

Научная статья
УДК 628.32
<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2026-1-25-32>
EDN VISTOK

Совершенствование процессов очистки загрязненных сероводородсодержащих производственных стоков

Любовь Михайловна Титова[✉], *Вадим Александрович Вакуленко*

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, titovalybov@mail.ru*[✉]

Аннотация. Промышленные объекты добычи и переработки нефти и газа с высоким содержанием серы являются источником загрязненных высококонцентрированных сероводородных технологических вод. Промышленные стоки на Астраханском газоконденсатном месторождении высоко агрессивны в виду его особенностей и подвергаются многоступенчатой очистке. В виду тенденций на ресурсосбережение и экологичность, диктуемых сложной экологической обстановкой в мире, необходимо детально проанализировать существующие технологии обработки сточных вод на соответствие принципам зеленой химии и определить конкретные предложения. В статье приведены пути совершенствования технологических процессов очистки сероводородсодержащих стоков установки сепарации пластового газа высокого давления Астраханского газоперерабатывающего завода, на котором реализован комбинированный способ очистки промышленных стоков и пластовой воды от сульфидов, карбонатов и сероводорода. Его недостатками являются неудовлетворительное качество очистки воды, использование жестких реагентов, многостадийность обработки, недостаточная экологичность и сохранение рисков для окружающей среды. Перспективной технологией очистки сточных вод являются усовершенствованные окислительные процессы. При обработке сульфидсодержащих стоков реакция Фентона позволяет разрушать токсичные сульфиды до нетоксичных соединений, удалять сероводород, превращать сульфиды в сульфаты, которые легче удаляются из воды. Реакция Фентона выявлены экологические и ресурсосберегающие преимущества: высокую эффективность очистки, проведение процесса при комнатной температуре, относительную простоту реализации. Предложена технологическая схема обработки высококонцентрированных сульфидсодержащих вод и локального обезвреживания стоков с переводом сероводорода в состояние нетоксичной легко транспортируемой товарной серы. Обоснованы требования к качеству стоков для реакции Фентона, определены ключевые факторы, определяющие процесс, скорректирована технологическая схема. При внесении предлагаемых изменений могут быть достигнуты такие эффекты, как экологизация производства, сокращение длины технологической цепочки и снижение энергетических затрат за счет использования мягких условий проведения процесса Фентона по сравнению с отпаркой.

Ключевые слова: пероксид водорода, производственные воды, промышленные сточные воды, реакция Фентона, сероводородсодержащие стоки

Для цитирования: *Титова Л. М., Вакуленко В. А.* Совершенствование процессов очистки загрязненных сероводородсодержащих производственных стоков // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2026. № 1. С. 25–32. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2026-1-25-32>. EDN VISTOK.

Original article

Improvement of purification processes of polluted hydrogen sulfide-containing industrial effluents

Lyubov' M. Titova[✉], *Vadim A. Vakulenko*

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, titovalybov@mail.ru*[✉]

Abstract. Industrial facilities for the extraction and processing of oil and gas with a high sulfur content are a source of polluted highly concentrated hydrogen sulfide process waters. Industrial effluents at the Astrakhan gas condensate field are highly aggressive due to its features and undergo multi-stage purification. In view of the trends in resource

conservation and environmental friendliness dictated by the complex environmental situation in the world, it is necessary to analyze in detail the existing wastewater treatment technologies for compliance with the principles of green chemistry and identify specific proposals. The article presents ways to improve the technological processes for purifying hydrogen sulfide-containing wastewater from the high-pressure reservoir gas separation plant of the Astrakhan Gas Processing Plant, which implements a combined method for purifying industrial wastewater and reservoir water from sulfides, carbonates and hydrogen sulfide. Its disadvantages are the unsatisfactory quality of water purification, the use of harsh reagents, multi-stage treatment, insufficient environmental friendliness and the preservation of risks to the environment. Advanced oxidation processes are a promising technology for wastewater treatment. When treating sulfide-containing wastewater, the Fenton reaction allows you to break down toxic sulfides to non-toxic compounds, remove hydrogen sulfide, and convert sulfides into sulfates, which are easier to remove from the water. Fenton's reaction reveals environmental and resource-saving benefits: high cleaning efficiency, carrying out the process at room temperature, and relative ease of implementation. A technological scheme is proposed for the treatment of highly concentrated sulfide-containing waters and local wastewater treatment with the transfer of hydrogen sulfide to a state of non-toxic, easily transported commercial sulfur. The requirements for the quality of effluents for the Fenton reaction are substantiated, the key factors determining the process are identified, and the technological scheme is adjusted. When making the proposed changes, such effects as greening production, shortening the length of the technological chain and reducing energy costs can be achieved by using the mild conditions of the Fenton process compared to steam.

