

УДК 622.276 (476) Медведев К.Ю. [Medvedev K.Yu.]

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ВЫРАБОТКИ ЗАПАСОВ НЕФТИ

**Prospects for the application of non-stationary
waterflooding to increase the production
of oil reserves**

На заключительных стадиях разработки большинства месторождений Беларуси, России и зарубежье, после практически полной выработки извлекаемых запасов нефти в залежах остается большая часть первоначального объема геологических запасов. В настоящий момент, объемы добываемой нефти лишь частично компенсируются приростом запасов за счет открытия новых месторождений. Все более и более актуальным становится применение эффективных методов повышения нефтеотдачи на действующих месторождениях. Методов, которые ввиду сложившейся в настоящий момент макроэкономической ситуации не требуют значительных капитальных вложений. Одним из таких методов является нестационарное заводнение, которое доказало свою эффективность на ряде месторождений различных нефтегазоносных провинций. В данной статье произведена систематизация и классификация существующих технологий гидродинамических методов воздействия, выделены критерии выбора объектов и даны рекомендации по технологии проведения работ.

At the final stages of the development of most of the deposits in Belarus, Russia and abroad, after the almost complete development of recoverable oil reserves, most of the initial volume of geological reserves remains in the deposits. At the moment, the volume of oil produced is only partially compensated by the increase in reserves due to the discovery of new deposits. More and more urgent is the application of effective methods of increasing oil recovery in existing fields. Methods, which in view of the current macroeconomic situation do not require significant capital investment. One of these methods is non-stationary waterflooding, which proved to be effective in a number of fields in various oil and gas provinces. In this article, the systematization and classification of existing technologies of hydrodynamical methods of influence has been made, the criteria for selecting objects have been singled out and recommendations on the technology of work have been made.

Ключевые слова: керн, коллектор, фильтрация, проницаемость, заводнение, неоднородность, градиент давления, нефтеотдача.

Key words: core, reservoir, flow, waterflooding, heterogeneity, permeability, oil recovery factor, pressure differential.

Введение

В настоящее время основным способом разработки нефтяных месторождений РБ, РФ, ближнего и дальнего зарубежья является заводнение нефтяных пластов. Широкое распространение данного метода позволило разрабатывать залежи высокими темпами при значительно меньшем фонде добывающих скважин, ускорить вывод эксплуатационных объектов на высокие уровни добычи нефти и увеличить в среднем вдвое нефтеотдачу пластов по сравнению с разработкой на естественных режимах. Вместе с

этим, эффективность вытеснения нефти водой, при традиционной технологии заводнения, даже в случае наилучших геолого-физических характеристик объектов (высокие ФЕС коллектора и их однородность по площади и разрезу, незначительная вязкость нефти) конечная нефтеотдача пластов не превышает 50–60 %, а при неблагоприятных условиях – не превышает 30–40 % [1].

Наличие того факта, что после практически полной выработки извлекаемых запасов месторождения в пластах остается большая часть первоначального объема нефти, возникает необходимость идентифицировать тип остаточной нефтенасыщенности продуктивного пласта. Определение типа остаточной нефтенасыщенности позволит обоснованно подойти к выбору конкретного метода или комплексу методов увеличения нефтеотдачи и оценить их промышленную эффективность и прогнозную рентабельность проекта.

Согласно данным многочисленных лабораторных исследований по вытеснению нефти водой [2], основными видами остаточной нефтенасыщенности являются:

- капиллярно-защемленная нефть;
- сорбированная нефть;
- пленочная нефть;
- нефть, оставшаяся в виде целиков, неохваченных или частично охваченных заводнением.

Остаточные геологические запасы нефти, неохваченные заводнением вследствие значительной неоднородности пластов по ФЕС, высокой расчлененности и резкой прерывистости пластов по площади и разрезу, находятся в пласте в виде капиллярно-защемленной нефти и остаточных целиков. Данная категория остаточной нефтенасыщенности составляет около 70 % всех остаточных запасов нефти и является основным резервом для увеличения нефтеотдачи пластов [2, 3].

