



ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ КЕРНА

А.А.Ефимов¹, Я.В.Савицкий¹, С.В.Галкин^{*1}, Е.В.Соболева², В.Ш.Гурбанов³

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; ²ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», Пермь, Россия; ³Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Study of Wettability of Reservoirs of Oil Fields by the Method of X-ray Tomography Core

A.A.Efimov¹, Ya.V.Savitskiy¹, S.V.Galkin¹, E.V.Soboleva², V.Sh.Gurbanov³

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;

²LLC «LUKOIL-PERM», Perm, Russia; ³Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Abstract

The experience of the study of wettability of oil reservoirs on the core material using the method of x-ray tomography. The process of hydrophobization of rocks significantly changes the geological and technological conditions of oil fields. Standard methods of evaluating the wettability of the reservoir do not give a fully reliable assessment of this important for the decision of technological problems of the parameter. Developed a method of evaluating the wettability of reservoirs, based on the scan x-ray emission of core samples in three states: the dry sample is saturated with water and residual water saturation. Method x-ray tomography allows to visualize the distribution pattern in the core areas with hydrophilic and hydrophobic surface. The connection of the hydrophobicity of the collectors with specific electrical resistance of rocks, which allows to assess their wettability to complexity data core and methods of geophysical research of wells.

Keywords:

X-ray tomography;
X-ray contrast solution;
Core; Wettability;
Hydrophilic collector;
Hydrophobic collector;
Electrical resistivity;
Lateral logs;
Side logging;
Injectivity

© 2016 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

В настоящее время для территории Пермского края ввиду длительной эксплуатации нефтяных месторождений актуальна задача стабилизации добычи. Основным объектом разработки являются терригенные пласты визейского возраста, эксплуатация которых идет, как правило, с применением методов интенсификации отборов и компенсирующим это заводнением пластов. Анализ разработки ряда месторождений севера Пермского края показывает, что для них существуют зоны пониженного пластового давления с недостаточной компенсацией отборов закачкой воды, что обусловлено низкой приемистостью нагнетательных скважин.

В работе [1] показано, что существует закономерность скважин с низкой приемистостью и аномально высокими удельными электрическими сопротивлениями (УЭС) коллекторов. Если в

целом УЭС для терригенных пород, определенные методом бокового каротажа (БК), составляют от 1 до 100 Ом·м, то для некоторых пластов (зон) установлены аномальные сопротивления, которые могут превышать 1000 Ом·м. Высокие удельные сопротивления указывают либо на низкую водонасыщенность пористой среды, либо на отсутствие непрерывности водной фазы, что может иметь место в гидрофобных системах. С учетом этого в работе [1] сделано предположение о связи участков аномально высоких УЭС и низкой приемистости скважин с гидрофобностью коллекторов.

Гидрофобность коллекторов в свою очередь оказывает существенное влияние на эффективность эксплуатации как нагнетательных, так и добывающих скважин. Так в работе [2] для территории исследования приведены примеры изменения продуктивности скважин в различных геологических условиях разработки. С учетом этого для обоснования эффективных технологических решений необходима оценка степени гидрофобизации коллекторов.

*E-mail: doc_galkin@mail.ru

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20160400298>

Таблица 1

Основные петрофизические характеристики образцов керн

обр. №	Месторождение	K_n , %	k , 10^{-3} мкм ²	$K_{об}$, %	M , д. ед.	$УЭС_{об}$, Ом·м	$УЭС_{об}$, Ом·м	$УЭС_{БК}$, Ом·м
1	Сибирское	13.0	150.8	5.2	0.02	3.1	95	280
2	Уньвинское	21.4	379.4	5.2	0.02	1.1	94	250
3	Сибирское	14.1	106.9	5.4	0.02	1.8	90	185
4	Уньвинское	21.5	749.3	4.5	0.02	1.5	220	1500
5	Уньвинское	13.5	55.7	12.2	0.03	1.9	137	280
6	Шершневское	18.1	334.7	9.3	0.03	2.3	25	3
7	Сибирское	15.6	189.1	12.7	0.18	2.0	30	100
8	Сибирское	11.4	23.0	14.0	0.30	4.0	36	160
9	Сибирское	13.6	143.0	14.4	0.41	2.1	133	150
10	Сибирское	14.7	87.7	13.1	0.65	2.5	24	950
11	Шершневское	17.4	276.4	8.4	0.80	2.2	56	нет данных
12	Уньвинское	14.6	147.4	7.1	0.82	2.7	76	110

Постановка задачи оценки смачиваемости поверхности горных пород. Петрофизические исследования керн

В естественных условиях микроструктурная смачиваемость весьма неоднородна на уровне отдельных пор и капилляров, ввиду чего гидрофобизация поверхности может различаться даже в пределах одного образца керн. Распределение гидрофобных и гидрофильных участков, их число и чередование зависят от природы породообразующих минералов, структуры порового пространства, физико-химических свойств насыщающих жидкостей и содержания в нем остаточной воды [3,4].

Известны различные методы дифференциальной и интегральной оценки смачиваемости поверхности пород-коллекторов, описание основных методик рассмотрено в работах [5,6]. Однако, известные на сегодня методы являются косвенными, давая только количественное представление о степени смачиваемости. В отличие от них метод рентгеновской томографии позволяет визуализировать структуру порового пространства горных пород и вмещающих флюидов. С учетом этого в данной работе предложены методические подходы оценки визуализации неоднородности распределения флюидов в емкостном пространстве коллекторов методом рентгеновской томографии. Целью работы является установление значимых различий пространственного распределения флюидов для гидрофильных и гидрофобных пород, проверка зависимости сопротивлений пород от степени их гидрофобизации.

