

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАСТОВЫХ КЕРНОВЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА (НА ПРИМЕРЕ ПОРОД ВУКТЫЛЬСКОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

В.А. Кузьмин, Н.А. Скибицкая
Институт проблем нефти и газа РАН,
e-mail: kuzminva@mail.ru

Введение

При разработке месторождений нефти и газа отработку технологий добычи с помощью моделирования пластовых процессов по вытеснению углеводородов с конкретными рабочими агентами проводят на реальном керновом материале. Для этого из керна формируют модель пласта. Выбор образцов для составной модели является очень важным этапом, так как модель, с одной стороны, должна состоять из различных пород, характеризующих изучаемый пласт, а с другой – необходимо минимизировать скачки фильтрационных свойств на контактах образцов. В настоящее время, при формировании пластовых керновых моделей для натуральных экспериментов по фильтрации микроструктурные особенности порового пространства не учитываются. В данной работе, на примере пород Вуктыльского нефтегазоконденсатного месторождения (ВНГМ), показана технология учета микроструктурных особенностей порового пространства для минимизации фильтрационных скачков на контактах образцов керновой модели пласта. Для этого была использована электронная микроскопия и анализ размерных и пространственных микроструктурных параметров порового пространства путем построения цифровой модели и алгоритмов, позволяющих с допустимой погрешностью проводить их сопоставление.

Методика

В настоящее время наиболее эффективным методом количественного исследования порового пространства пород является метод растровой электронной микроскопии с применением микрофотографии и катодолюминесценции. Методика катодолюминесцентного исследования порового пространства пород имеет преимущества, так как позволяет изучать микроструктурные детали, совершенно недоступные современной микрофотографии, которая из-за недостаточного разрешения не обеспечивает необходимую детализацию нижнего и среднего диапазона фильтрующих каналов в карбонатных и глинистых породах. В связи с этим, в настоящей работе для изучения особенностей строения порового пространства образцы пород исследовались в растровом

электронном микроскопе (РЭМ) по специально разработанной методике прямого измерения размеров сечений пор и поровых каналов [1, 2]. Анализ полученных катодоллюминесцентных РЭМ-изображений проводился программными методами на основе разработанных алгоритмов [3].

Метод позволяет анализировать поровое пространство путем его модельного сеточного представления и находить усредненные размерные параметры ячейки пора-канал. В качестве основных размерных параметров рассчитываются средний диаметр поры, усредненное количество каналов, выходящих из поры, их средний диаметр и другие характеристики. Количество каналов, приходящихся на одну пору, определяет координационное число (рис. 1).

