

УДК 622.276.43

## НЕСТАЦИОНАРНОЕ ЗАВОДНЕНИЕ КАК ОДИН ИЗ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ С ПОВЫШЕННОЙ ВЯЗКОСТЬЮ НЕФТИ

Чикиров Руст.Р., Мамчистова Е.И., Чикиров Русл.Р.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: rrchikirov@gmail.com

При разработке объектов с повышенной вязкостью нефти эффективность заводнения снижается из-за неравномерности продвижения фронта нагнетаемой воды. Данное явление связано с разницей подвижности добываемого флюида с агентом закачки. Частично описанная проблема может решаться за счет организации нестационарного заводнения, однако анализ научных работ и реализованных проектов показал низкий опыт в рассматриваемой области. Целью данной работы является определение критериев для ранжирования месторождений для получения максимального эффекта от реализации нестационарного заводнения с учетом реологических свойств нефти, геологического строения и фильтрационно-емкостных свойств целевого объекта и составление программы геолого-технических мероприятий для реализации на разрабатываемых месторождениях. Для анализа физики процесса и исключения погрешностей от неопределенных факторов на реальных объектах разработки, оценки метода циклической закачки проводились на синтетических моделях. Одним из достижений работы авторов было создание унифицированного инструмента ранжирования объектов по потенциальной эффективности применения циклического заводнения. Принципом работы созданной формы является первичный анализ геологических и промысловых данных для определения объектов разработки с перспективой применения нестационарного заводнения. Инструмент был апробирован при поиске участков опытно-промышленных работ на месторождениях Оренбургской области. В ходе работы выделены три участка, по которым, для количественного эффекта, проведены дополнительные расчеты на актуальных гидродинамических моделях. Результатом работы явилось включение предложенных мероприятий в планы недропользователя. Сформированные решения применимы для ряда месторождений Оренбургской области с суммарными извлекаемыми запасами более 10 млн т.

**Ключевые слова:** нестационарное заводнение, циклическое заводнение, повышенная вязкость нефти, изменение направления фильтрационных потоков, гидродинамические методы увеличения нефтеотдачи, оптимизация системы ПИД

## UNSTEADY WATERFLOODING AS AN EOR METHOD FOR HIGH-VISCOUS OIL RESERVOIRS

Chikirov Rust.R., Mamchistova E.I., Chikirov Rusl.R.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, e-mail: rrchikirov@gmail.com

In the development of objects with high viscosity of oil flooding efficiency is reduced due to the uneven progress of the front of the injected water. This phenomenon is due to the difference in the mobility of the produced fluid with the injection agent. Partly, the described problem can be solved by the organization of non-stationary flooding, but the analysis of scientific works and implemented projects showed low experience in the field. The purpose of this work is to determine the criteria for the ranking of deposits to obtain the maximum effect from the implementation of non-stationary flooding, taking into account the rheological properties of oil, geological structure and filtration-reservoir properties of the target object, and the preparation of a program of geological and technical measures for implementation in the developed fields. To analyze the physics of the process and to exclude errors from uncertain factors at the real objects of development, estimates of the cyclic injection method were carried out on synthetic models. One of the achievements of the authors was the creation of a unified tool for ranking objects on the potential effectiveness of cyclic flooding. The principle of the created form is the primary analysis of geological and field data to determine the objects of development with the prospect of using non-stationary flooding. The tool was tested in the search for experimental and industrial work in the fields of the Orenburg region. In the course of the work, three areas were identified, for which, for the quantitative effect, additional calculations were carried out on actual hydrodynamic models. The result of the work was the inclusion of the proposed measures in the subsoil user plans. The developed solutions are applicable for a number of fields of the Orenburg region with total recoverable reserves of more than 10 million tons.

