

УДК 622.276: 620.193

МРНТИ 52.47.97: 81.33.00

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108636>

Получена: 24.02.2023.

Одобрена: 17.08.2023.

Опубликована: 30.09.2023.

Научный обзор

Повышение эффективности применения бактерицидов и биостатов при использовании морской воды в системе поддержания пластового давления

М.Ю. Кильянов, Л.В. Игrevский, С.Ф. Хафизов,

В.С. Вербицкий, Д.Н. Ламбин

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье приведены материалы по классификации групп коррозионно-опасных бактерий, развивающихся на объектах нефтепромыслов, классификация нефтяных месторождений по микробиологическим проблемам, даны критические точки по развитию сульфатовосстанавливающих бактерий, а также классификация способов борьбы с микробиологической коррозией. Также дано описание влияния УФ-облучения на угнетение микроорганизмов. Приведены предложения РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина по совместному применению биоцидов, биостатов и УФ-облучения для борьбы с сульфатовосстанавливающими бактериями.

Ключевые слова: сульфатовосстанавливающие бактерии, биоциды, биостаты, ультрафиолетовое облучение.

Как цитировать:

Кильянов М.Ю., Игrevский Л.В., Хафизов С.Ф., Вербицкий В.С., Ламбин Д.Н. Повышение эффективности применения бактерицидов и биостатов при использовании морской воды в системе поддержания пластового давления // *Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана*. 2023. Том 5, №3. С. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108636>.

UDC 622.276: 620.193

CSCSTI 52.47.97: 81.33.00

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108636>

Received: 24.02.2023.

Accepted: 17.08.2023.

Published: 30.09.2023.

Review article

Efficiency improvement of Bactericides and Biostats Application when Using Seawater in a Reservoir Pressure Maintenance System

Mikhail Yu. Kilyanov, Leonid V. Igrevsky, Sergey F. Khafizov,

Vladimir S. Verbitsky, Dmitry N. Lambin

Gubkin University, Moscow, Russia

ABSTRACT

The article presents materials on the classification of groups of corrosion-hazardous bacteria developing at oilfield facilities, classification of oil fields by microbiological problems, critical points for the development of sulfate-reducing bacteria, as well as classification of methods to combat microbiological corrosion. The effect of UV irradiation on the inhibition of microorganisms is also described. The proposals of the Gubkin Institute on the joint application of biocides, biostats and UV irradiation to combat sulfate-reducing bacteria are given.

Key words: *sulfate-reducing bacteria, biocides, biostats, ultraviolet irradiation.*

To cite this article:

Kilyanov MY, Igrevsky LV, Khafizov SF, Verbitsky VS, Lambin DN. Efficiency improvement of Bactericides and Biostats Application when Using Seawater in a Reservoir Pressure Maintenance System. *Kazakhstan journal for oil & gas industry.* 2023;5(3):59–70. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108636>.

ӨЖ 622.276: 620.193

ҒТАХР 52.47.97: 81.33.00

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108636>

Қабылданды: 24.02.2023.

Мақұлданды: 17.08.2023.

Жарияланды: 30.09.2023.

Ғылыми шолу

Қабат қысымын ұстап тұру жүйесінде теңіз суын пайдалану кезінде бактерицидтер мен биостаттарды қолдану тиімділігін арттыру

М.Ю. Кильянов, Л.В. Игревский, С.Ф. Хафизов,

В.С. Вербицкий, Д.Н. Ламбин

И.М. Губкин атындағы мұнай және газ РМУ, Мәскеу қаласы, Ресей

АННОТАЦИЯ

Мақалада мұнай кәсіпшілігі нысандарында дамитын коррозияға қауіпті бактериялар топтарының жіктелуі, мұнай кен орындарының микробиологиялық проблемалар бойынша жіктелуі, сульфатты қалпына келтіретін бактериялардың дамуы бойынша сыни нүктелер, сондай-ақ микробиологиялық коррозиямен күресу тәсілдерінің жіктелуі туралы материалдар келтірілген. Сондай-ақ, ультракүлгін сәулеленудің микроорганизмдердің тежелуіне әсері сипатталған. Сульфатты қалпына келтіретін бактериялармен күресу үшін биоцидтерді, биостаттарды және ультракүлгін сәулеленуді бірлесіп қолдану бойынша И.М. Губкин атындағы Мұнай және газ РМУ (ҒЗУ) ұсыныстары келтірілген.

Негізгі сөздер: сульфатты қалпына келтіретін бактериялар, биоцидтер, биостаттар, ультракүлгін сәулелену.

Дәйексөз келтіру үшін:

Кильянов М.Ю., Игревский Л.В., Хафизов С.Ф., Вербицкий В.С., Ламбин Д.Н. Қабат қысымын ұстап тұру жүйесінде теңіз суын пайдалану кезінде бактерицидтер мен биостаттарды қолдану тиімділігін арттыру // *Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы*. 2023. 5 том, №3, 59–70 б.

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108636>.

Введение

Среди специалистов нефтегазовой промышленности распространено мнение, что главной угрозой коррозии оборудования является не её ускорение при воздействии на него сероводородных соединений, а насыщение металла водородом, что приводит к ухудшению его прочности и возникновению коррозионной трещинной деградации. Исследования показали, что этот процесс протекает особенно быстро в присутствии влаги и происходит в результате выделения водорода, так называемой водородной деполаризации, при электрохимической коррозии. Для этого требуется наличие

подходящих потенциалов железа и водорода. Кроме сероводорода, другие серосодержащие соединения, такие как SO₂, Na₂S и коллоидная сера, также способствуют насыщению металла водородом [1].