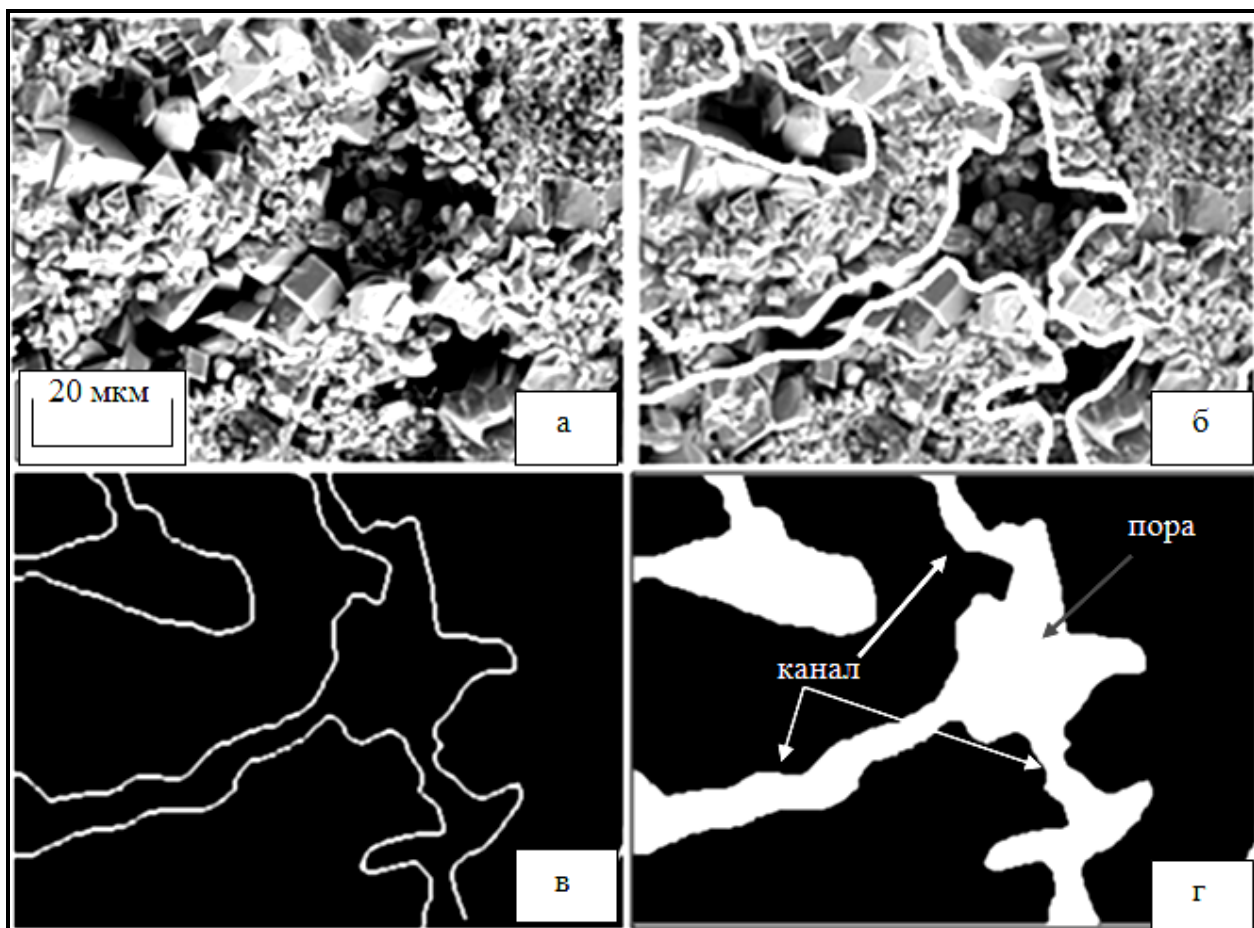


Рис. 1. Конфигурация пустот в известняке:
а, б – исходное вторично-электронное изображение скола пористого известняка;
в, г – конфигурация поры
(координационное число – 3)

На рис. 2, 3 показан пример порометрического исследования образцов породы катодоллюминесцентным методом в РЭМ.

