



Society of Petroleum Engineers

SPE-191717-18RPTC-RU

Перспективы использования микробиологического метода увеличения нефтеотдачи

Елена Владимировна Безверхая, Игорь Андреевич Трофимов, а также Владимир Андреевич Карепов,
Сибирский Федеральный Университет

Авторское право 2018 г., Общество инженеров нефтегазовой промышленности

Этот доклад был подготовлен для презентации на Российской нефтегазовой технической конференции SPE, 15-17 октября, 2018, Москва, Россия.

Данный доклад был выбран для проведения презентации Программным комитетом SPE по результатам экспертизы информации, содержащейся в представленном авторами реферате. Экспертиза содержания доклада Обществом инженеров нефтегазовой промышленности не выполнялась, и внесение исправлений и изменений является обязанностью авторов. Материал в том виде, в котором он представлен, не обязательно отражает точку зрения SPE, его должностных лиц или участников. Электронное копирование, распространение или хранение любой части данного доклада без предварительного письменного согласия SPE запрещается. Разрешение на воспроизведение в печатном виде распространяется только на реферат объемом не более 300 слов; при этом копировать иллюстрации не разрешается. Реферат должен содержать явно выраженную ссылку на авторское право SPE.

Резюме

Применение штаммов бактерий, разрушающих алюмосиликаты, приводит к изменению молекулярной структуры пород низкопроницаемого глиносодержащего нефтеносного пласта. В обработанных образцах уменьшение содержания кремния составляет от одного до пяти с половиной процентов, алюминия до двенадцати процентов. При деструкции силикатных минералов культурами силикатных бактерий при сравнении с абиогенным процессом отмечается высокая интенсивность биогенного выщелачивания силикатов (в т.ч. кварца). Среди слоистых силикатов и алюмосиликатов наиболее разлагаемыми оказались алюмосиликаты (глинистые минералы). Результаты исследований могут быть актуальны для разработки глинизированных нефтеносных свит Западной Сибири и Якутии, восстановлении фильтрационной способности пласта после бурения на глинистой основе, геолого-технологических мероприятий.

Введение

О бактериях наука знает много. С бактериями человечество живет уже миллионы лет. Ученые научились выделять штаммы микроорганизмов с заданными свойствами, адаптировать их к определенным условиям, использовать в различных отраслях промышленности.

История развития микробиологических методов увеличения нефтеотдачи началась в 1955 году с эксперимента на одном из приволжских месторождений, который закончился неудачей. Двадцатью годами позже, когда в мире поднялся биотехнологический бум и добывающие компании обратились к новым методам повышения нефтеотдачи, к проблеме решили вернуться [1].

Многолетние исследования позволили выяснить, какие типы бактерий находятся в пластах и каким способом можно регулировать их численность. Тогда интерес к пластовой микрофлоре был связан с проблемой сероводородной коррозии металлических труб и ухудшением качества нефти. Изучение процесса образования сероводорода при взаимодействии сульфатредуцирующих микроорганизмов и сульфатов, собственно, и привело к идее использовать «нефтяные» бактерии для производства веществ, способствующих вытеснению нефти из пластов.

Новая технология основывалась на механизме, аналогичном процессу образования сероводорода из сульфатов под воздействием микроорганизмов. Только на выходе требовалось получить не сероводород, а соединения, способствующие вытеснению нефти из пласта.

Эксперименты длились до 1988 года. Дальше они продолжались в виде опытно-промышленных испытаний. Эксперименты показали, что повышение нефтедобычи на разных залежах составляло от 10 до 30 %.

Нефть, добытая с применением биотехнологии достаточно дешевая, она сравнима по себестоимости с нефтью, добытой первичным и вторичным способами из активных запасов. Микробиологическая технология вписывается в схему вторичной добычи и требует минимальное дополнительное оборудование - компрессор для нагнетания воздуха и эжектор для введения минеральных солей. [2]

Экологически безопасные микробиологические методы увеличения нефтеотдачи применяются в основном на месторождениях, разрабатываемых с помощью заводнения. Присутствие водной фазы создает условия для развития богатой и разнообразной пластовой микрофлоры:

- микроорганизмы способны синтезировать (вырабатывать) различные вещества, снижающие вязкость и повышающие выход нефти;
- существуют бактерии, которые обитают и размножаются в нефтеносных пластах и способствуют извлечению так называемой недоступной нефти;
- микроорганизмы избирательно (селективно) повышают эффективность охвата нефтеносного пласта вытесняющими агентами, которые могут вырабатываться самими же бактериями;
- определённые виды микроорганизмов способны осуществлять своего рода биокрекинг, связанный с процессами переработки, и усвоения этими бактериями различных углеводородов.