Поставленная задача решалась на коллекции из 12 стандартных петрофизических образцов керн диаметром 26 мм визейских отложений Сибирского, Шершневского и Уньвинского месторождений из интервалов пластов с различными сопротивлениями по данным БК ($УЭС_{БК}$). Для

каждого образца керн, помимо томографических исследований, определялись пористость (K_n), абсолютная проницаемость (k), коэффициент остаточной водонасыщенности ($K_{об}$), удельное электрическое сопротивление водонасыщенного образца ($УЭС_{об}$) и образца с остаточной водой ($УЭС_{об}$). Данные определений петрофизических характеристик приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, отобранные для исследований образцы песчаников имеют следующие диапазоны значений петрофизических параметров: K_n от 11.4 до 21.5% (среднее значение 15.7%), k от 23 до $749 \cdot 10^{-3}$ мкм² (среднее значение $220 \cdot 10^{-3}$ мкм²), $K_{об}$ от 4.5 до 14.4% (среднее значение 9.3%). Таким образом, все представленные образцы являются коллекторами с широким варьированием фильтрационно-емкостных свойств.

Для контроля оценки гидрофобности использован динамический метод Амотта-Тулбовича. Сущность метода заключается в капиллярном вытеснении воды из полностью водонасыщенного образца углеводородной жидкостью с последующим вытеснением из образца углеводородной жидкости водой [7]. Количественной мерой гидрофобности при этом является параметр M , где для полностью гидрофильного образца $M=1$, а для полностью гидрофобного $M=0$. В результате для исследованных образцов диапазон параметра M охватил породы с различной степенью гидрофобизации (от 0.02 до 0.83 д.ед.), что соответствует поставленным задачам.

Из результатов определений $УЭС_{об}$ видно, что все насыщенные моделью пластовой воды образцы имеют низкие значения (табл.1), что подтверждает их коллекторские свойства. Для образцов с остаточной водонасыщенностью диапазон $УЭС_{об}$ значительно расширяется, преимущественно ввиду различий в смачиваемости пород. Анализ сопро-

тивлений по данным бокового каротажа $УЭС_{БК}$ интервалов, из которых отобран керн, показывает, что в ряде случаев отмечены аномально высокие сопротивления.

Различия в величинах $УЭС_{об}$ и $УЭС_{БК}$ обусловлено несоответствием в размерах изучаемых объектов. По данным бокового каротажа мы получаем усредненную оценку в пределах первых метров пласта, в то время как керн характеризует первые сантиметры горной породы. Необходимо отметить, что различия в значениях $УЭС$ по керну и по результатам БК также обусловлены влиянием экстракции на смачиваемость образцов керна, в то время как $УЭС_{БК}$ представляют оценку сопротивления в естественных пластовых условиях. В связи с этим данные $УЭС_{БК}$ при исследовании смачиваемости представляется более объективной оценкой чем $УЭС_{об}$. В целом оба показателя дополняют друг друга и при дальнейших исследованиях учтены в комплексе. Современные подходы корреляции данных ГИС и результатов лабораторных исследований керна при изучении терригенных коллекторов представлены в работах [8,9].

Методика исследования смачиваемости горных пород с использованием рентгеновской томографии керна

Следующим этапом проведения работ являлось исследование керна методом рентгеновской томографии. При рентгентомографических исследованиях использовалась микрофокусная система рентгеновского контроля с функцией компьютерной томографии NikonMetrology XT H 225. Согласно стандартным подходам исследование образцов керна проводится в 4 последовательных этапа:

1. Сканирование объекта;
2. Реконструкция объекта;
3. Компьютерное моделирование объекта;
4. Расчет размеров и объемов элементов внутренней структуры [10].

Компьютерное моделирование объекта и последующие расчеты проводились в программном комплексе AvizoFire (Visualization Sciences Group, Франция), возможности данного программного продукта рассмотрены в работах [11,12], а использование метода при исследованиях керна в работах [13,14].

Методика установления гидрофобной поверхности заключалась в сканировании образцов керна в трех состояниях: сухой образец, насыщенный NaI, с остаточной водой. При сканировании в разных состояниях образец находился в одном и том же фиксированном относительно источника рентгеновского излучения и детектора положении. Это условие осуществлялось определением координат образца в пространстве с помощью манипулятора рентгеновской системы. Требования, предъявляемые к положению образца во время сканирования в разных состояниях, обусловлены необходимостью последующих сопоставлений между собой получаемых 2D-срезов и 3D-моделей. При этом разрешение рентгеновских снимков должно оставаться неизменным.

Изучение водонасыщенности пород методом микрофокусной рентгеновской томографии ограничивается низкой проникающей способностью для рентгеновских лучей большинства флюидов, в том числе и четырехнормального раствора хлорида натрия (NaCl), используемого в качестве модели пластовой воды при насыщении керна в лабораторных условиях. Раствор NaCl в рентгеновском излучении имеет плотность сопоставимую с плотностью воздуха, что не позволяет отличить остаточную воду от воздуха заполняющего емкостное пространство горной породы. Для улучшения эффективности проведения томографических исследований в качестве модели пластовой воды использовался раствор йодида натрия (NaI). Раствор NaI имеет рентгеновскую плотность близкую к плотности минерального каркаса горной породы, что позволяет использовать его в качестве рентгеноконтрастного насыщающего раствора [15,16].

