

УДК 537.533.35:621.382

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕФТЕНАСЫЩЕННЫХ ПОРОД В РЭМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2021 г. В. А. Кузьмин*

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, 119333 Россия

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

Поступила в редакцию 07.07.2020 г.

После доработки 18.09.2020 г.

Принята к публикации 28.09.2020 г.

Показаны методика и результаты микроструктурных исследований в растровом электронном микроскопе образцов карбонатных пород натурной фильтрационной модели одного из пластов нефтегазоконденсатного месторождения. На основе проведенных исследований дан сравнительный анализ параметров порового пространства в образцах и показана эффективность анализируемой керновой модели с точки зрения минимизации фильтрационных “скачков” на контактах образцов.

Ключевые слова: растровый электронный микроскоп, керновая модель, фильтрация, катодолуминесценция, породы, поровое пространство, цифровая модель керна.

DOI: 10.31857/S1028096021050125

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проблема более эффективной разработки нефтяных и газовых месторождений приобрела еще большую актуальность в связи с увеличением количества залежей с трудноизвлекаемыми запасами, в частности, с карбонатными коллекторами, отличающимися повышенной неоднородностью.

Эффективность добычи на месторождениях зависит от многих причин, в том числе от правильного выбора метода разработки. При отработке технологий проводят моделирование пластовых процессов по вытеснению углеводородов с конкретными рабочими агентами на реальном керновом материале. Отбор представительного керна, на основе которого формируют модель пласта, осуществляется с учетом петрофизических и литологических особенностей моделируемого пласта. Недостатком такой относительно разнородной для порового пространства модели является резкая фильтрационная неоднородность контактов образцов. Фильтрационные эффекты в породах исследованы многими авторами, однако детально влияние особенностей строения порового пространства изучено недостаточно [1–5].

Как правило, при формировании пластовых керновых моделей для натуральных экспериментов по фильтрации микроструктурные особенности порового пространства не учитывают. В настоящей работе на примере пород Вуктыльского нефтегазоконденсатного месторождения (ВНГМ) по-

казана методика учета микроструктурных особенностей порового пространства для минимизации нежелательных фильтрационных эффектов во время экспериментов по моделированию. Для этого образцы керна, отобранные для модели с учетом литологических и петрофизических характеристик, были изучены в электронном микроскопе, и на основании полученных данных разнородных и пространственных параметров порового пространства было проведено их сопоставление. Проводили математическое моделирование на основе “цифрового керна” (E-Core technology, Virtual/digital core laboratory, Digital rock physics) [7–9]. Основу подхода к виртуальному керну составили детальная характеристика геометрии порового пространства породы и математическое моделирование физики исследуемого процесса.

МЕТОДИКА

Для детального анализа особенностей порового пространства пород были применены прямые количественные методы определения размеров пор на основе интегральной катодолуминесценции [10]. Был использован растровый электронный микроскоп (РЭМ) SUPRA 50 VP (фирма Карл Цейс) с разрешением 1.0 нм, оборудованный энергодисперсионным спектрометром INCA Endergy (фирма Oxford Instruments) для анализа элементного состава. Для проведения сравнительного анализа модели, составленной из разных образцов, были применены электронно-

Таблица 1. Основные петрофизические характеристики исследованных образцов

№ образца	Длина, см	Абсолютная проницаемость, мД	Открытая пористость, %
1	4.0	269.18	19.2
2	4.5	226.78	17.7
3	5.5	195.94	18.8
4	6.0	168.95	17.4
5	3.0	168.11	17.8
6	3.0	122.15	16.9

микроскопические методы исследования, позволяющие в режиме детектирования вторичных электронов и катодолюминесценции детально исследовать микростроение прямым методом и получить на основе статистических подсчетов микроструктурные параметры порового пространства. С помощью рентгеновского микроанализатора, встроенного в микроскоп, был изучен минеральный состав породообразующих компонентов образцов модели.