Современные биотехнологические способы могут серьёзно усилить указанные полезные качества микроорганизмов и существенно повысить эффективность их целенаправленного применения в нефтегазовом производстве.

Перспективы

В настоящее время перспективы добычи нефти связаны с доработкой уже известных и разрабатываемых месторождений (уменьшение доли остаточных запасов) и, в большей степени, с вводом в разработку новых месторождений с так называемыми трудноизвлекаемыми запасами.

Существуют различные взгляды на классификацию трудноизвлекаемых запасов, но авторы сходятся в том, что все их виды можно поделить на две группы. Одну из них составляют флюиды с аномальными свойствами (высокая вязкость, газовый фактор, наличие вредных примесей неуглеводородного состава, высокое содержание асфальтенов, парафинов и т.д.). Во вторую группу входят запасы месторождений, представленных «неблагоприятными» коллекторами (низкопроницаемые, прерывистые, изолированные, расчлененные и т.д.).

Доля извлекаемой нефти зависит от технологии ее добычи, фильтрационно-емкостных параметров пласта-коллектора, физико-химических свойств самой нефти и условий ее вытеснения различными реагентами.

Как правило, в неизвлекаемых остатках запасов находятся следующие формы нефти:

- капиллярно-удержанная нефть;
- нефть в пленочном состоянии, покрывающая поверхность твердой фазы – породы;
- нефть в плохо промытых водой низкопроницаемых участках, изолированных линзах, тупиках, в непроницаемых экранх и перемычках.

И если в первых двух случаях для добычи таких видов остаточной нефти применяют весьма обширный спектр методов увеличения нефтеотдачи (химические, физические, гидродинамические, газовые и т.д), то для третьей формы существования остаточной нефти практически используют только гидроразрыв пласта и кислотную обработку призабойной зоны. При этом необходимо заметить, что именно этот вид занимает большую часть (до 60%) остаточных запасов, в том числе в глинизированных песчаных коллекторах со средними значениями проницаемости менее 0,05 мкм².

Запасы нефти в низкопроницаемых коллекторах относят к трудноизвлекаемым, и они составляют около трети от всех запасов России. При традиционных методах разработки коэффициент нефтеотдачи составляет 10-25%.

К одной из групп низкопроницаемых коллекторов относят Баженовскую Свиту (БС), фильтрационно-емкостные свойства которой осложнены присутствием глины. Она, благодаря своим свойствам, затрудняет движение нефти по пласту, во многих случаях прекращая его. КИН на этих месторождениях не превышает 8%. Без третичных методов разработки эксплуатация месторождений БС практически невозможна. Однако методов, влияющих на свойства глины в пластовых условиях, в настоящее время не существует.

Микробиологическое воздействие, с нашей точки зрения, является одним из наиболее перспективных, поскольку изменение основных фильтрационных характеристик всего пласта-коллектора (а не только призабойной зоны скважины) без непосредственного доступа туда человека возможно одним из следующих способов:

- закачке в нефтяную залежь каких-либо реагентов в флюидоносителе;
- применении нанотехнологии (робототехника);
- использовании бактерий.

Известно огромное количество вариантов химических композиций, закачиваемых в пласт, которые способствуют увеличению коэффициентов охвата и вытеснения. Они дают хорошие показатели, но не в низкопроницаемых залежах, осложненных глинистыми включениями.

Нанотехнологии в нефтегазовом секторе промышленности находятся в начальной стадии развития и нуждаются в наработке большого объема теоретических исследований.

Поэтому наиболее доступным и простым для исследований является микробиологический метод воздействия на залежь.

Вторую группу низкопроницаемых коллекторов составляют пласты, представленные карбонатными породами. Карбонатные резервуары ориентировочно составляют 50-60% всех мировых запасов нефти и газа. Они имеют высокую расчлененность и прерывистость продуктивных слоев, характеризуются густой сетью трещин и каверн разнообразных размеров и протяженности. Выбор эффективной технологии их разработки в настоящее время затруднен в связи со сложностью получения и интерпретации геологической информации и отсутствием методик расчета параметров систем разработки и режимов работы скважин. Перспективность применения микробиологических методов увеличения нефтеотдачи на таких месторождениях достаточно велика и уже описана в литературе [3]. Основной принцип воздействия на коллекторы заключается в выработке бактериями углекислого газа, который имеет все преимущества газовых МУН (закачка CO₂):

- увеличение вязкости закачиваемой воды;
- уменьшение вязкости нефти;
- снижение поверхностного натяжения между фазами;
- образование в пласте углекислоты, растворяющей карбонатные породы и увеличивающей поровое и трещинное пространство.

