

УДК 622.276.7.2
МРНТИ 52.47.25

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108660>

Получена: 14.07.2023.

Одобрена: 09.11.2023.

Опубликована: 30.12.2023.

Оригинальное исследование

Повышение эффективности применения бактерицида при использовании морской воды в системе поддержания пластового давления

С.Х. Биджиева, Н.К. Нурсеитов, Т.Б. Калмуханова, М.С. Утепов

Филиал КМГ Инжиниринг "КазНИПИМунайгаз", г. Актау, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. На месторождении Узень с 2018 г. с целью изучения и контроля микробиологической зараженности сульфатовосстанавливающими бактериями (далее – СВБ) промышленных сред проводится полномасштабная бактерицидная обработка и мониторинг эффективности применения реагентов. На оборудованных точках контроля производится отбор проб воды на содержание клеток СВБ до и после закачки бактерицида.

Цель. Снизить интенсивность сульфидогенеза на месторождении и, как следствие, концентрацию сероводорода в попутно добываемом газе.

Материалы и методы. Поскольку применяемая технология закачки бактерицида ударными дозировками не позволяла достичь стабильного снижения концентрации сероводорода, она была заменена на технологию постоянной закачки бактерицида в морскую воду дозировкой 40 мг/л в экспериментальном режиме. Данная технология показала низкую эффективность, значения концентраций сероводорода (H_2S) варьировали в пределах 352–379 ppm, ежемесячный расход реагента при этом увеличился на 40%. На основании полученных данных о неэффективности постоянная закачка бактерицида на НСМ-4 была остановлена и предложена новая технология закачки бактерицида, направленная на подавление не только планктонных, но и адгезированных форм СВБ.

Результаты. Закачка бактерицида по новой технологии показала значительную эффективность, которая оценивалась по снижению концентрации сероводорода в попутно добываемом газе в среднем по месторождению на 45%.

Заключение. Предложенная новая технология закачки бактерицида позволила эффективно подавить активность сульфидогенных микроорганизмов и снизить уровень биогенного сероводорода на месторождении.

Ключевые слова: бактерицид, сероводород, сульфатовосстанавливающие бактерии, сульфатредукция, бактерицидная обработка.

Как цитировать:

Биджиева С.Х., Нурсеитов Н.К., Калмуханова Т.Б., Утепов М.С. Экспериментальное изучение растворения карбонатных образцов с применением рентгеновской микрокомпьютерной томографии // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2023. Том 5, №4. С. 48–59. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108660>.

UDC 622.276.7.2
CSCSTI 52.47.25

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108660>

Received: 14.07.2023.

Accepted: 09.11.2023.

Published: 30.12.2023

Original article

Increasing the efficiency of bactericide use when using seawater in a reservoir pressure maintenance system

Salimat Kh. Bidzhieva, Nauruzbek K. Nurseitov, Tilektes B. Kalmukhanova,
Maksat S. Utepov

Branch of KMG Engineering LLP KazNIPImunaigaz, Aktau, Kazakhstan

ABSTRACT

Rationale: Since 2018, at the Uzen oilfield, in order to study and control the microbiological contamination with sulfate-reducing bacteria (hereinafter referred to as SRB) of oilfield environment, full-scale bactericidal treatment and monitoring of the effectiveness of reagent use have been carried out. At the equipped control points, water samples are taken for the content of SRB cells before and after injection of the bactericide.

Target: Reduce the intensity of sulfidogenesis at the oilfield and, as a consequence, the concentration of hydrogen sulfide in the associated gas.

Materials and methods: Since the applied technology of injecting the bactericide in shock dosages did not allow achieving a stable reduction in the concentration of hydrogen sulfide, it was replaced by the technology of constantly injecting the bactericide into seawater at a dosage of 40 mg/l in an experimental mode. This technology showed low efficiency, hydrogen sulfide (H₂S) concentrations varied between 352–379 ppm, and the monthly consumption of the reagent increased by 40%. Based on the obtained data on ineffectiveness, the constant injection of bactericide at MPS-4 was stopped and a new technology for injection of bactericide was proposed, aimed at suppressing not only planktonic, but also adherent forms of SRB.

Results: Results. Injection of the bactericide using the new technology showed significant efficiency, which was assessed by reducing the concentration of hydrogen sulfide in the associated gas by an average of 45% across the oilfield.

Conclusion: The proposed new technology for injecting a bactericide made it possible to effectively suppress the activity of sulfidogenic microorganisms and reduce the level of biogenic hydrogen sulfide in the oilfield.

Keywords: *bactericide, hydrogen sulfide, sulfate-reducing bacteria, sulfate reduction, bactericidal treatment.*

To cite this article:

Bidzhieva SK, Nurseitov NK, Kalmukhanova TB, Utepov MS. Experimental study of dissolution of carbonate samples using X-ray microcomputed tomography. *Kazakhstan journal for oil & gas industry*. 2023;5(4):48–59. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108660>.

ӨОЖ 622.276.7.2

ҒТАХР 52.47.25

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108660>

Қабылданды: 14.07.2023.

Мақұлданды: 09.11.2023.

Жарияланды: 30.12.2023.

Түпұнсақ зерттеу

Қабат қысымын ұстау жүйесінде теңіз суын пайдалану арқылы бактерицидтерді қолдану тиімділігін арттыру

С.Х. Биджиева, Н.Қ. Нұрсейітов, Т.Б. Қалмұханова, М.С. Өтепов
ҚМГ Инжиниринг «ҚазНИПИмұнайгаз» филиалы, Ақтау қаласы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

Негіздеу. Өзен кен орнында 2018 жылдан бастап кәсіпшілік орталарының сульфатты қалпына келтіретін бактериялармен (бұдан әрі – СҚБ) микробиологиялық ластануын зерттеу және бақылау мақсатында толық көлемде бактерицидтік өңдеу және реагенттерді қолдану тиімділігіне мониторинг жүргізілуде. Жабдықталған бақылау пункттерінде бактерицидті енгізгенге дейін және одан кейінде СҚБ жасушаларының құрамына су сынамалары алынады.

