

УДК 622.276

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИСЛОТНЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОЛЛЕКТОРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХСЯ РАЗЛИЧНОЙ КАРБОНАТНОСТЬЮ И СТРУКТУРОЙ ПУСТОТНОГО ПРОСТРАНСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Мартюшев Дмитрий Александрович,
martyushevdi@inbox.ru

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

Актуальность работы обусловлена тем, что продуктивные карбонатные отложения нефтяных месторождений Пермского края характеризуются значительным разнообразием структурно-генетических типов пород и специфическим строением пустотного пространства. Разработка залежей со сложным строением пустотного пространства сопровождается трудностями в реализации высокоэффективной системы заводнения и, как следствие, снижением пластового давления и коэффициента продуктивности скважин. Для увеличения продуктивности скважин в карбонатных коллекторах проводят кислотное воздействие, эффективность которого зависит от карбонатности и особенностей структуры пустотного пространства обрабатываемых пород.

Цель работы: на основании лабораторных исследований оценить эффективность применяемых кислотных составов на нефтяных месторождениях Пермского края, характеризующихся различной карбонатностью и структурой пустотного пространства горных пород.

Методами исследования являлись прибор для определения карбонатности горных пород Карбонатомер КМ-04М, фильтрационные установки с моделированием пластовых условий УИК-5ВГ и АФС-300 и установка микрофокусной рентгенооскопии.

Результаты. Для каждого типа пустотного пространства проведено моделирование кислотного воздействия с использованием двух распространенных составов, которые применяются на территории Пермского края, с определением коэффициента изменения проницаемости и рентгеномографическими исследованиями. Рентгеномографические эксперименты на одном образце керна выполнены дважды: до и после моделирования кислотного воздействия. Практически на всех образцах с изначально равномерно-поровой структурой пустотного пространства проведение кислотного воздействия привело к образованию выраженного высокопроводящего канала фильтрации – «червоточины». Фильтрационные исследования, проведенные на трещиноватых образцах Гагаринского месторождения, ни в одном случае не привели к сколь либо значимому результату: кислотные составы проходили сквозь трещины, не приводя к увеличению ни общей пустотности, ни проницаемости образцов. Установлено, что проникновение кислотного состава в зону развития микротрещиноватости может привести к изменению направления кислотного воздействия; закачка кислотного состава в интервалы с выраженной трещиноватостью не приводит к высокой эффективности обработки. Установлено, что структура пустотного пространства и карбонатность горных пород нефтяных месторождений Пермского края являются факторами, которые определяют эффективность кислотного воздействия.

Ключевые слова:

Кислотные обработки, карбонатные коллектора, структура пустотного пространства, томографические исследования, фильтрационные исследования, микротрещиноватость, коэффициент восстановления проницаемости.

Введение

Значительная доля запасов углеводородов (около 65 % всех остаточных извлекаемых запасов) на территории Пермского края приурочена к карбонатным отложениям турнейско-фаменского и башкирского возраста. По данным [1–4], к основным особенностям данных коллекторов следует относить значительное разнообразие структурно-генетических типов пород, слагающих продуктивные пласты, а также специфическое строение их пустотного пространства. Для рассматриваемых объектов характерной чертой является снижение продуктивности скважин вследствие ухудшения энергетического состояния залежей, ввиду малоэффективной системы поддержания пластового давления [5–8]. В таких условиях зачастую прибегают к различным геолого-техническим мероприятиям [9, 10]. Одним из самых распространенных и простых химических методов, направленных на увеличение коэффициента продуктивности добывающих скважин, является проведение кислотных обработок. Несмотря на простоту метода и большой опыт проведения обработок, стоит серьезно относиться к планированию кислотного воздействия, так как по статистике око-

ло 40–45 % проведенных операций не достигают ожидаемого эффекта [11, 12].

Наличие в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» значительного накопленного опыта проведения кислотных обработок по различным технологиям в различных геолого-физических условиях обуславливает необходимость проведения анализа и выделение критериев эффективного применения данного метода интенсификации добычи нефти.

Для решения поставленной задачи проведена серия лабораторных исследований с привлечением современных фильтрационных установок, таких как УИК-5ВГ и АФС-300, а также с целью изучения пустотного пространства рассматриваемых объектов и визуализации воздействия кислотных составов на горную породу (образование «червоточин») использована микрофокусная рентгенооскопия [13–16].

