

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 622.276

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ**Нажису, Ерофеев В.И.***Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
e-mail: narisu2011@yandex.ru, erofeevvi@mail.ru*

В настоящее время технология полимерного заводнения является наиболее совершенным химическим методом для увеличения нефтеотдачи пластов, она может значительно повысить добычу нефти в условиях разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Технология полимерного заводнения позволяет значительно увеличить нефтеотдачу пластов с 5% до 30% на разрабатываемых нефтяных месторождениях. С быстрым развитием данной технологии и хорошим положительным эффектом вытеснения нефти в производстве, технология полимерного заводнения в будущем будет основным методом повышения нефтеотдачи пластов при разработке нефтяных месторождений. В данной работе рассмотрены основные особенности механизма вытеснения нефти из пластов с помощью технологии полимерного заводнения, основные применяемые полимеры в производстве, современное состояние технологии полимерного заводнения в промышленных условиях, их существующие проблемы и тенденции развития технологии полимерного заводнения. В работе особое внимание уделено экономической эффективности применения технологии полимерного заводнения по сравнению с технологией АСП заводнения при нынешних низких ценах на нефть. Установлено, что актуальными являются исследования по установлению механизма возврата профиля абсорбции. Когда полимерное заводнение входит в среднюю и более позднюю стадии из-за возврата профиля абсорбции, вызванного неоднородностью коллектора и удерживанием полимера в коллекторе, тогда слои со средней и низкой проницаемостью будут заблокированы и поглощение жидкости будет протекать значительно труднее, и это не будет способствовать повышению степени использования слоев пласта средней и низкой проницаемости и полимерный раствор циркулирует неэффективно преимущественно в слое с высокой проницаемостью, где содержание остаточной нефти относительно невелико и коэффициент охвата пласта не может быть значительно повышен. Кроме того, разработки новых эффективных полимеров, обладающих высокой термостойкостью, устойчивостью к высокой солености водонефтяных растворов и имеющих низкую себестоимость, является ключевым направлением развития технологии полимерного заводнения в будущем.

Ключевые слова: полимерное заводнение, методы увеличения нефтеотдачи пластов, механизм вытеснения нефти, нефтяное месторождение, коэффициент извлечения нефти

INVESTIGATION AND APPLICATION OF POLYMER FLOODING TECHNOLOGY FOR IMPROVEMENT OF PETROLEUM OIL REFINING**Narisu, Erofeev V.I.***National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: narisu2011@yandex.ru, erofeevvi@mail.ru*

Currently, polymer flooding technology is the most advanced chemical method for enhanced oil recovery, which can significantly increase oil production in the conditions of development and operation of oil fields. The technology of polymer flooding allows to significantly increase oil recovery from 5% to 30% in developed oil fields. With the rapid development of this technology and a good positive effect of oil displacement in production, the technology of polymer flooding in the future will be the main method of enhanced oil recovery in the development of oil fields. This paper discusses the main features of the mechanism of oil displacement from reservoirs using polymer flooding technology, the main polymers used in production, the current state of polymer flooding technology in field conditions, their existing problems and trends in the development of polymer flooding technology. In this paper, special attention is paid to the economic efficiency of the use of polymer flooding technology as compared to the HSA technology of water flooding with the current low oil prices. It has been established that studies on the establishment of the mechanism for returning the absorption profile are relevant. When polymer flooding enters the middle and later stages due to the return of the absorption profile caused by heterogeneity of the reservoir and retention of the polymer in the reservoir, then layers with medium and low permeability will be blocked and fluid absorption will be much more difficult and it will not increase the use of layers of the reservoir of medium and low permeability and polymer solution circulates inefficiently mainly in the layer with high permeability, where the content of residual oil relatively small and the enrollment ratio cannot be significantly increased. In addition, the development of new efficient polymers with high heat resistance, resistance to high salinity of oil-water solutions and having a low cost, are key areas for the development of polymer flooding technology in the future.

