

## **Производственные результаты практического применения диоксида хлора в качестве жидкости для интенсификации притока нефти (стимулирования) нефтяных скважин**

Дж.Ф. МакКафферти. Conoco, Inc., Е.У.Тейт и Д.А. Уилиамс, Exxon Chemical Company.

Журнал Американского Общества Нефтяных Инженеров «SPE Production & Facility», Февраль 1993 г., стр. 9 – 14.

---

### **Аннотация**

Новая инновационная и успешная технология практического применения диоксида хлора для стимулирования скважин. Безопасное генерирование и использование диоксида хлора является очень важным в процедуре стимулирования скважин для интенсификации добычи нефти. Было произведено стимулирование более чем 1000 скважин с применением описанного метода с генерированным диоксидом хлора. Были разработаны инструкции и эксплуатационные процедуры для безопасного обращения с диоксидом хлора при стимулировании скважин. Диоксид хлора является мощным оксидантом. Он был безопасно использован вместе с традиционными кислотами для стимулирования добывающих (эксплуатационных) скважин, нагнетательных скважин и скважин сброса соленой воды. Производственное совместное применение диоксида хлора и кислоты показало синергетический эффект, благодаря которому увеличилась продолжительность стимулирования за счет удаления продуктов, снижающих проницаемость пласта в призабойной зоне вокруг скважины. Производственные результаты коррелируют с результатами лабораторных испытаний по устранению последствий снижения проницаемости продуктивного горизонта. Эта технология было успешно применена в США при строгом соблюдении условий безопасности. Статья приводит также инструкцию по безопасному ведению процесса.

---

### **Введение**

Диоксид хлора используется более 50 лет в Европе для окисления органических загрязнений в питьевой воде и коммунальных сточных водах. В США технология обработки диоксидом хлора нашла применения для устранения сальмонеллы и бактерий при консервировании продуктов питания, а также в целлюлозно-бумажной промышленности для удаления лигнина {1}.

Адаптирование технологии обработки диоксидом хлора для нефтяной промышленности привело к новым технологическим решениям, в которых диоксид хлора был использован в стимулировании скважин для устранения окисляемых закупоривающих продуктов. Известными окисляемыми материалами, которые могут быть помехой продуктивности пласта, являются сульфид железа, био-органика и полиакриламидные полимерные реагенты. Дальнейшие осложнения возникают, когда эти загрязнения имеют место при присутствии карбоната кальция и гидроуглеродного шлама.

С течением времени у большинство скважин наблюдается снижение в нефтеотдаче (для эксплуатационных скважин) или нагнетаемости (для нагнетательных скважин). В какой-то мере это снижение вызвано кислото-растворимыми закупоривающими продуктами, такими как отложения карбоната кальция и сульфида железа. Обработка кислотой не оказывает никакого влияния на другие закупоривающие вещества, такие как органические биомассы и остатки

использованных полимерных реагентов. Окислительная мощность диоксида хлора, используемого совместно с традиционными кислотами, позволяет удалить эти закупоривающие вещества.

Традиционные кислоты будут растворять отложения карбоната кальция и сульфида железа. Однако при повышении pH пластовой жидкости, растворенный сульфид железа опять образует осадок и закупорит поры пласта {2}. Добавление диоксида хлора в кислотном стимулировании позволяет окислить нефте-смоченный сульфид железа в водо-смоченный гидроксид железа, который может быть челатирован присадками в кислоте. Диоксид хлора окислит также имеющийся  $H_2S$ , созданный кислотой в присутствии сульфида железа. Присутствующие в скважине остатки биомасс и любые полиакриламидные материалы тоже будут окислены. Для удаления тяжелых гидроуглеродов, который покрывают скальные пласты и играют роль связывающих агентов для загрязнений должен быть использован растворитель.

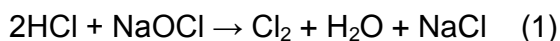
Эта статья описывает теорию, безопасные методы обработки скважин и конкретные примеры лабораторных испытаний.

---

### Метод генерирования

Любая процедура, включающая в себя использование диоксида хлора, должна отвечать требованиям безопасности. Растворимость диоксида хлора в свежей воде при температуре 25 °C составляет около 6000 мг/л (рис. 1){3}. Диоксид хлора является эффективным окислителем при низких концентрациях. При использовании в качестве окислителя в водных растворах при концентрации от 1500 мг/л до 3000 мг/л, диоксид хлора достаточно концентрирован, чтобы быть эффективным окислителем, но является также и достаточно разбавленным, чтобы считаться безопасным в обращении.