Для определения средних значений микроструктурных параметров емкостного пространства применяли специально разработанные алгоритмы программного анализа статистических данных по РЭМ-изображениям [11]. Алгоритмы создавали на основе сеточной модели порового пространства с элементами канал–пора. По данным электронно-микроскопических измерений были рассчитаны усредненные значения важнейших параметров емкостного пространства, влияющих на коэффициент извлечения углеводородов при разработке месторождения, – отношение среднего диаметра пор к среднему диаметру каналов $\alpha = d_{\text{пор}}/d_{\text{кан}}$ и координационное число сеточной модели емкостного пространства $\beta_{\text{кч}} = N_{\text{кан}}/N_{\text{пор}}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе объектом исследования были образцы известняков одной из скважин ВНГМ в количестве шести штук, которые на основании литологических и петрофизических характеристик были отобраны для керновой модели пласта. Модель была предназначена для проведения фильтрационных экспериментов и изучения способов разработки нефтесодержащего пласта. Задачей комплексного исследования микростроения была проверка возможных пороговых эффектов на контактах образцов в керновой модели.

В [12] было детально рассмотрено влияние особенностей порового пространства на пороговые эффекты в низкопроницаемых керновых моделях в местах контакта образцов. Это дало возможность разработать критерии, позволяющие минимизировать пороговые эффекты, возникающие на контактах образцов в модели. Было показано, что наиболее важными микроструктурными

характеристиками, влияющими на неоднородность, являются усредненная величина отношения диаметров пор и каналов $d_{\text{пор}}/d_{\text{кан}}$ и параметр $\beta_{\text{кч}}$ – координационное число, которое определяет строение сетки капилляров и существенно влияет на характер формы кривых относительной фазовой проницаемости. Разработанная методика микроструктурных исследований была использована при анализе эффективности выбранного керна для высокопроницаемой модели пласта (ВМП), для которой образцы были уже отобраны и модель сформирована. При исследовании прежде всего решали задачу анализа степени подобия строения порового пространства в образцах ВМП, которая в высокопроницаемых породах в основном определяется пространственным строением поровой системы, размерными характеристиками пор и каналов, т.е. законом их распределения по размерам. Параметры, определяющие эти характеристики, существенно влияют на фильтрационные и добычные возможности породы и во многом определяют пороговые эффекты, возникающие на контактах образцов модели.

При анализе микростроения всего было исследовано шесть образцов пород: № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6. Общая длина колонки кернов в ВМП составляет 26.36 см. Известно, что абсолютная проницаемость образцов составляет от 122.15 до 269.18 мД, и коэффициент открытой пористости – от 16.9 до 19.2% (табл. 1). Образцы были исследованы в РЭМ. Микростроение изучали на сколах образцов, напыленных золотом. Образцы, согласно исследованиям, представляют собой мелкозернистые доломитизированные известняки с мелкими и средними по размеру порами.

На рис. 1 приведены электронно-микроскопические изображения образцов модели, на которых видно кристаллическое строение зерен известняков. Для наглядного сопоставления и анализа микростроения образцов модели на рис. 2 приведено схематичное изображение ВМП с использованием РЭМ-изображений, полученных в режиме детектирования вторичных электронов.

Результаты электронно-микроскопических исследований и рентгеновского микронзондового анализа показали, что все образцы ВМП являются карбонатными разновидностями известняков