Keywords: polymer flooding, oil recovery methods, oil displacement mechanism, oil field, oil recovery factor

В последние годы мировая экономика интенсивно развивается и потребности многих стран в нефти и газе значительно возросли. Чтобы обеспечить достаточный объем добычи нефти, необходимый для развития национальной экономики, в допол-

нение к поиску новых запасов, во многих странах мира основное внимание научных исследований направлено на уменьшение материальных затрат при разработке нефтяных месторождений и на увеличение нефтеотдачи пластов при применении различных

химических методов увеличения нефтеотдачи пластов [1, 2]. В большинстве случаев химические методы увеличения нефтеотдачи пластов относятся к добавлению различных химических реагентов в нагнетательную воду, которые вызывают значительное изменение физико-химических свойств вытесняющей жидкости и межфазных свойств между вытесняющей жидкостью, нефтью и резервуаром, что в конечном итоге приводит к увеличению нефтеотдачи пластов. Полимерное заводнение является самым широко применяемым химическим методом для увеличения нефтеотдачи пластов. Полимерное заводнение позволяет увеличить нефтеотдачу пластов от 5% до 30% [3]. В настоящей работе рассмотрены механизмы вытеснения нефти из пластов с применением метода полимерного заводнения, анализ эффективности применения метода полимерного заводнения в нефтедобывающей промышленности, его существующие проблемы и дальнейшее направление развития данного метода.

*Механизм метода вытеснения нефти
с помощью полимерного заводнения*

Полимерное заводнение пластов достигается за счет добавления некоторого количества частично гидролизованного полиакриламида к нагнетательной воде, за счет этого макроскопически увеличивается вязкость нагнетательной воды и снижается коэффициент мобильности нефти и воды (M_0), т.е., по существу, полимер задерживается в порах коллектора, вызывает уменьшение сечения потока и увеличение фильтрационного сопротивления. Для неоднородного пласта полимер на начальной стадии полимерного заводнения сначала входит в слой с высокой проницаемостью и низким сопротивлением и задерживается в нем, что приводит к уменьшению сечения потока и увеличению фильтрационного сопротивления. Когда тот же раствор полимера проникает в слои с низкой и средней проницаемостью коллектора, также будет происходить задержание полимера и увеличение прироста фильтрационного сопротивления в них. По мере продолжения процесса полимерного заводнения фильтрационное сопротивление в слоях средней и низкой проницаемости коллекторов будет постепенно увеличиваться [4–6]. Объем и время задержки полимера в порах и фильтрационное сопротивление пласта может оцениваться по коэффициенту сопротивления и коэффициенту остаточного сопротив-

ления. По мере увеличения коэффициента сопротивления и коэффициента остаточного сопротивления увеличивается давление нагнетания, повышается перепад давления поглощения в слоях средней и низкой проницаемости, увеличиваются степень поглощения жидкости и коэффициент охвата пласта [7–10]. Для повышения нефтеотдачи пластов используются в основном два типа полимеров: синтетический полимер и биополимер. В настоящее время широко используются частично гидролизованный полиакриламид, ксантановые смолы и модифицированные полимеры, полиакриламиды в значительной степени доминируют при полимерном заводнении, а биополимеры пока не находят широкого применения [11, 12]. Самым широко используемым полимером в процессе повышения нефтеотдачи пластов на месторождении является частично гидролизованный полиакриламид (ПАА). Он представляет собой сополимер полиакриламида и полиакриловой кислоты. ПАА является предпочтительным в процессе повышения нефтеотдачи пластов, так как он может выдерживать высокие механические силы в процессе заводнения. Кроме того, низкая стоимость и устойчивость к бартерному воздействию тоже являются большим достоинством данного полимера. Но ПАА очень чувствителен к солености и вязкости воды. Свойство повышения вязкости значительно снижается, когда ПАА растворяется в воде высокой солености и вязкости [11–13].

