

# Микробиологическая зараженность нефтяных месторождений. Часть 2: Технологии биоцидных обработок и нехимические методы контроля

Валекжанин И.В.

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

## Аннотация

В настоящей статье рассмотрены преимущества и недостатки широко используемых технологий подачи биоцидов — постоянное дозирование реагента и периодические (ударные) обработки. Показана важность и основные методы контроля остаточного содержания биоцидов (с различными активными основами) в разных участках защищаемой системы. Рассмотрены методы микробиологического мониторинга с целью определения фактической эффективности биоцидной обработки. Описаны достоинства и ограничения как традиционных методов контроля (например, метод предельного разведения), так и ряда альтернативных способов (в частности, технологии секвенирования ДНК). Также в статье рассмотрены некоторые нехимические (физические) методы нейтрализации бактерий (УФ-дезинфекция, фильтрация и обработка ультразвуком).

## Материалы и методы

Рассмотрены преимущества и недостатки наиболее часто применяющихся технологий дозирования биоцидов на объектах нефтегазодобычи. Проанализированы методы контроля фактической эффективности биоцидов. Принимая во внимание рост различных регуляторных ограничений, накладываемых государствами на токсичные биоциды, рассмотрены некоторые

нехимические (физические) методы нейтрализации бактерий (УФ-дезинфекция, фильтрация и обработка ультразвуком).

## Ключевые слова

бактерии, микробиологическая зараженность, бактерицид, биоцид, УФ-излучение, ультразвук, фильтрация, нефтяное месторождение

## Для цитирования

Валекжанин И.В. Микробиологическая зараженность нефтяных месторождений. Часть 2: Технологии биоцидных обработок и нехимические методы контроля // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 6. С. 84–91. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-6-84-91

Поступила в редакцию: 23.08.2024

OIL PRODUCTION

UDC 622.276 | Original Paper

## Microbiological contamination of oil fields. Part 2: Biocidal treatment technologies and non-chemical control methods

Valekzhanin I.V.

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

## Abstract

This article discusses the advantages and disadvantages of commonly used biocide delivery technologies – continuous reagent dosing and periodic (shock) treatments. It shows the importance and main methods of monitoring the residual content of biocides (with different active bases) in different areas of the protected system. Microbiological monitoring methods are considered to determine the actual effectiveness of biocide treatment. The advantages and limitations of both traditional control methods (for example, the limiting dilution method) and a number of alternative methods (in particular, DNA sequencing technology) are described. The article also discusses some non-chemical (physical) methods of neutralizing bacteria (UV disinfection, filtration, and ultrasound treatment).

## Materials and methods

The advantages and disadvantages of the most commonly used biocide dosing technologies at oil and gas production facilities are considered. Methods for monitoring the actual efficiency of biocides are analyzed. Taking into account the growth of various regulatory restrictions imposed by states on toxic biocides, some non-chemical (physical)

methods of neutralizing bacteria (UV disinfection, filtration, and ultrasound treatment) are considered.

## Keywords

bacteria, microbiological contamination, bactericide, biocide, UV radiation, ultrasound, filtration, oil field

## For citation

Valekzhanin I.V. Microbiological contamination of oil fields. Part 2: Biocidal treatment technologies and non-chemical control methods. Exposition Oil Gas, 2024, issue 6, P. 84–91. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2024-6-84-91

Received: 23.08.2024

## 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. 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. 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, эффективности работы трубопроводов, теплопередачи теплообменников и биологического разложения продуктов нефтепереработки. В данной статье рассмотрены основные технологии биоцидных обработок, подходы к мониторингу остаточного содержания биоцидов и эффективности его применения, а также рассмотрена эффективность нехимических методов защиты оборудования от негативного влияния микробиологического заражения.

## Технологии биоцидных обработок

После того, как эффективность биоцида оценена в лаборатории и биоцид окончательно выбран [1], следующим этапом является определение способа его применения в целевой системе. В нефтегазовой промышленности биоцид применяется одним из трех способов: периодической обработкой, непрерывной обработкой и импульсной обработкой.

Периодическая обработка биоцидами наиболее распространена в нефтегазовой промышленности по разным причинам. Это более рентабельно, чем непрерывная обработка в крупных нефтепромысловых системах в течение длительного периода времени. При правильном применении она может достичь той же цели, что и непрерывное дозирование, то есть поставить под контроль активность или количество микроорганизмов в обрабатываемом объекте. При периодической обработке биоцид подается в целевой объект (трубопровод, РВС и т.д.) с заранее определенной дозировкой и периодичностью (наиболее распространенной является еженедельная обработка) и в течение заранее определенного периода времени (1–4 часа). В некоторых нефтяных компаниях используются два биоцида разного химического состава, чередующиеся еженедельно, с целью избежать или задержать развитие бактериальной резистентности к применяемым реагентам. Если это практически осуществимо, периодическую обработку биоцидом следует координировать с операцией механической очистки (скребкование). Механическое удаление или разрушение биопленок и твердых отложений посредством скребков повысит способность биоцида проникать и убивать

микроорганизмы в биопленках или отложениях. Биоциды часто добавляют сразу после скребки в течение 2–8 часов [2].

Непрерывная обработка обычно применяется при низких дозировках биоцидов (менее 10 ppm) для экономии средств и одновременного обеспечения биостатического контроля микробиологической активности. В некоторых случаях может применяться комбинация периодической обработки и непрерывного дозирования. Высокая дозировка одного биоцида применяется с установленной периодичностью (один раз в неделю/две недели/месяц) для уничтожения бактерий и удаления биопленок с поверхности оборудования с последующим непрерывным дозированием другого биоцида с меньшей дозировкой с целью предотвращения прикрепления новых бактерий к поверхности или свести к минимуму повторный рост биопленки между обработками [2]. Следует отметить, что при низких дозировках биоцидов, особенно неокисляющих биоцидов, нефтепромысловые микроорганизмы с большей вероятностью адаптируются и развивают устойчивость с течением времени или подвергаются процессу естественного отбора, приводящему к образованию более устойчивых микробных популяций в системах [3].

Импульсную обработку биоцидом можно рассматривать как «ударную» обработку при периодическом применении. Высокая концентрация биоцида (до 1 500 и более ppm) вводится в объект в течение нескольких минут, и биоцид затем равномерно распределяется в течение определенного времени (как правило, до 24 часов) [4]. Этот метод состоит в том, чтобы добавить достаточное количество биоцида с целью превысить пороговую концентрацию, необходимую для уничтожения микроорганизмов. Затем дозирование можно прекратить на время, необходимое для начала восстановления популяции бактерий. Импульсная обработка экономит затраты на биоциды по сравнению с непрерывной обработкой, но может вызвать осложнения при операции. Могут потребоваться некоторые компромиссы, чтобы избежать взаимодействия или несовместимости с другими нефтепромысловыми реагентами.