Использованный метод генерирования водного раствора диоксида хлора включал в себя приводящийся в движение водой смеситель-эдуктор Вентури. Всасывание, создаваемое при движении воды через Вентури {4,5}, вытягивает три исходных вещества вместе в реактор и в конечном счете в разбавляющую воду, которая приводит в движение Вентури. В первой из двух реакций 15% раствор соляной кислоты смешивался с 10% раствором гипохлорита натрия с контролем расхода ротаметром, с образованием небольшого количества гидратированного хлора



Во второй реакции водный раствор хлора вступал в реакции с хлоритом натрия с образованием жидкого раствора диоксида хлора.



Раствор диоксида хлора, образующийся во второй реакции, вытягивался из реактора в разбавляющую воду, которая приводит в действие Вентури. Диоксид хлора растворяется в разбавляющей воде и не вступает с ней в реакцию, в отличие от хлор-газа. Это повышает безопасность процесса, поскольку диоксид хлора не генерируется, когда насос останавливается и концентрация генерированного диоксида хлора ниже лимита растворимости в воде при стандартной температуре и давлении.

---

## Опыт производственной работы

Первые производственные испытания с применением диоксида хлора в качестве стимуляционной жидкости были выполнены в 1987 году специально для устранения повреждения пласта, вызванного полиакриламидом. Эта обработка была успешной, поскольку полиакриламидное снижение проницаемости требовало проведение окислительного процесса, а не кислотного гидролизного процесса {6}. Такие результаты способствовали дальнейшему использованию диоксида хлора в качестве окислителя в стимулировании скважин.

Обработка кислотой исторически использовалась для удаления отложений карбоната кальция из скважин. Однако, кислота показала себя неэффективной для удаления последствий снижения проницаемости из-за полимерных реагентов, сульфида железа и/или закупорки биомассой {6-8}. Сочетание применения диоксида хлора и кислоты обеспечивает синергетическую связь для удаления всех этих компонентов, вызывающих повреждение пласта.

Результаты стимулирования диоксидом хлора и кислотой показали улучшение как в объемах нефтеотдаче, так и нагнетаемости и продолжительности стимулирования. Синергетическая связь между диоксидом хлора и кислотой была подтверждена в производственных и лабораторных условиях как эффективное средство стимулирования скважин.

Улучшенные результаты наблюдали в производственных условиях на месторождении, когда диоксид хлора применялся между двумя степенями применения кислоты {7} и мицелльный растворитель был добавлен в кислоту. Первая степень кислотной обработки: (1) переводит в раствор сульфид железа и отложения карбоната кальция, (2) обеспечивает продвижение мицелльного растворителя к тяжело растворяющимся карбонатам, (3) переносит чешуйки железа и (4) уменьшает pH среды в скважине для активирования диоксида хлора. Степень обработки диоксидом хлора окисляет любые полимеры, сульфид железа, бактерии и образовавшийся газ  $H_2S$ . Вторая степень кислотной обработки «подчищает» оставшиеся карбонаты и обеспечивает продвижение мицелльного растворителя в пласты для увеличения смачиваемости водой. Достоинства этого эффекта сэндвича наблюдались в производственных условиях {7} и подтверждены данными лабораторных испытаний отобранных проб пласта.

Для применения диоксида хлора и кислоты были использованы традиционная технология введения. Обычное bullhead введение, скальная соль, шаровые уплотнители, сдвоенный пакер (straddle packer) и промывные инструменты были эффективны. Наиболее эффективно было прямое введение диоксида хлора и кислоты катушкой с трубками (coiled tubing).

Изменяющие направление движения жидкости материалы (diverting materials) **не должны использоваться** в фазе обработки диоксидом хлора каждой ступени. Ступени могут менять направление движения, однако только за счет применения диоксида хлора методом сэндвича между кислотой, содержащей эти материалы.

