

# Микробиологическая зараженность нефтяных месторождений. Часть 1: Основные действующие вещества реагентов-биоцидов

Валекжанин И.В.

ООО «РН-БашНИПнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия  
valekzhaniniv@bnipi.rosneft.ru

## Аннотация

Вода, используемая в различных технологических процессах при разработке нефтегазовых месторождений, может содержать микроорганизмы, которые при попадании в пласт, добывающие скважины и наземное оборудование могут вызывать самые разные проблемы (в частности, повышенную коррозию оборудования). Основным способом минимизации негативных рисков микробиологической зараженности объектов является применение специальных химических реагентов — биоцидов (или бактерицидов). В качестве основного действующего вещества биоцидов используются разные классы химических веществ, и, следовательно, меняется механизм их действия, эффективность и область возможного применения.

## Материалы и методы

Рассмотрены основные группы микроорганизмов, встречающихся в нефтегазовой промышленности, их пагубное воздействие на объекты нефтегазовой отрасли. Химическая обработка рассматривается как основная стратегия минимизации рисков, вызванных деятельностью микроорганизмов. Проанализированы широко используемые

биоциды в нефтегазовой промышленности с точки зрения принципа их действия, преимуществ и недостатков.

## Ключевые слова

бактерии, микробиологическая зараженность, бактерицид, биоцид, нефтяное месторождение

## Для цитирования

Валекжанин И.В. Микробиологическая зараженность нефтяных месторождений. Часть 1: Основные действующие вещества реагентов-биоцидов // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 5. С. 58–67. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-5-58-67

Поступила в редакцию: 04.04.2024

OIL PRODUCTION

UDC 622.276 | Original Paper

## Microbiological contamination of oil fields. Part 1: Main active ingredients of biocidal reagents

Valekzhanin I.V.

“RN-BashNIPneft” LLC (“Rosneft” PJSC Group Company), Ufa, Russia  
valekzhaniniv@bnipi.rosneft.ru

## Abstract

Water used in various technological processes during the development of oil and gas fields may contain microorganisms that, when released into the reservoir, production wells and surface equipment, can cause a variety of problems (in particular, increased corrosion of equipment). The main way to minimize the negative risks of microbiological contamination is the use of special chemical reagents – biocides (or bactericides). Different classes of chemical substances are used as the main active ingredient of biocidal reagents and, consequently, their mechanism of action, effectiveness and scope of possible application changes.

## Materials and methods

The main groups of microorganisms encountered in the oil and gas industry and their harmful effects on oil and gas industry facilities are considered. Chemical treatment is considered as the main strategy for minimizing the risks caused by the activity of microorganisms. Widely

used biocides in the oil and gas industry are analyzed in terms of their operating principle, advantages and disadvantages.

## Keywords

bacteria, microbiological contamination, bactericide, biocide, oil field

## For citation

Valekzhanin I.V. Microbiological contamination of oil fields. Part 1: Main active ingredients of biocidal reagents // Exposition Oil Gas, 2024, issue 5, P. 58–67. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2024-5-58-67

Received: 04.04.2024

## Введение

Сырая нефть представляет собой сложную смесь углеводородов и других органических соединений, а ее состав и физические свойства широко варьируются для различных месторождений по всему миру. Микроорганизмы, метаболизирующие углеводороды, широко распространены на каждом этапе добычи, транспортировки и переработки нефти. Микроорганизмы могут быть занесены в нефтяные пласты посредством бурения и гидроразрыва скважин, стимуляции, заводнения пласта и т.д. [1–3]. Присутствие большого количества попутно добываемой воды, ее возможное накопление в отдельных участках выкидных и магистральных трубопроводов и резервуарах для хранения делают контроль биозараженности достаточно сложной задачей в нефтяной промышленности. Надлежащее решение проблемы биозараженности оказывает прямое влияние на целостность трубопроводов и другого оборудования, что имеет большое значение в экономических вопросах, а также в области безопасности и охраны окружающей среды. Чтобы уменьшить негативный эффект роста бактерий, нефтяная промышленность обычно использует различные органические и неорганические химические реагенты (биоциды) для обработки зараженных объектов, а также для контроля и уменьшения негативного эффекта микробиологической коррозии, которая может быть вызвана, в частности, образованием сероводорода [4–5].

Вредное воздействие микроорганизмов в нефтяной промышленности начинается с выпадения и накопления воды, неорганических и органических твердых веществ, а также образования биопленок на поверхности металлического оборудования. Экзополисахариды, выделяемые некоторыми микроорганизмами, способствуют их первоначальному прикреплению к поверхности металла, запуская процесс колонизации и образования биопленок. Этот процесс зависит от характеристик поверхности, включая свободную энергию поверхности металла, шероховатость, гидрофобность и металлургические особенности. Толстый слой желеобразной биопленки вместе с другими неорганическими нерастворимыми химическими веществами (например, продуктами коррозии, осадками минеральных солей) и продуктами метаболизма бактериальной активности (например, органическими и неорганическими кислотами, ферментами, сероводородом) обеспечивает защиту от физических воздействий и биоцидных соединений [6]. Гетерогенные биопленки содержат отдельные клетки, а также микроколонии бактериальных клеток, разделенные интерстициальными каналами, которые обеспечивают диффузию и транспорт питательных источников и продуктов жизнедеятельности [7]. Состав микробного сообщества в биопленке и его метаболическая активность во многом зависят от внеклеточных условий, таких как температура и кислородный градиент, доноры и акцепторы электронов, накопление и удаление метаболитов, pH, минерализация воды и др. [8].

Бактериальное сообщество в биопленках часто демонстрирует совместную метаболическую активность. Благодаря синергетическому взаимодействию разных групп микроорганизмов биопленки по-разному влияют на поверхность металла. Например, аэробы активны на границе раздела верхнего слоя биопленки и окружающей жидкости/воздуха, потребляют кислород, обеспечивают микроокружение для анаэробов глубоко в биопленках

и на поверхности металла. Агрессивные метаболиты (например, сульфиды и кислоты), вырабатываемые бактериями в биопленках, также прямо или косвенно повышают скорость коррозии металлов. По оценкам, проведенным в 2001 г., коррозия обходится нефтегазовой промышленности США примерно в 13,4 миллиарда долларов в год, а на долю микробиологической коррозии приходится до 2 миллиардов долларов в год [9]. Помимо коррозионных повреждений оборудования и сооружений, вызванных бактериальной зараженностью, другие негативные последствия наличия бактерий включают, в частности, потерю приемистости нагнетательных скважин системы ППД, потери добычи нефти из-за закупорки породы пласта и снижения ее фильтрационно-емкостных характеристик, появление сероводорода в продукции скважин, увеличение стоимости переработки нефти и снижение качества конечных продуктов, снижение эффективности работы трубопроводов, теплопередачи теплообменников и биологическое разложение продуктов нефтепереработки [10–12]. Данная статья представляет собой обзор англоязычной литературы и направлена на рассмотрение основных микроорганизмов, встречающихся в нефтегазовой промышленности, их пагубного воздействия на объекты нефтяной промышленности, а также применения различных органических и неорганических реагентов для контроля микробиологической зараженности объектов. Основное внимание в настоящей статье уделяется классификации биоцидов, их достоинствам и недостаткам и основным областям их возможного применения.

## Основные микроорганизмы в нефтегазовой отрасли

Многие микроорганизмы, встречающиеся в нефтегазовой отрасли, могут вызывать коррозию и ряд других негативных последствий. Некоторые распространенные группы этих микроорганизмов включают сульфатовосстанавливающие бактерии (СВБ), сульфатовосстанавливающие археи (СВА), сероокисляющие бактерии (СОБ), метаногены, кислотообразующие бактерии (КОБ), железоокисляющие бактерии (ЖОБ), железовосстанавливающие бактерии, марганцеоокисляющие бактерии, нитратредуцирующие бактерии [13–14]. Каждая из этих физиологических групп микроорганизмов может содержать сотни и тысячи отдельных видов.

Микробиологическая коррозия — это электрохимический и химический процесс, на который влияет присутствие или деятельность микроорганизмов [15–16]. Деятельность отдельных видов бактерий или синергетической группы бактерий изменяет скорость и тип электрохимических и химических реакций на поверхности металла, что приводит к различным типам коррозии, таким как питтинговая, щелевая, коррозия под отложениями, усиленная гальваническая и эрозивная коррозия [17]. Микробиологическая коррозия оказывает существенное влияние на нефтегазовую и другие отрасли промышленности, поскольку она ухудшает целостность, безопасность и надежность работы трубопроводов и объектов переработки нефти, что приводит к высоким затратам на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также к остановке производства [18–19]. Однако само по себе присутствие данных классов организмов, ассоциированных с микробиологической коррозией, не указывает на то, что такой тип коррозии имеет место. Ни один из них

не показывает, что присутствие определенного типа микроорганизмов устанавливает причинно-следственную связь между бактериями и коррозией металла [20]. Эффективная программа управления микробиологической коррозией должна включать регулярный мониторинг бактериальной активности, периодическую оценку рисков и эффективную программу управления, например, периодическую обработку биоцидами.

Микробиологическая коррозия редко связана только с одним механизмом или одним видом микроорганизмов [21–22]. Фактически в естественной среде причиной микробиологической коррозии всегда являются сообщества, содержащие множество различных типов микроорганизмов. Например, в нижних точках трубопроводов, где скопилась вода и твердые отложения, сульфатовосстанавливающие бактерии и археи, кислотообразующие бактерии, метаногены и железоокисляющие бактерии часто сосуществуют в симбиотических отношениях. Железоокисляющие бактерии используют молекулярный кислород в качестве акцептора электронов и создают анаэробную среду, способствуя росту сульфатовосстанавливающих бактерий, архей и метаногенов. Кислотообразующие бактерии способны продуцировать органические кислоты и их соли (например, лактат, пропионат, ацетат, бутират), которые используются различными микроорганизмами, включая СВБ и метаногены. Некоторые виды СВБ производят водород, CO<sub>2</sub> и ацетаты путем ферментации, а метаногены и некоторые другие виды СВБ потребляют эти соединения для собственного роста. Кроме того, многие виды СВБ и метаногены способны потреблять водород, образующийся в результате катодной деполяризации, что деполярирует гальванический элемент, значительно увеличивая скорость коррозии.

