

# Проект АСП. Проблематика растворенного кислорода. Теория и практика

М.Ю. Бондарь\*, М.Ю. Шустер, В.М. Карпан, М.Ю. Костина, М.А. Азаматов  
Салым Петролеум Девелопмент Н.В., Москва, Россия

В статье представлены последние результаты исследований по влиянию растворенного кислорода на эффективность проекта АСП заводнения, реализуемого компанией «Салым Петролеум Девелопмент Н.В.». Пилотный проект по экспериментальной закачке растворов анионного поверхностно-активного вещества, соды и полимера (проект АСП) в пласт для повышения нефтеотдачи реализуется с 2016 года. Стабильность одного из компонентов АСП – полимера, сильно зависит от присутствия в воде железа, катионов жесткости и растворенного кислорода. Так как полимер используется при закачке на двух стадиях проекта, которые являются ключевыми и самыми продолжительными, на стадии проектирования установки АСП был заложен целый комплекс защиты полимера от негативных факторов, в особенности от влияния кислорода, который вызывает не только кислородную коррозию, но и необратимое разрушение полимерных цепей. В статье описаны исследования по стабильности полимерных растворов, проведен анализ потери вязкости со временем в присутствии железа и кислорода для растворов полимеров. Обоснован выбор метода химического обескислороживания для борьбы с растворенным кислородом. Описана программа лабораторных исследований проекта АСП и используемые аналитические контрольно-измерительные приборы. Представлена технологическая схема процесса АСП, и даны рекомендации по реализации технологии.

**Ключевые слова:** Заводнение АСП, метод увеличения нефтеотдачи, пилотный проект АСП, Западно-Салымское месторождение, растворенный кислород, стабильность полимера, свободные радикалы, химическое связывание кислорода, азотная подушка, амперометрический метод

**Для цитирования:** Бондарь М.Ю., Шустер М.Ю., Карпан В.М., Костина М.Ю., Азаматов М.А. (2018). Проект АСП. Проблематика растворенного кислорода. Теория и практика. *Георесурсы*, 20(1), с. 32-38. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.1.32-38>

## Введение

Компания «Салым Петролеум Девелопмент Н.В.» реализует пилотный проект по экспериментальной закачке растворов анионного поверхностно-активного вещества (ПАВ), соды и полимера в пласт для повышения нефтеотдачи. Активная закачка раствора АСП (анионное поверхностно-активное вещество, сода, полимер) началась в июле 2016 года, следующая фаза – полимерное заводнение – реализовалось в 2017 году. Проект завершится к концу 1 квартала 2018 года. Стабильность одного из компонентов АСП – полимера, сильно зависит от присутствия в воде железа, катионов жесткости и растворенного кислорода. Для устранения возможного отрицательного эффекта от растворенного кислорода в проекте АСП предусмотрен целый ряд мероприятий, направленных как на удаление из воды растворенного кислорода, так и на ограничение его поступления из атмосферы или реагентов в ходе эксплуатации. Подробное описание проекта АСП и аспекты борьбы с кислородом: от определения его отрицательных эффектов, до методов его удаления и контроля его содержания для будущих АСП проектов, рассмотрены в работе (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018).

В данной статье представлены последние результаты исследований по влиянию растворенного кислорода на эффективность АСП заводнения.

\* Ответственный автор: Михаил Юрьевич Бондарь  
E-mail: [Mikhail.Bondar@salympetroleum.ru](mailto:Mikhail.Bondar@salympetroleum.ru)

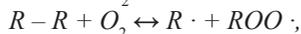
## Влияние растворенного кислорода на эффективность АСП

Применяемый в проекте АСП полимер – частично гидролизированный полиакриламид – в условиях химического заводнения подвергается воздействию высокой температуры, давления, сдвиговых напряжений, растворенных в воде солей жесткости, железа и растворенного кислорода, что отражается на его стабильности (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018).

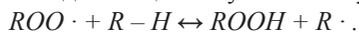
Так как полимер используется при закачке на двух стадиях проекта (сначала закачка растворов АСП и непосредственно закачка полимерного раствора после), которые являются ключевыми и самыми продолжительными, на стадии проектирования установки АСП был заложен целый комплекс защиты полимера от указанных выше негативных факторов, в особенности от влияния кислорода, который вызывает не только кислородную коррозию, но и необратимое разрушение полимерных цепей (Isabel Vega et al., 2015; Seright, Skjevraak, 2014; Wellington, 1983), в том числе из-за свободно-радикального механизма, что приводит к необратимой потере вязкости раствора, начинающей потерю его целевых свойств (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018).

Отчасти именно такая химическая чувствительность полимера используется при применении полиакриламидов в целях обработки скважин, когда для их разрушения используют растворы сильных окислителей – пероксидов (т.н. polymer breaker), являющихся источниками радикалов (из-за неустойчивой связи -O-O-).

Механизм деградации (потери целевых вязкостных свойств) под действием кислорода, можно описать следующими реакциями:



где R-R – участок полимерной цепи. Начавшись, реакция происходит по цепному механизму:

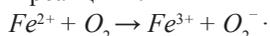


В присутствии активных ионов или молекул, например, сильных окислителей или восстановителей, или ионов переходных металлов, таких как железо, генерация свободных радикалов усиливается, что ускоряет процесс разрушения полимерных цепей.