**Keywords:** unsteady waterflooding, cyclic waterflooding, high oil viscosity, a change in fluid flows, fluid-dynamic methods of enhanced oil recovery, optimization of water injection system

Значительное количество нефтяных месторождений в РФ на сегодняшний день находится на 3-4 стадиях разработки. Часть из этой группы месторождений характеризуется повышенной обводненностью, существенно опережающей отборы от начальных извлекаемых запасов (НИЗ). При этом ряд месторождений имеют еще и повышенную вязкость нефти. В частности, только к

деятельности компаний Волго-Уральской провинции к такой категории относится более 10 млн т остаточных извлекаемых запасов, для эффективной выработки которых не достаточно традиционных подходов.

Одной из ключевых причин опережающей обводненности пластов с повышенной вязкостью нефти является высокий коэффициент мобильности. Под коэффициентом

мобильности (М) понимается отношение вязкости нефти к вязкости закачиваемой воды. Чем выше коэффициент мобильности, тем большие темпы роста обводненности, что в свою очередь влияет на коэффициент охвата и эффективность выработки [1].

Цель исследования: изучить вопрос эффективности применения нестационарного заводнения (НЗ), как одного из гидродинамических методов увеличения нефтеотдачи, в условиях повышенной вязкости нефти.

#### Материалы и методы исследования

Термин НЗ в отечественной литературе зачастую является обобщающим и подразумевает циклическое заводнение (ЦЗ), основанное на периодическом изменении режимов нагнетания, вплоть до полной остановки закачки. В рамках настоящей статьи будем понимать тождественность НЗ и ЦЗ.

Циклическая закачка на текущий момент распространена во всём мире [2]. Одним из первых наших соотечественников, отметивших возможную перспективность метода, был профессор М.Л. Сургучев. Ещё в середине XX в. он обратил внимание, что нестационарное заводнение (ввиду климатических условий) положительно влияет на динамику обводненности, благодаря пропитке высокопроницаемых пропластков [3]. Метод циклической закачки развивается и за рубежом, если рассматривать РФ, то в условиях повышенной вязкости подобные решения применялись на месторождениях ОАО «Удмуртнефть», где внедрялась циклическая закачка на объектах башкирского яруса среднего карбона с вязкостью нефти до 150 мПа\*с.

Для повышенной вязкости нефти, профиль вытеснения в немалой степени осложняется еще и неоднородностью по проницаемости отдельных слоев. Даже незначительная разница проницаемости в пропластках отчетливо влияет на равномерность продвижения фронта вытеснения [4]. Данный факт становится причиной частых прорывов воды от нагнетательных скважин. Циклическая закачка позволяет в большей степени задействовать вязкостные, гравитационные и капиллярные силы пласта. То есть в период остановки нагнетательной скважины происходит пропитка высокопроницаемых пропластков нефтью из низкопроницаемых, а в период восстановления нагнетания – вытеснение нефти и, соответственно, снижение обводненности. Одним из преимуществ данного метода, безусловно, является низкочувствительность, так как реализация циклического заводнения на месторождениях с уже сформированной системой поддержания пластового давления (ППД) не требует уникального оборудования.

В связи с тем, что опыт применения НЗ на таких пластах невелик, авторы проанализировали физику процесса, исключив погрешности, вносимые реальными объектами разработки. Для оценки метода циклической закачки в условиях пласта с повышенной вязкостью нефти была создана синтетическая модель, состоящая из пяти связанных пропластков с проницаемостями 50, 60, 70, 80 и 100 мД – типичными для рассматриваемых пластов региона [5]. Проницаемость по площади принята однородной (рис. 1).

