

**ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ С ЦЕЛЬЮ УЧЕТА МАСШТАБНОГО
ЭФФЕКТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЕМКОСТНОГО ПРОСТРАНСТВА
ТРЕЩИНОВАТЫХ КОЛЛЕКТОРОВ**

Галкин С.В.¹, Гурбанов В.Ш., Колычева Н.Ю.³, Казымов К.П.⁴, Осовецкий Б.М.⁴

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет

²Министерство науки и образования Азербайджанской Республики,
Институт нефти и газа

³ООО «МИП-Прогноз-РНМ»

⁴Пермский государственный национальный исследовательский университет

**POSSIBILITIES OF INTEGRATED USE OF NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS IN ORDER TO TAKE INTO
ACCOUNT THE SCALE EFFECT WHEN STUDYING THE CAPACITIVE SPACE OF FRACTURED RESERVOIRS**

Galkin S.V.¹, Gurbanov V.Sh.², Kolycheva N.Yu.³, Kazymov K.P.⁴, Osovetskiy B.M.⁴

¹Perm National Research Polytechnic University

²Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Oil and Gas Institute

³ООО «МИП-Прогноз-РНМ»

⁴Perm State University

Keywords: carbonate
reservoirs, core tomography,
electron microscopy,
fracture, heterogeneity

Summary. Clay-carbonate rocks of the Kashiro-Verei age of one of the regions of the Volga-Ural oil and gas region are considered as an object of research. The possibility of studying reservoirs by X-ray tomography of a full-sized and standard core in conjunction with the use of electron microscopy has been scientifically substantiated. As a result of comprehensive studies, lithological types of rocks have been identified that differ in the structure of the capacitive space. The representativeness of various lithotypes in the volume of rocks was quantified based on the data of studies of a full-size core. A joint analysis of the results of standard core tomography and electron microscopy made it possible to examine the structure of the pore space and the development of microfracturing processes at a detailed level. It is concluded that the considered type of development object is characterized by a void space, through which fluid filtration is potentially possible. The conducted studies made it possible to more reliably assess the prospects for the use of enhanced oil recovery methods, primarily hydraulic fracturing technology.

© 2023 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

Введение

При исследованиях керна вследствие проявления масштабного эффекта достоверность результатов зависит от геометрического размера изучаемых образцов. Структуру емкостного пространства карбонатных пород можно представить, как систему крупных и мелких пустот. При этом крупные системы (каверны, крупные трещины и очаги крупных пор) сообщаются между собой за счет микротрещин и мелких пустот.

При изучении пустотного пространства кернов различного размера эффективен метод томографии, при котором породы разделяются по их рентгеновской плотности (Mahanta, 2021; Ketova, 2022). Компьютерное моделирование результатов томографического метода выполняется обычно в программном комплексе Avizo Fire (Schmitt, 2016). Детальное изучение пустотного пространства пород на микроуровне позволяет выполнить метод электронной микроскопии, при котором сканируется поверхность керна с фотографированием особенностей микропустотного пространства. Совместное использование томографии и микроскопии позволяет получить комплексное представление о структуре и неоднородности продуктивного пласта.

Метод

Разрешающая способность при томографии полноразмерного керна ($d=100$ мм) составляет порядка 300 мкм, что позволяет выделять участки различных типов пустотности, локализации каверн, литологические неоднородности, а также крупные трещины. Томография стандартных петрофизических образцов ($d=30$ мм) позволяет изучать структурно-морфологические признаки, геометрию пустотного пространства с учетом влияния микронеоднородностей и слоистости керна. Разрешающая способность при этом составляет порядка 40 мкм (Yang, 2020).

Сканирование поверхности образцов при микроскопии позволяет работать при увеличениях до 30000 крат, что соответствует разрешающей способности 0.1 мкм. Метод позволяет визуализировать как структуру гранул породы, так и проявление микро- и нано- трещиноватости. Таким образом, методы рентгеновской томографии и микроскопии позволяют рассматривать геологические объекты на различном структурном уровне.

В качестве объекта исследований рассмотрены глинисто-карбонатные породы каширо-верейского возраста одного из месторождений Волго-Уральского нефтегазоносного региона. Продуктивные пласты характеризуется высокой степенью неоднородности, нефтеносные интервалы представлены известняками с различным диапазоном фильтрационно-емкостных свойств. Согласно исследованиям керна в геологическом разрезе выделено 4 литотипа. Литотип 1 представлен безглинистыми известняками с пористостью более 20%. Интервалы литотипа 2 представлены чередованием по 2-10 см пористых и плотных разностей пород. Интервалы литотипов 1 и 2 интерпретируются при подсчете запасов как нефтенасыщенные коллекторы. Литотип 3 характеризуется неоднородностью, которая имеет зональный характер. Литотип 4 представлен уплотненными заглинизированными известняками и не содержит нефтенасыщенных участков.