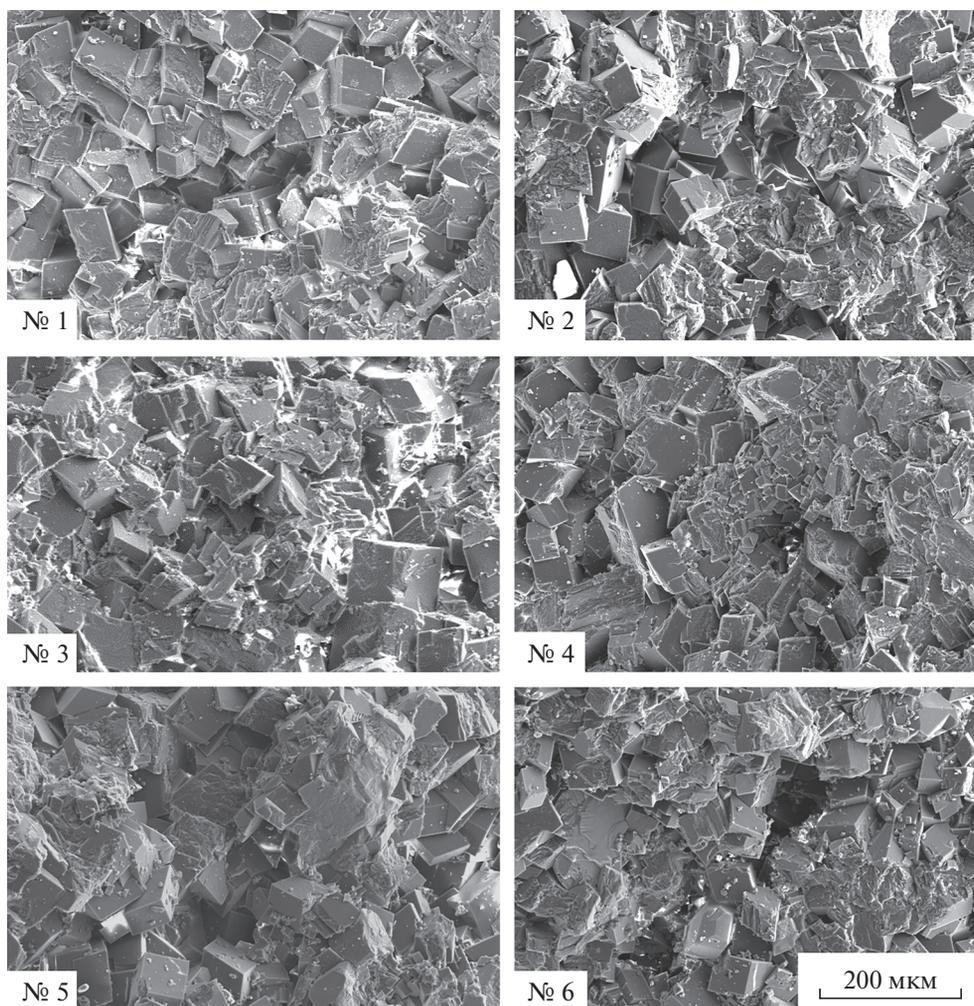


Рис. 1. Микрокристаллическое строение образцов известняка в модели для фильтрационных экспериментов: № 1 – мелкозернистый, доломитизированный, мелкопористый; № 2 – мелкозернистый, доломитизированный; № 3 – мелкозернистый, доломитизированный, с нечеткой органогенной структурой; № 4 – мелкозернистый доломитизированный; № 5 – мелкозернистый, доломитизированный; № 6 – мелкозернистый, доломитизированный.

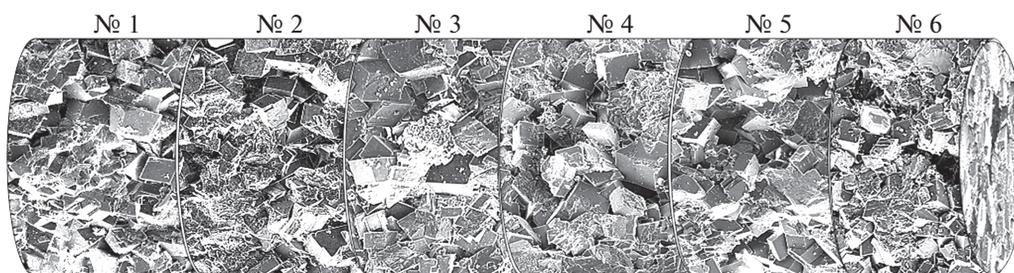


Рис. 2. Изменение микростроения модели на основе электронно-микроскопических изображений при электронном увеличении 300х.

доломитизированных. Породы во всех образцах мелкозернистые, т.е. размер их зерен в основном менее 100 мкм. Составы пород также очень схожи. Породы главным образом состоят из кальцита и вторичного перекристаллизованного доломита,

иногда с незначительным количеством нанобразований глинистых магнезиальных силикатов, преимущественно удлиненно-пластинчатой волокнистой гидрослюдой (рис. 3). Количество глинистого компонента незначительно – доли

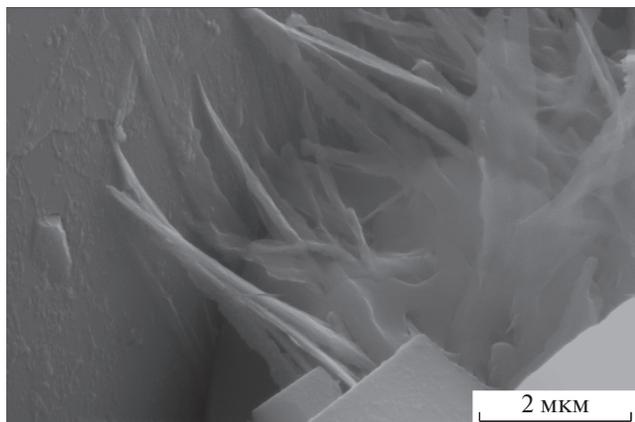


Рис. 3. Образец № 4: удлиненно-пластинчатая гидрофлюора в порах.

