

УДК 537.533.35:621.382

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА КАРБОНАТНЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И ГАЗА

© 2020 г. В. А. Кузьмин*

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, 119333 Россия

**e-mail: kuzminva@mail.ru*

Поступила в редакцию 22.09.2019 г.

После доработки 28.10.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

Изложена методика выделения микроструктурных типов порового пространства карбонатных пород на примере Димитровского газоконденсатно-нефтяного месторождения. Для изучения особенностей микростроения применялся растровый электронный микроскоп Carl Zeiss NVision 40, с помощью которого исследовалась поверхность сколов образцов и аншлифов, приготовленных из выбуренных кернов пород. В результате исследований были выделены породы с различным типом порового пространства.

Ключевые слова: электронный микроскоп, поровое пространство, катодолюминесцентный метод, известняк, микроструктура, пористость, поры, поровое пространство, микроструктурная классификация.

DOI: 10.31857/S1028096020040081

ВВЕДЕНИЕ

При оценке запасов углеводородов и разработке способов их извлечения в карбонатных пластах, характеризующихся очень сложным строением порового пространства, большое значение имеют микроструктурные особенности коллектора [1–3]. Это связано с тем, что характер разработки залежей, а также состояние начальных и остаточных запасов углеводородов в большей степени определяются структурой порового пространства пород, слагающих эту залежь. Поровое пространство также в значительной степени определяет возможное распределение остаточных запасов углеводородов в истощенных залежах на поздних этапах разработки [4].

Основным оценочным параметром емкости пород в геолого-промысловой практике является значение открытой пористости, которая характеризует сообщающийся объем открытых поровых каналов. В сложных карбонатных коллекторах требуется более детальная характеристика, так как в них особенно возрастает роль морфологии и размерных градаций поровых каналов на изменения гидродинамических, физико-химических и термодинамических условий в процессе разработки пластов. Ранее проведенные исследования пород из различных нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождениях (Оренбургское НГКМ,

Карачаганакское НГКМ, нефтяное месторождение Тенгиз, Димитровское ГНМ) позволили применить сеточную модель для расчета размерных и фильтрационных параметров порового пространства на основе электронно-микроскопических исследований. Микроструктурные параметры емкостного пространства определяют тип порового пространства и влияют на углеводородоотдачу при разработке месторождений. Было установлено, что в карбонатных коллекторах отношение среднего значения диаметра пор к диаметру соединяющих микрокапиллярных каналов в большей степени определяет величину структурно-защемленных газонасыщенных объемов в газоконденсатной части нефтегазоконденсатных месторождений. Этот параметр также оказывает существенное влияние на количество структурно-защемленных нефтенасыщенных объемов в нефтяных оторочках и подгазовых нефтяных залежах. В связи с этим, изучение порового пространства и микростроения карбонатных коллекторов с использованием современной электронной микроскопии является актуальной задачей.

МЕТОДИКА

В работе для исследования микростроения и порового пространства пород применялся автоэмиссионный растровый электронный микро-

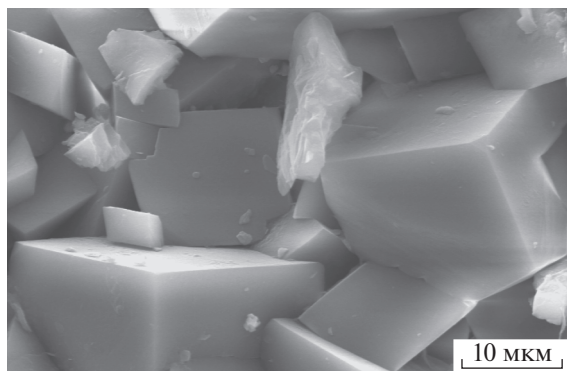


Рис. 1. Аутигенный доломит образованный в процессе доломитизации. Димитровское ГНМ. (РЭМ). Известняк биогермный водорослевый доломитизированный перекристаллизованный.

скоп (РЭМ) Carl Zeiss NVision 40 с пространственным разрешением 1.1 нм при 20 кВ. Микроскоп оснащен микрозондовым анализатором Oxford Instruments X-MAX и имеет электронно-оптическую колонну GEMINI третьего поколения, которая позволяет проводить анализ микроструктуры с увеличением до 900000×.

