

УДК 622.276.6

**Л.А. Магадова**<sup>1</sup>, e-mail: lubmag@gmail.com; **К.А. Потешкина**<sup>1</sup>, e-mail: poteshkina.k@gubkin.ru;

**М.М. Мухин**<sup>1</sup>, e-mail: mmm.himeko@gmail.com; **В.К. Дьяков**<sup>1</sup>, e-mail: dvk111995@mail.ru;

**В.В. Макиенко**<sup>1</sup>, e-mail: vladimir.makienko@lukoil.com

<sup>1</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (Москва, Россия).

## Усовершенствование комплексной технологии повышения нефтеотдачи пластов

Применение технологий по выравниванию профиля приемистости имеет большое значение для месторождений, находящихся на средних и поздних этапах разработки. Сложные геологические условия и наличие природных и техногенных каналов проводимости обуславливают применение современных комплексных технологий, направленных одновременно на изоляцию трещин и перераспределение фильтрационных потоков в пласте. На месторождениях с высокими температурами пласта и низкой проницаемостью породы-коллектора хорошо зарекомендовала себя комплексная технология SiXell, подразумевающая последовательную закачку раствора полимера и осадкогелеобразующей композиции на основе солей алюминия и раствора полимера. Раствор полимера представляет собой низкоконцентрированный раствор полиакриламида, применяемый в качестве буфера, защищающего осадкогелеобразующую композицию от разбавления. Основная проблема, с которой сталкиваются при использовании данной композиции, – высокая адсорбция полиакриламида на породе, препятствующая прокачке композиции глубоко в пласт, что приводит к образованию гелевого экрана вблизи призабойной зоны пласта и уменьшению технологического эффекта от операции.

Авторами статьи было проведено исследование в целях проверки гипотезы, что добавление к раствору полиакриламида сшивателя (соли поливалентного металла) может снизить адсорбцию полиакриламида на породе и, как следствие, позволит прокачать композицию глубоко в пласт. Были также проведены исследования статической адсорбции растворов линейного и сшитого полиакриламида различных марок. На основе полученных результатов авторами статьи разработана методика измерения концентрации сшитого полиакриламида, определены оптимальные марка и концентрации полиакриламида, сделаны выводы о применимости данного раствора в составе комплексной технологии по выравниванию профиля приемистости.

**Ключевые слова:** выравнивание профиля приемистости, повышение нефтеотдачи пласта, полиакриламид, статическая адсорбция, рентгенофлуоресцентный анализ.

.....

**Л.А. Магадова**<sup>1</sup>, e-mail: lubmag@gmail.com; **К.А. Потешкина**<sup>1</sup>, e-mail: poteshkina.k@gubkin.ru;

**М.М. Мухин**<sup>1</sup>, e-mail: mmm.himeko@gmail.com; **В.К. Дьяков**<sup>1</sup>, e-mail: dvk111995@mail.ru;

**В.В. Макиенко**<sup>1</sup>, e-mail: vladimir.makienko@lukoil.com

<sup>1</sup> Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education “Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)” (Moscow, Russia).

## Improvement of Complex Technology of Enhanced Oil Recovery

Application of technologies of straightening the injectivity of profile is quite important for fields on middle and late stages of development. Complicated geological conditions and existence of natural and technogenic fractures determine the application of modern complex technologies focus both on fracture isolation and redistribution of filtration flow in formation. Complex technology SiXell used in high-temperature formations with low permeability requires successive injection of polymer solutions, gel-generate compositions based on aluminic salts and polymer solutions. Polymer solution is represented as a low concentration solution required to prevent dilution of gel-generate compositions. One of the most common problems connected with these compositions is high polyacrylamide adsorption that results in its gelation in bottom-hole zone and decreasing of operational benefit.

The authors of the article conducted a study to test the hypothesis that the addition of a crosslinker (a salt of polyvalent metal) to the solution can reduce the adsorption of polyacrylamide on the rock and result in deep injection of composition

into the formation. The static adsorption of solutions of different brands linear and cross-linked polyacrylamide was researched to simulate reservoir conditions. In addition the measurement method to determine concentration of polyacrylamide was developed and put in practice. The optimal brand and concentration of polyacrylamide were determined to use in complex technology of straightening the injectivity of the profile.