При этом стоимость закупки, доставки и закачки природного углекислого газа в разы выше чем при выработке этого газа бактериями

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что основными объектами трудноизвлекаемых запасов являются остаточные запасы нефти традиционных месторождений, месторождения, представленные низкопроницаемыми коллекторами и месторождения с высоковязкой нефтью, и именно они требуют при разработке дополнительных капитальных вложений и новых технологий.

В настоящее время все существующие методы увеличения нефтеотдачи (МУН) сводят в следующим четырем группам:

- химические (вытеснение нефти водными растворами ПАВ, полимеров, щелочными растворами и кислотами);
- газовые (закачка углеводородных газов, углекислого газа, азота);
- тепловые (вытеснение нефти теплоносителями, воздействие с помощью внутрипластовых экзотермических окислительных реакций);
- физико-механические (гидроразрыв пласта (ГРП), горизонтальные скважины, электромагнитное воздействие);
- микробиологические (введение в пласт продуктов жизнедеятельности бактерий или их производство бактериями в самом пласте).

В данной работе остановимся на применении и определим перспективы использования микробиологического метода увеличения нефтеотдачи для приведенных видов запасов.

Месторождения высоковязких нефтей

Мировые ресурсы тяжелых и битуминозных нефтей значительно превышают запасы легких и традиционных. Вопрос освоения ресурсов таких нефтей особенно актуален сейчас, в связи со снижением в последнее время объемов прироста запасов кондиционных нефтей.

В процессе длительной разработки месторождений (25-35 лет) наблюдается рост определенных параметров, ведущих к ухудшению качества нефти: повышается содержание серы, парафина, асфальтенов и смол, снижается содержание легких фракций. Процесс ухудшения качества нефти усиливается по мере обводнения продукции, причем особенно высокое содержание смол и асфальтенов наблюдается в остаточной нефти. Согласно лабораторным данным, их содержание в остаточной нефти превышает исходное в 1,5-3,0 раза. Увеличенная концентрация в остаточной нефти смол и асфальтенов (в 1,5-4,0 раза относительно добываемой) наблюдается и в герметизированном керне, отобранном в промытых зонах пластов. Таким образом, хотя в процессе разработки месторождений и не происходит существенных изменений параметров добываемой нефти, способных кардинально повлиять на ее качество, параметры оставшейся в пласте нефти значительно отличаются от параметров уже добытой при обводнении продукции до 90-95%, что необходимо учитывать при планировании применения методов увеличения нефтеотдачи на поздней стадии разработки. Увеличение содержания АСПО изменяет также поверхностно-активные и реологические свойства нефти. Исходя из этого разрабатывается стратегия более полного нефтеизвлечения и совершенствуются алгоритмы проектирования свойств, необходимых для этого воздействия на пласты.

Добыча тяжелых высоковязких нефтей при помощи технологий для обычных нефтей ведет к низкой нефтеотдаче и потере ценных попутных компонентов, что оборачивается недополученной прибылью и наносит вред экологии. Доведение исходного сырья до требуемого качества достигается разбавлением более легкой нефтью или переработкой до получения так называемой синтетической нефти. Иногда для транспортировки тяжелых высоковязких нефтей строятся специальные трубопроводы с подогревом, что также увеличивает издержки производства.

Еще одна проблема добычи тяжелых нефтей- большинство российских НПЗ не рассчитаны на переработку тяжелых высоковязких нефтей. Некоторые тяжёлые высоковязкие нефти могут быть переработаны на НПЗ в смеси с обычными нефтями по традиционным технологиям. Другие такие нефти могут перерабатываться только на специализированных предприятиях, выпускающих ограниченный ассортимент нефтепродуктов. Экономически целесообразной и возможной добыча тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов представляется только благодаря развитию и применению эффективных технологий их переработки с получением товарных нефтепродуктов с высоким отличием рыночной цены от себестоимости. Это позволит окупить дорогостоящие технологии их добычи, многократно превышающие аналогичные затраты на разработку традиционных залежей. Учитывая дороговизну подобных технологий удивительно, что нет ни одного НПЗ, включающего процессы биокрекинга, хотя исследования в этой области уже проводились.