Мақсаты. Кен орнындағы сульфидогенездің қарқындылығын және нәтижесінде өндірілетін ілеспе газдағы күкіртсутек концентрациясын төмендету.

Материалдар мен әдістер. Қолданылатын технология бактерицидті жоғары дозамен айдау күкіртсутек концентрациясының тұрақты төмендеуіне қол жеткізе алмағандықтан, ол эксперименттік режимде 40 мг/л дозада теңіз суына бактерицидті тұрақты айдау технологиясымен ауыстырылды. Бұл технология төмен тиімділікті көрсетті, күкіртсутек концентрациясының мәнделері (H_2S) 352–379 ppm аралығында өзгерді, бұл ретте реагенттің ай сайынғы шығыны 40%-ға өсті. Тиімсіздігі туралы алынған мәліметтер негізінде НСМ-4-ке бактерицидтерді үнемі айдау тоқтатылды және тек планктондық ғана емес, сонымен қатар адгезияланған СҚБ формаларын басуға бағытталған бактерицидті айдаудың жаңа технологиясы ұсынылды.

Нәтижелері. Жаңа технология бойынша бактерицидті айдау айтарлықтай тиімділікті көрсетті, ол кен орны бойынша жол бойында өндірілетін газдағы күкіртсутек концентрациясының орташа есеппен 45%-ға төмендеуі бойынша бағаланды.

Қорытынды. Ұсынылған бактерицидті айдаудың жаңа технологиясы сульфидогенді микроорганизмдердің белсенділігін тиімді тежеуге және кен орнындағы биогенді күкіртті сутектің деңгейін төмендетуге мүмкіндік берді.

Негізгі сөздер: бактерицид, күкіртсутек, сульфатты қалпына келтіретін бактериялар, сульфатты қалпына келтіру, бактерицид айдау.

Дәйексөз келтіру үшін :

Биджиева С.Х., Нұрсейітов Н.Қ., Қалмұханова Т.Б., Өтепов М.С. Қабат қысымын ұстау жүйесінде теңіз суын пайдалану арқылы бактерицидтерді қолдану тиімділігін арттыру // *Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы*. 2023. 5 том, №4, 48–59 б. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108660>.

Введение

Известно, что закачка морской воды для поддержания пластового давления (далее – ППД) приводит к множеству проблем при добыче и транспортировке нефти и газа. Наличие растворенного в морской воде кислорода приводит к быстрому коррозионному износу металлических конструкций нефтепромышленного оборудования. Закачка морской воды вкупе с температурой среды определяют состав и функциональную активность прокариот в пластовых водах. Сульфатсодержащая морская вода активирует восстановление сульфатов и приводит к накоплению сульфидов в пластовой воде, нефти и газе [1]. В водных системах сульфид может существовать в виде S^{2-} , HS^- и H_2S в зависимости от pH и образовывать нерастворимые соли с катионами Sr^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Ag^+ , Hg^{2+} , Pb^{2+} , Sn^{2+} , Cu^{2+} . Сульфатвосстанавливающие бактерии (далее – СВБ), представленные обширной группой анаэробных микроорганизмов, считаются основными продуцентами биогенных сульфидов (FeS , H_2S и др.), однако показано, что бродильные микроорганизмы, например, тиосульфат- и серавосстанавливающие бактерии встречаются на нефтяных месторождениях в большем количестве и также могут быть ответственны за образование сульфидов [2]. Таким образом, биогенный сульфидогенез происходит в результате ферментативного восстановления не только сульфата, но также тиосульфата, сульфита или элементарной серы до сульфида в процессе энергетического метаболизма [3]. Продукты жизнедеятельности сульфидогенных микроорганизмов вносят дополнительный вклад в развитие коррозионных процессов, повышают стоимость добычи и переработки нефти и способствуют появлению ряда экологических проблем.

В нефтяных резервуарах с высокой температурой пласта ($>100^\circ C$) сульфидное заражение может иметь абиогенный характер. Известно несколько механизмов образования абиогенного сульфида: термическое разложение серосодержащих углеводородов (меркаптанов, сульфидов, сернистых гетероциклов), растворение пирита (FeS_2) или термохимическое восстановление сульфатов [4]. Преобладание определенного механизма абиогенного сульфидогенеза зависит от породы коллектора, состава нефти, температурного режима пласта и акватермолиза [5].

Согласно литературным данным [6], СВБ в нефтеносных коллекторах могут иметь как автохтонное, так и аллохтонное происхождение, будучи внесёнными в коллекторную систему в процессе разработки месторождения или на этапе добычи нефти.

Одним из распространенных способов борьбы с сероводородным заражением месторождения является использование бактерицидов, которые неспецифически подавляют рост микроорганизмов, угнетая процессы бактериальной жизнедеятельности, в т.ч. сульфидогенеза.

Нефтегазовое месторождение Узень, расположенное в степной части п-ова Мангышлак в Мангистауской области, введено в промышленную разработку в 1965 г. Для месторождения характерно многопластовое сложное геологическое строение. В разрезе отложений выделяют 25 продуктивных горизонтов преимущественно верхне-среднеюрского возраста. ППД на месторождении в процессе вторичной добычи нефти осуществляется посредством закачивания морской воды Каспийского моря.

Узень является высокотемпературным месторождением ($57-68^\circ C$). Закачка морской воды привела к снижению температуры в призабойной зоне до $40-46^\circ C$. Масштабные многопрофильные исследования микробного сообщества пластовых вод, проведённые на месторождении, выявили преобладание бактерий с бродильным типом метаболизма, принадлежащих к типам Desulfobacterota (55,7%), Firmicutes (18,0%), Chloroflexi (5,3%) и Thermotogae (4,1%). В состав сообщества также вошли термофильные и мезофильные сульфатредуцирующие бактерии родов Desulfotomaculum (3,5%), Desulfonauticus (2,0%), Desulfovibrio (1,25%), Desulfoglaeba (2,0%), а также бродильные бактерии рода Thermovirga (2,5%), способные восстанавливать серу до сульфида [7].

