

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2019, №1, Том 11 / 2019, No 1, Vol 11 <https://esj.today/issue-1-2019.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/68ECVN119.pdf>

Статья поступила в редакцию 23.01.2019; опубликована 14.03.2019

Ссылка для цитирования этой статьи:

Щерба В.А., Гомес Антониу Шикуну Суами, Воробьев К.А. Экономическое обоснование применения полимерного заводнения в глубоководных морских месторождениях высоковязкой нефти для увеличения нефтеотдачи в Республике Ангола // Вестник Евразийской науки, 2019 №1, <https://esj.today/PDF/68ECVN119.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Shcherba V.A., Gomes Antoniu Shikuna Suami, Vorob'ev K.A. (2019). The economic rationale for the use of polymer flooding in deep offshore heavy oil field to increase recovery in the Republic of Angola. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 1(11). Available at: <https://esj.today/PDF/68ECVN119.pdf> (in Russian)

УДК 33

Щерба Владимир Афанасьевич

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия
Доцент департамента «Недропользования и нефтегазового дела»
Кандидат геолого-минералогических наук
E-mail: shcherba_va@mail.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=666323

Гомес Антониу Шикуну Суами

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия
Магистр департамента «Недропользования и нефтегазового дела»
Кандидат геолого-минералогических наук
E-mail: engchicunagomes@mail.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=958737

Воробьев Кирилл Александрович

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия
Бакалавр департамента «Недропользования и нефтегазового дела»
E-mail: k.vorobyev98@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5792-3979>
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=887256
SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57193517186>

**Экономическое обоснование применения
полимерного заводнения в глубоководных морских
месторождениях высоковязкой нефти для увеличения
нефтеотдачи в Республике Ангола**

Аннотация. В течение последних десятилетий полимерное заводнение широко применялось для увеличения нефтеотдачи после обычного заводнения. Его применение вызывает интерес, особенно при текущих ценах за баррель нефти, т. к. данный метод повышает нефтеотдачу и является экономически выгодным. Несмотря на то, что закачка полимера на суше является проверенным методом увеличения нефтеотдачи, учитывая сотни успешно проведенных операций во всем мире, только одна экспериментальная операция была реализована на шельфе и ни одной в глубоководных условиях. Проект по закачке полимеров на месторождении Даля в Республике Ангола является первым в мире в глубоководных условиях. Тщательные комплексные геологические и инфраструктурные исследования привели к выводу

начать испытание на приемистость полимера на одной скважине с последующей непрерывной закачкой полимера на одну из четырех нагнетательных линий. В данной статье авторами описаны основные результаты экспериментального этапа.

Ключевые слова: экономика; полимерное заводнение; метод увеличения нефтедачи; тяжелая высоковязкая нефть; разработка месторождения высоковязкой нефти

В целях увеличения экономической эффективности разработки углеводородного сырья, сокращения прямых капиталовложений, а также создания оптимальных условий для реинвестирования капитала применяются различные способы повышения нефтеотдачи. Полимерное заводнение является широко применяемым методом увеличения нефтеотдачи (МУН). Применение данного метода вызывает интерес со стороны НИИ, особенно при текущих ценах за баррель нефти. Полимерное заводнение с лучшим коэффициентом подвижности улучшает эффективность охвата по сравнению с обычным заводнением [1].

Полимерное заводнение не является принципиально новым методом, так как в 2000 году было зарегистрировано более 170 полевых испытаний для вытеснения нефти закачиванием полимеров, и с тех пор было запущено около 2000 проектов. С другой стороны, применение данного метода на шельфе чрезвычайно ограничено. Успешен только один единственный опыт, проведенный в заливе на Востоке КНР. Проект все еще активен, но ограничен несколькими скважинами.

В самом начале геологических исследований в качестве основного ограничивающего фактора для извлечения закачиванием воды в пласт была определена вязкость нефти. Принимая во внимание основные параметры коллектора: средневязкая нефть, низкотемпературный коллектор, высокопроницаемые песчаники, закачка полимера была положительно оценена как потенциальный метод увеличения нефтеотдачи (МУН) для месторождения Даля (табл. 1).