После того, как определен объект с высокой биозараженностью, проведены работы по подбору и лабораторному тестированию эффективного биоцида, определена оптимальная технология его применения, последним шагом является определение того, в каком месте системы следует применять биоцид. Правильный выбор места биоцидной обработки окажет существенное влияние на эффективность реагента и микробиологического контроля в целом на объекте. Для начала необходимо провести комплексное микробиологическое исследование, чтобы понять проблемы и определить места повышенного риска на объектах добычи, транспортировки и подготовки углеводородного сырья. Как правило, место обработки биоцидом должно находиться раньше по технологической схеме добычи и сбора сырья, чем точка локализации проблемы. На многих нефтепромысловых объектах нередко биоцидная обработка не является частью первоначального проекта обустройства. Следовательно, либо требуется существенное изменение конструкции для установленного дозирующего устройства в определенном месте, либо оператору приходится доставлять необходимое количество реагента с базы хранения для каждой обработки.

Поскольку микроорганизмам для развития необходимы вода и питательные вещества, некоторые объекты особенно склонны к колонизации и росту микробов. В трубопроводах сырой нефти, если производительность не может поддерживать критическую скорость потока, вода и твердые частицы будут выпадать из нефти и накапливаться в нижних точках трубопровода, обеспечивая отличные условия для роста бактерий. В системе нефтепроводов, если установлено, что обработка биоцидом необходима для контроля микробиологического заражения, лучшим местом для дозирования биоцида является начало соответствующей магистральной линии в координации с операцией очистки/скребкования. Биоцид должен быть водорастворимым и иметь достаточное время удерживания, чтобы продукт перешел в водную фазу. С другой стороны, биоцидная обработка пласта с целью микробиологического контроля обычно не рекомендуется, поскольку стабильность биоцида в пластовых условиях может значительно ухудшаться (например, высокая температура, высокое давление и высокая минерализация), фактическую эффективность применяемого реагента оценить непросто, а сама обработка имеет кратковременный эффект, так как закачиваемый биоцид, как правило, обрабатывает только ближнюю призабойную зону, не попадая более глубоко в пласт.

Закачка воды для поддержания пластового давления и добычи нефти является широко распространенной практикой по всему миру. Обычно подземная или морская вода обрабатывается и очищается на установках подготовки пластовой воды (УППВ) и транспортируется по сети трубопроводов в нагнетательные скважины. В зависимости от размера трубопроводной сети вода может перемещаться в течение нескольких дней, прежде чем достигнет места закачки. Длительное время пребывания и обилие питательных веществ (особенно высокое содержание сульфатов в морской воде) способствуют активности бактерий, что ухудшает качество закачиваемой воды, приводит к постоянному продуцированию коррозионно-агрессивных компонентов, которые могут стать причиной порывов трубопроводов, снижению приемистости, коррозии ствола скважины, повреждению пласта. Для защиты целостности транспортной сети и обеспечения высокого качества нагнетательной воды неокисляющий биоцид обычно дозируется в начало трубопровода после очистки и деаэрации воды на УППВ.

В зависимости от химического состава биоцидов и особенностей системы вполне возможно, что одна закачка в начале крупной сети трубопроводов не может обеспечить достаточный остаток биоцида в конце трубопровода для эффективного микробиологического контроля. Поэтому крайне важно контролировать остаточную концентрацию реагента во всей системе, особенно в большой разветвленной сети трубопроводов. При необходимости можно рассмотреть возможность установки дополнительных точек дозирования.

## Мониторинг остаточного содержания биоцидов

После того как биоцид введен в целевой объект, необходимо контролировать его остаточное содержание в разных участках системы, а также количество или активность бактерий во всей системе. Необходимо

определить, достигла ли обработка биоцидом целевого объекта и была ли получена требуемая эффективность. Этот мониторинг следует проводить регулярно. Одно из мест мониторинга (для системы трубопроводов) находится в конце участка, чтобы контролировать остаточную концентрацию биоцида для эффективного микробиологического контроля в этой последней точке (следовательно, и по всей системе, начиная от точки дозирования). Данные мониторинга должны периодически пересматриваться и служить основой для любых изменений или оптимизации программы обработки биоцидами, включая химический состав биоцидов, частоту обработки, дозировку, продолжительность и места дозирования.

Широко доступны тестовые наборы для определения концентрации активных основ биоцидов, таких как тетраakis(гидроксиметил)фосфония сульфат (ТГФС) и глутаральдегид. Тест-набор для ТГФС основан на методе йодометрического титрования с диапазоном обнаружения 0–100 ppm, который можно расширить за счет разбавления пробы водой. Тест-набор на глутаральдегид основан на его реакции с 3-метилбензотиазол-2-он гидразоном с последующим колориметрическим сравнением с цветным компаратором или спектрофотометрическим измерением при длине волны 610 нм. Обычно тест-набор имеет диапазон обнаружения 1–200 ppm. Образец, содержащий более 200 ppm глутаральдегида, следует разбавить водой. Разрешение коммерческого тест-набора для определения глутарового альдегида достаточно для повседневного мониторинга, особенно если для окончательного определения оптической плотности окрашенных растворов глутарового альдегида и индикатора используется спектрофотометр. Если требуется более точное измерение глутаральдегида, метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с УФ-детектором (365 нм) является лучшим методом для обнаружения и количественного определения глутаральдегида. Однако ВЭЖХ — это лабораторный метод, он не является подходящим инструментом для рутинного мониторинга глутаральдегида в системах нефтегазовой промышленности.

Однако в большой сети трубопроводов бывает сложно отобрать пробы воды для измерения остаточного содержания биоцида после периодической обработки реагентом со стороны добывающих скважин. Это связано с трудностями оценки времени прохождения биоцида в крупной сети трубопроводов из-за сложности сети (различные диаметры, ответвления и т.д.), а также ежедневных изменений и колебаний в работе системы (например, скорости потока). В результате контролировать остаточное содержание биоцида в различных участках разветвленной наземной инфраструктуры бывает крайне сложной задачей, даже с использованием различных тестовых наборов.

Онлайн-датчик, который обнаруживает ТГФС и/или глутаральдегид, может обеспечить мониторинг остаточной концентрации этих биоцидов в режиме реального времени в различных точках крупной трубопроводной сети. Недавно были проверены концепции обнаружения, применимые для онлайн-мониторинга ТГФС и глутаральдегида, а прототип онлайн-датчика находится в стадии разработки [5].

Новый метод измерения ТГФС основан на измерении поглощения после

реакции окислительного реагента и ТГФС. Этот простой и понятный метод можно превратить в онлайн-датчик для биоцидов на основе ТГФС. Метод был проверен на чистых ТГФС и биоцидах, содержащих ТГФС, в пресной воде и морской воде Персидского залива. Для онлайн-определения глутаральдегида используется свойство сшивания глутаральдегида для тушения сигналов флуоресценции изготовленных по индивидуальному заказу наночастиц. Чувствительность к глутаральдегиду была подтверждена в пресной и морской воде Персидского залива, содержащей чистый глутаральдегид и биоциды на его основе. Оба метода измерения также были проверены на лабораторном стенде с проточной ячейкой и соответствующими оптическими и электронными системами с диапазоном 10–1 000 ppm ТГФС или глутаральдегида. Этот диапазон охватывает широкий круг концентраций биоцидной обработки и остаточную концентрацию, встречающуюся в трубопроводных сетях в нефтегазовой промышленности [6].