При решении поставленной задачи использовались образцы керна карбонатных продуктивных отложений (одного возраста) нефтяных месторождений и два кислотных состава, которые наиболее распространены и применяются в настоящее время в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

На начальном этапе исследований проведены лабораторные опыты в свободном объеме, включающие в себя: эффективность замедлителей, которые используются в тестируемых составах; оценка времени нейтрализации кислотных составов горной породой; коррозионная активность кислотных составов; взаимодействие с пластовыми флюидами (вода и нефть). Оба кислотных состава в этой серии экспериментов продемонстрировали положительные результаты.

Важно отметить, что характерной особенностью нефтяных месторождений Пермского края является различие в карбонатности (содержание кальцита, доломита и нерастворимого осадка) и в строении пустотного пространства горных пород в зависимости от их географического расположения. На рис. 1 представлена карта Пермского края с месторождениями, по которым изучалась карбонатность и строение пустотного пространства горных пород. Стоит отметить, что месторождения, расположенные на юге Пермского края, характеризуются идентичным строением пустотного пространства и карбонатностью горных пород и поэтому они условно объединены в южную группу ме-

сторождений. Из представленных моделей по южной группе месторождений видно, что преобладает поровая структура, без явно выраженных каверн и трещин. Исследуемая структура пустотного пространства месторождений, находящихся на севере Пермского края, характеризуется своим разнообразием. В ходе томографии выделены образцы с явно выраженной трещиноватостью (Гагаринское месторождение), микротрещиноватостью (Озерное месторождение), с равномерной пористостью (Маговское месторождение и южная группа месторождений) и неравномерной пористостью (Уньвинское месторождение и месторождение им. Сухарева).

Томография образцов ядра карбонатных отложений Пермского края продемонстрировала сложность строения их пустотного пространства. Как видно из рис. 1, продуктивные отложения, расположенные в относительной близости друг от друга, характеризуются самой разнообразной структурой пустотного пространства.

С учетом разнообразной структуры пустотного пространства карбонатных коллекторов Пермского края проведены исследования эффективности кислотного воздействия. Рентгеномногографиче-