Анализ микростроения проводился на основе исследования поверхности сколов образцов и аншлифов, приготовленных из выбуренных кернов пород.

Поровое пространство изучалось по специально разработанной методике, основанной на катодоллюминесценции в РЭМ [5–9]. Катодоллюминесцентный метод изучения порового пространства пород, имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими косвенными методами оценки структуры порового пространства, поскольку помимо количественных данных позволяет анализировать форму пор и поровых каналов с применением компьютерного анализа. В настоящее время применяемая методика, в сочетании с компьютерным анализом получаемых в РЭМ изображений, по-видимому, является единственным прямым количественным способом с разрешением менее одного микрона. Существующие томографические приставки в электронных микроскопах уступают этому методу по распознаваемости пор и минимальному фиксируемому размеру (разрешающей способности). Применяемая методика изучения структуры порового пространства пород дает возможность на основе программного анализа катодоллюминесцентных изображений получать количественные данные размеров пор и поровых каналов, а также рассчитывать параметры узла сеточной модели на основе прямых измерений сечений пор и каналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе объектом исследования в электронном микроскопе были карбонатные отложения артинского яруса нижнепермских отложений (P₁art) Димитровского газоконденсатно-нефтяного месторождения (ДГНМ), расположенного на территории Дагестана. Керна для исследования был отобран из интервала глубин 2567.63–2603.3 м одной из скважин месторождения. Породы отложений сложены преимущественно биогермными, водорослевыми и комковато сгустковыми известняками. В средней части интервала с глубины 2587.0 м также появляются тонко-микрозернистые доломитизированные разновидности известняков, которые в нижней части интервала чередуются с доломитами.

Микроскопическое изучение пород показало наличие вторичных изменений в породах, влияющих на формирование порового пространства. Наиболее распространена перекристаллизация с укрупнением кристаллов. В некоторых образцах порода полностью перекристаллизована до грануляции органических остатков и образованием комков. Наблюдается умеренное развитие процесса доломитизации (рис. 1), а также кальцитизации, преимущественно по межводорослевому пространству с образованием кристаллов вторичного кальцита тонко-мелкозернистой структуры. В породах часто встречаются кальцитовые сгустки и комки, образованные в результате преобразования водорослей. В небольшом количестве в порах встречается гидрослюда (рис. 2). В изученных породах имеются образцы с достаточно развитой поровой системой, однако преобладают плотные породы с единичными и в виде небольших скоплений-очагов порами, и микротрещинами (рис. 3). Очаги формируются непосредственно в очень плотной непроницаемой матрице и не могут быть результатом растворения отдельных зерен. По морфологическим признакам и характеру распределения в матрице породы эти поры наиболее вероятно являются результатом очагового развития за счет преобразования первичного карбонатно-органического полимерного вещества, согласно новым представлениям формирования карбонатного осадка (Дмитриевский А.Н., Скибицкая Н.А. и др.) [10, 11]. В плотных породах поровое пространство представляет собой относительно малосвязанную структуру из единичных пор и микроочаговых скоплений в плотной матрице, проницаемость которой обеспечивается в основном системой относительно небольшого числа поровых каналов (2–5 мкм) простой конфигурации. В пористых породах, которые присутствуют в разрезе, очаги пор распределены на микроуровне достаточно равномерно.

Описанные процессы влияют на формирование разных типов порового пространства, кото-

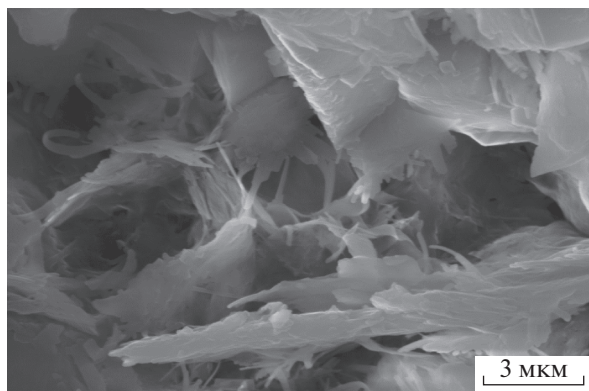


Рис. 2. Гидрослюда в порах известняка. Димитровское ГНМ (РЭМ).

