

Научная статья
УДК 622.276

К.А. Равелев¹, И.А. Казаков²

K.A. Ravelev¹, I.A. Kazakov²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²LLC «LUKOIL-Perm», Perm, Russian Federation

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕОДНОРОДНЫЙ
НЕФТЕНАСЫЩЕННЫЙ КОЛЛЕКТОР**

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE
OF NON-STATIONARY IMPACT ON A HETEROGENEOUS
OIL-SATURATED RESERVOIR**

Выполнена оценка целесообразности внедрения технологии циклического заводнения на башкирско-серпуховском объекте одного из месторождений Пермского края. На текущий момент наблюдаются серьезные проблемы его разработки вследствие недоучтенности геологического строения при проектировании системы разработки. В ходе изучения данного объекта установлена сильная степень геологической неоднородности, в условиях которой отмечается неравномерность фильтрации закачиваемого агента и низкий охват залежи стандартной системой заводнения. По результатам гидродинамических расчетов получена высокая технологическая эффективность реализации предлагаемой технологии.

Ключевые слова: неоднородный коллектор, система заводнения, охват залежи, циклическая закачка, гидродинамическая модель

In the framework of this work, an assessment was made of the feasibility of introducing the technology of cyclic waterflooding at the Bashkir-Serpukhov site of one of the fields in the Perm region. At the moment, there are serious problems in its development due to the underestimation of the geological structure in the design of the development system. During the study of this object, a strong degree of geological heterogeneity was established, in which there is an uneven filtration of the injected agent and low coverage of the reservoir by the standard waterflooding system. Based on the results of hydrodynamic calculations, a high technological efficiency of the implementation of the proposed technology was obtained.

Keywords: heterogeneous reservoir, flooding system, reservoir coverage, cyclic injection, hydrodynamic model

На сегодняшний день в нефтегазовой отрасли большая часть легкоизвлекаемых запасов нефти выработана, вследствие чего в разработку активно

вводятся трудноизвлекаемые запасы. Запасы, приуроченные к карбонатным коллекторам, относятся к данному типу запасов. Карбонатные породы имеют сложное строение, что свидетельствует о высоких требованиях к процессу их разработки для достижения проектных значений коэффициента извлечения нефти [1]. Изучение особенностей данных коллекторов происходит на протяжении долгого времени, однако даже на текущий момент не установлены четкие закономерности их строения. Для такого типа коллектора характерно разнообразие форм пустотного пространства, низкие фильтрационно-емкостные свойства, геологическая неоднородность [2, 3]. Интерес к разработке данных объектов обуславливается тем, что в них залегают огромные запасы углеводородного сырья.

При изучении месторождений нефти Пермского края установлено, что в карбонатных коллекторах залегают 60 % остаточных извлекаемых запасов, что обращает на себя внимание нефтедобывающих компаний. Вследствие этого наблюдается рост числа научно-исследовательских работ в области разработки данных объектов, усовершенствования систем разработки, повышения эффективности методов увеличения нефтеотдачи с целью достижения коэффициента извлечения нефти и его повышения.

Стоит отметить достижения Пермского края в нефтегазовой отрасли, которая имеет четко установленную структуру, обладающую высокой эффективностью работы с начала поиска и разведки месторождений и заканчивая переработкой добываемого сырья. Данные достижения наблюдаются уже не один десяток лет в течение всего периода разработки нефтяных и газовых месторождений Пермского края. Исследования усложняются, позволяя решать нестандартные задачи и создавать уникальные продукты. За всем этим стоит большое количество ученых, инженеров, IT-специалистов, опыт и знания которых пользуются широким спросом в Российской Федерации и за ее пределами.

В рамках настоящей научно-исследовательской работы рассмотрен ряд проблем разработки башкирско-серпуховского объекта одного из месторождений Пермского края. Данные проблемы выражаются в низком охвате залежи системой заводнения пласта, преждевременной обводненности добываемой продукции и недостижении проектного уровня добычи. Объект разработки находится на третьей стадии, эксплуатационный фонд скважин практически в полной мере разбурен.

Интерес к исследованию данного объекта вызван тем, что остаточные извлекаемые запасы составляют более 50 % от начальных и при сохранении текущей системы разработки существует большой риск усугубления настоящих проблем. Также отмечается, что при повышении объемов закачки рабочего агента в нагнетательные скважины наблюдается резкий рост процента

воды в добываемой продукции. Очевидно, что данные проблемы непосредственно связаны с некорректным внедрением системы поддержания пластового давления вследствие грубой недоучтенности геологических особенностей башкирско-серпуховской залежи.