Месторождение Даля содержит четыре различных залежей: Нижний главный канал, Верхний главный канал, Нижний фланг и Камелия.

Таблица 1

Основные данные месторождения Даля [2]

Извлекаемые запасы нефти, млрд. барр.	1
Площадь нефтеносности, км ²	230
Глубина моря, м	1200–1400
Глубина залегания залежей, м	800–1000 ниже морского дна
Средняя эффективная нефтенасыщенная толщина, м	от 6 до 10
Средняя проницаемость, дарси	1
Пластовая температура, °С	от 45 до 56
Пластовое давление, МПа	21,5–23,5
Вязкость нефти в пласте, мПа*с	10
Вязкость воды в пласте, мПа*с	0,5

В 2003 году было начато исследование, в котором были определены четыре основные задачи, чтобы продемонстрировать выполнимость и потенциальные преимущества полимерного заводнения на месторождении Даля:

1. Вязкость: была запущена специальная внутренняя лабораторная программа для выбора полимера и получения основных данных, необходимых для обоснованной оценки добавочной нефти;
2. Оценка ресурсов: моделирование с полимером и без полимера с использованием специализированного программного обеспечения и лабораторных входных

параметров, включая разработку и оптимизацию стратегии закачки (дата начала и частичная или полная обводненность месторождения);

3. Экспериментальная операция: цели, дизайн;
4. Архитектура: требуется дополнительное оборудование – логистика.

Основным решением стал выбор коммерческого частично гидролизованного полиакриламида с высоким молекулярным весом (18–20 МДа), который позволяет развивать адекватную вязкость в условиях солености месторождения Даля (25 г/л в начале – 52 г/л на основе моделирования добываемой воды) [2].

Вязкость раствора полимера сильно уменьшается, когда соленость увеличивается с 25 г/л до 40 г/л, но не выходит за пределы этого порога. Расчетная концентрация составляет 0,7 % активного материала. В наземных сооружениях можно ожидать значительного механического разрушения, и значения от 25 до 50 % измерялись во время испытаний с помощью дроссели, идентичны дроссели для подводных скважин. Адсорбция измерялась в разных образцах керна, от 200 мД до нескольких Дарси [3].

Дополнительная нефть оценивается в диапазоне от 3 до 7 % от исходной нефти в зависимости от пласта (4 различных пластов с различной вязкости нефти и неоднородностью проницаемости) и даты начала закачки полимера [2].

В самом начале исследований выяснилось, что наиболее неблагоприятными сценариями полимерного заводнения были те, в которых приемистость вязкого водного раствора была недостаточной для обеспечения адекватного поддержания пластового давления. Соблюдение за заполнением пустот считалось обязательным в концептуальных исследованиях.

Поэтому поэтапный подход был создан, состоящим из 3 ключевых этапов:

1. Испытание на одной скважине для демонстрации приемистости и работоспособности закачки полимера в условиях месторождения Даля;
2. Проводится закачка полимера во всех нагнетательных линии залежи Камелии, чтобы продемонстрировать долгосрочную способность и работоспособность, а также обеспечить, что полимер является эффективным (т. е. остается вязким в залежи, что является условием для получения дополнительной нефти);
3. Расширение полимерного заводнения на все месторождения, если на предыдущих этапах наблюдались положительные результаты.

Большие мешки (750 кг) порошкового полимера отправляются в контейнерах из Европы в Луанду, где строится местное промежуточное хранилище.

Для обеспечения приготовления хорошего полимерного раствора необходимо проверить ряд свойств: гигрометрию, вязкость, нерастворимое содержание, влажность/температуру, фильтруемость, содержание свободного акриламида, распределение частиц по размерам, степень гидролиза, содержание кислорода. Специальная конструкция (полимерная дозировочная машина) была разработана для испытания на закачку полимеров. На первом этапе была предназначена закачка в 3 скважины подводной линии нагнетания длиной 10 км.