процента, и оно не оказывает существенного влияния на фильтрационно-емкостные свойства. Также в породе встречаются микроскопические образования органического вещества в виде частиц с повышенным содержанием углерода.

Проведенные микрозондовые рентгеноструктурные исследования минерального состава карбонатной матрицы по всем образцам указывают на карбонатный состав всех образцов. Преобла-

дает кальцит и идиоморфные кристаллы доломита в виде ромбоэдров, что свидетельствует об их вторичном происхождении и интенсивных вторичных процессах, прошедших в породе, которые способствовали развитию пористости. На рис. 4 в качестве примера показаны результаты анализа минерального состава образца № 4, приведены РЭМ-изображения анализируемого участка, полученные в режиме детектирования вторичных электронов, рентгеновские энергетические спектры породообразующих кристаллов кальцита и доломита, и в табл. 2 – данные элементного состава.

Такие исследования были проведены для каждого образца. Было установлено, что химический состав и микростроение образцов пород (размеры слагающих породу зерен) очень близки. Все породы состоят главным образом из кальцита и вторичного перекристаллизованного доломита в основном ромбоэдрической формы с преимущественным размером кристаллов 100–130 мкм. Кристаллы вторичного кальцита имеют четко выраженную индивидуальность, но встречаются редко и составляют не более 1–2%. Среди них преобладают кристаллы, которые отличаются хорошо развитыми гранями скаленоэдра. Иногда встречаются кристаллы призматического габитуса, которые характеризуются развитыми плоскостями гексагональной призмы. Основная породообразующая матрица представляет собой реликто-

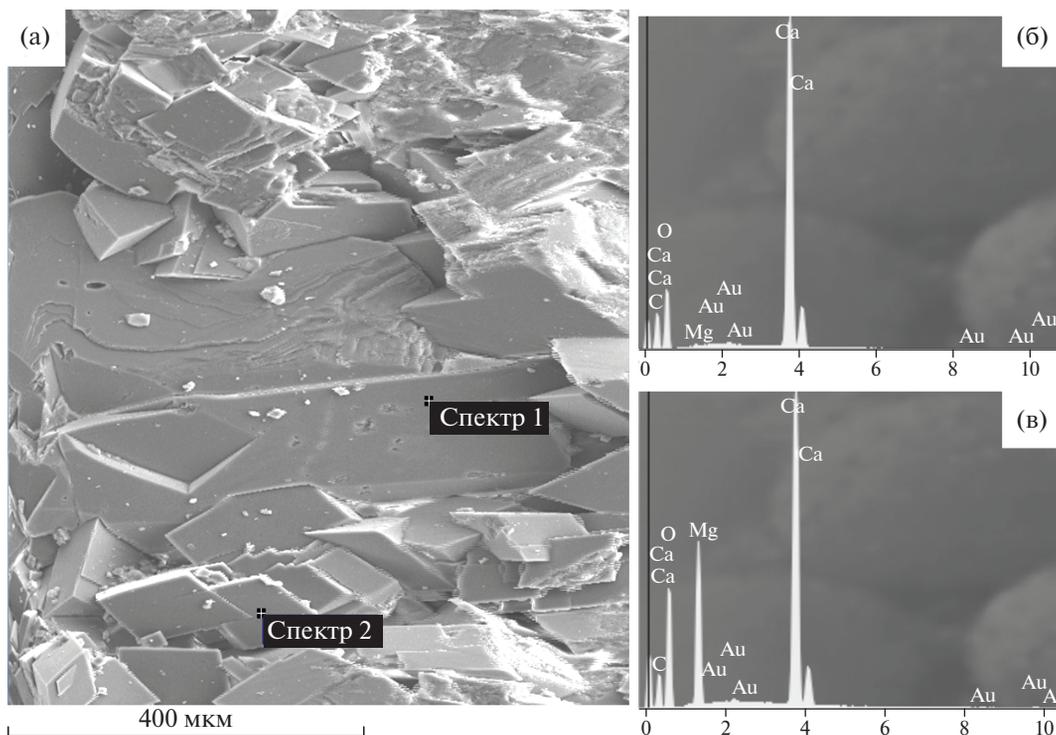


Рис. 4. Микрозондовое исследование образца № 3: а – РЭМ-изображение аутигенного кальцита и доломита, полученное в режиме детектирования вторичных электронов; рентгеновский энергетический спектр: б – кальцита (спектр 1); в – доломита (спектр 2).

