздействие 4 минуты с последующим остыванием;
- 3 – тот же образец, дополнительное воздействие 5 минут с последующим остыванием;
- 4 – повторное воздействие 5 минут с последующим остыванием.

Акцентируем внимание на том, что это был один и тот же образец.

Выбор такого режима воздействия был сделан исходя из соображений, что СВЧ-волны не только влияют на образец посредством нагрева, но и оказывают каталитическое влияние на процессы генерации нефти (во избежание аномально высоких температур, не превышающих 300 °C). Настройки сканирования и реконструкции цифровых моделей были такими же, как в цифровых моделях экспериментальных образцов, прогретых в муфельной печи. Понимание эффектов СВЧ-воздействия на нефтематринские породы может послужить катализатором развития новых третичных методов увеличения нефтеотдачи (МУН).

Результаты

При проведении эксперимента по термическому воздействию на экспериментальные образцы при температуре 370 °С один образец взорвался (удалось получить цифровую модель фрагмента этого образца), а другой

при температуре 480 °С загорелся. Ниже представлены результаты анализа цифровых моделей образцов (рис. 4 и табл. 1).

Результаты анализа цифровых моделей образца, подверженного СВЧ-воздействию, представлены на рис. 5.

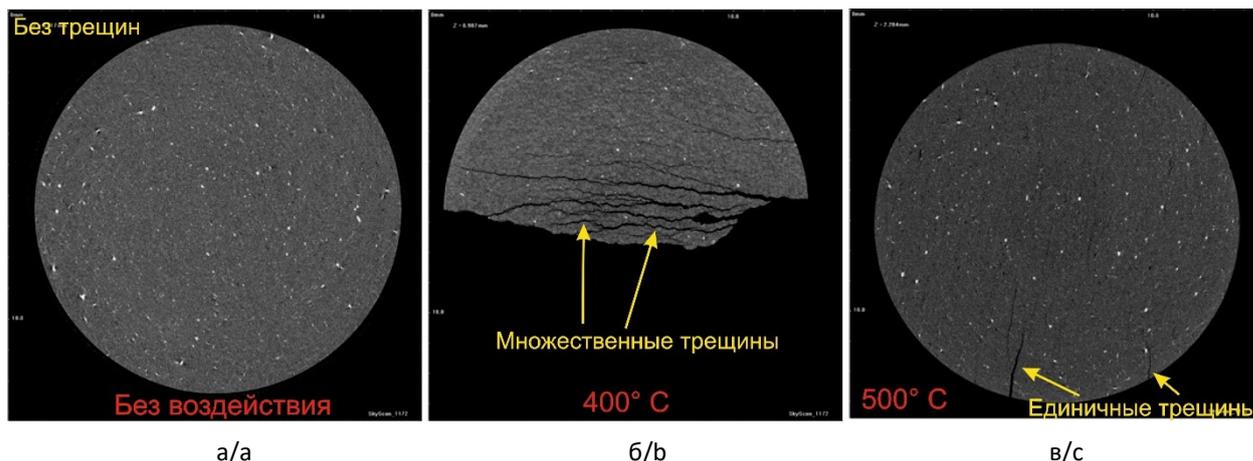


Рис. 4. Срезы цифровых моделей экспериментальных образцов:
 а – без прогрева (воздействия);
 б – прогрев до 400 °С;
 в – прогрев до 500 °С

Fig. 4. Sections of digital models of experimental samples:
 а – without heating (exposure);
 б – heating up to 400 °С,;
 с – heating up to 500 °С

Табл. 1. Результаты оценки пористости и эквивалент-диаметров пор экспериментальных образцов, подверженных термическому воздействию

Table 1. Results of evaluation of porosity and equivalent pore diameters of experimental samples subjected to thermal influence

Температура воздействия, °С	Кп, %	Эквивалент диаметры пор и их доля от КП, %				
		7 мкм	13 мкм	20 мкм	27 мкм	34 мкм
Без воздействия	2,5	56,94	37,47	4,52	1,07	0
100	3,8	51,05	46,46	2,47	0,02	0
200	3,4	48,54	46,71	4,48	0,22	0,06
300	3,2	49,40	40,52	8,04	1,86	0,17
400	6,4	27,07	42,99	19,05	9,72	1,17
500	4,2	40,38	42,46	13,68	3,43	0,04