### Микробиологический мониторинг эффективности обработки

Помимо мониторинга остаточного содержания биоцидов, необходимо также контролировать количество или активность микроорганизмов. Рекомендуется отбирать и анализировать пробы после каждой обработки биоцидом в различных местах. Микробиологические данные после обработки биоцидами необходимы для обнаружения и подтверждения любых недостатков применяемых технологий обработки биоцидами. Следует отметить, что анализ должен быть нацелен на адгезированные формы бактерий, а не на планктонные. Нередко после бактерицидной обработки количество бактерий в воде может увеличиваться из-за разрушения биопленок. Таким образом, установка на объект металлического купона-биозонда является наилучшим способом микробиологического мониторинга и эффективности применяемого реагента. Кроме того, динамика количества и активности бактерий в системе, обработанной биоцидом, гораздо важнее, чем единичные замеры, и для сравнения данных необходимо использовать одни и те же методы мониторинга.

Существует множество традиционных и молекулярных микробиологических методов подсчета бактерий [7–9], но для точного определения эффективности обработки биоцидами рекомендуются только те методы, которые позволяют подсчитывать живые бактерии. Наиболее широко используемым методом рутинного подсчета бактерий после обработки биоцидом является традиционный метод предельного разведения, хотя он способен обнаружить только менее 10 % микробной популяции в образце [9]. Наиболее распространенным объектом определения методом предельного разведения в полевых условиях являются сульфатвосстанавливающие бактерии (СВБ), инкубация которых занимает, как правило, 2–4 недели, прежде чем результаты подсчета станут доступными. Длительное получение результатов наличия в системе СВБ не позволяет операторам месторождений принимать быстрые контрмеры для контроля СВБ, если это необходимо.

Поскольку при рутинном мониторинге в полевых условиях предпочтение отдается скорости выполнения работ, биолюминесцентный тест АТФ второго поколения

является хорошим выбором метода мониторинга живых бактерий после обработки биоцидом [10–11]. Существует коммерчески доступный набор для тестирования АТФ, предназначенный для адгезированных форм бактерий, который позволяет получить результат за 10–15 минут. Следует отметить, что тест АТФ предназначен для общей микробной активности, а не конкретной группы микроорганизмов (например, СВБ).

Независимые от типа бактерий методы, как правило, не являются приоритетными методами для мониторинга выживших бактерий после обработки биоцидом, если эти методы не позволяют дифференцировать живые и мертвые бактерии. Метод количественной полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР), который также может измерять микробиологическую активность (мРНК) в активно метаболизирующихся клетках после воздействия биоцида, является одним из немногих эффективных методов для этой цели. Однако внедрение ПЦР-тестирования в полевой лаборатории — дело непростое по нескольким причинам. За исключением стоимости оборудования и обширного обучения, необходимого для технических специалистов, нестабильность и короткий период полураспада мРНК являются основными препятствиями для внедрения этого метода в нефтепромысловую лабораторию в качестве обычного метода мониторинга после обработки биоцидом. Другой независимый от культуры метод, который позволяет обнаружить и количественно оценить живые бактерии после обработки биоцидами, — это проточная цитометрия. Однако для работы с проточным цитометром, оптимизации параметров прибора и интерпретации данных требуется высококвалифицированный специалист. Внедрять проточную цитометрию в небольшой нефтепромысловой лаборатории в качестве рутинного метода мониторинга может оказаться непрактично.

Наконец, помимо остаточной концентрации биоцида и количества бактерий в обрабатываемой системе, можно контролировать и другие показатели, чтобы оценить эффективность бактерицидной обработки. Двумя наиболее распространенными ключевыми показателями эффективности, которые измеряются при применении биоцидов, являются скорость коррозии и количество  $H_2S$ , образующегося в системе. Скорость коррозии можно определить путем анализа потери веса на купонах (гравиметрический метод), используемых для мониторинга адгезированных форм бактерий после обработки биоцидом. Тест-полоска на ацетат свинца — это простой способ обнаружения растворенного  $H_2S$  в воде.

### Альтернативные методы микробиологического контроля

Для борьбы с огромными экономическими потерями, связанными с микробиологической активностью, в нефтегазовой промышленности широко используются биоцидные продукты широкого спектра действия. Однако существуют и другие альтернативные методы, которые применялись или могут быть применены в нефтегазовой промышленности для контроля микробиологической зараженности. Например, молибдат, нитрат и нитрит использовались для контроля метаболической активности СВБ и последующего ингибирования производства биогенного  $H_2S$  в нефтяном пласте [12–13].

## Нитраты

Закачка морской воды для поддержания пластового давления при добыче нефти является обычной практикой в нефтяной промышленности. Огромное количество сульфатов, привнесенных с закачкой морской воды, вместе с широким спектром органических веществ и продуктами их деградации в качестве доноров электронов, присутствующих в углеводородах, способствует активному росту сульфатвосстанавливающих бактерий и архей (СВБ и СВА) в пласте, трубопроводах и других объектах поверхностной инфраструктуры [14–15]. Деятельность СВБ и СВА вызывает серьезные экономические проблемы из-за токсичности образующегося  $H_2S$ . Помимо использования биоцидов широкого спектра действия, обработка нитратами и нитритами использовалась в системе закачки воды для контроля активности СВБ и, следовательно, коррозии [16–17].

Механизмы обработки нитратами для снижения активности СВБ и СВА можно резюмировать следующим образом [18]:

- ограничения роста СВБ путем содействия росту нитритвосстанавливающих бактерий (НВБ);
- повышенный окислительно-восстановительный потенциал за счет присутствия промежуточных продуктов восстановления нитратов (закиси азота и оксида азота). Производство биогенного  $H_2S$  подавляется, когда окислительно-восстановительный потенциал превышает 100 мВ;
- изменение энергетического метаболизма некоторых СВБ, использующих в качестве источника энергии нитраты вместо сульфатов;
- нитратвосстанавливающие, сульфидоокисляющие бактерии используют нитрат или нитрит для повторного окисления  $H_2S$ , что приводит к его удалению.

В результате обработки нитратами или нитритами сульфатредукция ингибируется или переключается на нитратредукцию, что снижает продуцирование биогенных сульфидов в кислой системе. Кроме того, нитритвосстанавливающие бактерии еще больше снижают количество сульфида, используя его в качестве источника энергии. Несмотря на многочисленные сообщения, показывающие успех применения нитратов в устранении биогенного производства  $H_2S$ , необходимо тщательно осознавать некоторые потенциальные негативные последствия данного подхода. При добавлении нитратов в систему заводнения количество нитратвосстанавливающих бактерий целенаправленно увеличивается и может за короткое время вырасти до очень высокой концентрации. Следствием большого количества НВБ в системе является биообрастание призабойной зоны и закупорка пород пласта-коллектора. Сообщалось [19], что непрерывная закачка нитратов приводит к увеличению давления закачки в нагнетательную скважину из-за накопления биопленки на основе НВБ, а давление снижается только при периодической обработке биоцидом. Еще одной проблемой является повышенная скорость коррозии после обработки нитратами или нитритами. Нитрит является окислителем, и высокая концентрация нитрита в обработанной системе либо из-за неполного восстановления нитрата, либо из-за неправильной дозировки нитрата или нитрита, может привести к ускорению скорости коррозии [20]. Повышенный риск коррозии также можно объяснить образованием полисульфида, неорганической

серы и тиосульфата при одновременном окислении сульфида нитратвосстанавливающими сульфидоокисляющими бактериями. Кроме того, сообщалось, что активность нитратвосстанавливающих бактерий в высоких концентрациях увеличивает микробиологическую питтинговую коррозию [21].