При исследовании целевого объекта выявлено, что объединение пластов в один эксплуатационный объект обусловлено единым водонефтяным контактом, одинаковым типом коллектора, близкими фильтрационно-емкостными свойствами и схожестью физико-химических свойств флюидов. Коллекторы серпуховского пласта представлены известняками биоморфными и доломитами светло-серыми, преимущественно водорослевыми, башкирского – известняками серыми и темно-серыми биоморфными, преимущественно водорослевыми, в различной степени доломитизированными, прослоями глинистыми и неравномерно пористыми.

В ходе изучения башкирско-серпуховской залежи рассматриваемого месторождения определено, что 3/4 коллектора имеют проницаемость менее $25 \cdot 10^{-3}$ мкм², пористость варьируется от 8 до 17 %, коэффициент расчлененности находится в диапазоне от 1 до 27 единиц, а коэффициент песчанистости составляет 0,4–0,55 доли единиц. Также автором проанализирована диаграмма распределения нефтенасыщенных толщин (рис. 1) по результатам геофизических исследований скважин, эксплуатирующих целевой объект.

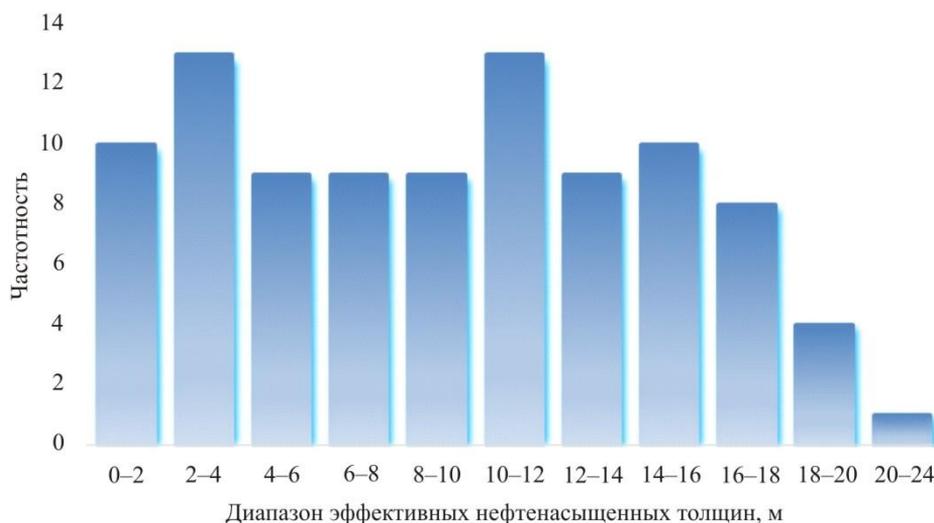


Рис. 1. Диаграмма распределения эффективных нефтенасыщенных толщин по фонду скважин

При оценке данной диаграммы установлено прямоугольное распределение толщин. Также выполнен анализ добычи нефти, по результатам которого установлено, что увеличение нефтенасыщенной толщины не ведет к увеличению добычи. На основании данных материалов сделан вывод о сильной степени геологической неоднородности разрабатываемого объекта, являющейся основной причиной возникновения существующих проблем разработки. Вследствие данной особенности закачиваемая вода прорывается по наиболее промытым зонам к добывающим скважинам, не проникая в малопроницаемые участки залежи. Данное обстоятельство свидетельствует о низком охвате залежи системой заводнения и повышенном содержании воды в добываемой продукции.

С целью решения текущих проблем разработки автор рассмотрел технологии, направленные на площадное воздействие. При обзоре научных источников [4, 5, 6] установлено, что перспективными вариантами в условиях рассматриваемого пласта являются полимерное заводнение и водогазовое воздействие. Однако, как показывает опыт применения данных технологий, их реализация требует высоких финансовых вложений. При дальнейшем изучении данной проблемы определен не менее эффективный вариант ее решения, заключающийся в циклическом заводнении целевого пласта [7]. Данная технология не требует значительных капитальных и операционных затрат и обладает высокой эффективностью, что придает ей высокую перспективность. Также стоит сказать, что на текущий момент в качестве агента закачки используют поверхностные воды недалеко расположенной реки, что также способствует осуществлению нестационарного заводнения на данном объекте.

Технология циклического заводнения заключается в периодических остановах и возобновлении работы нагнетательного фонда скважин, за счет которых происходит перераспределение давления в залежи, изменение фильтрационных потоков, что обеспечивает вовлечение запасов нефти из малопроницаемых и недренируемых ранее участков в разработку. В результате циклической закачки в пласте периодически проходят волны повышения и понижения давления. Слои и участки малой проницаемости, насыщенные нефтью, обладают низкой пьезопроводностью, обуславливая низкую скорость распространения давления в них по сравнению с высокопроницаемыми промытыми зонами. В связи с этим между нефтенасыщенными и заводненными зонами возникают различные по знаку перепады давления. При повышении давления в пласте, то есть при увеличении закачки воды или снижении отбора пластовой жидкости, возникают положительные перепады давления, соответствующие росту давления в заводненных зонах и его снижению в нефтенасыщенных. При снижении объемов нагнетания воды отмечается обратная ситуация.