Диагностика микробиологической коррозии традиционно достигается путем изучения трех признаков:

1. Уникальной морфологии коррозионных язв, таких как локализованные, круглые и кольцеобразные язвы.
2. Специфические продукты коррозии и отложения, такие как макинавит, грейгит и пирит, образующиеся в результате коррозии, вызванной СВБ.
3. Наличие вызывающих коррозию микроорганизмов или их побочных продуктов. Традиционно наличие микроорганизмов, вызывающих коррозию, определяют с использованием методов культурально-зависимого роста, таких как метод предельного разведения (в англоязычной литературе — метод наиболее вероятного числа). При этом данные методы не могут оценивать размер микробиологических сообществ и могут исказить их состав [23–24]. Некоторые микроорганизмы (например, метаногены) чрезвычайно трудно вырастить в лабораторных условиях. Наконец, многие образцы, полученные в ходе расследования коррозионных повреждений, часто не могут быть проанализированы обычными методами культивирования. Таким образом, традиционные микробиологические методы часто не могут представить важные доказательства, необходимые для точного диагноза микробиологической коррозии, т.е. присутствия вызывающих коррозию микроорганизмов в отказавших образцах металла.

Многие методы молекулярной микробиологии были разработаны, чтобы обойти проблемы, связанные с методами

культивирования. В частности, методы количественной полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР) широко используются для диагностики микробиологической коррозии путем обнаружения и количественного определения различных типов микроорганизмов, вызывающих коррозию, путем воздействия на гены малых субъединиц рибосомальной РНК или функциональные гены, которые присутствуют только в определенных группах бактерий [25–27]. Данный метод показал свою успешность и эффективность в вопросах диагностики микробиологической коррозии в нефтегазодобывающей отрасли.

### Сульфатвосстанавливающие бактерии и археи

Сульфатвосстанавливающие бактерии — группа морфологически и филогенетически разнообразных анаэробов, осуществляющих восстановление сульфата до сульфида. Хотя СВБ часто считают строго анаэробными, некоторые виды СВБ обладают значительной толерантностью к кислороду и могут выживать и быстро восстанавливаться после кратковременного воздействия кислорода [28–30]. При низких концентрациях растворенного кислорода некоторые СВБ способны «дышать»  $Fe^{3+}$  или даже кислородом, при этом водород выступает в качестве донора электронов [31]. СВБ присутствуют в различных средах, включая почву, бытовые, промышленные и горнодобывающие сточные воды, нефтегазодобывающие резервуары для хранения и нефте- и газопроводы [32–33]. Общая проблема, связанная с СВБ, заключается в том, что они могут продуцировать сероводород ( $H_2S$ ), который напрямую воздействует на поверхность металла, что приводит к анаэробной коррозии и образованию питтингов [34]. Однако очевидно, что сероводород вырабатывается не только СВБ,  $H_2S$  также может образовываться сульфатвосстанавливающими археями, метаногенами и ферментативными микроорганизмами в нефтепромысловых системах [35].

СВБ способны использовать в качестве доноров электронов широкий спектр низкомолекулярных органических соединений, в том числе летучие жирные кислоты, спирты (этанол, пропанол, бутанол и др.) и углеводороды [36]. Ацетаты, лактаты, пируваты, бутираты, этанол и водород являются одними из наиболее часто используемых субстратов СВБ [36]. СВБ используют сульфаты и другие соединения серы (сульфиты, тиосульфиты, тритионаты, тетратионаты и элементарная сера) в качестве конечных акцепторов электронов в процессах дыхания [37–38] и способны продуцировать большое количество биогенного  $H_2S$  [39].

Помимо СВБ, сульфатвосстанавливающие археи (СВА) также способны восстанавливать сульфат-ион. СВА являются гипертермофилами. Они растут анаэробно при высоких температурах от 60 до 95 °С, с оптимальным ростом при 83 °С [40]. Их можно найти в гидротермальных источниках, нефтяных месторождениях и горячих источниках. СВА способны окислять множество различных источников органического углерода, включая жирные кислоты, аминокислоты, альдегиды и органические кислоты, используя сульфат-ион в качестве конечного акцептора электронов.

Термин «сульфатвосстанавливающие прокариоты» (СВП) используется для совместного описания СВБ и СВА. СВП, как известно, вносят основной вклад в микробиологическую коррозию в системах добычи нефти и газа,

повреждение пласта, потерю приемистости нагнетательных скважин и другие проблемы, для решения которых требуются значительные экономические затраты [41]. Взвешенные частицы сульфида железа при добыче высокосернистых нефти или газа могут закупоривать стволы скважин или фильтрующее оборудование и стабилизировать эмульсии, что приводит к ухудшению разделения нефти и попутно добываемой воды. Сульфид железа также может связываться с органическими субстратами (например, асфальтенами, парафинами или сырой нефтью) и другими неорганическими твердыми веществами (например, песком, минеральными солями или коррозионными частицами) с образованием черных липких твердых веществ, способных откладываться на оборудовании [42].

Многие исследователи сообщают, что скорость коррозии, вызванная СВБ, в лабораторных условиях намного ниже, чем в полевых [43]. Также считают, что в анаэробной почве максимальная скорость коррозии стали под действием СВБ может достигать до 7 и более мм/год. Существование и активность СВБ при этом приводят к тому, что средняя скорость коррозии стали, подвергшейся воздействию анаэробной почвы, более чем в 20 раз выше, чем в контрольном случае. СВБ влияют на коррозию металла преимущественно за счет двух основных процессов в сульфатсодержащих бескислородных средах [44]. Один из них заключается в том, что СВБ «разъедает» металлическое оборудование косвенно через коррозионно-агрессивный газ  $H_2S$ , вырабатываемый СВБ как продукт сульфатредукции (химическая микробиологическая коррозия). Также некоторые виды СВБ могут «разъедать» металл посредством прямого поглощения электронов из самого металла (электрическая микробиологическая коррозия) [44].

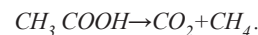
Сероводород также вызывает и другие серьезные проблемы для нефтегазовой отрасли. При этом, образующийся глубоко в пласте, он может приводить к снижению качества добываемой продукции. Биомасса и образование нерастворимых отложений  $FeS$  в результате реакции с ионами металлов (в основном железа) могут привести к закупорке нагнетательных скважин и породы пласта, что повлечет снижение приемистости и дебита скважин. В трубопроводах вместе со шламом нерастворимый  $FeS$  может образовывать отложения (как правило, совместно с минеральными солями) и затруднять течение добываемого флюида по трубопроводу [45].

### Метаногены

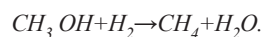
Метаногенные археи, или метаногены, представляют собой разнообразную группу организмов, которые могут жить в разных средах. Их находили даже в самых экстремальных условиях на Земле: они были погребены под километрами льда в Гренландии и жили в горячей и сухой пустынной почве. Они производят метан путем разложения органических соединений в анаэробных условиях. На их рост и активность влияют физические и химические факторы, такие как температура, минерализация и уровень pH среды. Метаногены очень чувствительны к низким концентрациям кислорода, даже в диапазоне нескольких частей на миллион [46]. Они являются важной группой микроорганизмов в продуктивных коллекторах [47].

Процесс образования биогенного метана известен как метаногенез, при котором используется небольшое количество простых

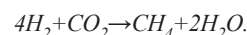
субстратов, включая  $H_2+CO_2$ , ацетаты, формиаты, метилированные соединения (метанол, метиламины, диметилсера), а также первичные и вторичные спирты [48]. Существует три различных пути метаногенеза. Ацетокластический метаногенез, ответственный за две трети биогенного производства метана, расщепляет уксусную кислоту с образованием  $CO_2$  и  $CH_4$ :



Метилотрофный метаногенез может генерировать  $CH_4$  из различных химических соединений, содержащих метильную группу, таких как метанол, этилсульфиды или метиламины:



Третий путь образования метана — гидротрофный метаногенез — встречается у большинства метаногенов. При этом водород служит источником электронов и энергии, тогда как  $CO_2$  (или CO или формиат-ион) — источником углерода и акцептором электронов:



В то время как гидротрофные метаногены могут вызывать коррозию стали за счет прямого окисления элементарного железа, ацетокластические метаногены могут успешно сосуществовать вместе с СВБ [49].

Метаногенез часто ограничивается поступлением продуктов ферментации (водорода или ацетат-иона). СВБ также используют водород или ацетат-ион в качестве источника электронов. Однако по сравнению с СВБ метаногены менее конкурентоспособны за эти субстраты. Это обусловлено тем, что сульфатредукция — более энергетически выгодный процесс, именно поэтому метаногены проигрывают конкуренцию за субстрат в присутствии сульфат-иона. Таким образом, метаногенез в экосистеме с высокой концентрацией сульфатов будет ингибироваться, как, например, в случае с закачкой морской воды для поддержания пластового давления [50]. Как правило, в большинстве сред зона метаногенеза и зона сульфатредукции практически не перекрываются. Однако в отсутствие сульфатов СВБ и метаногены могут сосуществовать с увеличением производства метана. Это объясняется тем, что некоторые СВБ могут ферментировать органические кислоты и их соли, такие как лактат и формиат, с образованием  $H_2$  и ацетат-иона, которые могут быть использованы ацетокластическими и гидротрофными метаногенами [51].

Сообщается, что метаногены также могут быть связаны с коррозией металла. Они способны эффективно поглощать водород с поверхности металлов, усиливать катодное восстановление протона и тем самым ускорять анодное растворение металла (катодная деполяризация) [52].