Доминирующее влияние на степень охвата пласта вытеснением по площади и разрезу оказывает его микро- и макронеоднородность [1]. Наличие локальных участков отсутствия коллекторов, участков с низкой проницаемостью, дизъюнктивных нарушений приводит к низкой приемистости нагнетательных скважин, частичному или полному отсутствию взаимодействия между нагнетательными и добывающими скважинами, что в результате ограничивает распространение влияния закачки на отдельные участки коллектора [1, 4, 5]. Следовательно, для повышения эффективности процесса заводнения таких пластов необходимо добиться увеличения коэффициента охвата, путем внедрения воды в малопроницаемые, незатронутые процессом вытеснения нефтенасыщенные зоны.

На основании обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований М. Л. Сургучев объединяет способы повышения эффективности методов заводнения в две большие группы: первая группа вклю-

чает в себя применении тепловых, химических и газовых агентов, вторая – основана на совершенствовании технологии системы заводнения [2]. При обосновании применения нетрадиционных методов заводнения следует учитывать, что первая группа является более дорогостоящей и требует использования дефицитных реагентов, сложного оборудования, а в некоторых случаях дополнительного бурения плотных сеток скважин, что приводит к значительному удорожанию стоимости добываемой нефти.

Постановка задачи

В сложившейся на настоящий момент макроэкономической ситуации, значительном снижении цены на нефтяное сырье на мировом рынке, капиталоемкие проекты несут в себе высокие риски. Рентабельность внедрения проектов достигает положительных значений при относительно высоких ценах на сырье. Одним из наиболее перспективных направлений увеличения нефтеотдачи пластов в сложившихся условиях, становится совершенствование и внедрение гидродинамических методов воздействия, которые позволяют решить первоначально поставленную задачу, а именно:

- увеличить коэффициент охвата пласта вытеснением;
- снизить остаточную нефтенасыщенность пластов;
- повысить коэффициент извлечения нефти с привлечением минимальных эксплуатационных затрат.

Материалы и методы исследований

Существующие гидродинамические методы воздействия на пласт

В настоящий момент в мировой практике нефтедобычи применяются различные вариации и модификации методов гидродинамического воздействия. Применение того или иного метода обосновывается сложившимися условиями разработки объекта, техническими возможностями имеющегося оборудования, степени развития инфраструктуры, представлениями о типе остаточной нефтенасыщенности и др. Вместе с этим, большинство вариаций и модификаций данных методов базируются на основных (рис. 1) [1, 2, 5]:

- метод изменения направлений фильтрационных потоков (метод ИНФП);
- метод попеременного циклического нагнетания и циклических отборов продукции (метод циклического воздействия (ЦВ));
- метод изменения режимов эксплуатации добывающих и/или нагнетательных скважин (метод форсированных отборов жидкости (ФОЖ)).



Рис. 1. Классификация гидродинамических методов воздействия на 3 основные группы и последующие их модификации

Каждый из данных методов имеет определенные преимущества и недостатки, условия применения, критерии успешности. На основании широты использования и своей эффективности, в мировой практике в последние годы наибольшую популярность и особый интерес нефтедобывающих компаний вызывает метод циклического воздействия на пласт. На основании многочисленных результатов успешного внедрения данный метод хорошо себя зарекомендовал на месторождениях Российской Федерации: Кулешовском, Покровском, Ромашкинском, Ново-Елховском, Трехозерном, Сугмутском [1, 6 ,7, 8], на группе месторождений Республики Беларусь: Речицкое, Тишковское, Восточно-Первомайское, Золотухинское и ряда месторождений других стран.