рые определяют свойства коллектора. В литературе имеется микроструктурная классификация типов порового пространства, в которой дана сравнительная оценка возможной углеводородотдачи пород-коллекторов нефти и газа через коэффициент остаточной газонасыщенности $K_{го}$ при прямоточной капиллярной пропитке породы [12, 13].

В основе предложенной классификации (табл. 1) лежат микроструктурные параметры строения емкостной системы коллектора: размерный параметр $\rho_{пк}$ — отношение среднего диаметра пор к среднему диаметру поровых каналов и $\beta_{кч}$ — координационное число капиллярной поровой системы (пространственный параметр).

Для определения типа порового пространства в исследуемых породах был выполнен количественный анализ по катодолуминесцентным РЭМ-изображениям и получены микроструктурные параметры порового пространства образцов (табл. 2).

На основе полученных данных и микроструктурной классификации, в изучаемом интервале

артинского яруса нижнепермских отложений были выделены следующие типы микростроения карбонатной матрицы породы:

1. Канально-поровая карбонатная матрица. Открытая пористость $K_{п.о} > 6\%$.
2. Порово-канальная карбонатная матрица. Открытая пористость $K_{п.о} 3-6\%$.
3. Низкопористая канально-поровая карбонатная матрица. Открытая пористость $K_{п.о} < 3\%$.
4. Низкопористая микротрещиноватая карбонатная матрица. Открытая пористость $K_{п.о} < 3\%$.

В качестве примера различий микростроения пород с различным типом порового пространства на рис. 4 приведены их электронно-микроскопические изображения.

Исследования показали, что изучаемые породы различаются не только по микроструктурным параметрам, но и морфологически, что хорошо видно на катодолуминесцентных РЭМ изображениях порового пространства различного типа (рис. 5).

В исследуемых отложениях породы с различным типом порового пространства встречаются по всему разрезу скважины, но с учетом преобладающего типа можно выделить четыре интервала с разными микроструктурными особенностями карбонатной матрицы.

1. Породы с канально-поровой матрицей (2567.63–2573.88 м).
2. Породы с порово-канальной матрицей (2573.88–2579.4 м).
3. Породы с низкопористой порово-канальной матрицей (2579.4–2585.61 м).
4. Низкопористая микротрещиноватая матрица (2585.61–2603.3 м).

Интервалы характеризуются следующими особенностями микростроения.

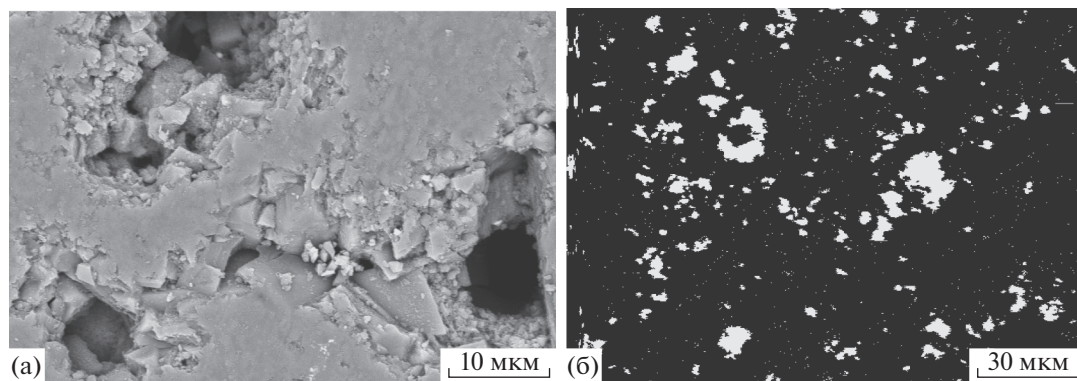


Рис. 3. Развитие очаговой пористости в известняке. Димитровское ГНМ: а — вторично-электронное изображение аншлифа в РЭМ; б — катодолуминесцентное РЭМ-изображение порового пространства.