Успех обработки нитратами и нитритами зависит от дозировки и частоты применения, концентрации нитритов в обрабатываемой системе, а также концентрации или активности СВБ в системе. Таким образом, необходимо тщательно контролировать концентрацию нитратов и нитритов, концентрацию сульфатов и сульфидов, а также концентрацию или активность СВБ, поскольку условия на рассматриваемом объекте оказывают глубокое влияние на метаболизм микроорганизмов. Методы молекулярной микробиологии используются в нефтяной промышленности для изучения закисления пластов и эффективности обработки нитратами. Например, можно использовать ПЦР-тестирование для определения активности СВБ путем измерения мРНК.

Дозировка и частота обработки должны быть оптимизированы для конкретного объекта и скорректированы в соответствии с данными мониторинга для поддержания надлежащей концентрации нитритов, чтобы активность СВБ подавлялась, не вызывая при этом загрязнения и коррозии. Учитывая эти потенциальные риски и строгие требования к мониторингу, метод обработки нитратами или нитритами для контроля СВБ следует использовать с осторожностью.

## Бактериофаги

Бактериофаги — это вирусы, которые заражают определенную бактериальную клетку, реплицируются в инфицированной клетке и, наконец, убивают клетку-хозяина. В отличие от обычных окисляющих и неокисляющих биоцидов, которые обеспечивают уничтожение практически всех микроорганизмов за счет различных способов действия, бактериофаги нацелены только на определенные микроорганизмы и оставляют любые другие бактерии практически нетронутыми. При использовании в качестве средства микробиологического контроля специфичность уничтожения бактериофагов имеет как преимущества, так и недостатки. Используя современные технологии секвенирования ДНК, можно легко определить наиболее распространенные и наиболее опасные бактерии в конкретном объекте на уровне рода или вида. Благодаря этой информации можно разработать специфические бактериофаги, нацеленные на этот конкретный микроорганизм. Таким образом, бактериофаги не токсичны для других форм жизни. Кроме того, количество фагов быстро упадет до очень низкого уровня после нейтрализации всех клеток-мишеней. В этом отношении бактериофаги можно рассматривать как «зеленые» биоциды.

В нефтяной и газовой промышленности популяции микроорганизмов очень разнообразны и уникальны на каждом месторождении, что представляет собой огромное препятствие для применения бактериофагов в качестве средства микробиологического контроля. Все повреждающие микроорганизмы должны быть предварительно идентифицированы для каждого нефтяного месторождения или объекта, а затем должны быть разработаны специфические бактериофаги для каждой конкретной целевой группы

микроорганизмов (рода или вида). Изменения бактериального сообщества в ответ на изменение условий эксплуатации могут сделать бактериофаги неэффективными для конкретного объекта [1].

## Физические технологии

С ростом различных регуляторных ограничений, накладываемых государствами на токсичные биоциды, в нефтегазовую промышленность в качестве альтернативных методов очистки воды были внедрены нехимические физические процессы. Физические процессы уменьшают или устраняют необходимость добавления биоцидных реагентов и представляют собой более экологически чистые решения для нейтрализации бактерий. Примеры физических процессов в нефтегазовой промышленности для борьбы с бактериями включают УФ-дезинфекцию, фильтрацию и обработку ультразвуком.

УФ-излучение (100–400 нм) невидимо для человеческого глаза. Ультрафиолетовый свет с длиной волны от 200 до 300 нм обладает уникальными бактерицидными свойствами [22]. В коммерческих УФ-системах обычно используется диапазон высокой интенсивности (длина волны 254 нм). Ультрафиолетовый свет этой длины волны может проникать через клеточную стенку микроорганизмов и изменять генетический материал (ДНК), предотвращая их размножение. Хотя УФ-обработка позиционируется как альтернатива биоцидам, возможно, из-за нейтрализации 99,999 % жизнеспособных бактерий [23], фактическая эффективность дезинфекции УФ-системы зависит от многих факторов. Интенсивность УФ-излучения и время контакта, которые зависят от скорости потока воды, определяют дозу УФ-обработки (интенсивность потока энергии, мДж/см<sup>2</sup>). Микробиологическая нагрузка, а также виды бактерий в водной системе влияют на необходимую дозу УФ-излучения. Различные микроорганизмы имеют разную скорость реакции на УФ-излучение. Такие виды, как СВБ, очень чувствительны к УФ-излучению со стандартными промышленными дозами 40 мДж/см<sup>2</sup>, обеспечивающими снижение количества жизнеспособных бактерий на 99,99 % за один проход (воздействие 0,5 секунды) [24]. Однако споробразующим бактериям может потребоваться в 10 раз более высокая доза УФ-излучения, чтобы снизить их количество на 90 % по сравнению с их эквивалентным штаммом, не образующим спор. Кроме того, УФ-обработка эффективна только в отношении планктонных форм бактерий, подвергшихся непосредственному воздействию УФ-излучения. Микроорганизмы внутри биопленки или твердых отложений не будут инактивированы УФ-излучением из-за его плохой проникающей способности. Наконец, качество воды оказывает существенное влияние на эффективность УФ-обработки, влияя на коэффициент пропускания УФ-излучения. Как правило, низкое качество воды с точки зрения мутности, цвета и КВЧ приводит к более низкому УФ-излучению и снижению его эффективности, поскольку цвет и взвешенные частицы в воде поглощают и рассеивают УФ-свет и уменьшают общее доступное УФ-излучение для дезинфекции [25]. Вода с высоким содержанием КВЧ или с частицами сульфида железа не является подходящим объектом для использования УФ-обработки в качестве единственной меры микробиологического контроля. Сообщалось, что в сточных водах

с высоким содержанием КВЧ предварительная ультразвуковая обработка улучшает эффективность УФ-излучения [26]. Еще одним недостатком УФ-обработки является засорение УФ-лампы, резко снижающее интенсивность работы, что, в свою очередь, повлияет на общую эффективность обработки.