На фоне высокого содержания H_2S в газе на месторождении Узень в 1976 г. в процесс эксплуатации введен план по закачке бактерицида с целью контроля микробиологической заражённости и подавления сульфидогенной активности бактериального сообщества пласта. За период с 1976 г. по настоящее время на месторождении применялись разные бактерициды, неоднократно менялась технология закачки. За длительный период применения бактерицидной обработки объектов неоднократно удавалось эффективно снижать уровень сероводорода. Однако в силу различных факторов удерживать результат на низких показателях удавалось непродолжительное время. Подробно и поэтапно технологии закачки и результаты применяемых технологий с 1976 по 2021 г. описаны ранее [8]. В указанный период отмечались этапы активных и эффективных закачек и длительного перерыва (до 10 лет) по причине отсутствия реагента, этапы успешного подавления

сульфидогенеза и безуспешные закачки по причине использования некачественного бактерицида или неэффективной технологии, неоднократное чередование технологий и бактерицидов и пр. [8].

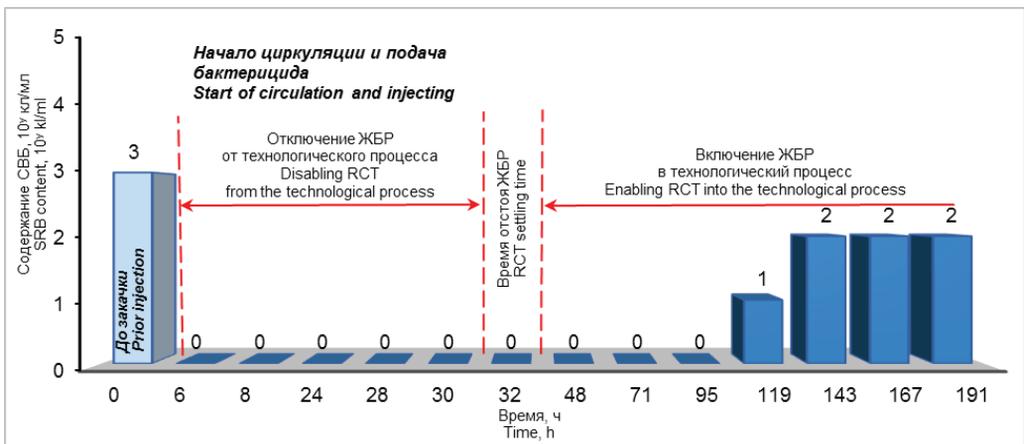
Применение морской и сточной воды в системе ППД на месторождении Узень

Основной зоной повышенного содержания H₂S на месторождении Узень является зона влияния морской воды. В закачиваемой воде соотношение морской и сточной вод непостоянно и меняется каждый месяц.

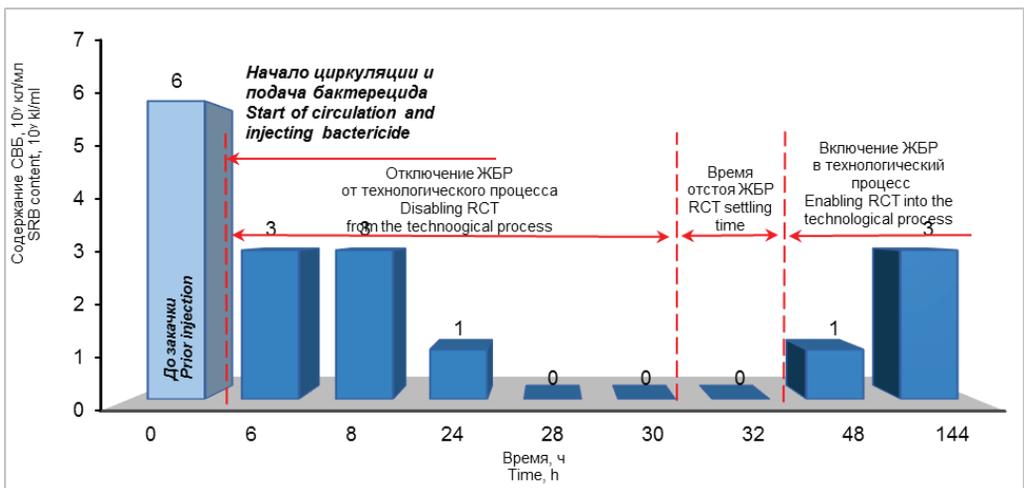
Согласно данным за 2023 г., нагнетаемая вода состоит:

- на 100% из морской воды на блочной кустовой насосной станции (далее – БКНС) 2 и 10;
- более 50% на БКНС 1а и 7;
- около 50% на БКНС 2а;
- до 5% на БКНС 8/9.

При смешивании пластовой воды с высоким содержанием катионов бария, кальция и/или стронция с морской водой, содержащей значительное количество сульфатов, происходит выпадение нерастворимых минеральных солей – сульфатов и карбонатов [9]. Постоянное смешивание несовместимых вод (морской и пластовой) на БКНС влечёт за собой ряд проблем, которые требуют значительных затрат времени



a)



б)

Рисунок 1. Эффективное подавление развития СВБ в результате применения рециркуляционной бактерицидной обработки на HCM-4 ЖБР №1 и 2

Figure 1. Effective suppression of the SRB development as a result of the use of recirculating bactericidal treatment on MPS -4 RCT №1 and 2.

