

УДК 541.11, 553.983, 553.985, 616-073.756.8

А.А. Ерофеев¹, А.А. Пачежерцев², И.А. Карпов³, Н.В. Морозов⁴,
А.Г. Калмыков⁵, А.Н. Черемисин⁶, Е.В. Козлова⁷, А.Ю. Бычков⁸

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СТИМУЛИРОВАНИЯ РАЗРАБОТКИ ЗАЛЕЖЕЙ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ⁹

Показано влияние температурного воздействия на образцы пород баженовской свиты. Воздействие проводилось методом пиролиза в интервале температуры 300–480 °С, а также в закрытых автоклавах в присутствии воды при пластовых значениях давления. Показано, что в результате температурного воздействия при 400 °С пиролитический пик S2 снижается на 90–95%, генерационный потенциал пород практически полностью реализован. Микротомографические исследования образцов в сочетании с растровой электронной микроскопией позволили установить зависимость изменения фильтрационно-емкостных свойств пород. Продемонстрировано, что уже при 350 °С в породах образуется система трещин; пористость и проницаемость в результате воздействия могут возрастать от нескольких раз до нескольких десятков раз. Полученные результаты позволят точнее моделировать процессы третичного воздействия на породы баженовской свиты с целью увеличения конечной нефтеотдачи пласта.

Ключевые слова: баженовская свита, температурное воздействие, фильтрационно-емкостные свойства, пиролиз, изменение структуры.

In this paper the temperature treatment impact on Bazhenov formation core samples are shown. Impact was performed by pyrolysis in a temperature range of 300–480 °C and in the closed autoclave in the presence of water at reservoir pressure. It is shown that as a result of thermal exposure at 400 °C pyrolytic peak S2 is reduced by 90–95% and generation potential of rocks almost completely implemented. The microtomographic samples studies combined with scanning electron microscopy allowed to establish the dependence of permeability and porosity of the rocks. It demonstrated that even at 350 °C the fracture system formed in core samples also the porosity and permeability due to impact may increase from several times to several ten times. The results will allow for a more accurate simulation of enhanced oil recovery treatment on Bazhenov formation rocks to increase oil recovery.

Key words: Bazhenov formation, thermal effects, reservoir properties, pyrolysis, changes in the structure.

Введение. Баженовская свита (БС) — одна из самых больших залежей сланцевой нефти в мире. По различным оценкам количество запасов в ней может достигать 0,19 млрд м³. Вместе с тем БС характеризуется низкими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) и высокой неоднородностью разреза по литотипам. Самый распространенный метод разработки таких месторождений на сегодняшний день — бурение

горизонтальных скважин с последующим много-стадийным гидроразрывом пласта (МГРП) для создания разветвленной сети трещин и стимуляции притока к скважине. К основным недостаткам этого метода относятся быстрое, от полугода до 2 лет, истощение скважин при низком коэффициенте извлечения подвижной нефти (КИН), невовлечение в разработку сорбированных углеводородов и генерационного потенциала керогена (твердого,

¹ Московский физико-технический институт, инжиниринговый центр по трудноизвлекаемым полезным ископаемым, руководитель исследовательской группы; *e-mail:* erofeev.aa@cet-mipt.ru

² Московский физико-технический институт, инжиниринговый центр по трудноизвлекаемым полезным ископаемым, инженер; *e-mail:* pachezhertsev.aa@cet-mipt.ru

³ ООО Газпромнефть НТЦ, гл. специалист; *e-mail:* Karpov.IA@gazpromneft-ntc.ru

⁴ ООО Газпромнефть НТЦ, вед. специалист; *e-mail:* Morozov.NV@gazpromneft-ntc.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, инженер; *e-mail:* a.g.kalmykov@gmail.com

⁶ Сколковский институт науки и технологии, центр добычи углеводородов, заместитель директора; *e-mail:* a.chremisin@skoltech.ru

⁷ Сколковский институт науки и технологии, центр добычи углеводородов, ст. науч. с.; *e-mail:* miliyakozlova@mail.ru

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, профессор; *e-mail:* andrewbychkov@rambler.ru

⁹ Работа выполнена за счет гранта Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 14.581.21.0008 от 03.10.2014 (уникальный идентификатор RFMEFI58114X0008)). Часть исследований по прогреву пород выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-17-00010).

нерастворимого в органических растворителях органического вещества (ОВ)). При определенных условиях часть керогена, называемая генерационным потенциалом и определяемая пиролизическим пиком S2 после экстракции, может быть преобразована в углеводородные соединения, жидкую фракцию которых можно называть синтетической нефтью. Содержание ОВ в разрезах БС варьирует в широких пределах в зависимости от литотипа и в некоторых пропластках достигает 25–30% по массе. Высокий нефтегенерационный потенциал БС обуславливает рассмотрение тепловых методов воздействия в качестве третичных методов увеличения нефтеотдачи.

Один из способов преобразования генерационного потенциала керогена — воздействие высокой температуры. Получаемые подвижные углеводороды, которые вовлекаются в процесс фильтрации нефти, будут увеличивать конечную нефтеотдачу. При этом в местах крекинга керогена образуются новые эффективные пустоты, которые по мере распространения тепла увеличивают проницаемость пласта в направлении фильтрации флюида. Гидродинамическое моделирование фильтрации теплоносителя в породах БС сопряжено с рядом трудностей, основная из них — недостаток фактических данных об изменениях состава и свойств пород под воздействием повышенной температуры. При этом динамический учет изменения ФЕС пласта при гидродинамическом моделировании может значительно влиять на расчетную результативность технологий теплового воздействия [Alekseev et al., 2015].