Обсуждение результатов

Для количественной оценки неоднородности и емкостных свойств проведены томографические исследования полноразмерного керна. Для проницаемого литотипа 1 установлено развитие кавернозности. Для литотипа 2 проницаемый объем (76%) преобладает над уплотненным (24%). Для литотипа 3 значительно больший объем (86%) представлен уплотненной породой, меньший – коллектором (14%). Визуализация пустотного пространства на стандартном керне позволила в проницаемой части литотипа 3 выделить участки с микротрещиноватостью, что согласуется с установленной слабой трещиноватостью по данным гидродинамических исследований скважин (Martyushev, 2019).

На рисунке 1 приведено картирование пустотного пространства пород по данным рентгеновской томографии. Основой для построения карт являлось определение размеров пустот в полигонах небольшого размера с последующим расчетом осредненных значений раскрытости на площади сечения. Количество пустот отображено в развернутом цветовом диапазоне: наиболее крупные – оранжевые, желтые цвета, мелкие – синие, фиолетовые. В целом проведенное картирование показывает значительное отличие в структуре порового пространства литотипа 1 от литотипов 2 и 3. Примечательно, что в литотипе 4, интервалы которого по данным каротажа рассматривается как абсолютно плотные породы, также установлена зона с относительно крупными пустотами.

В таблице представлена информация о структуре размеров пор в емкостном пространстве для различных литотипов. В целом анализ показывает заметное увеличение относительного количества крупных пустот в литотипе 1 по сравнению с литотипами 2 и 3. Причем, даже в литотипе 4, для которого нефтеносность не установлена, присутствуют, хоть и в небольшом количестве, поры относительно крупного размера.

При изучении различий пустотного пространства литотипов на микроструктурном уровне методом электронной микроскопии анализировались участки поверхности пород. Результаты электронно-микроскопических снимков приведены на рисунке 2.

Анализ результатов микроскопии показывает, что литотип 1 представлен округлыми биоморфозами фораминифер размером до 1-2 мм. Для литотипа 1 сеть микротрещин развита в целом слабо, трещины имеют небольшую протяженность. Для проницаемой части литотипа 2 на микроскопических снимках видно, что пустотное пространство частично заполняется глинистым и новообразованным карбонатным веществом, при этом прослеживается развитие коротких микротрещин. Для литотипа 3 основу матричного вещества составляют биоморфозы по водорослям, которые представлены вытянутыми жгутиками цилиндрической формы (диаметр около 10 мкм). В проницаемом объеме присутствуют микрокаверны диаметром до 0.5 мм. Литотип 4 на микроуровне состоит из пластинчатых кристаллов кальцита, которые на отдельных участках замещаются крупными разностями размером до 5 мкм. Для литотипа 4 выявлены

микротрещины, межслоевые щели, а также в незначительном объеме межзерновая пористость. В целом можно сделать вывод, что каширо-верейская толща характеризуется пустотным пространством, по которому потенциально возможна фильтрация флюидов.

Выводы

Предлагаемый комплекс методов визуализации пустотного пространства для каширо-верейской нефтеносной толщи позволил количественно установить объемы пород, представленных различными литологическими разностями. Совместный анализ результатов томографии стандартного керна и электронной микроскопии позволил на детальном уровне визуализировать как структуру порового пространства, так и развитие микротрещиноватости. Понимание структуры трещиноватости нефтяного объекта, в том числе, позволяет более объективно оценить перспективы применения методов повышения нефтеотдачи, прежде всего технологии гидроразрыва пласта.