**Keywords:** alignment profile injectivity, enhanced oil recovery, polyacrylamide, static adsorption, X-ray fluorescence.

Текущее состояние долго эксплуатируемых месторождений России характеризуется высокой обводненностью продукции добывающих скважин как пластовыми, так и закачиваемыми водами. Для увеличения срока рентабельной эксплуатации скважин и повышения нефтеизвлечения, особенно из зон пласта, не затронутых заводнением, широко применяются различные потокоотклоняющие технологии. Выравнивание профиля приемистости (ВПП) – это операция, проводимая на нагнетательных скважинах в целях изоляции промытых участков пласта, перераспределения фильтрационных потоков и задействования в разработку дополнительных объемов нефти. На месторождениях с высокими пластовыми температурами хорошо зарекомендовали себя технологии, имеющие низкую первоначальную вязкость, которая повышается при пластовых температурах. Большой интерес для применения в низкопроницаемых пластах представляют осадкогелеобразующие композиции, основной принцип действия которых заключается в закачке реагентов, образующих гелеобразный осадок при взаимодействии с пластовой водой, породой-коллектором или за счет гидролиза компонентов системы.

Осадкогелеобразующие композиции на основе соли алюминия и карбамида широко применяются на месторождениях Западной Сибири для выравнивания профиля приемистости скважин. Применение данных реагентов не требует больших экономических затрат, поэтому осадкогелеобразующие композиции на основе соли алюминия и карбамида постоянно дорабатываются, усовершенствуется их компонент-

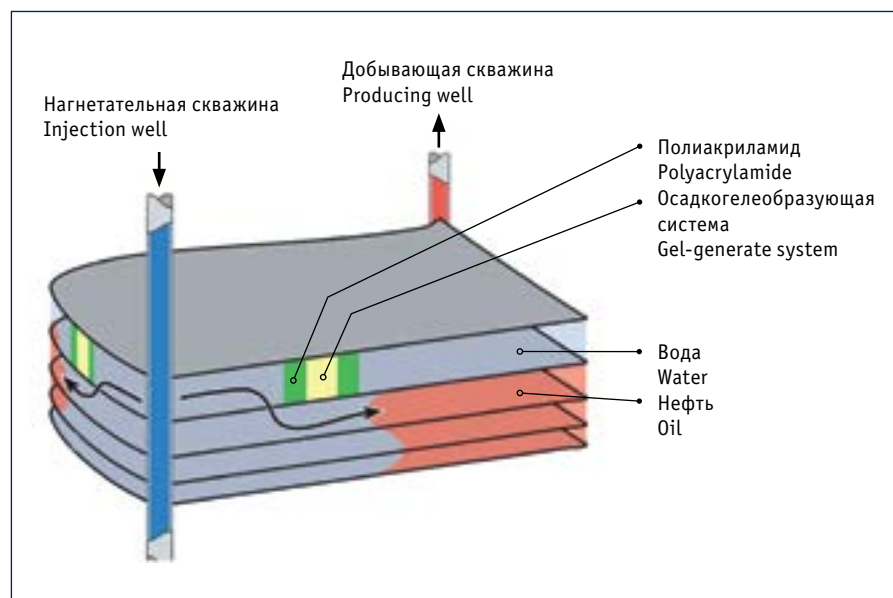


Рис. 1. Схема работы технологии SiXell при вытеснении нефти из пласта

Fig. 1. Scheme of the impact of SiXell technology in the oil displacement from the reservoir

ный состав, используются различные модифицирующие добавки. Одним из направлений разработок является увеличение индукционного периода осадкогелеобразования, так как многими вычислительными и эмпирическими исследованиями показано, что чем дальше от нагнетательной скважины будет расположен изолирующий экран, тем больший прирост дополнительной добычи будет наблюдаться после закачки осадкогелеобразующего состава [1].