а) ЖБР №1 / RCT No. 1; б) ЖБР №2 / RCT No. 2

и ресурсов, поскольку приводит к увеличению содержания сероводорода, развитию кислородной, карбонатной и сульфидной коррозии, выпадению неорганических солей и закупориванию перфорационных каналов, уменьшению пропускной способности труб как в наземной инфраструктуре, так и в призабойной зоне пласта скважин.

Мониторинг формирования планктонных и адгезированных форм СВБ в резервуарах в условиях месторождения

Эффективность бактерицидной обработки на месторождении также контролируется мониторингом численности СВБ на объектах. Для оценки динамики количества СВБ по результатам бактерицидной обработки железобетонных резервуаров (далее – ЖБР) отбор проб и микробиологические исследования содержания СВБ в воде проводились до и во время рециркуляции, во время отстоя и после запуска резервуара. Культивировали посева при температуре, соответствующей температуре исследуемого объекта. В мировой практике безопасным количеством СВБ считается содержание не более 10^2 кл/мл [8].

Было отмечено, что во время бактерицидной обработки с рециркуляцией жидкости в резервуаре происходит полное подавление активности СВБ. После обработки и запуска резервуара в технологический процесс количество СВБ на выходе из резервуара не превышает количество СВБ на входе,

что свидетельствует о высокой эффективности и предпочтительности рециркуляционной бактерицидной обработки объектов (рис. 1).

Известно, что адгезированные СВБ обладают большей устойчивостью к действию бактерицидов, чем планктонные бактерии. Исследование эффективности бактерицидной обработки адгезированных форм СВБ в ЖБР с морской водой на HCM-4 были проведены по следующей схеме

- «ударная» бактерицидная обработка с рециркуляцией ЖБР;
- установка металлических купонов для формирования адгезированных форм СВБ;
- извлечение купонов после установки через 20 ч и через 18 сут.

В табл. 1 приведены результаты микробиологического анализа адгезированных форм СВБ. На HCM-4 во время проведения работ производилась постоянная закачка бактерицида в дозировке 40 мг/л. В приведенном исследовании проводилась дополнительная бактерицидная обработка ЖБР «ударной» дозировкой 600 мг/л с рециркуляцией и последующим периодом отстоя (общее время обработки составило 32 ч). Купоны устанавливали в ЖБР через 24 ч после запуска ЖБР в технологический процесс. Уровень воды в резервуаре составлял 3,8 м.

Результаты исследования показывают, что после обработки ЖБР «ударными» дозами с рециркуляцией совместно с применением постоянной закачки низкой дозировки в 40 мг/л, после его подключения в технологический

Таблица 1. Определение адгезированных форм СВБ на HCM-4
Table 1. Definition of adherent SRB forms on MPS-4

№ п/п No.	Точка отбора проб на определение СВБ Sampling point for SRB determination	Кол-во СВБ, кл/мл Number of SRB, cells/ml	Примечание Note
1	ЖБР №2, верхний уровень (купоны установлены на высоте 2,5 м от дна резервуара) RCT № 2, upper level (coupons installed at a height of 2.5 m from the bottom of the tank)	103	Через 20 ч инкубации купоны были извлечены для определения адгезированных форм СВБ. After 20 h of incubation coupons were removed to determine the adherent forms of SRB.
	ЖБР №2, нижний уровень (купоны установлены на высоте 1,8 м от дна резервуара) RCT № 2, lower level (coupons installed at a height of 1.8 m from the bottom of the tank)	102	
2	ЖБР №2, верхний уровень (купоны установлены на высоте 2,5 м от дна резервуара) RCT № 2, upper level (coupons installed at a height of 2.5 m from the bottom of the tank)	105	Через 18 сут купоны были извлечены для определения адгезированных форм СВБ. After 18 days the coupons were removed to determine the adherent forms of SRB. На входе HCM-4 за время проведения исследования проводилась постоянная закачка бактерицида с дозировкой 40 мг/л. At the MPS-4 inlet during the study, a constant injection of bactericide with a dosage of 40 mg/l was carried out.
	ЖБР №2, нижний уровень (купоны установлены на высоте 1,8 м от дна резервуара) RCT № 2, lower level (coupons installed at a height of 1.8 m from the bottom of the tank)	105	

процесс в течение 18 сут происходит накопление адгезированных форм СВБ на установленных купонах (количество клеток увеличивается с 102–103 до 105 кл/мл), а, значит, и на внутренних стенках ЖБР и прочих промысловых объектов, контактирующих с морской водой. Данный эксперимент свидетельствует о высокой эффективности «ударной» обработки и низкой эффективности постоянной закачки малых доз. Эти выводы подтверждались также результатами анализа содержания сероводорода при постоянной закачке бактерицида с дозировкой 40 мг/л, которые свидетельствовали о неэффективности данной технологии. Интенсивность формирования адгезированных биопленок может значительно различаться для объектов, контактирующих с разными водами (сточная, морская, смешанная).

Технологии бактерицидной обработки объектов на месторождении Узень с целью подавления биогенного сульфидогенеза

В настоящее время на месторождении Узень остро стоит проблема биогенного сульфидогенеза и сульфидной коррозии. Мониторинг концентрации сероводорода и скорости коррозии на месторождении подтверждает, что коррозия в значительной степени имеет сульфидное происхождение,

при этом наибольшее осложнение наблюдается в зонах закачки морской воды, в меньшей степени – в зоне закачки смешанной (морской и пластовой) и сточной (пластовой) вод. На рис. 2 показана зависимость степени сульфидной заражённости от закачиваемой воды. На БКНС-1 длительное время закачивали морскую воду, что привело к значительному росту содержания сероводорода в попутно добываемом газе. С 2019 г. было принято решение заменить морскую воду на сточную, однако борьба с высокими концентрациями сероводорода на этом участке продолжается по настоящее время. Для подавления сульфидогенеза и коррозионных процессов используется ряд методов, в т.ч. применение бактерицидов и ингибиторов коррозии.

