

Оценка влияния анизотропии пласта по проницаемости на эффективность циклического заводнения

П.В. Пятибратов

к.т.н., доцент¹

pyatibratov.p@gmail.com

А.Р. Аубакиров

ведущий специалист отдела газовых методов
повышения нефтеотдачи пластов²

Artur.Aubakirov@lukoil.com

¹РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,
Москва, Россия

²ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия

На эффективность циклического заводнения оказывает влияние целый ряд геолого-физических и промыслово-технологических факторов. В статье на основе трехмерного гидродинамического моделирования показано влияние анизотропии проницаемости на обоснование времени полуцикла и технологическую эффективность метода.

Материалы и методы

Трехмерное компьютерное моделирование.

Ключевые слова

циклическое заводнение, критерии применимости циклического заводнения, анизотропия пласта по проницаемости

На сегодняшний день в России наиболее распространенным способом разработки остается заводнение. Многие месторождения характеризуются высокой обводненностью продукции скважин и низким коэффициентом охвата пласта воздействием, обусловленным высокой неоднородностью фильтрационно-емкостных свойств. В таких условиях возрастает актуальность применения методов увеличения нефтеотдачи пластов, вместе с тем падение цен на нефть требует поиска эффективных и рентабельных технологий, к которым относятся гидродинамические методы повышения нефтеотдачи пластов. Одним из относительно малозатратных гидродинамических МУН является циклическое заводнение.

В работах [1, 2, 3] подробно рассматривается набор критериев применимости циклического заводнения, связанных геолого-физическими характеристиками объекта и промыслово-технологическими особенностями его разработки. К числу геолого-физических критериев применимости циклического заводнения относят слоистую неоднородность пласта, гидродинамическую связность прослоев, трещиноватость пластов, вязкость нефти, площадную неоднородность, упругоэластичность пластовой системы, текущую нефтенасыщенность.

Эффективность циклического заводнения определяется двумя неразрывно связанными процессами: внедрением воды в малопроницаемые зоны пласта за счет перепадов давления, возникающих при неравномерном распределении давлений, и капиллярным удержанием в малопроницаемых зонах пласта внедрившейся воды.

Таким образом, наиболее подходящими объектами для циклического заводнения

считаются пласты, резко неоднородные по проницаемости, ввиду возникновения нестационарных перепадов давления между разнопроницаемыми слоями при изменении режимов работы скважин.

Однако интенсивность внедрения воды в малопроницаемые зоны пласта определяется не только значениями возникающих градиентов давления, а также проницаемостью слоев в вертикальном направлении.

При создании трехмерной гидродинамической модели пластов в качестве распределения проницаемости в вертикальном направлении часто используют либо значения, полученные в результате ремасштабирования геологической модели методом тензора, либо задаются постоянным коэффициентом анизотропии, равным, например, 10. Под коэффициентом анизотропии проницаемости в данной работе понимается отношение горизонтальной проницаемости к вертикальной, $k_{\text{гор}}/k_{\text{верт}}$ [4].

Значения коэффициента анизотропии в трехмерной гидродинамической модели могут значительно отличаться от результатов, полученных на образцах кернов, из-за различия в масштабе. Представление об анизотропии пласта по проницаемости может изменяться в процессе разработки и изучения пласта, а значения изменяться в десятки и сотни раз [5]. При этом значение коэффициента анизотропии оказывает существенное влияние на процессы перемещения флюидов в пласте при различных системах разработки и на эффективность выработки запасов.

В настоящей статье проводится оценка влияния анизотропии пласта по проницаемости на эффективность циклического заводнения на основе трехмерного компьютерного моделирования.

Для оценки влияния коэффициента анизотропии на эффективность циклического заводнения проведены расчеты на синтетической гидродинамической модели, т.е. упрощенной гидродинамической модели реального объекта, созданной с целью анализа изучаемых процессов и влияния отдельных факторов. Использование такой модели позволяет рассматривать множество вариантов разработки с применением исследуемой технологии в короткий временной промежуток и исследовать влияние на технологию отдельных факторов независимо от других.