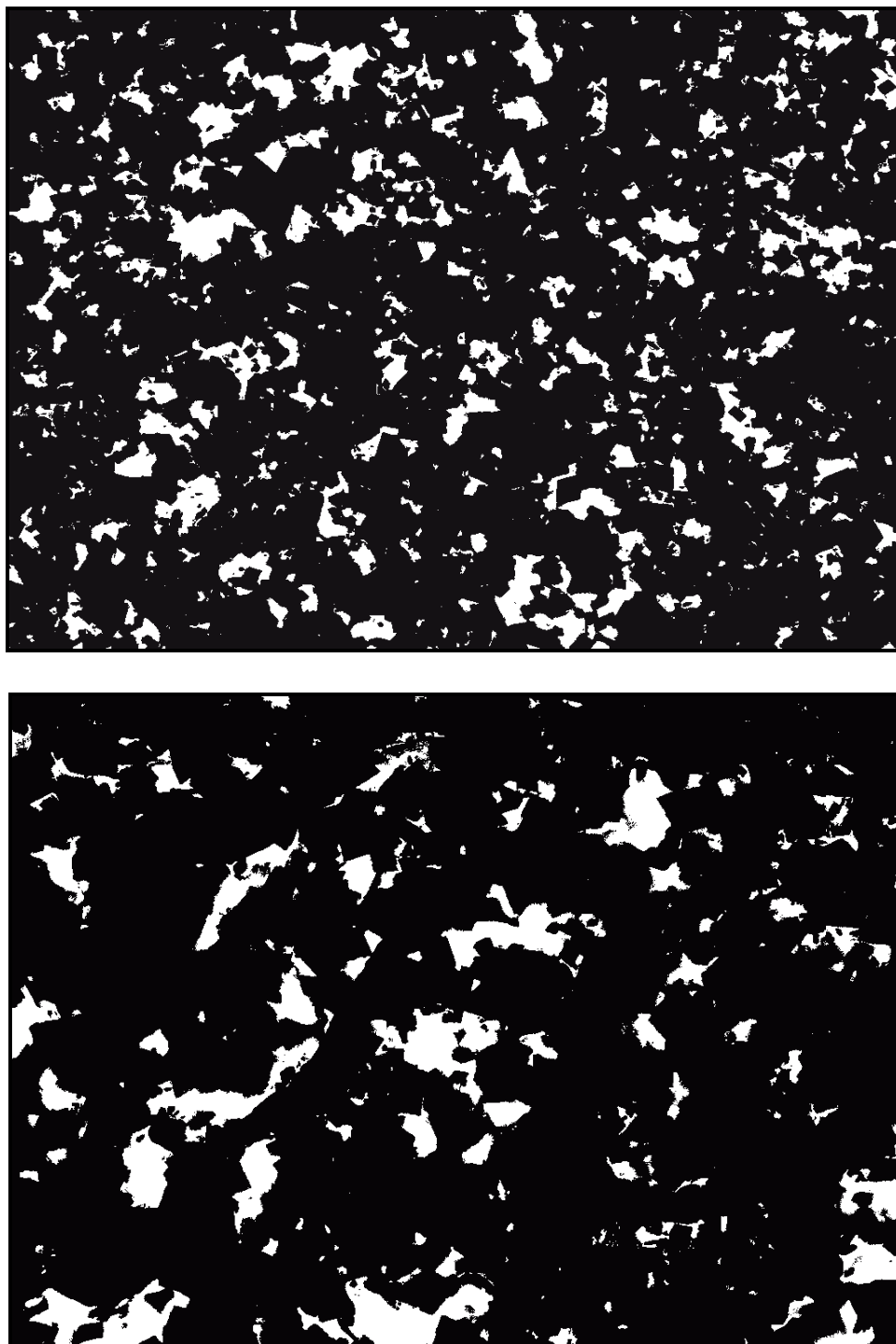
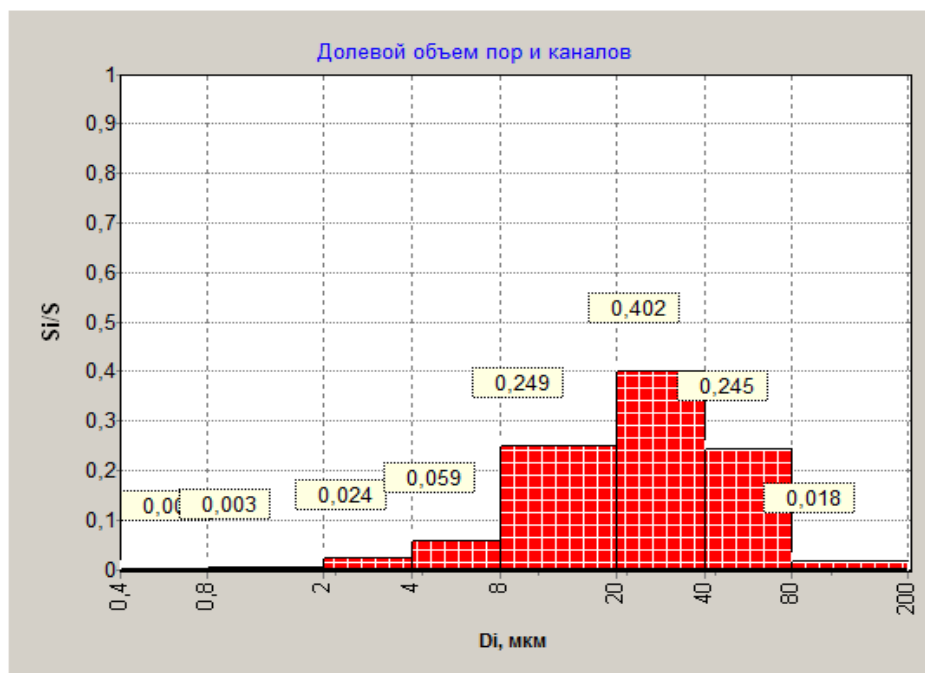


Рис. 2. Поровое пространство в обр. 4/26, скв. № 210, инт. отбора (3775,0–3780,0 м, C_{1S1}); катодоллюминесценция; увел. 400^{\times} и 800^{\times}



а



б

Рис. 3. Результат обработки катодлюминесцентных изображений (обр.4/26, скв. № 210, инт. отбора 3775,0–3780,0 м, C_{1S1}): а – гистограмма долевого объема пор и каналов в емкостном объеме образца; б – гистограмма распределения пор и каналов по размерам

Критерии выбора образцов пород для керновой модели с учетом микроструктурных характеристик порового пространства

Исследования, проведенные авторами, показали, что наиболее важной микроструктурной характеристикой при подборе керна для создания натурной модели

пласта для экспериментов по фильтрации является усредненная величина отношения диаметров пор и каналов ($d_{пор}/d_{кан.}$). При формировании модели пласта на контактах образцов из-за несовпадения элементов просветности поровых объемов отношение $d_{пор}/d_{кан.}$ резко изменяется. Это приводит к возникновению фильтрационного скачка на контактах образцов, При этом, чем больше разница этого микроструктурного параметра в образцах, тем больше фильтрационный скачок.