В настоящее время выделены пять основных групп коррозионно-опасных бактерий, развивающихся на объектах нефтепромыслов (табл. 1).

Результаты многих исследований свидетельствуют о том, что представители рода Thiobacillus (тионовые бактерии) являются основными участниками в окислении большого количества соединений серы до сульфатов. Эти тионовые (сероокисляющие) бактерии [1]

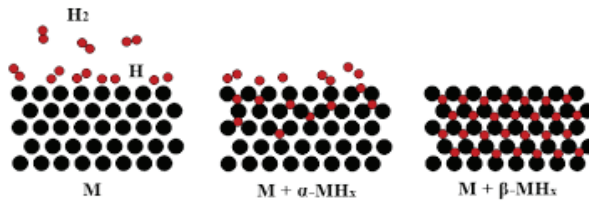


Рисунок 1. Насыщение металла водородом
Figure 1. Hydrogen saturation of the metal

Таблица 1. Виды углеводородных бактерий
Table 1. Types of hydrocarbon bacteria

Виды бактерий Type of bacteria	Описание / Description
Железобактерии Iron bacteria	Аэробные автотрофные организмы, не требующие для своего развития органических веществ, поглощающие железо в ионном состоянии и выделяющие его в виде нерастворимых соединений. Возникающая электрохимическая гетерогенность поверхности усиливает коррозию. Aerobic autotrophic organisms that do not require organic matter for their development, absorb iron in the ionic state and excrete it in the form of insoluble compounds. The resulting electrochemical heterogeneity of the surface enhances corrosion. <i>Pod: Galionella, Leptothrix, Crenotrix Genus: Galionella, Leptothrix, Crenotrix</i>
Денитрифицирующие бактерии Denitrifying bacteria	Аэробные гетеротрофные бактерии, восстанавливающие нитраты до свободного азота, источником энергии для них являются органические соединения нефти. Aerobic heterotrophic bacteria that reduce nitrate to free nitrogen, their energy source is organic compounds from petroleum. <i>Pod: Pseudomonas denitrificans, Pseudomonas fluorescens, Bacillus Genus: Pseudomonas denitrificans, Pseudomonas fluorescens, Bacillus</i>
Углеводород окисляющие бактерии Hydrocarbon oxidizing bacteria	Аэробные гетеротрофные бактерии, окисляющие углеводороды нефти и сопутствующего газа с образованием промежуточных продуктов неполного окисления типа спиртов, альдегидов, диоксида углерода и кислот Heterotrophic Aerobic Bacteria that oxidize petroleum hydrocarbons and associated gas to form incomplete oxidation intermediates such as alcohols, aldehydes, carbon dioxide and acids. <i>Pod: Pseudomonas Genus: Pseudomonas</i>
Тионовые (сероокисляющие) бактерии Thionic (sulfur-oxidizing) bacteria	Аэробные или анаэробные (в зависимости от рода) автотрофные микроорганизмы, осуществляющие окисление сероводорода, сульфида кальция, серы, тиосульфатов, тетрагидратов, гидросульфидов и некоторых других соединений серы до состояния сульфатов и серной кислоты Aerobic or anaerobic (depending on the genus) autotrophic microorganisms that oxidize hydrogen sulfide, calcium sulfide, sulfur, thiosulfates, tetrathionates, hydrosulfides and some other sulfur compounds to the state of sulfates and sulfuric acid <i>Pod: Thiobacillus thioiparus, T. thiooxidans, T. Ferrooxidans Genus: Thiobacillus thioiparus, T. thiooxidans, T. Ferrooxidans</i>
Сульфатвосстанавливающие бактерии Sulfate-reducing bacteria	Анаэробные автотрофные бактерии, восстанавливающие многие соединения серы, в т.ч. сульфаты, до сульфидов. У некоторых сульфатвосстанавливающих бактерий обнаружена способность окислять молекулярный водород. Anaerobic autotrophic bacteria that reduce many sulfur compounds, including sulfates, to sulfides. Some sulfate-reducing bacteria have been found to have the ability to oxidize molecular hydrogen. <i>Pod: Desulfomonas, Desulforomonas, Desulfovibrio Desulfotomaculum Genus: Desulfomonas, Desulforomonas, Desulfovibrio Desulfotomaculum</i>

выполняют важную роль в природном превращении серы. Благодаря упомянутой окислительной активности, сероокисляющие бактерии в состоянии конкурировать с процессами окисления различных серосодержащих соединений.

В то же время сульфатвосстанавливающие бактерии (далее – СВБ) являются исключительно анаэробами и могут размножаться при определенной температуре 25–44°C и pH 5,5–9,0 (оптимально 7,2). Они остаются жизнеспособными при температурах до 800°C и концентрации сероводорода до 2000 мг/л. Несмотря на то, что СВБ – анаэробы, относящиеся к облигатным и не переносящие кислорода, они не погибают от него. Этим объясняется их широкое распространение в природе.