Цель работы — экспериментальное определение зависимости пиролизических параметров и ФЕС пород от температуры нагрева образцов, осуществляемого при различных условиях. Для изучения этого влияния образцы исследованы комплексом методов, включающим растровую электронную микроскопию, компьютерную микротомографию, пиролизические исследования и численный расчет проницаемости пород.

Обзор аналогичных экспериментальных исследований. Метод компьютерной микротомографии (мКТ) широко применяется для изучения свойств и внутренней структуры традиционных нефтенасыщенных коллекторов [Taud et al., 2005; Vandersteen et al., 2003; Van Geet et al., 2000]. Однако в последнее время его все шире применяют и при изучении строения образцов, относящихся к сланцевым месторождениям.

В работах [Chugunov et al., 2015; Gerke et al., 2005] предложены методы детального описания сланцевых пород и их пустотного пространства с использованием рентгеновского микротомографа и сканирующего электронного микроскопа. В результате комплексирования методов РЭМ и мКТ построены разномасштабные модели порового

пространства и минеральной составляющей образцов БС. Отличительная особенность комплексирования — выделение пористости в керогене, выявленной с использованием метода РЭМ.

В работе [Panahi et al., 2012] описаны трещины и деформации образцов пород сланцев Грин Ривер, возникающие в результате преобразования ОВ при нагреве образцов пород. Образование «вторичных» пустот описано также в работах [Kibodeaux, 2014; Mehrabi et al., 2015; Tiwari et al., 2013]. В работе [Korost et al., 2012] описано исследование нефтематеринских пород доманиковых отложений. Показано, что при нагреве происходит образование трещин, параллельных напластованию. Во всех исследованиях применялись рентгеновские установки различных модификаций.

Методика исследований. Пиролизические исследования пород, проводимые на аппаратуре Rock-Eval, позволяют определить основные характеристики ОВ породы — количество, качество и степень его термической зрелости, а также оценить нефтегазогенерационный потенциал породы, выявить в разрезе интервалы, обогащенные ОВ или насыщенные свободными углеводородами. Методика пиролиза успешно применяется с 1970-х гг. и описана в работах [Behar et al., 2001; Espitalié et al., 1985; Гончаров и др., 1982; Лопатин и др., 1987].

Метод заключается в нагревании образца в потоке гелия в программируемом температурном режиме, после чего органическое вещество дожигается в присутствии кислорода. Углеводородные соединения попадают из печи на пламенно-ионизационный детектор (ПИД), который фиксирует выделение трех пиков органических соединений при программируемом разогреве образцов горной породы от 25 до 650 °С. При температуре до 90 °С происходит выделение газовой фазы (пик S0), до 300 °С (пик S1) выделяются легкие жидкие углеводороды (УВ), чаще всего мальтоновая фракция. При 300–650 °С (пик S2) происходит собственно десорбция тяжелых связанных УВ, а также крекинг керогена в инертной среде, в результате чего ОВ превращается в газообразные УВ. Температура, при которой отмечается наибольшая интенсивность выхода УВ в пределах пика S2, обозначается как T_{\max} .

Таким образом измеряются следующие параметры:

1) S0 — количество свободных УВ (температура в печи до 90 °С), мг УВ/г породы;

2) S1 — количество УВ — продуктов термического испарения до температуры 300 °С, мг УВ/г породы;

3) S2 — количество УВ, образованных в процессе термодеструкции (крекинга) керогена, или остаточный потенциал — количество УВ, которое может выделиться в процессе дальнейшего катагенеза исследуемых пород; сумма этих пиков

рассматривается как генерационный потенциал породы и также измеряется в мг УВ/г породы;

4) T_{max} — температура, при которой образование УВ при термодеструкции (крекинге) керогена достигает максимального значения, °С;

5) $C_{орг}$ (или ТОС) — общее содержание органического углерода (Total Organic Carbon) в породе (масс.%, wt. %);

Расчетные коэффициенты — водородный индекс (HI, Hydrogen Index) — $HI=(S2 \cdot 100)/ТОС$, мг УВ/г ТОС, характеризующий генерационный потенциал ОВ вместе с кислородным индексом (OI, Oxygen Index), $OI=(S3 \cdot 100)/ТОС$, мг CO_2 /г ТОС, а также ряд других параметров, таких, как PI и OSI.

Компьютерную микротомографию использовали для исследования изменений пустотного пространства образцов пород БС, возникающих в результате нагрева. Этот метод позволяет выделять отдельные структурные объекты в образцах пород — поры и минералы, слагающие матрицу. Метод основан на регистрации рентгеновского излучения, проходящего через исследуемый объ-

ект. Значение регистрируемого сигнала зависит от толщины исследуемого объекта, его состава и плотности. В процессе сканирования исследуемый объект вращается вокруг своей оси с установленным угловым шагом, при этом регистрируются так называемые теневые проекции, в которых яркость каждого пикселя отображает плотность внутренней структуры. В результате реконструкции получают поперечные срезы сканируемого объекта, строят трехмерные модели пустот и минералов с пространственным разрешением до 1 мкм/пиксель.

Нами для микротомографии использован томограф «Bruker SkyScan 1272» с пакетом встроенного программного обеспечения для обработки получаемых поперечных срезов образцов пород.