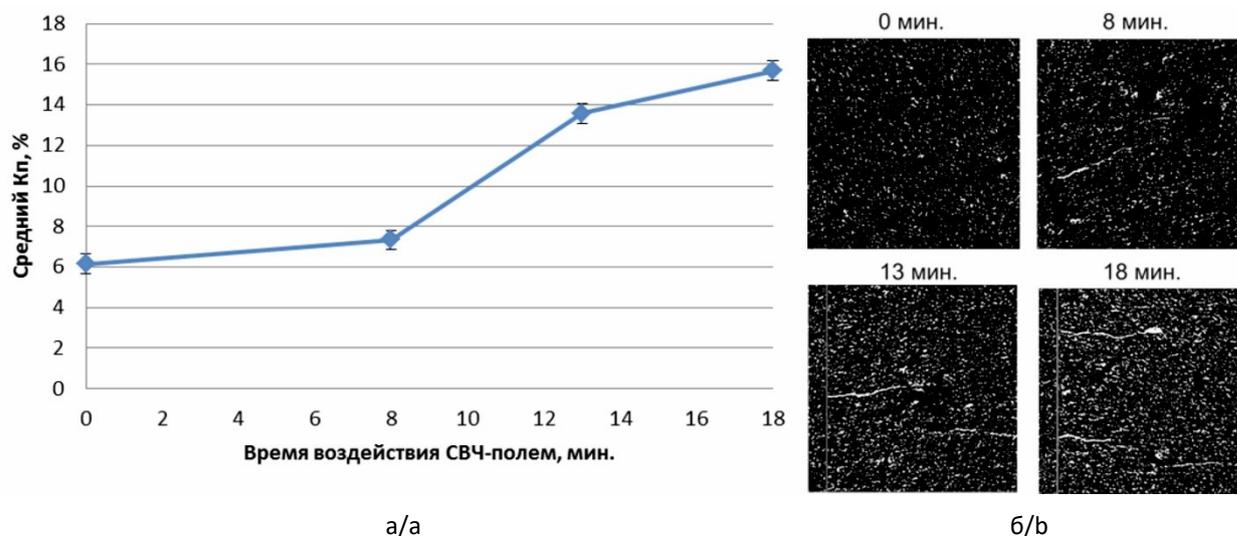


Рис. 5. Результаты цифрового анализа экспериментального образца, подверженного СВЧ-воздействию:
 а – график изменения пористости в зависимости от времени воздействия СВЧ-полем;
 б – бинаризованная структура пустотного пространства в 2D на разных стадиях (времени) воздействия

Fig. 5. Results of digital analysis of an experimental sample subjected to microwave influence:
 а – graph of porosity variation as a function of microwave field exposure time;
 б – binarized structure of void space in 2D at different stages (time) of exposure

Обсуждение результатов

В настоящей работе были проведены экспериментальные исследования по термическому и СВЧ-воздействию и задокументированы изменения в структуре пустотного пространства.

Известно, что изменения в структуре пустотного пространства керогено-содержащих пород зависят не только от скорости нагрева, но и от содержания органического вещества. Анализируя рис. 5, можно сделать вывод, что в баженовской свите, аналогично доманиковой формации, в зависимости от содержания ОВ при нагреве наблюдаются различные эффекты трансформации пустотного пространства.

Экспериментальная коллекция образцов была выбрана с минимальным расстоянием между образцами и уложилось в интервал 50 см. Это было сделано в связи с предположением,

что чем ближе образцы друг к другу – тем меньше изменчивость их свойств.

Исследования интервала отбора образцов показывают, что содержание ОВ, даже в пределах 50 см керна может в образцах различаться и показывать различные эффекты трансформации пустотного пространства даже при одинаковой температуре нагрева.

Сравнение результатов пиролиза в открытой системе и пиролиза с помощью СВЧ-воздействия на экспериментальные образцы, можно заключить, что результаты близкие.

Сравнивать численные показатели затруднительно, однако образование трещиноватости фиксируется результатами микротомографии при пиролизе в открытой системе и при пиролизе с помощью СВЧ-воздействия.