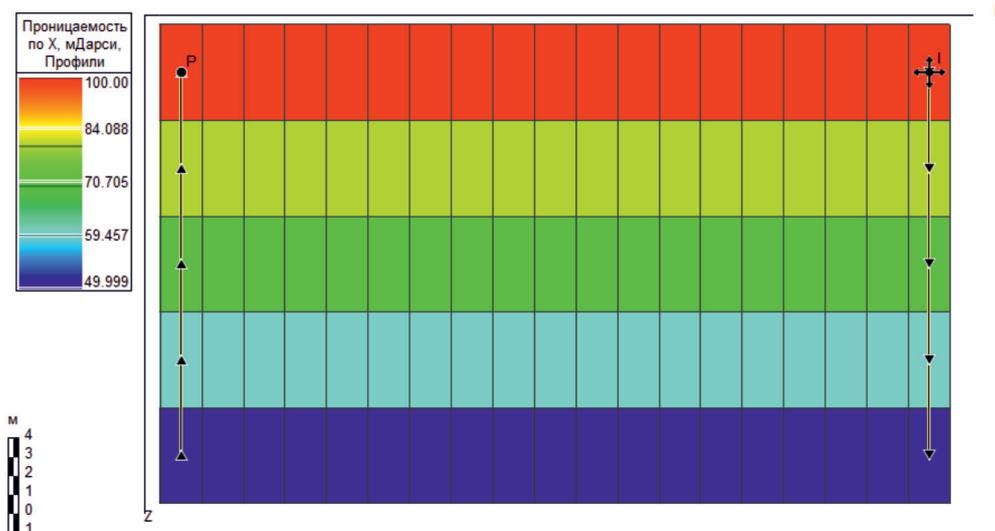


Рис. 1. Распределение проницаемости по пропласткам на модели

Для оценки влияния реологических свойств нефти рассматривались два случая: с вязкостью нефти 1 мПа\*с ( $M = 1$ ) и 30 мПа\*с ( $M = 30$ ). В обеих моделях приемистость была задана, исходя из целевой компенсации 100%, расстояние между скважинами 250 м. Расчёты подтвердили представления о неравномерности фронта вытеснения в связи с повышенной вязкостью нефти. Так, при коэффициенте мобильности  $M = 1$  через 10 месяцев обводненность составила не более 2% (рис. 2), а в модели при  $M = 30$  через те же 10 месяцев обводненность превысила 44% (рис. 3).

**Результаты исследования и их обсуждение**

Стационарное заводнение привело к преждевременному языковому обводнению в связи с высоким коэффициентом мобильности. При этом при расчетах до предельной обводненности 98% КИН в модели с  $M = 1$  составил 0,546, а в модели с  $M = 30$  только 0,443.

Далее, на рассматриваемых моделях следовала серия расчетов определения оптимального цикла закачки и простоя (остановки) нагнетательной скважины в диапазоне от 0,5 сут. до 45 сут.

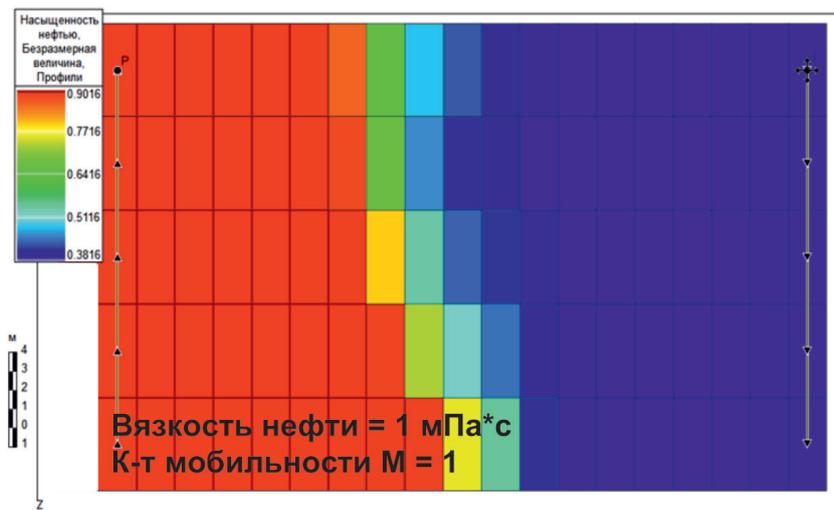


Рис. 2. Распределение насыщенности в условиях вязкости нефти (1 мПа\*с,  $M = 1$ ) через 10 месяцев заводнения