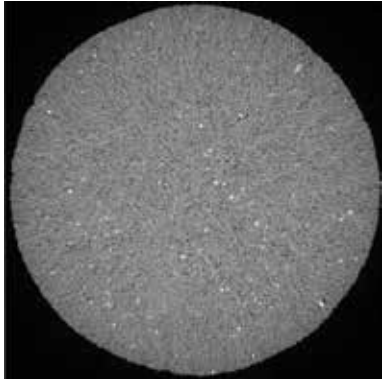
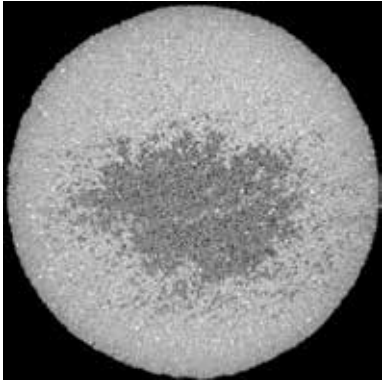
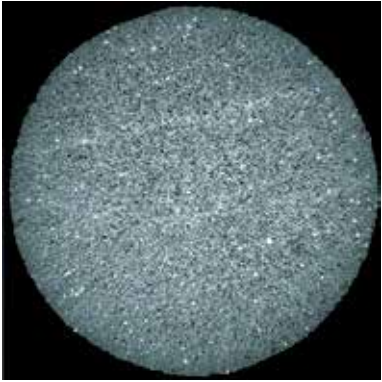
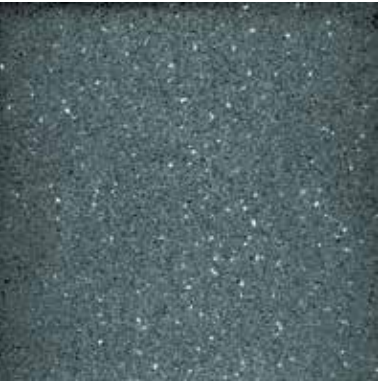
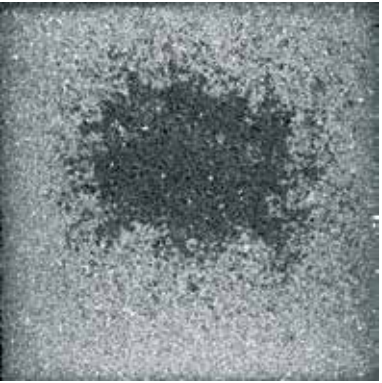
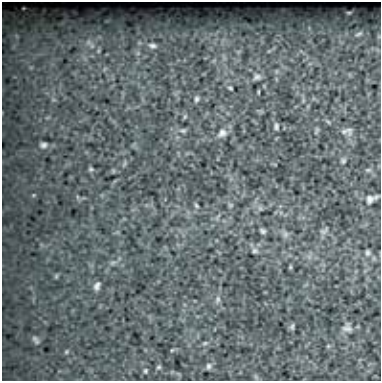
После сканирования образцов насыщенных раствором NaI в них моделировалась остаточная водонасыщенность. Моделирование проводилось методом полупроницаемой мембраны при избыточном давлении 0.3 МПа в течение 3-х суток. Образцы с остаточной водой помещались в керосин в целях предотвращения испарения воды, донасыщались и сканировались в этом состоянии. Подготовка образцов на всех этапах осуществлялась согласно руководящим документам по исследованию керна материала.

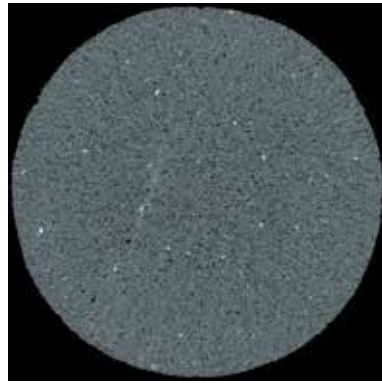
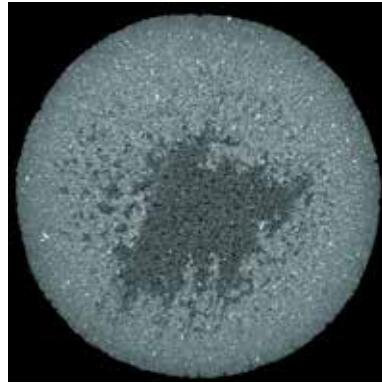
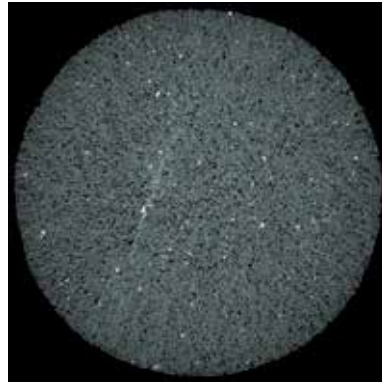

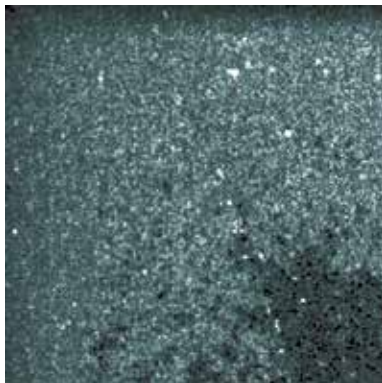
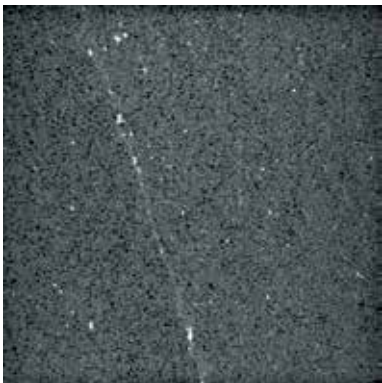
Анализ результатов оценки смачиваемости коллекторов методом рентгеновской томографии

Продольные и поперечные 2D-срезы, являясь результатом сканирования образцов рентгеновским излучением, представляют собой изображения в оттенках серого. Более темным оттенкам соответствует менее плотная для рентгеновского излучения среда, в большей степени пропускающая излучение. При диаметре образцов 26 мм и технических характеристиках томографа минимальный размер фиксируемого объекта составляет – 0.03 мм.