Для поставленной задачи была выбрана модель двухфазной трехмерной изотермической фильтрации «BlackOil». При построении модели были использованы свойства реального объекта: глубина залегания, толщина пласта, начальное распределение пластового давления, свойства породы и флюидов, зависимость пористости от проницаемости. Моделирование начального насыщения проводилось в соответствии с моделью капиллярно-гравитационного равновесия. Остаточные

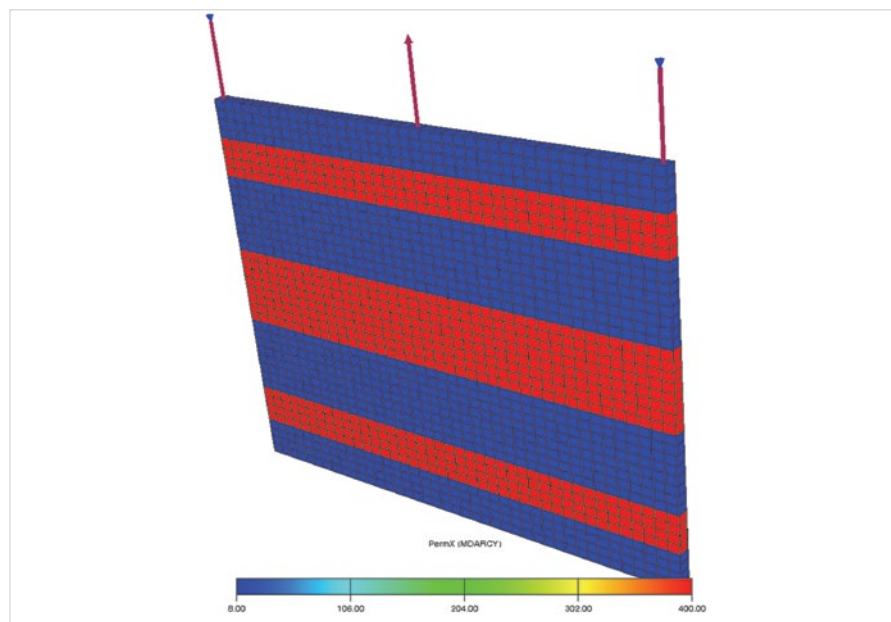


Рис. 1 — Распределение проницаемости в синтетической гидродинамической модели

нефтенасыщенность и водонасыщенность, критическая водонасыщенность заданы в зависимости от пористости и проницаемости. Упрощенная модель представляет собой слоисто-неоднородный пласт, состоящий из 7 слоев, проницаемость высокопроницаемых слоев модели составляет 0.4 мкм², низкопроницаемых — 0.008 мкм² (рис. 1).

Для расчета технологических показателей при циклическом заводнении использовались следующие технологические ограничения:

- полуциклы нагнетания и простоя симметричны;
- амплитуда колебаний давления рассчитывалась из условия 100% компенсации отборов закачкой;
- время полуцикла варьировалось в интервале от 1 до 7 сут.

Расчеты проводились до достижения обводненности 98%. Технологическая эффективность оценивалась по формуле:

$$\text{Эф} = \frac{Q_{\text{н}} - Q_{\text{с}}}{Q_{\text{с}}} \cdot 100\%$$

где Эф — относительный прирост накопленной добычи нефти, %;

$Q_{\text{с}}$ — накопленная добыча нефти при стационарном заводнении, м³;

$Q_{\text{н}}$ — накопленная добыча нефти при циклическом заводнении, м³.

Результаты расчетов технологической эффективности циклического заводнения при разных значениях коэффициента

анизотропии и длительности полуцикла представлены в таб. 1 и на рис. 2.

Результаты расчетов свидетельствуют, что оптимальная длительность полуцикла, т.е. время полуцикла, при котором достигается максимальная дополнительная добыча за один цикл, и технологическая эффективность циклического заводнения зависят от значения коэффициента анизотропии пласта следующим образом (рис. 2):

- чем выше коэффициент анизотропии пласта, тем больше времени необходимо для перераспределения давления в вертикальном направлении и внедрения воды в малопроницаемые пропластки при циклическом заводнении и, следовательно, тем больше время полуцикла;
- чем ниже коэффициент анизотропии, тем интенсивнее происходит перераспределение давления между низкопроницаемыми и высокопроницаемыми пропластками в процессе стационарного заводнения, меньше перепад давления между ними при циклическом заводнении и, следовательно, меньше объем внедрения воды в низкопроницаемые зоны и объем дополнительно вытесненной нефти в результате создания нестационарных перепадов давления.

Прогнозирование технологической эффективности циклического заводнения проведено на основе трехмерной гидродинамической модели одного из месторождений ПАО «ЛУКОЙЛ», некоторые

геолого-физические характеристики которого представлены в таб. 2.