Величина $d_{пор}/d_{кан.}$ существенно влияет на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) и определяет различия в величине коэффициента остаточного структурно-защемленного газа ($K_{з.о.}$) при прямоточной капиллярной пропитке для пород с разной структурой порового пространства [4, 5]. Этот параметр во многом определяет величину структурно-защемленных газонасыщенных объемов в газоконденсатной части нефтегазоконденсатных месторождений и структурно-защемленных нефтенасыщенных объемов в их нефтяных оторочках и подгазовых нефтяных залежах. При бoльшем единицы отношении $d_{пор}/d_{кан.}$ возникает и растет эффект структурно-защемленных поровых объемов, в которых движение газа в процессе разработки не подчиняется законам фильтрации, а идет через его разгрузку в динамические (проточные, фильтрующие) поровые объемы. Движение жидкости в таких структурно-защемленных объемах практически отсутствует, а величина этих объемов определяет минимальную (предельную, целевую) величину остаточной нефтенасыщенности в нефтенасыщенных отложениях или величину остаточного газа, защемленного при обводнении. В высокопористых крупнопористых породах структура порового пространства существенно отличается от капилляроподобной и является ярко выраженной четочной. В таких породах отношение $d_{пор}/d_{кан.}$ существенно больше единицы. Наименьшими средними значениями $K_{з.о.}$ характеризуются плотные низкопроницаемые породы, для которых отношение $d_{пор}/d_{кан.}$ минимально. В породах пористых и даже высокопористых, но мелко- и субкапиллярнопоровых, размеры пор ненамного превышают размеры поровых каналов. Структура порового пространства в них приближается к капилляроподобной, а отношение среднего диаметра пор к среднему диаметру поровых каналов стремится к единице. Учитывая это, при группировании образцов для ядерной модели величина отношения $d_{пор}/d_{кан.}$ была выбрана базовым критерием.

Следующим важным этапом при подборе ядра для модели является учет пространственного строения поровой системы, которая даже при очень близком законе

распределения пор по размерам может существенно влиять на относительную фазовую проницаемость. Это хорошо показано в классической работе И. Фэтта [6, 7], в которой приводятся данные модельных экспериментов капиллярного вытеснения и двухфазной фильтрации. Основным выводом работы является тот факт, что само строение сетки капилляров и количество пересечений каналов в узлах (координационное число) существенно влияют на характер формы кривых относительной фазовой проницаемости (ОФП), в отличие от закона распределения пор по размерам, который принципиально не изменяет характер двухфазной фильтрации. На рис. 4 показаны кривые ОФП при двухфазной фильтрации в поровых системах с разным координационным числом (параметром β по И. Фэтту).

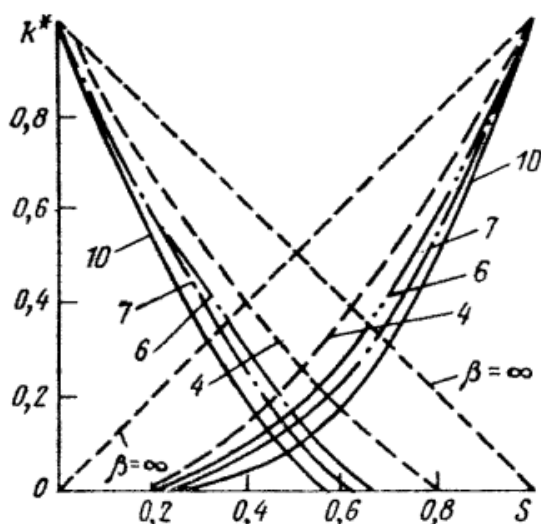


Рис. 4. Кривые ОФП для сетчатых моделей с различным координационным числом (параметром β по И. Фэтту)

Из приведенных графиков видно, что с ростом числа пересечений каналов в узлах сетчатой фильтрационной системы относительная проницаемость уменьшается. Это означает, что при одинаковом значении насыщенности проницаемость фазы выше в простой капиллярной системе, состоящей из протяженных каналов с минимальным количеством пересечений. Анализ графиков показывает, что изменение координационного числа на 3–4 единицы приводит к заметному изменению относительной проницаемости (до 5–10%). Поэтому в качестве интервала значения координационного числа в группах образцов для модели целесообразно принять величину

изменения, равную 4. То есть, при подборе керна для составного образца модели в фильтрационных экспериментах координационное число в образцах не должно различаться более чем на 4 единицы.