2D-срезы сгруппированы в зависимости от состояния образца во время сканирования: сухой образец, насыщенный NaI, с остаточной водой (рис.1–4). Каждый срез имеет привязку по координатным плоскостям. Для иллюстрации рентгеновской томографии в статье использованы наиболее характерные изображения: для образцов с подтвержденной гидрофобностью это 2D-срезы на рисунках 1 и 2, а для образцов с отсутствием гидрофобной поверхности на рисунках 3 и 4.

Из рисунков видно, что в сухом состоянии в образцах четко выделяются три фазы: пустоты (от темно-серого до черного), минеральный каркас горной породы (серый и светло-серый), минеральные включения повышенной относительно горной породы плотности (белый). Изображения образцов с остаточной водой фактически не отличаются от сухих образцов, что объясняется относи-

	Сухой образец	Насыщенный NaI	С остаточной водой
2D-срезы поперечного сечения			
	Xy354	Xy337	Xy342
2D-срезы продольного сечения			
	Xz348	Xz350	Xy347
Рис.1. Образец № 2. 2D-срезы продольного и поперечного сечения			

	Сухой образец	Насыщенный NaI	С остаточной водой
2D-срезы поперечного сечения			
	Xy314	Xy320	Xy315
2D-срезы продольного сечения			
	Xz354	Xz340	Xz342
Рис.2. Образец № 4. 2D-срезы продольного и поперечного сечения			

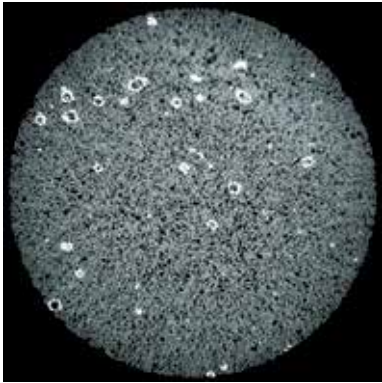
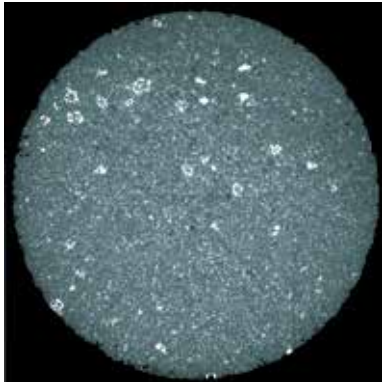
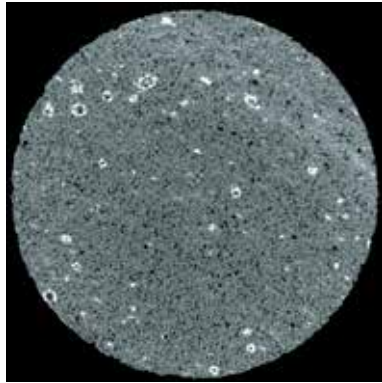
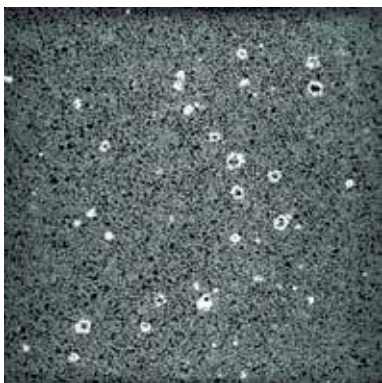
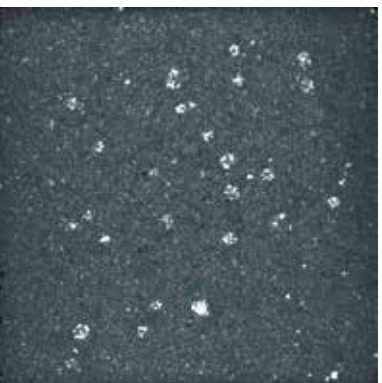
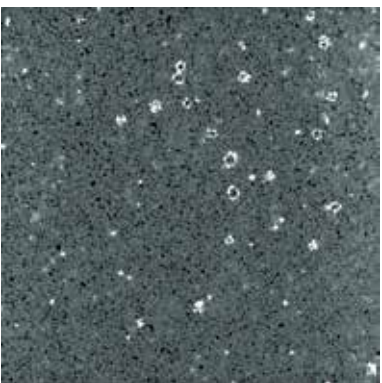
	Сухой образец	Насыщенный NaI	С остаточной водой
2D-срезы поперечного сечения			
	Xy336	Xy336	Xy324
2D-срезы продольного сечения			
	Xz340	Xz344	Xz340