вый кальцит с кристаллами призматической и изометрической формы, в которой присутствует вторичный аутигенный доломит, размер и форма которого показана на рис. 5.

Таким образом, можно констатировать, что породы во всех образцах модели относятся к известнякам доломитизированным. Участки с перекристаллизованным доломитом имеют идиоморфнозернистую структуру. Зерна представлены хорошо оформленными ромбоэдрическими разноориентированными кристаллами с гладкой поверхностью размером до 100 мкм. Вероятно, образование высокой пористости этих пород происходило в результате доломитизации и перекристаллизации исходной породы, что способствовало формированию вторичной очаговой пористости. Как результат, в исследованных образцах существует хорошо связанная система относительно крупных межзерновых поровых каналов, способная обеспечить хорошую фильтрацию, что подтверждает высокая проницаемость образцов.

Таблица 2. Данные рентгеновского микроанализа (мас. %)

Спектр	С	О	Mg	Ca
Спектр 1	22.70	53.73	0.15	23.42
Спектр 2	20.84	55.30	9.06	14.80

АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ОБРАЗЦОВ МОДЕЛИ

Ранее в [12] были установлены критерии подбора образцов с учетом микроструктурных особенностей порового пространства. Было показано, что чем ближе значения этих микроструктурных параметров образцов, тем меньше будет пороговый скачок фильтрационных свойств собранной модели. В случае высокопроницаемых образцов помимо этих параметров необходимо, чтобы законы распределения пор по размерам во всех образцах ВМП были одинаковыми или схо-