## Примеры применения

Обсуждаемые здесь два примера производственного применения диоксида хлора были выполнены на использующем заводнение месторождении Уоррен МакКии, который находится в 15 милях южнее г. Хоббс, штат Нью-Мексика. Нефтяной горизонт этого месторождения состоит из нескольких очень мелких неконсолидированных слоев песчаника (толщиной от 45 до 90 см), разделенных тонкими барьерами сланца. Общий продуктивный интервал составляет от 9000 до 9200 футов и среднее значение чистого слоя составляло 130 футов. Пористость и проницаемость составляли, соответственно, в среднем 16% и 122 миллидарси.

Основное истощение этого пласта тянется от его открытия в 1948 году до начала использования заводнения в 1978. В 1987 году эксплуатационные скважины были усилены гравийным слоем и было смонтировано высокопроизводительное подъемное оборудование. Полевые записи показывают, что сульфид железа привел к проблемам с производительностью в течение нескольких лет.

---

### Пример 1 – Проблема сульфида железа в эксплуатационных скважинах

Этот пример является первым успешным случаем применения диоксида хлора/ соляной кислоты на эксплуатационной скважине. Эта скважина обычно производит 180 баррелей нефти в сутки и 717 баррелей воды в сутки с умеренной проблемой с сульфидом железа. Скважина была эффективно обработана в порционном режиме ингибитором коррозии к всасывающей линии насоса, однако обсадные трубы внизу были открыты воздействию неингибированной скважиной жидкости и подвергались коррозии. Из-за значительного объема сульфида железа, образовавшегося с годами, полагали, что большой процент сульфида железа образовывался из пластов.

В сентябре 1989 года из старого комплекта перфораций на корродированном участке началась протечка в скважину. В течение 3 месяцев произошло насыщение скважины сульфидом железа. Увеличившийся уровень сульфида железа в жидкости, производимой скважиной, вызвал появление устойчивой эмульсии, которая отложилась на поверхности контакта нефть/вода в главном обработателе (main treater) в системе резервуаров сбора нефти (батареи резервуаров). Этот не поддающийся обработке эмульсионный слой необходимо было дренировать через день и вывозить на площадки захоронения. Соответствующие затраты на химикаты в батареи резервуаров также возросли в течение этого периода. К декабрю 1989 года проблема с сульфидом железа в скважине возросла до такого уровня, что погружной электронасос вышел из строя.

Насос был вынут в декабре и протечки в обсадной трубе были устранены. Затем скважина была очищена и произведено ее стимулирование обработкой 1000 галлонами ксилола с последующей обработкой 2000 галлонами 20% раствора соляной кислоты. Была сделана попытка механической прочистки скважины (swab the well), но труба диаметром 2 7/8 дюйма была полностью закупорена сульфидом железа. Затем трубы и скважина были очищены с помощью буровой трубы диаметром 1 ¼ дюйма. После этого скважина была обработана 100 баррелями (1 баррель – около 159 литров) 0,2% раствора диоксида хлора. Это позволило механически очистить скважину и устранить закупорку сульфидом железа.

Скважина была возвращена в производственный обработыватель основного резервуара батареи резервуаров без каких-либо свидетельств необходимости обработки железосульфидных эмульсий. Фактически, применение химических реагентов для обработки эмульсий в батарее резервуаров было прекращено, что позволило сэкономить 2500 дол. в месяц {9, 10}. Анализ образцов нефти в лаборатории указал на отсутствие какого-либо негативного эффекта влияние обработки диоксидом хлора на качество добытой сырой нефти. До обработки диоксидом хлора, скважина была не в состоянии производить нефть из-за серьезных проблем, вызванных сульфидом железа. После применения диоксида хлора нефтеотдача скважины восстановилась до 180 баррелей нефти в сутки.

**Выводы:** Совместная обработка диоксидом хлора и кислотой могут эффективно очищать загрязненные сульфидом железа скважины, восстанавливать их нефтеотдачу и уменьшать или полностью устранять проблемы с обезвоживанием сырой нефти в системе резервуаров сбора сырой нефти (батареи резервуаров).