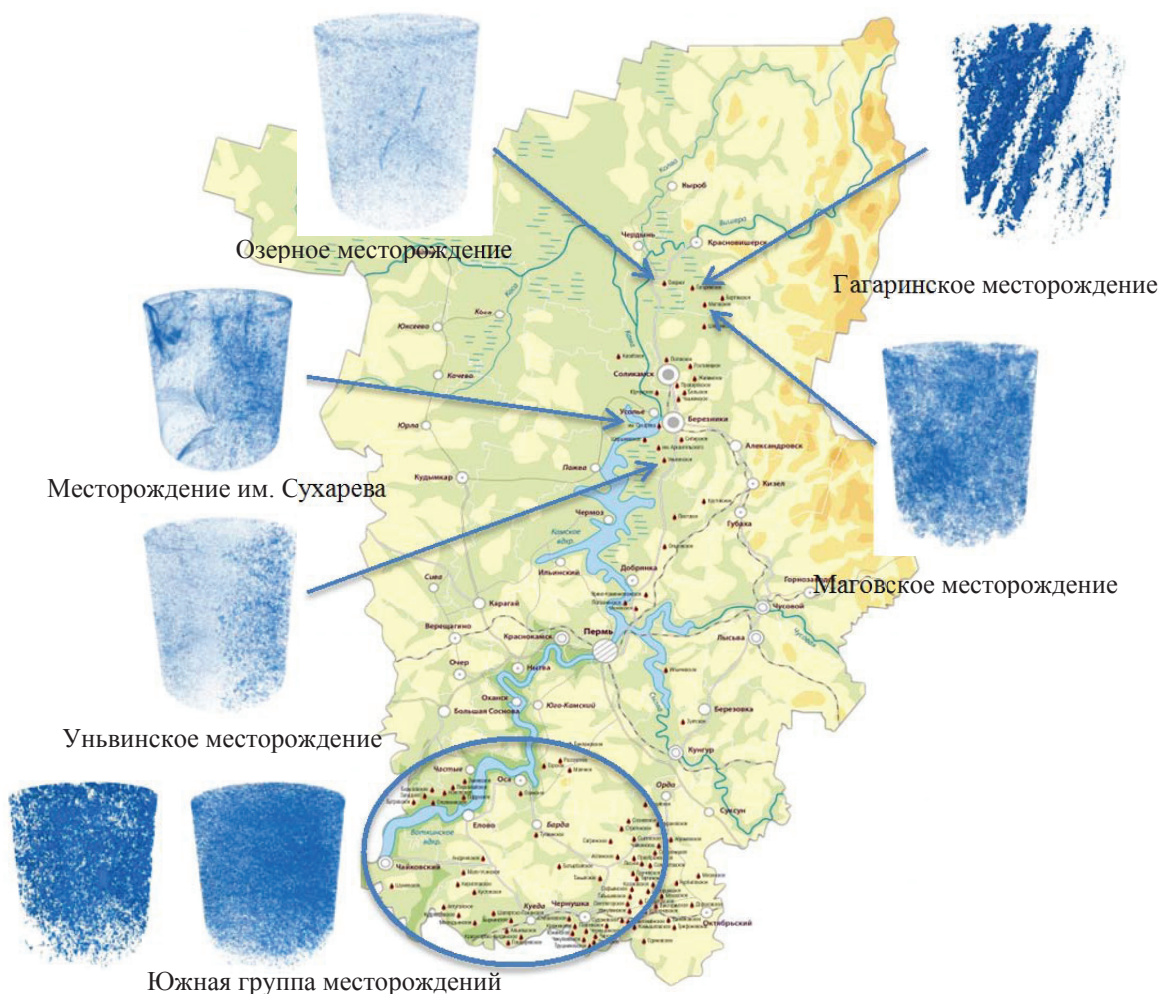


Рис. 1. Структура пустотного пространства горных пород нефтяных месторождений Пермского края

Fig. 1. Structure of the rocks void in the oil fields of the Perm Krai

ские эксперименты на одном образце керна выполнены дважды: до и после моделирования кислотного воздействия. Использование 3D-моделей образцов керна позволяет визуализировать и учесть структуру пустотного пространства до моделирования кислотной обработки и более полно и всесторонне подойти к анализу результатов и эффективности этого воздействия.

Оценка карбонатности горных пород

Карбонатность горных пород – содержание кальцита, доломита и нерастворимого осадка, является важным параметром, от которого зависит эффективность кислотного воздействия. Карбонатность горных пород определялась с помощью прибора Карбонатомера КМ-04М. На рис. 2. представлена диаграмма соотношения «кальцит–доломит–нерастворимый осадок» для различных нефтяных месторождений Пермского края.

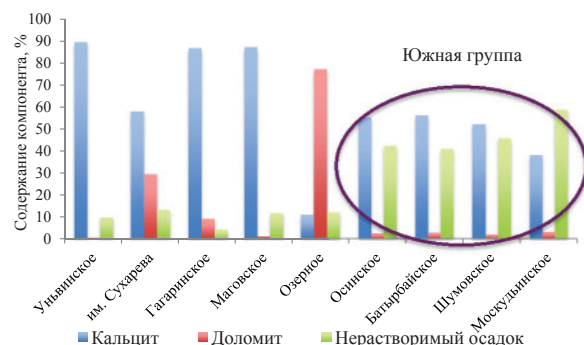


Рис. 2. Карбонатность горных пород нефтяных месторождений Пермского края

Fig. 2. Carbonate content of rocks of oil deposits of the Perm Krai

Как следует из анализа представленных данных, максимальное содержание кальцита, обуславливающее высокую эффективность кислотного воздействия, характерно для образцов керна Уньвинского, Гагаринского и Маговского месторождений. Для месторождения им. Сухарова и Озерного месторождения характерно повышенное содержание доломита, менее эффективно реагирующего с соляной кислотой, нежели кальцит. Для месторождений южной группы отмечается значительное содержание нерастворимого осадка, что является фактором, снижающим эффективность кислотного воздействия.

Исходя из данных о карбонатности горных пород и томографических исследований образцов горных пород проведено моделирование кислотного воздействия.

Проведение фильтрационных исследований

Основным параметром, характеризующим эффективность кислотного воздействия по данным фильтрационных экспериментов, принята величина коэффициента восстановления проницаемости. Данный коэффициент представляет собой отношение проницаемости образца по нефти после моде-

лирования кислотной обработки к значению этой проницаемости до воздействия [17–23].