На сегодняшний день известно достаточно много технологий извлечения тяжелой нефти и природных битумов, которые на практике доказали свою эффективность: это циклическая закачка пара (Cyclic Steam Stimulation – CSS), парогравитационный метод дренирования (Steam-Assisted Gravity Drainage – SAGD), холодная добыча (Cold heavy-oil production with sand – CHOPS), извлечение растворителями в парообразном состоянии (Vapor Extraction – VAPEX), процесс с добавлением растворителя (Solvent Aided Process – SAP), комбинации внутрискважинного горения и добычи нефти из горизонтальной скважины (Toe to Heel Air Injection – THAI), новая технология CAPRI (CAlytic upgradiNg PROcess In-situ) на базе THAI, предполагающая использование катализаторов окисления. Все эти методы относят к двум группам методов увеличения нефтеотдачи – химические и тепловые.

Микробиологические методы к настоящему времени в России применяют на месторождениях ОАО "Татнефть". Они основаны на вводе в пласт биомассы микроорганизмов и питательных веществ. Технология микробиологического воздействия на пласт в условиях закачки сточных вод разработки ТатНИПИнефть и ИНМИ РАН базируется на технологии активации пластовой микрофлоры, но для увеличения численности микроорганизмов в условиях повышенной минерализации применяется биопрепарат "Деворойл", содержащий биомассу из пять типов бактерий. К настоящему времени в ОАО "Татнефть" внедрены и применяются биотехнологии МУН, основанные на вводе в пласт биомассы микроорганизмов и питательных веществ. Технология микробиологического воздействия на пласт в условиях закачки сточных вод разработки ТатНИПИнефть и ИНМИ РАН базируется на технологии активации пластовой микрофлоры, но для увеличения численности микроорганизмов в условиях повышенной минерализации применяется биопрепарат "Деворойл", содержащий биомассу из пять типов бактерий.[4]

В последние десятилетия появились работы зарубежных ученых по использованию микроорганизмов с целью извлечения битумов. В частности, в США в лабораторных условиях изучалась возможность экстракции битума при помощи микроорганизмов, опыты показали применимость этого метода для добычи битума из песчаников некоторых месторождений, в частности, месторождения Атабаска [5]. Представители рода Clostridium продуцируют ПАВ, газы, спирты и кислоты, а рода Bacillus - ПАВ, кислоты и биополимеры. Широко изучены и распространены методы, основанные на использовании мелассы и сбраживающих её микроорганизмов. Эти перспективные методы применяются на различных стадиях процесса разработки пластов и могут применяться в различных вариантах:

- закачка мелассы и бактерий в нагнетательные скважины с целью воздействия на пласт;
- для очистки призабойных зон и стимуляции скважин.

Все эти методы увеличивают вытесняющие способности закачиваемого агента, но не изменяют свойств высоковязкой нефти, не изменяют ее реологических способностей в то время как основная сложность разработки месторождений высоковязких нефтей заключается в ее транспортировке на любом этапе добычи.

1. Транспортировка по пласту – фильтрация. Осложняется силами трения между слоями породы, между нефтью и породой, между различными видами флюидов, неньютоновскими свойствами высоковязкой нефти. Выражается в снижении скорости фильтрации и, как следствие, увеличении остаточных запасов месторождения. При низких пластовых температурах возможно выпадение смол, асфальтенов и парафинов на зернах породы – коллектора. Выражается в снижении фильтрационно-емкостных свойств нефтяного пласта.
2. Транспортировка по стволу добывающей скважины – скважинная добыча. Осложняется отложениями асфальтосмолопарафиновых веществ (АСПВ) по стволу скважины. Обуславливает сужение диаметра и снижение производительности скважин.
3. Транспортировка по трубопроводам – внутрипромысловый транспорт. Как и в предыдущем случае, осложнениями являются отложения АСПВ, и снижение пропускной способности трубопровода.

По определению Большой энциклопедии нефти и газа, АСПВ – высокомолекулярные соединения, включающие кислород, серу, азот и состоящие из большого числа нейтральных соединений неизвестного строения и непостоянного состава, среди которых преобладают нейтральные смолы и асфальтены. Наибольшее количество смол отмечается в тяжелых темных нефтях, богатых ароматическими углеводородами.

В свою очередь, микроорганизмам присуща способность усваивать углеводороды нефти, представленных различными систематическими группами. К ним относятся различные виды микромицетов, дрожжей и бактерий [6]. Наиболее активные деструкторы нефти встречаются среди бактерий. Они характеризуются способностью к усвоению широкого спектра углеводородов, включая и ароматические, обладают высокой скоростью роста и, следовательно, представляют большой практический интерес.

В Сибирском Федеральном Университете в Институте нефти и газа проводились исследования по выявлению воздействия процесса жизнедеятельности бактерий на АСПО.