Термическое воздействие

Во время проведения эксперимента два образца (1 – прогретый до 400 °С, 2 – прогретый до 500 °С) при температуре 370 °С находились в одинаковых внешних условиях. Один образец взорвался, судя по всему, из-за генерации легких УВ, второй сохранил свою целостность. Это подтверждает, что эффективность создания искусственного коллектора в баженовской свите в результате использования третичных термических методов увеличения нефтеотдачи контролируется геохимической характеристикой – содержанием ОВ. Увеличение количества пор размером 27–34 мкм начинает происходить уже после достижения температуры 200 °С. Известно, что трансформация керогена (Метод пиролиза по технологии Rock-Eval) начинается после 300 °С² – это противоречит полученным результатам. При интерпретации результатов анализа цифровых моделей, для образцов, прогретых до 200 °С, можно предположить следующее:

1. Происходит расширение битумоида и частичное увеличение некоторых пор, где присутствуют благоприятные условия для этого;

2. Образцы баженовской свиты, даже при непрерывном отборе керна, обладают разными свойствами, например, в одном образце могут присутствовать крупные углистые включения, которые не отличимы по рентген-плотности от пор.

СВЧ-излучение

СВЧ-излучение – это сверхвысокочастотное электромагнитное излучение, которое обладает эффектом нагрева некоторых элементов горной породы, в том числе керогена и битумоида. Наиболее

часто в литературе встречаются работы по СВЧ-воздействию на залежи высоковязкой нефти [6], в том числе с использованием специальных нанокатализаторов, усиливающих эффект нагрева залежей [7]. Встречаются работы по пиролизу сланцев с помощью СВЧ-излучения [8, 9]. СВЧ-воздействие на залежи углеводородов в сравнении с классическим термогазовым воздействием отличается тем, что происходит преобразование электромагнитной энергии в тепловую. Предполагается (так как СВЧ-воздействие пока еще не внедрено в практику МУН), что СВЧ-нагрев выглядит эффективнее, так как он сводит к минимуму потери тепла и позволяет целенаправленно прогревать конкретные целевые интервалы пласта. Например, исследования по моделированию процесса микроволнового нагрева показали, что СВЧ-воздействие позволяет увеличить совокупную добычу газа в сланцевых пластах на 45% [10] и в значительной степени снизить вязкость нефти, облегчая добычу [11].

Идея воздействия СВЧ-излучением на сланцевые формации – не новая, однако в контексте данного исследования получены результаты изменений структуры пустотного пространства одного из литотипов баженовской свиты – черного битуминозного аргиллита. В отличие от горючих сланцев зарубежных нефтегазоносных провинций, битуминозные аргиллиты баженовской свиты могут быть охарактеризованы как отложения, которые не имеют жесткого скелета. Даже в рамках одного и того же литотипа наблюдается значимое отличие геохимических характеристик, которые влияют на эффекты трансформации пустотного пространства – к ним можно отнести количественное содержание битумоида и ОВ, а также их геометрическое расположение внутри исследуемого образца.

² Пиролиз Rock-Eval.

<https://neftegaz.ru/science/development/331667-piroliz-rock-eval/> (дата обращения: 29.05.2025).

Известно, что трещины распространяются по пути наименьшего геомеханического сопротивления, это значит, что от структуры пустотного пространства и расположения керогена будет зависеть финальный результат фильтрационных свойств исследуемого образца, подвергнутого воздействию. Отсутствие жесткого скелета в баженовских битуминозных аргиллитах обуславливает необходимость детализированной проработки оценки эффективностей применения СВЧ-излучения в промышленных масштабах, в качестве метода увеличения нефтеотдачи.

Высокочастотные электромагнитные волны имеют сильные ограничения по глубине проникновения в пласт, но развитие СВЧ-излучателей в нефтедобывающей промышленности показано в работе [12], отмечается, что спектр СВЧ-излучения достаточно широк и позволяет подобрать параметры излучения таким образом, чтобы обеспечить эффективный прогрев нефтяного пласта.

Говоря про конкретный экспериментальный образец, анализируя рис. 5, следует отметить, что в результате СВЧ-воздействия эффекты трансформации пустотного пространства фиксируются уже после 8-минутного воздействия: увеличивается коэффициент пористости, а также наблюдаются процессы автофлюидоразрыва с образованием трещиноватости. Наиболее интенсивные изменения в структуре пустотного пространства фиксируются во временном интервале с 8 по 13 минуту воздействия. В 2019 г. была опубликована работа [13] с совмещением цифровых моделей исследуемого в настоящей работе экспериментального образца, подвергнутого СВЧ-воздействию. Были совмещены

цифровые модели: без воздействия и после 8-минутного воздействия, результат совмещения цифровых моделей представлен на рис. 6. Результат вычитания цифровых моделей одной из другой трактуется следующим образом: серый цвет – изменений нет, черный и ярко-белый – изменения. В результате воздействия образовались трещины и увеличился диаметр образца. Черный и белый цвет могут быть следствием как изменения одной модели, так и другой. Без изменений – серый цвет монолитный. Черные и белые точки – результат не идеального совмещения тяжелых минералов.