Практически на всех образцах с изначально равномерно-поровой структурой пустотного пространства проведение кислотного воздействия привело к образованию выраженного высокопроницающего канала фильтрации – «червоточины». В качестве примера на рис. 3 представлены результаты рентгеновской томографии таких образцов после обработок.

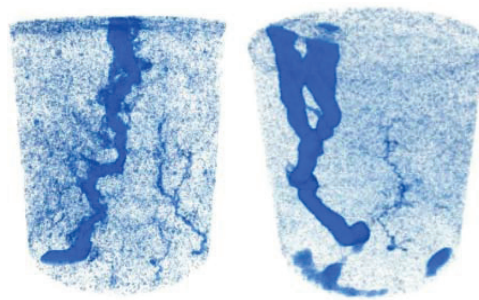


Рис. 3. Структуры пустотного пространства образцов после кислотного воздействия

Fig. 3. Structures of the void space of the samples after acid treatment

Значительный интерес представляют результаты фильтрационных экспериментов на трещиноватых образцах Гагаринского месторождения. Проведение серии таких опытов ни в одном случае не привело к сколь-либо значимому результату: кислотные составы проходили сквозь трещины, не приводя к увеличению ни общей пустотности, ни проницаемости образцов (рис. 4). В целом эффективность обработки следует считать низкой (таблица).

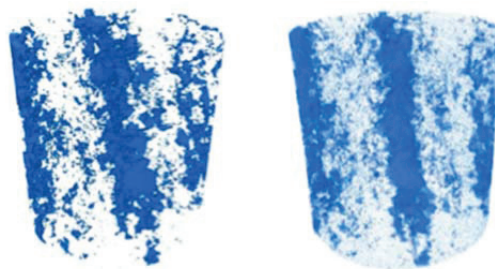


Рис. 4. Изменения структуры пустотного пространства трещиноватого образца

Fig. 4. Changes in the structure of the fractured sample voids

Моделирование кислотной обработки на образцах керна, характеризующихся наличием микротрещин, также сопровождалось образованием высокопроницающего канала: слева образец керна до кислотного воздействия, справа – после (рис. 5).

Образцы керна южной группы месторождений и Маговского месторождения характеризуются выраженной поровой структурой пространства; поры четко выраженные, достаточно крупные и равномерно распределены по объему образца. Как следует из анализа результатов томографии, в ходе

кислотного воздействия образовался высокопроводящий канал: слева образец керна до кислотного воздействия, справа – после (рис. 6). Визуально более отчетливо высокопроводящий канал выделяется на срезах (рис. 7), нежели на 3D-модели пустот.

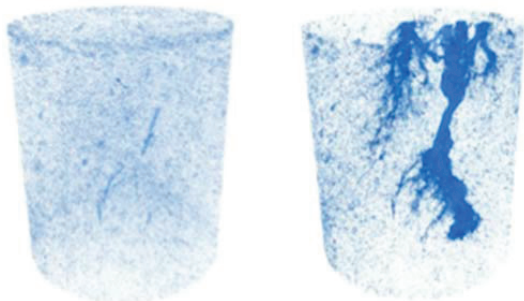


Рис. 5. Изменение структуры пустотного пространства образца с микротрещиноватостью

Fig. 5. Change in the void structure of the sample with microfractures

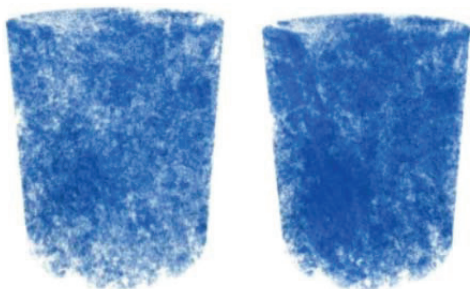


Рис. 6. Изменение структуры пустотного пространства образца с выраженной поровой структурой

Fig. 6. Change in the void structure of a sample with a pronounced pore structure

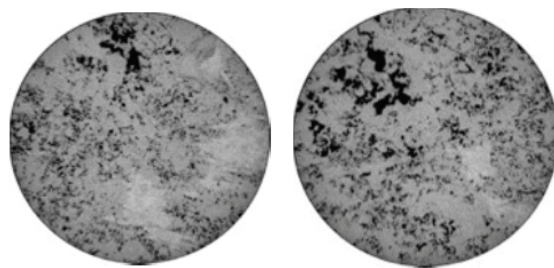


Рис. 7. Изменение структуры пустотного пространства образца с выраженной поровой структурой (срезы)

Fig. 7. Change in the void structure of a sample with a pronounced pore structure (slices)

Обобщенные результаты по изменению проницаемости образцов керна в результате моделирования на них кислотных обработок представлены в таблице.