С 2018 г. на месторождении Узень проводилась масштабная бактерицидная обработка. Закачка велась бактерицидами разных марок и производителей по следующей схеме: постоянная закачка и ежеквартальная ударная закачка на НСМ-4, ежемесячная ударная закачка на ЦППН, УПСВ-1 и 2. Мониторинг эффективности бактерицидных обработок осуществляется по динамике снижения содержания сероводорода в попутно добываемом газе, отобранном на групповых установках (далее – ГУ).

За длительный период наблюдений было отмечено, что постоянная обработка объектов

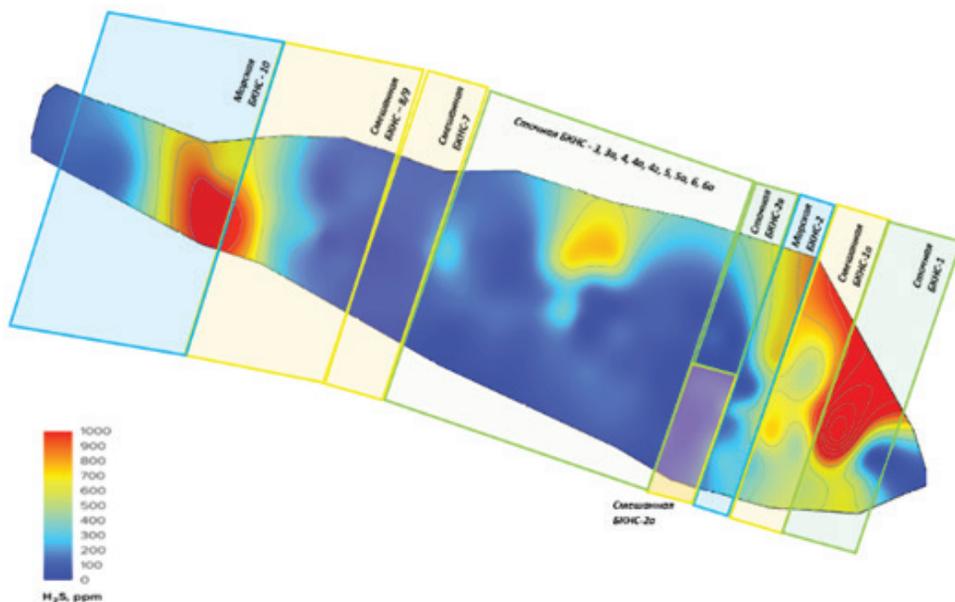


Рисунок 2. Карта зон закачки сточной, смешанной и морской воды на месторождении Узень и распределение содержания сероводорода (по состоянию на март 2023 г.)

Figure 2. Map of waste, mixed and sea water injection zones at the Uzen oilfield and distribution of hydrogen sulfide content (as of March 2023)

малыми дозами совместно с периодической обработкой ударными дозами бактерицида эффективно снижала уровень сероводорода. Однако в силу различных факторов, таких как срыв поставок реагента, поставки некачественного реагента и пр., удерживать уровень сероводорода на низких показателях удавалось в течение непродолжительного времени, в связи с чем наблюдались колебания концентрации сероводорода в среднем от 74 до 350 ppm. Пиковое снижение сероводорода отмечалось в октябре 2020 г. и соответствовало значению 34 ppm. Этот период совпал со снижением добычи и простоем скважин. Максимальное значение концентрации сероводорода за период с 2018 по 2023 гг. составляло 419 ppm и было отмечено в ноябре 2021 г. после остановки закачки бактерицида на период продолжительностью 7 мес. (апрель – октябрь 2021 г.).

В 2021 г. обработка производилась бактерицидом по следующей схеме:

- «ударная» обработка НСМ-4 3 раза в месяц (200 мг/л в течение 24 ч);

- «ударная» обработка УПСВ-1,2 и ЦППН 1 раз в месяц (200 мг/л в течение 24 ч). Такая технология закачки позволяла удерживать уровень сероводорода на средних значениях до 155 ppm. В результате остановки закачки бактерицида в апреле 2021 г. отмечался резкий скачок содержания сероводорода до значения 390 ppm [8]. Содержание сероводорода сохранялось на высоком уровне до ноября 2021 г. и доходило до пикового значения 419 ppm (рис. 3).

Технология «ударных закачек», применявшаяся на месторождении с января по август 2022 г., заключалась в обработке бактерицидом дозировкой 200 мг/л: резервуары со сточной водой (УПСВ-1,2 и ЦППН) – 1 раз в месяц, резервуары с нагнетаемой морской водой (НСМ-4) – до 3 раз в месяц. Для более качественной обработки коллекторов НСМ-4 по рекомендации филиала ТОО «КМГ Инжиниринг» «КазНИПИМунайгаз» производилась рециркуляция морской воды в резервуарах с подачей бактерицида. Применение данной технологии не дало стабильного эффекта в снижении содержания сероводорода. Наилучший результат был достигнут в августе: детектируемое количество сероводорода составило 184,2 ppm.

С 26.08.2022 г. на НСМ-4 была начата постоянная закачка бактерицида в морскую воду с дозировкой 40 мг/л. Такое изменение технологии было введено в тестовом режиме сроком на 3 мес. Технология постоянной закачки малых доз оказалась неэффективна и экономически невыгодна: значения концентрации H_2S в течение 3 тестовых меся-

цев варьировались в пределах 352–379 ppm, при этом ежемесячный расход реагента увеличился на 40%. На основании результатов применения экспериментальной технологии в начале декабря 2022 г. постоянная закачка бактерицида была остановлена.

Новая технология подразумевала:

1. Увеличение дозировки для «ударной» обработки (400 мг/л).

2. Проведение бактерицидной обработки резервуаров (сточной воды) только после зачистки от донных отложений.