Таблица 1. Микроструктурная классификация (Кузьмин В.А., Скибицкая Н.А., 2018 г.) [13]

Микроструктурный класс коллектора	Тип порового пространства	Характеристика	Координационное число $\beta_{кч} = N_{кан}/N_{пор}$	Отношение среднего диаметра пор к среднему диаметру каналов, $\rho_{пк} = d_n/d_k$	Коэффициент структурно-защемленной газонасыщенности (нефтенасыщенности) $K_{го} (K_{но}), \%$
1	Канальный тип	Существенно преобладают каналы, а поры отсутствуют, либо присутствуют как единичные включения	>10	1–10	5–15
2	Порово-канальный	Преобладают протяженные каналы, а количество пор меньше чем каналов	3–10	10–20	15–30
3	Канально-поровый	Преобладают поры, а соединяющие их каналы по длине соизмеримы с размерами этих пор	2–3	>20	>30
4	Порово-контактный	Существенно преобладают поры, контактирующие друг с другом; каналы, соединяющие поры, отсутствуют	–	–	30–60

Таблица 2. Структурные параметры порового пространства образцов определенные способом катодолуминесценции в электронном микроскопе

№ образца	Глубина отбора, м	Проницаемость пор, 10^{-15} м^2	Координационное число $\beta_{кч} = N_{кан}/N_{пор}$	Средний диаметр каналов, $d_{кан}$, мкм	Средний диаметр пор, $d_{пор}$, мкм	Среднее отношение $\rho_{пк} = d_{пор}/d_{кан}$
1/5	2567.63	0.017	2.31	1.66	8.9	5.36
1/12	2569.98	0.0003	2.01	1.9	11.49	6.05
1/14	2570.18	0.0239	2.7	1.66	4.21	2.54
1/15	2571.21	0.0032	3	1.96	22.65	11.56
1/27	2573.88	0.0006	2.01	1.89	7.52	3.98
1/66	2576.45	0.009	2	3.76	11.72	3.12
1/83	2576.98	0.0005	2.01	1.8	6.86	3.81
1/84	2577.42	0.0001	2.01	1.64	9.41	5.74
1/98	2579.4	0.002	24.61	5.34	34.76	6.5
1/103	2581.37	0.0051	2	1.66	3.25	1.96
1/112(1)	2581.74	0.012	4.12	2.39	14.23	5.95
1/119(2)	2583.17	0.0023	4	2.66	3.2	1.2
1/125	2584.39	0.012	4.12	2.37	14.12	5.96
1/131	2585.61	0.0014	2.27	2.13	19.16	9
1/179(1)	2593.9	0.0013	3	2.77	8.5	3.07
1/182	2594.82	0.0149	2.83	1.66	9.15	5.51
1/222	2599.55	0.0006	2.01	1.66	7.67	4.62
1/223	2600.15	0.0063	2.45	1.66	16.2	9.76
1/225	2603.3	0.0067	3.35	1.77	4.9	2.77