С целью оценки целесообразности внедрения рассматриваемой технологии на целевом объекте выполнена серия гидродинамических расчетов в соответствии с базовым и предлагаемым вариантами. В качестве инструмента моделирования циклического заводнения использован гидродинамический симулятор Tempest MORE. Для осуществления гидродинамического моделирования автору работы предоставлена геолого-гидродинамическая модель целевого объекта, адаптированная на текущий момент. Внешний вид гидродинамической модели рассматриваемого пласта представлен на рис. 2.

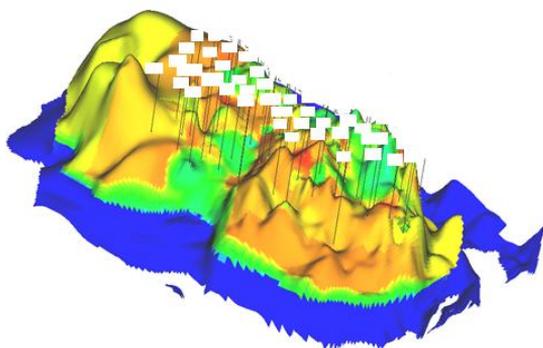


Рис. 2. Гидродинамическая модель целевого объекта на примере куба нефтенасыщенности

С использованием представленной модели выполнены гидродинамические расчеты для различных вариантов продолжительности полуцикла. В рамках данной работы рассмотрены промежутки времени от 5 до 60 суток с шагом 5 дней. Внедрение предлагаемой технологии запланировано на 1 января 2022 года. В соответствии с последним действующим проектным документом разработка данной залежи планируется до 2091 года включительно. В связи с этим все прогнозные расчеты выполнены до данного момента окончания разработки.

Перед проведением анализа результатов в сравнении с базовым вариантом приведена сравнительная характеристика полученных результатов расчетов для различных вариантов продолжительности полуцикла. Стоит отметить, что при рассмотрении динамики изменения основных показателей разработки между данными вариантами отсутствует какая-либо разница за исключением средневзвешенного давления в углеводородной фазе. В ходе анализа установлено, что с увеличением продолжительности полуцикла повышается амплитуда изменения данного параметра, однако общий тренд изменяется аналогично вне зависимости от продолжительности полуцикла.

В соответствии с экспертной оценкой автора принято решение, что продолжительность полцикла, равная 30 сут. является наиболее оптимальной.

В целях оценки эффективности предлагаемой технологии циклического заводнения приведена таблица, в которой отражены результаты расчетов в гидродинамическом симуляторе по базовому и предлагаемому вариантам.

Основные показатели разработки башкирско-серпуховского объекта
рассматриваемого месторождения в соответствии с базовым
и предлагаемым вариантами

Дата	P, бар		$\Sigma Q_{ж}, \text{м}^3 \cdot 10^3$		$\Sigma Q_{н}, \text{м}^3 \cdot 10^3$		$\Sigma Q_{з}, \text{м}^3 \cdot 10^3$	
	Баз.	Предл.	Баз.	Предл.	Баз.	Предл.	Баз.	Предл.
01.01.2022	187,154	186,694	6085,4	6085,4	4809,4	4809,5	5875,3	5845,6
01.01.2026	191,370	179,588	7229,7	7225,3	5302,5	5329,7	7324,9	6580,8
01.01.2030	194,872	175,604	8374,0	8348,7	5707,7	5768,8	8774,5	7303,1
01.01.2034	197,719	173,428	9518,3	9459,9	6047,9	6142,7	10224,0	8021,4
01.01.2038	200,042	172,460	10662,3	10564,8	6337,4	6465,2	11673,6	8756,6
01.01.2042	201,971	171,727	11805,8	11667,3	6587,6	6746,8	13123,2	9475,9
01.01.2046	203,569	171,302	12949,4	12770,7	6808,5	6996,9	14572,8	10197,2
01.01.2050	204,885	171,230	14093,9	13875,6	7006,8	7222,3	16022,3	10932,5
01.01.2054	205,974	170,953	15239,1	14982,1	7186,9	7427,0	17471,9	11648,8
01.01.2058	206,878	170,856	16384,9	16090,4	7352,0	7614,5	18921,5	12373,1
01.01.2062	207,637	170,956	17531,3	17200,7	7504,3	7787,3	20371,0	13107,3
01.01.2066	208,284	170,758	18677,9	18312,9	7645,4	7947,3	21820,6	13821,7
01.01.2070	208,838	170,758	19824,7	19426,9	7776,7	8096,4	23270,2	14548,9
01.01.2074	209,318	170,811	20971,9	20542,7	7899,2	8235,9	24719,8	15280,2
01.01.2078	209,741	170,587	22119,5	21660,2	8014,0	8367,1	26169,3	15994,5
01.01.2082	210,116	170,621	23267,2	22779,1	8121,9	8490,8	27618,9	16724,8
01.01.2086	210,454	170,631	24415,1	23899,4	8223,7	8607,5	29068,5	17453,0
01.01.2090	210,761	170,419	25562,9	25020,8	8320,0	8718,1	30518,0	18167,4
01.01.2092	210,899	170,566	26112,0	25557,6	8364,3	8769,0	31211,6	18524,6