В этой работе дополнительно, используя метод цифрового анализа – совмещение цифровых моделей и вычитание цвета (одной модели из другой), удалось зафиксировать косвенным путем увеличение диаметра образца (белый цвет по окружности образца) после 8-минутной СВЧ-обработки, а также образование трещиноватости (желтые стрелки на рис. 6).

Следует учесть экологичность перспективной промысловой технологии СВЧ-пиролиза в пластовых условиях. Микроволновое воздействие является более экологичным методом по сравнению с традиционными тепловыми методами термогазового воздействия, поскольку оно производит меньше выбросов парниковых газов и не требует меньше воды [11]. Снижение тепловых потерь за счет целенаправленного прогрева конкретных интервалов является немаловажным фактором заботы об окружающей среде. Это приводит к снижению эксплуатационных расходов по сравнению с традиционными методами, такими как впрыск пара, которые часто связаны с высоким потреблением энергии и потерями тепла [14].

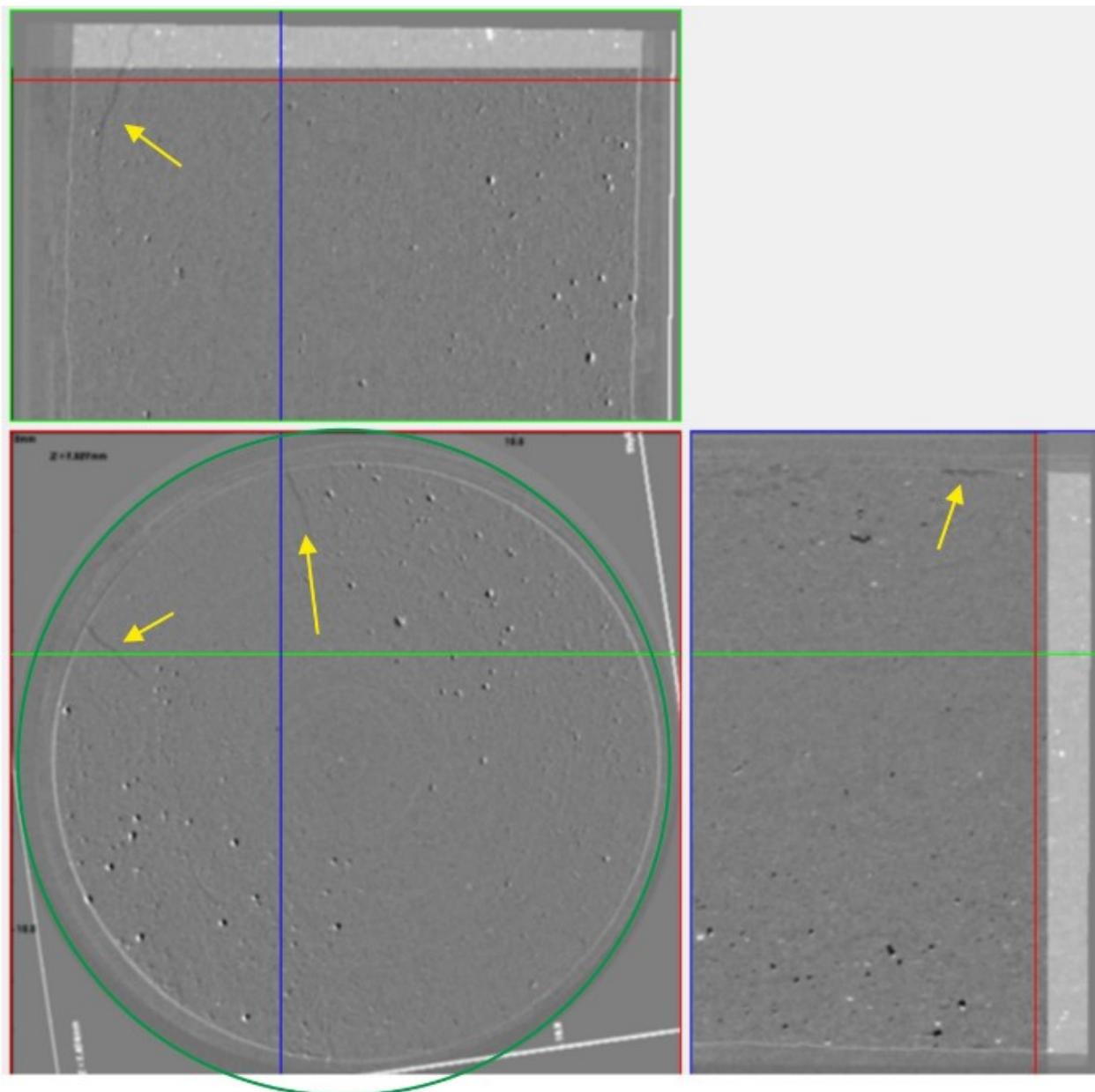


Рис. 6. Ортогональные сечения совмещенных цифровых моделей до и после 8 минутного СВЧ-воздействия на образец

Fig. 6. Orthogonal sections of combined digital models before and after 8 minutes of microwave exposure to the sample.

Источник: адаптировано из [13]

Source: adapted from [13]

Необходимо отметить, что одной из основных проблем является масштабирование технологии СВЧ-воздействия для применения в промышленных условиях, а не в лабораториях. Хотя лабораторные

эксперименты показали многообещающие результаты, внедрение микроволнового нагрева в процесс добычи нефти требует дальнейших исследований и разработок [15, 16].

Заключение

Приведен анализ известных методов увеличения нефтеотдачи при различных подходах к разработке залежей в баженовской свите. Проанализированы современное состояние и перспективы использования технологии воздействия СВЧ на пласт.