Основной принцип процесса заключается в подготовке раствора для закачки в пласт в два этапа. На первом этапе из десульфированной морской воды и порошкового полимера получают маточный (концентрированный) раствор, который созревает в течение 40 мин. На втором этапе маточный раствор закачивается под давлением (макс. 15 МПа) в систему впрыска

воды (смесь очищенной воды и десульфированной морской воды) для разбавления через статический смеситель и, наконец, направляется в райзер (рис. 1).

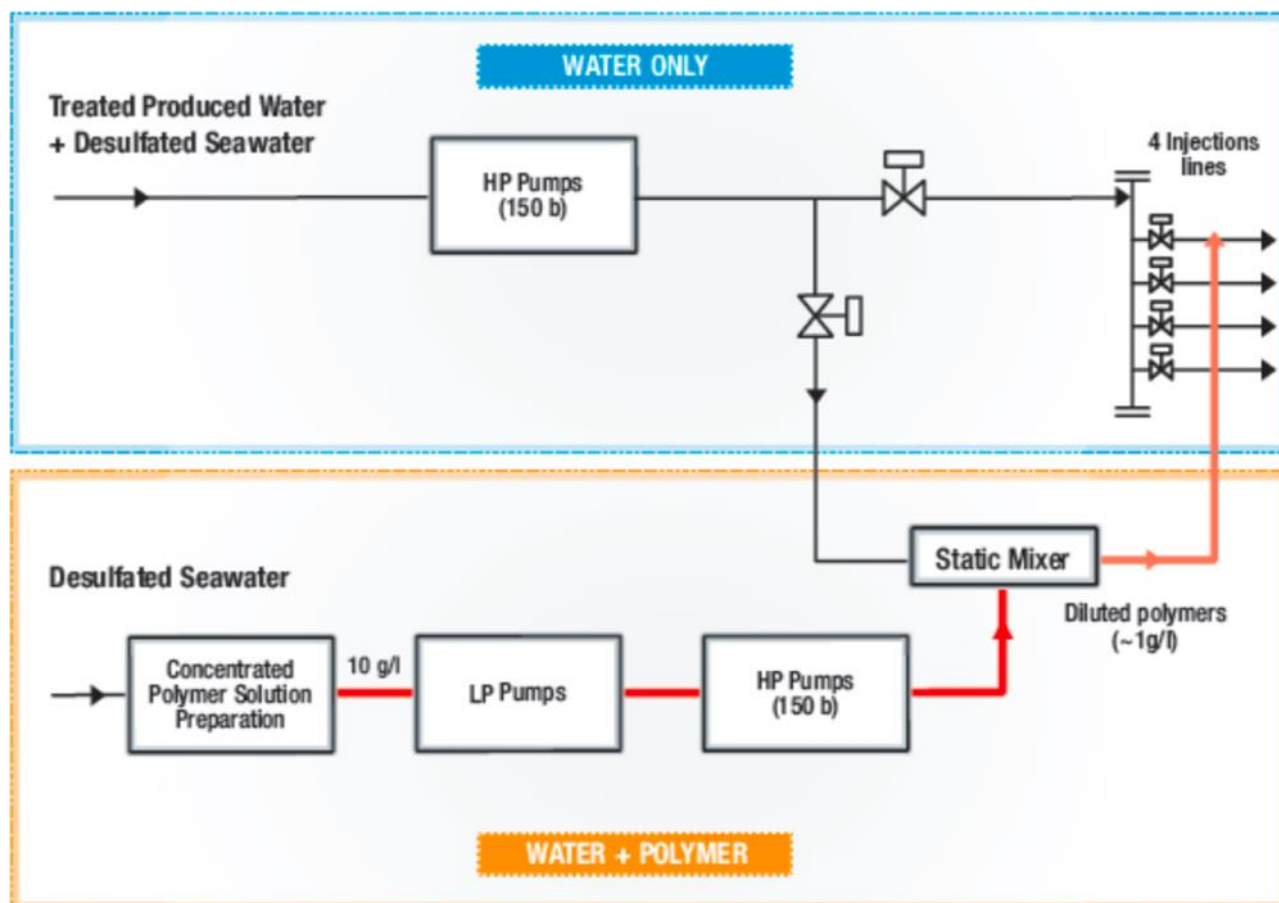


Рисунок 1. Принципиальная схема закачка полимеров [2]

Процедуры для обеспечения качества и его контроля были определены и использованы все время процесса полимера включая поставку, переход, растворение, и впрыску раствора. На всем протяжении подготовки полимерного раствора расположены точки отбора проб, определены инструменты и процедуры для его отбора.