Из полученных данных можно сделать вывод, что структура пустотного пространства и карбонатность горных пород нефтяных месторождений Пермского края являются факторами, которые обуславливают эффективность кислотного воздействия. Наименьший прирост проницаемости после кислотного моделирования отмечается на месторождении им. Сухарева, горная порода которого характеризуется повышенным содержанием доломита и нерастворимого осадка, и на Гагаринском месторождении, для которого характерно наличие явно выраженной трещиноватости. Таким образом, проведение кислотных обработок рассмотренными составами на данных месторождениях является нецелесообразным мероприятием. Для остальных рассматриваемых объектов получены значительные приросты коэффициента восстановления проницаемости.

Таблица. Изменение проницаемости образцов керна в результате моделирования на них кислотных обработок

Table. Results of the change in permeability of core samples due to simulation of acid treatments on them

Месторождение Field	Количество опытов, КС1/КС2 Number of experiments, acid composition1/acid composition2	Объем прокачки кислотного состава в объемах пор Volume of pumping acid composition in the pore volume	Диапазон изменения коэффициента проницаемости/среднее значение Range of change in permeability change coefficient/average value
Уньвинское Unvinskoe	7/7	1–2	$\frac{54,7 - 4795,1}{708,6} / \frac{36,8 - 3407,7}{757,4}$
им. Сухарева Sukharev	5/5		$\frac{2,4 - 18,1}{5,9} / \frac{2,4 - 92,1}{11,2}$
Гагаринское Gagarinskoe	5/5		$\frac{0,5 - 6,6}{2,4} / \frac{0,06 - 7,13}{2,8}$
Маговское Magovskoye	6/6		$\frac{144,7 - 4771,0}{1209,7} / \frac{8562,8 - 56160,5}{18563,9}$
Озерное Ozernoye	7/7		$\frac{100,2 - 2297,2}{833,1} / \frac{0,9 - 679,2}{267,8}$
Южная группа Southern group	12/12		$\frac{13,2 - 501,8}{202,7} / \frac{16,7 - 39487,9}{1114,7}$

Также стоит отметить, что наличие в горной породе микротрещиноватости (техногенной или естественной) влияет на направление образовавшегося канала фильтрации: направление канала изменяется после достижения плоскости развития трещины (рис. 5).

Заключение

Таким образом, выполненные фильтрационные и томографические исследования по моделированию кислотного воздействия на карбонатные отложения месторождений Пермского края позволили установить следующее:

- продуктивные карбонатные отложения месторождений Пермского края характеризуются

разнообразной и сложной структурой пустотного пространства;