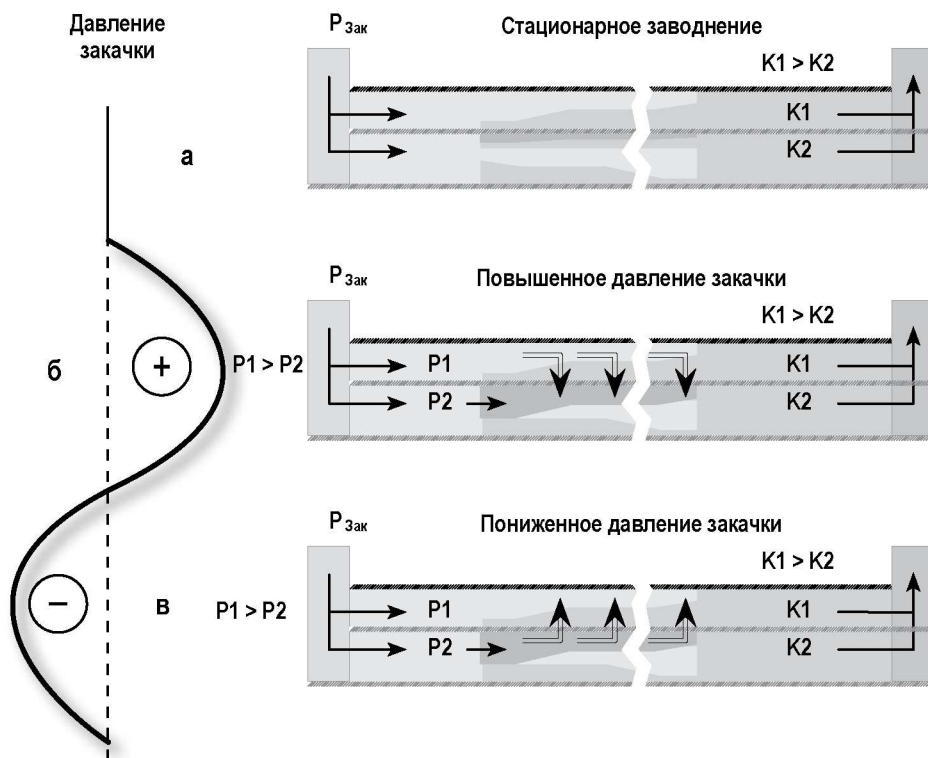


Рис. 2. Процессы, происходящие в пласте при циклическом воздействии.

Механизм действия метода циклического воздействия

Циклический метод заводнения основан на периодическом изменении условий воздействия на пласт, при котором создается нестационарное распределение пластового давления. При неустановившемся энергетическом состоянии в нефтяной залежи возникают условия для непрерывного проявления упругих сил пластовой системы. В неоднородном пласте между различными зонами, каналами и потоками жидкостей возникают градиенты гидродинамических давлений, за счет которых происходят перетоки жидкостей из одних прослоев в другие, из трещин в блоки, а также изменяются направления движения фильтрационных потоков и их геометрия (рис. 2). На практике неустановившееся состояние давления и скорости фильтрации жид-

кости в пласте создаются периодическим изменением объема нагнетаемой воды и добываемой из пласта жидкости [1, 3, 4, 9].

На рисунке 2 в графическом виде представлена физическая суть циклического воздействия. В качестве примера использовалась двухслойная модель пласта. Верхний слой характеризуется большей проницаемостью, нижний – меньшей.

В первом случае (рисунок 2, а), показан процесс вытеснения при стационарном заводнении. Верхний слой, ввиду более высокой проницаемости, вырабатывается быстрее, и обводняет добывающую скважину. При этом нижний слой вырабатывается в меньшей степени, и содержит в себе объем остаточных запасов нефти не подвергшийся дренированию.

Во втором случае (рисунок 2, б), показан процесс вытеснения при цикле увеличения давления нагнетания. Ввиду создания большого градиента давления, происходит внедрение воды из верхнего слоя в нижний, в результате этого, дренируется дополнительный объем запасов нижнего слоя, объем, который не был задействован при стационарном заводнении.

В третьем случае (рис. 2, в), показан процесс вытеснения при цикле уменьшения давления нагнетания. Ввиду того, что верхний слой обладает большей пьезопроводностью (из условия более высокой проницаемости), то давление в верхнем слое снижается быстрее, чем в нижнем. В результате этого, создается репрессия с нижнего слоя на верхний и происходит движение жидкости «снизу вверх». В случае гидрофильного коллектора за счет смачиваемости в порах остается вода, а в верхний слой фильтруется нефть. Если коллектор гидрофобный, то происходит движение жидкости, с долей нефти и воды пропорционально их подвижности в пласте. На основании представленного механизма циклического воздействия вытесняется дополнительный объем нефти, не вовлеченный в активную разработку при стационарном заводнении.

***Результаты лабораторных исследования
по определению коэффициентов вытеснения
при циклическом воздействии***

Исследования проводились на 2-х физических моделях [10]. В качестве физических моделей были выбраны образцы керна одного из месторождений Западной Сибири. КERN терригенного типа. Проницаемость первой модели 0,215 мкм², второй 0,423 мкм². Пластовое давление создавалось 7 МПа, горное – 30 МПа, вязкость нефти – 1,68 мПа·с.