---

### **Пример 2 – Закупорка нагнетательных скважин сульфидом железа и бактериями**

Второй пример совместного применения диоксида хлора и кислоты для интенсификации добычи нефти был выполнен при заводнении месторождения Уоррен МакКи. Источником сырой воды в качестве воды для заводнения на этом месторождении использовалась очищенная вода после очистных сооружений канализации г. Хоббс. Эта вода хлорируется для обезвреживания бактерий, перекачивается насосом через скважину добычи соли для повышения солесодержания воды и затем фильтруется до крупности частиц < 5 микрон перед закачиванием в нефтяные пласты. Несмотря на то, что производился мониторинг и поддерживалось качество закачиваемой воды во все время заводнения скважин, обезвреживание бактерий было эффективно не во все периоды. В результате этого, все поверхностное оборудование стало загрязнено бактериями и возникло необходимость его очистки и стерилизации. При этом, никаких попыток не делалось для контроля бактерий, которые попадали в скважину в эти периоды.

За 12 лет заводнения пластов, нагнетаемость воды в скважины упала от 0,1 до 0,2 баррелей нагнетаемой воды на 1 psi (1 psi = 0,07 кг/см<sup>2</sup>) давления нагнетательного давления в устье скважины. Была принята программа улучшения нагнетаемости скважин за счет увеличения плотности перфораций скважины и очистки скважины 15% раствором соляной кислоты. Типовой процедурой являлось увеличение плотности перфораций в песках всего месторождения МакКи до 2 отверстий на фут и затем матричное окисление интервала в четыре ступени 15% раствором HCl. Материал, изменяющий направление движения, использовался между каждыми ступенями (см. Таблицу 1). Таким путем нагнетаемость в трех скважинах была увеличена в среднем на 17%. Следующие три скважины были стимулированы по той же схеме, но с добавлением 2100 галлонов 0,3% раствора диоксида хлора в последовательности сэндвича между двумя порциями 1050 галлонов 15% раствора соляной кислоты (см. Таблицу 2). Нагнетаемость этих трех скважин увеличилась в среднем на 178%, т.е. в 10 раз больше, чем при применении только соляной кислоты. Начальные результаты испытаний показали, что совместная обработка диоксидом хлора и кислотой имеет синергетический эффект и значительно более

эффективна, чем применение только соляной кислоты в очистке нагнетательных скважин, загрязненных сульфидом железа и бактериями.

## Изучение отобранных проб пласта

Изучение проб пласта было проведено для того, чтобы помочь в объяснении положительных производственных результатов и поведения диоксида хлора, сульфида железа, полимеров и биомассы. Во время проведения испытаний надо было ответить на следующие вопросы:

1. Какие продукты получаются при окислении сульфида железа?
2. Насколько эффективно потребляется диоксид хлора?
3. Какова эффективность обработки пробы пласта?
4. Остаются ли какие-нибудь закупоривающие материалы в пробе?

Результаты были предсказуемы и одновременно, вызывающие удивление. Сульфид ( $S^{-2}$ ) окислился до сульфита ( $SO_3^{-2}$ ) и сульфата ( $SO_4^{-2}$ ). Не наблюдалось элементарной серы и преобладал ион ( $SO_4^{-2}$ ). Это свидетельствовало о эффективном окислении иона сульфида ( $S^{-2}$ ).

Присутствие относительно высокого уровня иона  $Fe^{+2}$  вызывало удивление до тех пор, пока мы не вспомнили, что  $Fe^{+3}$  может быть восстановлен в  $Fe^{+2}$  и поэтому окислить  $S^{-2}$  до  $SO_3^{-2}$  или  $SO_4^{-2}$ . Не наблюдалось наличие остатков полимеров или биомассы в пробах после испытаний. Пробы были достаточно чистые и не имели признаков наличия железа, биомассы, серы или полимерных материалов. Большинство диоксида хлора, использованного для обработки, было израсходовано пробой, но его остаточное количество еще измерялось на выходе из пробы.

---

## Процедура испытаний.

Пробы были отобраны из пласта песчаника Береа. Пробы диаметром 1 дюйм были длиной 2,55 дюймов для Теста 1 и длиной 2,75 дюймов для Теста 2. Торцы проб были выравнены и обрезаны, пока они не стали параллельны друг другу. Пробы были помещены в рукав Хасслер и нагреты до температуры испытания. Первоначально была установлена проницаемость по 7% раствору KCl. Затем проба была повреждена введением в нее бульона, содержащего сульфид железа, бактерии и полимеры до такого уровня, пока потеря давления в пробе не стало  $> 450$  psi (31,7 кг/см<sup>2</sup>). Бульон был приготовлен инкубацией сульфат-редуцирующих бактерий при температуре около 23,9 °C в гидрокипропилен гуаровом (hydroxurporyl guar) растворе с погруженным в него отрезком трубки класса N-80.