Воздействие на осложняющий фактор заключалось в уменьшении асфальто-смолистых и парафиновых отложений в процессе жизнедеятельности микроорганизмов, которые разлагают АСПО на поверхностно-активные вещества, жирные кислоты, спирты, альдегиды, полимеры (полисахариды), двуокись углерода и др.

Изначально, цель эксперимента заключалась в наблюдении за воздействием аэробных бактерий на нефтяные отложения в отстойных резервуарах, представленных механическими примесями с АСПО.

Науке известен целый ряд видов бактерий, которые способны разлагать только определённые цепочки углеводородов, в результате чего конечный эффект мало значим. Особенностью данного исследования являлось применение целого спектра видов бактерий (в том числе бактерий-аборигенов), для увеличения их комплексного воздействия на углеводороды.

В ходе экспериментов в стеклянном сосуде смешивались питательные вещества с дистиллированной водой, данная среда разделялась на сосуды, в которые добавлялись нефтяные отложения с РВС и аэробные микроорганизмы. Для создания благоприятных условий воздействия бактерий на отложения создавалась дополнительная аэрация воздуха с помощью компрессора. Время воздействия на образцы длилось 1, 2 и 3 недели. Эксперимент был поставлен с постоянным температурным диапазоном в 21-24 градуса и процессом аэрации, необходимым для поддержания жизнедеятельности бактерий. По истечению времени воздействия образцы после

воздействия углеводородокисляющих бактерий были помещены в сушильный шкаф на 1 сутки для обезвоживания. Далее в образцы были вмешаны 200мл гептана и оставлены на реакцию в течение 1 суток.

После реакции образцы с гептаном заливались в делительную коронку для процесса фильтрации через бумажный фильтр. В ходе данной фильтрации на фильтре осаждались асфальтеновая фракция с образца, которая не растворилась в гептане. После процесса фильтрации через бумажный фильтр, образцы с гептаном заливались в адсорбционно- хроматографическую колонку с заранее засыпанным в нее силикагелем. В хроматографической колонке происходило разделение исходной многокомпонентной смеси на ряд бинарных смесей, состоящих из жидкости и одного из разделяемых компонентов с целью определения концентрации компонентов каждого образца. Для выделения каждого компонента использовались различные растворители.

Таблица 1—Необходимые растворители для выделения определенного компонента образца.

Растворитель	Компонент
Гептан(фильтр)	Асфальтены
Гептан (колонка)	Парафины
Толуол	Ароматические смолы
Спирт	Полярные смолы
Четыреххлористый углерод	Асфальтены

Каждый растворитель прогонялся через адсорбционно хроматографическую колонку несколько раз до прозрачного состояния.

После отделения растворимого вещества с адсорбционно хроматографической колонки производилась отгонка растворителя на колбонагревателе до сухого остатка растворимого вещества в колбе. Результаты изменения процентного содержания АСПВ представлены в таблице 2

Таблица 2—Изменение массы АСПВ в ходе воздействия микроорганизмов

Процентное соотношение веществ					
Время воздействия	Асфальтены 1 тип, %	Парафины, %	Ароматические смолы, %	Полярные парафины, %	Асфальтены 2 тип, %
Исходное состояние	48,1	13,54	26,14	4,58	7,63
1 неделя	43,53	12,37	23,64	3,96	7,095
2 неделя	40,85	11,14	21,85	3,528	6,57
3 неделя	39,44	10,38	19,72	3,21	6,22

Визуальные результаты обработки образцов с течением времени представлены на снимках (Рисунок 1 и 2).

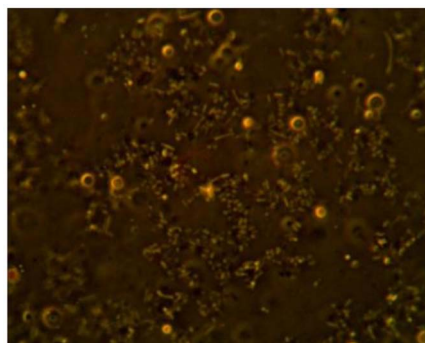


Рисунок 1—Снимок исходного образца с помещенными в него бактериями (1 день воздействия).