Преимущество УФ-технологии очистки воды заключается в том, что она не содержит токсичных химикатов и не образует вредных побочных продуктов в очищаемой воде. УФ-технология широко используется в продуктах питания и питьевой воде, очистке сточных вод и т.д. В нефтегазовой промышленности УФ-обеззараживание используется при закачке в нагнетательные скважины (морская или пластовая вода), гидроразрыве пласта, гидроиспытаниях трубопроводов и ряде других операций [24]. При закачке пластовой или морской воды, как на суше, так и на платформах, неконтролируемая микробиологическая активность, особенно деятельность СВБ, может привести к многочисленным негативным воздействиям на целостность нагнетательных скважин и пласта-коллектора, таким как повреждение оборудования из-за микробиологической коррозии, биообрастание и засорение нагнетательных скважин. УФ-система может использоваться для дезинфекции закачиваемой морской воды, обеспечения высокого качества закачиваемой воды и минимизации негативного воздействия бактерий. Однако, в зависимости от размера и конструкции водной системы, может также потребоваться предварительная фильтрация и обработка биоцидами (окислительными или неокисляющими) для защиты трубопроводов и конструкций до и/или после УФ-системы. При добыче сланцевого газа в пласт закачивается большой объем воды, чтобы высвободить газ, запертый в породах. Пластовая вода повторно используется в других технологических процессах после обработки и дезинфекции на месте. УФ-обеззараживание считается лучшим доступным методом эффективной нехимической очистки пластовой воды для операций ГРП. Дополнительным преимуществом УФ-технологии в нефтегазовой промышленности является то, что она устраняет некоторые проблемы несовместимости различных нефтепромысловых реагентов. Известно, что широко используемый биоцид глутаральдегид несовместим с обычным поглотителем кислорода бисульфатом натрия. Эту несовместимость можно устранить, переключившись на физический процесс УФ-обработки в качестве основного метода дезинфекции.

Хотя УФ-обработка повреждает ДНК или РНК клетки и предотвращает ее размножение, клетка не сразу умирает. Исследования показали, что УФ-излучение может индуцировать жизнеспособное, но культивируемое состояние у некоторых видов бактерий [27]. Несколько исследований показали, что бактерии в таком состоянии могут реанимироваться в подходящей среде, становиться метаболически активными и пригодными для культивирования [28]. Это создает потенциальный риск для системы водоснабжения, основанной исключительно на УФ-дезинфекции, и требует использования комбинированной стратегии дезинфекции для эффективного контроля бактериальной зараженности. Авторы [29] сравнили эффективность биоцидной обработки УФ-излучением и ТГФС городских сточных вод

и выяснили, что обработка сточных вод биоцидами, по-видимому, имеет лучшие результаты с точки зрения процентного снижения жизнеспособных микроорганизмов в системе, чем обработка УФ-излучением.

Вторым примером физических методов микробиологического контроля является ультразвуковая обработка. Механизм инактивации или уничтожения микроорганизмов ультразвуковой обработкой обусловлен главным образом истончением клеточных мембран, локализованным нагревом и образованием свободных радикалов [30]. Ультразвук может создавать акустическое давление, которое вызывает кавитационные пузырьки в жидкости. Когда эти микропузырьки схлопываются за чрезвычайно короткий промежуток времени (микросекунды), большое количество энергии высвобождается во множестве таких мест одновременно [31–32]. Создаваемые в этих местах высокие давления (порядка сотен атмосфер) и температуры (в диапазоне тысяч градусов) могут разрушить клеточную стенку и клеточную мембрану микроорганизмов и, таким образом, инактивировать бактерии [33–34]. Кроме того, во время ультразвукового процесса образуются химические соединения, такие как перекись водорода и гидроксильные радикалы, которые оказывают биоцидное воздействие на микроорганизмы [35].

Ультразвуковая обработка считается экологически безопасным методом снижения уровня микробиологической коррозии за счет уменьшения количества бактерий, вызывающих коррозию, в системе. Сообщается, что ультразвуковая энергия обладает хорошей эффективностью против планктонных форм бактерий [30] и мягких биопленок [36]. Однако эффективность ультразвуковой энергии для уничтожения микроорганизмов в продуктах коррозии или твердых отложениях весьма сомнительна. Наконец, ультразвуковая обработка может разрушить основной материал и усугубить щелевую коррозию [30].

Многие исследователи сообщали о синергическом эффекте предварительной ультразвуковой обработки в сочетании с УФ-излучением в борьбе с бактериями. Предварительная обработка ультразвуком повысила эффективность УФ-дезинфекции за счет эффекта механического сдвига и присутствия кавитационных пузырьков, которые могут разбивать крупные частицы на более мелкие, тем самым подвергая бактерии воздействию УФ-излучения для более эффективной дезинфекции [37]. Результаты этих исследований показали, что одновременное или последовательное сочетание ультразвука с УФ-излучением может повысить эффективность инактивации бактерий, особенно когда сточные воды характеризуются низким коэффициентом пропускания УФ-излучения.

Другим примером физических процессов является фильтрация, в том числе микрофильтрация (МФ) [38]. Фильтрующая мембрана удерживает частицы в зависимости от размера пор. Мембрана микрофильтра имеет размер пор  $100 \text{ нм}^{10}$  мкм и задерживает крупные коллоиды и бактерии. УФ-мембрана имеет размер пор  $2 \text{ } 100 \text{ нм}$ , может удерживать макромолекулы и белки. Мембрана обратного осмоса имеет наименьший размер пор  $0,1\text{--}1 \text{ нм}$ , может удерживать очень мелкие частицы, такие как соли щелочных металлов, и через эту мембрану

может проходить практически только чистая вода.

Закачка морской воды является очень распространенной практикой на нефтяных месторождениях для поддержания пластового давления. Однако массовое закачивание морской воды может создать проблему солеобразования, поскольку морская вода может содержать до  $3 \text{ } 000 \text{ мг/л}$  сульфат-ионов. Образование отложений сульфатов бария и стронция приводит к потере приемистости нагнетательных скважин, закупорке пород-коллекторов и эксплуатационных НКТ. Нанофильтрационные мембраны широко используются для удаления почти всех сульфатов (до 99 %) из морской воды при операциях закачки воды на месторождениях как на море, так и на суше [39]. Хотя основной целью удаления сульфатов является предотвращение образования сульфатных отложений, одним из побочных преимуществ удаления сульфатов из закачиваемой морской воды является контроль микробиологической активности в пластовых условиях. Удаление до 99 % сульфатов нанофильтрационными мембранами существенно снижает доступный сульфат для активности СВБ, что, в свою очередь, значительно уменьшает количество образующегося сероводорода в пласте. Тем не менее, необходимо отметить, что основной движущей силой строительства установок удаления сульфатов с помощью нанофильтрационных мембран в нефтяной промышленности является предотвращение образования сульфатных отложений, а не какие-либо микробиологические преимущества.

Все физические процессы микробиологического контроля имеют один общий недостаток: они не оказывают остаточного воздействия на воду. Следовательно, вода после физических процессов не защищена от деятельности бактерий. Хотя УФ, ультразвук и мембраны могут инактивировать или удалить большинство микробов (до 99,99 %, как при УФ-обработке), эти процессы не гарантируют, что выжившие бактерии не будут расти в последующих технологических процессах. Бактерии, которые уже образовались в системе после точки обработки физическими методами, не будут затронуты этими обработками. Отсутствие остаточного эффекта этих технологий в настоящее время препятствует их широкому использованию в нефтегазовой отрасли. В этой связи могут потребоваться другие меры борьбы с микробами, такие как химические реагенты — биоциды.