### Классификация биоцидов

Неконтролируемый рост микроорганизмов в нефтепромысловых системах может привести к дорогостоящим проблемам, таким как коррозионные повреждения оборудования. Это напрямую влияет на безопасную эксплуатацию, экономические показатели и соблюдение экологических требований во всех сферах добычи, транспортировки, переработки и распределения углеводородов. В нефтегазовой промышленности проблемы, вызванные микроорганизмами (бактериями, грибами, дрожжами, водорослями), обычно решаются

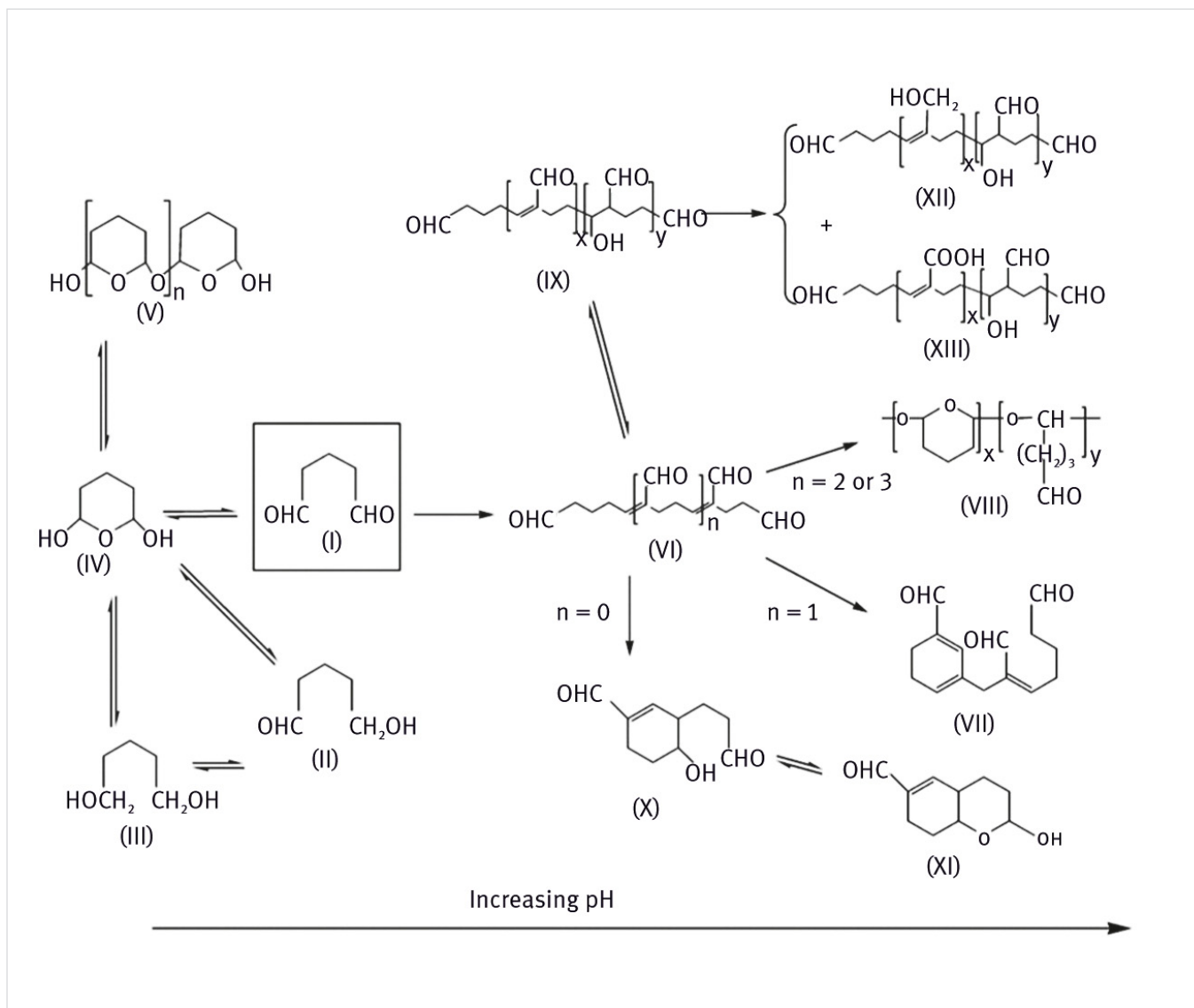


Рис. 1. Возможные формы глутарового альдегида в водном растворе  
 Fig. 1. Possible forms of glutaraldehyde in aqueous solution

химическими (биоциды и биостаты), механическими (скребками или соскабливанием), физическими (УФ, фильтрация, обработка ультразвуком) и электрохимическими (катодная защита) методами. Биоциды используются на всех этапах разработки нефтяных месторождений: от начального бурения и добычи сырья до хранения и транспортировки сырой нефти и продуктов ее переработки.

В общем смысле биоциды — это химические вещества, предназначенные для уничтожения, сдерживания, обезвреживания или оказания контролирующего воздействия на любые вредные организмы. Химическая структура биоцидов определяет способ их действия на микроорганизмы. Однако биоцидный эффект, или биостатический эффект, также сильно зависит от применяемой концентрации и времени контакта с микроорганизмами. На рынке представлено множество биоцидных веществ, но их использование строго регламентируется различными регулирующими органами в разных странах мира. В нефтегазовой промышленности в коммерческих биоцидных продуктах обычно используются лишь некоторые биоцидные активные вещества. Иногда несколько биоцидных активных веществ смешивают в одном реагенте, чтобы повысить его общую эффективность за счет

синергетического действия различных активных компонентов. Кроме того, к биоцидным продуктам можно добавлять и другие химические вещества, например, ПАВы, для лучшего проникновения в биопленку, повышая эффективность биоцидов в уничтожении микроорганизмов.

Биоциды можно разделить на две группы в зависимости от способа действия: неокисляющие или органические биоциды и окисляющие или неорганические биоциды. Они применяются к различным объектам в нефтегазовой отрасли [53]. Неокисляющие или органические биоциды обычно используются в анаэробных системах, таких как системы добычи нефти, нефтепроводы и трубопроводы системы ППД. Однако существуют системы, которые содержат кислород или подвергаются его воздействию, например, установки очистки нагнетательной воды, промывные воды на НПЗ, подпиточная вода при бурении и резервуары для хранения под открытым небом. В этих системах часто используются окислительные или неорганические биоциды.

#### Неокисляющие биоциды

Наиболее часто применяемыми неокисляющими или органическими биоцидами в нефтегазовой промышленности

являются формальдегид, глутаральдегид, тетраakis(гидроксиmетил)фосфония сульфат, четвертичные аммониевые соединения (ЧАС), 2,2-дибром-3-нитрилопропионамид и изотиазолиноны. Эти биоциды обладают антибактериальными свойствами широкого спектра действия, воздействуя на различные молекулы микроорганизмов. Они влияют на клеточный метаболизм, структуру и трансляцию ДНК. Сшивание открытых аминогрупп на белках, окисление клеточных стенок, разрушение метаболических белков и цитоплазматической мембраны являются одними из наиболее распространенных способов действия данного типа биоцидов [54]. На эффективность биоцидов оказывают влияние многие факторы, такие как химический состав воды, температура, наличие сероводорода и кислорода, несовместимость с другими нефтепромысловыми реагентами [55]. По сравнению с окисляющими биоцидами неокисляющие более специфичны, дольше действуют и менее коррозионно агрессивны.

#### Формальдегид и глутаральдегид

Формальдегид и глутаральдегид (глутаровый альдегид) представляют собой альдегидные соединения со схожим механизмом действия в борьбе с микроорганизмами.

Механизм нейтрализации заключается в реакции с первичными и/или вторичными аминами в белках или ДНК, вызывающей перекрестное сшивание белков в клеточной мембране и нарушающей клеточные процессы и клеточный метаболизм [56]. Формальдегид и глутаральдегид термически нестабильны и теряют биоцидную эффективность при температуре выше 50 °С (значение термостабильности также зависит от минерализации и pH воды) [57]. Формальдегид более токсичен, считается «предполагаемым канцерогеном для человека» и запрещен во многих странах, включая США и страны ЕС, из-за экологических проблем, а также рисков для здоровья и безопасности человека. Считается, что глутаральдегид имеет лучший экологический профиль и легко разлагается в широком диапазоне pH [58]. Период полураспада обычно составляет 4–12 часов в зависимости от внешних условий. Аэробное биоразложение глутарового альдегида включает окисление обеих альдегидных групп до глутаровой кислоты. Затем глутаровая кислота распадается до CO<sub>2</sub> в качестве конечного продукта. В анаэробных условиях глутаральдегид превращается в гидроксипентаналь и далее метаболизируется до спирта и пентандиола [59].

Глутаральдегид является одним из наиболее часто используемых биоцидных активных веществ в нефтегазовой промышленности для борьбы с микроорганизмами. Это биоцид широкого спектра действия, неионогенный, не пенящийся, эффективный в большом диапазоне pH (обычно pH 6,5–9,0). Это высокого качества бактерицид, эффективно работающий против СВБ, особенно в отношении сложных и стойких микроорганизмов, благодаря своей хорошей проникающей способности. Однако он имеет ограниченную эффективность против водорослей и грибов [60].

Структура глутаральдегида в водном растворе не ограничивается мономерной формой. Вместо этого он может присутствовать как минимум в 13 различных формах в зависимости от уровня pH, концентрации, температуры и т.д. (рис. 1).

Глутаральдегид быстро автополимеризуется, образуя водорастворимые димеры и тримеры, и выпадает в осадок при высоких температурах (~140 °С) и/или щелочном pH. В биоциде с активной основой в виде глутаральдегида в качестве носителя обычно используются вода или спирты (в основном метанол и изопропанол). Спирты в составе замедляют полимеризацию во время хранения и увеличивают проникновение альдегида в клетку. Полимеризация блокирует активные центры (альдегидные группы) молекул глутарового альдегида, которые отвечают за его биоцидную активность. При гидроразрыве пласта биоцидный мономер глутаральдегида имеет ограниченное время для контроля микробной активности. Добавление соли четвертичного аммония и поверхностно-активных веществ в рецептуру часто улучшает биоцидную эффективность глутаральдегида [61].

Глутаральдегид не реагирует с сильными кислотами и щелочами, нечувствителен к присутствию сульфидов (H<sub>2</sub>S, HS<sup>-</sup>, S<sup>2-</sup>), переносит среду повышенной минерализации. Он совместим с большинством других нефтепромысловых химических реагентов, но на его биоцидную эффективность могут влиять амины, аммиак и поглотители кислорода на основе бисульфита [62]. Бурно реагирует с аммиаком и аминокислотами, что вызывает экзотермическую реакцию полимеризации альдегида и, следовательно,

его дезактивацию. Глутаральдегид менее эффективен при проникновении в биопленку и уничтожении микроорганизмов в биопленках по сравнению с планктонными формами бактерий.