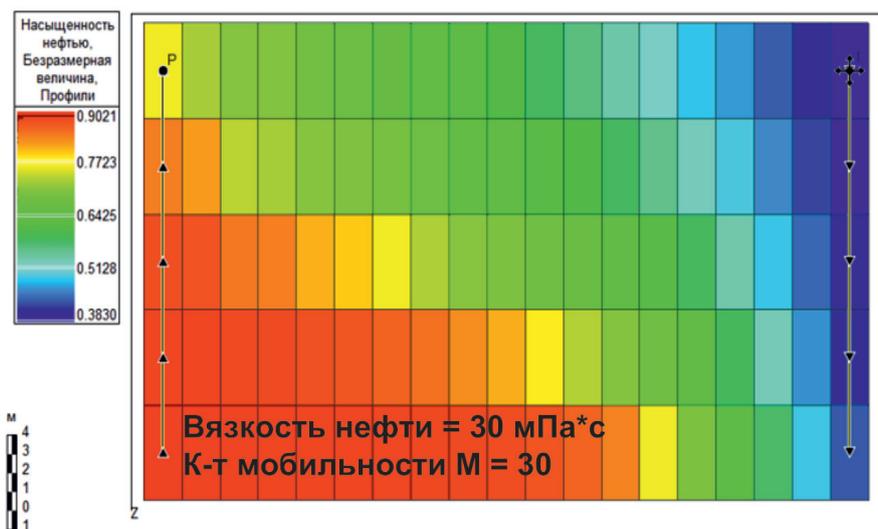


Рис. 3. Распределение насыщенности в условиях повышенной вязкости нефти (30 мПа\*с,  $M = 30$ ) через 10 месяцев заводнения

По итогам расчетов выбраны наиболее эффективные периоды закачки/остановки – 14 суток/14 суток. На рис. 4 приведены результаты расчетов на модели с  $M = 30$  на стадии зрелой выработки (обводненность около 80%) и результаты через 14 суток после остановки нагнетания. Расчеты показали выравнивание фронта вытеснения нагнетаемой водой, что связано с интенсификацией перетоков между низко- и высокопроницаемыми зонами пласта. Данное явление происходит за счёт перераспределения пластового давления, а также влияния капиллярных и гравитационных сил.

Расчет практического применения вышеописанного метода проведен на реальном месторождении – терригенный пласт нефтяного месторождения X Волго-Уральского региона.

Основной проблемой разработки рассматриваемого пласта является опережающая выработку обводнённости (текущие отборы от НИЗ 49% при обводнённости 92%). Вязкость нефти пласта – 25,5 мПа\*с, что относится к категории пластов с повышенной вязкостью в соответствии с российской классификацией запасов.

Расчёт проведен по трём участкам, которые были определены на основе анализа остаточных извлекаемых запасов (рис. 5), преждевременного обводнения добывающих скважин, неравномерности профилей притока и приемистости. Выбранные участки характеризуются неравномерной выработкой по разрезу, образованием застойных зон не вырабатываемой нефти. В качестве примера, по участку № 1, приведен разрез текущей нефтенасыщенности на 01.06.2016 из гидродинамической модели (ГДМ) (рис. 6).