Ксантан представляет собой полисахарид, который получают путем ферментации глюкозы или фруктозы различными бактериями. Возможность повышения вязкости раствора заключается в высокой молекулярной массе ксантана, которая находится в диапазоне от 2 до 50×10^6 г/мол. По сравнению с ПАА, ксантан имеет более устойчивую структуру и является более не ионным соединением. Благодаря этим свойствам ксантан не чувствителен к солености и твердости, но после закачки в пласт ксантан чувствителен к бактериальному разложению [13, 14]. Полиакриламид и частично гидролизованный полиакриламид очень чувствителен к солености и вязкости воды, за счет этого свойство повышения вязкости значительно снижается, когда ПАА растворяется в высокоминерализованной воде. Кроме того, термическое разложение и низкая термостойкость являются недостатком полиакриламида и частично гидролизованного полиакриламида. Когда температура

выше, чем 93 °С происходит серьезное термическое разложение полиакриламида, поэтому полиакриламид не пригоден в пластах при высоких температурах. В связи с этим разработка термостойких и солеустойчивых модифицированных полимеров является актуальной задачей [15, 16]. В последние годы исследования термостойких и солеустойчивых модифицированных полимеров разделяют на два основных направления:

- ультростойкие молекулярные полимеры и химическая модификация полимеров, в том числе сополимер акриламида с термостойкими и солеустойчивыми мономерами;
- гидрофобный ассоциирующий полимер, сополимер акриламида с новой структурой [17].

*Состояние применения технологии
полимерного заводнения
в промысловых условиях*

Технологии полимерного заводнения для повышения нефтеотдачи пластов начали применять в середине 20 в. В 1964 г. США проводили первое пилотное тестирование по полимерному заводнению пластов для повышения нефтеотдачи пластов и в течение следующих пяти лет провели 61 пилотное испытание. С 1970 по 1985 г. были проведены 183 промышленных испытаний по полимерному заводнению, 55,7% из них достигли хорошего технического и экономического эффекта. С 1990-х гг. из-за падения цен на нефть количество промышленных испытаний сократилось. В табл. 1 представлено количество проведенных промышленных испытаний по применению технологии полимерного заводнения для повышения нефтеотдачи пластов в мире до 2015 г. В 24 странах были проведены 733 промышленных испытания по применению технологии полимерного заводнения. Из них 8 испытаний были выполнены на море, меньше чем 15% испытаний проведены на карбонатных коллекторах [18, 19].

На сегодняшний день в Китае широко применяются технологии полимерного заводнения для повышения нефтеотдачи пластов. В 1972 г. на нефтяном месторождении Дацин в Китае были впервые проведены полевые испытания технологии полимерного заводнения. После проведенных промышленных испытаний на нефтяных месторождениях Дацин, Цэнгли, Ляохэ, Синьцзян, Даганг, Хэнань и Цзилинь были реализованы проекты по полимерному заводнению. В настоящее время технологии полимерного заводнения широко применяются в Ки-

тае и представляют собой одну из важных технологий для устойчивой добычи нефти [20–22]. В 2003 г. объем добычи нефти в результате полимерного заводнения достиг более 10 млн т / год на месторождении Дацин, который стал крупнейшим месторождением по объему добычи нефти в результате применения технологии полимерного заводнения для повышения нефтеотдачи пластов в Китае, что позволило увеличить коэффициент извлечения нефти (КИН) на 13–14%. Общий объем геологических запасов месторождения Дацин подходит для применения химических методов увеличения нефтеотдачи пластов – 2,313 млрд т. В настоящее время химические методы увеличения нефтеотдачи пластов применены на 87 нефтяных промыслах, с общим количеством 1,077 млрд т геологических запасов [23, 24].

Таблица 1

Количество проведенных испытаний технологий полимерного заводнения для повышения нефтеотдачи пластов в мире до 2015 г.