## Итоги

Одна из основных проблем контроля микробиологического заражения объектов нефтегазовой промышленности состоит в относительно узком спектре активных основ коммерчески используемых биоцидов. Это связано, в частности, с недостаточной эффективностью альтернативных химических реагентов, экономическим фактором, а также существующими в ряде стран законодательными ограничениями, связанными с экологическими рисками. В этой связи разработка новых продуктов в будущем, скорее всего, будет сосредоточена на биоцидных составах. Смешивание различных биоцидных активных веществ в один продукт или смешивание с другими добавками, такими как поверхностно-активные вещества, является одним из направлений разработки продуктов за счет использования

преимуществ синергетического действия различных химических веществ и, следовательно, повышения биоцидных свойств для микробиологического контроля. Кроме того, разработка новых механизмов доставки реагента в область целевого назначения является еще одной интересной задачей, которая потенциально может обеспечить улучшенный микробиологический контроль в некоторых системах, например, защита призабойных зон от биообрастания и производства биогенного H<sub>2</sub>S путем обработки закачиваемой воды биоцидным составом длительного действия с поэтапным механизмом высвобождения активной основы.

#### Выводы

В настоящей статье кратко представлены несколько альтернативных методов, включая биологические и физические процессы, для потенциального применения в нефтегазовой промышленности с целью контроля микробиологического заражения и смягчения негативных последствий деятельности микроорганизмов. Однако их широкое внедрение в нефтегазовой отрасли еще предстоит увидеть, особенно для крупных и сложных систем добычи, транспортировки и подготовки нефти и воды.

По результатам проведенных исследований сделан вывод о том, что эффективный контроль биозараженности на объектах нефтегазовой отрасли требует комплексных подходов и решений. При этом применение биоцида с подтвержденной в лабораторных условиях эффективностью может оказаться недостаточно результативным в случаях, если наблюдаются нарушения в технологии его применения или объект применения и место подачи биоцида определено некорректно. В этой связи минимизация негативных последствий микробиологического заражения объектов возможна только при принятии и реализации эффективных управленческих решений.

#### Литература

1. Валежжанин И.В. Микробиологическая зараженность нефтяных месторождений. Часть 1: Основные действующие вещества реагентов-биоцидов // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 5. С. 58–67.
2. Keasler V., De Paula R.M., 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).
3. Oh S., Tandukar M., Pavlostathis S.G. et al. Microbial community adaptation to quaternary ammonium biocides as revealed by metagenomics. Environmental microbiology, 2013, Vol. 15, issue 10, P. 2850–2864. (In Eng).
4. Grant D.M., Bott T.R. Biocide dosing strategies for biofilm. Proceedings of engineering conferences international, Santa Fe, NM, May 18–22, 2003. (In Eng).
5. Zhu X.Y., Al-Moniee M.A., Al-Saleh M.A. Methods for detecting and quantifying tetrakis(hydroxymethyl)phosphonium sulfate (THPS) in biocide products. Patent Application US17/084108, 2020. (In Eng).
6. Zhu X.Y., Al-Moniee M.A., Al-Saleh M.A. Methods for detecting and quantifying glutaraldehyde-based products in water. Patent Application US17/107829, 2020. (In Eng).
7. Whitby C., Skovhus T.L. Applied microbiology and molecular biology in oilfield systems. Introduction. Proceedings from the international symposium on applied microbiology and molecular biology in oil systems (ISMOS-2), 2009, P. 3–5. (In Eng).
8. Amann R.I., Ludwig W., Schleifer K.H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation. Microbiological reviews, 1995, Vol. 59, issue 1, P. 143–169. (In Eng).
9. Vester F., Ingvorsen K. Improved most-probable-number method to detect sulfatereducing bacteria with natural media and a radiotracer. Applied and environmental microbiology, 1998, Vol. 64, issue 6, P. 1700–1707. (In Eng).
10. Keasler V., Bennett B., Keller C. et al. Expanding the microbial monitoring toolkit: evaluation of traditional and molecular monitoring methods. International biodeterioration & biodegradation, 2013, Vol. 81, P. 51–56. (In Eng).
11. Paschoalino M., Raymond J., Sianawati E. et al. Evaluation of a glutaraldehyde/THNM combination for microbial control in four conventional oilfields. SPE International Conference on Oilfield Chemistry, Galveston, TX, 8–9 April, 2019, SPE-193594-MS. (In Eng).
12. Isa M.H., Anderson G.K. Molybdate inhibition of sulphate reduction in two-phase anaerobic digestion. Process Biochemistry, 2005, Vol. 40, issue 6, P. 2079–2089. (In Eng).
13. Kjellerup B.V., Veeh R.H., Sumithratne P. et al. Monitoring of microbial souring in chemically treated, produced-water biofilm systems using molecular techniques. Journal of industrial microbiology and biotechnology, 2005, Vol. 32, issue 4, P. 163–170. (In Eng).
14. Gittel A., Sorensen K.B., Skovhu T.L. et al. Prokaryotic community structure and sulfate reducer activity in water from high-temperature oil reservoirs with and without nitrate treatment. Applied and environmental microbiology, 2009, Vol. 75, issue 22, P. 7086–7096. (In Eng).
15. Sunde E., Torsvik T. Microbial control of hydrogen sulfide production in oil reservoirs. Petroleum Microbiology. Washington: ASM Press, 2005, P. 201–213. (In Eng).
16. Hubert C., Nemat M., Jenneman G. et al. Corrosion risk associated with microbial souring control using nitrate or nitrite. Applied microbiology & biotechnology, 2005, Vol. 68, issue 2, P. 272–282. (In Eng).
17. Myhr S., Lillebø B.-L., Sunde E. et al. Inhibition of microbial H<sub>2</sub>S production in an oil reservoir model column by nitrate injection. Applied microbiology and biotechnology, 2002, Vol. 58, issue 3, P. 400–408. (In Eng).
18. Hubert C., Nemat M., Jenneman G. et al. Containment of biogenic sulfide production in continuous up-flow packed-bed bioreactors with nitrate or nitrite. Biotechnology progress, 2003, Vol. 19, issue 2, P. 338–345. (In Eng).
19. Davidova I.A., Hicks M.S., Fedorak P.M. et al. The influence of nitrate on microbial processes oil industry production waters. Journal of industrial microbiology and biotechnology, 2001, Vol. 27, issue 2, P. 80–86. (In Eng).
20. Rempel C.L., Evitts R.W., Nemat M. Dynamics of corrosion rates associated with nitrite or nitrate mediated control of souring under biological conditions simulating an oil reservoir. Journal of industrial microbiology and biotechnology, 2006, Vol. 33, issue 10, P. 878–886. (In Eng).
21. Iino T., Ito K., Wakai S. et al. Iron corrosion induced by nonhydrogenotrophic nitrate-reducing *Prolixibacter* sp. strain MIC1-1. Applied and environmental microbiology, 2015, Vol. 81, issue 5, P. 1839–1846. (In Eng).
22. Meulemans C. The basic principles of UV-disinfection of water. Ozone: science & engineering, 1987, Vol. 9, issue 4, P. 299–313. (In Eng).
23. Mittelman M.W. Bacterial growth and biofouling control in purified water systems in biofouling and biodeterioration in industrial water systems. Proceedings of the international workshop on industrial biofouling and biocorrosion. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg: 1990, P. 133–154. (In Eng).
24. ATG Evoqua, Oil, Gas & Petrochemical UV Systems. Lancashire, UK: 2019.
25. Klanian M.G., Espinosa-Faller F.J., Nunez A. et al. Effect of turbidity on the ultraviolet disinfection performance in recirculating aquaculture system with low water exchange. Aquaculture Research, 2012, Vol. 43, issue 4, P. 595–606. (In Eng).
26. Jin X., Li Z., Xie L. et al. Synergistic effect of ultrasonic pre-treatment combined with UV irradiation for secondary effluent disinfection. Ultrasonics sonochemistry, 2013, Vol. 20, issue 6, P. 1384–1389. (In Eng).
27. Zhang S., Ye C., Lin H. et al. UV disinfection induces a VBNC state in *Escherichia coli* and *Pseudomonas aeruginosa*. Environmental science and technology, 2015, Vol. 49, issue 3, P. 1721–1728. (In Eng).
28. Al-Gabr H.M., Zheng X. Yu. Inactivation of *Aspergillus flavus* in drinking water after treatment with UV irradiation followed by chlorination. Science of the total environment, 2013, Vol. 463–464, P. 525–529. (In Eng).
29. Croese E., De Vries H., Robertson T. et al. Oil & gas water injection treatment system case study: field trial comparing biocide/UV disinfection and new monitoring techniques for mitigating MIC and reservoir souring. Corrosion Conference & Expo, New Orleans, LA, 26–30 March, 2017. NACE-2017-9114. (In Eng).
30. Pound B.G., Gofu Y., Schattner P. et al. Ultrasonic mitigation of microbiologically influenced corrosion. Corrosion, 2005, Vol. 61, issue 5, P. 452–463. (In Eng).
31. Gogate P.R., Pandit A.B. Sonophotocatalytic reactors for wastewater treatment: a critical review. AIChE Journal, 2004, Vol. 50, issue 5, P. 1051–1079. (In Eng).
32. Gogate P.R., Tayal R.K., Pandit A.B. Cavitation: a technology on the horizon. Current Science, 2006, Vol. 91, issue 1, P. 35–46. (In Eng).
33. Bhola R., Bhola S.M., Mishra B. et al.