Вытеснение проводилось путем прокачки 6–8 поровых объемом воды, до стабилизации коэффициента вытеснения. При достижении стабильных значений коэффициента вытеснения фильтрация прекращалась и осуществлялась смена гидродинамического режима путем последовательного ступен-

чатого увеличения давления закачки воды на входе в модель. Давление на входе в модель изменялось ступенчато: 7,06; 7,12; и 7,18 МПа.

Результаты данных экспериментов показали, что после смены гидродинамического режима, т.е. ступенчатого повышения давления, режим вытеснения сопровождается высокими перепадами давления на участке стабилизации, что свидетельствует об изменении градиентов давления в поровой структуре и подключению к процессу вытеснения новых поровых каналов и капилляров. Оценка изменения коэффициента вытеснения показала, что после ступенчатого гидродинамического воздействия коэффициент вытеснения увеличился на 6,24 % (при проницаемости – 0,215 мкм²) и на 5,15 % (при проницаемости – 0,423 мкм²).

Таким образом, при внедрении технологии циклического воздействия, для достижения максимального снижения остаточной нефтенасыщенности и повышения дополнительной добычи нефти, следует ступенчато увеличивать интенсивность каждого последующего цикла.

***Результаты опытно-промысловых работ по внедрению
циклического воздействия на Речицком месторождении
Республики Беларусь***

Метод циклического воздействия был опробован на залежи нефти IV пачки задонского горизонта Речицкого месторождения. Данная залежь является пластовой, сводовой, в южной и западной частях литологически экранирована, с севера и востока ограничена контуром водонефтяного контакта (ВНК). Литологический тип коллектора – карбонатный. Тип пустотного пространства – порово-каверново-трещинный. Нефтенасыщенные толщины изменяются от 0 м до 29,4 м. Значения коэффициента открытой пористости варьируют от 4,4 до 12,7 %. Начальное пластовое давление 26,5 МПа, текущее давление на момент проведения циклического воздействия 16,7 МПа. Давление насыщения – 5,9 МПа, газосодержание нефти – 44,6 м³/т. Нефть малосернистая, высокопарафинистая, высокосмолистая.

Залежь IV пачки задонского горизонта Речицкого месторождения находится на четвертой стадии разработки. Разработка залежи ведется с поддержанием пластового давления методом приконтурного заводнения.

Весь комплекс работ по внедрению циклического воздействия подразделялся на этапы по месяцам:

Первый этап (январь-март) – с помощью изменения частоты тока, подаваемого на электродвигатели насосного оборудования, по каждой добывающей скважине подбирался оптимальный режим работы, при котором скважина работала с наибольшим дебитом нефти стабильно. На этом этапе достигалось наиболее полное вовлечение в разработку пласта в области радиуса дренирования;

Второй этап (апрель-июнь) – увеличение текущей месячной компенсации отбора закачкой со 100 до 105 %;

Третий этап (июль-сентябрь) – закачка в нагнетательные скважины потокоотклоняющих реагентов. Цель данного этапа – изменение направления фильтрационных потоков и вовлечение в процесс дренирования невыработанных удаленных зон;

Четвертый этап (октябрь-декабрь) – снижение текущей месячной компенсации отбора закачкой до 95 %.

С января следующего года работы по циклическому воздействию прекращаются, текущая компенсация устанавливается на уровне 100 %, залежь разрабатывается на стационарном режиме.

Анализируя результаты выполненных работ необходимо отметить, что увеличение отборов жидкости спровоцировало рост обводненности по добывающему фонду. Снижение текущей компенсации до 91,2 % (четвертый этап) отразилось на энергетическом состоянии залежи: пластовое давление на начало года составляло 16,7 МПа, а на конец – 15,5 МПа, в результате чего, по всему добывающему фонду скважин наблюдалось снижение динамических уровней. Стабилизация отмечалась только при проведении завершающего этапа при поддержании текущей компенсации на уровне 100 %.

Технологическая эффективность работ, выраженная в виде дополнительной добычи нефти, оценивалась по характеристикам вытеснения методом Камбарова. На основании выполненных расчетов величина дополнительной добычи нефти за период проведения работ составила ≈ 4000 т. Основной эффект получен от работ первого этапа (подбор оптимального режима работы скважин) – 71 %.