Рис.3. Образец № 7. 2D-срезы продольного и поперечного сечения



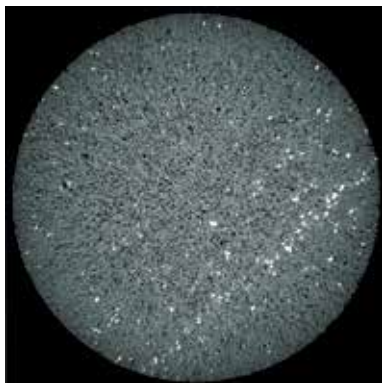
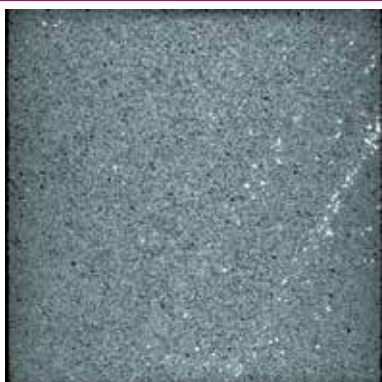
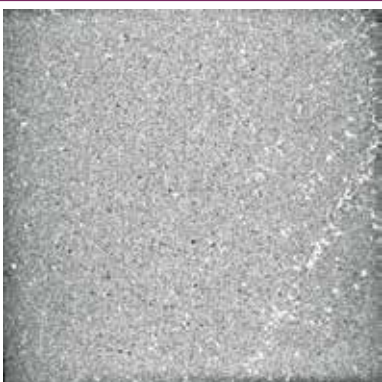
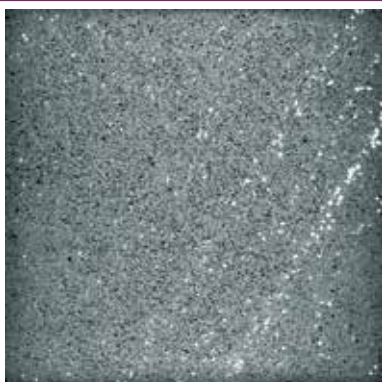
	Сухой образец	Насыщенный NaI	С остаточной водой
2D-срезы поперечного сечения			
	Xy368	Xy376	Xy369
2D-срезы продольного сечения			
	Xz352	Xz357	Xz352

Рис.4. Образец № 12. 2D-срезы продольного и поперечного сечения

тельно невысоким содержанием остаточной воды, обусловленным межгранулярной равномерно распределенной по всему объему образца открытой пористостью. Для образцов насыщенных NaI характер изображений зависит от того проявилась гидрофобная поверхность или нет.

В образцах насыщенных NaI с подтвержденной гидрофобностью (рис.1,2) присутствуют три фазы: минеральный каркас горной породы (светло серый), минеральные включения повышенной относительно горной породы плотности (белый), гидрофобная поверхность (темно-серый). Наличие зоны гидрофобной поверхности проявляется в недонасыщении центральной части образцов. Это, по мнению авторов, обусловлено тем, что раствор NaI, ввиду низкой смачиваемости поверхности породы, в меньшей степени проникает в данную зону. Необходимо отметить, что при большом разрешении зоны гидрофобизации на 2D-срезах видно, что некоторая часть образца и здесь заполнена раствором NaI, что подтверждает высокую неоднородность на микроуровне характера смачиваемости горных пород.

Для образцов с неподтвержденной гидрофобной поверхностью (рис.3,4) установлены только две фазы: минеральный каркас горной породы (светло серый) и минеральные включения повышенной относительно горной породы плотности (белый). Для всего объема данных образцов характерна их полная пропитка раствором NaI.

Кроме представления о характере пространственного распределения в образце пористости и гидрофобной поверхности, рентгеновская томография позволяет провести сопоставление 3D-моделей образца в сухом состоянии и насыщенного с целью оценки изменения порового объема ($V_{пор}$ мм³). Как можно увидеть на рисунках 1 и 2, в насыщенном состоянии объем приходящийся на гидрофобную поверхность – это участки образца, в которых насыщение раствором NaI не произошло. В образцах с неподтвержденной гидрофобной поверхностью такие участки отсутствуют, так как всё связанное емкостное пространство насыщенно рентгеноконтрастным раствором. Исключение составляют крупные пустоты, из которых во время сканирования, проходящего около 4 часов, вода уходит под действием силы тяжести.

Расположение гидрофобной поверхности в центральной части образцов, по мнению авторов, обусловлено их недоэкстрагированностью. Экстракция исследуемых образцов проводилась в аппаратах Сокслета согласно ГОСТ 26450.0-85. В реальных пластовых условиях гидрофобизация зерна проявляется по всему объему образца, в то время как после экстракции гидрофобная поверхность локализуется только в его центральной части. Это связано с тем, что в приповерхностной части образца экстракция происходит значительно интенсивнее, чем в его центральной части. В результате при сложившихся на практике величинах длительности (интенсивности) экстрагирования в центральной части образца зерна сохраняет-

ся природная гидрофобизация.

Следует отметить, что по опыту авторов исследований зерна методом рентгеновской томографии (более 200 образцов терригенных и карбонатных коллекторов), недонасыщенность в центральной части образцов никогда не наблюдалась. Данный эффект авторами получен впервые именно при томографических исследованиях визейских отложений Соликамской депрессии. С учетом этого, в данной работе исследовались образцы преимущественно из высокоомной по боковому каротажу части разреза, что рассматривалось как вероятный признак гидрофобности.

Рентгеновская томография посредством установления объемов пор в сухом и насыщенном состоянии позволила провести качественную и количественную оценку степени смачиваемости. Результаты полученных на зерне экспериментов совместно с данными $УЭС_{БК}$ пласта представлены в таблице 2.