#### **Тетраakis(гидроксиэтил)фосфония сульфат (ТГФС)**

ТГФС представляет собой четвертичное фосфорорганическое соединение с хорошими экологическими характеристиками и широко используется в качестве биоцида в нефтегазовой промышленности для борьбы с микробиологическим заражением [63]. Он успешно разлагается и не накапливается в окружающей среде. Это биоцид широкого спектра действия, эффективный в диапазоне pH от 3 до 11, механизм действия которого заключается в реакции со специфическими аминокислотами на клеточной мембране микроорганизмов. Кроме того, ТГФС может блокировать путь сульфидогенного восстановления, что делает его высокоэффективным в борьбе с СВБ. Помимо биоцидного эффекта, ТГФС также проявляет свойства хелатора железа и поэтому используется в качестве средства для удаления отложений сульфида железа в нефтяной промышленности. По сравнению с глутаральдегидом ТГФС более термически стабилен и выдерживает температуру до 160 °С. Однако, как и глутаровый альдегид, он несовместим с поглотителями кислорода бисульфитом аммония и имеет ограниченную способность проникновения в биопленку. В присутствии ионов аммония ТГФС реагирует с сульфидными отложениями и железом, существенно ограничивая его биоцидную эффективность [64].

ТГФС может легко разлагаться в результате процессов гидролиза, окисления, фотолитического и биоразложения. Продуктами распада, в основном, являются оксид трис(гидроксиэтил)фосфина и бис(гидроксиэтил)фосфиновая кислота. Они обладают низкой токсичностью для водной среды и не считаются опасными для окружающей среды. Оба в дальнейшем разложатся до CO<sub>2</sub> и неорганических веществ. На процесс разложения сильно влияют многие факторы, такие как температура, pH, уровень O<sub>2</sub>, свет, микроорганизмы и т.д. [65].

ТГФС также используется для контроля осаждения сульфида железа при закачке воды и для удаления отложений в системах добычи нефти. Растворы на основе ТГФС показали эффективность растворения сульфидов железа, сравнимую или даже лучшую, чем неингибированная соляная кислота, особенно в сочетании с хлоридом аммония или органическим фосфонатным ингибитором отложений [66].

#### **Четвертичные аммониевые соединения (ЧАС)**

ЧАСы, такие как хлорид алкилдиметилбензиламмония и соединения хлорида диалкилдиметиламмония, содержат положительно заряженные ионы азота с алкильными или арильными группами. Они являются обычными компонентами биоцидов и ингибиторов коррозии из-за своих свойств поверхностно-активных веществ и широко используются для микробиологического контроля во многих промышленных системах [58]. ЧАСы, как правило, лучше всего работают в щелочной среде. Являясь ингибитором коррозии, они создают тонкий защитный слой на поверхности металла, тем самым уменьшая взаимодействие окислителей со сталью. Как биоциды, ЧАСы действуют на клеточную мембрану,

дестабилизируя ее и приводя к быстрому разрушению клетки. Они несовместимы с окислителями, особенно с хлоратами, пероксидами, хроматами и перманганатами.

ЧАСы являются эффективным альгицидом и достаточно хорошим бактерицидом и могут применяться в широком диапазоне pH (оптимальный pH 6,5–8,5). Однако они, как правило, оказывают бактериостатическое действие только на СВБ. Его поверхностная активность (в качестве поверхностно-активного вещества) делает его очень эффективным для проникновения в биопленку и обеспечения микробиологического контроля при использовании на нефтяных месторождениях. В биоцидных продуктах ЧАСы часто используются в сочетании с другими активными веществами, такими как глутаральдегид и ТГФС, для обеспечения усиленного микробиологического контроля, помогая биоциду проникать в биопленку. С другой стороны, их поверхностно-активные свойства могут вызвать проблемы с пенообразованием, особенно при pH выше 8,0, или несовместимость с анионными добавками, такими как ингибиторы солеотложения и коррозии. ЧАСы имеют плохую совместимость с полианионными полимерами, дезактивируются высокой жесткостью воды (обычно более 500 мг/л) и ограниченно применяются в водной системе с высоким содержанием взвешенных веществ. Они обычно не используются при разведке нефти, поскольку могут отрицательно влиять на проницаемость пород-коллекторов. При переработке сырой нефти поверхностно-активные свойства ЧАСов могут вызывать появление эмульсии и пенообразования и препятствовать разделению нефти и воды [66].

#### **Дибромнитрилопропионамид (ДБНПА)**

ДБНПА — это быстродействующий биоцид на основе брома, эффективно работающий при кислом, нейтральном или щелочном pH. Он демонстрирует быструю эффективность уничтожения микроорганизмов, оперативно разлагаясь на несколько побочных продуктов, включая аммиак, бромид-ионы, дибромацетонитрил и дибромуксусную кислоту в водной среде. Это свойство позволяет безопасно сбрасывать очищенные сточные воды даже в чувствительные водоемы. ДБНПА не считается биоцидом-окислителем, несмотря на небольшое выделение бромного компонента, который может окислять бактериальные субстраты и усиливать его биоцидную активность. В низких концентрациях он очень эффективен для контроля роста аэробных и анаэробных бактерий, грибов и водорослей. Подавляющее большинство микроорганизмов погибает в течение 5–10 минут после контакта с ДБНПА. Однако эффективность уничтожения значительно снижается из-за присутствия в системе аммиака и любых молекул серы (например, H<sub>2</sub>S) [67].

ДБНПА широко используется для дезинфекции и очистки сульфатотудаляющих мембран нанофильтрации и мембран обратного осмоса. Для периодической обработки мембран обычно рекомендуется использовать 10–30 ppm активных ингредиентов в течение от 30 минут до 3 часов каждые 5 дней, в зависимости от степени биообрастания системы. Если в воде присутствует восстановитель (например, бисульфит натрия), требуется более высокая дозировка ДБНПА для учета дезактивации восстановителем. ДБНПА также используется в качестве биоцида при проведении ГРП [68].

ДБНПА разлагается посредством гидролиза, фотолиза (УФ-излучение) и биологическим путем, причем скорость разложения зависит от pH и температуры среды. Период полураспада ДБНПА быстро уменьшается с увеличением pH и температуры. И в водной среде он составляет приблизительно 24 часа при pH 7, 2 часа при pH 8, 15 минут при pH 9. Из-за короткого периода полураспада ДБНПА не подходит для резервуаров-хранилищ, крупных трубопроводных сетей с длительным временем пребывания или систем с присутствием сульфидов или поглотителей кислорода на основе бисульфитов [67].

#### Изотиазолиноны

Изотиазолиноны (в англоязычной литературе иногда встречается термин «изотиазолон») представляют собой неокисляющие биоциды широкого спектра действия, используемые при промышленной очистке воды для контроля роста, метаболизма и образования биопленок бактериями, грибами и водорослями [68]. Соединения нарушают метаболические пути клетки с участием ферментов дегидрогеназы, подавляя критические физиологические функции, включая рост, дыхание и синтез АТФ. Гибель клеток происходит в результате разрушения белковых тиолов и образования свободных радикалов.

По сравнению с ДБНПА изотиазолинон имеет гораздо менее высокую скорость уничтожения бактерий и более эффективен в водах с высоким содержанием органических веществ. Соединения изотиазолинона можно использовать индивидуально или в сочетании с другими биоцидами. Наиболее часто используемым продуктом является смесь 5-хлор-2-метил-4-изотиазолин-3-она и 2-метил-4-изотиазолин-3-она в соотношении 3:1 при конечной концентрации ~1,5 % от общего количества активных ингредиентов, стабилизированная одно- или двухвалентными катионами при кислотном pH [69]. Они эффективны как против обычных аэробных, так и против спорообразующих бактерий в диапазоне pH от 6,5 до 9,0. Изотиазолиноны являются эффективными альгицидами и фунгицидами, но только при кислотном или слабощелочном уровне pH.

Изотиазолиноны также можно использовать в низких концентрациях (10–20, ppm) по технологии постоянного дозирования. Для достижения наилучшей биоцидной эффективности pH воды должен находиться в диапазоне 6–9. Соединения изотиазолинона обладают длительным действием и могут использоваться для долгосрочной консервации (до 6 месяцев) водной системы при контроле биологического роста в дозировке 500–1 000 ppm. Биоцидная эффективность изотиазолинонов может быть усилена различными добавками, включая поверхностно-активные вещества и ЧАСы, но может быть дезактивирована в среде, содержащей восстановители, такие как сероводород.

Изотиазолиноны быстро разлагаются в водной среде с периодом полураспада менее 24 часов. Метаболизм включает расщепление изотиазолонового кольца и последующее окисление до алкильных соединений и  $\text{CO}_2$ . Кроме того, изотиазолоновое кольцо подвержено нуклеофильной атаке со стороны таких веществ, как сульфид, бисульфит, меркаптаны, органические тиолы и амины, что приводит к расщеплению кольца и образованию простой органической кислоты. Побочные продукты разложения значительно менее токсичны, и поэтому считается, что

соединения изотиазолинона имеют хорошие экологические характеристики.

#### Окисляющие биоциды

Диоксид хлора ( $\text{ClO}_2$ ), гипохлориты, хлорид брома и надуксусная кислота относятся к числу распространенных окислительных или неорганических биоцидов, используемых в нефтегазовой промышленности. Они уничтожают бактерии, окисляя органические молекулы на клеточной стенке и клеточной мембране, что приводит к потере нормальной активности ферментов, необходимой для дыхания и клеточного метаболизма [53]. Это окисление, как правило, неизбирательное и очень быстрое, порядка нескольких минут. Однако эффективность окисляющих биоцидов зависит от многих условий системы, таких как pH и органическая нагрузка внутри системы. Уровень pH воды влияет на доступные молекулы биоцидного действия, будь то бром, хлор или хлорноватистая кислота. Характер окисления ограничивает использование этой группы биоцидов в нефтегазовой промышленности, поскольку органические молекулы (например, сырая нефть) быстро поглощают окисляющие биоциды, уменьшая их остатки для расширенного контроля микробиологической активности. В результате окисляющие биоциды используются только в системах очистки воды и только для кратковременной защиты в нефтегазовой промышленности. Наконец, окисляющие биоциды, как правило, очень агрессивны к металлическим конструкциям, что еще больше ограничивает их использование в нефтегазовой промышленности.