Так как размеры пустот в породах БС могут составлять десятки и сотни нанометров, определение характеристик пустотного пространства исключительно методом компьютерной микротомографии приведет к возникновению значительных погрешностей. Для минимизации ошибки при расчете свойств пустотного пространства нами использованы данные стандартных петрофизи-

Таблица 1

Результаты исследований

Скважина	Интервал, м	Температура нагрева, °С	Пиролитические исследования								Результаты микротомографии				Расчет абсолютной проницаемости	
			до нагрева				после нагрева				до нагрева		после нагрева		до нагрева	после нагрева
			S1, мг/г породы	S2, мг/г породы	ТОС	HI	S1, мг/г породы	S2, мг/г породы	ТОС	HI	$\phi_{tot}, \%$	$\phi_{open}, \%$	$\phi_{tot}, \%$	$\phi_{open}, \%$	мД	мД
1	xx44,28	320	7,39	59,63	14,46	403	1,71	49,59	11,38	435	1,78	0,06	1,74	0,06	0,3656	1,1139
		360					1,4	36,92	10,26	359	3,06	0,18	4,95	0,43	0,2108	2,2059
		400					0,49	14,9	10,83	137	6,09	0,96	6,62	1,77	0,4113	7,7514
		440					0,85	3,13	4,49	69	8,00	2,23	9,80	6,10	0,3226	18,3864
		480					0,04	0,21	5,11	4	6,36	0,55	9,01	4,86	0,7067	37,0750
2	xx24–xx26	300	2,96	49,96	11,92	418	5,88	50,56	11,96	422	6,02	2,11	5,10	2,70	0,1580	0,2700
		350					3,05	2,03	8,6	23	5,18	2,13	6,36	3,87	0,8640	23,3081
		400					2,77	2,13	9,2	23	5,61	2,05	7,74	5,25	0,5330	27,9380
	xx24–xx26	300	2,96	49,96	11,92	418	0,72	58,13	10,55	550	3,73	0,66	4,38	1,77	0,4898	8,5423
		350					0,72	47,99	11,33	423	4,99	1,09	5,19	2,62	0,7174	13,6533
		400					0,62	10,5	8,75	119	3,89	0,55	6,06	3,34	0,7244	16,8284
		450					0,53	4,1	8,22	49	3,26	0,33	7,07	4,37	0,5098	36,3935
3	xx11–xx14	300	1,77	103,1	12,51	823	1,61	69,54	7,94	875	6,33	2,32	6,44	3,01	0,5165	1,5966
		350					0,55	30,2	6,67	453	5,69	2,18	9,92	8,43	0,3832	9,5251
		400					0,56	4,32	4,65	92	6,73	2,95	14,40	13,48	0,4456	18,3448
		450					0,56	1,51	3,83	39	5,52	0,99	13,61	12,40	0,3030	57,6820
	xx31–xx35	350	1,24	17,87	3,26	548	0,52	9,26	2,86	430	5,75	0,37	6,05	0,26	0,3769	4,4990
		400					0,49	2,18	2,06	106	5,02	0,44	6,27	1,31	0,4022	7,9271
		450					0,78	1,53	2,12	72	5,09	0,54	8,68	4,37	0,7166	16,6675



Рис. 1. Общая схема эксперимента

ческих исследований (определение пористости и проницаемости методом газоволюметрии на порозиметре «АР-608»).

Методология определения взаимосвязи пористых и пиролитических характеристик в зависимости от нагрева. Для определения влияния нагрева на породы БС выполнен эксперимент, включающий все описанные выше виды лабораторных исследований и состоящий из четырех этапов. Схема исследования приведена на рис. 1.

На первом этапе экспериментов из исходного ядерного материала были выпилены образцы в форме цилиндра диаметром 3 мм и длиной 5–7 мм. Такие размеры объектов позволяют проводить мКТ с разрешением 1 мкм/пиксель, что дает возможность регистрировать и анализировать мелкие поры размером несколько микрометров и в то

же время анализировать пустотность в масштабе, более приближенном к экспериментальным петрофизическим исследованиям.

На втором этапе исходные образцы исследованы на микротомографе, проведена съемка поверхности в РЭМ и пиролитические исследования. В результате на этом этапе созданы трехмерные карты распределения общих и открытых пустот, выявлено распределение пустот по размерам и объемам, рассчитана абсолютная проницаемость, получены изображения поверхности с высоким разрешением и значения нефтегенерационного потенциала.

На третьем этапе проводится нагрев образцов. Нагрев происходит в пиролитаторе в инертной атмосфере и при атмосферном давлении. Каждый образец нагревали до определенной температуры, затем выдерживали в течение 2 ч. Дополнительно для сравнения пиролитических экспериментов с пластовыми условиями выполнены эксперименты по нагреву образцов в закрытых автоклавах в присутствии воды. Необходимость присутствия воды показана в работах по тепловому воздействию на породы БС, проведенных ранее на кафедре геохимии МГУ имени М.В. Ломоносова [Бычков и др., 2015]. Значения температуры нагрева образцов

в этих экспериментах указаны в табл. 1.

На четвертом этапе проводился комплекс исследований, аналогичный таковому на втором этапе.

Материалы исследований. Исследованы образцы из скважин № 1 и 2 на Южной площади Приобского месторождения и из скважины № 3 Арчинского месторождения. Все образцы отличаются по фильтрационно-емкостным свойствам (ФЕС), минеральному составу, литотипу, содержанию ОВ и нефтегенерационному потенциалу. Исходные данные для всех образцов приведены в табл. 2.