Качественная оценка смачиваемости устанавливалась по наличию-отсутствию в объеме образца гидрофобной поверхности, т.е. участков с низкой степенью пропитки. Необходимо отметить, что для ряда образцов распределение в их объеме поверхности гидрофобизации имеет неравномерный характер. Так образец №1, для которого в центральной части установлены как промытые, так и объемы с остаточной гидрофобизацией, отнесен к низкогидрофобным. Образец №11, для которого гидрофобизация проявляется лишь эпизодически в крайне незначительном объеме, отнесен к гидрофильным.

С целью количественной оценки смачиваемости введен показатель – степень пропитки. По причине неравномерности распределения участков недонасыщенности в объеме образца количественная оценка проводилась не по всему образцу, а для 3D-модели куба со стороной в 10 мм «вырезанного» из гидрофобной части образца (для гидрофильных образцов – из наиболее гидрофобной) и представляет собой осредненную оценку пропитки типичного участка гидрофобизации. Данные об объемах пор в сухом и насыщенном образце и степени пропитки представлены в таблице 2.

В работе [1] в результате сопоставления $УЭС_{БК}$ и параметра M для интервалов разреза с $УЭС_{БК}$ менее 120 Ом·м коллектор отнесен к преимущественно гидрофильному типу. Интервалы с $УЭС_{БК}$ более 200 Ом·м отнесены к гидрофобным коллекторам. Для диапазона $УЭС_{БК}$ от 120 до 200 Ом·м тип коллектора по смачиваемости неоднозначен. Пользуясь классификацией из работы [1], оценим сопоставимость результатов величин $УЭС$ с выводами о гидрофобности образцов по томографии зерна.

Для гидрофильных по томографии образцов №№ 6, 7, 11, 12 установлены сопротивления менее 120 Ом·м. Для гидрофильного образца №11 отсутствуют данные БК (брак каротажа), но низкое значение $УЭС_{об} = 56$ Ом·м также позволяет судить о его вероятной гидрофильности.

Таблица 2

Сопоставление величин УЭС с результатами рентгеновской томографии образцов керна

Обр. №	УЭС _{об'} Ом·м	УЭС _{БК'} Ом·м	V _{пор'} мм ³		Степень пропитки, %	Оценка смачиваемости по томографии
			Сухой образец	Насыщенный NaI		
1	95	280	21.2	18.4	87	низкогидрофобный
2	94	250	32.2	12.7	39	гидрофобный
3	90	185	48.3	45.9	95	гидрофильный
4	220	1500	64.6	38.0	59	гидрофобный
5	137	280	72.7	41.3	57	гидрофобный
6	25	3	27.4	25.2	92	гидрофильный
7	30	100	66.9	65.3	98	гидрофильный
8	36	160	91.9	36.7	40	гидрофобный
9	133	150	42.8	30.4	71	гидрофобный
10	24	950	17.7	10.8	61	гидрофобный
11	56	нет данных	89.5	78.3	88	гидрофильный
12	76	110	34.7	33.2	96	гидрофильный

Для гидрофобных образцов №№ 1, 2, 4, 5, 10 сопротивления УЭС_{БК} превышают 200 Ом·м. Гидрофобные по томографии образцы №№ 8, 9 по УЭС_{БК} попадают в промежуточный диапазон сопротивлений от 120 до 200 Ом·м.

Из таблицы 2 также видно, что показатель степени пропитки в целом хорошо согласуется с качественной оценкой гидрофобизации образцов по данным томографии. Для всех гидрофильных образцов степень пропитки превышает 88%, в то время как для гидрофобных – минимальная пропитка составляет 39%. Среди гидрофобных наибольшая пропитка установлена для образца №1 (87%), для которого, как было указано выше, по данным томографии участки гидрофобизации чередуются с гидрофильными.

В результате все 5 исследованных гидрофильных по томографии образцов относятся к низкоомным (менее 120 Ом·м) интервалам коллекторов. Из 6 гидрофобных по томографии образцов 4 имеют сопротивления УЭС_{БК} более 200 Ом·м, 2 образца отнесены к промежуточному интервалу УЭС_{БК} (от 120 до 200 Ом·м). Здесь необходимо отметить, что для визейских коллекторов Соликамской депрессии

доля скважин со значениями УЭС_{БК} в интервале от 120 до 200 Ом·м составляет менее 12%, что позволяет для подавляющего большинства скважин судить о смачиваемости коллектора по данным БК.

Таким образом, рентгеновская томография позволила визуализировать в образцах керна участки с гидрофобной поверхностью. Далеко не во всех случаях результаты определения смачиваемости образцов по динамическому методу Амотта-Тулбовича и томографии совпали. В ряде случаев для гидрофильных образцов (№№ 3, 6, 7) по методу Амотта-Тулбовича установлено значительное занижение параметра *M*. Различия в результатах обусловлены по всей видимости тем, что при определениях динамическими методами в основном учитывается диаметр капилляров. Разрешение томографии при проведенных исследованиях ограничено 0.03 мм, капилляры меньшего диаметра методом не фиксируются. Зато рентгеновская томография является прямым методом исследования емкостного пространства, позволяя учитывать влияние на смачиваемость комплекса факторов минералогического характера (состав породы, цемента, структурные связи и др.).

Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие выводы:

- применение рентгеновской томографии впервые позволило визуализировать в образцах керна участки локализации гидрофобной поверхности, причем, визуализация возможна преимущественно в образцах со 100% водонасыщенностью.
- для территории исследования впервые на керновом материале прямым методом подтверждено наличие гидрофобных коллекторов в визейских эксплуатационных объектах.
- при сканировании водонасыщенного керна рентгеновская томография позволяет не только визуализировать, но и по разности объемов пор в сухом и насыщенном состояниях рассчитать объем, занимаемый в образце гидрофобной поверхностью.
- установлены закономерности влияния смачиваемости поверхности на электрическую проводимость горных пород, как по данным исследований на керне, так и в скважине. Возможность прогноза наличия гидрофобного коллектора по данным бокового каротажа является важным практическим выводом данной работы.