- кислотное воздействие необходимо проводить с учетом карбонатности и строения пустотного пространства горных пород;
- проникновение кислотного состава в зону развития микротрещиноватости может привести к изменению направления кислотного воздействия, что необходимо учитывать, особенно вблизи водонасыщенных интервалов пласта;
- проведение кислотных обработок рассмотренными составами на месторождении им. Сухарева и Гагаринском месторождении, в связи с незначительным приростом коэффициента проницаемости, является нецелесообразным мероприятием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторин В.Д. Влияние особенностей карбонатных коллекторов на эффективность разработки нефтяных залежей. – М.: Недра, 1988. – 150 с.
2. Денк С.О. Нетипичные продуктивные объекты Пермского Предуралья. – Пермь: ПермНИПИнефть, 1997. – 328 с.
3. Путилов И.С. Разработка технологий комплексного изучения геологического строения и размещения месторождений нефти и газа. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 285 с.
4. Определение параметров трещиноватости пород на основе комплексного анализа данных изучения керна, гидродинамических и геофизических исследований скважин / С.С. Черепанов, И.Н. Пономарева, А.А. Ерофеев, С.В. Галкин // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 94–96.
5. Оценка влияния естественной трещиноватости коллектора на динамику продуктивности добывающих скважин Озерного месторождения / В.А. Мордвинов, Д.А. Мартюшев, Т.С. Ладейщикова, Н.П. Горланов // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 14. – С. 32–38.
6. Мордвинов В.А., Мартюшев Д.А., Пузиков В.И. Оценка влияния естественной трещиноватости коллектора на динамику продуктивности добывающих скважин сложнопостроенной нефтяной залежи // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 11. – С. 120–122.
7. Лекомцев А.В., Мордвинов В.А. К оценке забойных давлений при эксплуатации скважин электроцентробежными насосами // Научные исследования и инновации. – 2011. – Т. 5. – № 4. – С. 29–32.
8. К прогнозированию темпов снижения добычи нефти по данным истории разработки нефтяных залежей / М.К. Анурьев, Т.М. Гуляева, А.В. Лекомцев, Д.В. Чернышев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – Т. 12. – № 6. – С. 93–100.
9. Анализ проведения геолого-технических мероприятий по увеличению продуктивности добывающих скважин на нефтяных месторождениях Пермского края / П.Ю. Илюшин, Р.М. Рахимзянов, Д.Ю. Соловьев, И.Ю. Колычев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 15. – С. 81–89.
10. Распоров А.В., Новокрещенных Д.В. Анализ результатов применения методов интенсификации на карбонатных коллекторах месторождений Пермского края // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 10. – С. 73–82.
11. Modeling and simulation of wormhole formation during acidization of fractured carbonate rocks / Piyang Liu, Jun Yao, Gary Douglas Couplès, Jingsheng Ma, Hai Sun // Journal of Petroleum Science and Engineering. – June 2017. – V. 154. – P. 284–301.
12. Distinguishing between carbonate and non-carbonate precipitates from the carbonation of calcium-containing organic acid leachates / R.M. Santos, Yi Wai Chiang, J. Elsen, T. van Gerven // Hydrometallurgy. – August 2014. – V. 147–148. – P. 90–94.
13. Опыт исследования керна карбонатных отложений методом рентгеновской томографии / А.А. Ефимов, Я.В. Савицкий, С.В. Галкин, С. Шапиро // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – № 18. – С. 23–32.
14. Савицкий Я.В. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании керна нефтяных и газовых месторождений // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 15. – С. 28–37.
15. X-ray microtomography of hydrochloric acid propagation in carbonate rocks / A.C. Machado, T.J.L. Oliveira, F.B. Cruz, R.T. Lopes, I. Lima // Applied Radiation and Isotopes. – February 2015. – V. 96. – P. 129–134.
16. Numerical simulation and X-ray imaging validation of wormhole propagation during acid core-flood experiments in a carbonate gas reservoir / Alireza Safari, Mojtaba Moradi Dowlatabad, Ali Hassani, Fariborz Rashidi // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – March 2016. – V. 30. – P. 539–547.
17. Влияние характеристик образцов и условий проведения экспериментов на эффективность применения кислотных составов / В.И. Галкин, Г.П. Хижняк, А.М. Амиров, Е.А. Гладких // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 30–33.
18. Lan-Anh Phan Thi, Huu-Tuan Do, Shang-Lien Lo. Enhancing decomposition rate of perfluorooctanoic acid by carbonate radical assisted sonochemical treatment // Ultrasonics Sonochemistry. – September 2014. – V. 21. – Iss. 5. – P. 1875–1880.
19. Tomohito Kameda, Masahito Tochinali, Toshiaki Yoshioka. Treatment of hydrochloric acid using Mg–Al layered double hydroxide intercalated with carbonate // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 25 July 2016. – V. 39. – P. 21–26.
20. Naizhen Liu, Ming Liu. Simulation and analysis of wormhole propagation by VES acid in carbonate acidizing // Journal of Petroleum Science and Engineering. – February 2016. – V. 138. – P. 57–65.
21. Snoeck Ch., Pellegrini M. Comparing bioapatite carbonate pre-treatments or isotopic measurements: P. 1. Impact on structure and chemical composition // Chemical Geology. – 6 December 2015. – V. 417. – P. 394–403.
22. Burgos-Cara A., Ruiz-Agudo E., Rodriguez-Navarro C. Effectiveness of oxalic acid treatments for the protection of marble surfaces // Materials & Design. – 5 February 2017. – V. 115. – P. 82–92.
23. Carbonate acidizing: Modeling, analysis, and characterization of wormhole formation and propagation / Mehdi Ghommam, Weishu Zhao, S. Dyer, Xiangdong Qiu, D. Brady // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2015. – V. 131. – P. 18–33.