Таким образом, при выборе образцов для модельных экспериментов необходимо учитывать особенности порового пространства пород и подбирать образцы для модели на основании рассчитанных средних значений отношения диаметров пор к диаметрам каналов и координационного числа. При этом, чем ближе значения этих микроструктурных параметров в образцах, тем меньше будет пороговый скачок фильтрационных свойств в собранной модели. Совершенно очевидно, что и литолого-петрофизические характеристики при этом также должны учитываться.

Результаты порометрического электронно-микроскопического анализа пород для формирования керна модели пласта

Для подбора образцов в группы, из которых можно составлять керна модели, была отобрана и изучена коллекция образцов продуктивных отложений Вуктыльского нефтегазоконденсатного месторождения (Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция, республика Коми). Массивно-пластовая газоконденсатная залежь сложена преимущественно карбонатными породами. По всей толще карбонатов нижней перми–карбона наблюдается резкая фильтрационная неоднородность и анизотропия.

Образцы для создания необходимой стендовой модели были отобраны из скважин: № 13, № 33, № 53, № 57, № 209, № 210, № 215, № 225 и № 278 из интервала глубин 3357,9–4281,0 м, представленных отложениями нижнепермскими, среднего и нижнего карбона.

Исследованные породы представлены преимущественно доломитами тонкозернистыми известковистыми пористыми, а также известняками, известняками микрозернистыми с органическим детритом (вакстоун), известняками водорослево-фораминиферовыми, известняками фораминиферо-водорослевыми доломитизированными и переходными разностями. По данным петрофизических исследований (табл. 1), открытая пористость образцов изменяется от 0,38% до 18,9%, при среднем значении 4,06%. Проницаемость образцов изученной коллекции изменяется от значений, меньших 0,01 мД (в таблицу не включены) до 6,039 мД, при среднем значении 0,782 мД.

**Петрофизические свойства образцов пород ВНКМ изученной коллекции,
отобранной для создания натурной модели пласта**

№ обр.	Коэфф. открытой пористости, $K_{п.о.}, \%$	Коэфф. абсолютной проницаемости по газу $K_{пр.}, \text{м}^2 \cdot 10^{-15}$	Коэфф. остаточной водонасыщенности (центрифугирование), $K_{во}, \%$	Коэфф. нефтегазонасыщенности $K_{не}=100 - K_{во}, \%$	Коэфф. эффективной пористости $K_{п.эф.} = K_n \cdot K_{не}, \%$	Коэфф. структурно-защемленной газонасыщенности, $K_{го}$	Коэфф. динамической пористости $K_{п.дин.} = K_n \cdot (K_{не} - K_{го})$
1/40	1,90	0,035	11,5	88,54	1,79	50,19	0,77
4/14	11,78	0,9537	27,5	72,53	6,24	23,43	4,22
4/26	17,93	7,297	62,1	37,87	6,79	37,06	0,14
4/28	10,75	5,6941	50,5	49,50	5,32	31,71	1,91
4/41	0,90	0,078	43,0	57,03	0,44	53,25	0,03
5/26	6,65	0,40	33,3	66,74	4,44	29,72	2,46
5/31	4,70	0,088	52,2	47,85	2,66	15,57	1,80
5/35	4,20	0,046	1,20	98,80	3,22	50,59	1,57
5/43	3,20	0,013	41,3	58,67	2,25	23,83	1,33
6/9	3,70	0,040	36,6	63,35	2,32	40,76	0,83
6/22	1,20	0,019	5,50	94,52	0,95	26,56	0,69
6/33	1,60	0,029	26,6	73,35	1,16	4,57	1,09
6/53	4,40	2,353	72,4	27,57	1,08	10,78	0,66
6/55	1,10	0,061	50,0	49,97	0,73	18,94	0,45
6/72	3,50	0,022	30,0	70,01	2,49	52,38	0,63
6/80	7,50	4,243	45,8	54,22	3,34	31,58	1,40
7/58	3,00	0,017	22,3	77,67	3,18	49,82	1,14
7/68	3,32	0,126	38,8	61,24	2,03	32,16	0,96
8/60	0,90	0,015	41,2	58,78	0,56	26,10	0,31
8/88	0,40	0,426	43,2	56,85	0,23	41,56	0,06
8/123	4,70	0,012	61,9	38,08	1,77	9,87	1,31
10/19	5,10	0,026	49,2	50,76	3,22	25,95	1,57
10/54	3,40	2,192	44,2	55,84	2,31	33,45	0,93
11/22	4,20	0,077	33,3	66,72	2,45	38,58	1,04
11/34	6,80	0,049	41,0	59,02	4,36	24,70	2,53
11/42	6,00	0,032	30,27	69,73	4,46	55,97	0,88
11/44	7,26	0,113	38,13	61,87	4,49	27,75	2,48
11/76	2,50	0,023	38,46	61,54	1,42	26,86	0,80
11/80	5,10	0,497	51,72	48,28	2,76	34,16	0,81
11/83	9,63	2,4468	16,52	83,48	8,04	52,57	2,97
11/128	4,30	0,010	57,09	42,91	1,77	13,99	1,19