- Microbiologically influenced corrosion and its mitigation: (a review). *Material science research India*, 2010, Vol. 7, issue 2, P. 407–412. (In Eng).
34. Piyasena P., Mohareb E., McKellar R.C. Inactivation of microbes using ultrasound: a review. *International journal of food microbiology*, 2003, Vol. 87, issue 3, P. 207–216. (In Eng).
35. Javaherdashti R. *Microbiologically Influenced Corrosion*. Springer, London: 2008. (In Eng).
36. Broekman S., Pohlmann O., Beardwood E.S. et al. Ultrasonic treatment for microbiological control of water systems. *Ultrasonics sonochemistry*, 2010, Vol. 17, issue 6, P. 1041–1048. (In Eng).
37. Naddeoa V., Landia M., Belgiorno V. Wastewater disinfection by combination of ultrasound and ultraviolet irradiation. *Journal of hazardous materials*, 2009, Vol. 168, issue 2–3, P. 925–929. (In Eng).
38. Yang Z., Zhou Y., Feng Z. et al. A review on reverse osmosis and nanofiltration membranes for water purification. *Polymers*, 2019, Vol. 11, issue 8, P. 1252–1273. (In Eng).
39. Bader M. Nanofiltration for oil-fields water injection operations: analysis of concentration polarization. *Desalination*, 2006, Vol. 201, issue 1–3, P. 106–113. (In Eng).

## ENGLISH

### Results

One of the major challenges in controlling microbiological contamination in the oil and gas industry is the relatively narrow spectrum of active bases of commercially used biocides. This is due, in particular, to the insufficient effectiveness of alternative chemical reagents, economic factors, and existing legislative restrictions in a number of countries related to environmental risks. In this regard, the development of new products in the future will most likely focus on biocidal formulations. Mixing different biocidal active substances into one product or mixing with other additives such as surfactants is one of the directions for product development by taking advantage of the synergistic action of different chemicals and, therefore, enhancing the biocidal properties for microbiological control. In addition, the development of new mechanisms for delivering the reagent to the target area is another interesting task, which can potentially provide improved microbiological control in some systems, for example, protection of wellbore zones from biofouling and production of biogenic H<sub>2</sub>S by treating the injected water with a long-acting biocide composition with a step-by-step release mechanism of the active base.

### Conclusions

This paper briefly presents several alternative methods, including biological and physical processes, for potential application in the oil and gas industry to control microbiological contamination and mitigate the negative effects of microorganisms. However, their widespread adoption in the oil and gas industry has yet to be seen, especially for large and complex oil and water production, transportation, and treatment systems. Based on the results of the studies, it was concluded that effective control of biocontamination at oil and gas facilities requires integrated approaches and solutions. At the same time, the use of a biocide with proven efficiency in laboratory conditions may not be effective enough in cases where there are violations in the technology of its application or the object of application and the place of biocide supply are incorrectly determined. In this regard, minimizing the negative consequences of microbiological contamination of facilities is possible only through the adoption and implementation of effective management decisions.