3. Увеличение количества адресных «ударных» обработок нагнетательных скважин и БКНС (400 мг/л).

4. Увеличение дозировки для закачки в нагнетательные скважины до 2000 мг/л.

Согласно новой технологии, с февраля 2023 г. закачку бактерицида проводили по следующей схеме: «ударная» обработка УПСВ-1,2 и ЦППН 1 раз в квартал, «ударная» обработка НСМ-4 – до 2 раз в месяц. Для улучшения качества обработки и охвата большего количества проблемных участков проведены адресные «ударные» закачки бактерицида на БКНС-1, 1а, 2а, 2, 4г, 8/9, 10 и в нагнетательные скважины дозировкой 2000 мг/л.

Закачка бактерицида по новой технологии, описанной выше, за период с февраля по май 2023 г. показала значительную эффективность, которая оценивалась по снижению концентрации сероводорода в попутно добываемом газе в среднем по месторождению на 45% (рис. 4).

Адресная закачка бактерицида

По результатам проведения адресных «ударных» обработок через КНС и нагнетательные скважины отмечен значительный положительный эффект, который оценивался по снижению уровня сероводорода на обрабатываемых объектах. Эффект от таких обработок сохраняется не более 1 мес.

Согласно проведенным исследованиям, зона сульфатредукции приходится на радиус 2–5 м в призабойной зоне скважины. Ранее были проведены исследования, которые подразумевали отбор проб в результате самоизлива из нагнетательной скважины с целью определения СВБ, сульфатов и H_2S через определённые интервалы времени в процессе излива. Было отмечено, что в начале излива уменьшалось количество сульфатов и изменялось количество сероводорода, однако со временем их концентрации выходили на стабильный уровень. По результатам данного эксперимента был рассчитан примерный радиус зоны активной сульфатредукции в скважине. На данный радиус и объём (исходя

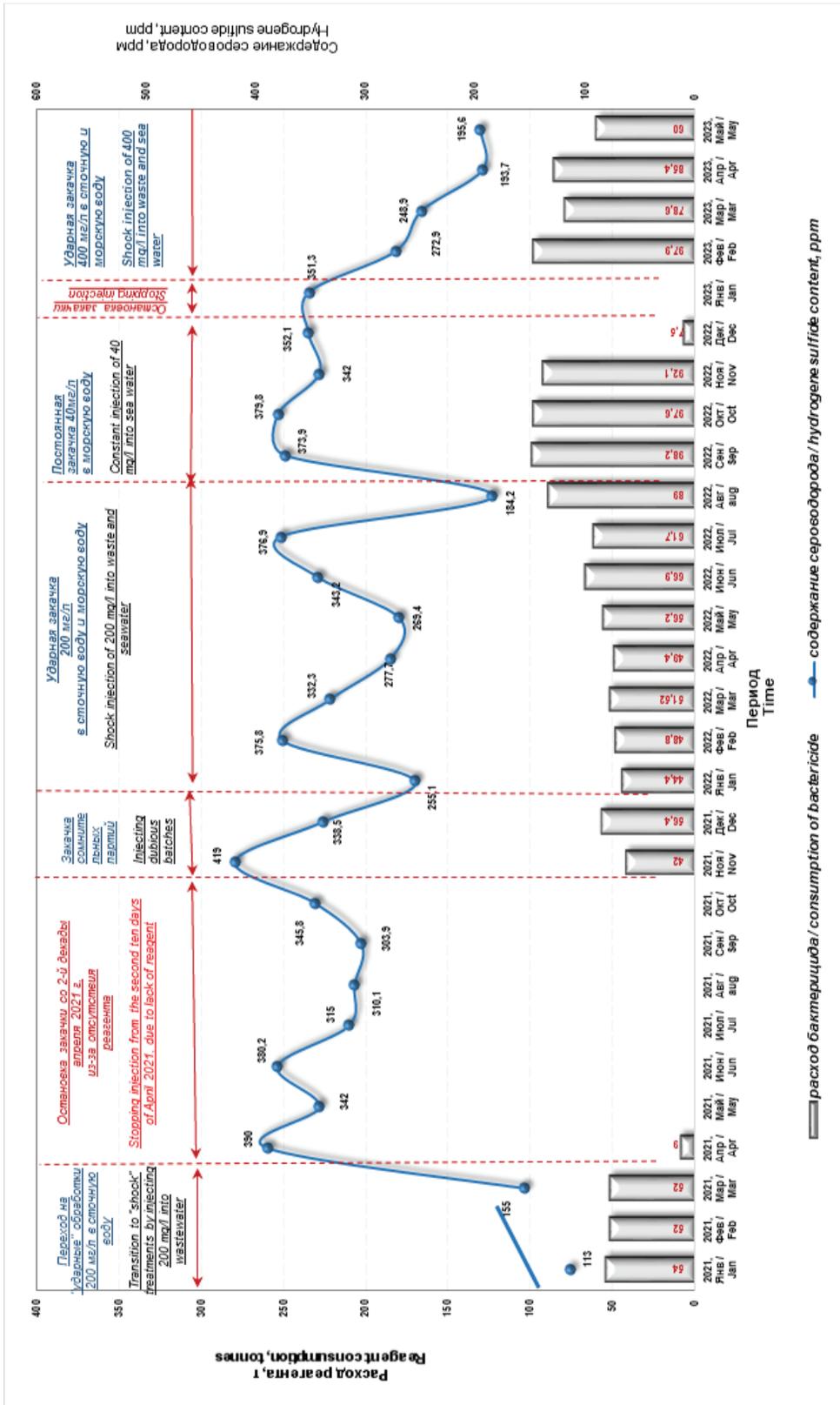


Рисунок 3. Динамика расхода реагента и содержание сероводорода в попутно добываемом газе по всем ГУ (среднее значение) за период с января по май 2023 г.
 Figure 3. Dynamics of reagent consumption and hydrogen sulfide content in associated gas for all gas plants (average value) for the period from January to May 2023

из эффективной мощности) рассчитывалась «ударная» обработка.