В научно-образовательном центре (НОЦ) «Промысловая химия» при РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина разработана комплексная технология SiXell [2, 3], которая предполагает закачку в пласт неорганической осадкогелеобразующей системы (ОГС) на основе солей алюминия и карбамида,

включающей добавку, регулируемую время осадкогелеобразования. В целях снижения уровня разбавления осадкогелеобразующей композиции пластовой водой до и после основной системы в данной технологии используются буферные оторочки, представляющие собой низкоконцентрированный раствор полиакриламида (ПАА) (рис. 1). Технология хорошо зарекомендовала себя на месторождениях с низкопроницаемыми неоднородными коллекторами. Основная проблема, с которой сталкиваются при применении данной технологии, – это высокая адсорбция ПАА на породе, из-за чего гель образуется в прискважинной зоне пласта. Ввиду использования данной технологии в низкопроницаемых коллекторах повышение концентрации ПАА является нецелесообразным.

Ссылка для цитирования (for citation):

Магадова Л.А., Потешкина К.А., Мухин М.М., Дьяков В.К., Макиенко В.В. Усовершенствование комплексной технологии повышения нефтеотдачи пластов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2019. № 1–2. С. 70–73.

Magadova L.A., Poteshkina K.A., Mukhin M.M., Diyakov V.K., Makienko V.V. Improvement of Complex Technology of Enhanced Oil Recovery. Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory, 2018, No. 12, P. 70–73. (In Russian)

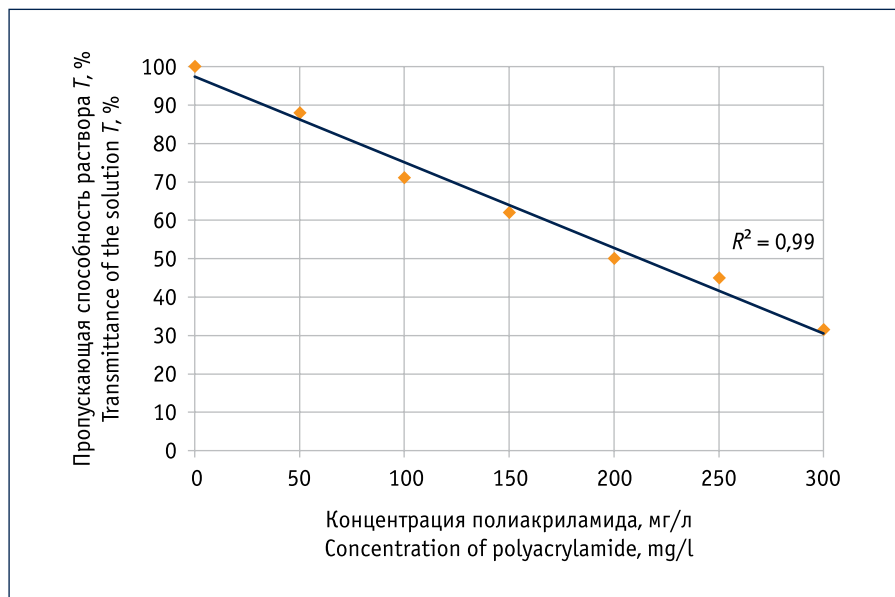


Рис. 2. Зависимость пропускающей способности раствора от концентрации полиакриламида марки FP 307

Fig. 2. The dependence of the transmittance of the solution on the concentration of polyacrylamide FP 307