Представленные результаты расчетов демонстрируют высокую технологическую эффективность нестационарного заводнения. На конец разработки целевого объекта отмечается увеличение добычи нефти на 404,7 тыс. м³ по сравнению с базовым вариантом, при этом в ходе разработки объекта с момента внедрения технологии уменьшается уровень добычи жидкости и, следовательно, снижается обводненность добываемой продукции. Данные параметры характеризуют целесообразность осуществления данной технологии, способной разрешить существующие на данный момент проблемы разработки. Отметим, что при реализации нестационарного заводнения средневзвешенное давление в углеводородной фазе снижается вследствие уменьшения

уровня закачки, однако данное снижение незначительно и до конца разработки находится на отметке выше значения давления насыщения нефти газом.

В заключение данной работы необходимо подвести итоги на основании выполненной оценки целесообразности внедрения технологии циклического заводнения на башкирско-серпуховском объекте одного из месторождений Пермского края, имеющем сильную степень неоднородности вследствие приведенных характеристик пласта. Анализ результатов исследования демонстрирует высокую эффективность изменения существующих режимов работы нагнетательного фонда скважин путем реализации периодической закачки, способствующей увеличению охвата залежи системой заводнения, снижению обводненности добываемой продукции, повышению коэффициента извлечения нефти. Результаты осуществленной работы являются крайне информативными и доказывают эффективность циклического заводнения в условиях неоднородных коллекторов.

Список литературы

1. Шарф И.В., Борзенкова Д.Н. Трудноизвлекаемые запасы нефти: понятие, классификационные подходы и стимулирование разработки // Фундаментальные исследования. – 2015. – Т. 16, №. 2. – С. 3593–3597.

2. Равелев К.А. Методика подбора кислотного состава для эффективной обработки призабойной зоны пласта на примере башкирских нефтенасыщенных отложений Пермского края // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2020. – Т. 2. – С. 343–349.

3. Равелев К.А. Исследование эффективности применения кислотного состава в зависимости от скорости растворения минералов горной породы // Master's Journal. – 2020. – №. 2. – С. 56–62.

4. Шамилов В.М., Бабаев Б.Р. Разработка многофункциональных композиционных смесей на основе водорастворимых ПАВ, полимеров и металлических нанопорошков в качестве агентов вытеснения нефти // Территория Нефтегаз. – 2016. – №. 6. – С. 60–63.

5. Эффективность применения водогазовых смесей для повышения нефтеотдачи и перераспределения фильтрационных потоков / Г.П. Хижняк [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, №. 18. – С. 42–52.

6. Повышение эффективности подземной добычи нефти термощахтным способом / Д.Г. Закиров, Р.А. Файзрахманов, А.В. Николаев, Н.Ф. Шаякбаров // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 58–60.

7. Шадрина М.А., Козлова И.А. Обоснование применения циклического заводнения башкирской залежи Сухобизьярского поднятия Баклановского ме-

сторождения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2012. – №. 3. – С. 39–44.

Сведения об авторах

Равелев Кирилл Алексеевич – студент, кафедры «Нефтегазовые технологии», горно-нефтяной факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: Kirill.Ravelev@pstu.ru.

Казаков Иван Алексеевич – инженер I категории ЦИТС (Полазна), ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», e-mail: kazaknavi@gmail.com.

Научный руководитель **Вяткин Кирилл Андреевич** – аспирант, ассистент кафедры «Нефтегазовые технологии», горно-нефтяной факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: Kirill.Vyatkin@girngm.ru.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 15.03.2022

Одобрена: 27.04.2022

Принята к публикации: 01.09.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Равелев, К.А. Исследование влияния нестационарного воздействия на неоднородный нефтенасыщенный коллектор / К.А. Равелев, И.А. Казаков // Журнал магистров. – 2022. – № 1. – С. 52–59.

Please cite this article in English as: Ravelev K.A., Kazakov I.A. Investigation of the influence of non-stationary impact on a heterogeneous oil-saturated reservoir. *Master's journal*, 2022, no. 1, pp. 52-59.