В Компании были проведены собственные исследования по стабильности полимерных растворов, один из результатов приведен на рисунке 1, что согласуется с общими принципами (Seright, Skjevtrak, 2014.).

Присутствие ионов железа ускоряет процесс выделения свободных радикалов с участием кислорода (Isabel Vega et al., 2015; Wellington, 1983), но при этом в обескислороженной среде влияние железа незначительно, что также описано в (Isabel Vega et al., 2015; Wellington, 1983) и в наших тестах на стабильность.

При присутствии железа (или катиона другого переходного металла или окислителя) и кислорода механизм выделения свободных радикалов происходит по следующим реакциям:



где R-R – участок полимерной цепи

Из изложенных реакций важно то, что присутствие железа и кислорода в воде одновременно оказывают наибольшее влияние на длину полимерной цепи, а значит на вязкость полимера. Обратная сторона присутствия ионов трехвалентных металлов – сшивание полимерных цепей между собой, что резко повысит вязкость раствора выше требуемого значения. Этот вопрос поднимался в (Seright, Skjevtrak, 2014.), однако в проекте АСП не было предпосылок повышения уровня железа, даже с учетом коррозии обширных участков трубопроводов, до такого уровня, когда начиналось сшивание

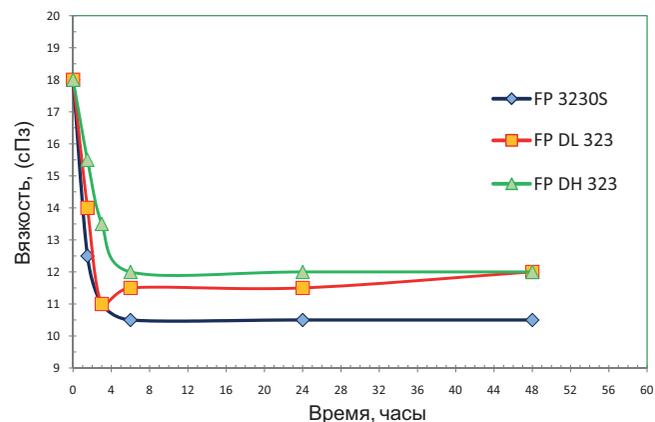


Рис. 1. График потери вязкости со временем в присутствии железа и кислорода для растворов полимеров серии Floaат (FP 3230S – применяемый в проекте) в растворе с концентрацией полимера 2500 мг/л, железа – 5 мг/л, кислорода 10 мг/л, при температуре 83 °C

полимерных цепей в растворе; железо присутствовало в воде в количествах, активирующих именно цепные радиальный механизмы.

Так как исключить фактор электрохимической коррозии трубопроводов (и, соответственно, обнаружения в воде ионов железа и других тяжёлых металлов) полностью нельзя, даже после подготовки воды, включающей в себя обессоливание на обратноосмотических мембранах, было принято решение все усилия направить именно на удаление растворенного кислорода (обескислороживание) с нормой технологического режима не более 10 мг/л и защиту процесса от атмосферного кислорода (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018) и того кислорода, что приходит в систему вместе с компонентами АСП.

Механизм снижения вязкости отчасти имеет свободно-радикальную природу это означает, что реакция может протекать не только по окислительному принципу – с участием окислителей, но и с участием восстановителей, что также должно быть учтено.

### Применяемые в пилотном проекте методы борьбы с кислородом

Обзор методов борьбы с растворенным кислородом и их применение в пилотном проекте по заводнению АСП описаны в работе (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018). Проект реализуется на нескольких инфраструктурных объектах, главным объектом технологической схемы проекта является установка приготовления и закачки химических растворов АСП. Основными источниками поступления кислорода в процесс в данной технологической схеме являются непосредственно артезианские скважины, сыпучие реагенты, между гранулами которых есть содержащие атмосферный воздух пустоты, поверхностно-активные вещества (ПАВ) и изобутиловый спирт (ИБС). Атмосферный кислород может растворяться при контакте с водой в резервуарах и емкостях (равновесная концентрация кислорода в реальных условиях может достигать 9-10 мг/л). Поэтому борьба с кислородом идет сразу по нескольким направлениям (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018):

- Создание азотной подушки во всех резервуарах и емкостях для исключения контакта жидкостей с кислородом воздуха. Азот генерируется на азотно-воздушной станции;
- Химическое связывание растворенного кислорода дозированием восстановителя непосредственно после очистки воды с учетом избытка, рассчитанного на кислород, поступающий после точки дозирования (с реагентами и т.д.);
- Контроль водно-химического режима химического связывания кислорода (рН, щелочность, температура и т.д.);
- Постоянный аналитический контроль содержания кислорода в различных технологических потоках для своевременного обнаружения источников поступления кислорода и его удаления, при этом контроль ведется как при помощи КИП, так и различными лабораторными методами.

### Выбор методов борьбы с растворенным кислородом

При разработке проекта АСП изначально рассматривались два метода борьбы с кислородом:

- мембранное обескислороживание на мембранных контакторах (Klaassen, Feron, Jansen, 2005), работающих

по схеме азот-вакуум, так как азотная станция применяется в проекте независимо от выбранного метода борьбы с кислородом и способна генерировать азот требуемого качества – не ниже 99,8%; принцип работы и внешний вид проиллюстрированы на рисунке 2;

- химическое обескислороживание (связывание растворенного кислорода восстановителем).