Скважина DAL710 (в залежи Камелия) была выбрана для проверки приемистости растворов полимеров на основе следующих критериев:

- это одна из нагнетательных скважин залежи Камелия;
- это наклонная скважина (а не горизонтальная скважина), что делает интерпретацию падения давления менее неопределенной;
- она уже была пробурена и испытана, что позволило получить надежные данные для проектирования последовательного испытания закачки;
- во время испытания была доступна значительная линия для закачки воды;
- и, наконец, что не менее важно, он оснащен датчиками температуры и давления в забое скважины, позволяющими осуществлять точный мониторинг закачки воды.

Задача состоит в том, чтобы охарактеризовать режим закачки с помощью последовательных шагов скорости потока, тщательно отслеживая уровни давления и

продемонстрировать способность готовить высококачественные растворы полимеров с заданной скоростью и концентрацией в условиях эксплуатации на шельфе.

Были испытаны две концентрации полимеров: для геологических исследованных целей, для наблюдения за работы нагнетательных скважин при различных вязкостях; для эксплуатационных задач, для испытания полимерной дозировочной машины при разной скорости потока маточного раствора. Время от времени закачка прерывалась, чтобы наблюдать за падением давления.

Критерии успеха геологических исследований были определены следующим факторам:

- минимальная скорость закачки 3500 барр. воды/день при целевой вязкости, основана на требованиях месторождения в этой скважине;
- минимальный совокупный объем закачки является 75 000 баррелей загущенного раствора, чтобы характеризовать приемистость и работоспособность полимерной дозировочной машины;
- эксплуатационные результаты испытаний на полимерное заводнения.

Испытания начались 24 декабря 2008 года и закончились 3 апреля 2009 года.

Исправность глубокой морской закачки полимера с использованием десульфатированной морской воды была успешно продемонстрирована. Время безотказной работы составило в среднем 80 %, а раствор полимера, приготовленный на борту судно, был хорошего качества. С начала закачки полимера (декабрь 2008 г.) фильтруемость была хорошей, а нерастворимое содержание низкое ($< 0,5\%$) [2].

Измерение постоянного перепада давления выше и ниже по течению подводного дроссели зафиксировало изменение перепада давления (ΔP) при переходе от чистой воды к раствору полимера. Это было дополнительно подтверждено во время первого этапа, как показано на рисунке.

Испытание в основном выполнил все геологические цели:

- скорость закачки 13 000 баррелей в сутки при целевой вязкости 3,3 мПа*с в головке райзера (вместо назначены – 3500 баррелей в сутки);
- совокупный объем закачки в 390 000 баррелей выше 3,3 мПа*с (вместо назначены – 75 000 баррелей);
- не наблюдались признаки закупорки или потери закачки.

Испытание также отметил тот факт, что закачки полимеров были лучше, чем ожидалось, в рыхлых песках месторождения Даляя.

К сожалению, интерпретация падения давления была трудной, в основном из-за эксплуатационных проблем.

После успешного завершения испытания полимерного заводнения в скважине DAL710 был начат промежуточный период закачки только воды с разными целями:

- измерить поведение давления DAL710 после впрыска полимера;
- установить базовую нагнетательную линию воды для каждого из двух других скважин DAL713 и DAL729.

Параллельно был полностью проверен полимерную дозировочную машину, и были сделаны некоторые улучшения на основе выводов, извлеченных из первого испытания, таких как усиление трубопровода для снижения вибрации в секциях высокого давления, пересмотр

автоматических последовательностей блока питания (блока нарезки полимеров) сократить время простоя и т. д.

Этап 1 официально начался 8 февраля 2010 года с закачки на все нагнетательные линии залежи Камелии.