Поступила 01.11.2017 г.

Информация об авторах

Мартюшев Д.А., младший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276

LABORATORY STUDIES OF ACID COMPOSITIONS FOR TREATING RESERVOIR, CHARACTERIZED BY VARIOUS CARBONATE CONTENT AND VOID STRUCTURE OF ROCKS

Dmitry A. Martyushev,

martyushevd@inbox.ru

Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

The relevance of the research is caused by the fact that the productive carbonate deposits of oil fields of Perm Krai are characterized by a considerable variety of structural-genetic types of rocks and void specific structure. The exploration of deposits with void complex structure is accompanied by the difficulties in implementing a highly efficient water flooding system and, as a consequence, reducing reservoir pressure and well productivity. To increase wells productivity in carbonate reservoirs the acid treatment is carried out. The effectiveness of acidic exposure is advisable to perform taking into account the peculiarities of the void structure and the carbonation of the rocks being treated.

The main aim of the study is to carry out the laboratory studies for assessing the effectiveness of acidic compounds in the oil fields of Perm Krai, characterized by different carbonate content and the structure of rocks void.

The methods: a device for determining the carbonate content of rocks, carbonatometer KM-04M, filtration units with simulation of formation conditions of UIP-5VG and AFS-300 and microfocus fluoroscopy.

The results. For each type of void the authors have simulated the acid effect using two common compositions applied in Perm Krai, determining a permeability change factor and with X-ray tomography studies. X-ray tomography experiments on a single core sample were performed twice: before and after modeling the acid effect. The acidic effect almost on all samples with an initially uniformly porous structure of the void, led to formation of a pronounced highly conducting filtration channel – the «wormhole». The filtration studies carried out on fractured samples of the Gagarinskoe field did not lead to any significant result: the acid compositions passed through the cracks without leading to an increase in either the total voidness or the permeability of the samples. It was determined that acid composition penetration into microfractures development zone can lead to a change in the acidic effect direction; acid composition injection into intervals with pronounced fracturing does not lead to high processing efficiency. It was determined that the void structure and the carbonate content of the rocks of the oil fields in Perm Krai are the factors that determine the effectiveness of the acid effect.

Key words:

Acid treatments, carbonate reservoirs, void structure, tomography studies, filtration research, microfractures, coefficient of permeability recovery.