Литература

1. Е.В.Соболева, С.В.Галкин, А.А.Ефимов. Анализ геолого-геофизических характеристик терригенных коллекторов при прогнозе приемистости скважин месторождений Соликамской депрессии //Нефтяное хозяйство. –2014. –№6. –С.20-22.
2. П.Ю.Илюшин, Р.М.Рахимзянов, Д.Ю.Соловьев, И.Ю.Колычев. Анализ проведения геолого-технических мероприятий по увеличению продуктивности добывающих скважин на нефтяных месторождениях Пермского края //Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. –2015. –Т. 14. –№15. –С.81–89.
3. Н.Н.Михайлов, К.А.Моторова, Л.С.Сечина. Геологические факторы смачиваемости пород-коллекторов нефти и газа //Деловой журнал «Neftegas.ru». –2016. –№3. –С.80-90.
4. В.Г.Жогло, А.В.Халецкий. О роли капиллярной пропитки в извлечении нефти из карбонатных пород коллекторов на примере подсолевых залежей нефти Припятского прогиба //SOCAR Proceedings. –2010. –№4. –С.36–38.
5. Ш.К.Гиматудинов, А.И.Ширковский. Физика нефтяного и газового пласта. М.: Альянс, 2005.
6. Н.Ю.Нестеренко. Смачиваемость пород-коллекторов пластовыми флюидами //Геология нефти и газа. –1995. –№5. –С. 26-36
7. В.М.Добрынин, Б.Ю.Вендельштейн, Д.А.Кожевников. Петрофизика (Физика горных пород). М.: РГУ нефти и газа им И.М.Губкина, 2004.
8. М.М.Искандеров. Комплексная интерпретация результатов ГИС при изучении терригенных разрезов // SOCAR Proceedings. –2014. – №3. –С.4–10.
9. Н.С.Шиланов, Б.Б.Хибасов, К.С.Байтенов. Особенности интерпретации материалов каротажа по новым скважинам //SOCAR Proceedings. –2011. –№ 3. –С.16–19.
10. S.V.Galkin, A.A.Efimov, S.N.Krivoshchekov, et al. X-ray tomography in petrophysical studies of core samples from oil and gas fields //Russian Geology and Geophysics. –2015. –No. 5. –P.782–792.
11. H.Okabe, M.J.Blunt. Pore space reconstruction of vuggy carbonates using microtomography and multiple - point statistics //Water Resources Research. –2007. –Vol. 43. –P. W12S02.
12. S.Berg, R.Armstrong, H.Ott, et al. Multiphase flow in porous rock imaged under dynamic flow conditions with fast x-ray computed microtomography //Petrophysics. –2014. –Vol. 55. –No.4. –P.304-312.
13. Я.В.Савицкий. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании керна нефтяных и газовых месторождений //Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. –2015. –Т. 14. –№15. –С.28–37.
14. А.А.Налетова, А.В.Олейник, П.А.Глазунов, П.В.Шевелёв. Оценка влияния неопределённости функций относительной фазовой проницаемости по газу на показатели разработки на примере месторождения X // SOCAR Proceedings. –2011. –№ 2. –С.25–34.
15. B.L.Alemu, E.Aker, M.Soldal, et al. Effect of sub-core scale heterogeneities on acoustic and electrical properties of a reservoir rock: a CO2 flooding experiment of brine saturated sandstone in a computed tomography scanner //European Association of Geoscientists & Engineers. Geophysical Prospecting. –2012. –Vol. 61. –P. 235-250.

References

1. E.V.Soboleva, A.A.Efimov. The analysis of geological and geophysical characteristics of terrigenous reservoirs at the forecast injectability of wells of Solikamskaya depression //Oil industry. –2014. –No.6. –P.20-22.
2. P.Iu.Iliushin, R.M.Rakhimzianov, D.Iu.Solovov, I.Iu.Kolychev. Analysis of well intervention aimed at oil production enhancement in the Perm krai's fields // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining. –2015. –Vol. 14. –No.15. –P.81–89.
3. N.N.Mihaylov, K.A.Motorova, L.S.Sechina. Geologicheskie faktoryi smachivaemosti porod-kollektorov nefti i gaza //Delovoy zhurnal «Neftegas.ru». –2016. –No.3. –S.80-90.
4. V.G.Zhoqlo, A.V.Haletski. About role of capillary impregnation in oil recovery from carbonate reservoirs from the example of subsalt oil deposits in the Pripyatskiy trough //SOCAR Proceedings. –2010. –No.4. –P.36–38.
5. Sh.K.Gimatudinov, A.I.Shirkovskiy. Fizika neftyanogo i gazovogo plasta. M.: Alyans, 2005.
6. N.Yu.Nesterenko. Smachivaemost porod-kollektorov plastovymi flyuidami //Geologiya nefti i gaza. –1995. –No. 5. –S. 26-36.
7. V.M.Dobrynin, B.Yu.Vendelshtein, D.A.Kozhevnikov. Petrophysics (Rock physics). M.: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2004.
8. M.M.Isgandarov. Integrated interpretation of well logging results in the study of terrigenous sections // SOCAR Proceedings. –2014. – No.3. –P.4–10.
9. N.S.Shilanov, B.B.Khibasov, K.S.Baytenov. Features of interpretation of logging data on new wells //SOCAR Proceedings. –2011. –No. 3. – P.16–19.
10. S.V.Galkin, A.A.Efimov, S.N.Krivoshchekov, et al. X-ray tomography in petrophysical studies of core samples from oil and gas fields //Russian Geology and Geophysics. –2015. –No. 5. –P.782–792.
11. H.Okabe, M.J.Blunt. Pore space reconstruction of vuggy carbonates using microtomography and multiple - point statistics //Water Resources Research. –2007. –Vol. 43. –P. W12S02.
12. S.Berg, R.Armstrong, H.Ott, et al. Multiphase flow in porous rock imaged under dynamic flow conditions with fast x-ray computed microtomography //Petrophysics. –2014. –Vol. 55. –No.4. –P.304-312.
13. Ia.V.Savitskii. Current features of x-ray tomography in examination of core samples from oil and gas deposits //Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining. –2015. –Vol. 14. –No. 15. –P.28–37.
14. A.A.Nalyotova, A.B.Oleinik, P.A.Glazunov, P.V.Shevel'ov. Evaluation of effective relative phase permeability functions uncertainty on gas influence upon development factor on example of X field //SOCAR Proceedings. –2011. –No. 2. –P.25–34.
15. B.L.Alemu, E.Aker, M.Soldal, et al. Effect of sub-core scale heterogeneities on acoustic and electrical properties of a reservoir rock: a CO2 flooding experiment of brine saturated sandstone in a computed tomography scanner //European Association of Geoscientists & Engineers. Geophysical Prospecting. –2012. –Vol. 61. –P. 235-250.