Результаты исследований и их обсуждение

На основании теоретических предпосылок, результатов лабораторных исследований, а также успешного практического применения циклического воздействия на месторождениях, выделены основные критерии потенциально перспективных для данной технологии объектов:

1. Высокая микро- и макронеоднородность продуктивных пластов: высокая расчлененность (коэффициент расчлененности 3–4 ед. и выше), зональная неоднородность (наличие зон снижения проницаемости или полного выклинивания

- коллектора), значительные отличия ФЭС прослоев (различие пропластков по проницаемости в 4 и более раз);
2. Наличие гидродинамической связи между неоднородными прослоями и зонами пласта, что обеспечивает перетоки воды при изменении градиентов давления;
 3. Залежь должна обладать достаточно высокой упругоёмкостью, за счет физических характеристик пластового флюида (высокая сжимаемости нефти, наличие выделившегося свободного газа в пласте);
 4. На основании результатов практического применения наилучшие результаты получены при внутриконтурном заводнении, с расстоянием между линией нагнетания и зоной отборов не более 700 м;
 5. Наличие подвижных остаточных извлекаемых запасов.

После выбора потенциально перспективного объекта на основании геолого-геофизических характеристик, необходимо определиться с технологией проведения циклического воздействия. Важнейшими технологическими параметрами циклического воздействия являются продолжительность полуцикла и амплитуда колебания давлений [11, 12].

Продолжительность полуцикла представляет собой время работы нагнетательного фонда скважин при остановленном добывающем фонде и наоборот, время работы добывающего фонда скважин при остановленном нагнетательном фонде. На основании результатов практического применения циклического воздействия, для определения оптимального времени полуцикла положительно себя зарекомендовала формула [2, 6, 8]:

$$T = \frac{l^2 \cdot m \cdot C \cdot \mu}{2k}$$

где, T – длительность полуцикла нестационарного воздействия;
 l – среднее расстояние между нагнетательными и добывающими скважинами;
 m – пористость;
 C – коэффициент сжимаемости породы и жидкости;
 μ – вязкость нефти;
 k – проницаемость.

В случае значений пористости – 20%, вязкости нефти – 10 мПа·с, проницаемости – 0,1 мкм², коэффициента сжимаемости породы и жидкости – 1·10⁻⁴ атм⁻¹, расстоянию между скважинами 400 м, длительность полуцикла составляет 18,5 суток. В большинстве случаев, среднее значение про-

должительности полциклов на реализованных проектах колеблется в пределах от 10 до 20 суток [1, 2, 6, 12, 13].

Исходя из теоретического описания физических процессов происходящих в пласте при циклическом воздействии, увеличение амплитуды колебания давлений приводит к увеличению значений градиентов давления, что в свою очередь повышает интенсивность перетоков между неоднородными зонами и прослоями. В связи с этим, при выборе амплитуды колебаний давлений стоит руководствоваться техническими характеристиками промышленного оборудования. Однако важной особенностью технологии является то, что циклы не должны оставаться постоянными и каждый последующий цикл должен отличаться по интенсивности от предыдущего.

Выводы

На большинстве месторождений после практически полной выработки остаточная нефть находится в капиллярно-защемленном виде или в виде отдельных целиков нефти. Для повышения полноты ее извлечения широко используется метод циклического воздействия, который доказал свою эффективность на ряде месторождений РБ, РФ и за рубежом. В отличие от большинства МУН технология циклического воздействия не требует дополнительных затрат на обустройство месторождения и закупку дополнительного оборудования, что не увеличивает себестоимость добычи нефти. Проанализировав геолого-физические характеристики объектов и сложившиеся системы разработки, можно отметить, что данный метод применим практически повсеместно. Для достижения наибольшей эффективности от внедрения циклического воздействия, рекомендуется использовать предложенные в данной работе критерии выбора объектов и технологию проведения работ.

Библиографический список

1. Гавура В.Е. Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений. М.: ВНИИОЭНГ, 1995. 496 с.
2. Белоногова Е.А., Патракова Е.П., Иванов В.А. Нестационарное извлечение нефти из заводненного зонально-неоднородного по проницаемости пласта // Нефтепромышленное дело. 2012. №3. С. 30–34.
3. Иванова М.М., Чоловский И.П., Брагин Ю.И. Нефтегазопромышленная геология. М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. 414 с.