Keywords: hydrogen peroxide, industrial water, industrial wastewater, Fenton reaction, hydrogen sulfide-containing wastewater

For citation: Titova L. M., Vakulenko V. A. Improvement of purification processes of polluted hydrogen sulfide-containing industrial effluents. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2026;1:25-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2026-1-25-32>. EDN VISTOK.

Введение

Подготовка газа к переработке включает в себя не менее важные с экономической и экологической точек зрения вспомогательные технологические процессы, целью которых является подготовка добываемой вместе с газом воды и твердых примесей для последующего использования или утилизации.

Промышленные объекты добычи и переработки нефти и газа с высоким содержанием серы являются источником загрязненных высококонцентрированных сероводородных технологических вод. Стоки могут содержать до 2–7 г/л сероводорода, являются крайне токсичными для окружающей среды по отношению к стали и бетону, значительно усиливают коррозию трубопроводов и насосного парка, снижают ресурс арматуры. В связи с чем стоки на предприятии подлежат отдельному сбору и направляются в узлы очистки, их сброс напрямую в водный объект недопустим.

Промышленные стоки Астраханского газоконденсатного месторождения в связи с его особенностью высокоагрессивны и, как следствие, подвергаются многоступенчатой очистке [1].

Способы очистки промышленных сточных вод, содержащих сероводород и соединения серы в виде сульфидов и гидросульфидов, применяемые в промышленности, имеют общие недостатки: сложность и многоступенчатость; необходимость

использования дополнительных реагентов; получение неперерабатываемых шламов и др. Ввиду тенденций в области ресурсосбережения и экологичности, диктуемых сложной экологической обстановкой в мире, необходимо детально проанализировать существующие технологии обработки сточных вод на соответствие принципам зеленой химии, определить конкретные предложения. В частности, подход, направленный на снижение вредного воздействия химических процессов на окружающую среду, подразумевает такие принципы создания или совершенствования технологических процессов, как предотвращение образования отходов, использование безопасных растворителей и вспомогательных веществ, повышение энергоэффективности за счет проведения процессов в мягких условиях, применение разлагаемых химических веществ.

Цель исследования – разработать пути совершенствования технологических процессов очистки сероводородсодержащих стоков установки сепарации пластового газа высокого давления Астраханского газоперерабатывающего завода (АГПЗ).

Анализ технологии очистки промышленных серосодержащих стоков

На АГПЗ реализован комбинированный способ очистки промышленных стоков и пластовой воды от сульфидов, карбонатов и сероводорода (рис. 1).