В результате жизнедеятельности тиобактерий образуется серная кислота, приводящая к коррозии металла нефтепромыслового оборудования. Однако этим негативное влияние данных бактерий на металлы не ограничивается. Бактерии *T. ferrooxidans* окисляют так называемый железный купорос ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) до сульфата трехвалентного железа ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), являющегося агрессивным окислителем металла нефтепромыслового оборудования. При контакте с железом или сталью сульфат железа (III) восстанавливается до железного купороса, который, в свою очередь, вновь окисляется тиобактериями до сульфата железа (III). При благоприятных для жизнедеятельности бактерий условиях этот цикл может повторяться многократно, приводя к постоянному разрушению металла нефтепромыслового оборудования.

По микробиологическим проблемам нефтяные месторождения можно разделить на три группы [4]:

1. Месторождения на начальной стадии разработки, в продукции которых отсутствует сероводород, а мероприятия по интенсификации добычи только начинают применяться.

При разработке месторождений, отнесенных к первой группе, целью борьбы с микробиологическими проблемами является недопущение заражения продуктивных горизонтов. Достигается данная цель решением нескольких задач: правильным выбором источника воды (при этом основным критерием является отсутствие СВБ), обязательной обработкой закачиваемой воды для предупреждения заражения, поскольку в процессе заводнения происходит интенсивный водообмен. При этом дозировка бактерицида выбирается постоянная и минимальная, а сам бактерицид подлежит замене каждые

4–6 мес., чтобы исключить адаптацию к нему бактерий.

2. Месторождения, находящиеся на заключительной стадии разработки и использующие систему поддержания пластового давления (далее – ППД), могут приводить к появлению сероводорода в результате закачки воды.

На таких месторождениях необходимо бороться с бактериальным восстановлением сульфатов в двух направлениях: защита оборудования от коррозии и подавление жизнедеятельности бактерий в условиях пласта. Подача ударных доз бактерицидов в закачиваемую в пласт воду, непосредственно в нагнетательные скважины, позволяет подавить СВБ в пласте. Нефтепромысловое же оборудование следует защищать составами комплексного действия (бактерицид и ингибитор) и вводить их на различных участках системы сбора и подготовки.

3. Месторождения, на которых продукция содержит сероводород с начала разработки, требуют особого внимания. Необходимо проводить мероприятия по защите оборудования от коррозии и обеспечивать безопасность работников. Для этого можно применять обработку продукции биологическими препаратами, а также применять системы контроля и автоматического регулирования параметров эксплуатации.

Для данной группы месторождений рекомендуются антикоррозионные мероприятия с использованием ингибиторов коррозии и бактерицидов.

Основные элементы промышленного обустройства, страдающие от СВБ

В соответствии с работами [5, 6] элементы нефтепромыслового обустройства по степени критичности воздействия коррозии классифицируются следующим образом:

1. Элементы конструкции скважин (в первую очередь буровое оборудование и эксплуатационные колонны). В эту же группу можно отнести поверхностное оборудование: металлические части буровых установок, цементировочное и противовибросовое оборудование, запорно-регулирующая арматура, устьева арматура, автоматизированные системы управления и т.п., глубинно насосное оборудование.

2. Система ППД, как контактирующая преимущественно с водой, наиболее уязвима к СВБ. В полной мере подвержены воздействию коррозии: все водоводы высокого и низкого давления, в т.ч. водозабора, все элементы водоочистных сооружений, промышленные

насосные станции (кустовые и блочные кустовые), разводящие трубопроводы от блоков гребенок и водораспределительных пунктов до нагнетательных скважин.

3. Системы промышленного сбора и транспорта скважинной продукции, включающие всё оборудование (ёмкости и сепараторы, запорно-регулирующую арматуру, измерительные установки и т.п.) и трубопроводы для транспорта скважинной продукции.

4. Оборудование системы промышленной подготовки нефти. Это агрегаты и аппараты (насосы, компрессоры, абсорберы и т.п.), ёмкостное оборудование разных этапов подготовки (газожидкостные сепараторы, трехфазные разделители, отстойники горизонтальные, электродегидраторы и т.п.), теплообменное оборудование (печи трубчатые блочные, путевые подогреватели, аппараты типа «Хиттер-Триттер» и т.д.), оборудование по подготовке газа.

5. Оборудование для хранения товарной и промышленной нефти, светлых и темных нефтепродуктов, например, резервуары вертикальные стальные, резервуары горизонтальные. Причем ёмкости, контактирующие с водой (в любом её состоянии), сильнее подвержены коррозии.

Как показывает практика по микробиологической зараженности наземного оборудования, а также воды и нефти в промышленных условиях [2, 3], наиболее сильно заражены СВБ сточные и подтоварные воды для нужд систем ППД, поступающие из резервуаров очистных сооружений цеха по подготовке и перекачки нефти.

Существуют два варианта классификации методов противодействия бактериальной коррозии [7, 8].

1-й вариант классификации:

1) использование специальных составов ингибиторов-бактерицидов;

2) продувка кислородом среды, заражённой бактериями;

3) использование устойчивых к воздействию СВБ защитных покрытий;

4) регулирование параметров пластовой воды – pH фактора;

5) катодная защита устойчивых к воздействию СВБ поверхностей;

6) удаление из среды веществ, питательных для СВБ.