Задokumentированы изменения в структуре пустотного пространства по цифровым моделям образцов, подвергшимся пиролизу в открытой системе и СВЧ-пиролизу. Результаты показали увеличение коэффициента пористости и образование трещиноватости при том и другом виде пиролиза. При разработке третичных методов нефтеотдачи для баженовской свиты обязательно нужно учитывать геохимические характеристики, такие как содержание битумоида и органического вещества целевых пластов. Потенциальные эффекты методов увеличения нефтеотдачи

будут контролироваться не только временем и степенью энергетического воздействия на пласт, но и геохимическими характеристиками конкретных отложений. Судя по анализу цифровых моделей образцов черных битуминозных аргиллитов баженовской свиты, даже при относительно невысоких температурах воздействия (до активации генерации жидких и газообразных углеводородов из керогена) наблюдаются изменения в структуре пустотного пространства, предположительно происходит расширение битумоида и увеличение размера пор.

По результатам экспериментальных данных и литературного анализа рассмотрены достоинства и недостатки теплового и СВЧ-воздействия на пласт для увеличения нефтеотдачи.

Предлагается развивать промышленную технологию СВЧ-воздействия на целевые интервалы пласта, так как она выглядит более экологичной и энергоэффективной.

Вклад авторов

А.А. Пономарев – концептуализация, создание рукописи и ее редактирование.

В.М. Александров – методология.

В.С. Корытов – администрирование проекта.

Б.В. Григорьев – ресурсы.

К.А. Галинский – проведение исследования.

А.Е. Кудрявцев – программное обеспечение.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список источников

1. Левкина В.В., Калмыков А.Г., Генарова Т.Н. и др. Сравнение потенциала вторичных и третичных методов воздействия на пласт для получения углеводородов из нефтематеринских пород, обладающих высоким нефтегенерационным потенциалом // Георесурсы. 2019. Т. 21, № 4. С. 95–102. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.95-102>

2. Якуш С.Е., Полищук А.М. Разработка Баженовской свиты: проблемы и подходы // Процессы в геосредах. 2019. № 4(22). С. 540–551.