Свойства исследованных пород БС

Скважина	Интервал, м	Литотип	Минеральный состав, %	Пористость по газу, %	Проницаемость по газу, мД
1	xx44,28	Силициты глинисто-карбонатно-керогеновые	Пирит, 2,7 ОВ, 16,5 Кремнистый материал, 6,9 Глинистый материал, 12,1 Карбонаты, 59,8 Альбит, 2,0	0,47	0,01
2	xx24–xx26	Силициты глинисто-карбонатно-керогеновые	Пирит, 4,0 ОВ, 31,0 Кремнистый материал, 41,0 Глинистый материал, 16,0 Карбонаты, 3,0 Альбит, 5,0	2,08	0,304
3	xx11–xx14	Микстит кероген-глинисто-кремнистый	Пирит, 6,0 ОВ, 16,4 Кремнистый материал, 35,4 Глинистый материал, 28,1 Карбонаты, 1,9 Альбит, 12,2	2,31	
	xx31–xx35	Микстит кероген-глинисто-кремнистый	Пирит, 3,6 ОВ, 15,8 Кремнистый материал, 38,8 Глинистый материал, 26,4 Карбонаты, 4,61 Альбит, 10,6	0,97	

Определение минерального состава проводилось методом рентгено-флюоресцентного анализа с дальнейшим пересчетом количеств оксидов в количество минералов (методика разработана Г.А. Калмыковым на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых МГУ имени М.В. Ломоносова), пористость и проницаемость по газу определяли с использованием стандартного петрофизического оборудования — порозиметра и пермеаметра.

Образцы из скважины № 2 Приобского месторождения нагревали в присутствии воды в автоклавах при пластовых значениях давления.

Результаты исследований. Все результаты пиролитических исследований, расчетов пустотности и проницаемости исследованных образцов до и после нагрева приведены в табл. 1.

Изменение пиролитических параметров. К основным пиролитическим параметрам, характеризующим нефтегенерационный потенциал пород БС, как сказано выше, относятся S2 и НI. Анализируя температурную динамику этих параметров, можно определить температуру начала преобразования керогена и генерации синтетической нефти, выделить диапазон температуры, в котором происходит преобразование основной массы (объема) ОВ, а также установить температуру, по достижении которой генерационный потенциал можно считать полностью реализованным (снижение параметра S2 на 95%).

На рис. 2 приведен график изменения параметра S2 с увеличением температуры нагрева образцов для всех скважин. На графике видно, что характер изменения параметра S2 идентичен во всех образцах, нагретых в пиролитаторе. Практически полная реализация генерационного потенциала достигается при нагреве до 400 °С. При этом при нагреве до 350 °С параметр S2 снижается в среднем на 40–60% от начального. На этом фоне характер зависимости S2 от температуры в образцах из скважины № 2, нагретых в присутствии воды, заметно отличается. Здесь при нагреве до 350 °С значение параметра S2 снижается на 90%, что может свидетельствовать о более полном преобразовании ОВ в присутствии воды и при пластовом давлении. Уменьшение водородного индекса с

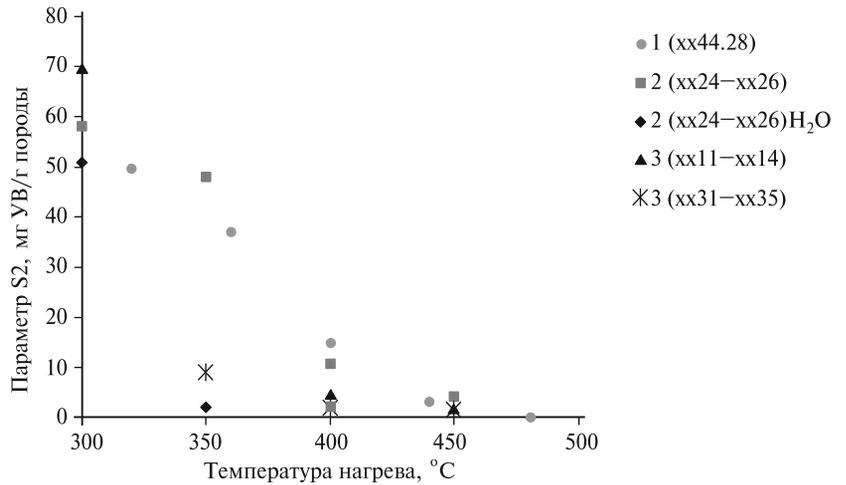


Рис. 2. Зависимость параметра S2 от температуры нагрева пород

ростом температуры нагрева наглядно демонстрирует изменение стадии зрелости ОВ, подтверждая уменьшение генерационного потенциала.

Изменение пустотного пространства. Для анализа пустотного пространства были проведены расчеты общей пустотности и открытой (или эффективной) пустотности до и после проведения экспериментов. Дополнительно проанализировано распределение пустот по объемам и их связанность между собой. На рис. 3 приведены примеры поперечных сечений образцов из скважины № 3 Арчинского месторождения с высоким содержа-