2-й вариант классификации:

1) воздействие на поверхность металла:

а. физическое удаление загрязнений,

б. придание поверхности гидрофобных свойств,

с. полное удаление воды из среды или облучение,

д. использование коррозионностойких сплавов и покрытий,

е. изменение адгезионных свойств,

ф. применение смазочных материалов и ингибиторов коррозии,

г. применение специальных покрытий поверхности оборудования с добавлением биоцидов;

2) воздействие на среду обитания бактерий, термобарические условия:

а. поддержание температуры близкой к стандартной и влажности менее 80%,

б. недопущение проникновения бактерий путем герметизации и/или очистки, осушки,

с. применение катодной защиты с целью угнетения процессов жизнедеятельности бактерий,

д. подавление жизнедеятельности биоцидами

3) воздействие непосредственно на бактерии:

а. применение радиации,

б. применение антибиоза,

с. применение паразитических микроорганизмов,

д. применение бактерицидов.

Химические методы уничтожения микроорганизмов включают обработку среды веществами, которые вызывают гибель микробов. В нефтепромысловых областях используются бактерициды и биостаты. Бактерициды уничтожают микроорганизмы, а биостаты тормозят их рост, не убивая их.

Биостаты ограничивают развитие микроорганизмов, тогда как бактерициды их уничтожают. Использование биостатов вместе с бактерицидами даёт более эффективный результат, по сравнению с применением одного из них. Некоторые органические бактерициды могут также действовать как биостаты, однако не все биостаты могут уничтожать бактерии.

Для борьбы с бактериальным восстановлением сульфатов широко используется метод закачки высокоминерализованных вод хлоркальциевого типа в пласт. Периодическая закачка высокоминерализованных сточных вод необходима не реже, чем раз в 9–11 мес., в течение не менее 3 дней.

Действие окисляющих бактерицидов активно против всех видов СВБ, в то время как некоторые из них могут оставаться устойчивыми к органическим бактерицидам, которые не обладают окислительными свойствами. В основном это касается хлорорганических соединений, которые, несмотря на свою высокую эффективность, могут привести к некоторым осложнениям при использовании.

Неокисляющие органические бактерициды работают путём влияния на проницаемость клеточных стенок и нарушения их биологических процессов.

В нефтепромысловой практике из неокислительных органических бактерицидов чаще всего применяют пентандиаль и гидроксиметил фосфония с небольшим количеством формальдегида и акролеина. Результаты исследований показывают, что эффект от использования бактерицидов значительно выше, чем любое возможное отрицательное коррозионное воздействие.

Биостаты являются эффективными веществами, препятствующими росту микроорганизмов, но не уничтожающими их. Влияние биостатического агента приводит к торможению репродуктивной способности микроорганизмов. Когда препарат перестаёт действовать, микроорганизмы возобновляют свою жизнедеятельность и размножение.

В нефтегазовой промышленности биостатические вещества широко используются для поддержания низких уровней СВБ и ингибирования метаболической активности, предотвращая образование сероводорода. Для достижения желаемого эффекта концентрация биостатиков в водных растворах гораздо ниже, чем для органических бактерицидов.

В отличие от органических бактерицидов, которые часто применяются в виде ударных доз, реагенты-биостатики дозируются периодически или непрерывно. Они почти нечувствительны к качеству обеззараживаемой воды.

Эффективный уровень концентрации биостатиков, необходимый для уничтожения бактерий, достигается при дозировании в воде. Это даёт возможность обеззараживать и все элементы водного транспорта, включая резервуары, водопроводы и призабойную зону пласта нагнетательных скважин, которые являются источниками распространения микрофлоры. Прерывистые обработки необходимы только для восстановления биопленки с адгезированными бактериями, и частота обработок зависит от активности бактерий и их среды обитания. Обычно обработки проводятся 1–3 раза в квартал.

Существует три подхода при проведении бактерицидных обработок [9, 10]:

1. Для подавления бактерий в оборудовании промыслового обустройства и пласте при забоях нагнетательных скважин проводить периодическую ударную обработку бактерицидами ёмкостей сбора и подготовки товарной воды. В первый год внедрения технологии обработка проводится не менее 6 раз, во второй год – 4 обработки, и две обработки осуществляются на третий год.

2. Для подавления жизнедеятельности в прискважинной зоне пласта нагнетательных скважин бактерицид периодически добавляется на вход насосов кустовой насосной станции в течение 2 сут. В первый год применения технологии ударные обработки выполняются не менее 6 раз, на следующий год количество обработок снижается до 4, в третий год проводятся 2 обработки.

3. Постоянная обработка закачиваемой воды бактерицидом с периодическим увеличением дозировки до ударной. Увеличение дозировки бактерицидов до ударных производится для обработки ёмкостной системы подготовки товарной воды, системы водоводов и прискважинной зоны пласта в нагнетательных скважинах. Периодичность в первый год составляет не менее 4 раз по 2 сут и 4 раза в течение следующих двух лет с равной периодичностью.

По результатам внедрения технологий защиты от коррозии и биокоррозии можно констатировать следующее:

1. При использовании биоцидов в сточной воде наблюдается значительное снижение количества СВБ, обусловленное уменьшением планктонных форм бактерий, но этот эффект сохраняется лишь несколько суток, поскольку отложения твёрдых примесей и биоплёнка на внутренней поверхности ёмкостей и водоводов вновь способствуют росту адгезированных форм СВБ. После обработки, через 1–2 недели количество СВБ в сточной воде может быть ниже фоновых значений на 2–3 порядка. Тем не менее отмечено, что спустя месяц количество планктонных СВБ в пробах воды фактически восстанавливается до исходного уровня.