Все образцы были исследованы в электронном микроскопе и с помощью компьютерного анализа РЭМ-изображений были получены порометрические данные, приведенные в табл. 2. Данные включают величины усредненных значений размеров пор,

каналов и другие микроструктурные параметры, являющиеся основой для расчета координационного числа и отношения диаметров пор и каналов. Как видно из табл. 2, по характеру строения поровой системы (различие координационных чисел и отношений $d_{пор}/d_{кан.}$) отобранная коллекция образцов пород характеризуется значительной изменчивостью структуры порового пространства.

Таблица 2

Микроструктурные параметры порового пространства (цифровая модель) образцов ВГКМ, определенные способом катодолюминесценции в электронном микроскопе

№ обр.	Структурные параметры порового пространства			
	Координационное число, $N_{кан.}/N_{пор}$	Средний диаметр каналов, мкм	Средний диаметр пор, мкм	Среднее отношение $d_{пор}/d_{кан.}$
1/40	2,01	0,71	9,22	13
4/14	5,00	1,02	10,98	11
4/26	5,00	0,99	9,12	9
4/28	4,00	0,91	8,42	9
4/41	3,66	0,51	6,70	13
5/26	5,38	1,59	14,07	9
5/31	2,01	0,96	3,93	4
5/35	2,01	0,83	9,45	11
5/43	2,05	0,48	4,30	9
6/9	2,01	1,05	6,51	6
6/22	2,01	0,83	3,01	4
6/33	2,01	0,92	5,93	6
6/53	4,99	0,58	4,11	7
6/55	20,29	0,48	4,38	9
6/72	2,01	0,25	3,80	14
6/80	9,01	1,00	10,08	10
7/58	2,01	0,16	2,26	14
7/68	4,00	0,89	5,24	10
8/60	2,00	0,18	–	–
8/88	2,01	0,39	4,70	12
8/123	2,01	0,74	2,75	4
10/19	2,01	0,99	6,36	6
10/54	2,01	0,87	6,63	8
11/22	2,01	0,19	2,32	12
11/34	2,01	0,66	4,32	7
11/42	2,01	0,57	8,01	14
11/44	5,00	0,78	4,02	5
11/76	3,07	0,88	5,35	6
11/80	7,96	1,74	12,8	7
11/83	4,01	1,27	13,45	8
11-128	2,01	0,72	5,68	8

Анализ закономерности изменения коэффициента структурно заземленной (остаточной) газонефтенасыщенности $K_{z.o.}$ по отношению среднего значения диаметра пор к среднему значению диаметра каналов ($d_{пор}/d_{кан.}$) показал, что между ними имеется линейная зависимость вида $K_{z.o.} = 3,3037(d_{пор}/d_{кан.}) - 3,2751$. Из этой зависимости следует, что при увеличении значений ($d_{пор}/d_{кан.}$) на 4 единицы $K_{z.o.}$ увеличивается приблизительно на 10%. Таким образом, если соблюсти условие, что $K_{z.o.}$ для каждого образца в группе будет отличаться не более чем на 10% и минимальное значение различий координационного числа в образцах равно 4, расчет по формуле показывает следующие интервалы отношения $d_{пор}/d_{кан.}$ в группах (табл. 3):

Таблица 3

Интервалы отношения $d_{пор}/d_{кан.}$ в группах

Интервал	$d_{пор}/d_{кан.}$
1	4–7
2	>7–10
3	>10–14
4	>14–17
5	>17–20

Для учета координационного числа необходимо в каждом интервале произвести сортировку данных по этому параметру. Окончательно в коллекции выбранных образцов выделилось шесть групп с близкими микроструктурными характеристиками внутри каждой группы (табл. 4).

Выделенные группы содержат образцы с относительно близкими микроструктурными характеристиками порового пространства, существенно влияющими на характер фильтрации. В табл. 4 приведены результаты группирования образцов по всем исследованным горизонтам.

На основе полученных данных были подобраны образцы модели для экспериментов по фильтрации. На рис. 5 и 6 приведено схематичное изображение модели с использованием катодолюминесцентных (поровое пространство) и вторично-электронных (микростроение) изображений, полученных в растровом электронном микроскопе.