К сентябрю 2011 года в три скважины было закачено более 5,5 млн баррелей раствора полимера, включая 0,390 млн закачено во время испытания [3].

Качество концентрированных растворов, приготовленных на полимерной дозировочной машине, оставалось в соответствии со спецификациями, поддерживая низкий коэффициент фильтрации (1,1) и низкое содержание нерастворимых веществ (0,5 %).

Непрерывный мониторинг закачки давления доступен благодаря манометрам в забое скважины для отслеживания эволюции приемистости скважины. Качество очистки производимой воды является одним из ключевых деталей, влияющих на приемистость разбавленного раствора полимера, и требует тщательной проверки. Из-за большого расстояния между нагнетательной и добывающей скважины (от 1000 до 1500 м) увеличение нефтеотдачи из-за закачки полимера является медленной: уменьшение обводненности (или замедление обводненности) или даже достижение полимера до добывающей скважины, как ожидается, займет от 3 до 5 лет на основе имитационной работы [3].

Было рассмотрено бурение загущающую скважину: либо добывающая, либо нагнетательную, либо скважина для наблюдения и отбора проб. Была проведена оценка плюсов и минусов каждого варианта, включая осуществимость, ценность информации и экономичность. Окончательный выбор состоял в том, чтобы пробурить пробоотборную скважину рядом с нагнетательной скважиной, с дополнительной целью изучения добычи в более глубоком горизонте. Цель состоит в том, чтобы отобрать загущенную воду из этой скважины и проверить, соответствуют ли свойства полимерного раствора при таких условиях солености и концентрации проб [8; 9].

Полимерное заводнение является проверенным методом увеличения нефтеотдачи в высокопроницаемых песчаниках на суше, предполагается, что при условии, что вязкость полимера соответствует начальной, после прохождения всего набора установок для закачки, характерной для глубоководной реализации. Постепенное увеличение нефтеотдачи должно быть ожидаемым.

Расположение скважины для отбора проб было выбрано рядом с нагнетательной скважиной DAL713, чтобы минимизировать риск бурения в области без полимера. Высокое качество 4D сейсмических данных, полученных в середине 2008 г. и в конце 2010 г., очень помогло определить пути потока воды между слоями существующего нагнетательного скважины DAL713 и добывающего скважины DAL708, как это уже предполагалось, на основе анализа мониторинга коллектора. На основании этого моделирования и прогноза эволюции концентрации время бурения скважины было точно настроено для обеспечения отбора in-situ проб. Кумулятивный объем закачиваемого раствора полимера был определен. Карта концентрации связана с объемом полимера закачено в скважину DAL713.

После того, как пробоотборная скважина была пробурена и завершена, часть залежи, промытая полимером, была испытана, и было запущено не более 3 последовательных сбор проб в забое скважины.

Главная проблема, связанная с отбором проб, в недавно пробуренной скважине, является загрязнением буровым раствором. Модульный динамический инструмент оснащен технологией отбора проб на кабеле Quicksilver Probe, который позволяет перекачивать загрязненную жидкость по периметру проба на отдельную линию от чистой жидкости, которой

в центре проба. Вязкость жидкости в линии потока измеряется непрерывно с помощью вибрирующего штанга и струнного датчика [3].

Пробы будут перенесены на площадку буровой вышки в бутылках для проб по контролируемому протоколу, предотвращающему химическое и механическое разрушение проба. Оценка свойств (концентрация, вязкость и разложение) проводится в лаборатории судна с целью повышения эффективности процессов закачки [5; 6].

В итоге можно сделать следующие выводы.

Опытно-промышленные испытания показали довольно хорошие результаты. Месторождение разрабатывается закачкой воды с использованием плавучей установкой с 31 наклонными или горизонтальными подводными скважинами и 4 нагнетательными линиями. Одна нагнетательная линия обычно закачивает в несколько коллекторы так же в несколько системы. Максимальная мощность закачки воды составляет 405 кВт/сутки. Добыча происходит за счет 4 добывающие линии и 37 добывающие скважины. Первая добыча нефти была в 13 декабря 2006 года. Суточная добыча в 240 тыс. баррели нефти достигли уже через несколько месяцев и с тех пор не уменьшалось [2].