2. На рис. 2 показаны средние значения количества СВБ различных форм в процессе обработки биоцидами. Из рисунка видно, что количество осевших на поверхности СВБ снижается на один – два порядка. Эффект от обработки длится 1,5–2 мес., после чего количество СВБ восстанавливается.

3. Анализ адгезированных на поверхности форм СВБ, ответственных за локальную коррозию систем сбора скважинной продукции и водоводов на нефтепромыслах России [11], является важнейшим критерием оценки эффективности технологий обработок биоцидами.

Угнетение микроорганизмов возможно различными **физическими методами**, к которым можно отнести ультрафиолетовые (далее – УФ) и рентгеновские лучи, ультразвуковое излучение, γ -, β - и α -излучения, высокочастотные токи. Указанные методы не загрязняют биосферу.

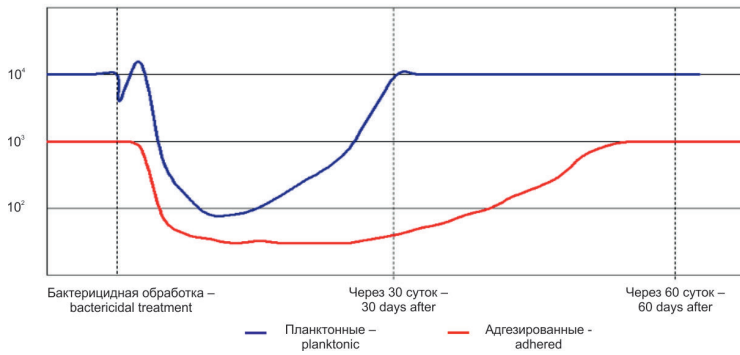


Рисунок 2. Средние значения количества СРБ различных форм в процессе обработки биоцидами
Figure 2. Average values of the number of SRB (sulfate-reducing bacteria) of different forms in the process of biocide treatment

Фотохимические реакции в структуре ДНК и РНК молекул, вызванные воздействием УФ-лучей и оказывающие бактерицидное действие, необратимо повреждают их. Также к фатальному для микроорганизмов результату приводят необратимые нарушения в их клеточных стенках и структуре мембран [12].

Вакуумный УФ в области длин волн 100...200 нм [13] может разрушать органику (остаточную нефть) и вызывать образование

озона из молекул кислорода, растворённого в воде. Он также воздействует на молекулы органических соединений, что позволяет проводить глубокую фотохимическую очистку воды от нефтепродуктов, пестицидов, токсических и мутагенных циклических органических соединений.

УФ-излучение в области длин волн 205...315 нм используется для обеззараживания воды от микроорганизмов (максимальный эффект достигается при 260 нм). Необратимые повреждения ДНК и РНК микроорганизмов происходят под воздействием УФ-излучения в результате фотохимических реакций в их структуре. Кроме того, нарушения структуры мембран и клеточных стенок микроорганизмов также вызывают их гибель.

Преимущества применения УФ-излучения:

- эффективность и универсальность воздействия на различные микроорганизмы в воде;
- безопасность для жизни и здоровья человека и экологичность;
- относительно низкая цена;
- невысокие эксплуатационные расходы;
- низкие капитальные затраты;
- простота обслуживания установок.

Температура и рН воды не имеют влияния на фотохимические процессы, а их зависимость от химического состава незначительна. Чтобы повысить эффективность, можно сочетать их с другими методами обеззараживания и физическими воздействиями. Например, одновременное использование кавитации или ультразвука и ультрафиолета, а также небольших доз озона после обработки снижает необходимую дозу облучения и гарантирует полную очистку воды даже при наличии взвесей. Введение небольших доз активного хлора создаёт эффект последствия, который предотвращает повторное загрязнение воды.

Таблица 2. Степень обеззараживания
Table 2. Level of disinfection

Микроорганизм Microorganism	Степень обеззараживания при дозе УФ-облучения, мДж/см ² Level of disinfection at UV dose, mJ/cm ²		
	16	40	80
Бактерии / Bacteria			
Aeromonas hydrophila	>6	>6	>6
Campylobacter jejuni	>6	>6	>6
Clostridium tetani	1,8	4,4	>6
Escherichia coli	6	>6	>6
Enterococcus	1,6	4	8
Fecal Coliform	>6	>6	>6
Fecal Streptococcus	1,6	4	8
Pseudomonas aeruginosa	>6	>6	>6
Salmonella paratyphi	5	>6	>6
Salmonella typhi	>6	>6	>6
Shigella dysenteriae	>6	>6	>6
Shigella flexneri	>6	>6	>6
Vibrio cholerae	>6	>6	>6
Вирусы / Viruses			
Hepatitis A	2,9	>4	>4
Coliphage	4,4	>4	>4
Coliphage MS-2	0,7	1,7	3,5
Coxsackie	2,7	>4	>4
Poliovirus	2,1	>4	>4
Rotavirus	1,8	>4	>4
Простейшие / Protozoa			
Giardia lamblia	0,19	0,49	1,5
Cryptosporidium parvum		4 (0,1*)	

*различные методы анализа / various methods of analysis

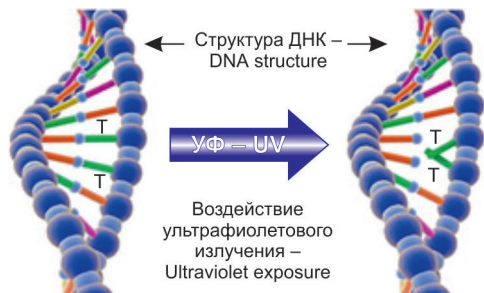


Рисунок 3. Воздействие УФ-излучения на ДНК бактерии
Figure 3. UV radiation effect on bacterium DNA