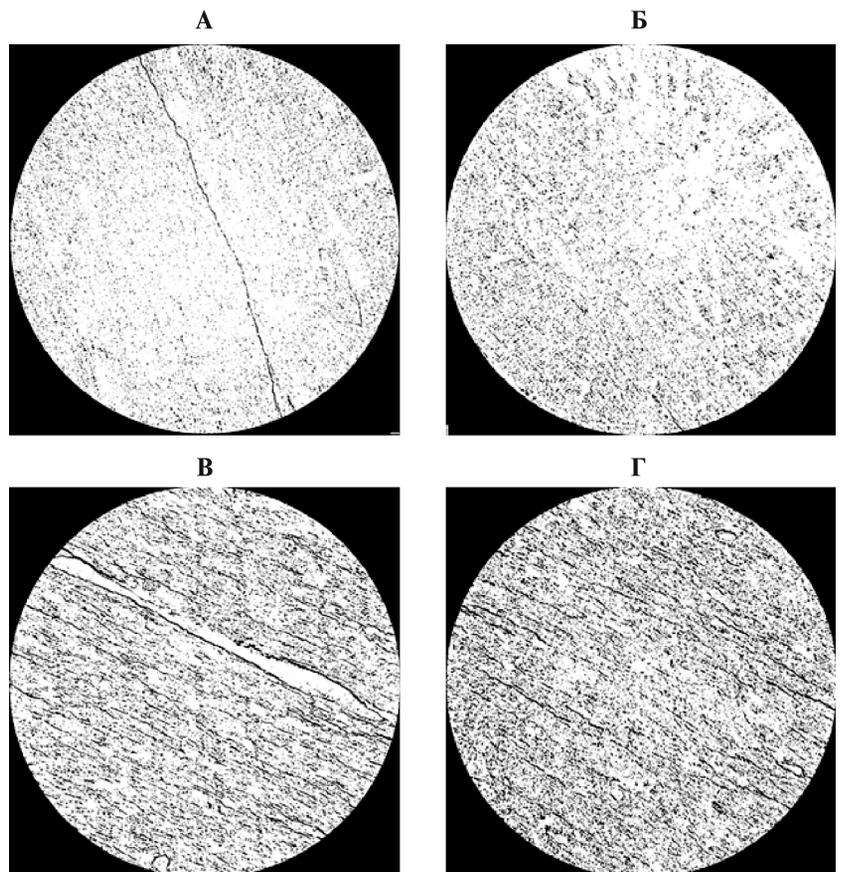


Рис. 3. Поперечные сечения образцов из скважины № 3 Арчинская. Нагрев (°C): А — 300, Б — 350, В — 400, Г — 450

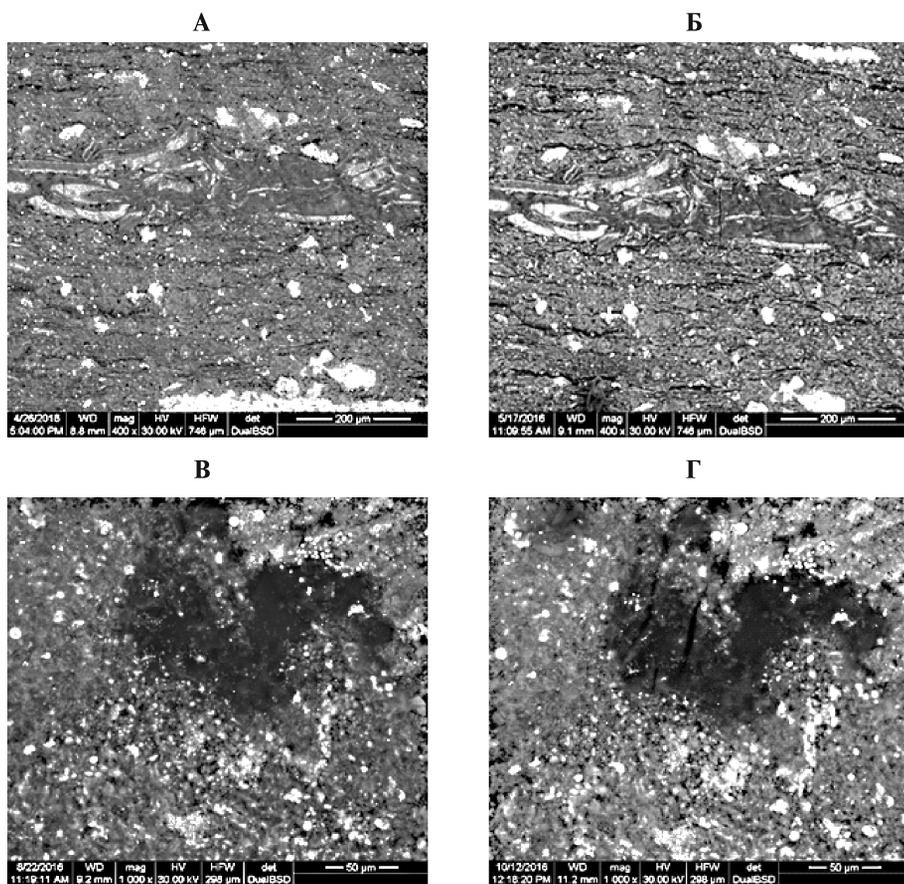


Рис. 4. Снимки поверхности образца на РЭМ. Слева — до нагрева, справа — после нагрева