Страна	Количество	Страна	Количество
Ангола	1	Индонезия	1
Аргентина	11	Кувейт	1
Австралия	1	Мексика	1
Австрия	1	Нигерия	1
Бразилия	2	Оман	2
Канада	50	Польша	1
Китай	67	Румыния	3
Колумбия	1	Россия	2
Франция	5	Суринам	1
Германия	12	Тринидад	1
Венгрия	1	Великобритания	1
Индия	6	США	560

*Существующие проблемы и тенденция
развития полимерного заводнения*

С точки зрения исследования механизма вытеснения нефти полимерного заводнения исследование механизма возврата профиля абсорбции является актуальной задачей [25, 26]. Для нефтяных месторождений с относительно большой неоднородностью пластов полимерное заводнение не имело более высокого эффекта увеличения добычи нефти и уменьшения обводненности. На ранней стадии полимерного заводнения профиль абсорбции вытесняющего агента коллектора может быть улучшен, но когда полимерное заводнение входит в среднюю и более позднюю стадии из-за явления воз-

врата профиля абсорбции, вызванного неоднородностью коллектора и удерживания полимера в коллекторе, слои со средней и низкой проницаемостью будут заблокированы и поглощение жидкости происходит значительно труднее, и это не способствует повышению степени использования слоев пласта средней и низкой проницаемости. Полимерный раствор неэффективно циркулирует преимущественно в слое с высокой проницаемостью, где содержание остаточной нефти относительно невелико и объем охвата не может быть расширен [27–29]. В ходе применения полимерного заводнения используемые полимерные реагенты часто деградируют при различных физических или химических условиях, таких как термическое разложение, окислительная деградация, механическая деградация и др. После деградации высокомолекулярная масса и механическая энергия полимерного реагента уменьшаются или даже исчезают, что приводит к уменьшению вязкости, прочности и снижению эффекта применения полимерного реагента, поэтому для более эффективного повышения нефтеотдачи пластов необходимо уменьшать степень разложения полимера. В нефтяной промышленности, учитывая огромные масштабы производства, большое значение при выборе определенных конкретных химических методов для увеличения нефтеотдачи пластов имеют цена и степень риска при выборе химреагентов. В связи с этим Китайская

заводнения, составляет около $29,1 \times 10^4$ дол. США, а стоимость скважины, работающей с использованием технологии АСП заводнения, значительно больше и составляет $42,7 \times 10^4$ дол. США. Из-за сложности систем очистки сточных вод и систем нагнетания стоимость наземного строительства скважин, работающих с использованием технологии АСП заводнения, значительно выше, чем стоимость скважин, работающих с использованием технологии полимерного заводнения [30].

Таким образом, при нынешних низких ценах на нефть стоимость технологии АСП заводнения значительно выше, чем стоимость полимерного заводнения с точки зрения экономической эффективности, и оно доминирует в химических методах увеличения нефтеотдачи пластов. В то же время необходимо содействовать разработке и применению высокоэффективных и недорогих «зеленых» полимеров и минимизировать затраты на химические вещества, тем самым повышая экономическую эффективность применения технологий полимерного заводнения для повышения нефтеотдачи пластов. В то же время необходимо стимулировать разработки и применение высокоэффективных полимеров с низкой себестоимостью и минимизировать затраты на химические реагенты, тем самым увеличивая экономическую эффективность технологий полимерного заводнения для повышения нефтеотдачи пластов.