Традиционные деаэратеры, широко применяемые в энергетике, из-за размеров оборудования и стоимости, не рассматривались.

Экономический расчет по суммарным затратам на срок жизни проекта (около 1-1,5 лет) показал целесообразность работы по второму пути, к тому же контакторы усложнили бы без того сложную технологическую схему подготовки воды (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018). Но для будущих проектов, данный метод может быть применен, если, например, удалять и растворенный кислород, и растворенную углекислоту одновременно.

Для реализации второго метода проводился скрининг различных восстановителей-поглотителей кислорода на основе органических и неорганических сульфит-содержащих веществ, в том числе и лабораторная проверка выбранного реагента (Таблица 1).

Несмотря на ряд очевидных недостатков, таких как образование сульфатов в ходе реакции с кислородом, ограниченный рабочий диапазон pH и температуры, были выбраны сульфит-содержащие (сульфиты, бисульфиты, метабисульфиты) поглотители для дальнейшей проработки, в основном из-за дешевизны и легкодоступности, а также простоты вовлечения в технологический процесс и эксплуатации дозирующего оборудования. Кроме того, сульфиты способны образовывать защитную пленку (по заявлениям производителя) на стенках оборудования, что способствует снижению скорости кислородной коррозии (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018). Под сульфитами здесь понимаются бисульфит натрия, сульфит натрия и метабисульфит натрия, в том числе с катализатором.

В ходе лабораторной проверки был смоделирован процесс связывания кислорода реагентом «АМИНАТ™

КО-2» (Паспорт безопасности химической продукции «Препарат Аминат КО-2» по ТУ 2149-098-17965 829-03 компании ЗАО «ЭКОС-1») и оценено влияние различных факторов на кинетику реакции (pH, время воздействия, температура и т.д.). Описание и результаты экспериментов по оценке эффективности АМИНАТа™ КО-2 при обескислороживании дистиллированной воды приведены в (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018).

Согласно результатам для обеспечения условий процесса химического обескислороживания в дистиллированной воде необходимо дополнительно дозировать щелочные реагенты. Опыт по обескислороживанию дистиллированной воды при подщелачивании до pH = 6,7 показал высокую эффективность реагента даже при низкой температуре. Уже в первые минуты опыта практически полностью происходило связывание кислорода, а через десять минут содержание кислорода снижалось до требуемых значений 10-15 мкг/дм³ (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018).

На основании проведенных исследований по оценке эффективности химического обескислороживания пермеата обратного осмоса с использованием АМИНАТа™ КО-2 можно сделать следующие выводы (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018):

1) Эффективное химическое связывание кислорода при дозировании АМИНАТа™ КО-2 протекает при дополнительном подщелачивании, обеспечивая значение pH обработанной воды выше 6,2-6,3;

2) Продолжительность пребывания пермеата после дозирования АМИНАТа™ КО-2 в накопительном баке не влияет на эффективность обескислороживания при дальнейшем нагревании воды;

3) Рекомендовать проводить процесс подщелачивания пермеата до и после накопительного бака с корректировкой дозирования по значению pH использовать более щелочные формы реагентов, например, сульфиты натрия или бисульфиты натрия.

Стоит отметить также альтернативу приведенным выше методикам борьбы с отрицательным воздействием кислорода – использование полимеров с защитными

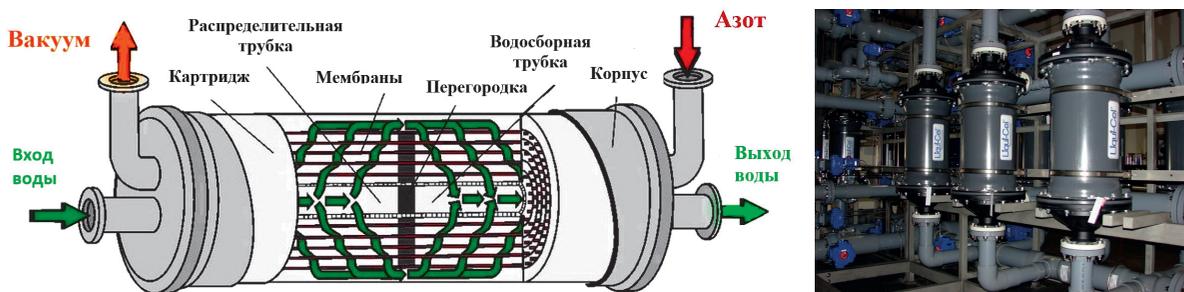
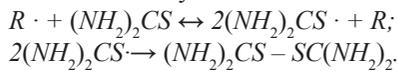


Рис. 2. Принцип работы (слева) и внешний вид (справа) мембранных контакторов для обескислороживания

Поглотитель кислорода	Пассивирующие свойства	Увеличение соленосодержания	Токсичность	Стехиометрическое потребление на 1 мг O <sub>2</sub>	Товарная форма
Сульфиты натрия	Нет	да	Нет данных	7,9	Порошок, раствор
Гидразин	да	нет	Токсичен, канцероген	1,0	Жидкость
Карбогидразин	да	нет	Нет данных	1,4	Жидкость
Метилэтилкетоксим	да	нет	Нет данных	5,4	Жидкость
Гидрохинон	да	нет	Нет данных	6,9	Жидкость
Диэтилгидроксиламин	да	нет	Безопасен	1,2	Жидкость

Таблица 1. Обзор реагентов – поглотителей кислорода ((Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018) с дополнениями)

добавками, таких как мочевины и тиомочевина. Молекулы мочевины, взаимодействуя с радикалами, связываются в стабильные молекулы:



Такие добавки или подобные им часто используют производители полимеров, если нужно нивелировать отрицательное взаимодействие в т.ч. кислорода, сероводорода и т.д. В случае пилотного проекта было решено пойти пути химического связывания кислорода из-за дороговизны специальных защищенных полимеров.