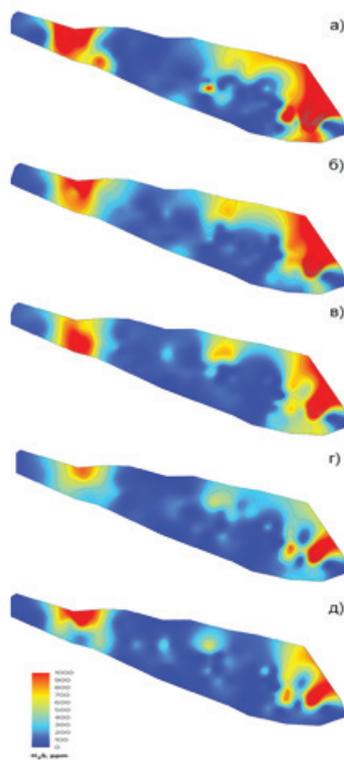
Известно, что на месторождении Узень наиболее активная часть биоценоза расположена в призабойной части пласта нагнетательной скважины [11]. Расчет скорости превращения сульфатов в сероводород установил, что 50–85% сульфатов от общего их количества в закачиваемой воде (3200 мг/л) восстанавливаются в объёме до 300 м³ извлекаемой воды.

Закачка бактерицида в нагнетательные скважины производится из расчёта удельного расхода ингибитора 2000 г/м³ объёма призабойной зоны пласта, заражённой СВБ.

Заключение

Применение бактерицида является одним из наиболее эффективных методов борьбы с образованием биогенного сульфидогенеза. Эффективная технология закачки бактерицида прямо или косвенно способствует борьбе с целым рядом осложнений на промышленных объектах, связанных с образованием и накоплением в пласте сульфидов: уменьшение эмульгирующего эффекта сульфида железа и образование трудно разрушаемой эмульсии, снижение коррозионного воздействия биогенных сульфидов и углекислого газа на металлические объекты (трубопроводы, резервуары и пр.), увеличение межремонтного периода подземного оборудования, снижение расходов на улучшение эксплуатационных и функциональных характеристик добываемой нефти. Таким образом, применение эффективной технологии закачки бактерицида позволяет значительно снизить финансовые вложения на разных этапах эксплуатации месторождения.

Опытным путём выявлено, что технология постоянной закачки реагента малыми дозами (40 мг/л) неэффективна в борьбе с образованием и накоплением биогенного сероводорода, поскольку не имеет достаточного ингибирующего влияния на активность сульфидогенных микроорганизмов, в т.ч. СВБ. Низкие концентрации бактерицида, попадая в условия пласта, могут существенно разбавляться, достигая концентраций, к которым микроорганизмы становятся нечувствительны. Согласно литературным данным [10], эффективность бактерицида может также зависеть от состава обрабатываемого микробного сообщества. Кроме того, постоянное присутствие бактерицида в малых дозах приводит к постепенной адаптации микробиоты к действующему веществу и, как следствие, не препятствует развитию планктонных форм и формированию бактериальных биопленок, а, значит, без «ударных»



Масштаб 1:160 000

Scale 1:160 000

Рисунок 4. Карты распределения зараженности сероводородом на 2023 г.

Figure 4 Hydrogen sulfide contamination distribution maps for 2023

а) январь / January; б) февраль / February; в) март / March; г) апрель / April; д) май / May

обработок постоянная закачка бактерицида в малых дозах неэффективна против сульфидогенной активности планктонных и, следовательно, адгезированных форм бактерий на промышленных объектах.

Новая технология закачки бактерицида, разработанная согласно рекомендациям экспертов, предполагала комплексный подход к обработке месторождения: закачка «ударными» дозировками, адресные закачки, закачка на БКНС увеличенной дозировкой 400 мг/л. Предполагалась также периодическая зачистка резервуаров, что дополнительно повышало эффективность бактерицидных обработок.

В течение 3 мес. обработки наблюдалось стабильное снижение концентрации сероводорода: в апреле среднее содержание сероводорода по 78 ГУ составило 193,7 ppm, что показывает снижение сероводорода в газе по сравнению с показателями января практически вдвое.

По результатам мониторинга применения бактерицида, согласно новой технологии рекомендуется продолжить закачку реагента по утвержденному плану мероприятий. Рекомендуется также продолжать обработку

ударными «адресными» закачками БКНС и нагнетательные скважины. При этом наиболее проблемные участки с повышенным содержанием сероводорода требуют особого внимания и адресной обработки.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

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

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

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующий образом: Биджиева С.Х. – концептуализация и дизайн исследования, написание текста, Нурсеитов Н.К. – курирование данных, администрирование проекта, анализ полученных материалов, Калмуханова Т.Б. – визуализация, сбор и обработка материалов,

Утепов М.С. – написание первичного варианта, визуализация материала.