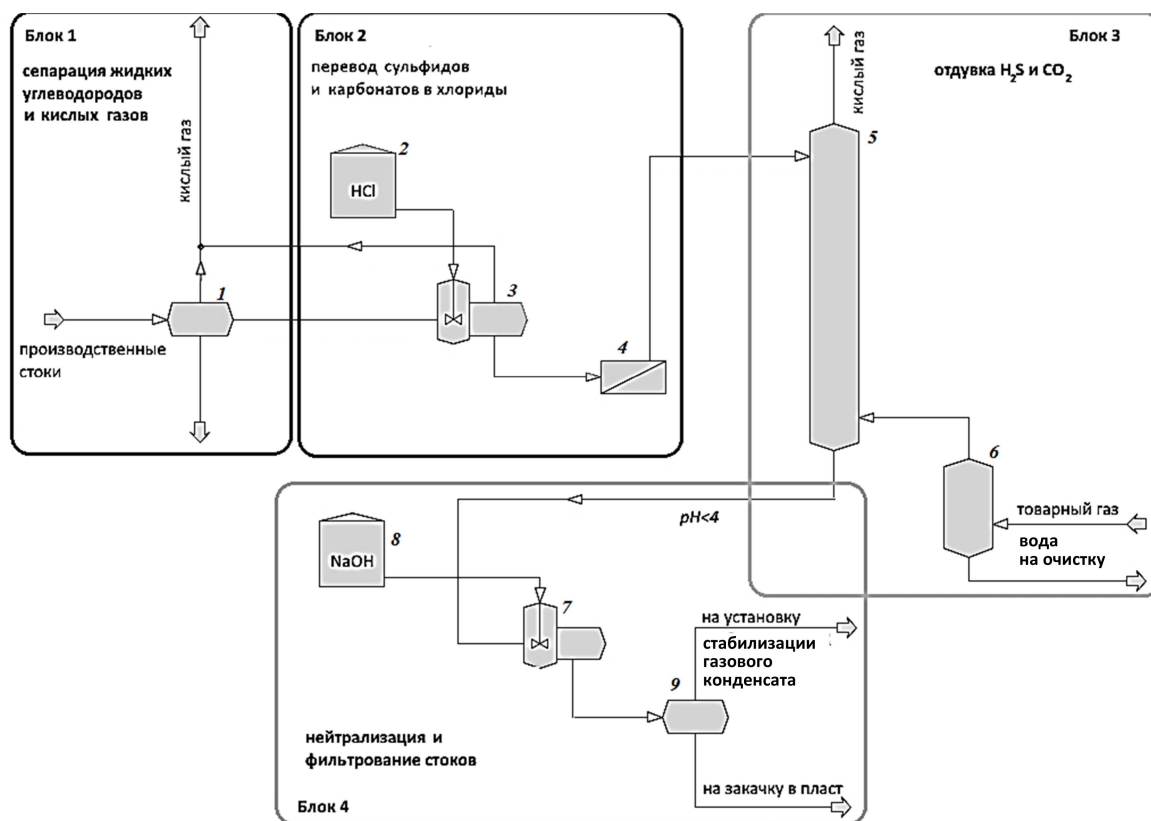


Рис. 1. Комбинированный способ очистки промышленных стоков и пластовой воды Астраханского газоперерабатывающего завода от сульфидов, карбонатов и сероводорода:

1 – отстойник; 2, 8 – бак; 3, 7 – реактор-стойник; 4 – фильтр тонкой очистки; 5 – stripping-колонна; 6 – сепаратор; 9 – фильтр-маслоотделитель

Fig. 1. Combined method of industrial wastewater and reservoir water treatment Astrakhan Gas Processing Plant for sulfides, carbonates and hydrogen sulfide:

1 – settling tank; 2, 8 – tank; 3, 7 – settling reactor; 4 – fine filter; 5 – stripping column; 6 – separator; 9 – oil separator filter

Обработка пластовых и загрязненных сероводородом технологических вод завода включает сепарацию жидких углеводородов, разложение соляной кислотой сульфидов и карбонатов до сероводорода и диоксида углерода с фильтрацией от механических примесей и твердых частиц, удаление растворенного сероводорода и диоксида углерода посредством отпарки товарным газом, нейтрализации гидроксидом натрия, сепарация остаточных жидких углеводородов. Целевым продуктом установки является нейтрализованная и обезмасленная вода, очищенная от сероводорода, диоксида углерода и углеводородов, и поступающая на зачку в пласт. Отобранный сероводород и другие газы направляются в замкнутый цикл с процессом Клауса для получения элементарной серы. Такая сложная схема обработки требуется в виду химического состава стоков и содержания в них ценного сырья, подлежащего извлечению.