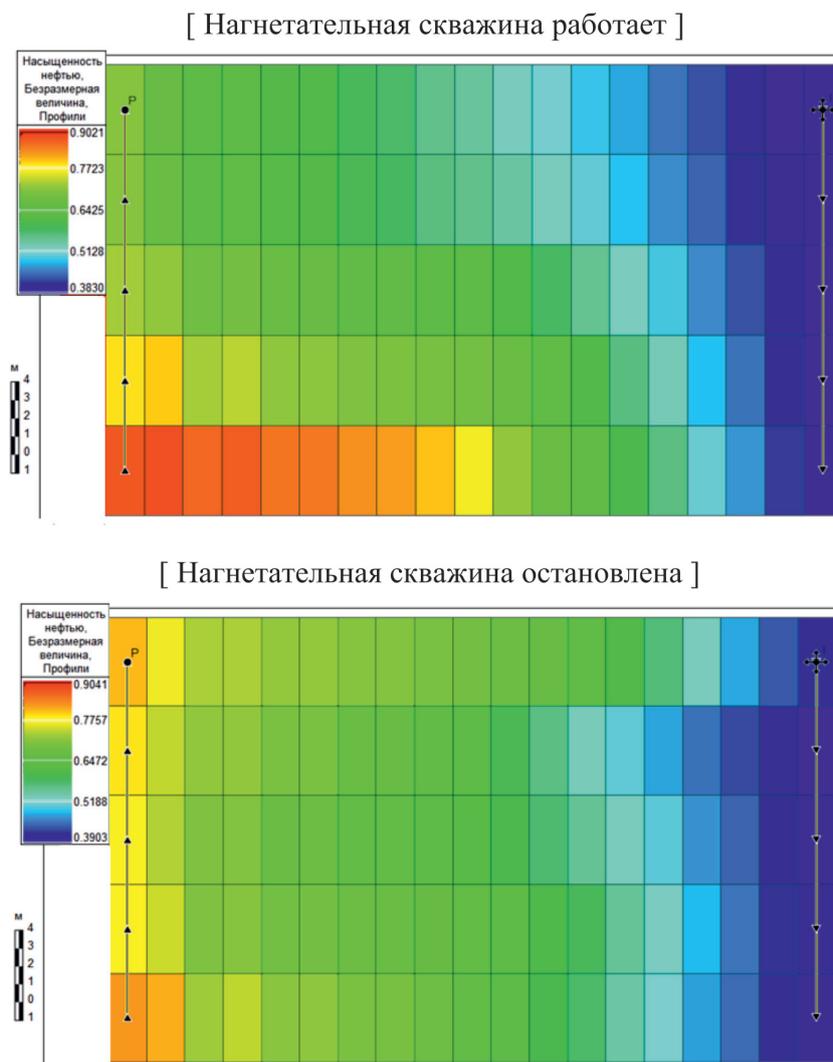


Рис. 4. Процесс перераспределения нефти в пласте



Таблица 2

Сравнение накопленных показателей за прогнозный год

Уча- сток	Вариант	Накоплен- ная добыча жидкости, тыс. т	Нако- пленная добыча нефти, тыс. т	Нако- пленная добыча воды, тыс. т	Нако- пленная закачка, тыс. м <sup>3</sup>	Период увеличе- ния/огра- ничения закачки, сут	Доп. добыча нефти абс/отн., тыс. т / %	Сокраще- ние добычи воды абс/отн., тыс. т / %	Сни- жение обводнен- ности, %
1	Базовый	212,4	8,2	204,2	91,3	—	—	—	—
	Цикл. воз- действие	201,8	11,5	190,3	109,5	15/15	3,3/40,2	13,9 / 6,8	1,84
2	Базовый	372,0	23,4	348,6	116,9	—	—	—	—
	Цикл. воз- действие	345,9	27,9	318,0	67,5	11/11	4,5/19,2	30,6 / 8,8	1,78
3	Базовый	31,7	10,8	20,9	25,6	—	—	—	—
	Цикл. воз- действие	29,0	13,5	15,5	36,5	9/7	2,7/25,0	5,4 / 25,8	12,48
Дополнительная добыча нефти за прогнозный год абс/отн., тыс. т / %							10,5 / 24,8	49,9 / 8,7	2,3

Многовариантные расчеты на гидродинамической модели позволили выбрать наиболее эффективные уровни закачки и периоды циклики для каждого анализируемого участка. Сравнение проводилось по дополнительной добыче нефти относительно базового варианта, в котором приёмистость принималась из расчёта среднегодовых показателей за 2016 г. Ввиду особенности климатических условий необходима реализация НЗ без остановок нагнетательного фонда. При этом в вариантах с ЦЗ приёмистость варьировалась в большую и меньшую стороны, по сравнению с базовым вариантом (табл. 1), а под циклами понимается длительность изменения режима. Расчеты проведены на период прогноза один год.