### References

- 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).
- Keasler V., De Paula R.M., 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).
- Oh S., Tandukar M., Pavlostathis S.G. et al. Microbial community adaptation to quaternary ammonium biocides as revealed by metagenomics. *Environmental microbiology*, 2013, Vol. 15, issue 10, P. 2850–2864. (In Eng).
- Grant D.M., Bott T.R. Biocide dosing strategies for biofilm. *Proceedings of engineering conferences international*, Santa Fe, NM, May 18–22, 2003. (In Eng).
- Zhu X.Y., Al-Moniee M.A., Al-Saleh M.A. Methods for detecting and quantifying tetrakis(hydroxymethyl)phosphonium sulfate (THPS) in biocide products. *Patent Application US17/084108*, 2020. (In Eng).
- Zhu X.Y., Al-Moniee M.A., Al-Saleh M.A. Methods for detecting and quantifying glutaraldehyde-based products in water. *Patent Application US17/107829*, 2020. (In Eng).
- Whitby C., Skovhus T.L. Applied microbiology and molecular biology in oilfield systems. *Introduction*. Proceedings from the international symposium on applied microbiology and molecular biology in oil systems (ISMOS-2), 2009, P. 3–5. (In Eng).
- Amann R.L., Ludwig W., Schleifer K.H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation. *Microbiological reviews*, 1995, Vol. 59, issue 1, P. 143–169. (In Eng).
- Vester F., Ingvorsen K. Improved most-probable-number method to detect sulfatereducing bacteria with natural media and a radiotracer. *Applied and environmental microbiology*, 1998, Vol. 64, issue 6, P. 1700–1707. (In Eng).
- Keasler V., Bennett B., Keller C. et al. Expanding the microbial monitoring toolkit: evaluation of traditional and molecular monitoring methods. *International biodeterioration & biodegradation*, 2013, Vol. 81, P. 51–56. (In Eng).
- Paschoalino M., Raymond J., Sianawati E. et al. Evaluation of a glutaraldehyde/THNM combination for microbial control in four conventional oilfields. *SPE International Conference on Oilfield Chemistry*, Galveston, TX, 8–9 April, 2019, SPE-193594-MS. (In Eng).
- Isa M.H., Anderson G.K. Molybdate inhibition of sulphate reduction in two-phase anaerobic digestion. *Process Biochemistry*, 2005, Vol. 40, issue 6, P. 2079–2089. (In Eng).
- Kjellerup B.V., Veeh R.H., Sumithraratne P. et al. Monitoring of microbial souring in chemically treated, produced-water biofilm systems using molecular techniques. *Journal of industrial microbiology and biotechnology*, 2005, Vol. 32, issue 4, P. 163–170. (In Eng).
- Gittel A., Sorensen K.B., Skovhu T.L. et al. Prokaryotic community structure and sulfate reducer activity in water from high-temperature oil reservoirs with and without nitrate treatment. *Applied and environmental microbiology*, 2009, Vol. 75, issue 22, P. 7086–7096. (In Eng).
- Sunde E., Torsvik T. Microbial control of hydrogen sulfide production in oil reservoirs. *Petroleum Microbiology*. Washington: ASM Press, 2005, P. 201–213. (In Eng).
- Hubert C., Nemati M., Jenneman G. et al. Corrosion risk associated with microbial souring control using nitrate or nitrite. *Applied microbiology & biotechnology*, 2005, Vol. 68, issue 2, P. 272–282. (In Eng).
- Myhr S., Lillebø B.-L., Sunde E. et al. Inhibition of microbial H<sub>2</sub>S production in an oil reservoir model column by nitrate injection. *Applied microbiology and biotechnology*, 2002, Vol. 58, issue 3, P. 400–408. (In Eng).
- Hubert C., Nemati M., Jenneman G. et al. Containment of biogenic sulfide production in continuous up-flow packed-bed bioreactors with nitrate or nitrite. *Biotechnology progress*, 2003, Vol. 19, issue 2, P. 338–345. (In Eng).
- Davidova I.A., Hicks M.S., Fedorak P.M. et al. The influence of nitrate on microbial processes oil industry production waters. *Journal of industrial microbiology and biotechnology*, 2001, Vol. 27, issue 2, P. 80–86. (In Eng).
- Rempel C.L., Evitts R.W., Nemati M. Dynamics of corrosion rates associated with nitrite or nitrate mediated control of souring under biological conditions simulating an oil reservoir. *Journal of industrial microbiology and biotechnology*, 2006, Vol. 33, issue 10, P. 878–886. (In Eng).
- Iino T., Ito K., Wakai S. et al. Iron corrosion induced by nonhydrogenotrophic nitrate-reducing *Prolixibacter* sp. strain MIC1-1. *Applied and environmental microbiology*, 2015, Vol. 81, issue 5, P. 1839–1846. (In Eng).
- Meulemans C. The basic principles of UV-disinfection of water. *Ozone: science & engineering*, 1987, Vol. 9, issue 4, P. 299–313. (In Eng).
- Mittelman M.W. Bacterial growth and biofouling control in purified water

- systems in biofouling and biodeterioration in industrial water systems. Proceedings of the international workshop on industrial biofouling and biocorrosion. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg: 1990, P. 133–154. (In Eng).
24. ATG Evoqua, Oil, Gas & Petrochemical UV Systems. Lancashire, UK: 2019.
25. Klanian M.G., Espinosa-Faller F.J., Nunez A. et al. Effect of turbidity on the ultraviolet disinfection performance in recirculating aquaculture system with low water exchange. *Aquaculture Research*, 2012, Vol. 43, issue 4, P. 595–606. (In Eng).
26. Jin X., Li Z., Xie L. et al. Synergistic effect of ultrasonic pre-treatment combined with UV irradiation for secondary effluent disinfection. *Ultrasonics sonochemistry*, 2013, Vol. 20, issue 6, P. 1384–1389. (In Eng).
27. Zhang S., Ye C., Lin H. et al. UV disinfection induces a VBNC state in *Escherichia coli* and *Pseudomonas aeruginosa*. *Environmental science and technology*, 2015, Vol. 49, issue 3, P. 1721–1728. (In Eng).
28. Al-Gabr H.M., Zheng X. Yu. Inactivation of *Aspergillus flavus* in drinking water after treatment with UV irradiation followed by chlorination, *Science of the Total Environment* 463 (2013) 525–529. (In Eng).
29. Croese E., De Vries H., Robertson T. et al. Oil & gas water injection treatment system case study: field trial comparing biocide/UV disinfection and new monitoring techniques for mitigating MIC and reservoir souring. *Corrosion Conference & Expo*, New Orleans, LA, 26–30 March, 2017. NACE-2017-9114. (In Eng).
30. Pound B.G., Gorfu Y., Schattner P. et al. Ultrasonic mitigation of microbiologically influenced corrosion. *Corrosion*, 2005, Vol. 61, issue 5, P. 452–463.
31. Gogate P.R., Pandit A.B. Sonophotocatalytic reactors for wastewater treatment: a critical review. *AIChE Journal*, 2004, Vol. 50, issue 5, P. 1051–1079. (In Eng).
32. Gogate P.R., Tayal R.K., Pandit A.B. Cavitation: a technology on the horizon. *Current Science*, 2006, Vol. 91, issue 1, P. 35–46. (In Eng).
33. Bholra R., Bholra S.M., Mishra B. et al. Microbiologically influenced corrosion and its mitigation: (a review). *Material science research India*, 2010, Vol. 7, issue 2, P. 407–412. (In Eng).
34. Piyasena P., Mohareb E., McKellar R.C. Inactivation of microbes using ultrasound: a review. *International journal of food microbiology*, 2003, Vol. 87, issue 3, P. 207–216. (In Eng).
35. Javaherdashti R. *Microbiologically Influenced Corrosion*. Springer, London: 2008. (In Eng).
36. Broekman S., Pohlmann O., Beardwood E.S. et al. Ultrasonic treatment for microbiological control of water systems. *Ultrasonics sonochemistry*, 2010, Vol. 17, issue 6, P. 1041–1048. (In Eng).
37. Naddeoa V., Landia M., Belgiorno V. Wastewater disinfection by combination of ultrasound and ultraviolet irradiation. *Journal of hazardous materials*, 2009, Vol. 168, issue 2–3, P. 925–929. (In Eng).
38. Yang Z., Zhou Y., Feng Z. et al. A review on reverse osmosis and nanofiltration membranes for water purification. *Polymers*, 2019, Vol. 11, issue 8, P. 1252–1273. (In Eng).
39. Bader M. Nanofiltration for oil-fields water injection operations: analysis of concentration polarization. *Desalination*, 2006, Vol. 201, issue 1–3, P. 106–113. (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](mailto:valekzhaniniv@bnipi.rosneft.ru)

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



**expoz.ru**

**3D**

**АНИМАЦИОННЫЕ  
РОЛИКИ**