4. Лысенко В.Д., Грайфер В.И. Разработка малопродуктивных нефтяных месторождений. М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. 562 с.
5. Форест Грей. Добыча нефти. М.: Олимп-Бизнес, 2003. 416 с.
6. Рустамов И.Ф., Хальзов А.А., Лепихин В.А., Фатхлисламов М.А. Оценка эффективности циклического заводнения в разнородных коллекторах Росташинского месторождения // Нефтепромысловое дело. 2013. № 3. С. 6–69.
7. Каршиев А.Х., Агзамов А.А., Набиева Н.К. О результатах форсированного отбора жидкости из залежей месторождений Кокшайты с повышенной вязкостью нефти, приуроченных к карбонатным коллекторам // Нефтепромысловое дело. 2013. №2. С. 34–38.
8. Фаттахов И.Г., Кулешова Л.С., Фарухшин И.Ф. Вопрос макрорегулирования ограничения добычи воды на примере циклического заводнения // Нефтепромысловое дело. 2012. №3. С. 28–29.
9. Газизов А.А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки. М.: Недра-Бизнесцентр, 2002. 639 с.
10. Панахов Г.М., Аббасова Н.Н. Гидродинамический метод извлечения защемленной углеводородной жидкости в условиях капиллярной неоднородности // Нефтяное хозяйство. 2015. № 2. С. 49–52.
11. Грачев С.И., Коротенко В.А., Ягафаров А.К. Проблемы нестационарного заводнения с применением ПАВ // Бурение и нефть. 2011. № 2. С. 40–41.
12. Байков В.А., Колонских А.В., Макатров А.К., Политов М.Е., Теллин А.Г., Якасов А.В. Нестационарная фильтрация в сверхнизкопроницаемых коллекторах при низких градиентах давлений // Нефтяное хозяйство. 2013. №10. С. 52–56.
13. Обзор современных методов повышения нефтеотдачи пласта // НИК Петрос © 2010 [Электронный ресурс]. URL <http://petros.ru/worldmarketoil/?action=show&id=267> (дата обращения: 14.09.2016).

References

1. Gavura V.E. Geology and development of oil and gas fields. Moscow: VNIIOENG, 1995. 496 p.
2. Belonogova E.A., Patrakova E.P., Ivanov V.A. Non-stationary extraction of oil from a flooded zone-inhomogeneous permeability reservoir // Oilfield business. 2012. №3. P. 30–34.
3. Ivanova M.M., Cholovsky I.P., Bragin Yu.I. Oil and gas field geology. M.: Nedra-Business Center, 2000. 414 p.
4. Lysenko V.D., Greifer V.I. Development of unproductive oil fields. M.: Nedra-Business Center, 2001. 562 p.
5. Forest Gray. Oil production. Moscow: Olimp-Business, 2003. 416 p.
6. Rustamov I.F., Khalzov A.A., Lepikhin V.A., Fatkhislamov M.A. Evaluation of the effectiveness of cyclic waterflooding in hete-

- ogeneous reservoirs of the Rostashinsky deposit // Oilfield business. 2013. №3. P. 66–69.
7. Karshiev A.Kh., Agzamov A.A., Nabieva N.K. On the results of the forced withdrawal of liquid from the deposits of the Kokaity deposits with the increased viscosity of oil confined to the carbonate reservoirs // Oilfield business. 2013. №2. P. 34–38.
 8. Fattahov I.G., Kuleshova L.S., Farukhshin I.F. The issue of macro regulation of water extraction limitation on the example of cyclic waterflooding // Oilfield business. 2012. №3. P. 28–29.
 9. Gazizov A.A. Increase in oil recovery of heterogeneous strata at a late stage of development. M.: Nedra-Business Center, 2002. 639 p.
 10. Panakhov G.M., Abbasova N.N. Hydrodynamic method of extraction of a clamped hydrocarbon liquid under conditions of capillary inhomogeneity // Oil industry. 2015. №2. P. 49–52.
 11. Grachev S.I., Korotenko V.A., Yagafarov A.K. Problems of non-stationary waterflooding with the use of surfactants // Drilling and oil. 2011. №2. P. 40–41.
 12. Baikov V.A., Kolonskikh A.V., Makatrov A.K., Politov M.E., Telin A.G., Yakasov A.V. Nonstationary filtration in ultra-low permeable reservoirs at low pressure gradients // Oil Industry. 2013. №10. P. 52–56.
 13. Review of modern methods of enhanced oil recovery // NIK Petros © 2010 [Electronic resource]. URL <http://petros.ru/worldmarketoil/?action=show&id=267> (Date of circulation: September 14, 2016).