После предварительной сепарации производственных сточных вод от кислых газов и нефтепродуктов в блоке 1 сульфиды и карбонаты, растворенные в воде, превращаются за счет химического вза-

имодействия с соляной кислотой в хлориды, реакция сопровождается выделением сероводорода и углекислого газа. Сероводород в воде находится в молекулярно-растворенном состоянии либо в виде сульфида S^{2-} и гидросульфида HS^- . Для его перевода в молекулярную форму с целью последующего удаления необходимо подкисление воды до pH 5 и ниже [2], для чего используют специальные реагенты – технические кислоты (блок 2), возвратные потоки кислых газов (CO_2 и SO_2), отходящие дымовые газы. Затем, для того чтобы сместить равновесие в направление газовой фазы, через сероводородсодержащую воду продувают при большой площади массообмена поток газа с низким содержанием H_2S в процессе дегазации (блок 3), либо воду подогревают и осуществляют термическую деаэрацию. Оба метода основаны на физических закономерностях растворения газа в жидкости и в самом грубом приближении описываются законом Генри (растворимость газа прямо пропорциональна парциальному давлению газа, зависит от температуры и давления). В данном случае используется отдувка товарных

газов с последующей нейтрализацией стоков гидроксидом натрия (блок 4), т. к. скопление в канализационных колодцах углекислоты может привести к несчастным случаям при ремонте канализационной сети предприятия. Недостатками физических методов являются неудовлетворительное качество очистки воды, использование жестких реагентов (соляной и серной кислот, гидроксида натрия), многостадийность обработки, недостаточная экологичность и сохранение рисков для окружающей среды.

Применяется несколько технологий обработки высококонцентрированных сероводородных вод, зависящие от типа соединений и задач очистки. Эти методы направлены на обезвреживание токсичных сульфидов и удаление карбонатов, приводящие к проблемам в нефтедобыче (например, коррозия оборудования), например, окисление кислородом воздуха, химическое осаждение солями железа, коагуляция, биологическая очистка и др. На практике сочетаются несколько методов очистки, т. к. очищаемые воды имеют сложный состав, меняющийся во времени. Выбор метода зависит от количества сточных вод, разновидностей присутствующих веществ и их концентраций, технологических и санитарных требований, предъявляемых к очищенным стокам.

Наиболее подробно изученной альтернативой используемому на предприятии методу является окислительный метод.

Использование для окисления сульфидов атмосферного кислорода практической значимости не имеет, поскольку в отсутствие катализаторов процесс окисления протекает крайне медленно. Для ускорения процесса окисления H_2S могут применяться как гетерогенные, так и водорастворимые катализаторы на основе соединений железа, хрома, никеля, кобальта и других металлов переменной валентности. При этом ион металла работает как переносчик электронов с сульфид-иона на кислород, попеременно восстанавливаясь сульфид-ионом и окисляясь кислородом. Наиболее целесообразно совмещение катализа с участием водорастворимого катализатора с одновременным связыванием сероводорода в нерастворимый сульфид металла. Особого внимания заслуживает метод обработки сероводородных вод гидроокисью железа с последующей регенерацией образовавшегося трисульфида железа продувкой воздухом с получением $Fe(OH)_3$, который вновь используется в водоочистке. Данный метод привлекателен тем, что помимо многократного использования одной и той же гидроокиси железа параллельно протекают реакции каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха в присутствии железа, которое попеременно принимает двух- и трехвалентное состояние [3]. В последнее время большое внимание уделяется изготовлению гетерогенных катализаторов на основе иммобилизации металло- или неметаллосодержащих ионных жидкостей на различных твердых носителях, которые можно легко отделить после завершения реак-

ции и повторно использовать. Поэтому интерес к разработке новых и эффективных каталитических процессов для окисления органических сульфидов по-прежнему растет [4]. Кроме того, каталитическое окисление характеризуется высокой скоростью процесса и в случаях связывания сероводорода в нерастворимые соединения серы экологичностью из-за отсутствия выбросов газообразного сероводорода.