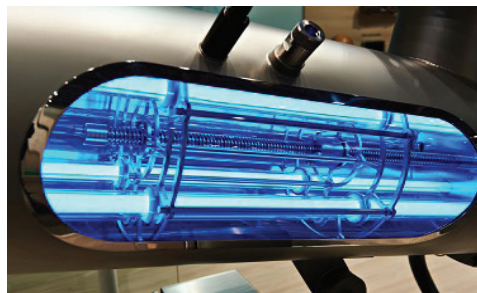


Рисунок 4. Установка бактерицидная ультрафиолетовая с ультразвуком ЛАЗУРЬ М-500КА [14]
Figure 4. Installation of bactericidal ultraviolet ultrasound LASUR M-500KA [14]

Этот же эффект достигается при использовании серебра, меди или йода для обеззараживания воды.

На рис. 4 показана установка бактерицидная ультрафиолетовая с ультразвуком ЛАЗУРЬ М-500КА [14].

Бактерицидная лампа УФ-спектра разрушает органику (остаточную нефть), убивает СВБ, защищена кварцевой трубкой.

Дополнительное ультразвуковое излучение:

- создает кавитацию в воде, которая разрушает оболочки вредных бактерий и вирусов;
- ведёт к образованию активных радикалов, что улучшает эффективность обработки воды ультрафиолетом и приводит к интенсивному окислению органических примесей;
- препятствует биообрастанию и соляризации как защитной кварцевой трубки, так и внутренней поверхности корпуса реактора.

Перед подачей воды в установку требуется её дополнительная подготовка. Обработка ультрафиолетом убивает бактерии, но не имеет отложенного действия: если далее вода попадает в зараженные ёмкости, требуется применение бактерицида. Со временем концентрация применяемого бактерицида может быть понижена до нуля.

Авторами изучены материалы по влиянию закачки морской воды на ряде месторождений, в том числе Узень (Казахстан), Белый Тигр (Вьетнам). Разработка месторождения Узень осуществляется с ППД путём закачки воды в пласт через блочные кустовые насосные станции. В качестве рабочего агента при закачке используется подтоварная и морская вода.

Закачка морской воды началась в 1967 г. и быстро привела к заражению пластовых вод СВБ и продуктами их жизнедеятельности (сероводород, сульфид железа), которое приводит к осложнениям при эксплуатации инфраструктуры месторождения, процессам

коррозии нефтепромыслового оборудования, образованию стойких трудноразрушаемых эмульсий и многим другим проблемам. Особенно интенсивно СВБ развиваются в прискважинной зоне пласта вокруг нагнетательных скважин, где складываются наиболее благоприятные условия для формирования жизнедеятельности СВБ. Таким образом, чем более эффективно работает система ППД, тем более интенсивно происходит заражение.

На месторождении Белый Тигр на шельфе Вьетнама закачка морской воды начата в 1987 г. Следует отметить, что при разработке месторождения был учтен опыт закачки морской воды на месторождении Узень.

Поэтому началу закачки предшествовала тщательная подготовка, в т.ч. были проведены лабораторные анализы морской воды в районе месторождения. В результате проведенных исследований было установлено, что морская вода в зоне отбора практически не содержит взвешенных частиц и нефтепродуктов и может быть использована без дополнительной очистки. Первоначальный опыт использования морской воды для закачки в пласт на месторождении Белый Тигр показал, что наибольшей технологичностью и эффективностью обладают установки электроцентробежных насосов (далее – УЭЦН) в обычном, некоррозионностойком исполнении. В то же время необходимость борьбы с СВБ была очевидна, и для неё было принято решение применять ингибиторы и бактерициды.

Тем не менее после начала закачки заражение происходило достаточно интен-

сивно. Кроме того, выяснилось, что применённые виды УЭЦН в обычном исполнении не обеспечивали расчётной продолжительности работы (наработки на отказ) и параметров закачки. Таким образом, несмотря на все подготовительные меры, обеспечить необходимые показатели работы оборудования не удалось [14].

Средством борьбы с заражением СВБ традиционно считалась закачка в пласт различных бактерицидов, действующих на различные классы бактерий. Как показывают приведённые выше примеры, использование бактерицидов, воздействующих на определённые виды бактерий, не вполне эффективно. По мнению авторов, эффективным будет применение жёсткого УФ-облучения воды, действующего на все виды бактерий. Метод недорогой как по капитальным вложениям, так и по операционным затратам (электричество, замена ламп раз в год, периодическая промывка и замена фильтров, обслуживание системы подготовки воды).

Предлагается реализация в несколько основных этапов:

1. Первый этап. Подготовка воды из водозабора и её дезинфекция с помощью УФ-облучения. Бактерицид вводится перед закачкой в пласт (для дезинфекции уже заражённого пласта). Подтоварная вода также подготавливается и дезинфицируется ультрафиолетом, чтобы снизить затраты на бактерициды, но в систему сбора вводится бактерицид (для дезинфекции заражённых участков). Вводится регулярный мониторинг СВБ в системе сбора.

2. Второй этап. По мере очистки водоочистного оборудования от СВБ будет снижаться требуемое количество вводимого комплекса «бактерицид + биостат» (в перспективе до нуля). Оборудование для УФ-обработки добываемой из скважин воды остаётся.