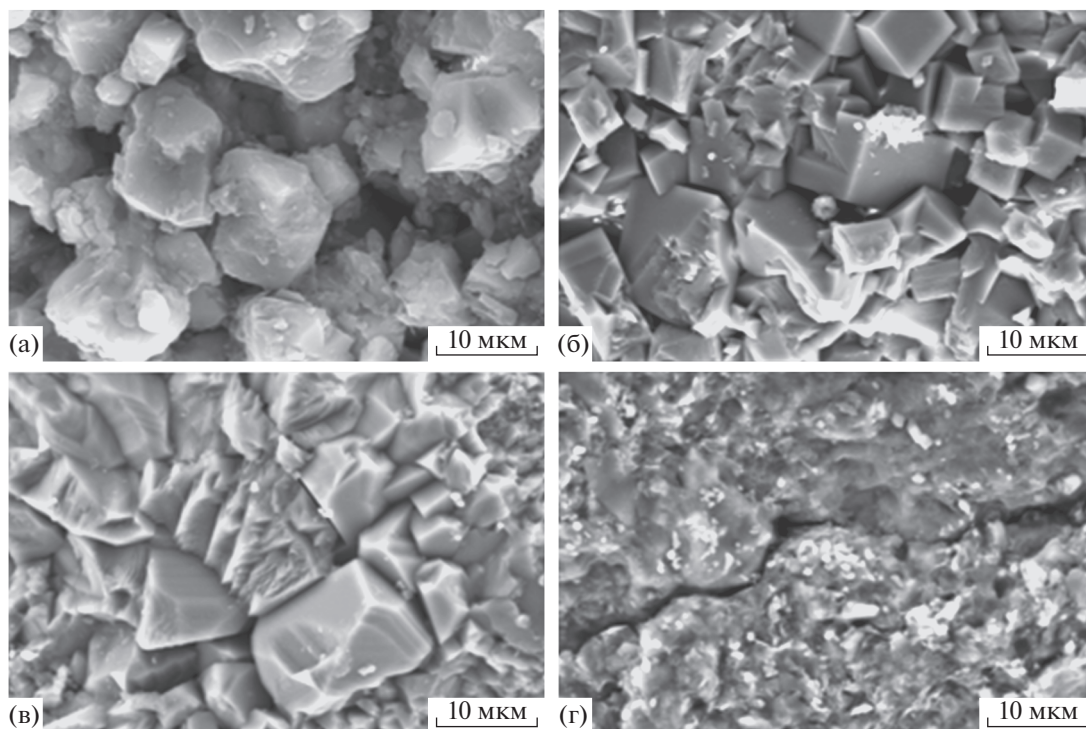


Рис. 4. Известняки с различным типом порового пространства. Димитровское НГМ (РЭМ). Поверхности сколов образцов: а – порово-канальная карбонатная матрица; б – канално-поровая карбонатная матрица; в – низкопористая порово-канальная карбонатная матрица; г – низкопористая микротрещиноватая карбонатная матрица.

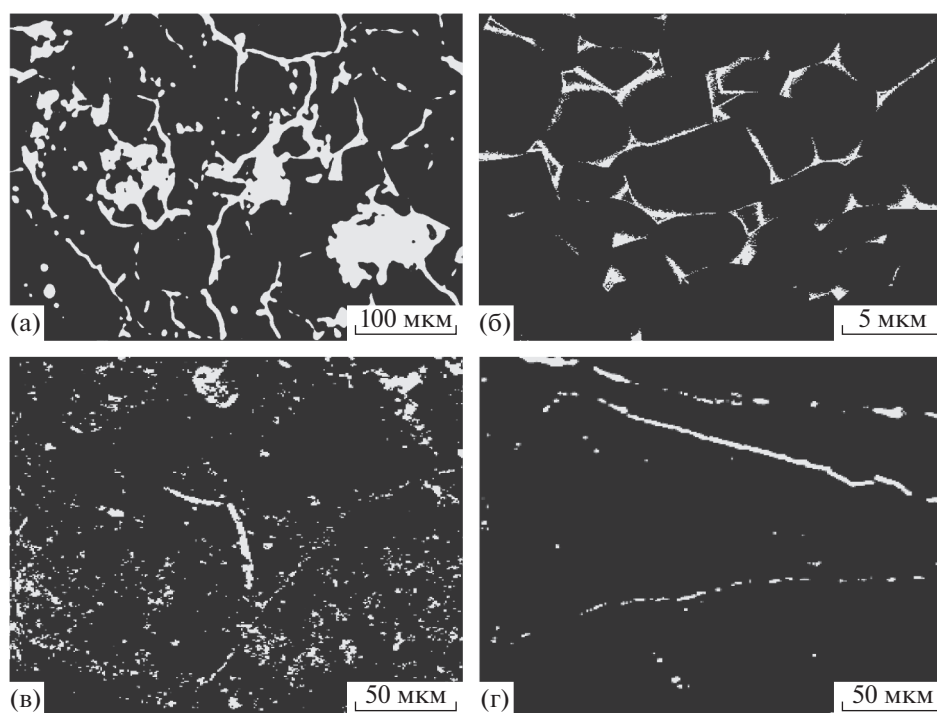


Рис. 5. Катодолуминесцентные изображения порового пространства различного типа. Димитровское НГМ: а – канално-поровая карбонатная матрица; б – порово-канальная карбонатная матрица; в – низкопористая порово-канальная карбонатная матрица; г – низкопористая микротрещиноватая карбонатная матрица.