### Борьба с растворенным кислородом при эксплуатации. Водно-химический режим

В ходе эксплуатации было выявлено изменение показателя рН в резервуаре чистой воды, куда поступает пермеат обратного осмоса (имеющий пониженный за счет уголекислоты рН). Показатель опускался ниже 5,0 единиц за счет гидролиза метабисульфита, что снижало эффективность реагента. По итогам исследований было решено повышать рН только в резервуаре чистой воды дозированием раствора соды (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018).

Также была проанализирована динамика концентрации кислорода в различных потоках. При отключении азотной продувки емкостного оборудования или образования контакта с атмосферой (в ходе пусконаладочных работ или остановов, например) наблюдалось резкое повышение концентрации кислорода, что являлось результатом стремления водной системы прийти к равновесной концентрации растворенного кислорода при данных условиях (Rubin Battino et al., 1983; Kai Fischer, Michael Wilken, 2001) (рис. 3).

В ходе пусконаладочных работ (ПНР) и запуска стадии АСП, в рамках которой в пласт началась закачка раствора ПАВ, его со-растворителя, изобутилового спирта (ИБС),

соды, соли и полимера, в финальном смешанном растворе наблюдалось резкое увеличение концентрации кислорода. Было определено, что скачки изменения концентрации кислорода, фиксируемые проточным анализатором, согласовывались с показаниями датчиков мгновенного расхода ИБС. Это связано с повышенной растворимостью кислорода в спиртах, в том числе и изобутиловом. Так, налив ИБС в цистерны происходит не в полностью герметичных и изолированных условиях, растворенный в ИБС кислород попадал в раствор АСП, и датчик это фиксировал (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018). Как отмечается равновесная концентрация кислорода в спирте может достигать десятков мг/л (Kai Fischer, Michael Wilken, 2001; W. Rodgers Baird, Robert T. Foley, 1972). Попытки провести измерение содержания кислорода приводили к результатам с большим разбросом, от нескольких мг/л до 50-80 мг/л.

Чтобы гарантировано обеспечить удаление кислорода, поступающего из ИБС или другого источника, было решено повысить избыток сульфитов с последующим снижением до 10-15 мг/л, в результате чего кислород снизился за считанные дни. В дальнейшем было решено снизить избыток сульфитов и повышать его только в случаях непредвиденных отклонений от норм технологического режима (отключение или недостаточность азотных продувок, нарушение герметичности емкостного оборудования и т.д.).

Были выработаны рекомендации и относительно использования сульфитов, так как их использование может иметь ряд побочных отрицательных эффектов при использовании на Западно-Салымском и других месторождениях: сульфаты, как продукты связывания кислорода, перерабатываются сульфат-восстанавливающими бактериями (СВБ) на сероводород, вызывающий активную коррозию оборудования и трубопроводов. Также с барьером пластовых вод будет образовываться барит (форма сульфата бария),