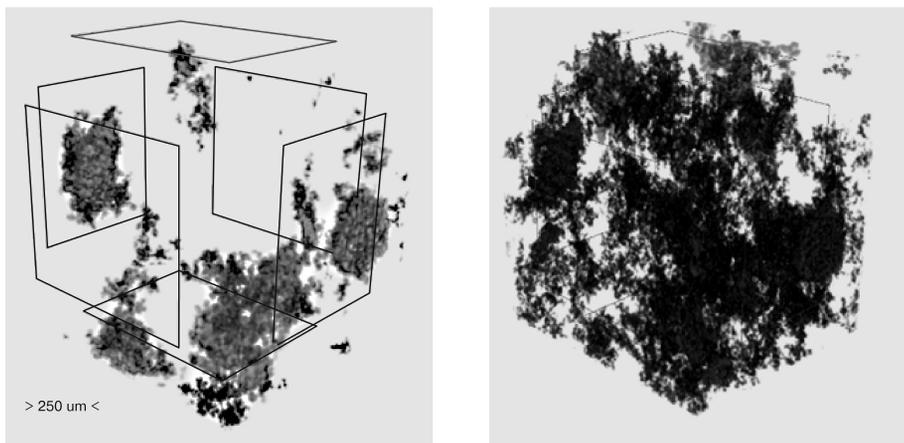


Рис. 5. Трехмерная визуализация связанности объемов пустотного пространства до нагрева (слева) и после нагрева (справа) до 400 °С. Светло-серое — пустоты объемом 10^{-5} – 10^{-4} мм³, темно-серое — 10^{-4} – 10^{-2} мм³

нием ОВ после температурного воздействия. Отметим, что породы из скважины № 3 Арчинская находятся на начальной стадии катагенеза, органическое вещество практически не преобразовано и, соответственно, обладает высоким генерационным потенциалом. Образцы были отобраны в направлении, параллельном общему напластованию пород. В результате нагрева до 400 °С произошло интенсивное растрескивание образца, вследствие чего закрытые ранее поры были вовлечены в общую систему пустотного пространства. В образце,

подвергнувшись нагреву до 450 °С, также наблюдается плотная сеть новообразованных трещин с сопоставимыми значениями пористости в предыдущем образце. Подчеркнем, что при меньшем содержании ОВ (образцы из скважины № 1 и из другого интервала скважины № 3) таких наглядных изменений проследить не удалось.

На рис. 4 приведены снимки поверхности образцов на РЭМ до и после нагрева с разным разрешением для образцов, нагретых до 350 °С. На них видно, как происходит увеличение естественных трещин и образование новых в прослоях, ранее заполненных ОВ (верхние микрофото), также наблюдается образование трещин в ОВ (нижние микрофото). В результате анализа этих изображений можно сделать вывод о том, что изменение пустотности начинает происходить уже при нагреве до 350 °С, в первую очередь за счет крекинга ОВ и образования трещин между ОВ и минеральной матрицей (в частности, вероятно, в результате разного температурного расширения).

Помимо образования новых трещин при нагреве происходит и изменение структуры пустотного пространства. На рис. 5 показана трехмерная визуализация пустотного пространства одного и того же образца до (слева) и после (справа) нагрева. На нем выделены пустоты различного объема. Как видно

на рис. 5, в результате нагрева произошло объединение нескольких ранее не связанных между собой систем пустот в одну общую. При этом за счет крекинга керогена их размер (на снимке слева светлое) увеличился. В результате одновременно увеличились объем пустотного пространства и его связанность. Температурная граница, при которой этот эффект становится особенно заметным, составляет 400 °С. При этом в образцах, нагретых до 450 °С, общая доля высокообъемных систем пустот может достигать 80%.

На рис. 6 приведены графики зависимости пустотности, рассчитанной по данным мКТ, от температуры нагрева. На графике видно, что с ростом температуры пустотность в образцах существенно увеличивается. При этом чем больше ОВ в образце и чем ниже стадия катагенеза, тем большее значение пустотности достигалось. Это связано с большим генерационным потенциалом и, соответственно, большим количеством УВ, которые могут быть получены при крекинге керогена. Характер увеличения объема пустотного пространства хорошо коррелирует с изменением пиролитического параметра S₂ (табл. 1).

В то же время общую тенденцию к увеличению пустотности для всех образцов можно считать одинаковой. Для образцов из скважины № 2, нагрев которых проводился в автоклавах в присутствии воды, увеличение пустотности больше, чем для образцов, нагрев которых осуществлялся в пиролизаторе. Отсюда можно сделать вывод, что повышенное давление и присутствие воды способствуют более раннему и полному преобразованию ОВ, что также подтверждается пиролитическими характеристиками образцов после нагрева. Отметим, что в образцах с повышенным содержанием ОВ при нагреве до температуры 450 °С и выше может происходить уменьшение объема пустотного пространства. Это может объясняться изменениями в минеральной матрице, а также эффектом температурного расширения ее компонентов.

Изменение проницаемости. Ключевое свойство пустотного пространства пород БС с точки зрения гидродинамического моделирования — проницаемость и ее изменение в процессе нагрева. Расчет проницаемости проводили с использованием коммерческого программного обеспечения (ПО), в основе математического аппарата которого лежит решение упрощенных уравнений Навье—Стокса методом конечных объемов. Трехмерная модель пустотного пространства для расчета проницаемости строилась на основе данных мКТ. Так как поровое пространство БС имеет высокую неоднородность по объему,