Безкатализаторные окислительные методы обработки возможны при использовании сильных окислителей (озона, перманганата калия, хлора, перекиси водорода), что делает их весьма дорогостоящими, особенно в условиях очистки высококонцентрированных сероводородных вод. Тем не менее, учитывая, что при этом не образуются загрязненные шламы и технологическая цепочка обработки укорачивается, т. к. не требуется обработка катализатора, можно данные процессы отнести к более экологичным по сравнению с рассматриваемыми.

Для интенсификации процесса известно ультрафиолетовое фотохимическое окисление сульфида натрия при использовании в качестве источника света ртутной лампы для получения водорода и элементарной серы при продувке раствора сероводородом [5]. Процесс происходит в мягких условиях с непрерывным замкнутым циклом для H_2S , его можно охарактеризовать как энергосберегающий в виду незначительных затрат на электроэнергию для создания светового потока.

Известно, что для очистки подтоварных вод возможно использовать пероксид водорода благодаря его окислительным свойствам (потенциал окисления 1,8 эВ). Вещество используется в химической промышленности, водоочистке, очистке бытовых и промышленных сточных вод, дренажных и шахтных вод. Легко распадаясь на воду и активный кислород, H_2O_2 эффективно удаляет органические и неорганические примеси и временно предотвращает повторное загрязнение. Пероксид водорода относительно недорог и после использования не требует дополнительной обработки сточной воды по сравнению с другими химическими веществами. Широко используется при небольших количествах загрязнителя при периодическом дозировании для водоочистных систем небольшого масштаба, селективного разложения органических загрязнителей и устранения неприятного запаха [6]. Кроме того, пероксид водорода широко используется в усовершенствованном окислительном процессе и доказал свою эффективность в удалении сульфидов как самостоятельно, так и в сочетании с такими катализаторами, как железо или ультрафиолетовое излучение [7].

Пример практической реализации очистки сточных вод от растворимых сульфидов и сероводорода обработкой перекисью водорода периодическим методом приведен ниже. В поток вводится доза перекиси водорода, равная от четырех- до десятикратному стехиометрическому эквивалентному содержанию сульфидов в поступающих сточных водах за

определенный период времени, и она достаточна для снижения уровня сульфидов и сероводорода практически до нуля. Для поддержания последнего около нуля осуществляется непрерывная подача перекиси водорода в проточную систему в количестве, стехиометрически эквивалентном содержанию сульфидов и сероводорода в поступающих сточных водах [8]. Возможно использование 35 или 50 % перекиси водорода, а также другие более высокие или более низкие концентрации перекиси водорода; выбор определяется удобством и доступностью. Способ не вызывает коррозии металла, керамики или других материалов, встречающихся в канализационной системе. Конечные продукты окисления, сера и вода, не являются токсичными.

В статье [9] подробно проанализирован данный способ обработки канализационных сточных вод г. Касабланка, Марокко, с периодическим дозированием перекиси водорода на насосной станции для снижения концентрации сульфидов и устранения неприятного запаха сероводорода. Следует отметить, что стоки не характеризовались высоким содержанием сульфидов и относились по своим характеристикам к разряду коммунальных. Ограничение применения данного метода очистки авторы [9] связывают с бурным выделением токсичного газа – сероводорода, что, напротив, может быть преимуществом применительно к технологии очистки промстоков на АГПЗ.

Обработка сульфид- и сероводородсодержащих стоков промышленного происхождения перекисью водорода была изучена в статье [10] на примере подтоварной воды сепарации жирного газа. Установлено, что применение пероксида водорода в количестве, рассчитанном из содержания сульфидов и объема подлежащей очистке воды, позволяет достичь окисления всего количества загрязнителя, реакция идет с высокой скоростью, в мягких условиях и не требует катализаторов. Но наряду с окислением сульфидов протекает реакция дополнительного окисления образующейся серы, что нежелательно, т. к. приводит к перерасходу реагента и неполному окислению сульфидов.

Перспективной технологией очистки сточных вод являются усовершенствованные окислительные процессы. Окислительные реакции Фентона используют для очистки чрезвычайно загрязненных сточных вод фармацевтической промышленности, сточных вод нефтедобывающей промышленности, промышленных сточных вод рыбоконсервных предприятий, активных фармацевтических промежуточных продуктов в сточных водах для разложения органических загрязнителей [11].