3. *Белозёров В.Б.* Открытая трещиноватость баженовской свиты и перспективы ее разработки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 1. С. 150–158.
4. *Иванников В.И., Иванников И.В., Олеванов С.А.* К вопросу разработки и добычи нефти из залежей баженовской свиты // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 8. С. 44–50. <https://doi.org/10.30713/0130-3872-2019-8-44-50>
5. *Ponomarev A.A., Kadyrov M. A., Gafurov M.R.* et al. Magnetic field impact on geochemistry of soluble organic matter when heat-treating oil shales and search for analogies in nature // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2023. Vol. 129. P. 103306. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103306>
6. *Shang H., Yue Y., Zhang J.* et al. Effect of microwave irradiation on the viscosity of crude oil: A view at the molecular level // Fuel Processing Technology. 2018. Vol. 170. P. 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.10.021>
7. *Hanyong L., Kexin C., Ling J.* et al. Experimental study on the viscosity reduction of heavy oil with nano-catalyst by microwave heating under low reaction temperature // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 170. P. 374–382. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.06.078>
8. *Taheri-Shakib J., Kantzas A.* A comprehensive review of microwave application on the oil shale: Prospects for shale oil production // Fuel. 2021. Vol. 305. P. 121519. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121519>
9. *Cheng Y., Lin S., Ma Y.* Pore structure of oil shale heated by using conduction and microwave radiation: A case study of oil shale from the Fushun in China // Geofluids. 2022. Vol. 2022, No. 1. P. 6231192. <https://doi.org/10.1155/2022/6231192>
10. *Sun C., Liu W., Wang B., Guo C.* Modeling microwave heating for enhanced shale gas recovery: Fully coupled two-phase flows with heat transfer and electromagnetism in deformable reservoirs // Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 248. P. 123190. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123190>
11. *Gharibshahi R., Asadzadeh N., Jafari A.* Toward understanding the effect of electromagnetic radiation on in situ heavy oil upgrading and recovery: Background and advancements // Innovations in Enhanced and Improved Oil Recovery – New Advances / Ed. by M. Zoveidavianpoor. Vienna: InTechOpen, 2023. P. 164–177. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002809>
12. *Cao B., Dergunov V.S., Chelintsev S.N.* Effects of hybrid microwave heating on the structural and mechanical properties of heavy oil // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2021. Vol. 57, No. 3. P. 492–498. <https://doi.org/10.1007/s10553-021-01272-5>
13. *Пономарев А.А.* Методика косвенной оценки наличия нефтегенерации в глинисто-битуминозных породах под воздействием СВЧ-волн // Технологии нефти и газа. 2019. № 2(121). С. 28–31. <https://doi.org/10.32935/1815-2600-2019-121-2-28-31>
14. *Hascakir B., Acar C., Akin S.* Microwave-assisted heavy oil production: An experimental approach // Energy & Fuels. 2009. Vol. 23, No. 12. P. 6033–6039. <https://doi.org/10.1021/EF9007517>
15. *Peng M., Li W., Lin L.* et al. Feasibility analysis of nanoparticles enhanced in-situ microwave thermal recovery of shale oil // Proceedings of the 10th International Field Exploration and Development Conference. Singapore: Springer, 2020. P. 2864–2874. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0761-5_268

16. *Gharibshahi R., Omidkhah M., Jafari A.* Sandpack flooding of microwave absorbent nanofluids under electromagnetic radiation: An experimental study // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2024. Vol. 14, No. 3. P. 853–865. <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01736-w>

Информация об авторах

Андрей Александрович Пономарев – главный специалист, ООО «НОВАТЭК Научно-технический центр», Тюмень, Россия; старший преподаватель, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; SPIN-код: 3969-5187, <https://orcid.org/0000-0002-9770-4586>; e-mail: ponomarev94@mail.ru

Вадим Михайлович Александров – к.г.-м.н., заместитель генерального директора, АО «Тандем», Тюмень, Россия; доцент, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; SPIN-код: 7591-0301, <https://orcid.org/0009-0008-8247-1901>; e-mail: alexandrov_v@aotandem.ru

Виталий Сергеевич Корытов – заместитель директора лабораторно-исследовательского центра, ООО «НОВАТЭК Научно-технический центр», Тюмень, Россия; доцент, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; SPIN-код: 5974-3446, <https://orcid.org/0009-0003-8496-1174>; e-mail: korytov85@mail.ru

Борис Владимирович Григорьев – к.т.н., заведующий кафедрой, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; SPIN-код: 4206-1318, <https://orcid.org/0000-0002-2757-1386>; e-mail: b.v.grigorev@utmn.ru

Кирилл Александрович Галинский – старший преподаватель, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; SPIN-код: 7227-5530, <https://orcid.org/0009-0003-6930-5670>; e-mail: galinskijka@tyuiu.ru

Антон Евгеньевич Кудрявцев – старший преподаватель, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; SPIN-код: 4413-3850, <https://orcid.org/0000-0003-4556-6780>; e-mail: kudrjavnsevae@tyuiu.ru