16. А.А.Ефимов, Я.В.Савицкий, С.В.Галкин, С.А.Шапиро. Опыт исследования керн карбонатных отложений методом рентгеновской томографии //Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. –2016. –Т. 15. –№ 18. –С.23–32.

16. A.A.Efimov, Ya.V.Savitskii, S.V.Galkin, S.Shapiro. Experience of study of core from carbonate deposits by X-ray tomography //Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining. –2016. –Vol. 15. –No. 18. –P.23–32.

Исследование смачиваемости коллекторов нефтяных месторождений методом рентгеновской томографии керн

А.А.Ефимов¹, Я.В.Савицкий¹, С.В.Галкин¹,
Е.В.Соболева², В.Ш.Гурбанов³

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; ²ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», Пермь, Россия;

³Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Реферат

Изложен опыт исследования смачиваемости коллекторов на керновом материале с помощью метода рентгеновской томографии. Процессы гидрофобизации горных пород значительно изменяют геолого-технологические условия эксплуатации нефтяных месторождений. Стандартные методы оценки смачиваемости коллекторов не дают в полной мере достоверной оценки этого важного для решения технологических задач параметра. Разработан метод оценки смачиваемости коллекторов, основанный на сканировании рентгеновским излучением образцов керн в трех состояниях: на сухом образце, насыщенном водой, с остаточной водонасыщенностью. Метод рентгеновской томографии позволяет визуализировать характер распределения в керне участков с гидрофильной и гидрофобной поверхностью. Рассмотрена связь гидрофобности коллекторов с удельным электрическим сопротивлением горных пород, что позволяет при оценке их смачиваемости комплексировать данные керн и методов геофизических исследований скважин.

Ключевые слова: рентгеновская томография, рентгеноконтрастный раствор, керн, смачиваемость, гидрофильный коллектор, гидрофобный коллектор, удельное электрическое сопротивление, боковой каротаж, приемистость скважин.

Kernin rentgen tomoqrafiyası üsulu ilə neft yataqlarının kollektorlarının islanma qabiliyyətinin tədqiqi

A.A.Yefimov¹, Y.V.Savitskiy¹, S.V.Qalkin¹, Y.V.Sobolyeva², V.Ş.Kurbanov³

¹Perm Politexnik Milli Tədqiqat Universiteti, Perm, Rusiya;

²«Lukoil-Perm» MMC, Perm, Rusiya; ³Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Bakı, Azərbaycan

Xülasə

Məqalədə rentgen tomoqrafiyası üsulunun köməyi ilə kern materialı üzərində kollektorların islanma qabiliyyətinin tədqiqinə dair sınaq təcrübəsi təqdim edilmişdir. Dağ süxurlarının hidrofoblaşması prosesləri neft yataqlarının istismarının geoloji-texnoloji şərtlərini əhəmiyyətli dərəcədə dəyişdirir. Kollektorların islanma qabiliyyətinin qiymətləndirilməsinin standart üsulları texnoloji məsələlərin həlli üçün vacib olan bu parametrin tam olaraq dəqiq qiymətləndirilməsinə imkan vermir. Kollektorların islanma qabiliyyətinin qiymətləndirilməsi üsulu işlənmişdir. Üsul kern nümunələrinin rentgen şüaları ilə üç vəziyyətdə skan edilməsinə əsaslanmışdır: quru, suyla doymuş, qalıq sudoyumlu. Rentgen tomoqrafiyası üsulu hidrofil və hidrofob səthli sahələrin kerdə paylanma xarakterini vizuallaşdırmağa imkan verir. Kollektorların hidrofiliyyətinin dağ süxurlarının xüsusi elektrik müqaviməti ilə əlaqəsinə baxılmışdır ki, bu da onların islanma qabiliyyətinin qiymətləndirilməsi zaman kern məlumatlarını və quyuların geofiziki tədqiqat üsullarını kompleksləşdirməyə imkan verir.

Açar sözlər: rentgen tomoqrafiyası, rentgen kontrastlı məhlul, kern, islanma, hidrofil kollektor, hidrofob kollektor, xüsusi elektrik müqaviməti, yan karotaj, vurucu quyunun məhsuldarlığı.