Расчеты проводились для стационарного и циклического заводнения при значениях коэффициента анизотропии пласта, равных 10 и 100. На рис. 2 приведено сравнение характеристик вытеснения при стационарном (пунктирные кривые) и циклическом (сплошные кривые) заводнении при разных значениях коэффициента анизотропии. В случае задания коэффициента анизотропии равного 100 технологическая эффективность циклического заводнения за 10 лет разработки составляет 3.0%, при коэффициенте анизотропии равном 10—2.1%. Результаты расчетов при стационарном заводнении при заданных значениях коэффициента анизотропии отличаются менее чем на 0.2%.

Итоги

В результате проведенных расчетов на секторной гидродинамической модели показано, что наряду с такими факторами как слоистая неоднородность пласта, гидродинамическая связность прослоев, трещиноватость пластов, вязкость нефти, площадная неоднородность, упругоёмкость пластовой системы, текущая нефтенасыщенность, на эффективность метода существенное влияние оказывает коэффициент анизотропии пласта. Время полуцикла и технологическая эффективность циклического заводнения прямо пропорциональны значению коэффициента анизотропии пласта.

Время полуцикла, сут	Коэффициент анизотропии			
	10	100	500	1000
1	0.12	0.83	2.39	3.44
2	0.10	0.81	2.55	3.89
3	0.06	0.71	2.45	3.92
4	0.09	0.59	2.22	3.63
5	0.00	0.40	2.11	3.31
6	0.02	0.36	1.76	3.00
7	0.11	0.36	1.65	2.57
Оптимальное	0.12	0.83	2.55	3.92

Таб. 1 — Результаты расчетов технологической эффективности циклического заводнения при разных значениях коэффициента анизотропии и длительности полуцикла

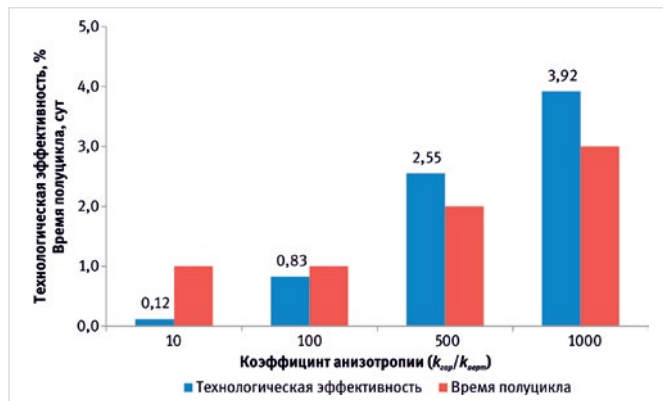


Рис. 2 — Зависимость времени полуцикла и эффективности циклического заводнения от коэффициента анизотропии

Параметры	Ед. измер.	Знач.
	Средняя общая толщина	м
Средняя газонасыщенная толщина	м	-
Средняя нефтенасыщенная толщина	м	5
Пористость	%	19
Проницаемость	мкм ²	0.467
Коэффициент песчаности	доли ед.	0.6
Коэффициент расчлененности	доли ед.	3.4
Вязкость нефти в пластовых условиях	мПа*с	25.1
Вязкость воды в пластовых условиях	мПа*с	1.42

Таб. 2 — Геолого-физические характеристики месторождения

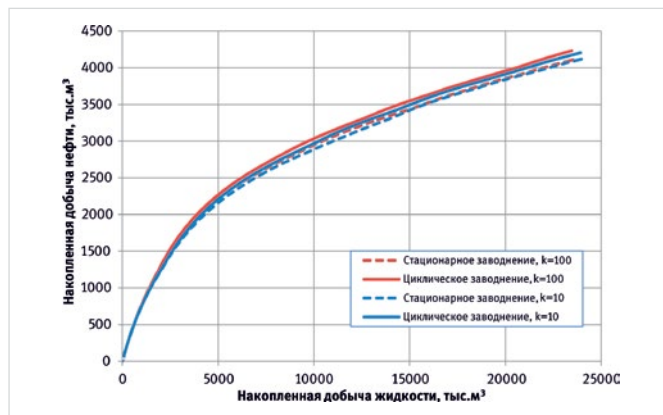


Рис. 3 — Сравнение характеристик вытеснения при стационарном и циклическом заводнении при разных значениях коэффициента анизотропии

Выводы

Показано, что наряду с известными критериями применимости циклического заводнения, анизотропия проницаемости оказывает существенное влияние на выбор технологических параметров метода (время полцикла) и его технологическую эффективность. Результаты представляют научный и практический интерес. В частности в статье показано, как полученные результаты могут быть использованы на полномасштабных трехмерных гидродинамических моделях при проектировании циклического заводнения.