Таблица 2

Сравнение затрат на добычу нефти при использовании технологии полимерного заводнения и технологии АСП заводнения

Проекты	Инвестиции в строительство (доллар США на тонну нефти)	Стоимость химического агента (доллар США на тонну нефти)	Операционная стоимость (доллар США на тонну нефти)
Полимерное заводнение	88	37	77
АСП заводнение	88	92	110

национальная нефтяная компания провела экономическую оценку и сделала сравнительный анализ по применению технологии полимерного заводнения и технологии АСП (щелочь/ПАВ/полимер) заводнения для повышения нефтеотдачи пластов. В табл. 2 представлено сравнение финансовых затрат на добычу нефти с использованием технологии полимерного заводнения и технологии АСП заводнения. Так, например, стоимость одной наземной скважины, работающей с использованием технологии полимерного

Заключение

В настоящей работе рассмотрены часто применяемые полимеры для повышения нефтеотдачи пластов, их механизмы вытеснения нефти, состояние применения технологии полимерного заводнения и тенденции развития данной технологии. Объекты применения технологии полимерного заводнения изменяются от песчаниковых пород до гравелитовых и карбонатных пород, от нормальных пластовых температур до высоких пластовых температур и высокоминерализ-

зованных нефтей, от высокомолекулярных полимеров до сверхвысоких полимеров. Поэтому разработки новых полимеров с высокой термостойкостью, устойчивых к высокой солености растворов и с низкой себестоимостью, являются одним из ключевых направлений развития технологий полимерного заводнения в будущем.