Приготовленная проба была предварительно промыта 15% раствором соляной кислоты для удаления каких-либо кислотнорастворимых материалов. Кислота была прокачена как с 5% по объему мицелльным окисляющим растворителем, так и без него. Немедленно после этого проба обрабатывалась 0,2% по весу раствором диоксида хлора, приготовленном в 7% растворе KCl. Последующая промывка пробы проводилась 15% раствором соляной

кислоты с 0,28% по весу (25 фунтов/1000 галлонов) лимонной кислоты, прокаченными через пробу для удаления любых кислотно-растворимых продуктов из ступени обработки диоксидом хлора. Степень промывки 7% раствором KCl была применена для заключительного измерения восстановленной проницаемости пробы. Для измерения концентрации диоксида хлора,  $Fe^{+2}$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $SO_3^{-2}$ ,  $SO_4^{-2}$ ,  $Al^{+3}$  и  $SiO_2$  отбирались образцы жидкости на выходе из пробы на стадиях кислотной пред-промывки, обработки диоксидом хлора и кислотной заключительной промывки.

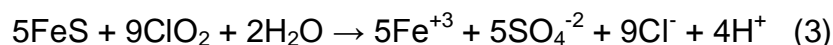
## Результаты испытаний

Рис. 2 иллюстрирует влияние на проницаемость обработки без мицелльного окисляющего растворителя. Начальная проницаемость 7% раствору KCl составляла 132 миллиарды, а конечная восстановленная проницаемость увеличилась на 65 миллиарды, т.е. проницаемость была восстановлена на 49%. В таблице 4 приведены результаты анализа полученной из пробы жидкости после пред-промывки кислотой, обработки диоксидом хлора и заключительной промывки кислотой.

Рис. 3 показывает эффект от добавления мицелльного окисляющего растворителя на ступени пред-промывки. Первоначальная и конечная проницаемость 7% раствору KCl составляли, соответственно, 318 и 348 миллиарды, т.е. 109% увеличение первоначальной проницаемости. Также, уменьшение проницаемости во время ступени обработки диоксидом хлора было значительно медленнее, чем в Тесте 1. В таблице 5 приведены результаты анализа образцов на выпуске из образцов кислотной пред-промывки, обработки диоксидом хлора и кислотной заключительной промывки.

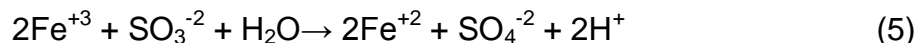
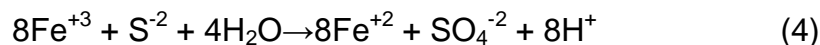
## Обсуждение

Ожидалось, что диоксид хлора окислит и устранил органические материалы, такие как полимеры и биомассу. Также ожидалось, что окисление сульфида железа приведет к образованию  $Fe^{+3}$  и  $SO_4^{-2}$ :



В зависимости от стехиометрии реакции между диоксидом хлора и иона  $S^{-2}$ , другими возможными продуктами являются  $SO_3^{-2}$  и элементарная сера. В этом исследовании наблюдались только  $SO_4^{-2}$  и  $SO_3^{-2}$ . Элементарная сера не была обнаружена как энергодиспергированным рентгеновским облучением, так и визуальным наблюдением за пробами. Анализы  $SO_4^{-2}$  и  $SO_3^{-2}$  были выполнены стандартными аналитическими методами [11].

При наблюдении удивительным оказалось присутствие  $Fe^{+2}$  на выходе из пробы, вызванное восстановлением  $Fe^{+3}$  в  $Fe^{+2}$  сульфидом  $S^{-2}$  или сульфитом  $SO_3^{-2}$



Большое количество  $Fe^{+2}$ , пронесенное через пробу диоксидом хлора в Тесте 2 (Таблица 5), может быть объяснено смачивающими и суспензионными характеристиками мицелльного окислительного растворителя в кислоте, использовавшегося при

предварительной кислотной промывке пробы. Это вызывало удивление, поскольку степень обработки диоксидом хлора имела pH более 7, при этом ожидалось, что частицы железа будут осаждаться в виде FeO или Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> {2}.