Таблица 4

**Группы образцов с близкими микроструктурными характеристиками
порового пространства**

№ обр.	Координационное число, $N_{кан.}/N_{пор}$	Средний диаметр каналов, $d_{кан.}$, МКМ	Средний диаметр пор, $d_{пор}$, МКМ	Среднее отношение $d_{пор}/d_{кан.}$	Группа
8-123	2,01	0,74	2,75	4	1 гр.
6/22	2,01	0,74	2,85	4	
5/31	2,01	1,00	4,25	4	
6/9	2,01	1,17	6,51	6	
6/33	2,01	0,79	4,56	6	
10/19	2,01	0,99	6,36	6	
11/34	2,01	0,66	4,32	7	
11/76	3,07	0,78	4,73	6	
6/53	4,99	0,66	4,73	7	
11/44	5,00	0,81	4,30	5	
11-128	2,01	0,77	5,78	8	
10/54	2,01	0,87	6,63	8	
5/35	2,01	0,74	8,14	11	
5/43	2,05	0,51	4,60	9	
4/28	4,00	0,94	8,43	9	
7/68	4,00	0,52	5,24	10	
11/83	4,01	1,66	12,86	8	
4/26	5,00	1,02	9,34	9	
4/14	5,00	0,99	10,41	11	
5/26	5,38	1,69	15,17	9	
11/80	7,96	1,90	13,33	7	3 гр.
6/80	9,01	1,00	10,08	10	4 гр.
6/55	20,29	0,63	5,67	9	5 гр.
8/88	2,01	0,39	4,7	12	6 гр.
11/22	2,01	0,19	2,32	12	
1/40	2,01	0,69	8,96	13	
7/58	2,01	0,16	2,26	14	
11/42	2,01	0,54	7,62	14	
6/72	2,01	0,25	3,80	14	
4/41	3,66	0,34	4,38	13	

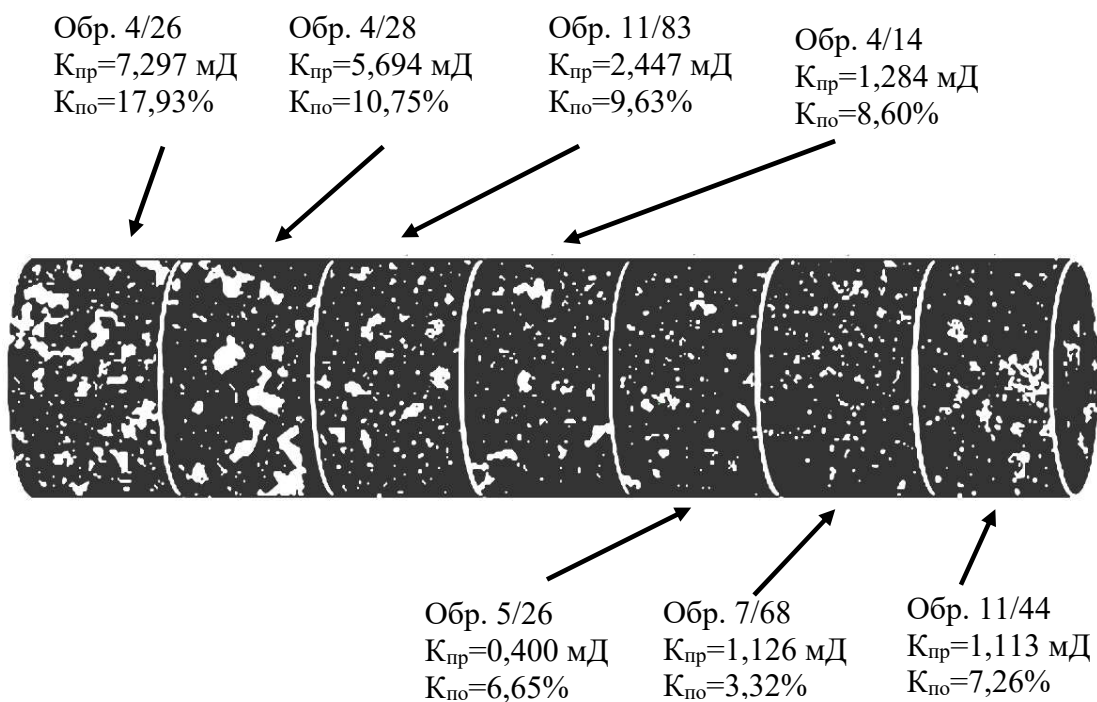


Рис. 5. Поровое пространство в образцах модели на основе катодоллюминесцентных электронно-микроскопических изображений (увел. 1000^{\times})