Список литературы

1. Шарбатова И.Н., Сургучев М.Л. Циклическое воздействие на неоднородные нефтяные пласты. М.: Недра, 1988. 121 с.
2. Крянев Д.Ю. Нестационарное заводнение. Методика критериальной оценки выбора участков воздействия. М.: ВНИИнефть, 2008. 208 с.
3. Чертенков М.В., Чуйко А.И., Аубакиров А.Р., Пятибратов П.В. Выбор объектов и перспективных участков для применения циклического заводнения // Нефтяное хозяйство. 2015. №8. С. 60–64.
4. Тиаб Д., Доналдсон Э.Ч. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. 2-е изд. М.: Премиум Инжиниринг, 2009. 868 с.
5. Ringrose, P., Bentley M. Reservoir Model Design: A Practitioner's Guide. Springer, 2015. 249 p.

ENGLISH

OIL PRODUCTION

Assessing the impact of reservoir permeability anisotropy on the cyclic waterflooding effectiveness

UDC 622.276

Authors:

Petr V. Pyatibratov — Ph.D., associate professor¹; pyatibratov.p@gmail.com

Artur R. Aubakirov — leading specialist of gas EOR methods²; Artur.Aubakirov@lukoil.com

¹Gubkin Russian State Oil and Gas university, Moscow, Russian Federation

²LLC "LUKOIL-Engineering", Moscow, Russian Federation

Abstract

The effectiveness of the cyclic waterflooding depends on a number of geological, physical and technological factors. In the article based on a three-dimensional hydrodynamic simulation shows the influence of the anisotropy permeability for half-cycle duration and technological efficiency of the method.

Materials and methods

3D simulation.

Results

As a result of simulations on the sectoral simulation model shows that, in addition to factors such as the layered heterogeneity of reservoir hydrodynamic connectivity layers, fractured reservoirs, oil viscosity, areal heterogeneity, compressibility of reservoir system, current oil saturation, efficiency of the method is significantly affected by the reservoir anisotropy coefficient. Duration of

half-cycle and technological efficiency of cyclic waterflooding is directly proportional to the value of reservoir anisotropy coefficient.

Conclusions

It is shown that in addition to well-known criteria for cyclic flooding applicability, reservoir permeability anisotropy has a significant influence on the choice of process parameters of the method (half-cycle duration) and technological efficiency.

The results are scientifically and practically interesting. In particular, the article shows how the results can be used for full-scale three-dimensional hydrodynamic model for the design of cyclic waterflooding.

Keywords

cyclic waterflooding,
cyclic waterflooding applicability criteria,
reservoir permeability anisotropy

References

1. Sharbatova I.N., Surguchev M.L. *Tsiklichesкое vozdeystvie na neodnorodnye neftyanye plasty* [Cyclic impact on heterogeneous stratum]. Moscow: Nedra, 1988, 121 p.
2. Kryanev D.Yu. *Nestatsionarnoe zavodnenie. Metodika kriterial'noy otsenki vybora uchastkov vozdeystviya* [Nonsrationalary waterflooding. Methods of evaluating the selection criterion of the exposure spots]. Moscow: VNIIneft', 2008, 208 p.
3. Chertenkov M.V., Chuyko A.I., Aubakirov A.R., Pyatibratov P.V. *Vybor ob"ektov i perspektivnykh uchastkov dlya primeneniya tsiklicheskogo zavodneniya* [Zones and regions selecting for cyclic waterflooding]. Oil Industry, 2015, issue 8, pp. 60–64.
4. Tiab D., Donaldson E.Ch. *Petrofizika: teoriya i praktika izucheniya kolektorskikh svoystv gornykh porod i dvizheniya plastovykh flyuidov* [Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties]. 2nd ed. Moscow: Premium Inzhiniring, 2009, 868 p.
5. Ringrose, P., Bentley M. Reservoir Model Design: A Practitioner's Guide. Springer, 2015. 249 p.

СЕМИНАР-КОНФЕРЕНЦИЯ

«Строительство горизонтальных, разветвленных-скважин и ЗБС: проблемы, перспективы, инновационные решения»

10–14 октября 2016

«Инновационные решения в области КРС, ПНП, ГНКТ, внутрискважинные работы и супервайзинг в горизонтальных и разветвленных скважинах»

05–09 июня 2017



Инновационные
Технологии

+7 (3452) 534 009

togc@bk.ru, in_tech@bk.ru

WWW.TOGC.INFO