#### Диоксид хлора

$\text{ClO}_2$  — желтовато-зеленый газ, растворяющийся в воде при комнатной температуре. Он примерно в 10 раз более растворим, чем хлор, и в 50 раз более растворим, чем озон. Однако растворимость резко снижается с повышением температуры. Это высокореактивный окислитель. Он может взорваться, если концентрация в воздухе превысит порог взрыва в 10 об%. Из соображений безопасности его необходимо генерировать на месте применения с помощью генератора  $\text{ClO}_2$  методами, минуяющими газовую фазу. По той же причине с ним почти всегда обращаются как с растворенным в воде газом в диапазоне концентраций 0,5–10 г/л.

$\text{ClO}_2$  имеет некоторые уникальные преимущества перед газообразным хлором благодаря своей селективности, эффективности в широком диапазоне pH (pH 4–10) и скорости нейтрализации бактерий [58].  $\text{ClO}_2$  превосходит хлор при pH выше 7, в присутствии аммиака, аминов, кремнезема и фосфатов, а также для контроля биопленок в системах водоснабжения. Он менее коррозионно агрессивен, чем хлор. Он широко используется в качестве отбеливателя в бумажной промышленности и для очистки питьевой воды. В нефтяной промышленности из соображений безопасности использование  $\text{ClO}_2$  обычно ограничивается применением на водоочистных станциях, например, перед осветлением сточной воды или песчаными фильтрами [55]. Однако стоит отметить, что  $\text{ClO}_2$ , как и большинство биоцидов-окислителей, расходуется практически мгновенно, не оставляя остатков для длительного микробиологического контроля.

#### Гипохлориты

Гипохлориты являются наиболее широко используемыми хлорсодержащими дезинфицирующими средствами и доступны в жидкой

(например, гипохлорит натрия) или твердой (например, гипохлорит кальция) формах. Они обладают противомикробным действием широкого спектра, не оставляют токсичных остатков, не зависят от жесткости воды, экономически доступны и быстро действуют, удаляя биопленки с поверхности металла [70]. Однако гипохлориты весьма нестабильны: как сухие, так и жидкие формы теряют концентрацию хлора за короткие периоды времени, часто в течение нескольких дней. Скорость распада сухой соли гипохлорита или раствора гипохлорита увеличивается при атмосферном воздействии, солнечного света, более высоких температур, кислотных композиций или при контакте с медью или никелем, которые катализируют его разложение.

Гипохлориты широко используются в качестве отбеливающего и противомикробного агента при очистке воды. Они являются более сильным окислителем, чем  $\text{ClO}_2$ . На крупных водоочистных станциях гипохлориты обычно получают на месте электролизом рассола (хлорида натрия). Это устраняет проблемы транспортировки, хранения и обращения, связанные с газообразным хлором. Гипохлориты являются наименее дорогими биоцидами-окислителями, используемым на нефтепромыслах.

#### Хлорид брома

Хлорид брома является очень активным окислителем и существует в жидкой форме при комнатной температуре. Он использовался в качестве биоцида, в частности, как альгицид, фунгицид и дезинфицирующее средство, в промышленных системах водоснабжения. Он практически не теряет биоцидной активности в присутствии аммиака. Однако он очень агрессивен, имеет высокое давление паров и склонность к дымлению, а также создает проблемы при обращении и доставке, которые ограничивают его широкое коммерческое использование.

#### Надуксусная кислота

Реагенты на основе надуксусной кислоты (другие названия — пероксиуксусная кислота, перуксусная кислота, НУК) представляют собой равновесные смеси, содержащие надуксусную кислоту, перекись водорода, уксусную кислоту, воду и стабилизатор [55]. Биоцидная активность данной кислоты обусловлена окислением сульфгидрильных групп, дисульфидных и двойных связей в белках, липидах и других клеточных компонентах, что нарушает хемиосмотические и транспортные функции клеточной мембраны.

Надуксусная кислота характеризуется очень быстрым действием против всех микроорганизмов при низкой концентрации (менее 5 минут при 100 ppm). Особым преимуществом этой кислоты является то, что побочные продукты ее разложения (например, уксусная кислота, вода, кислород) нетоксичны и легко растворяются в воде. Биоцидная активность не зависит от pH и жесткости воды и сохраняется даже в присутствии органических веществ, хотя требуется более высокая дозировка [70].

Надуксусная кислота является более сильным окисляющим биоцидом, чем  $\text{ClO}_2$ , и окисляет более широкий круг объектов. В нефтегазовой промышленности она успешно используется при гидроразрыве пласта для обеззараживания технологических жидкостей.

#### Консерванты

Некоторые органические или неокисляющие биоциды могут действовать как

консерванты. В отличие от других широко используемых биоцидов, таких как формальдегид, глутаральдегид, ТГФС и ЧАСы, максимальная эффективность которых проявляется от 30 минут до 6 часов, консерванты обычно действуют очень медленно, но обеспечивают долгосрочный микробный контроль [71]. Эффективность консервантов измеряется днями или даже неделями. Большинство консервантов, используемых в нефтяной промышленности, являются высвобождающими формальдегид. Это означает, что антимикробная эффективность консервантов обусловлена высвобождением формальдегида в результате медленного процесса гидролиза. Следовательно, эффективность консервантов зависит от скорости гидролиза с образованием формальдегида, на который могут существенно влиять pH и другие химические параметры воды. Примеры обычных консервантов, используемых на нефтяных месторождениях, включают 4,4-диметилпиперазидин, 3,3-метиленис-(5-метилпиперазидин), трис(гидроксиэтил)нитрометан, цис-1-(3-хлораллил)-3,5,7-триаза-1-азониадамман хлорид и 3,5-диметилтетрагидро-1,3,5-тиадиазинтион-2 (дазомет). Авторы [71] сравнили однократные обработки глутаральдегидом с консервантом дазометом и обнаружили, что глутаральдегид вызывал гораздо более быстрое снижение жизнеспособных СВБ, но дазомет был способен поддерживать отсутствие жизнеспособных СВБ через 28 дней.

Консерванты часто используются в сочетании с другими органическими или неорганическими биоцидами для быстрого уничтожения микроорганизмов и долгосрочной консервации системы. Например, при операциях бурения комбинация обычного органического биоцида и биоцида-консерванта обеспечит быстрое уничтожение бактерий на поверхностном оборудовании (например, трубопроводе нагнетательной воды, резервуаре для хранения бурового раствора и т.д.), а также длительное биоцидное действие. В работе [72] авторы сравнили эффективность глутарового альдегида и ряда биоцидов-консервантов против СВБ при повышенной (75 °C) и нормальной (35 °C) температурах. Было обнаружено, что глутаральдегид эффективен как против мезофильных, так и против термофильных СВБ. Однако его эффективность сохранялась в течение более коротких периодов времени при 75 °C по сравнению с 35 °C. Напротив, консерванты показали улучшенную эффективность при 75 °C по сравнению с 35 °C, которая сохранялась дольше, как против термофильных, так и мезофильных СВБ.

### Итоги

Микроорганизмы широко распространены на всех этапах эксплуатации нефтяных месторождений. Известно, что неконтролируемый рост бактерий при технологических операциях может привести к дорогостоящим проблемам, в частности, к коррозионным отказам оборудования, потере приемистости нагнетательных скважин и добычи нефти, повреждению пласта, снижению эффективности трубопроводов и биологическому разрушению продуктов переработки нефти. В нефтегазовой отрасли наиболее распространенной технологией минимизации негативных рисков микробиологического заражения объектов является применение бактерицидов.

### Выводы

В данной статье рассмотрены основные группы микроорганизмов, встречающихся в

нефтегазовой промышленности, синергические взаимоотношения этих микроорганизмов в различных условиях окружающей среды и эксплуатации, а также их пагубное воздействие на объекты нефтегазовой отрасли. Химическая обработка (биоциды, консерванты) рассматривается как основная стратегия минимизации рисков, вызванных деятельностью микроорганизмов. Проанализированы широко используемые биоциды в нефтегазовой промышленности с точки зрения принципа действия, преимуществ и недостатков, а также ограничений применения на различных объектах нефтяной промышленности.

### Литература

- Jonathan D. Van Hamme, Ajay Singh, Owen P. Ward. Recent advances in petroleum microbiology. *Microbiology and molecular biology reviews*, 2003, Vol. 67, issue 4, P. 475–490. (In Eng).
- Magot M. Indigenous microbial communities in oil fields. *Petroleum Microbiology*. Washington: ASM Press, 2005, P. 21–34. (In Eng).
- Mohammed E. Sindi, Abdalla M. Ezzat, Abdulaziz A Ba Hamdan et al. Microbial assessment and control in drilling operations. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, 2018, SPE-189345-MS. (In Eng).
- Лунин Д.А., Минченко Д.А., Носков А.Б. и др. Промысловый опыт эксплуатации внутрискважинного оборудования в сероводородсодержащих средах // Нефтегазовое дело. 2023. № 3. С. 47–92.
- Малинин А.В., Ситдинов В.Д., Ткачева В.Э., Макатров А.К., Валекжанин И.В., Маркин А.Н. Особенности микроструктуры и микротекстуры среднеуглеродистой стали, подвергнутой сероводородному растрескиванию под напряжением // *Frontier materials & Technologies*. 2023. № 1. С. 33–44.
- Eckert R.B. Emphasis on biofilms can improve mitigation of microbiologically influenced corrosion in oil and gas industry. *Corrosion engineering, science and technology*, 2015, Vol. 50, issue 3, P. 163–168. (In Eng).
- Arampatzi S.I., Giannoglou G., Diza E. Biofilm formation: a complicated microbiological process. *Aristotle University Medical Journal*, 2011, Vol. 38, issue 2, P. 22–24. (In Eng).
- Telegdi J. Shaban A., Vastag G. *Biocorrosion-Steel*. Encyclopedia of interfacial chemistry: surface science and electrochemistry, 2018, Vol. 7, P. 28–42. (In Eng).
- Koch G.H., Brongers M.P.H., Thompson N.G. et al. Corrosion costs and preventive strategies in the United States. *Federal Highway Administration*, Washington, 2001, FHWA-RD-01-156. (In Eng).
- Passman F.J. Microbial contamination and its control in fuels and fuel systems since 1980 – a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, Vol. 81, P. 88–104. (In Eng).
- Loredana S. Dorobantu, Anthony K.C. Yeung, Julia M. Foght, Murray R. Gray. Stabilization of oil-water emulsions by hydrophobic bacteria. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 70, issue 10, P. 6333–6336. (In Eng).
- Ligthelm D.J., R.B. de Boer, Brint J.F., Schulte W.M. Reservoir souring: an analytical model for H<sub>2</sub>S generation and transportation