Окисление по методу Фентона – одно из самых известных реакций окисления смешивающихся с водой органических соединений, катализируемых металлами. Смесь FeSO_4 или любого другого комплекса железа с H_2O_2 (реактив Фентона) при достаточно низком уровне pH приводит к каталитиче-

скому разложению H_2O_2 и протекает по свободно-радикальному цепному механизму с образованием гидроксильных радикалов, которые обладают чрезвычайно высокой окислительной способностью и могут за короткое время разложить трудно-разлагаемые органические соединения.

Таким образом, согласно данным литературных источников, пероксид водорода с успехом применяется для очистки сточных вод промышленного происхождения от сульфидов. Для того чтобы снизить потребление окислителя на проведение данного процесса, возможно его интенсификация по методу Фентона. Необходимо учитывать, что, хотя оба процесса связаны с использованием пероксида водорода, они существенно различаются по механизму, скорости и области применения.

Пероксид водорода осуществляет прямое окисление субстрата за счет передачи атома кислорода. Молекула H_2O_2 относительно стабильная, но может разлагаться на воду и кислород, при высоких концентрациях в водном растворе взрывоопасна. Скорость реакции относительно медленная, зависит от pH среды и концентрации H_2O_2 .

Реакция Фентона – это каталитическое разложение пероксида водорода в присутствии ионов железа (II) Fe^{2+} . В результате реакции образуются гидроксильные радикалы $\text{OH}\cdot$, мощные окислители, инициирующие цепную реакцию других активных форм кислорода, которые разлагают органические вещества и минерализуют их, например в CO_2 и H_2O . При обработке сульфидсодержащих стоков реакция Фентона позволяет разрушать токсичные сульфиды до нетоксичных соединений, удалять сероводород, превращать сульфиды в сульфаты, которые легче удаляются из воды.

Таким образом, реакция Фентона значительно эффективнее прямого окисления H_2O_2 благодаря каталитическому эффекту. Учитывая также ее экологические и ресурсосберегающие преимущества (высокую эффективность очистки, проведение процесса при комнатной температуре, относительную простоту реализации) по сравнению с традиционной технологией обработки сточных вод, описанной ранее, считаем целесообразным изменение установки локального обезвреживания стоков загрязненных сероводородсодержащих производственных стоков АГПЗ с использованием реакции Фентона и выводом из материального потока элементарной серы.

При этом требуется решить ряд задач: обосновать требования к качеству стоков для реакции Фентона; сформулировать ключевые факторы, определяющие процесс; скорректировать технологическую схему и подобрать необходимое оборудование.

Требования к качеству стоков

Метод окисления Фентона работает в кислых условиях, поэтому для его осуществления требуется мониторинг pH и возможная корректировка. Содержание взвешенных веществ должно быть не

более 200 мг/л, следует контролировать концентрацию масел, ионов хлора, фосфатов и других загрязнителей, определяя их предельно допустимые концентрации на основе экспериментальных данных. На рис. 1 в блоке 1 и 2 показано оборудование (сепаратор, бак для кислоты, отстойник) с целью принятия соответствующих мер для предварительной очистки стоков и снижения нагрузки на реактор Фентона. Таким образом, значительных изменений в аппаратном оформлении процесса не требуется.

Ключевые факторы, определяющие процесс разложения сульфидов по Фентону

Для успешного применения реакции Фентона необходимо учитывать следующие факторы: концентрацию реагентов; pH среды (оптимальный диапазон 6–8); температуру процесса; наличие примесей в сточных водах.

Концентрация реагентов и наличие примесей имеют существенное значение для достижения целей очистки с использованием метода Фентона. При наличии сульфидов реакция Фентона претерпевает существенные изменения, т. к. сульфид-ионы могут взаимодействовать с гидроксильными радикалами, образуя элементарную серу и другие продукты.