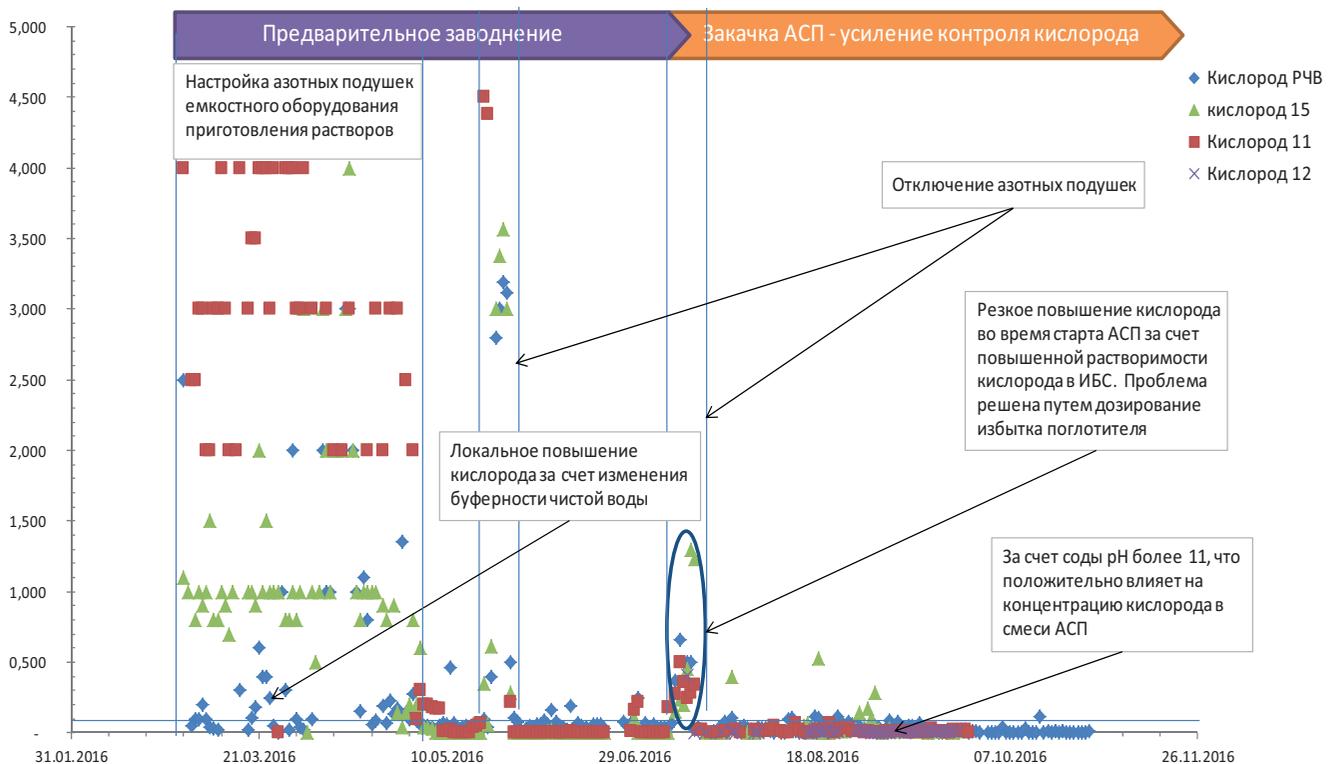


Рис. 3. Динамика концентрации кислорода в различных потоках в ходе реализации проекта АСП (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018)

отложения которого крайне сложно ликвидировать даже сильными кислотами.

Сульфиты, как сильные восстановители, могут также участвовать в радикальных реакциях деградации полимера, что означает необходимость контроля содержания остаточных сульфитов в воде, но большая часть сульфитов после реакции с кислородом образуют сульфаты, анионы инертные в отношении свободно-радикальных механизмов, а остаточные сульфиты в образуемых концентрациях не влияют на вязкость существенным образом. Это было учтено при разработке программы контроля водно-химического режима.

### Программа аналитического контроля

Программа лабораторных исследований проекта АСП содержит более 38 аналитических показателей и более 45-ти применяемых методик, как стандартных (ПНД, РД, ГОСТы, ASTM), так и специально разработанных для проекта. Для ключевых показателей часто применялось сразу несколько методик, что связано с тем, что для одних и тех же показателей в разных средах, потоках и условиях необходимо использовать различные методы измерения.

Определение концентрации растворенного кислорода в лабораториях проводится при помощи метода Винклера или йодометрического титрования РД 52.24.419-2005 (Массовая концентрация растворенного кислорода в водах. Методика выполнения измерений йодометрическим методом). Несмотря на то, что метод Винклера отнесен к стандартным химическим методам анализа растворов во множестве его модификаций, упрощающих исследования, провести с помощью него оперативный экспресс-анализ в полевых условиях невозможно (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018). Именно поэтому для оперативного измерения концентрации растворенного кислорода в воде нами в проекте используются анализаторы растворенного кислорода, или оксиметры (рис. 4 А, В), а также специальные тест-наборы экспресс-определения растворенного кислорода (визуально-колориметрический метод, рис. 4 Б).

После изучения рынка аналитических приборов и консультаций с производителями было решено использовать только те приборы, которые основаны на более нейтральном методе – амперометрическом.

Принцип действия амперометрического анализатора растворенного кислорода основан на электрохимическом

методе определения концентрации кислорода.

В проекте используются ряд портативных приборов и два типа аналитических контрольно-измерительных приборов для разных диапазонов измерения (от близких к равновесному значений концентрации к следовым в несколько мкг/л).

Для проверки также используются выбранные экспресс-методы определения кислорода визуально-колориметрическими методами: индиго карминовым для значений не менее 1 мг/л и Rodhazine D для значений в мкг/л (ASTM D 888-87, Dissolved Oxygen in Water; ASTM D5543-09, Standard Test Methods for Low-Level Dissolved Oxygen in Water) (рис. 4).

Для полноты контроля содержания кислорода на различных стадиях технологических схемы АСП был предусмотрен и оборудован ряд пробоотборных точек, а также используются аналитические измерительные приборы проточного типа. На упрощенной схеме (рис. 5) процесса в зеленых сносах отмечены точки отбора проб, в желтых – места контроля кислорода проточными аналитическими приборами, красная стрелка показывает место ввода поглотителя кислорода.

Такое количество точек контроля содержания кислорода позволяет оперативно выявлять причины повышения концентрации (источники кислорода), а использование трех подходов к определению (портативный прибор – тест-набор – КИП) сводит к минимуму вероятность ошибочного определения содержания кислорода. Кроме того, отдельное внимание уделяется определению избытка сульфитов-ионов в различных средах, как индикации происходящих в них процессов. Отсутствие сульфитов может стать сигналом скорого повышения уровня кислорода (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018). Особенно важно иметь избыток реагента перед смешением с ИБС или иной жидкостью, растворимость кислорода в которой может быть значительно выше, чем в воде.

Также при реализации схемы с азотной продувкой емкостного оборудования можно сделать вывод, что защищать технологические среды необходимо после ввода реагента-поглотителя или ввода в процесс полимера. То есть нет нужды реализовывать азотные подушки в емкостях с исходной водой, промежуточных емкостях установки подготовки воды и т.д.; это позволит снизить операционные затраты.