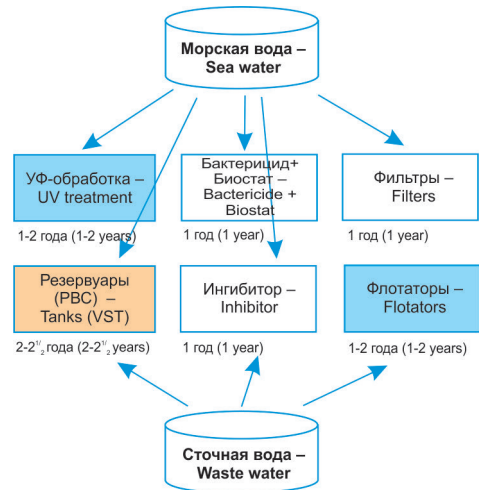


Рисунок 5. Сравнение затрат на подготовку воды для системы ППД

Figure 5. Comparison of water treatment costs for the RPM (reservoir pressure maintenance) system

PBC / VST – резервуар вертикальный стальной / vertical steel tank

Цифрами показаны сроки реализации.

Figures denote the timeframe for implementation

3. Третий этап. Когда фиксируется снижение заражения добываемой из скважин воды, начинается снижение объёмов закачиваемого в пласт бактерицида и биостата (в перспективе до нуля).

4. Четвертый этап. Остаются УФ-станции на водозаборе, т.к. СВБ изначально содержатся в морской воде. Оборудование для УФ-обработки подтоварной воды отключается. Бактерицид более не требуется, но остаётся регулярный мониторинг СВБ в системе сбора.

На рис. 5 показано сравнение затрат на подготовку воды для системы ППД. Оценочные затраты на подготовку воды для ППД показаны на рис. 6.



Рисунок 6. Оценочные затраты на подготовку воды для ППД, долл. США/1000 м³

Figure 6. Estimated costs of water treatment for RPM, US dollar/1000 m³

УФО / UVI – ультрафиолетовое облучение / ultraviolet irradiation.;

УДО / DEU – установка демульсионного отстоя / de-emulsification unit

Выводы

Механизм воздействия сероводорода на сталь применяемого нефтепромыслового оборудования заключается в насыщении металла водородом, что приводит к ухудшению его прочности и возникновению коррозионной трещинной деградации.

Основными представителями СВБ являются представители рода *Thiobacillus* (тионовые бактерии). Они окисляют большое количество соединений серы до сульфатов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Кильянов М.Ю. – концепция работы, сбор, анализ, интерпретация данных, написание и редактирование рукописи, Игrevский Л.В. – интерпретация данных, Хафизов С.Ф. – концепция работы, интерпретация данных, контроль за выполнением работы, Вербицкий В.С. – концепция работы, сбор и интерпретация данных,

Наиболее сильно заражены СВБ сточные и подтоварные воды для нужд систем ППД, поступающие из резервуаров очистных сооружений цеха по подготовке и перекачки нефти.

Наиболее эффективным и экономически оправданным способом борьбы с СВБ является комплексное воздействие бактерицидами и жестким УФ-излучением. Со временем долю бактерицида можно будет сокращать.

Ламбин Д.Н. – написание и редактирование рукописи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The greatest contribution is distributed as follows: Mikhail Yu. Kilyanov – conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and editing of the manuscript; Leonid V. Igrevsky – interpretation of data for the work; Sergey F. Khafizov – conception of the work, interpretation of data for the work, supervising of the work; Vladimir S. Verbitsky – conception of the work, interpretation of data for the work; Dmitry N. Lambin – drafting and editing of the manuscript .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чеботарев Е.Н.* Биохимия сульфатовосстанавливающих бактерий // Итоги науки и техники. Сер. Микробиология. 1978. Т. 7. С. 5–64.
2. *Хисамутдинов Н.И., Телина А.Г., и др.* Обследование зараженности закачиваемых и добываемых вод микроорганизмами-агентами биокоррозии и биообразований для разработки технологии повышения нефтеотдачи применением биоцидов. Отчет малого предприятия «Нефтегазтехнология», 1991–1992.
3. *Кузнецов С.И.* Роль микроорганизмов в круговороте веществ в озерах. Москва: Академия наук СССР, 1952. С. 300.
4. *Андреева Д.Д., Фахрутдинов Р.З.* Коррозионно-опасная микрофлора нефтяных месторождений // Проблемы нефтедобычи, нефтехимии, нефтепереработки и применения нефтепродуктов. № 10, 2013. С. 137–142.
5. *Абдуллин И.Г., Давыдов С.Н., Худяков М.А., Кузнецов М.В.* Коррозия нефтегазового и нефтепромыслового оборудования. Уфа: Издательство Уфимского нефтяного института, 1990. С. 72.
6. *Гутман Э.М., Низамов К.Р., Гетманский М.Д., и др.* Защита нефтепромыслового оборудования от коррозии. Москва: Недра, 1983. С. 152.
7. *Багдасарова Ю.А., Багдасаров Р.С.* Физико-химические основы коррозии. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2004. С. 98.
8. *Перельгин Ю.П., Лось И.С., Киреев С.Ю.* Коррозия и защита металлов от коррозии. Пенза: Издательство ПГУ, 2015. С. 88.
9. *Овинников Н.В., Битнер А.К., Пиляев П.В., и др.* Отчет о научно-исследовательской работе «Исследования проб добываемого флюида, сырой нефти и попутного нефтяного газа Юрубчено-

Тохомского месторождения, Док.ВС-367-09. Отчет о НИР.»; Красноярск, ООО РН-КрасноярскНИПИнефть, 2009г. С. 203.