- in an oil reservoir owing to bacterial activity. *SPE Offshore Europe*, Aberdeen, United Kingdom, 1991, SPE-23141-MS. (In Eng).
- Crolet J. Microbial corrosion in the oil industry: a corrosionist's view. *Petroleum Microbiology*. Washington: ASM Press, 2005, P. 143–169. (In Eng).
  - Larsen J., Sørensen K.B., Højris B. et al. Significance of troublesome sulfate-reducing prokaryotes (SRP) in oil field systems. *Corrosion conference & Expo*, Houston, Texas, 2009, NACE-09389. (In Eng).
  - NACE, Detection, testing, and evaluation of microbiologically influenced corrosion (MIC) on external surfaces of buried pipelines, *NACE TM0106-2006*, NACE International, Houston, TX, 2006. (In Eng).
  - Telegdi J., Shaban A., Trif L. Review on the microbiologically influenced corrosion and the function of biofilms. *International journal of corrosion and scale inhibition*, 2020, Vol. 9, issue 1, P. 1–33. (In Eng).
  - Pope D.H. Microbiologically influenced corrosion of internal aspects of natural gas industry pipelines and associated equipment: mechanisms, diagnosis, and mitigation. A practical manual on microbiologically influenced corrosion. Vol. 2. Houston: NACE International, 2001, P. 13–25. (In Eng).
  - Borenstein S.W. *Microbiologically influenced corrosion handbook*. Cambridge: Woodhead Publishing, 1994, 304 p. (In Eng).
  - Brenda J. Little, Jason S. Lee. *Microbiologically influenced corrosion*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007, 304 p. (In Eng).
  - Horn J., Jones D. Microbiologically influenced corrosion: perspectives and approaches. *Manual of environmental microbiology*. Washington: ASM Press, 2002, P. 1072–1083. (In Eng).
  - Hamilton W.A. Microbially influenced corrosion as a model system for the study of metal microbe interactions: a unifying electron transfer hypothesis. *Biofouling*, 2003, Vol. 19, issue 1, P. 65–76. (In Eng).
  - Videla H.A., Herrera L.K., Edyvean G. An updated overview of SRB induced corrosion and protection of carbon steel. *Corrosion Conference & Expo*, Houston, Texas, 2005, NACE-05488. (In Eng).
  - Osburne M.S., Grossman T.H., August P.R. et al. Tapping into microbial diversity for natural products drug discovery. *ASM News*, 2000, Vol. 66, P. 411–417. (In Eng).
  - Torsvik V., Goksøyr J., Daae F.L. High diversity in DNA of soil bacteria. *ASM journals. Applied and environmental microbiology*, 1990, Vol. 56, issue 3, P. 782–787. (In Eng).
  - Xiangyang Zhu, John Kilbane II, Alvin Ayala et al. Application of quantitative, real-time PCR in monitoring microbiologically-influenced corrosion (MIC) in gas pipelines. *Corrosion Conference & Expo*, Houston, Texas, 2005, NACE-05493. (In Eng).
  - Zhu X.Y., Modi H., Ayala A. et al. Rapid detection and quantification of microbes related to microbiologically influenced corrosion using quantitative polymerase chain reaction. *Corrosion*, 2006, Vol. 62, issue 11, P. 950–955. (In Eng).
  - Zhu X.Y., Moniee M.A. *Molecular microbiology techniques*. Trends in oil and gas corrosion research and technologies: production and transmission. Duxford: Woodhead Publishing, 2017, P. 513–536. (In Eng).
  - Dolla A., Fournier M., Dermoun Z. Oxygen

- defense in sulfate-reducing bacteria. *Journal of Biotechnology*, 2006, Vol. 126, issue 1, P. 87–100. (In Eng).
29. Kjeldsen K.U., Joulain C., Ingvorsen K. Oxygen tolerance of sulfate-reducing bacteria in activated sludge. *Environmental Science & Technology*, 2004, Vol. 38, issue 7, P. 38–43. (In Eng).
  30. Zhu X.Y., Modi H., J.J. Kilbane II. Efficacy and risks of nitrate application for the mitigation of SRB-induced corrosion. *Corrosion Conference & Expo*, San Diego, CA, 2006, NACE-06524. (In Eng).
  31. Roden E.E., Lovley D.R. Dissimilatory Fe (III) reduction by marine microorganism *Desulfuromonas acetooxidans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, Vol. 59, issue 3, P. 734–742. (In Eng).
  32. Cord-Ruwisch R., Kleinitz W., Widdel F. Sulfate-reducing bacteria and their activities in oil production. *Journal of Petroleum Technology*, 1987, Vol. 39, issue 1, P. 97–106. (In Eng).
  33. Zhu X.Y., Lubeck J., J.J. Kilbane II. Characterization of microbial communities in gas industry pipelines. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, 2003, Vol. 69, issue 9, P. 5354–5363. (In Eng).
  34. Hamilton W.A. Sulphate-reducing bacteria and anaerobic corrosion. *Annual Review of Microbiology*, 1985, Vol. 39, P. 195–217. (In Eng).
  35. Hugenholtz P. Exploring prokaryotic diversity in the genomic area. *Genome Biology*, 2002, Vol. 3, issue 2, 8 p. (In Eng).
  36. Céline Pallud, Philippe Van Cappellen. Kinetics of microbial sulfate reduction in estuarine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, Vol. 70, issue 5, P. 1148–1162. (In Eng).
  37. Gibson G. Physiology and ecology of the sulphate-reducing bacteria. *Journal of Applied Bacteriology*, 1990, Vol. 69, issue 6, P. 769–797. (In Eng).
  38. Lovley D.R., Philips E. Novel processes for anaerobic sulfate production from elemental sulfur by sulfate-reducing bacteria. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, 1994, Vol. 60, issue 7, P. 2394–2399. (In Eng).
  39. Hubert C., Voordouw G. Oil field souring control by nitrate-reducing *Sulfurospirillum* spp. that outcompete sulfate-reducing bacteria for organic electron donors. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, 2007, Vol. 73, issue 8, P. 2644–2652. (In Eng).
  40. Klenk H.P., Clayton R.A., Tomb J.F. et al. The complete genome sequence of the hyperthermophilic, sulphate-reducing archaeon *Archaeoglobus fulgidus*. *Nature*, 1997, Vol. 390, issue 6658, P. 364–370. (In Eng).
  41. Ayazi M., Mirfenderski S., Moghadam A.A. et al. Study of the corrosion factors in offshore oil production units. *Petroleum & Coal*, 2006, Vol. 48, issue 2, P. 6–10. (In Eng).
  42. Li S.Y., Kim Y.G., Jeon K.S. et al. Microbiologically influenced corrosion of carbon steel exposed to anaerobic soil. *Corrosion*, 2001, Vol. 57, issue 9, P. 815–828. (In Eng).
  43. Enning D., Garrelfs J. Corrosion of iron by sulfate-reducing bacteria: new views of an old problem. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, 2014, Vol. 80, issue 4, P. 1226–1236. (In Eng).
  44. Youssef N., Elshahed M.S., McInerney M.J. Microbial processes in oil fields: culprits, problems, and opportunities. *Advances in Applied Microbiology*, 2009, Vol. 66, P. 141–251. (In Eng).
  45. Elias D.A., Krumholz L.R., Tanner R.S. et al. Estimation of methanogen biomass by quantitation of Coenzyme M. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 65, issue 12, P. 5541–5545. (In Eng).
  46. Gray N.D., Sherry A., Larter S.R. et al. Biogenic methane production in formation waters from a large gas field in the North Sea. *Extremophiles: Life Under Extreme Conditions*, 2009, Vol. 13, issue 3, P. 511–519. (In Eng).
  47. Thauer R.K., Kaster A.K., Seedorf H. et al. Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation. *Nature Reviews. Microbiology*, 2008, Vol. 6, P. 579–591. (In Eng).
  48. Zhang T., Fang H., Ko B. Methanogen population in a marine biofilm corrosive to mild steel. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, Vol. 63, P. 101–106. (In Eng).
  49. Chen J., Wade M.J., Dolfig J. et al. Increasing sulfate levels show a differential impact on synthetic communities comprising different methanogens and a sulfate reducer. *Journal of the Royal Society Interface*, 2019, Vol. 16, issue 154, 12 p. (In Eng).
  50. Guyot J.P., Brauman A. Methane production from formate by syntrophic association of *Methanobacterium bryantii* and *Desulfovibrio vulgaris* JJ. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, 1986, Vol. 52, issue 6, P. 1436–1437. (In Eng).
  51. Zhou E., Wang J., Moradi M. et al. Methanogenic archaea and sulfate reducing bacteria induce severe corrosion of steel pipelines after hydrostatic testing. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, Vol. 48, P. 72–83. (In Eng).
  53. Turkiewicz A., Brzeszcz J., Kapusta P. The application of biocides in the oil and gas industry. *Nafta-Gaz*, 2013, issue 2, P. 103–111. (In Eng).
  54. Keasler V., R. De Paula, Nilsen G. et al. Biocides overview and applications in petroleum microbiology. *Trends in oil and gas corrosion research and technologies: production and transmission*. Duxford: Woodhead Publishing, 2017, P. 539–562. (In Eng).
  55. Gorman S., Scott E.M. A review—antimicrobial activity, uses and mechanism of action of glutaraldehyde. *Journal of Applied Bacteriology*, 1980, Vol. 48, issue 2, P. 161–190. (In Eng).
  56. McGinley H.R., Enzien M.V., Jenneman G. et al. Studies on the chemical stability of glutaraldehyde in produced water. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, Woodlands, Texas, USA, 2011, SPE-141449-MS. (In Eng).
  57. Fink J.K. *Bacterial control, petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids*. Waltham: Gulf Professional Publishing, 2012, 785 p. (In Eng).
  58. Williams T.M. The environmental fate of oil and gas biocides: a review. *Corrosion Conference & Expo*, San Antonio, 2014, NACE-3876. (In Eng).
  59. Frayne C. The selection and application of nonoxidizing biocides for cooling water systems. *The Analyst*, 2001, issue 8, 14 p. (In Eng).
  60. Wen J., Zhao K., Gu T. et al. A green biocide enhancer for the treatment of sulfate-reducing bacteria (SRB) biofilms on carbon steel surfaces using glutaraldehyde. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2009, Vol. 63, issue 8, P. 1102–1106. (In Eng).
  61. Jordan S.L., Russo M.R., Blessing R.L. et al. Inactivation of glutaraldehyde by reaction with sodium bisulfite. *Journal of toxicology and environmental health*, 1993, Vol. 47, issue 3, P. 299–309. (In Eng).
  62. Zhao K., Wen J., Gu T. et al. Mechanistic modeling of anaerobic THPS biocide degradation under alkaline conditions. *Materials Performance*, 2009, Vol. 48, issue 8, P. 62–66. (In Eng).
  63. Wylde J.J., Winning I.G. Challenges and solutions associated with the development of an iron scale dissolver chemistry. *Corrosion Conference & Expo*, New Orleans, LA, 2004, NACE-04730. (In Eng).
  64. Kramer J.F. A new high performance quaternary phosphonium biocide for biofouling control in industrial water systems. *Corrosion Conference & Expo*, San Diego, CA, 2006, NACE-06093. (In Eng).
  65. Kahrilas G.A., Blotvogel J., Stewart P.S. et al. Biocides in hydraulic fracturing fluids: a critical review of their usage, mobility, degradation, and toxicity. *Environmental Science & Technology*, 2015, Vol. 49, issue 1, P. 16–32. (In Eng).
  66. Bertheas U., Majamaa K., Arzu A. et al. Use of DBNPA to control biofouling in RO systems. *Desalination and Water Treatment*, 2009, Vol. 3, issue 1-3, P. 175–178. (In Eng).
  67. Exner J.H., Burk G.A., Kyriacou D. Rates and products of decomposition of 2,2-dibromo-3-nitropropionamide. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1973, Vol. 21, issue 5, P. 838–842. (In Eng).
  68. Williams T.M. The mechanism of action of isothiazolone biocide. *Corrosion Conference & Expo*, San Diego, CA, 2006, NACE-06090. (In Eng).
  69. Williams T.M. Efficacy of chloromethyl-methylisothiazolone (CMIT/MIT) biocide vs *Legionella* and protozoa. *Corrosion Conference & Expo*, Nashville, TN, 2007, NACE-07433. (In Eng).
  70. Rutala W.A., Weber D.J. *Disinfection, sterilization, and control of hospital waste*. Mandell, Douglas, and Bennett's Principles and Practice of Infectious Diseases. Amsterdam: Elsevier, 2015, P. 3294–3309. (In Eng).
  71. Kramer J.F. Peracetic acid: a new biocide for industrial water applications. *Corrosion Conference & Expo*, New Orleans, LA, 1997, NACE-97404. (In Eng).
  72. R. De Paula, Keasler V., Tidwell T. Evaluation of preservative chemistries to control microbial activity during well completion, in: *Corrosion Conference & Expo*, Dallas, TX, 2015, NACE-6069. (In Eng).
  73. Yin B., Williams T., Koehler T. et al. Targeted microbial control for hydrocarbon reservoir: identify new biocide offerings for souring control using thermophile testing capabilities. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, Vol. 126, P. 204–207. (In Eng).