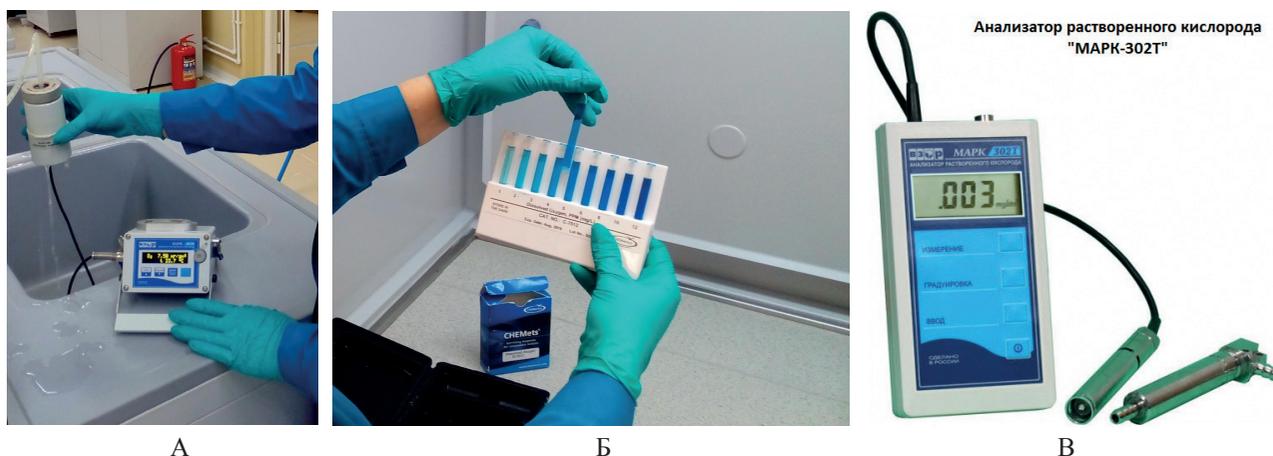


Рис. 4. Лабораторные методы измерения концентрации кислорода: А – Портативный проточный анализатор МАРК-3010, Б – тест-наборы Chemetrics, В – проточный портативный анализатор МАРК-302Т.

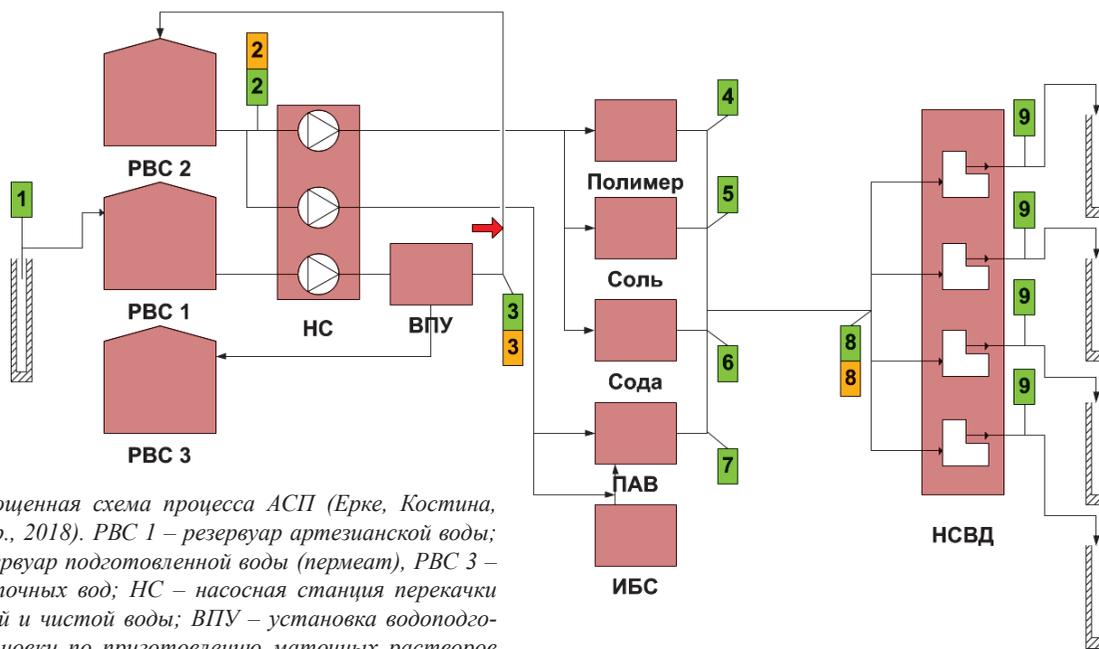


Рис. 5. Упрощенная схема процесса АСП (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018). PBC 1 – резервуар артезианской воды; PBC 2 – резервуар подготовленной воды (пермеат), PBC 3 – резервуар сточных вод; НС – насосная станция перекачки артезианской и чистой воды; ВПУ – установка водоподготовки; установки по приготовлению маточных растворов реагентов (Полимер, Соль, Сода, ПАВ, ИБС); НСВД – насосная станция высокого давления закачки растворов АСП в пласт. Потoki сред, в которых происходит анализ содержания растворенного кислорода, отмечены цифрами: 1 – Артезианская вода; 2 – Подготовленная вода (пермеат) после PBC; 3 – Подготовленная вода (пермеат) до PBC; 4 – Маточный раствор полимера; 5 – Маточный раствор соли; 6 – Маточный раствор соды кальцинированной; 7 – Маточный раствор ПАВ и ИБС; 8 – Смесь АСП на входе в насосную станцию закачки после смешения; 9 – Пробоотборные точки на нагнетании насосов высокого давления.