Поступила в редакцию 28.02.2025

Принята к публикации 17.04.2025

NOTES IN ENGINEERING

Original article

<https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2025.09>

First results and comparative analysis of experimental studies of void space transformation in black bituminous mudstones of the Bazhenov Formation of the Salym field under thermal and microwave effects

Andrey A. Ponomarev^{1,2} ✉, Vadim M. Alexandrov^{2,3}, Vitaly S. Korytov^{1,2}, Boris V. Grigoriev⁴, Kirill A. Galinsky², Anton E. Kudryavtsev²

1 – NOVATEK Scientific and Technical Center LLC, 53 50 let VLKSM St., Tyumen, 625026, Russia

2 – Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russia

3 – Tandem JSC, 57 Respubliki St., Tyumen, 625000, Russia

4 – University of Tyumen, 6 Volodarskogo St., Tyumen, 625003, Russia

Abstract. *Background.* The article considers the problem of oil production from the Bazhenov Formation, the recoverable resources of which are estimated to reach 20 billion t. *Objective.* To analyze the known methods of enhancing oil recovery in the Bazhenov Formation and to consider the prospects for using the technology of ultrahigh frequency electromagnetic action on the formation. *Materials and methods.* The object of the study is one of the lithotypes of the Bazhenov Formation – black bituminous argillite. Experiments were carried out on thermal and electromagnetic action of ultrahigh frequency with recording of changes in the qualitative and quantitative characteristics of the experimental samples. *Results.* Changes in the structure of the void space are documented using digital models. According to the results of laboratory studies, it is noted that the structure of the void space can be affected by such geochemical characteristics as bitumen and organic carbon – their spatial distribution and quantity. The prospects for using ultrahigh frequency electromagnetic action on the formation, the advantages and disadvantages of other methods are presented. *Conclusions.* The potential effects of enhanced oil recovery methods will be controlled not only by the time and degree of energy impact on the reservoir, but also by the geochemical characteristics of specific deposits. The industrial technology of microwave impact on target reservoir intervals is proposed to be developed, as it appears to be more environmentally friendly and energy efficient.

Keywords: Bazhenov Formation, void space transformation, computer X-ray microtomography, microwave effects, thermal effects, digital core analysis

Funding: the work received no funding.

Acknowledgments: the authors are grateful to the reviewers for their valuable advice; special thanks to the scientists who passed away: Arkady R. Kurchikov, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, and Ivan I. Nesterov, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, for the preservation and development of the Tyumen geological school.

✉ Andrey A. Ponomarev, ponomarev94@mail.ru

© Ponomarev A.A., Alexandrov V.M., Korytov V.S., Grigoriev B.V., Galinsky K.A., Kudryavtsev A.E., 2025



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

For citation: Ponomarev A.A., Alexandrov V.M., Korytov V.S., Grigoriev B.V., Galinsky K.A., Kudryavtsev A.E. First results and comparative analysis of experimental studies of void space transformation in black bituminous mudstones of the Bazhenov Formation of the Salym field under thermal and microwave effects. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 324–340. (In Russ.). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2025.09>

Author contributions

Andrey A. Ponomarev – conceptualization, writing – review & editing.

Vadim M. Alexandrov – methodology.

Vitaly S. Korytov – project administration.

Boris V. Grigoriev – resources.

Kirill A. Galinsky – investigation.

Anton E. Kudryavtsev – software.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