1. Породы с канално-поровой матрицей

В породах этого типа пустотное пространство представляет собой поры-емкости, соединенные более узкими протяженными каналами, связывающих поровые объемы. Эти породы имеют открытую пористость от 7.5 до 12%, а их проницаемость колеблется от 0.06 до 0.2 мД. Средний размер пор в них составляет 13.93 мкм, а каналов — 2.47 мкм. При этом координационное число в среднем равно 6.6, т.е. имеется значительный объем пор, за счет которых осуществляется существенная доля фильтрации. Среднее отношение $\rho_{пк} = d_{пор}/d_{кан}$ составляет 5.27. Поры распределены в объеме на микроуровне относительно равномерно или в виде очагов с небольшим снижением плотности пор в промежуточных зонах.

2. Породы с порово-канальной матрицей

К ним относятся породы, имеющие в карбонатной матрице развитую систему проницаемых каналов с небольшой долей пор в виде отдельных очаговых скоплений, размером несколько десятков микрон. По количеству преобладают каналы, которые по длине соизмеримы с размерами этих пор. Открытая пористость колеблется в пределах 2.9—4.14%, а проницаемость составляет 0.05—0.12 мД, которая обеспечивается преимущественно каналами. Средний размер фильтрующих пор в породах этого интервала меньше, чем в породах с канално-поровой пористой матрицей и составляет 8.87 мкм. Размер каналов в среднем составляет 2.01 мкм, т.е. несколько меньший, чем в пористой матрице. Координационное число в породах этого типа в среднем 3.2, что означает упрощение капиллярной системы и уменьшение количества пор в узлах. Такая поровая система имеет преимущественно каналную систему фильтрации, с небольшой долей участия пор, т.е. преобладают поровые каналы, а емкостная система является более благоприятной с точки зрения полноты вытеснения углеводородов по сравнению с предыдущим типом.

3. Породы с низкопористой порово-канальной матрицей

Открытая пористость в этих породах составляет 0.6—2.87%, а проницаемость 0.07—0.1 мД, т.е. фильтрационная характеристика относительно высокая для такой плотной породы. Имеющаяся проницаемость в таких породах связана с небольшим количеством достаточно проницаемых каналов относительно простой геометрии. Координационное число в них имеет значение 2.6, т.е. пустотное пространство представляет собой в основном поровые каналы. Именно поэтому они близки по проницаемости к породам с низкопористой порово-канальной матрицей. Диаметры

каналов в них составляют в среднем 1.94 мкм, а пор 6.27 мкм, которые фактически являются локальными расширениями каналов.

4. Низкопористая микротрещиноватая матрица

В этих породах имеется плотная, возможно субкапиллярнопоровая, матрица и микротрещины, раскрытость которых в основном очень небольшая (3—10 мкм). Трещины короткие и не связаны в единую фильтрационную систему. Проницаемость обеспечивается преимущественно отдельными капиллярными и, по-видимому, крупными субкапиллярными каналами. Координационное число без учета микротрещин составляет 2.1, т.е. фильтрация осуществляется практически полностью поровыми каналами, средний диаметр которых составляет 2314 мкм. Этот тип пород близок к предыдущему по фильтрационно-емкостным характеристикам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В изученных породах артинских отложений Димитровского ГНМ наблюдается чередование пород с различными типами порового пространства — от структуры с развитой системой канал-пора, сравнительно высоким координационным числом и большими значениями отношения $\beta_{кч} = d_{пор}/d_{кан}$ в пористых породах до плотных пород (которые преобладают) с единичными “сквозными” поровыми каналами простой конфигурации. Плотные породы преимущественно имеют координационное число близкое к 2, характерное для канального строения порового пространства.