10. Силин М.А., Рыжков В.И., Белоусов А.В., Ампилов Ю.П., и др. Публичный аналитический доклад по направлению научно-технического развития «Новые технологии добычи и использования углеводородного сырья», Москва, НП «Национальный институт нефти и газа», 2014.С. 452.

11. Кварцевые лампы для дезинфекции помещений. <https://koffkindom.ru/kvarcevye-lampy-dlya-dezinfekcii-pomeshhenij.htm>

12. svarog-uv.ru. [интернет]. Бактерицидная установка обеззараживания питьевой воды и сточных вод ультрафиолетом (УФ) с применением ультразвука «Лазурь М-500КА» [дата обращения 21.02.2023]. Доступ по ссылке: https://www.svarog-uv.ru/l_500ka.htm?ysclid=le5cc253pq382867912.

13. Велиев М.М., Бондаренко В.А., Иванов А.Н., и др. Из истории экспериментальной закачки морской воды для поддержания пластового давления на месторождении Белый Тигр на шельфе Социалистической Республики Вьетнам // Нефтяное хозяйство. 2020. № 1156. С. 36–41. doi: 10.24887/0028-2448-2020-2-36-40.

REFERENCES

1. Chebotaryov YN. Biochemistry of sulfate reducing bacteria. Itogi nauki i tekhniki. *Mikrobiologiya*. 1978;7:5–64. (In Russ).

2. Khissamutdinov NI, Telin AG, et al. Survey of contamination of injected and produced waters with microorganisms-agents of biocorrosion and bioformations for the development of technology for enhanced oil recovery using biocides. Report of the small enterprise "Neftegaztehnologiya", 1991–1992. (In Russ).

3. Kuznetsov SI. *The role of microorganisms in the cycle of substances in lakes*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1952. P. 300. (In Russ).

4. Andreyeva DD, Fakhrutdinov RZ. Corrosion-dangerous microflora of oil fields // *Problems of oil production, petrochemistry, oil refining and the use of petroleum products*. 2013;10:137–142. (In Russ).

5. Abdullin IG, Daydov SN, Khudyakov MA, Kuznetsov MV. *Corrosion of oil and gas and oilfield equipment*. Ufa : Publishing house of the Ufa Oil Institute; 1990. P. 72. (In Russ).

6. Gutman EM, Nizamov KR, Getmansky MD, et al. *Protection of oilfield equipment against corrosion*. Moscow: Nedra; 1983. P. 152. (In Russ).

7. Bagdassarova YA, Bagdassarov RS. *Physical and chemical bases of corrosion*. Samara: Samara Polytech Flagship University; 2004. P. 98. (In Russ).

8. Perelygin YP, Los IS, Kireyev SY. *Corrosion and protection of metals from corrosion*. Penza : Publishing House of Penza State University ПГУ, 2015. С. 88. (In Russ).

9. Ovchinnikov NV, Bitner AK, Pilayev PV, et al. Research report «Studies of samples of extracted fluid, crude oil and associated petroleum gas from the Yurubcheno-Tokhomskoye field. Research report»; Krasnoayrsk, LLC RN-KrasnoayrskNIPIneft, 2009. P. 203.

10. Silin M, Ryzhkov VI, Belousov AV, Ampilov YP, et al. *Public analytical report on the direction of scientific and technical development "New technologies for the production and use of hydrocarbon raw materials"*, Moscow, Non-profit partnership "National Institute of Oil and Gas"; 2014. P. 452.

11. svarog-uv.ru. [internet]. Bactericidnaya ustanovka obezzarazhivaniya pit'yevoy vody i stochnykh vod ul'trafiioletom (UF) s primeneniym ul'trazvuka "Lazur" M-500KA" [cited 2023 Feb 21]. Available from: https://www.svarog-uv.ru/l_500ka.htm?ysclid=le5cc253pq382867912. (In Russ).

12. Veliev MM, Bondarenko VA, Ivanov AN, et al. Excerpts on the history of sea water pilot injection for reservoir pressure maintenance at White Tiger field of Vietnam offshore. *Oil Industry*. 2020;1156:36–41. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-2-36-40. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кильянов Михаил Юрьевич

e-mail: m.kilyanov@mail.ru.

Игrevский Леонид Витальевич

e-mail: igrevsky.l@gubkin.ru.

***Хафизов Сергей Фаизович**

e-mail: khafizov@gubkin.ru.

Вербицкий Владимир Сергеевич

e-mail: verbitsky_vs@gubkin.ru.

Ламбин Дмитрий Николаевич

e-mail: lambind@gmail.com.

AUTHORS' INFO

Mikhail Yu. Kilyanov

e-mail: m.kilyanov@mail.ru.

Leonid V. Igrvsky

e-mail: igrevsky.l@gubkin.ru.

***Sergey F. Khafizov**

e-mail: khafizov@gubkin.ru.

Vladimir S. Verbitsky

e-mail: verbitsky_vs@gubkin.ru.

Dmitry N. Lambin

e-mail: lambind@gmail.com.

*Автор, ответственный за переписку/Corresponding Author