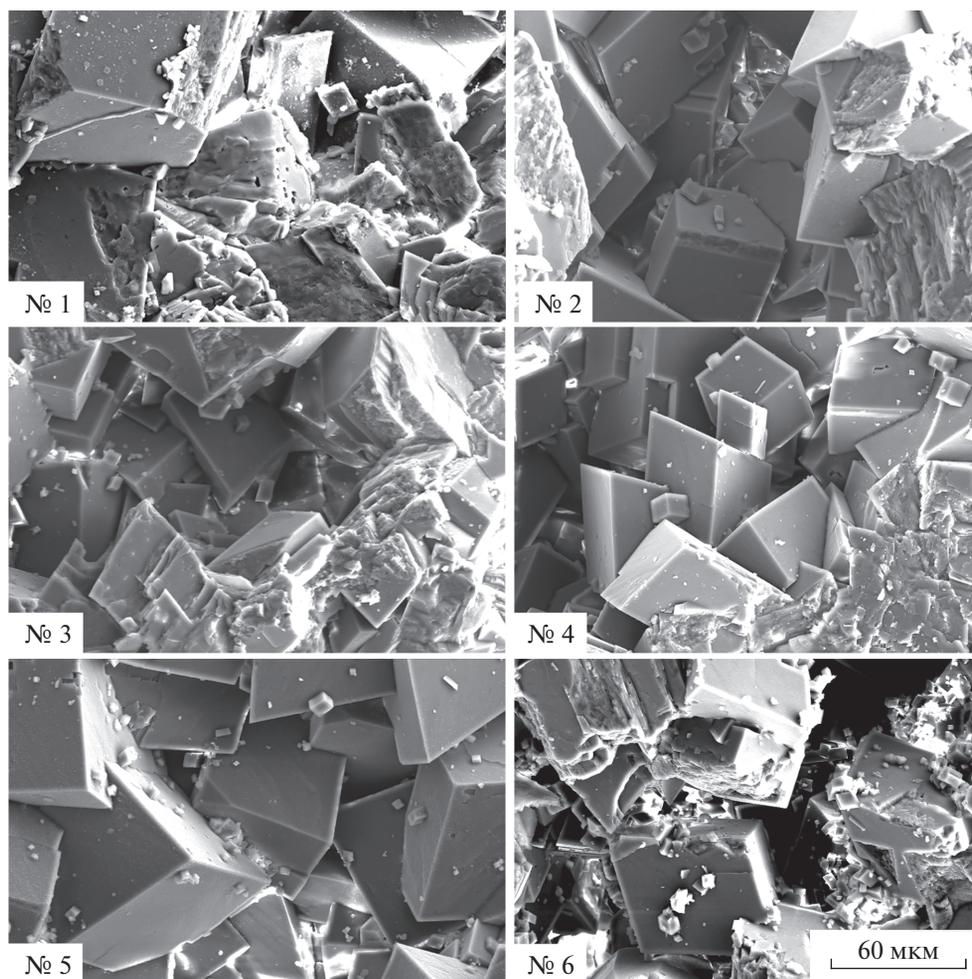


Рис. 5. Доломитизированные участки в образцах модели (вторичный аутигенный доломит).

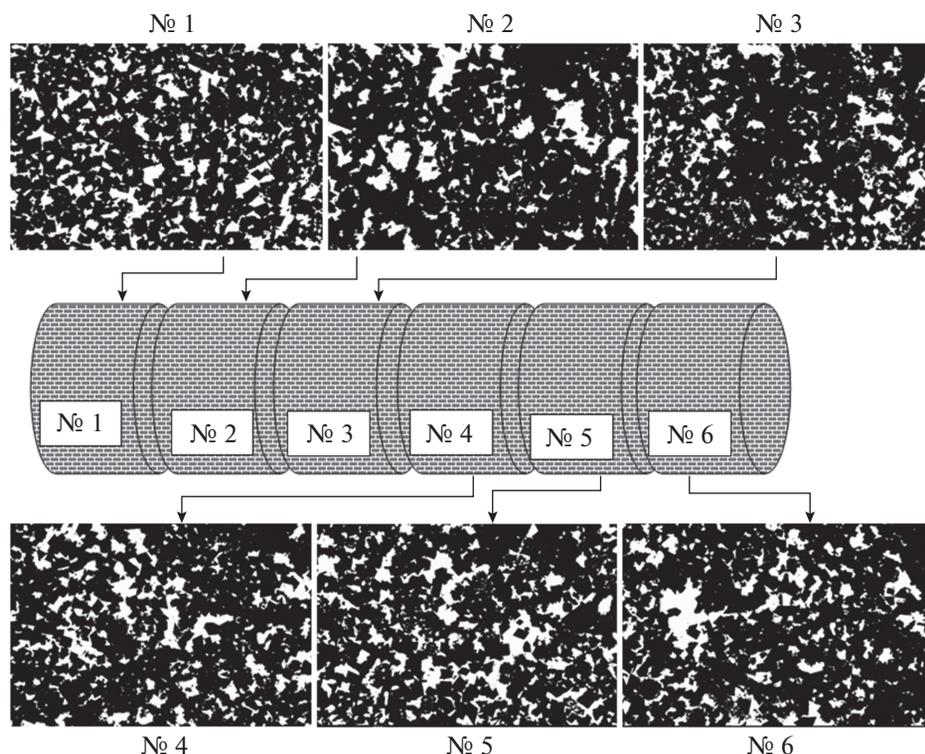


Рис. 6. Структура порового пространства в образцах модели для фильтрационных экспериментов (катодоллюминесцентный метод, электронное увеличение 100×).

жими. Литолого-петрофизические характеристики также должны учитываться. С учетом этого было вычислено допустимое значение $d_{\text{пор}}/d_{\text{кан}} = 3$ для образцов модели, которое было определено как максимальное граничное значение этого параметра для объединения образцов в группы при составлении модели. В случае высокопроницаемых пород эта величина будет еще меньше. Поэтому ее можно применить и как граничное значение для образцов ВМП, при котором величина $d_{\text{пор}}/d_{\text{кан}}$ не должна различаться более чем на три единицы. Аналогично, координационное число не должно превышать три–четыре единицы. Для сопоставления распределения пор по размерам в образцах были построены гистограммы (рис. 6).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА МЕТОДОМ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В РАСТРОВОМ ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ

В ходе исследований в РЭМ микростроения образцов ВМП было установлено, что поровая система во всех образцах образована в результате диагенетической перекристаллизации, доломитизации-перекристаллизации и благоприятна для фильтрации. Поры и каналы представляют собой промежутки угловатой формы между гра-

нями кристаллов кальцита и доломита, составляющими основную массу породы. Визуализация порового пространства в образцах модели с помощью катодоллюминесцентной методики (рис. 6) показала, что поры распределены в объеме образцов относительно равномерно. Это благоприятный фактор для применения отобранных образцов в модели, несмотря на то что имеются некоторые различия плотности распределения в образцах.