References

1. Levkina V.V., Kalmykov A.G., Genarova T.N. et al. Comparison of influence on the formation by secondary and tertiary methods for the production of hydrocarbon compounds from oil source rocks with high oil-generating potential. *Georesursy*. 2019. Vol. 21, No. 4. P. 95–102. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.95-102>
2. Yakush S.E., Polishchuk A.M. Oil recovery from Bazhen Formation: Problems and approaches. *Protsessy v geosredakh*. 2019. No. 4(22). P. 540–551. (In Russ.).
3. Belozеров V.B. Open-fractured Bazhenov Suite and its future development. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018. Vol. 329, No. 1. P. 150–158. (In Russ.).
4. Ivannikov V.I., Ivannikov I.V., Olevanov S.A. On the problem of the deposits' development and oil production from the Bazhenov Suite deposits. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*. 2019. No. 8. P. 44–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.30713/0130-3872-2019-8-44-50>
5. Ponomarev A.A., Kadyrov M. A., Gafurov M.R. et al. Magnetic field impact on geochemistry of soluble organic matter when heat-treating oil shales and search for analogies in nature. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2023. Vol. 129. P. 103306. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103306>
6. Shang H., Yue Y., Zhang J. et al. Effect of microwave irradiation on the viscosity of crude oil: A view at the molecular level. *Fuel Processing Technology*. 2018. Vol. 170. P. 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.10.021>
7. Hanyong L., Kexin C., Ling J. et al. Experimental study on the viscosity reduction of heavy oil with nano-catalyst by microwave heating under low reaction temperature. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. Vol. 170. P. 374–382. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.06.078>
8. Taheri-Shakib J., Kantzas A. A comprehensive review of microwave application on the oil shale: Prospects for shale oil production. *Fuel*. 2021. Vol. 305. P. 121519. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121519>
9. Cheng Y., Lin S., Ma Y. Pore structure of oil shale heated by using conduction and microwave radiation: A case study of oil shale from the Fushun in China. *Geofluids*. 2022. Vol. 2022, No. 1. P. 6231192. <https://doi.org/10.1155/2022/6231192>

10. Sun C., Liu W., Wang B., Guo C. Modeling microwave heating for enhanced shale gas recovery: Fully coupled two-phase flows with heat transfer and electromagnetism in deformable reservoirs. *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 248. P. 123190. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123190>
11. Gharibshahi R., Asadzadeh N., Jafari A. Toward understanding the effect of electromagnetic radiation on in situ heavy oil upgrading and recovery: Background and advancements. In: Zoveidavianpoor M., ed. *Innovations in Enhanced and Improved Oil Recovery – New Advances*. Vienna: InTechOpen, 2023. P. 164–177. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002809>
12. Cao B., Dergunov V.S. Chelintsev S.N. Effects of hybrid microwave heating on the structural and mechanical properties of heavy oil. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2021. Vol. 57, No. 3. P. 492–498. <https://doi.org/10.1007/s10553-021-01272-5>
13. Ponomarev A.A. Methods of indirect estimation of oil and gas generation in clay-bituminous rocks under the influence of microwave waves. *Tekhnologii nefi i gaza*. 2019. No. 2(121). P. 28–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.32935/1815-2600-2019-121-2-28-31>
14. Hascakir B., Acar C., Akin S. Microwave-assisted heavy oil production: An experimental approach. *Energy & Fuels*. 2009. Vol. 23, No. 12. P. 6033–6039. <https://doi.org/10.1021/EF9007517>
15. Peng M., Li W., Lin L. et al. Feasibility analysis of nanoparticles enhanced in-situ microwave thermal recovery of shale oil. In: *Proceedings of the 10th International Field Exploration and Development Conference*. Singapore: Springer, 2020. P. 2864–2874. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0761-5_268
16. Gharibshahi R., Omidkhah M., Jafari A. Sandpack flooding of microwave absorbent nanofluids under electromagnetic radiation: An experimental study. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2024. Vol. 14, No. 3. P. 853–865. <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01736-w>

Information about the authors

Andrey A. Ponomarev – Chief Specialist, NOVATEK Scientific and Technical Center LLC, Tyumen, Russia; Senior Lecturer, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-9770-4586>; e-mail: ponomarev94@mail.ru

Vadim M. Alexandrov – Cand. Sci. (Geol.-Min.), Deputy Director General, Tandem JSC, Tyumen, Russia; Associate Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia; University, Tyumen, Russia; <https://orcid.org/0009-0008-8247-1901>; e-mail: alexandrov_v@aotandem.ru

Vitaly S. Korytov – Deputy Director of the Laboratory Research Center, NOVATEK Scientific and Technical Center LLC, Tyumen, Russia; Associate Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia; <https://orcid.org/0009-0003-8496-1174>; e-mail: korytov85@mail.ru

Boris V. Grigoriev – Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, University of Tyumen, Tyumen, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-2757-1386>; e-mail: b.v.grigorev@utmn.ru

Kirill A. Galinsky – Senior Lecturer, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia; <https://orcid.org/0009-0003-6930-5670>; e-mail: galinskijka@tyuiu.ru

Anton E. Kudryavtsev – Senior Lecturer, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-4556-6780>; e-mail: kudryavtsevae@tyuiu.ru

Received 28 February 2025

Accepted 17 April 2025