В породах наблюдается большая изменчивость по пористости и плотности матрицы. В пористых разностях капиллярное поровое пространство формируется за счет микроочаговых скоплений в матрице и представляет собой преимущественно связанную сетчатую структуру из элементов канал-пора, а в плотных породах преимущественно из единичных поровых каналов и зарождающихся микроочагов пор.

Анализ порового пространства позволяет сделать вывод о закономерном улучшении добычных характеристик в породах с низкопористой порово-канальной матрицей в интервале 2579.4—2585.61 м изучаемой скважины. В плотных породах этого интервала проницаемость хотя и ухудшается, однако это снижение не пропорционально снижению пористости. Причина заключается в особенностях строения порового пространства. В плотных породах появляются сквозные поровые каналы простой конфигурации с относительно большими диаметрами, компенсирующие уменьшение проницаемости, за счет снижения пористости.

В нижнем интервале артинских отложений в породах развита матричная, дискретная, не связанная в единую фильтрационную систему микротрещиноватость, которая практически не влияет на проницаемость.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья подготовлена сотрудником ИПНГ РАН в рамках выполнения государственного задания по темам “Прогноз состояния ресурсной базы нефтегазового комплекса России на основе системных исследований перспектив нефтегазоносности природных резервуаров в карбонатных, терригенных и сланцевых формациях”, № АААА-А19-119030690047-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сургучев М.Л., Симкин Э.М. // Нефтяное хозяйство. 1988. № 9. С. 31.
2. Мархасин И.Л. Физико-химическая механика нефтяного пласта. М.: Недра, 1977. 214 с.
3. Абасов М.Т., Кулиев А.М. Методы гидродинамических расчетов разработки многопластовых месторождений нефти и газа. Баку: ЭЛМ, 1976. 200 с.
4. Kuz'min V.A., Mikhailov N.N., Skibitskaya N.A. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron and Neutron Tech., 2013. V. 7. № 5. P. 907.
5. Гоулдстейн Дж., Яковица Х. Практическая растровая электронная микроскопия. М.: Мир, 1978. 657 с.
6. Kuz'min V.A. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron and Neutron Tech. 2007. V. 1. № 6. P. 687.
7. Кузьмин В.А., Соколов В.Н. Использование компьютерного анализа РЭМ-изображений для оценки емкостных и фильтрационных свойств пород – коллекторов нефти и газа // Тез. докл. VIII Симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. РЭМ-93. Черноголовка, 1993. С. 45.
8. Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В., Мельник В.Н. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 1998. № 1. С. 33.
9. Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В., Мельник В.Н. // Известия Акад. Наук. Сер. физ. 1999. Т. 63. № 7. С. 1328.
10. Дмитриевский А.Н., Скибицкая Н.А., Яковлева О.П. Матричная нефть – дополнительный сырьевой ресурс нефтегазоконденсатных месторождений / Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. Теоретические и прикладные аспекты // Тез. докл. Всероссийской конференции. М.: ГЕОС, 2007. С. 80.
11. Дмитриевский А.Н., Скибицкая Н.А., Вульфсон А.Н., Зекель Л.А., Прибылов А.А. // Журн. физ. хим. 2007. Т. 81. № 5. С. 1.
12. Кузьмин В.А., Скибицкая Н.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 11. С. 105.
13. Кузьмин В.А., Скибицкая Н.А. // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 3(22). <http://oilgas-jour>.

Electron-Microscopic Study of Pore Space of Carbonate Rocks-Collectors of Oil and Gas

V. A. Kuzmin*

Institute of Oil and Gas Problems of RAS, Moscow, 119333 Russia

**e-mail: kuzminva@mail.ru*

The work describes the procedure of determination of microstructural types of pore space of carbonate rocks on the example of Dimitrovsk gas condensate-oil deposit. In order to study the features of the micro-structure, the NVision 40 (Carl Zeiss Company) raster electron microscope (REM) was used, using which the surface of the chips of samples and anshlifes prepared from drilled core rocks was studied. As a result of the research, rocks with different types of pore space were identified.

Keywords: electron microscope, pore space, cathodoluminescent method, limestone, microstructure, porosity, pores, pore space, microstructural classification.