Для количественного сопоставления структурных параметров электронно-микроскопические катодоллюминесцентные изображения порового пространства были обработаны специальной компьютерной программой для подсчета микроструктурных параметров “цифрового ядра” [8]. Основные результаты количественного анализа параметров порового пространства по шести образцам ВМП сведены в табл. 3. Как видно из таблицы, во всех образцах ВМП координационное число изменяется в пределах от минимального значения 4.34 в образце № 2 до максимального 4.74 в образце № 3. Разница Δ составляет 0.4 при допустимом значении три–четыре единицы. Среднее отношение диаметра пор и каналов в образцах модели $d_{\text{пор}}/d_{\text{кан}}$ минимально (11.9) в образце № 6 и максимально (14.5) в образце № 5, т.е. $\Delta = 2.6$ при допустимом значении 3.

Таблица 3. Параметры цифровой модели образцов

№ образца	Средний эквивалентный диаметр пор и каналов, мкм	Средний периметр пор и каналов, мкм	Проницаемость (расчетная), Д	Координационное число, $N_{\text{кан}}/N_{\text{пор}}$	Средний диаметр каналов, мкм	Средний диаметр пор, мкм	Среднее отношение $d_{\text{пор}}/d_{\text{кан}}$
1	50.27	159.22	0.235	4.49	6.47	88.27	13.6
2	52.54	171.67	0.220	4.34	6.32	89.67	14.2
3	37.19	111.66	0.195	4.74	4.84	69.52	14.4
4	37.19	111.66	0.165	4.74	4.84	69.52	14.4
5	58.83	199.48	0.180	4.35	7.25	105.09	14.5
6	42.50	154.98	0.127	4.39	6.10	72.50	11.9

Таким образом, анализ этих параметров показывает очень близкие значения координационного числа поровой системы во всех образцах ВМП. Приведенные на рис. 7 гистограммы распределения пор и каналов по размерам имеют вид унимодального и бимодального (близкого к унимодальному) распределения с левой асимметрией, характерной для средне- и высокопроницаемых пород. Гистограммы распределения долевого объема пор по размерам, особенно диапазон фильтрующих пор и каналов, также очень близки. Для сопоставления они размещены на одном графике (рис. 7), из которого видно, что для гистограмм, имеющих унимодальный вид, максимум находится в области 80–200 мкм (образец № 3), 200–400 мкм (образцы № 4, № 5, № 6). В образцах № 1 и № 2 наблюдается слабовыраженное бимодальное распределение с пиками в области 80–200 мкм и дополнительным пиком 400–800 мкм, что связано с небольшим увеличением количества относительно крупных сводовых пор. Это означает, что максимум емкостных объемов находится в диапазоне размеров от 80 до 400 мкм

(в случае унимодального) и от 400 до 800 мкм (в случае бимодального) распределения, т.е. имеются различия. Однако для фильтрации более существенна роль каналов. Из таблицы параметров порового пространства следует, что средний размер каналов колеблется в очень небольших пределах – от 4.85 до 7.25 мкм. Поэтому распределение можно считать однотипными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате электронно-микроскопических исследований было установлено, что для высокопроницаемых образцов модели основными факторами, влияющими на фильтрационный скачок в зонах контактов, так же, как и для моделей с низкопроницаемыми образцами, являются параметры порового пространства – координационное число $\beta_{\text{кч}}$ и величина $d_{\text{пор}}/d_{\text{кан}}$. Помимо этих параметров, на фильтрационную неоднородность (возникновение перепадов давления) оказывает влияние также характер закона распределения пор по размерам. Это связано с тем, что в местах контактов крупные каналы со значительным вкладом в проницаемость могут не совпадать, т.е. прерываться.