## Results

Microorganisms are widespread at all stages of oil field operation. It is known that uncontrolled bacterial growth during technological operations can lead to costly problems, in particular, to corrosion failures of equipment, loss of injection wells and oil production, formation damage, decreased pipeline efficiency and biological destruction of oil refining products. In the oil and gas industry, the most common technology for minimizing the negative risks of microbiological contamination of facilities is the use of bactericides.

## Conclusions

This article discusses the main groups of microorganisms encountered in the oil and gas industry, the synergistic relationships of these microorganisms under various environmental and operational conditions, and their detrimental effects on oil and gas facilities. Chemical treatment (biocides, preservatives) is considered as the main strategy for minimizing the risks caused by the activity of microorganisms. Widely used biocides in the oil and gas industry are analyzed in terms of their operating principle, advantages and disadvantages, and limitations of use at various oil industry facilities.

## References

- Jonathan D. Van Hamme, Ajay Singh, Owen P. Ward. Recent advances in petroleum microbiology. *Microbiology and molecular biology reviews*, 2003, Vol. 67, issue 4, P. 475–490. (In Eng).
- Magot M. Indigenous microbial communities in oil fields. *Petroleum Microbiology*. Washington: ASM Press, 2005, P. 21–34. (In Eng).
- Mohammed E. Sindi, Abdalla M. Ezzat, Abdulaziz A Ba Hamdan et al. Microbial Assessment and Control in Drilling Operations. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, 2018, SPE-189345-MS. (In Eng).
- Lunin D.A., Minchenko D.A., Noskov A.B. et al. Field experience of downhole equipment operation in hydrogen sulfide-containing environments. *Oil and gas business*, 2023, issue 3, P. 47–92 (In Russ).
- Malinin A.V., Sitdikov V.D., Tkacheva V.E., Makatrov A.K., Valekzhanin I.V., Markin A.N. Characteristic properties of the microstructure and microtexture of medium-carbon steel subjected to sulfide stress cracking. *Frontier Materials & Technologies*, 2023, issue 1, P. 33–44. (In Russ).
- Eckert R.B. Emphasis on biofilms can improve mitigation of microbiologically influenced corrosion in oil and gas industry. *Corrosion engineering, science and technology*, 2015, Vol. 50, issue 3, P. 163–168. (In Eng).
- Arampatzi S.I., Giannoglou G., Diza E. Biofilm formation: a complicated microbiological process. *Aristotle University Medical Journal*, 2011, Vol. 38, issue 2, P. 22–24. (In Eng).
- Telegdi J. Shaban A., Vastag G. Biocorrosion-Steel. *Encyclopedia of interfacial chemistry: surface science and electrochemistry*, 2018, Vol. 7, P. 28–42. (In Eng).
- Koch G.H., Brongers M.P.H., Thompson N.G. et al. Corrosion costs and preventive strategies in the United States. *Federal Highway Administration*, Washington, 2001, FHWA-RD-01-156. (In Eng).
- Passman F.J. Microbial contamination and its control in fuels and fuel systems since 1980 – a review. *International biodeterioration & Biodegradation*, 2013, Vol. 81, P. 88–104. (In Eng).
- Loredana S. Dorobantu, Anthony K.C. Yeung, Julia M. Foght, Murray R. Gray. Stabilization of oil-water emulsions by hydrophobic bacteria. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 70, issue 10, P. 6333–6336. (In Eng).
- Ligthelm D.J., R.B. de Boer, Brint J.F., Schulte W.M. Reservoir souring: an analytical model for H<sub>2</sub>S generation and transportation in an oil reservoir owing to bacterial activity. *SPE Offshore Europe*, Aberdeen, United Kingdom, 1991, SPE-23141-MS. (In Eng).
- Crolet J. Microbial corrosion in the oil industry: a corrosionist's view. *Petroleum Microbiology*. Washington: ASM Press, 2005, P. 143–169. (In Eng).
- Larsen J., Sørensen K.B., Højris B. et al. Significance of troublesome sulfate-reducing prokaryotes (SRP) in oil field systems. *Corrosion conference & Expo*, Houston, Texas, 2009, NACE-09389. (In Eng).
- NACE, Detection, testing, and evaluation of microbiologically influenced corrosion (MIC) on external surfaces of buried pipelines, NACE TM0106-2006. *NACE International*, Houston, TX, 2006. (In Eng).
- Telegdi J., Shaban A., Trif L. Review on the microbiologically influenced corrosion and the function of biofilms. *International journal of corrosion and scale inhibition*, 2020, Vol. 9, issue 1, P. 1–33. (In Eng).
- Pope D.H. Microbiologically influenced corrosion of internal aspects of natural gas industry pipelines and associated equipment: mechanisms, diagnosis, and mitigation. *A practical manual on microbiologically influenced corrosion*. Vol. 2. Houston: NACE International, 2001, P. 13–25. (In Eng).
- Borenstein S.W. *Microbiologically influenced corrosion handbook*. Cambridge: Woodhead Publishing, 1994, 304 p. (In Eng).
- Brenda J. Little, Jason S. Lee. *Microbiologically influenced corrosion*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007, 304 p. (In Eng).
- Horn J., Jones D. *Microbiologically influenced corrosion: perspectives and approaches*. Manual of environmental microbiology. Washington: ASM Press, 2002, P. 1072–1083. (In Eng).
- Hamilton W.A. Microbially influenced corrosion as a model system for the study of metal microbe interactions: a unifying electron transfer hypothesis. *Biofouling*, 2003, Vol. 19, issue 1, P. 65–76. (In Eng).
- Videla H.A., Herrera L.K., Edyvean G. An updated overview of SRB induced corrosion and protection of carbon steel. *Corrosion Conference & Expo*, Houston, Texas, 2005, NACE-05488. (In Eng).
- Osborne M.S., Griossman T.H., August P.R. et al. Tapping into microbial diversity for natural products drug discovery. *ASM News*, 2000, Vol. 66, P. 411–417. (In Eng).
- Torsvik V., Goksøyr J., Daee F.L. High diversity in DNA of soil bacteria. *ASM journals. Applied and environmental microbiology*, 1990, Vol. 56, issue 3, P. 782–787. (In Eng).
- Xiangyang Zhu, John Kilbane II, Alvin Ayala et al. Application of quantitative, real-time PCR in monitoring microbiologically-influenced corrosion (MIC) in gas pipelines. *Corrosion Conference & Expo*, Houston, Texas, 2005, NACE-05493. (In Eng).
- Zhu X.Y., Modi H., Ayala A. et al. Rapid detection and quantification of microbes related to microbiologically influenced corrosion using quantitative polymerase chain reaction. *Corrosion*, 2006, Vol. 62, issue 11, P. 950–955. (In Eng).
- Zhu X.Y., Moniee M.A. *Molecular microbiology techniques*. Trends in oil and gas corrosion research and technologies: production and transmission. Duxford: Woodhead Publishing, 2017, P. 513–536. (In Eng).
- Dolla A., Fournier M., Dermoun Z. Oxygen defense in sulfate-reducing bacteria. *Journal of Biotechnology*, 2006, Vol. 126, issue 1, P. 87–100. (In Eng).
- Kjeldsen K.U., Joulain C., Ingvorsen K. Oxygen tolerance of sulfate-reducing bacteria in activated sludge. *Environmental Science & Technology*, 2004, Vol. 38, issue 7, P. 38–43. (In Eng).
- Zhu X.Y., Modi H., J.J. Kilbane II. Efficacy and risks of nitrate application for the mitigation of SRB-induced corrosion. *Corrosion Conference & Expo*, San Diego, CA, 2006, NACE-06524. (In Eng).
- Roden E.E., Lovley D.R. Dissimilatory Fe (III) reduction by marine microorganism *Desulfuromonas acetooxidans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, Vol. 59, issue 3, P. 734–742. (In Eng).
- Cord-Ruwisch R., Kleinitz W., Widdel F. Sulfate-reducing bacteria and their activities in oil production. *Journal of Petroleum Technology*, 1987, Vol. 39, issue 1, P. 97–106. (In Eng).
- Zhu X.Y., Lubeck J., J.J. Kilbane II. Characterization of microbial communities in gas industry pipelines. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, 2003, Vol. 69, issue 9, P. 5354–5363. (In Eng).
- Hamilton W.A. Sulphate-reducing bacteria and anaerobic corrosion. *Annual Review of Microbiology*, 1985, Vol. 39, P. 195–217. (In Eng).
- Hugenholtz P. Exploring prokaryotic diversity in the genomic area. *Genome Biology*, 2002, Vol. 3, issue 2, 8 p. (In Eng).
- Céline Pallud, Philippe Van Cappellen. Kinetics of microbial sulfate reduction in estuarine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, Vol. 70, issue 5, P. 1148–1162. (In Eng).
- Gibson G. Physiology and ecology of the sulphate-reducing bacteria. *Journal of Applied Bacteriology*, 1990, Vol. 69, issue 6, P. 769–797. (In Eng).