REFERENCES

- Victorin V.D. *Vliyaniye osobennostey karbonatnykh kolektorov na effektivnost razrabotki neftyanykh zalezhey* [Influence of features of carbonate reservoirs on the efficiency of development of oil deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 150 p.
- Denk S.O. *Netipichnye produktivnye obekty Permskogo Preduralya* [Untypical productive objects of the Perm Ural region]. Perm, PermNIPIneft Publ., 1997. 328 p.
- Putilov I.S. *Razrabotka technology kompleksnogo izucheniya geologicheskogo stroeniya i razmeshcheniya mestorozhdeniy nefi i gaza* [Development of technologies for a comprehensive study of the geological structure and location of oil and gas fields]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ. house, 2014. 285 p.
- Cherepanov S.S., Ponomareva I.N., Erofeev A.A., Galkin S.V. Determination of fracture parameters of rocks on the basis of complex analysis of core data, hydrodynamic and geophysical studies of wells. *Oil Industry*, 2014, no. 2, pp. 94–96. In Rus.
- Mordvinov V.A., Martyushev D.A., Ladeyschikova T.S., Gorlanov N.P. Evaluation of the effect of the natural fracturing of the reservoir on the dynamics of the productivity of the producing wells of the Ozeroye deposit. *Bulletin PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2015, no. 14, pp. 32–38. In Rus.
- Mordvinov V.A., Martyushev D.A., Puzikov V.I. Evaluation of the effect of the natural fracturing of the reservoir on the dynamics of the productivity of producing wells of a complexly built oil deposit. *Oil Industry*, 2014, no. 11, pp. 120–122. In Rus.
- Lekomtsev A.V., Mordvinov V.A. To the evaluation of bottomhole pressures during well operation by electric centrifugal pumps. *Scientific researches and innovations*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 29–32. In Rus.
- Anuriev M.K., Gulyaeva T.M., Lekomtsev A.V., Chernyshev D.V. To predict the rate of decline in oil production according to the history of the development of oil deposits. *Bulletin PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2013, vol. 12, no. 6, pp. 93–100. In Rus.
- Ilyushin P.Yu., Rakhimzyanov R.M., Soloviev D.Yu., Kolychev I.Yu. Analysis of geological and technical measures to increase the productivity of production wells in the oil fields of the Perm Territory. *Bulletin PNIIP. Geology. Oil and gas and mining*, 2015, no. 15, pp. 81–89. In Rus.
- Raspopov A.V., Novokreshcheny D.V. Analysis of the results of application of the methods of intensification on the carbonate reservoirs of the Perm Krai deposits. *Bulletin PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2014, no. 10, pp. 73–82. In Rus.
- Piyang Liu, Jun Yao, Gary Douglas Couples, Jingsheng Ma, Hai Sun. Modeling and simulation of wormhole formation during acidization of fractured carbonate rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, June 2017, vol. 154, pp. 284–301.
- Santos R.M., Yi Wai Chiang, Elsen J., Van Gerven T. Distinguishing between carbonate and non-carbonate precipitates from the carbonation of calcium-containing organic acid leachates. *Hydrometallurgy*, August 2014, vol. 147–148, pp. 90–94.
- Efimov A.A., Savitsky Ya.V., Galkin S.V., Shapiro S. Experience in the study of the core of carbonate deposits by the X-ray tomography method. *Bulletin PNIIP. Geology. Oil and gas and mining*, 2016, no. 18, pp. 23–32. In Rus.
- Savitsky Ya.V. Modern possibilities of the method of X-ray tomography in the study of cores of oil and gas deposits. *Bulletin PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2015, no. 15, pp. 28–37. In Rus.
- Machado A.C., Oliveira T.J.L., Cruz F.B., Lopes R.T., Lima I. X-ray microtomography of hydrochloric acid propagation in car-

- bonate rocks. *Applied Radiation and Isotopes*, February 2015, vol. 96, pp. 129–134.
16. Alireza Safari, Mojtaba Moradi Dowlatabad, Ali Hassani, Fari-borz Rashidi. Numerical simulation and X-ray imaging validation of wormhole propagation during acid core-flood experiments in a carbonate gas reservoir. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, March 2016, vol. 30, pp. 539–547.
 17. Galkin V.I., Khizhnyak G.P., Amirov A.M., Gladkikh E.A. Influence of characteristics of samples and conditions of carrying out of experiments on efficiency of application of acid compositions. *Oil industry*, 2015, no. 9, pp. 30–33. In Rus.
 18. Lan-Anh Phan Thi, Huu-Tuan Do, Shang-Lien Lo. Enhancing decomposition rate of perfluorooctanoic acid by carbonate radical assisted sonochemical treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, September 2014, vol. 21, Iss. 5, pp. 1875–1880.
 19. Tomohito Kameda, Masahito Tochinai, Toshiaki Yoshioka. Treatment of hydrochloric acid using Mg–Al layered double hydroxide intercalated with carbonate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 25 July 2016, vol. 39, pp. 21–26.
 20. Naizhen Liu, Ming Liu. Simulation and analysis of wormhole propagation by VES acid in carbonate acidizing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, February 2016, vol. 138, pp. 57–65.
 21. Snoeck Ch., Pellegrini M. Comparing bioapatite carbonate pre-treatments or isotopic measurements: P. 1. Impact on structure and chemical composition. *Chemical Geology*, 6 December 2015, vol. 417, pp. 394–403.
 22. Burgos-Cara A., Ruiz-Agudo E., Rodriguez-Navarro C. Effectiveness of oxalic acid treatments for the protection of marble surfaces. *Materials & Design*, 5 February 2017, vol. 115, pp. 82–92.
 23. Mehdi Ghommam, Weishu Zhao, Dyer S., Xiangdong Qiu, Brady D. Carbonate acidizing: Modeling, analysis, and characterization of wormhole formation and propagation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2015, vol. 131, pp. 18–33.

Received: 1 November 2017.

Information about the authors

Dmitry A. Martyushev, junior researcher, Perm National Research Polytechnic University.