Для анализируемой ядерной модели электронно-микроскопические исследования микростроения образцов, проведенные в РЭМ, показали, что по химическому составу, размеру зерен (кристаллитов), а также интенсивности вторичных процессов (доломитизации, перекристаллизации) породы в образцах очень близки. Практически все исследованные образцы карбонатных пород идентичны по микростроению и немного различаются по количеству крупных пор, что отражается в кривых распределения пор по размерам. В целом в структурах порового пространства во всех образцах ВМП наблюдаются очень близкие распределения пор по размерам, а для строения ячейки канал–пора характерно почти одно и

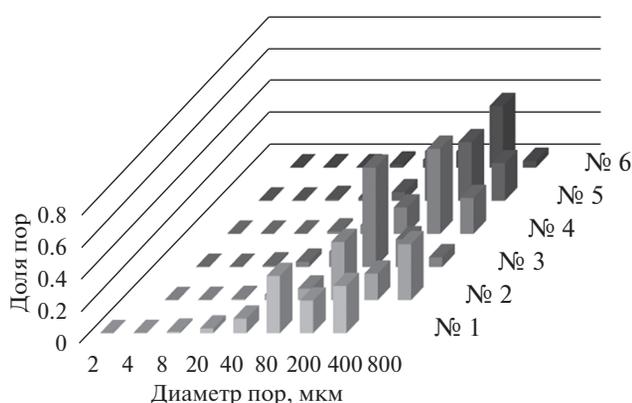


Рис. 7. Гистограмма долевого объема пор и каналов в образцах модели.

то же координационное число. Расчетные усредненные значения отношения $d_{\text{пор}}/d_{\text{кан}}$, полученные на основании прямых статистических измерений в электронном микроскопе, также очень близки.

Таким образом, близкие значения основных микроструктурных параметров порового пространства пород в образцах модели указывают на их принадлежность к одной группе, что позволяет прогнозировать минимальные пороговые эффекты при проведении фильтрационных экспериментов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме “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. King F.H. Principles and Conditions of the Movement of Groundwater // U.S. Geological Survey. 19 Annu. Rep. 2. 1898. P. 59.
2. Арье А.Г. Физические основы фильтрации подземных вод. М.: Недра, 1984. 101 с.
3. Ребиндер П.А., Кусаков М.М., Зинченко К.Е. // Докл. АН СССР. 1940. Т. 28. № 5. С. 42.
4. Коробов К.Я., Антипин Ю.В. // Нефтяное хозяйство. 1968. № 8. С. 26.
5. Брилинг И.А. Фильтрация в глинистых породах. М.: Недра, 1984. 57 с.
6. Кузьмин В.А., Скибицкая Н.А. // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 3(22). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art37>
7. Dvorkin J., Walls J., Tutuncu A. et al. Rock Property Determination Using Digital Rock Physics. <https://www.researchgate.net/publication/240527365>
8. Мизгулин В.В., Штуркин Н.А., Нурканов Е.Ю., Кадушиников Р.М., Сафонов С.С. Метод трехмерного статистического анализа микроструктуры и порового пространства керна по теневым изображениям с рентгеновского томографа / Тез. докл. III Науч.-практ. конф. “Математическое моделирование и компьютерные технологии в разработке месторождений”. Москва, 2010. С. 51.
9. Бетелин В.Б. Проблемы создания отечественной технологии “цифровое месторождение” // Междунар. конф. “Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе”. Сургут, 2014. С. 15.
10. Kuzmin V.A. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2007. V. 1. № 6. P. 687.
11. Кузьмин В.А., Соколов В.Н. Использование компьютерного анализа РЭМ-изображений для оценки емкостных и фильтрационных свойств пород-коллекторов нефти и газа // Тез. докл. VII симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел “РЭМ-93”. Черногловка, 1993. С. 45.
12. Кузьмин В.А., Скибицкая Н.А. // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 1(20). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-20.art41>
13. Большаков М.Н., Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2007. № 8. С. 108.

Microstructural Studies of Oil-Saturated Rocks in SEM During Modeling Filtration Processes

V. A. Kuzmin*

Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow, 119333 Russia

*e-mail: kuzminva@mail.ru

The technique and results of microstructural studies in a scanning electron microscope of samples of carbonate rocks of a full-scale filtration model of one of the layers of an oil and gas condensate field are shown. Based on the studies carried out, a comparative analysis of the parameters of the pore space in the samples is given and the efficiency of the analyzed core model in terms of minimizing filtration “jumps” at the contacts of the samples is shown.

Keywords: scanning electron microscope, core model, filtration, cathodoluminescence, rocks, pore space, digital core model.