ADDITIONAL INFORMATION

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

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

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The greatest contribution is distributed as follows: Salimat Kh. Bidzhieva – conceptualization and design of the study, writing the text; Nauruzbek K. Nurseitov – data curation, project administration, analysis of received materials; Tilektes B. Kalmukhanova – visualization, collection and processing of materials; Maksat S. Uteпов – writing the primary version, visualization of the material.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gieg L.M., Jack T.R., Foght J.M. Biological souring and mitigation in oil reservoirs // *Appl Microbiol Biotechnol.* 2011. Vol. 92, № 4. P. 263–282. doi:10.1007/s00253-011-3542-6.
2. Magot M., Ravot G., Campaignolle X., et al. Dethiosulfovibrio peptidovorans gen. nov., sp. nov., a new anaerobic, slightly halophilic, thiosulfate-reducing bacterium from corroding offshore oil wells // *Int J Syst Bacteriol.* 1997. Vol. 47, № 3. P. 818–824. doi:10.1099/00207713-47-3-818.
3. Liamleam W., Annachhatre A.P. Electron donors for biological sulfate reduction // *Biotechnol Adv.* 2007. Vol. 25, № 5. P. 452–463. doi:10.1016/j.biotechadv.2007.05.002.
4. Khatib Z.I., Salanitro J.R. Reservoir souring: analysis of surveys and experience in sour waterfloods // *Society of Petroleum Engineers*; 1997 Oct 5–8; San Antonio, Texas. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/97SPE/All-97SPE/SPE-38795-MS/189127>. Дата обращения: 16.07.2023.
5. Holubnyak Y.I., Bremer J.M., Mibeck B.A.F., et al. Understanding the souring at Bakken oil reservoirs // *Society of Petroleum Engineers*; 2011 Apr 11–13; The Woodlands, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEOCC/proceedings-abstract/11OCS/All-11OCS/SPE-141434-MS/151097>. Дата обращения: 12.06.2023.
6. Muyzer G., Stams A.J.M. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria // *Nat Rev Microbiol.* 2008. Vol. 6. P. 441–454. doi:10.1038/nrmicro1892.
7. Sokolova D.S., Semenova E.M., Grouzdev D.S., et al. Sulfidogenic microbial communities of the Uzen high-temperature oil field in Kazakhstan // *Microorganisms.* 2021. Vol. 9, № 9. P. 1818. doi:10.3390/microorganisms9091818.
8. Иманбаев Б.А., Жапаров Н.С., Максут Д.М., Утепов М.С. Методы применения бактерицидов для борьбы с биогенным сероводородом на месторождении Узень и Карамандыбас // *Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана.* 2021. Т. 4, № 9. С. 79–92. doi:10.54859/kjogi99709.
9. Ежова А.В. Литология. 3-е изд. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009.
10. Pereira G.F., Pilz-Junior H.L., Corção G. The impact of bacterial diversity on resistance to biocides in oilfields // *Sci Rep.* 2021. Vol. 11, № 1. doi:10.1038/s41598-021-02494-7.

11. Муллаев Б.Т., Абитова А.Ж., Саенко О.Б., Туркпенбаева Б.Ж. Месторождение Узень. Проблемы и решения. Алматы : Нур-Принт, 2016.

REFERENCES

1. Gieg LM, Jack TR, Foght JM. Biological souring and mitigation in oil reservoirs. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2011;92(4):263–282. doi:10.1007/s00253-011-3542-6.
2. Magot M, Ravot G, Campaignolle X, et al. *Dethiosulfovibrio peptidovorans* gen. nov., sp. nov., a new anaerobic, slightly halophilic, thiosulfate-reducing bacterium from corroding offshore oil wells. *Int J Syst Bacteriol.* 1997;47(3):818–824. doi:10.1099/00207713-47-3-818.
3. Liamleam W, Annachhatre AP. Electron donors for biological sulfate reduction. *Biotechnol Adv.* 2007;25(5):452–463. doi:10.1016/j.biotechadv.2007.05.002.
4. Khatib ZI, Salanitro JR. Reservoir souring: analysis of surveys and experience in sour waterfloods // Society of Petroleum Engineers; 1997 Oct 5–8; San Antonio, Texas. Available from: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/97SPE/All-97SPE/SPE-38795-MS/189127>.
5. Holubnyak YI, Bremer JM, Mibeck BAF, et al. Understanding the souring at Bakken oil reservoirs // Society of Petroleum Engineers; 2011 Apr 11–13; The Woodlands, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEOCC/proceedings-abstract/11OCS/All-11OCS/SPE-141434-MS/151097>.
6. Muyzer G, Stams AJM. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nat Rev Microbiol.* 2008;6:441–454. doi:10.1038/nrmicro1892.
7. Sokolova DS, Semenova EM, Grouzdev DS, et al. Sulfidogenic microbial communities of the Uzen high-temperature oil field in Kazakhstan. *Microorganisms.* 2021;9(9):1818. doi:10.3390/microorganisms9091818.
8. Imanbayev BA, Zhaparov NS, Maksut DM, Utepov MS. Methods of combating biogenic hydrogen sulfur at the Uzen and Karamandibas oilfield. *Kazakhstan journal for oil & gas industry.* 2021;4(9):79–92. (In Russ).
9. Ezhova AV. *Lithology. 3th ed.* Tomsk: Tomsk Polytechnic University Press; 2009. (In Russ).
10. Pereira GF, Pilz-Junior HL, Corção G. The impact of bacterial diversity on resistance to biocides in oilfields. *Sci Rep.* 2021;11(1). doi:10.1038/s41598-021-02494-7.
11. Mullaev BT, Abitova AZ, Sayenko OB, Turikpenbayev BZ. Uzen field. *Problems and solutions.* Almaty: Nur-Print; 2016. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Биджиева Салимат Хасановна

канд. биол. наук

ORCID 0000-0002-7599-114X

e-mail: s.bidzhieva@kmge.kz.

Нурсеитов Наурузбек Карджаубаевич

e-mail: n.nurseitov@kmge.kz.

Калмуханова Тилектес Багдовлетовна

e-mail: t.kalmukhanova@kmge.kz.

Утепов Максат Сейлханулы

e-mail: m.utepov@kmge.kz.

AUTHORS' INFO

*Salimat Kh. Bidzhieva

Cand. Sc. (Biology)

ORCID 0000-0002-7599-114X

e-mail: s.bidzhieva@kmge.kz.

Nauruzbek K. Nurseitov

e-mail: n.nurseitov@kmge.kz.

Tilektes B. Kalmukhanova

e-mail: t.kalmukhanova@kmge.kz.

Maksat S. Utepov

e-mail: m.utepov@kmge.kz.

*Автор, ответственный за переписку/Corresponding Author