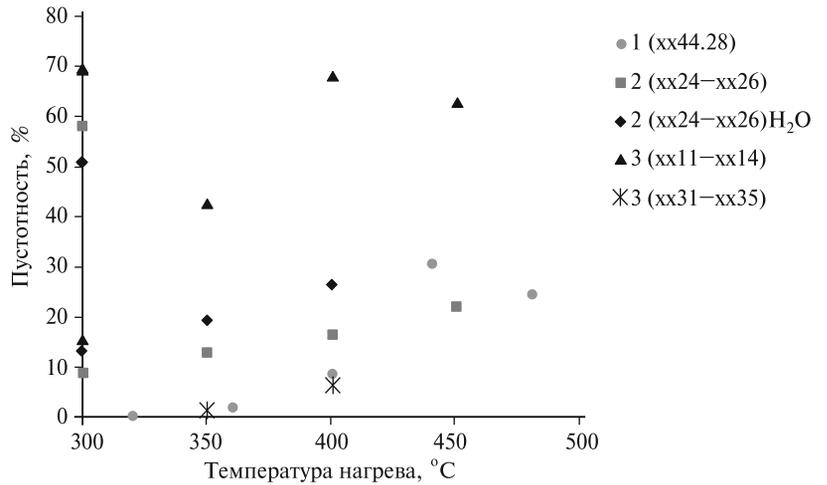


Рис. 6. График изменения пустотного пространства при нагреве образцов

расчет проницаемости проводился на нескольких моделях пустотного пространства меньшего размера, вырезанных из разных частей исходной трехмерной модели пустот. В качестве итоговой проницаемости было принято усредненное зна-

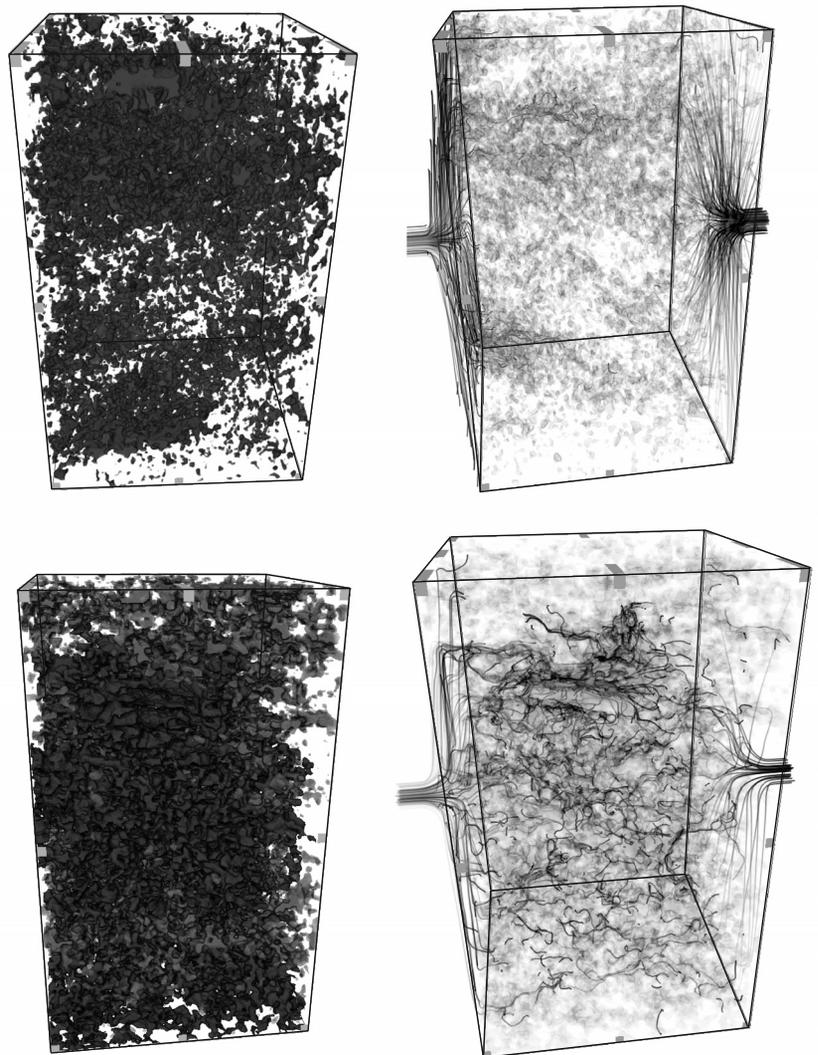


Рис. 7. Визуализация сети поровых каналов и скорости течения по ним флюида при расчете проницаемости

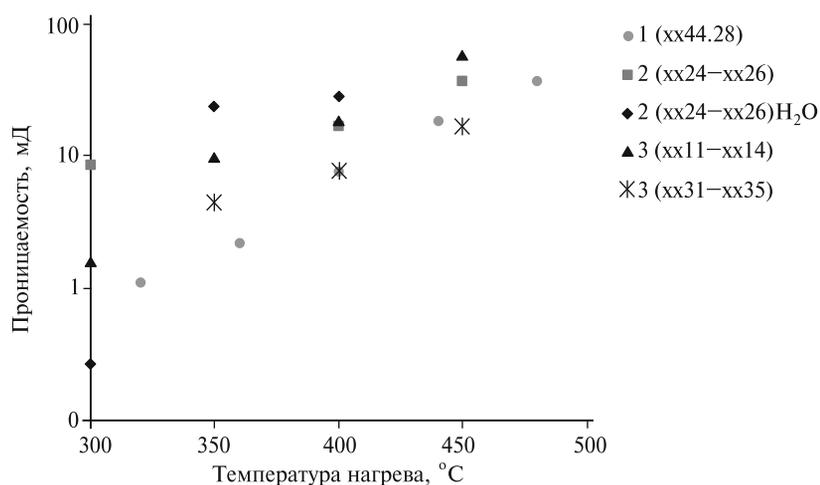


Рис. 8. Зависимость абсолютной проницаемости от температуры нагрева образцов

чение. На рис. 7 приведены примеры визуализации результатов расчета проницаемости.