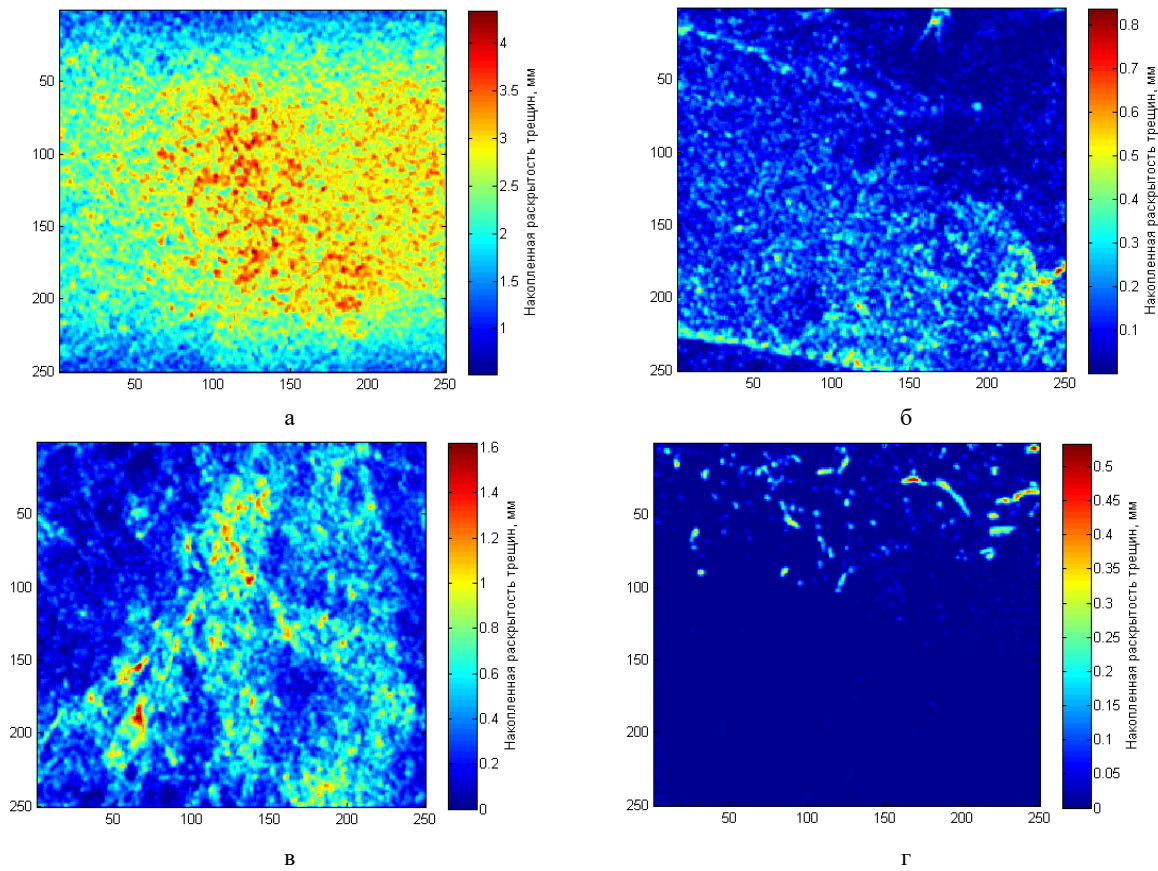


Рис. 1. Карты пустотности для литотипов 1 (а), 2 (б) и 3 (в) и 4 (г)

тип пород	размер пустотности, мкм								
	40-69	69-92	92-116	116-139	139-162	162-185	185-208	208-231	>231
	доля пустотности различных размеров, %								
литотип 1	22,8	13,9	25,7	12,0	12,8	5,6	4,1	1,6	1,5
литотип 2	49,3	14,4	23,8	5,6	4,7	1,2	0,7	0,2	0,1
литотип 3	50,4	15,9	20,6	5,4	4,5	1,4	0,9	0,4	0,5
литотип 4	39,0	11,5	14,4	7,4	9,6	5,2	5,6	3,1	4,2