Результаты анализа на содержание Al<sup>+3</sup> и SiO<sub>2</sub> должны были быть ожидаемы для ступеней кислотной обработки, опираясь на результаты работ Симона и Андерсона {12} по изучению растворимости глин в 15% растворе соляной кислоты. Однако выделение этих компонентов на стадии обработки диоксидом хлора не предполагалось. Этот феномен должен в дальнейшем быть изучен.

Испытания с пробами пласта продемонстрировали, что обработка диоксидом хлора по-стадийно с кислотой окислит сульфид железа и полностью устранит повреждение пласта. Этот результат получен в отличие от обработки только 15% раствором соляной кислоты, которой недостаточно для удаления повреждения, вызванного полимером и биомассой. Поэтому часть сульфида железа, не вступившая в реакцию с кислотой, остается. Кроме того, сульфид железа, растворенный кислотой, может вновь осаждаться, если pH выше 1,9

Добавление мицелльного окисляющего растворителя обеспечивает получение более лучших результатов, чем без этой добавки, вероятно потому, что при этом замедляется осаждение железа. Сравнение содержания ионов металла на выпуске из пробы на ступени обработки диоксидом хлора в Тесте 1 (рис. 2) и Тесте 2 (рис. 3) это иллюстрирует.

---

## Выводы

1. Программа стимулирования скважин с применением диоксида хлора/15% раствора HCl может быть безопасной и эффективной при следовании рекомендациям, изложенным в этой статье.
2. Примеры показывают, что стимулирование диоксидом хлора и соляной кислотой могут эффективно устранить повреждение как эксплуатационных, так и нагнетательных скважин.
3. Испытания, выполненные с отобранными пробами пласта, подтвердили производственные результаты.

## Благодарность

Мы выражаем нашу признательность руководству компаний Conoco Inc. и Exxon Chemical Co. за возможность опубликовать эту работу.

**Ссылки на литературу:** 12 наименований.

**Приложение** Приводятся рекомендации по безопасной генерации и использованию раствора диоксида хлора в промышленных условиях нефтяного месторождения.

## Заключение

При соблюдении данных рекомендаций по этой технологии было выполнено стимулирование более 1000 скважин без каких-либо нарушений техники безопасности.



Таблица 1. Типовая процедура применения кислоты

Степень	Типы и количество компонентов
1	50 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон с 2 фунтами/галлон соли крупностью 100 меш (общее кол-во соли 420 фунтов)
2	50 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон с 2 фунтами/галлон соли крупностью 100 меш (общее кол-во соли 420 фунтов)
3	50 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон с 2 фунтами/галлон соли крупностью 100 меш (общее кол-во соли 420 фунтов)
4	50 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон с 2 фунтами/галлон соли крупностью 100 меш (общее кол-во соли 420 фунтов)
Вытесняющая жидкость (Displacement)	57 баррелей завершающей жидкости (completion fluid)

Примечание: 100 меш = 150 микрон

Таблица 2. Типовая процедура применения соляной кислоты и диоксида хлора

Степень	Типы и количество компонентов
1	25 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 3 барреля 3% водного раствора KCl 50 баррелей 0,3% раствора диоксида хлора смешанного с 3% водным раствором KCl 3 барреля 3% водного раствора KCl 25 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 3 барреля соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон с 2 фунтами/галлон соли крупностью 100 меш (общее кол-во соли 420 фунтов)
2	25 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 3 барреля 3% водного раствора KCl 50 баррелей 0,3% раствора диоксида хлора смешанного с 3% водным раствором KCl 3 барреля 3% водного раствора KCl 25 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 3 барреля соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон с 2 фунтами/галлон соли крупностью 100 меш (общее кол-во соли 420 фунтов)
3	25 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 3 барреля 3% водного раствора KCl 50 баррелей 0,3% раствора диоксида хлора смешанного с 3% водным раствором KCl 3 барреля 3% водного раствора KCl 25 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 3 барреля соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон с 2 фунтами/галлон соли крупностью 100 меш (общее кол-во соли 420 фунтов)
4	25 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 3 барреля 3% водного раствора KCl 50 баррелей 0,3% раствора диоксида хлора смешанного с 3% водным раствором KCl 3 барреля 3% водного раствора KCl 25 баррелей 15% раствора HCl/NE/FE кислота 3 барреля соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон 5 баррелей соленой воды концентрацией 10 фунтов/галлон с 2 фунтами/галлон соли крупностью 100 меш (общее кол-во соли 420 фунтов)