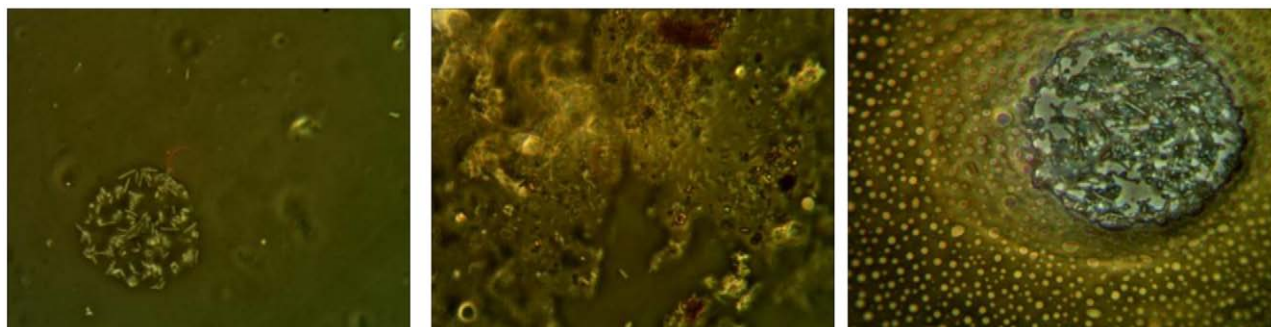


Рисунок 2—Снимок среды спустя 1, 2 и 3 недели хода эксперимента.

Съёмки производились с помощью микроскопа с фазово-контрастным устройством и увеличением 1500 раз.

На данных снимках можно заметить внешнее изменение общей среды. Оно характеризуется осветлением основного фона, что можно объяснить процессом деструкции углеводов.

В результате экспериментов были получены следующие данные (рисунок 3)

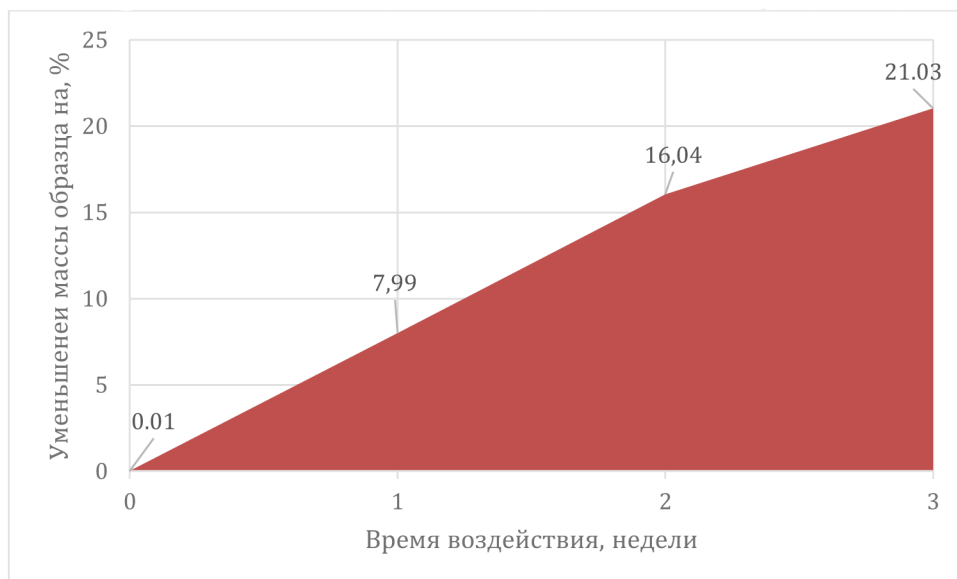


Рисунок 3—Изменение массы образца с течением времени при его трехнедельной обработке микроорганизмами.

Результаты

Изменение массы АСПВ, взятых из донных отложений резервуаров, после обработки бактериями можно объяснить изменением их структурного состава и переходом части углеводородов в жидкое и газообразное состояние. Бактерии осуществляют своеобразный биокрекинг тяжелых и длинных молекул твердых углеводородов, расщипляя их на более короткие. Подтверждения этому находятся в большом количестве литературы. Положительные стороны использования бактерий для увеличения извлечения остаточных запасов и изменения реологических свойств нефти (биокрекинг) достаточно очевидны: дешевизна, экологичность, простота организации закачки биореагентов и др.

Полученные данные можно использовать для внедрения микробиологических методов для увеличения подвижности нефти непосредственно в самом нефтеносном пласте (разработка месторождений высоковязких нефтей и увеличение извлечения остаточных запасов), а также при переработке ее на нефтеперерабатывающих заводах.

Дальнейшие перспективы применения микробиологического способа повышения нефтеотдачи на месторождениях высоковязкой нефти связаны с проведением исследований по определению количественной взаимосвязи микроорганизмов и продуктов их жизнеобеспечения с технологическими параметрами работы скважин и оборудования. Одним из самых важных вопросов в работе бактериального воздействия на нефтяных месторождениях остается вопрос обеспечения стабильности его работы, определение факторов риска, предупреждение непредвиденных последствий применения столь сложного, интересного и непредсказуемого инструмента как бактерии.