Ионы железа (II) могут образовывать комплексы с сульфид-ионами. Основными продуктами реакции являются: элементарная сера; сероводород; гидроксильные радикалы (OH⁻).

Важно отметить, что присутствие сульфидов может замедлять или модифицировать классическую реакцию Фентона, т. к. сульфид-ионы способны конкурировать с ионами железа за активные центры.

В результате обработки сульфидсодержащих сточных вод образуется элементарная сера, которая может быть утилизирована или использована в качестве вторичного сырья.

Предлагаемая технологическая схема обработки высококонцентрированных сульфидсодержащих вод

При модификации технологии обработки высококонцентрированных сульфидсодержащих вод по методу Фентона технологическая схема упрощается и включает предварительную механическую очистку стоков, коррекцию pH за счет добавления кислоты, смешивание с катализатором, реакцию окисления по Фентону, удаление потоков газа (сероводорода и др.), выделение и сбор элементарной серы, нейтрализацию стоков перед закачкой в пласт (рис. 2).

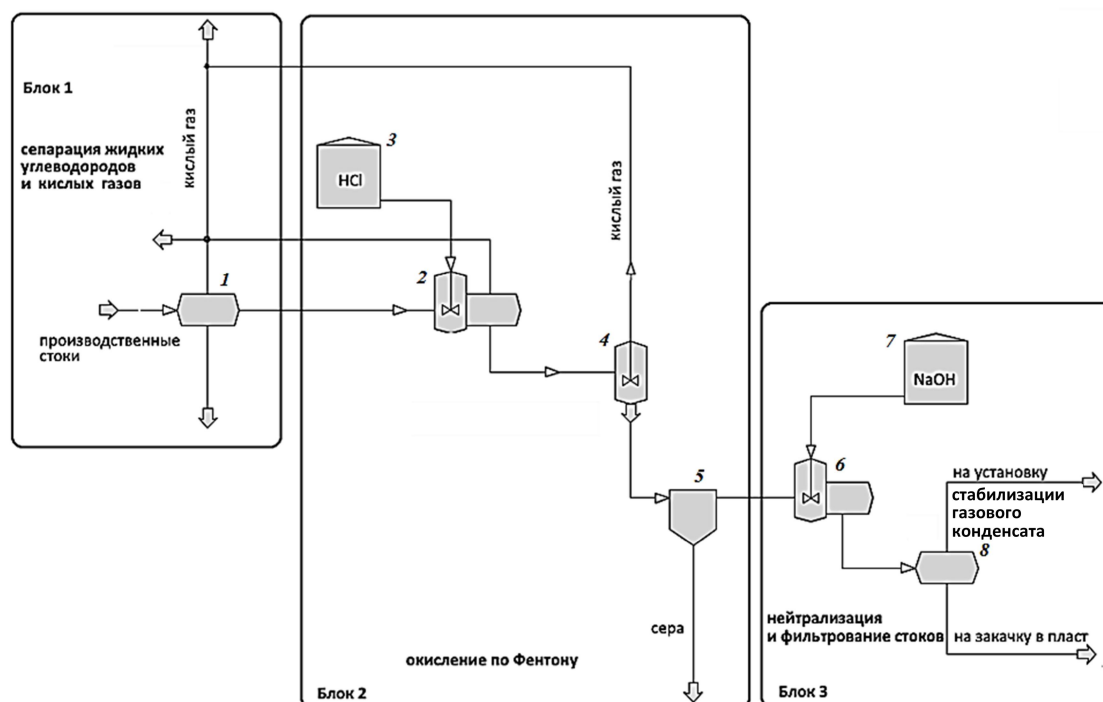


Рис. 2. Предлагаемая технологическая схема очистки промышленных стоков и пластовой воды Астраханского газоперерабатывающего завода от сульфидов, карбонатов и сероводорода: 1, 5 – отстойник; 2, 6 – реактор-отстойник; 3, 7 – бак; 4 – реактор Фентона; 8 – фильтр-маслоотделитель