Для повышения эффективности разработки необходимо применять методы увеличения нефтеотдачи, потенциал которых зависит от типа конкретного метода, а от характеристики нефти и от характеристики нефтяного пласта [4; 7].

Благоприятные пластовые условия для закачки полимера, которые присутствуют на данном месторождении:

- высокопроницаемые чистые пески;
- средняя вязкость нефти;
- низкая температура.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зоу В. и др., Ключевые технологии полимерного заводнения на морском месторождении Бохай Бэй, М: документ SPE115240, представленный на Азиатско-тихоокеанской нефтегазовой конференции и выставке SPE – Перт, 20–22 октября 2008.
2. Морель Д., Жуан С., Заугт Э., Бугер Я., Полимерное заводнение в глубоководных морских месторождениях Ангола: стратегия развития и наблюдение за производительностью полимеров, М.: документ WPC-20-2890, на 20-й Всемирным нефтяном конгрессе, 4–8 декабря 2015.
3. Тебаульт Ж. и др., Проблемы и достижения разработки месторождения Даля, М: документ OTC18538 – представлен на конференции по оффшорной технологии – Хьюстон, 30 апреля–3 мая 2014.
4. Тчаро Хоноре, Воробьев А.Е., Воробьев К.А. Цифровизация нефтяной промышленности: базовые подходы и обоснование «интеллектуальных» технологий // Вестник Евразийской науки, 2018 №2, <https://esj.today/PDF/88NZVN218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
5. Чекушина Т.В., Воробьев К.А. Определение величины зоны уплотнения грунта при взрыве сферического заряда // Вестник Евразийской науки, 2018 №2, <https://esj.today/PDF/87NZVN218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
6. Чекушина Т.В., Воробьев К.А. Оптимизация контура карьеров с использованием инновационных технологий компьютерной программы «NPV Scheduler и Datamine-Studio 3» // Вестник Евразийской науки, 2018 №1, <https://esj.today/PDF/77NZVN118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
7. Vorob'ev A., Chekushina T., Vorob'ev K., 2017. Russian national technological initiative in the sphere of mineral resource usage. Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik. 2, 1–8.
8. Lyashenko V., Vorob'ev A., Nebohin V., Vorob'ev K., 2018. Improving the efficiency of blasting operations in mines with the help of emulsion explosives. Mining of Mineral Deposits. 1, 95–102.
9. Ozhogina E.G., Shadrunkova I.V., Chekushina T.V., 2017. Mineralogical rationale for solving environmental problems of mining regions. Gornyi zhurnal. 11, 105–110.

Shcherba Vladimir Afanas'evich

Peoples' friendship university of Russia, Moscow, Russia
E-mail: shcherba_va@mail.ru

Gomes Antoniu Shikuna Suami

Peoples' friendship university of Russia, Moscow, Russia
E-mail: engchicunagomes@mail.ru

Vorob'ev Kirill Aleksandrovich

Peoples' friendship university of Russia, Moscow, Russia
E-mail: k.vorobyev98@mail.ru

The economic rationale for the use of polymer flooding in deep offshore heavy oil field to increase recovery in the Republic of Angola

Abstract. Over the past ten years, polymer flooding has been widely used to increase oil recovery after water flooding. Its application is of interest, especially to current prices for a barrel of oil, since the method improves oil recovery and is economically beneficial. While polymer flooding onshore may be qualified as a mature technique of enhanced oil recovery, considering the hundreds of operations that have been conducted worldwide, only one experimental operation was carried out offshore, and none in deep offshore conditions. The polymer injection project at the Dala field in the Republic of Angola is the first in the world in deep-sea conditions. Careful integrated geoscience and architectural studies led to the decision to begin polymer injection testing on one single well, followed by continuous polymer injection on one of the four injection lines. The article describes the main results of the experimental stage.

Keywords: economy; polymer flooding; enhanced oil recovery; heavy oil; heavy oil field recovery