Бактериальное воздействие на низкопроницаемые коллектора

Основной проблемой разработки месторождений, представленных низкопроницаемыми коллекторами, является сложность фильтрации, обусловленной малым поровым пространством или наличием непроницаемого (малопроницаемого) цемента породы коллектора, глинизацией. Из всех представленных методов увеличения нефтеотдачи нет ни одного метода, улучшающего проницаемость пласта, кроме химических (кислотная обработка) и физических (ГРП), дающих результаты только в околоскважинном пространстве. А все остальные, включая и микробиологическое воздействие на пласт, касаются изменений свойств нефти (уменьшение вязкости) или улучшают отмывающие и вытесняющие способности закачиваемого агента. Такие методы применяют в России, Польше, Венгрии, Румынии, Китае, Германии, США.

Поскольку глинизация коллектора – одно из самых распространенных явлений, то целью проводимых исследований стало изучение воздействия микроорганизмов на *глиносодержащие породы* нефтяного коллектора.

Глина - мелкозернистая осадочная горная порода, пылевидная в сухом состоянии, пластичная при увлажнении. Глина состоит из одного или нескольких минералов группы каолинита, монтмориллонита или других слоистых алюмосиликатов, но может содержать и песчаные и карбонатные частицы. Как правило, породообразующим минералом в глине является каолинит, его состав: 47% (масс) оксида кремния (IV) (SiO_2), 39 % оксида алюминия (Al_2O_3) и 14 % воды (H_2O).

Вопрос о существенной роли микроорганизмов в разрушении минералов класса силикатов в природной обстановке в основном возникал перед минераологами, геохимиками и микробиологами при изучении процессов в почво- и корообразовании (работы Вернадского, Виноградова, Аристовской, Глазовской, Лукашева, Полюнова и др.). Вопрос бактериального воздействия на глины нефтеносного пласта практически нигде не рассматривался.

В основу настоящих исследований были положены работы Яхонтовой Л. К., Зверевой В. П. [7], в которых бактериальному разложению подвергались кварц, полевые шпаты, нефелин, слоистые силикаты (мусковит, биотит, глауконит, вермикулит и др.), роговая обманка, пироксены, эпидот,

гранаты и другие силикаты. Во всех случаях при сравнении с абиогенным процессом отмечалась высокая интенсивность биогенного выщелачивания силикатов и даже весьма трудно разлагаемого кварца. Все эксперименты проводились в одних и тех же условиях с использованием силикатных бактерий (*Bacillus mucilaginosus*), в свое время обоснованных и детально изученных.

Также проводились опыты с пластинками полевых шпатов. Они примечательны тем, что удалось увидеть продукты бактериального разрушения алюмосиликатов - совместно скоагулированные гидрогели кремния и алюминия, видимо, аллофаноидной природы, сорбирававшие щелочи и щелочные земли [8].

Среди слоистых силикатов и алюмосиликатов наиболее разлагаемыми оказались алюмосиликаты (глинистые минералы). Интенсивность биовыщелачивания наиболее высокая у шамозита и глауконита, кристаллическая структура которых мало совершенна, химический состав переменен и, как правило, нестехиометричен.

В результате приведенного выше литературного обзора нами была выдвинута гипотеза: для изменения структуры, а как следствие, и фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемого глиносодержащего нефтеносного пласта можно применить штаммы бактерий, разрушающих силикаты и алюмосиликаты.

Для подтверждения этой гипотезы и определения количественных показателей разрушения глин в лабораториях института нефти и газа СФУ совместно со специалистами-микробиологами был проведен ряд экспериментов.

Бактериальной обработке подвергались образцы битуминозного песка (BP), монтмориллонита (MON), алевролита нефтенасыщенного (А). В качестве питательной среды применяли глюкозу. Условия проведения эксперимента обычные - температура 25°C, атмосферное давление, без нагнетания воздуха и какой-либо подпитки внешней средой. Обработанные и базовые образцы подвергались рентгеноструктурному анализу, после чего проводилось сравнение исходных и полученных данных.

Результаты рентгеноструктурного анализа по обработанным и необработанным (н/о) образцам представлены в таблице 3.