Таблица 3. Результаты испытаний

Применение только 15% раствора HCl

Скважина	До			После		
	Производительность, баррелей воды/сутки	Давление (psi)	Нагнетаемость, Баррелей воды/сутки/ psi	Производительность, баррелей воды/сутки	Давление (psi)	Нагнетаемость, Баррелей воды/сутки/psi
28	1414	1725	0,82	1510	1390	1,09
60	633	1700	0,37	390	1320	0,30
114	322	1750	0,18	389	1750	0,22
Среднее значение	0,46			0,54		

Увеличение нагнетаемости:  $[(0,54 - 0,46)/0,46](100\%) = 17\%$

Применение 15% раствора HCl + ClO<sub>2</sub>

Скважина	До			После		
	Производительность, баррелей воды/сутки	Давление (psi)	Нагнетаемость, Баррелей воды/сутки/ psi	Производительность, баррелей воды/сутки	Давление (psi)	Нагнетаемость, Баррелей воды/сутки/psi
22	340	1725	0,20	380	1160	0,33
59	389	1700	0,23	1550	1580	0,98
62	195	1750	0,11	300	1550	0,19
Среднее значение	0,18			0,50		

Увеличение нагнетаемости:  $[(0,50 - 0,18)/0,18](100\%) = 178\%$

Таблица 4. Испытание с пробами пласта №1. Анализ жидкости, мг/л, отобранной из поврежденной пробы, обработанной диоксидом хлора после пред-промывки соляной кислотой.

Образец для анализа	ClO <sub>2</sub>	Общее Fe	Fe <sup>+2</sup>	Fe <sup>+3</sup>	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Al <sup>+3</sup>
Пред-промывка HCl							133
1	711,6	72,9	47,6	25,3	0,0,	232,0	-
2	711,6	75,9	-	-	0,0	748,0	-
3	782,8	29,1	29,1	0,0	50,0	616,0	30
4	711,6	21,5	21,5	0,0	50,0	262,0	-
5	782,8	49,2	10,8	38,4	100,0	103,0	-
6	498,1	39,0	10,1	28,9	100,0	374,0	10
7	284,6	54,5	12,5	42,0	100,0	289,0	-
8	569,3	-	13,2	-	50,0	10,0	-
9	853,9	14,7	6,0	8,7	100,0	207,0	-
10	284,6	19,3	19,3	0,0	50,0	181,0	-
11	249,1	4,2	4,2	0,0	37,5	154,0	8
12	249,0	6,0	6,0	0,0	25,0	259,0	
13	284,6	11,1	11,1	0,0	12,5	272,0	
14	249,0	16,2	16,2	0,0	25,0	127,0	
15	249,0	8,1	8,1	0,0	25,0	272,0	
16	142,3	9,8	9,8	0,0	25,0	259,0	
17	142,3						
HCl + лимонная кислота							
1							418
2							166
3							105

Таблица 5. Испытание с пробами пласта №2. Аналитические результаты, мг/л, применение диоксид хлора вместе с 5% раствором мицелльного растворителя

Образец для анализа	ClO <sub>2</sub>	Fe <sup>+2</sup>	Fe <sup>+3</sup>	Общее Fe	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Al <sup>+3</sup>
Пред-промывка 15% раствором HCl + 5% раствор мицелльного растворителя							
1				3025			817
2				1953			575
Диоксид хлора при pH 2,0 с HCl в 7% растворе KCl при температуре 43,3 °C							
1	67,5	6,8	743	750	196,5	80	817
2	67,5	19,0	476	495	179,5	40	575
3	67,5	6,6	391	398	150,0	40	161
4	67,5	3,8	315	319	137,5	40	36
5	67,5	11,6	219	231	135,0	40	24
6	67,5	13,4	164	177	132,0	0	17
7	67,5	14,8	119	134	126,0	40	15
8	67,5	10,2	88	98	129,0	40	13
9	67,5	6,8	58	65	126,0	40	11
10	67,5	13,4	30	43	115,5	40	10
Заключительная промывка 15% раствором HCl + лимонная кислота (25 фунтов/1000 галлонов)							
1				815			102
2				916			180
3				539			130
4				312			90
5				189			69
6				154			62

Графики (рис. 1 – 3) приведены на следующей странице.