## Выводы и рекомендации

При реализации технологии АСП, в которой контролю растворенного кислорода воды и растворов отводится одна из решающих ролей, важно учитывать ряд факторов и следовать следующим рекомендациям (Ерке, Костина, Бондарь и др., 2018):

- Необходимо на стадии проектирования исключить контакт с атмосферным кислородом путем поддержания азотных подушек в емкостном оборудовании, особенно для обескислороженных сред, так как система быстро вернется к равновесному содержанию кислорода в воде или водном растворе, а это единицы мг/л. Нет нужды реализовывать азотные подушки в емкостях с исходной водой, промежуточных емкостях установки подготовки воды и т.д.; это позволит снизить операционные затраты.

- Необходимо поддерживать уровень избытка поглотителя кислорода на приемлемом уровне. Отсутствие избытка является сигналом о наличии проблемы и скором повышении уровня кислорода, большой избыток также может быть причиной деградации полимера;

- Необходимо соблюдать водно-химический режим применения реагента-поглотителя, который заключается в поддержании оптимальной температуры, pH и времени пребывания;

- Необходимо учитывать поступление кислорода с компонентами АСП, особенно с теми, в которых растворимость кислорода аномально высока;

- Важно понимать, какие методы измерения кислорода применимы и оптимальны для различных сред, особенно многокомпонентных, для этого нужно учитывать побочные физико-химические процессы, которые могут привести к ошибочному определению кислорода. Также для проверки использование различных альтернативных методов не является излишним;

- Особое внимание следует уделить разработке системы пробоотборных точек и их оформлению для исключения контакта с атмосферой при отборе проб и соблюдению правил отбора проб;

- При выборе химического метода важно выбрать такой реагент, применение которого не повлечет за собой дополнительных мероприятий по реализации оптимальных водно-химических режимов.

## Литература

- Ерке С.И., Костина М.Ю., Бондарь М.Ю. и др. (2018). Особенности борьбы с растворенным кислородом в проекте АСП. *Нефтяное хозяйство*, 1, с. 66-71. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-1-66-71.
- ASTM D 888-87, Dissolved Oxygen in Water, Test Method. A. Gilbert, T.W., Behymer, T.D., Castañeda, H.B. (1982). Determination of Dissolved Oxygen in Natural and Wastewaters. *American Laboratory*, pp. 119-134.
- ASTM D 5543-09, Standard Test Methods for Low-Level Dissolved Oxygen in Water.
- Isabel Vega, M. Isabel Hernández, Diana Masiero, Leticia Legarto, Silvana Gandi, Sergio Bosco, Remigio Ruiz (2015). IOR: Improving Polymer Selection, Connecting Lab Results with Field Operation. *AAPG Latin America Region, Geoscience Technology Workshop*. Search and Discovery Article #41642.
- Kai Fischer, Michael Wilken (2001). Experimental determination of oxygen and nitrogen solubility in organic solvents up to 10 MPa at temperatures between 298 K and 398 K. *J. Chem. Thermodynamics*, 33(10), pp. 1285-1308. doi: <https://doi.org/10.1006/jcht.2001.0837>.
- Klaassen R., Feron P.H.M., Jansen A.E. (2005). Membrane contactors in industrial applications. *Chem. Eng. Res. Des.*, 83, pp. 234-246.
- Rubin Battino, Timothy R. Rettich, and Toshihiro Tominaga (1983). The Solubility of Oxygen and Ozone in Liquids. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 12(163). doi: <https://doi.org/10.1063/1.555680>.
- Seright, R. S., Skjevrak, I. (2014). Effect of Dissolved Iron and Oxygen on Stability of HPAM Polymers. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/169030-MS.
- W. Rodgers Baird, and Robert T. Foley (1972). Solubility of oxygen in selected organic solvents. *J. Chem. Eng. Data*, 17(3), pp. 355-357. doi: 10.1021/je60054a029.
- Wellington, S. L. (1983). Biopolymer Solution Viscosity Stabilization - Polymer Degradation and Antioxidant Use. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/9296-PA.

**Сведения об авторах**

*Михаил Юрьевич Бондарь* – Ведущий инженер-химик  
Салым Петролеум Девелопмент Н.В.  
Россия, 123242, Москва, Новинский бульвар, д.31

*Михаил Юрьевич Шустер* – Руководитель проекта АСП  
Салым Петролеум Девелопмент Н.В.  
Россия, 123242, Москва, Новинский бульвар, д.31

*Владимир Николаевич Карпан* – Инженер по разработке  
Салым Петролеум Девелопмент Н.В.  
Россия, 123242, Москва, Новинский бульвар, д.31

*Мария Юрьевна Костина* – Ведущий специалист технического департамента

Салым Петролеум Девелопмент Н.В.  
Россия, 123242, Москва, Новинский бульвар, д.31

*Марат Альбертович Азаматов* – Руководитель направления, Магистр физики, MSc Petroleum Engineering  
Салым Петролеум Девелопмент Н.В.  
Россия, 123242, Москва, Новинский бульвар, д.31