В результате расчетов построены графики зависимости изменения абсолютной проницаемости от температуры нагрева породы для всех образцов (рис. 8). Как видно на рис. 8, для всех образцов наблюдается тенденция к увеличению проницаемости от температуры нагрева. Таким образом, нагрев уже до температуры 350 °C позволяет создавать развитую систему трещин в образце, что будет как повышать дебит за счет открытия закрытых ранее пор и создания каналов для извлечения УВ, сформировавшихся в результате температурного воздействия, так и позволит проводить дальнейший прогрев породы, например, за счет закачки в пласт теплоагента.

Заключение. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о значительном влиянии нагрева на ФЕС пород баженовской свиты. В пропластках с высоким начальным со-

держанием ОВ объем пустотного пространства может увеличиваться до 7 раз по сравнению с начальным за счет реализации генерационного потенциала. Наряду с общим увеличением объема пустот происходит и увеличение связанного объема пустот вследствие образования обширной сети трещин и каналов, соединяющих изолированные поры.

Изменение объема и структуры пустотного пространства при нагреве влияет и на расчетную проницаемость образцов пород. Образование сети трещин при нагреве до 400–450 °C приводит к многократному увеличению проницаемости. Этот эффект очень важно учитывать при оценке теплового

воздействия при гидродинамическом моделировании циклической закачки теплоносителя в пласт. В ходе реализации этой технологии теплоноситель в прогретой зоне на втором и последующих циклах будет фильтроваться быстрее, и, соответственно, фронт прогрева будет уходить дальше, чем при постоянной проницаемости в прогретой зоне.

Отметим, что при температуре 350 °C и выше генерационный потенциал керогена реализуется на 90–95%, что позволяет рассчитать и смоделировать процессы увеличения дебита из скважин. Таким образом, полученные температурные зависимости пустотности, проницаемости и пиролитических параметров для пород баженовской свиты с разным содержанием ОВ, находящегося на разных стадиях зрелости, могут быть применены при гидродинамическом моделировании технологий теплового воздействия на пласты БС с целью оценки перспективности этих методов для увеличения дебита из скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гончаров И.В., Харин В.С. Использование пиролиза в инертной атмосфере при исследовании органического вещества пород // Проблемы нефти и газа Тюмени. 1982. Т. 56.

Бычков А.Ю., Калмыков Г.А., Бугаев И.А. и др. Экспериментальные исследования получения углеводородных флюидов из пород баженовской свиты при гидротермальных условиях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 4. С. 34–39.

Корост Д.В., Надежкин Д.В., Ахманов Г.Г. Изучение пустотного пространства нефтематеринской породы при генерации углеводородов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2012. № 4. С. 32–37.

Лопатин Н.В., Емец Т.П. Пиролиз в нефтегазовой геохимии. М.: Наука, 1987. 143 с.

Alekseev Yu.V., Erofeev A.A., Pachezhertsev A.A. et al. Prospects for use of thermochemical recovery methods for development of the Bazhenov formation // Oil Industry. 2015. Vol. 10. P. 93–97.

Behar F., Beaumont V., De B. Penteadó H.L. Rock-Eval 6 Technology: Performances and Developments // Oil & Gas. Sci. and Technology. 2001. Vol. 56, N 2. P. 111–134.

Chuginov S.S., Kazak A.V., Cheremisin A.N. Integration of X-ray micro computed tomography and focused ion-beam scanning electron microscopy data for pore-scale characterization of Bazhenov formation, Western Siberia // Oil Industry. 2015. Vol. 10. P. 44–49.

Espitalié J., Deroo G., Marquis F. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications // Oil & Gas. Sci. and Technology. 1985. Vol. 40, N 5. P. 563–579.

Korost D., Korost, D., Mallants, D., Balushkina N. et al. Determining physical properties of unconventional reservoir rocks: from laboratory methods to pore-scale modeling // SPE Unconventional Resources Conference and Exhibition-Asia Pacific. Soci. of Petroleum Engineers, 2013.

Kibodeaux K.R. Evolution of porosity, permeability, and fluid saturations during thermal conversion of oil shale // SPE annual technical conference and exhibition. Soci. of Petroleum Engineers, 2014.

Mehrabi M., Pasha M., Jia X., Hassanpour A. Pore volume analysis of gas shale samples using 3-D X-ray micro tomography // SPE Offshore Europe Conference and Exhibition. Soci. of Petroleum Engineers, 2015.

Panahi H., Kobchenko M., Renard F. et al. A 4D synchrotron X-ray tomography study of the formation of hydrocarbon migration pathways in heated organic-rich shale // Arxiv preprint arxiv:1401.2448. 2014.

Taud H., Martinez-Angeles R., Parrot J.F., Hernandez-Escobedo L. Porosity estimation method by X-ray computed tomography // J. Petrol. Sci. and Engineering. 2005. Vol. 47. N 3. P. 209–217.

Tiwari P., Deo M., Lin C.L., Miller J.D. Characterization of oil shale pore structure before and after pyrolysis by using X-ray micro CT // Fuel. 2013. Vol. 107. P. 547–554.

Vandersteen K., Busselen B., Van Den Abeele K., Carmeliet J. Quantitative characterization of fracture apertures using microfocus computed tomography // Geol. Soc. Lond. Spec. pub. 2003. Vol. 215. P. 61–68.

Van Geet M., Swennen R., Wevers M. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography // Sediment. Geol. 2000. Vol. 132. P. 25–36.

Поступила в редакцию
16.11.2016