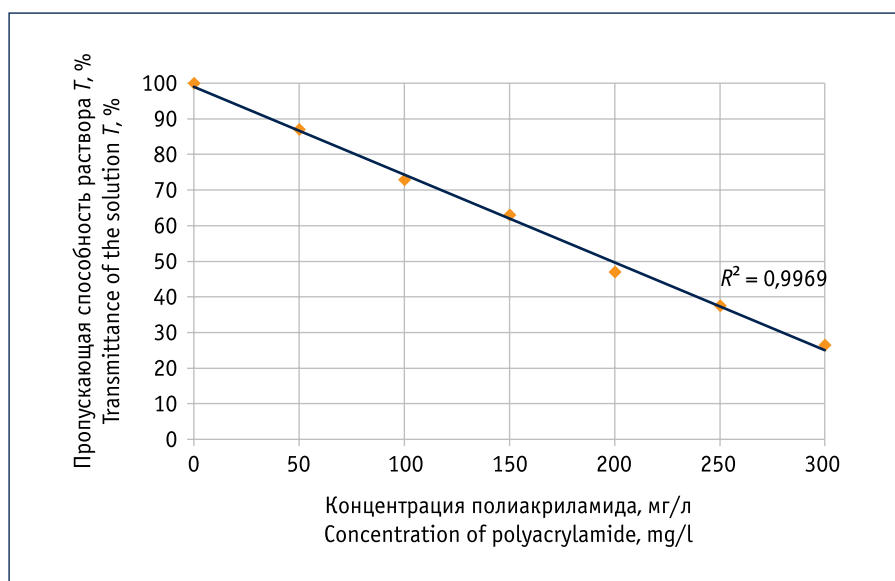


Рис. 3. Зависимость пропускающей способности раствора от концентрации полиакриламида марки AN 125 SH

Fig. 3. The dependence of the transmittance of the solution on the concentration of polyacrylamide AN 125 SH

Было выдвинуто предположение, что добавление сшивающего агента (соли поливалентного металла) к раствору ПАА позволит снизить его адсорбцию на породе. Ионы поливалентного металла связывают функциональные группы молекул ПАА, что ослабляет их взаимодействие с породой (подана заявка № 2018118834 от 22.05.2018 на патент

на изобретение «Способ разработки обводненной нефтяной залежи»). В целях подтверждения теории была проведена серия экспериментов по исследованию статической адсорбции растворов ПАА двух марок – FP 307 (гидролизованной ПАА) и AN 125 SH (сульфонируемой ПАА). В качестве сшивающего агента применялся раствор ацетата

хрома товарной формы 50 % масс. в соотношении ПАА и ацетата хрома 20:1 (в пересчете на чистое вещество).

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ АДСОРБЦИИ РАСТВОРОВ ПОЛИАКРИЛАМИДА

На первом этапе оценивалась термостабильность растворов ПАА обеих марок в пресной (0,32 г/л) и минерализованной (24 г/л) водах концентрацией 100, 300 и 500 мг/л. Термостабильность оценивалась по изменению эффективной вязкости растворов при температуре 97 °С в течение 14 сут. ПАА марки AN 125 SH в низких концентрациях оказался более устойчивым к минерализации, а оптимальной концентрацией оказалось 300 мг/л: у данной системы наблюдалась минимальная разница вязкостей между сшитым и линейным растворами. Данное обстоятельство говорит о том, что сшитый раствор обладает низкой вязкостью, что позволит прокачать его глубоко в пласт.

Далее было проведено исследование статической адсорбции растворов линейного и сшитого ПАА обеих марок на насыпной модели, представляющей собой песок с размером частиц 0,08–0,28 мм. Исследования проводились в герметичном контейнере, куда помещали 100 г песка и 50 г раствора полимера концентрацией 300 мг/л. Системы выдерживались при комнатной температуре до наступления динамического равновесия. Для поддержания оптимального контакта между жидкостью и твердой фазой образцы перемешивались каждые 6 ч. Для всех образцов ставились пять параллельных опытов, использовался также «холостой» образец (без песка) для учета влияния термической и механической деструкций.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ ПАА ПОСЛЕ АДСОРБЦИИ

Концентрация линейного ПАА определялась фотоколориметрическим методом на приборе КФК-2 при длине волны 490 нм по методике АРІ [4]. Для этого был построен график зависимости пропускающей способности раствора T, %, от концентрации ПАА в растворе в диапазоне концентраций



от 0 до 300 мг/л при добавлении «отбеливающего раствора» – раствора гипохлорита натрия. При концентрации ПАА выше 300 мг/л наблюдалось образование хлопьевидных конгломератов, негативно влиявших на показания прибора. Как видно на рис. 2 и 3, зависимость пропускающей способности раствора от концентрации для обеих марок ПАА носит линейный характер. С учетом потери концентрации при термической и механической деструкции адсорбция линейных растворов составила: для FP 307 – 0,0405 мг/г, для AN 125 SH – 0,0365 мг/г.