Таблица 3— Результаты биовыщелачивания в течение 3х недель (BP - битуминозный песок, MON - монтмориллонит, А - алевролит нефтенасыщенный)

Образцы	Основные элементы, входящие в состав образцов, %							Изменение содержания основных элементов, %		
	O	Si	C	Al	K	Fe	Na	Si	Al	O
BP	40,0869	29,6310	18,8000	5,4406	1,7764	1,6601	1,1244			
BP н/о	41,2096	29,9195	18,0063	5,4631	1,7218	1,6033	1,0482	1,0	0,4	2,7
MON	46,6084	29,2180	5,0098	9,5844	0,0525	4,5128	0,2845			
MON н/о	47,7506	30,1429	3,7871	9,8847	0,1059	4,3032	1,0387	3,1	3,0	2,4
А	45,3102	26,5859	4,1261	11,1584	2,5143	5,1775	1,0400			
А н/о	44,8598	28,0998	3,5604	12,7133	4,4009	4,3040	0,1807	5,4	12,2	-1,0

Результаты

Из таблицы 3 видно, что в обработанных пробах содержание основных элементов (кремний, алюминий) уменьшилось от 1 до 12 % по сравнению с исходными образцами. Это соответствует данным, представленным в работах Яхонтовой Л. К. и Зверевой В. П.. По их данным количество

выщелоченного SiO_2 в процентном содержании из каолинита Просьяновского месторождения Днепропетровской области за 15 недель воздействия составило 12%, а из монтмориллонита (Аскани, Грузия) – 9%, что в пересчете на кремний равно 4,2%. Таким образом было получено подтверждение тому, что бактерии, разрушающие алюмосиликаты, могут работать на породах, представляющих нефтеносные пласты, и работать эффективно.

В результате проведенных работ, можно сделать предварительный вывод о том, что такие изменения в концентрации элементов проб связаны с изменением или разрушением молекулярной решетки исходных веществ. Так как рентгено-структурному анализу подвергались только твердые фазы исходных и обработанных образцов, то исходя из закона сохранения вещества логично предположить, что недостающие проценты кремния и алюминия перешли в другое фазовое состояние. Например, в жидкое. Структурные изменения непроницаемых в обычном состоянии пород однозначно приведут к изменению их свойств, в том числе и фильтрационных. Это дает основание предположить, что при разработке и заводнении месторождения фильтрация жидкости по пласту, обработанному бактериями, приведет к возможному вымыванию из него перешедших в растворенное, коллоидное или другое измененное состояние некоторых элементов глины, к структурному изменению коллектора, и, как следствие, увеличению его фильтрационно-емкостных свойств.

Естественно, пока в вопросе обработки пластов бактериями, разрушающими алюмосиликаты, больше вопросов, чем ответов, а исследования находятся на начальном этапе. Но мы же говорим о перспективах?!

Литература

- 1 Ибатуллин Р. Р. Применение современных микробиологических технологий увеличения нефтеотдачи на объектах НГДУ «Лениногорскнефть» / Р. Р. Ибатуллин, Р. С. Хисамов, Г. Ф. Кандаурова, С. С. Беляев, И. А. Борзенков, Т. Н. Назина // Нефтяное хозяйство. – 2005. – № 7. – С. 42-45.
- 2 Безверхая Е.В. Перспективы микробиологического метода увеличения нефтеотдачи, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016, 44 с.
- 3 Назина Т.Н., Иванова А.Е., Кандаурова Г.Ф., Ибатуллин Р.Р., Беляев С.С., Иванов М.В. Микробиологические исследования карбонатного коллектора Ромашкинского нефтяного месторождения в связи с испытанием биотехнологии повышения нефтеотдачи. Предварительные исследования // Микробиология. 1998. Т. 67, № 5. С. 701–709.
- 4 Увеличение нефтеотдачи на поздней стадии разработки месторождений. Теория. Методы. Практика / Р.Р. Ибатуллин, Н.Г. Ибрагимов, Ш.Ф. Тахаутдинов, Р.С. Хисамов. – М. : Недра-Бизнесцентр, 2004. – 292 с.
- 5 Carbonate rocks and petroleum reservoirs: a geological perspective from the industry. Trevor P. Burchette. In Advances in carbonate exploration and reservoir analysis. Ed. by J.Garland, J.E.Neilson, S.E.Laubach, K.J.Whidden. Geological Society, London, Special Publications, 2012
- 6 Захаров С.Д., Исмаилов Э.Ш., Стародуб А.Н. и др. Способ повышения продуктивности микроорганизмов. Патент РФ на изобретение № 2208049, М., 2003, 14 с.
- 7 Яхонтова Л. К., Зверева В. П. Основы минералогии гипергенеза: Учеб. пособие. Владивосток: Дальнаука, 2000. 331 с. ISBN 5-7442-1235-3
- 8 Александров В.Г., Зак Г.А. Бактерии, разрушающие алюмосиликаты (Силикатные бактерии) // Микробиол. 1950. - Т. 19. - №2. - С. 97-108.