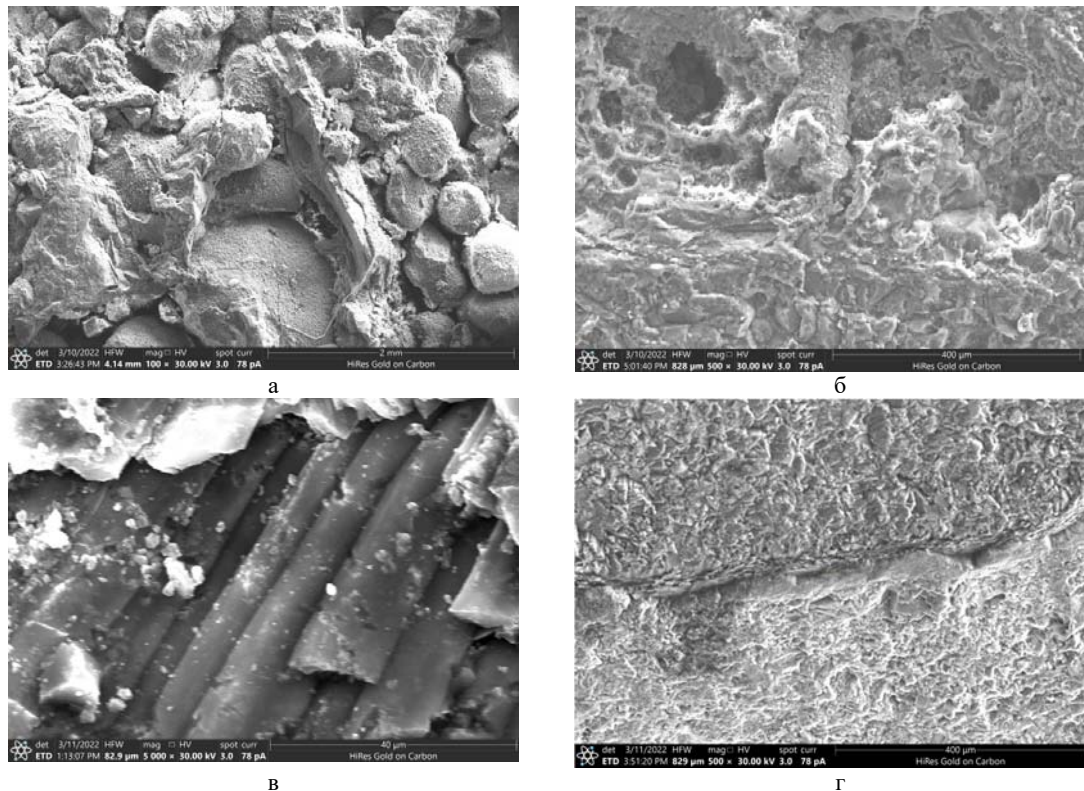


Рис. 2. Микрофотографии поверхности образцов для литотипов 1 (а), 2 (б) и 3 (в) и 4 (г)

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSNM-2023-0005).

REFERENCES

- Mahanta B., Vishal V., Ranjith P.G., Singh T.N. An insight into pore-network models of high-temperature heat-treated sandstones using computed tomography. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 77, 2020, 103227.
- Ketova Yu., Galkin S., Kolychev I. Evaluation and X-Ray tomography analysis of super-absorbent polymer for water management in high salinity mature reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 2021, 107998.
- Schmitt M., Halisch M., Müller C., Fernandes C.P. Classification and quantification of pore shapes in sandstone reservoir rocks. *Solid Earth*, Vol. 7, 2016, pp. 285-300.
- Yang S.-Q., Yang Z., Jing H.-W., Xu T. Fracture evolution mechanism of hollow sandstone under conventional triaxial compression by X-ray micro-CT observations and three-dimensional numerical simulations. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 190, 2020, pp.156-180.
- Martyushev D.A., Galkin S.V., Shelepov V.V. The influence of the rock stress state on matrix and fracture permeability under conditions of various lithofacial zones of the tournaisian-fammenian oil fields in the upper Kama region. *Moscow University Geology Bulletin*, Vol. 74(6), 2019, pp. 573-581.

ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ С ЦЕЛЬЮ УЧЕТА МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЕМКОСТНОГО ПРОСТРАНСТВА ТРЕЩИНОВАТЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Галкин С.В.¹, Гурбанов В.Ш. , Кольчева Н.Ю.³, Казымов К.П.⁴, Осовецкий Б.М.⁴

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет

²Министерство науки и образования Азербайджанской Республики, Институт нефти и газа

³ООО «МИП-Прогноз-РНМ»

⁴Пермский государственный национальный исследовательский университет

Резюме. В качестве объекта исследований рассмотрены глинисто-карбонатные породы каширо-верейского возраста одного из районов Волго-Уральского нефтегазоносного региона. Научно обоснованы возможности изучения коллекторов мето-

дами рентгеновской томографии полноразмерного и стандартного керна в совокупности с применением электронной микроскопии. В результате комплексных исследований выделены литологические типы пород, различающиеся структурой емкостного пространства. По данным исследований полноразмерного керна количественно оценена представительность различных литотипов в объеме пород. Совместный анализ результатов томографии стандартного керна и электронной микроскопии позволил на детальном уровне рассмотреть структуру порового пространства и развитие процессов микротрещиноватости. Сделаны выводы, что рассмотренный тип объекта разработки характеризуется пустотным пространством, по которому потенциально возможна фильтрация флюидов. Проведенные исследования позволили более достоверно оценить перспективы применения методов повышения нефтеотдачи, прежде всего технологии гидроразрыва пласта.

Ключевые слова: карбонатные коллекторы, томография керна, электронная микроскопия, трещина, неоднородность