Определить концентрацию ПАА в шитом растворе ПАА фотоколориметрическим методом не представлялось возможным ввиду образования осадка в системе при добавлении «отбеливающего раствора» гипохлорида натрия. Если предположить, что все ионы хрома

участвуют в шивке и их количество в растворе остается пропорциональным концентрации ПАА в жидкой фазе, то концентрацию ПАА в шитом растворе представляется возможным установить косвенным способом путем определения концентрации хрома в растворе и соответствующего расчета. Содержание хрома при этом можно определять различными видами титрования или с помощью таких инструментальных методов анализа, как атомно-абсорбционная спектроскопия, рентгеновская спектроскопия или ионообменная хроматография. С учетом особенностей пробы наибольший интерес представляет определение хрома методом рентгеновской флуоресценции. Предварительные исследования позволили оценить, что добавление ацетата хрома позволяет снизить адсорбцию растворов ПАА на 15 %.

## ВЫВОДЫ

Исследование способов снижения адсорбции растворов ПАА является важным направлением при разработке новых технологий ВПП.

В рамках усовершенствования технологии SiXell изучение статической адсорбции растворов ПАА показало, что для марки AN 125 SH характерна меньшая адсорбция по сравнению с маркой FP 307. Данные исследования подтверждают высокую эффективность применения сульфонированных ПАА, особенно в регионах Западной Сибири, для которых характерны высокие температуры. Применение раствора шитого ПАА марки AN 125 SH в составе комплексной технологии SiXell позволит уменьшить объем буферной оторочки ПАА при сохранении тампонирующих свойств осадкогелеобразующей композиции.

## Литература:

1. Силин М.А., Елисеев Д.Ю., Куликов А.Н. Пути развития технологий физикохимического воздействия на пласты месторождений Западной Сибири с целью повышения их нефтеотдачи // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2012. № 4 (269). С. 40–48.
2. Магадова Л.А., Потешкина К.А., Макиенко В.В. и др. Составы для комплексной технологии повышения нефтеотдачи пласта, основанной на удаленном гелеобразовании // Технологии нефти и газа. 2018. № 5 (118). С. 31–36.
3. Состав многофункционального реагента для физико-химических методов увеличения нефтеотдачи (МУН): пат. 2529975 РФ, МПК E21B 43/22, E21B 33/138, C09K 8/508 / Н.И. Николаев, В.И. Кокорев, В.Б. Карпов и др.; патентообладатель: ОАО «РИТЭК», ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина»; № 2013129541/03; заявл. 28.06.2013; опубл. 10.10.2014; Бюл. № 28, 8 с.
4. Method I. Measurement of Concentration of Polyacrylamides by the Bleach Method // API recommended practice 63 (RP 63), 1st edition, June, 1990.

## References:

1. Silin M.A., Eliseev D.Y., Kulikov A.N. Ways of Development of Physicochemical Effect on West Siberia to Enhance Oil Recovery. Trudy Rossijskogo gosudarstvennogo universiteta nefiti i gaza imeni I.M. Gubkina = Proceeding of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2012, No. 4 (269), P. 40–48. (In Russian)
2. Magadova L.A., Poteshkina K.A., Makienko V.V., et al. Compositions for Complex Technology of Enhanced Oil Recovery Based on Remote Gel Formation. Tekhnologii nefiti i gaza = Oil and Gas Technologies, 2018, No. 5 (118), P. 31–36. (In Russian)
3. Composition of Multi-Functional Reagent for Physical and Chemical Advanced Recovery Methods (ARM) – Patent No. 2529975 RF. MPC E21B 43/22, E21B 33/138, C09K 8/508; authors – N.I. Nicolaev, V.I. Kokorev, V.B. Karpov, et al.; patent holder – Russian Innovative Fuel and Energy Company OJSC, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Gubkin Russian State University of Oil and Gas, No. 2013129541/03; appl. June 28, 2013; publ. October 10, 2014; Bul. No. 28, 8 p. (In Russian)
4. Method I. Measurement of Concentration of Polyacrylamides by the Bleach Method. In: API recommended practice 63 (RP 63), 1st edition, June, 1990.