38. Lovley D.R., Philips E. Novel processes for anaerobic sulfate production from elemental sulfur by sulfate-reducing bacteria. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, 1994, Vol. 60, issue 7, P. 2394–2399. (In Eng).
39. Hubert C., Voordouw G. Oil field souring control by nitrate-reducing *Sulfurospirillum* spp. that outcompete sulfate-reducing bacteria for organic electron donors. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, 2007, Vol. 73, issue 8, P. 2644–2652. (In Eng).
40. Klenk H.P., Clayton R.A., Tomb J.F. et al. The complete genome sequence of the hyperthermophilic, sulphate-reducing archaeon *Archaeoglobus fulgidus*. *Nature*, 1997, Vol. 390, issue 6658, P. 364–370. (In Eng).
41. Ayazi M., Mirfenderski S., Moghadam A.A. et al. Study of the corrosion factors in offshore oil production units. *Petroleum & Coal*, 2006, Vol. 48, issue 2, P. 6–10. (In Eng).
42. Li S.Y., Kim Y.G., Jeon K.S. et al. Microbiologically influenced corrosion of carbon steel exposed to anaerobic soil. *Corrosion*, 2001, Vol. 57, issue 9, P. 815–828. (In Eng).
43. Enning D., Garrelfs J. Corrosion of iron by sulfate-reducing bacteria: new views of an old problem. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, 2014, Vol. 80, issue 4, P. 1226–1236. (In Eng).
44. Youssef N., Elshahed M.S., McInerney M.J. Microbial processes in oil fields: culprits, problems, and opportunities. *Advances in Applied Microbiology*, 2009, Vol. 66, P. 141–251. (In Eng).
45. Elias D.A., Krumholz L.R., Tanner R.S. et al. Estimation of methanogen biomass by quantitation of Coenzyme M. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 65, issue 12, P. 5541–5545. (In Eng).
46. Gray N.D., Sherry A., Larter S.R. et al. Biogenic methane production in formation waters from a large gas field in the North Sea. *Extremophiles: Life Under Extreme Conditions*, 2009, Vol. 13, issue 3, P. 511–519. (In Eng).
47. Thauer R.K., Kaster A.K., Seedorf H. et al. Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation. *Nature Reviews. Microbiology*, 2008, Vol. 6, P. 579–591. (In Eng).
48. Zhang T., Fang H., Ko B. Methanogen population in a marine biofilm corrosive to mild steel. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, Vol. 63, P. 101–106. (In Eng).
49. Chen J., Wade M.J., Dolfig J. et al. Increasing sulfate levels show a differential impact on synthetic communities comprising different methanogens and a sulfate reducer. *Journal of the Royal Society Interface*, 2019, Vol. 16, issue 154, 12 p. (In Eng).
50. Guyot J.P., Brauman A. Methane production from formate by syntrophic association of *Methanobacterium bryantii* and *Desulfovibrio vulgaris* JJ. *ASM Journals. Applied and Environmental Microbiology*, 1986, Vol. 52, issue 6, P. 1436–1437. (In Eng).
51. Zhou E., Wang J., Moradi M. et al. Methanogenic archaea and sulfate reducing bacteria induce severe corrosion of steel pipelines after hydrostatic testing. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, Vol. 48, P. 72–83. (In Eng).
52. Campbell C. Advances in testing and monitoring of biocides in oil and gas. *Trends in oil and gas corrosion research and technologies: production and transmission*. Duxford: Woodhead Publishing, 2017, P. 489–511. (In Eng).
53. Turkiewicz A., Brzeszcz J., Kapusta P. The application of biocides in the oil and gas industry. *Nafta-Gaz*, 2013, issue 2, P. 103–111. (In Eng).
54. Keasler V., R. De Paula, Nilsen G. et al. Biocides overview and applications in petroleum microbiology. *Trends in oil and gas corrosion research and technologies: production and transmission*. Duxford: Woodhead Publishing, 2017, P. 539–562. (In Eng).
55. Gorman S., Scott E.M. A review—antimicrobial activity, uses and mechanism of action of glutaraldehyde. *Journal of Applied Bacteriology*, 1980, Vol. 48, issue 2, P. 161–190. (In Eng).
56. McGinley H.R., Enzien M.V., Jenneman G. et al. Studies on the chemical stability of glutaraldehyde in produced water. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, Woodlands, Texas, USA, 2011, SPE-141449-MS. (In Eng).
57. Fink J.K. Bacterial control, petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids. Waltham: Gulf Professional Publishing, 2012, 785 p. (In Eng).
58. Williams T.M. The environmental fate of oil and gas biocides: a review. *Corrosion Conference & Expo*, San Antonio, 2014, NACE-3876. (In Eng).
59. Frayne C. The selection and application of nonoxidizing biocides for cooling water systems, *The Analyst*, 2001, issue 8, 14 p. (In Eng).
60. Wen J., Zhao K., Gu T. et al. A green biocide enhancer for the treatment of sulfate-reducing bacteria (SRB) biofilms on carbon steel surfaces using glutaraldehyde. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2009, Vol. 63, issue 8, P. 1102–1106. (In Eng).
61. Jordan S.L., Russo M.R., Blessing R.L. et al. Inactivation of glutaraldehyde by reaction with sodium bisulfite. *Journal of toxicology and environmental health*, 1993, Vol. 47, issue 3, P. 299–309. (In Eng).
62. Zhao K., Wen J., Gu T. et al. Mechanistic modeling of anaerobic THPS biocide degradation under alkaline conditions. *Materials Performance*, 2009, Vol. 48, issue 8, P. 62–66. (In Eng).
63. Wylde J.J., Winning I.G. Challenges and solutions associated with the development of an iron scale dissolver chemistry. *Corrosion Conference & Expo*, New Orleans, LA, 2004, NACE-04730. (In Eng).
64. Kramer J.F. A new high performance quaternary phosphonium biocide for biofouling control in industrial water systems. *Corrosion Conference & Expo*, San Diego, CA, 2006, NACE-06093. (In Eng).
65. Kahrilas G.A., Blotvogel J., Stewart P.S. et al. Biocides in hydraulic fracturing fluids: a critical review of their usage, mobility, degradation, and toxicity. *Environmental Science & Technology*, 2015, Vol. 49, issue 1, P. 16–32. (In Eng).
66. Bertheas U., Majamaa K., Arzu A. et al. Use of DBNPA to control biofouling in RO systems. *Desalination and Water Treatment*, 2009, Vol. 3, issue 1-3, P. 175–178. (In Eng).
67. Exner J.H., Burk G.A., Kyriacou D. Rates and products of decomposition of 2,2-dibromo-3-nitropropionamide. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1973, Vol. 21, issue 5, P. 838–842. (In Eng).
68. Williams T.M. The mechanism of action of isothiazolone biocide. *Corrosion Conference & Expo*, San Diego, CA, 2006, NACE-06090. (In Eng).
69. Williams T.M. Efficacy of chloromethyl-methylisothiazolone (CMIT/MIT) biocide vs *Legionella* and protozoa. *Corrosion Conference & Expo*, Nashville, TN, 2007, NACE-07433. (In Eng).
70. Rutala W.A., Weber D.J. Disinfection, sterilization, and control of hospital waste. *Mandell, Douglas, and Bennett's Principles and Practice of Infectious Diseases*. Amsterdam: Elsevier, 2015, P. 3294–3309. (In Eng).
71. Kramer J.F. Peracetic acid: a new biocide for industrial water applications. *Corrosion Conference & Expo*, New Orleans, LA, 1997, NACE-97404. (In Eng).
72. R. De Paula, Keasler V., Tidwell T. Evaluation of preservative chemistries to control microbial activity during well completion, in: *Corrosion Conference & Expo*, Dallas, TX, 2015, NACE-6069. (In Eng).
73. Yin B., Williams T., Koehler T. et al. Targeted microbial control for hydrocarbon reservoir: identify new biocide offerings for souring control using thermophile testing capabilities. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, Vol. 126, P. 204–207. (In Eng).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Валекжанин Илья Владимирович**, начальник отдела борьбы с осложнениями, ООО «РН-БашНИПНефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия  
**Для контактов:** valekzhaniniv@bnipi.rosneft.ru

**Valekzhanin Ilya Vladimirovich**, head of the department of complications management, “RN-BashNIPIneft” LLC (“Rosneft” PJSC Group Company), Ufa, Russia  
**Corresponding author:** valekzhaniniv@bnipi.rosneft.ru