Суммарный эффект по рассмотренным участкам составил 10,5 тыс. т нефти или 8,7 % (табл. 2). Согласно анализу выработки запасов, прирост добычи нефти связан именно с вовлечением застойных зон в разработку, что свидетельствует об увеличении коэффициента нефтеотдачи. Также отмечается снижение добычи воды на 49,9 тыс. т, т.е. эксплуатационных затрат (табл. 2). Обводненность снизилась на 2,3 %.

### Заключение

Таким образом, для месторождений с повышенной вязкостью нефти, находящихся на 3–4 стадиях разработки, циклическое заводнение может являться одним из доступных инструментов для увеличения нефтеотдачи.

### Выводы

1. В условиях пластов с повышенной вязкостью нефти стационарное заводнение может являться одной из причин преждевременного языкообразного обводнения.

2. Циклическая закачка позволяет снизить обводненность продукции, добычу воды и, как следствие, эксплуатационные затраты.

3. Благодаря низкотратности и простоте реализации, нестационарное заводнение, как способ увеличения нефтеотдачи на месторождениях с повышенной вязкостью, является одним из оптимальных решений, позволяющих увеличить конечную нефтеотдачу.

### Список литературы

1. Чалов С.В. О применении циклического заводнения на нефтяном месторождении / С.В. Чалов, В.В. Поплыгин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2010. – Т. 9, № 5. – С. 65–69.
2. Романова М.Ю. Анализ эффективности нестационарного заводнения как гидродинамического метода увеличения нефтеотдачи пластов в Западной Сибири / М.Ю. Романова, И.А. Синцов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11–4. – С. 735–738.
3. Владимиров И.В. Нестационарные технологии нефтедобычи (этапы развития, современное состояние и перспективы). – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2004. – 216 с.
4. Heriot-Watt Institute of Petroleum Engineering, Reservoir engineering 2010. – 925 p.
5. Тараканова О.Э. Нестационарное заводнение как способ повышения эффективности реализованной системы поддержания пластового давления / О.Э. Тараканова, М.М. Галиуллин, Н.В. Дубовецкая // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 11. – С. 49–53.

### References

1. Chalov S.V. O primeneniі ciklicheskogo zavodneniya na nefyanom mestorozhdenii / S.V. Chalov, V.V. Poplygin // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politexnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo. – 2010. – T. 9, № 5. – P. 65–69.
2. Romanova M.Yu. Analiz e'ffektivnosti nestacionarnogo zavodneniya kak gidrodinamicheskogo metoda uvelicheniya nefteotdachi plastov v Zapadnoj Sibiri / M.Yu. Romanova, I.A. Sincov // Fundamental'ny'e issledovaniya. – 2015. – № 11–4. – P. 735–738.
3. Vladimirov I.V. Nestacionarny'e tehnologii nefteodoby'chi (e'tapy razvitiya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy). – M.: OAO «VNIIOE'NG», 2004. – 216 p.
4. Heriot-Watt Institute of Petroleum Engineering, Reservoir engineering 2010. – 925 p.
5. Tarakanova O.E'. Nestacionarnoe zavodnenie kak sposob povy'sheniya e'ffektivnosti realizovannoj sistemy' podderzhaniya plastovogo davleniya / O.E'. Tarakanova, M.M. Galjullin, N.V. Duboveczkaya // Neftyanoe hozyajstvo. – 2013. – № 11. – P. 49–53.