*Статья поступила в редакцию 30.11.2017;*

*Принята к публикации 02.03.2018; Опубликована 30.03.2018*

IN ENGLISH

**ASP project. Problematics of dissolved oxygen. Theory and practice**

*M.Y. Bondar\**, *M.Y. Shuster*, *V.M. Karpan*, *M.Y. Kostina*, *M.A. Azamatov*

*Salym Petroleum Development N.V., Moscow, Russian Federation*

*\*Corresponding author: Mikhail Yu. Bondar, e-mail: Mikhail.Bondar@salympetroleum.ru*

**Abstract.** The article presents the latest results of studies of dissolved oxygen affect on efficiency of ASP flooding project being executed by Salym Petroleum Development N.V. Company. Pilot project associated with experimental injection of solutions of anionic surface-active substance (surfactant), soda and polymer into formation for enhanced oil recovery (ASP project) has been implemented since 2016. Stability of one of ASP components – polymer strongly depends upon presence of iron, hardness cations and dissolved oxygen in water. As long as polymer is used for injection on two project stages, which are the main and the most extended, at the stage of ASP unit design a complex of polymer protection from negative factors was considered, particularly impact of oxygen, which causes not only oxygen corrosion, but also irreversible destruction of polymer chains. The article describes studies of polymer solution stability, contains analysis of viscosity loss in the course of time in presence of iron and oxygen for polymer solutions. It justifies selection of chemical deoxygenation method for dissolved oxygen control. The article describes program of ASP laboratory studies and analytical instrumentation applied. It provides ASP process scheme and recommendations for technology implementation.

**Keywords:** ASP flooding, EOR, ASP Pilot project, West Salym oil field, dissolved oxygen, free-radical degradation mechanism, chemical oxygen scavenging, nitrogen blanketing, amperometrical method, polymer stability

**Recommended citation:** Bondar M.Y., Shuster M.Y., Karpan V.M., Kostina M.Y., Azamatov M.A. (2018). ASP project. Problematics of dissolved oxygen. Theory and practice. *Georesursy = Georesources*, 20(1), pp. 32-38. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.1.32-38>

**References**

- ASTM D 888-87, Dissolved Oxygen in Water, Test Method. A. Gilbert, T.W., Behymer, T.D., Castañeda, H.B. (1982, March). Determination of Dissolved Oxygen in Natural and Wastewaters. American Laboratory, pp. 119-134
- ASTM D 5543-09, Standard Test Methods for Low-Level Dissolved Oxygen in Water.
- Erke S.I., Kostina M.Yu., Bondar M.Yu., Shuster M.Yu., Karpan V.M. (2018). Dissolved oxygen control specifics in ASP project. *Neftyanoe Khozyaystvo = Oil industry*, 1, pp. 66-71. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-1-66-71 (In Russ.)

Isabel Vega, M. Isabel Hernández, Diana Masiero, Leticia Legarto, Silvana Gandi, Sergio Bosco, and Remigio Ruiz (2015). IOR: Improving Polymer Selection, Connecting Lab Results with Field Operation. *AAPG Latin America Region, Geoscience Technology Workshop*. Search and Discovery Article #41642

Kai Fischer, Michael Wilken (2001). Experimental determination of oxygen and nitrogen solubility in organic solvents up to 10 MPa at temperatures between 298 K and 398 K. *J. Chem. Thermodynamics*, 33(10), pp. 1285-1308. doi: <https://doi.org/10.1006/jcht.2001.0837>

Klaassen R., Feron P.H.M., Jansen A.E. (2005). Membrane contactors in industrial applications. *Chem. Eng. Res. Des.*, 83, pp. 234-246

Rubin Battino, Timothy R. Rettich, and Toshihiro Tominaga (1983). The Solubility of Oxygen and Ozone in Liquids. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 12(163). doi: <https://doi.org/10.1063/1.555680>

Sright, R. S., Skjevraak, I. (2014). Effect of Dissolved Iron and Oxygen on Stability of HPAM Polymers. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/169030-MS

W. Rodgers Baird, and Robert T. Foley (1972). Solubility of oxygen in selected organic solvents. *J. Chem. Eng. Data*, 17(3), pp. 355-357. doi: 10.1021/jc60054a029

Wellington, S. L. (1983). Biopolymer Solution Viscosity Stabilization - Polymer Degradation and Antioxidant Use. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/9296-PA

**About the Authors**

*Mikhail Yu. Bondar* – Leading Chemical Engineer

Salym Petroleum Development NV  
31, Novinsky boul., Moscow, 123242, Russian Federation

*Mikhail Yu. Shuster* – ASP project Manager

Salym Petroleum Development NV  
31, Novinsky boul., Moscow, 123242, Russian Federation

*Volodymyr M. Karpan* – PhD, Reservoir Engineer

Salym Petroleum Development NV  
31, Novinsky boul., Moscow, 123242, Russian Federation

*Maria Yu. Kostina* – Leading Specialist of the Technical Department, Salym Petroleum Development NV

31, Novinsky boul., Moscow, 123242, Russian Federation

*Marat A. Azamatov* – Head of the Department, Master of Physics, MSc Petroleum Engineering

Salym Petroleum Development NV  
31, Novinsky boul., Moscow, 123242, Russian Federation

*Manuscript received 30 November 2017;*

*Accepted 2 March 2018;*

*Published 30 March 2018*