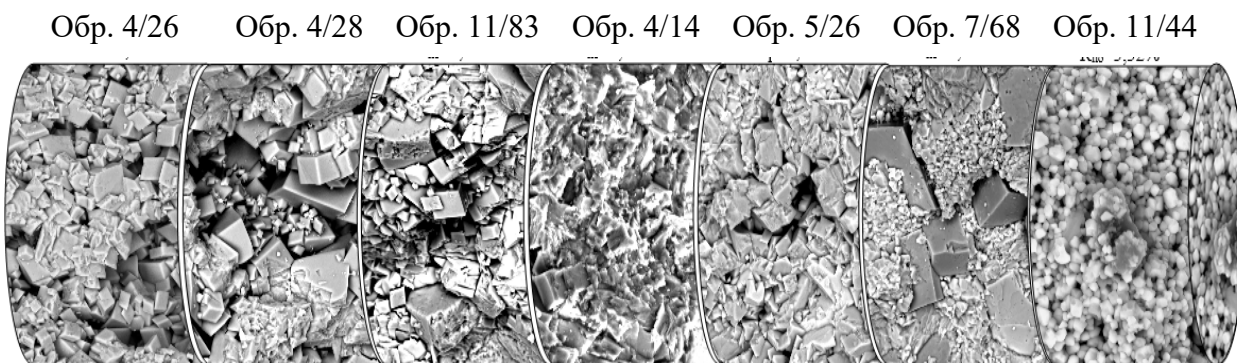


Рис. 6. Микростроение в образцах модели на основе электронно-микроскопических изображений (увел. 3000^{\times})

Как видно из рис. 5, образцы в модели имеют различную проницаемость и пористость. В то же время, структура порового пространства в образцах близка по строению, что снижает пороговые эффекты на контактах образцов ядерной модели. Образцы расположены последовательно по степени уменьшения количества поровых каналов и уменьшения их связанности.

Заключение

Для разработки эффективных технологий добычи нефти и газа необходимо проведение экспериментальных исследований процессов фильтрации с использованием рабочих агентов непосредственно на керновом материале продуктивных пластов. Подбор керна для модели с учетом особенностей строения порового пространства является важным этапом отработки технологии добычи стендовым моделированием исследуемых процессов.

Проведенный комплекс электронно-микроскопических исследований позволил разделить образцы пород по группам с учетом важнейших микроструктурных характеристик строения порового пространства, средней величины отношения $d_{пор}/d_{кан.}$ и координационного числа поровой системы. В результате исследований выделены группы образцов с близкими микроструктурными характеристиками порового пространства, влияющими на КИН и ОФП. На основании полученных данных был отобран керн натурной модели пласта из газоконденсатной части залежи Вуктыльского НГКМ для экспериментов по физическому моделированию пластовых процессов и экспериментальных исследований по добыче жидких углеводородов (нефти и ретроградного конденсата) в концентрациях ниже порога фильтрации.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Системный подход к совершенствованию теории и практики нефтегазогеологического районирования, прогнозирования нефтегазоносности и формирования ресурсной базы нефтегазового комплекса России», № АААА-А17-117082360031-8).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kuzmin V.A.* Cathodoluminescence Technique for Studying the Pore Space of Rocks Using Scanning Electron Microscopy // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2007. Vol. 1, No. 6. P. 687–690.
2. *Скибицкая Н.А., Сурначев Д.В., Кузьмин В.А., Большаков М.Н.* Моделирование пористости в карбонатных пластах на примере Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2007. № 3. С. 71–74.
3. *Кузьмин В.А., Соколов В.Н.* Использование компьютерного анализа РЭМ-изображений для оценки емкостных и фильтрационных свойств пород-коллекторов нефти

и газа // VII симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел «РЭМ-93»: Тез. докл. Черноголовка, 1993. С. 45.

4. Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А., Большаков М.Н. Влияние микроструктурных параметров карбонатных пород продуктивных отложений на остаточную нефтегазонасыщенность месторождений углеводородов // Нефтяное хозяйство. 2010. № 12. С. 98–101.

5. Dullien A.L., Batra V.K. Determination of the structure of porous media // Ind. Eng. Chem., 1970. Vol. 62, No. 10. P. 25–53.

6. Fatt I. Pore structure in sandstones by compressible sphere-pack models // Bull. Am. Ass. Petrol. Geol. 1958. Vol. 42, No. 8. P. 1914–1957.

7. Fatt I. The network model of porous media // Pet. Trans. AIME. 1956. Vol. 207. P. 144–181.