Список литературы

1. Bai B., Zhou J., Yin M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control. *Petroleum exploration and development*. 2015. vol. 42. no. 4. P. 481–487. DOI: 10.1016/S1876-3804(15)30045-8.
2. Sheng J.J., Leonhardt B., Nasser A. Status of polymer-flooding technology. *Journal of Canadian petroleum technology*. vol. 54. no. 2. P. 116–125. DOI: 10.2118/174541-PA.
3. El-hoshoudy A.N., Desouky S.E.M., Elkady M.Y., Al-sabagh A.M., Betiha M.A., Mahmoud S. Hydrophobically associated polymers for wettability alteration and enhanced oil recovery – Article review. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2017. vol. 26. no. 3. P. 757–762. DOI:10.1016/j.ejpe.2016.10.008.
4. Hou W. Water injection profile variation of oil layers under polymer flooding. *Petroleum exploration and development*. 2007. vol. 34. no. 4. P. 478–482.
5. Co L., Zhang Z., Ma Q., Watts G., Zhao L., Shuler P.J., Tang Y. Evaluation of functionalized polymeric surfactants for EOR applications in the Illinois Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015. vol. 134. P. 167–175. DOI: 10.1016/j.petrol.2015.06.009.
6. Niu L., Lu X., Xiong C., Tang X., Wu X., Jia X., Zhang S. Experimental study on gelling property and plugging effect of inorganic gel system (OMGL). *Petroleum exploration and development*. 2013. vol. 40. no. 6. P. 728–732.
7. Wang J., Xu S. Overview of methods of improving oil-gas recovery efficiency by chemical flooding. *Contemporary Chemical Industry*. 2016. vol. 45. no. 5. P. 911–915.
8. Dong M., Ma S., Liu Q. Enhanced heavy oil recovery through interfacial instability: A study of chemical flooding for Brintnell heavy oil. *Fuel*. 2009. vol. 188. P. 1049–1056. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.11.014.
9. Shedid A.S. Influences of fracture orientation on oil recovery by water and polymer flooding processes: An experimental approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2006. vol. 50. P. 285–292. DOI: 10.1016/j.petrol.2005.12.002.
10. Xie K., Lu X., Li Q., Jiang W., Yu Q. Analysis of reservoir applicability of hydrophobically associating polymer. *SPE Journal*. 2016. vol. 21. no. 1. P. 1–9. DOI: 10.2118/174553-pa.
11. Wever D.A.Z., Picchioni F., Broekhuis A.A. Polymers for enhanced oil recovery: A paradigm for structure-property relationship in aqueous solution. *Progress in polymer science*. 2010. vol.36. no. 11. P. 1558–1628. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2011.05.006.
12. Mohammad H.S., Mohammad H.G., Mohsen M., Davood R. Experimental and numerical investigation of polymer flooding in fractured heavy oil five-spot systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2013. vol. 108. P. 370–382. DOI: 10.1016/j.energy.2014.09.005.
13. Abass A. Olajire Review of ASP EOR (alkaline surfactant polymer enhanced oil recovery) technology in the petroleum industry: Prospects and challenges. *Energy*. 2014. vol. 77. P. 963–982.
14. Maurya N.K., Kushwaha P., Mandal A. Studies on interfacial and rheological properties of water soluble polymer grafted nanoparticle for application in enhanced oil recovery. *Journal of the Taiwan institute of chemical engineers*. 2017. vol. 70. P. 319–330.
15. Wang Y., Li N., Zhang Z., Zhou J. Research progress of temperature resistant and salt-resistant polymers for oil-displacing agent. *Fine and Specially Chemicals*. 2010. vol. 18. no. 10. P. 35–38.
16. Raffa P., Broekhuis A.A., Picchioni F. Polymeric surfactants for enhanced oil recovery: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2016. vol. 145. P. 723–733. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.07.007.
17. Su X., Wang X., Zhou Y., Sun J., Yang X. Research progress on improving oil recovery by using cross-linked polymer oil-displacing system in China. *Advances in fine petrochemicals*. 2007. vol. 8. no. 4. P. 22–25.
18. Jin Y. Progress in research and application of polymer flooding technology abroad. *Unconventional oil & gas*. 2017. vol. 4. no. 1. P. 116–122.
19. Wang J., Dong M. Optimum effective viscosity of polymer solution for improving heavy oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2009. vol. 67. P. 155–158.
20. Zhang L. Technical and economic potential for polymer flooding in Shengli Oilfield. *Petroleum exploration and development*. 2007. vol. 34. no. 1. P. 79–83.
21. Alsofi A.M., Blunt M.J. Polymer flooding design and optimization under economic uncertainty. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2014. vol. 124. P. 46–59.
22. Zhu Y., Hou Q., Jian G., Ma D., Wang Z. Current development and application of chemical combination flooding technique. *Petroleum exploration and development*. 2013. vol. 40. no. 1. P. 90–97. DOI: 10.4172/2157-7463.C1.014.
23. Wang D., Cheng J., Wu J., Wang G. Application of polymer flooding technology in Daqing oilfield. *Acta Petrolei Sinica*. 2005. vol. 26. no. 1. P. 74–78.
24. Xiong C., Tang X. Technologies of water shut-off and profile control: An overview. *Petroleum exploration and development*. 2007. vol. 34. no. 1. P. 83–86.
25. Wang X., Shen S., Wang J., Li B., Hua K. Remaining oil distribution of polymer flooding in Bohai S oilfield. *Special oil and gas reservoirs*. 2016. vol. 23. no. 3. P. 102–105.
26. Bai Z., Wu S., Fu Z. The distribution of microcosmic remaining oils after polymer flooding in Daqing oilfield. *Acta Petrolei Sinica*. 2013. vol. 34. no. 5. P. 924–931.
27. Hou J., Du Q., Su Q., Zhang B., Gao D. Macroscopic response mechanism and distribution rules of remaining oil in polymer flooding. *Acta Petrolei Sinica*. 2010. vol. 31. no. 1. P. 96–99.
28. Cao R., Han P., Hou W. Section inversion rules and inversion mechanism of polymer flooding. *Acta Petrolei Sinica*. 2009. vol. 30. no. 2. P. 267–270.
29. Liu Z., Li Y., Gao W., Xue X., Wang S., Li X. Experimental study on variable flow resistance during polymer flooding in vertically heterogeneous reservoirs. *Xinjiang Petroleum Geology*. 2017. vol. 38. no. 3. P. 332–336.
30. Li S., Wu X., Wang D., Yu Z., Weng X. Research on polymer flooding system and its development trend. *Contemporary Chemical Industry*. 2018. vol. 47. no. 3. P. 632–635.