Fig. 2. The proposed technological scheme for the treatment of industrial wastewater and reservoir water Astrakhan Gas Processing Plant for sulfides, carbonates and hydrogen sulfide: 1, 5 – sump; 2, 6 – sump reactor; 3, 7 – tank; 4 – Fenton reactor; 8 – oil separator filter

Заклучение

Таким образом, при внесении предлагаемых изменений в технологию обработки высококонцентрированных сульфидсодержащих вод установки сепарации пластового газа высокого давления АГПЗ могут быть достигнутые такие эффекты, как экологизация производства, сокращение длины технологической цепочки и снижение энергетических затрат за счет использования мягких условий прове-

дения реакции Фентона по сравнению с отпаркой. Процесс Фентона известен и широко используется для очистки органосодержащих сточных вод, но не рекомендуется для разложения сульфидов, т. к. сопровождается самопроизвольным бурным выделением сероводорода, что в условиях предприятия по переработке серосодержащего газа целесообразно, т. к. не требует дорогостоящего процесса отпарки.

Список источников

1. Тараканов Г. В. Технология переработки природного газа и газового конденсата на Астраханском газоперерабатывающем заводе: учебно-методический комплекс. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2013. 192 с.
2. Фисенко Л. Н., Черкесов А. Ю., Игнатенко С. И., Костюков В. П. Исследование технологии очистки высококонцентрированных сероводородсодержащих сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 4. С. 67–73.
3. Фисенко Л. Н., Черкесов А. Ю., Игнатенко С. И. Удаление сероводорода из сернисто-щелочных стоков нефтехимических производств // Нефтепереработка и нефтехимия. 2007. № 4. С. 39–43.
4. Liu X. B., Rong Q., Tan J., Chen C., Hu Y. L. Recent Advances in Catalytic Oxidation of Organic Sulfides: Applications of Metal-Ionic Liquid Catalytic Systems // *Frontiers in Chemistry*. 2022. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.798603>.
5. Clovis A. L., Cuning H., Randy J. UV photochemical oxidation of aqueous sodium sulfide to produce hydrogen and sulfur Fowler // *Journal of Photochemistry and Photobiology Chemistry*. 2004. Vol. 168. С. 153-160.
6. Mohajeri S., Aziz H. A., Isa M. H., Bashir M. J. K., Mohajeri L., Adlan M. N. Influence of Fenton reagent oxidation on mineralization and decolorization of municipal land-

- fill leachate // *Journal of Environmental Science and Health*. 2010. Vol. 45(6). P. 692–698. <https://doi.org/10.1080/10934521003648883>.
7. El Brahmī A., Abderafi S. Hydrogen sulfide removal from wastewater using hydrogen peroxide in-situ treatment: Case study of Moroccan urban sewers // *Materials Today: Proceedings*. 2021. N. 45. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.641>.
8. Пат. US 3705098A. Очистка сточных вод перекисью водорода / Шепард Дж. А., Хоббс М. Ф. Заявл. 22.02.1971; опубл. 05.12.1972.
9. El Brahmī A., Abderafi S. Performance of hydrogen peroxide 35 % treatment for sulfide mitigation in sanitary sewers: sewage characterization and response surface methodology // *International Journal of Environmental Science Technology*. 2023. Vol. 20. P. 2127–2140. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04130-x>.
10. Уханов С. Е., Уханова Н. Ю. Применение пероксида водорода для очистки подтоварной воды сепарации жирного газа от сероводорода и сульфидов конференция // Вестник ПГТУ. Химическая технология и биотехнология. 2008. № 8. С. 143–152.
11. Aljuboury Dr. Dh., Palaniandy P., Aziz H., Feroz S. A Review on the Fenton Process for Wastewater Treatment // *Journal of Innovative Engineering*. 2014. N. 2 (3). P. 4.

References

1. Tarakanov G. V. *Tekhnologiya pererabotki prirodnogo gaza i gazovogo kondensata na Astrakhanskom gazopererabatyvayushchem zavode: uchebno-metodicheskij kompleks* [Technology of natural gas and gas condensate processing at the Astrakhan Gas Processing Plant: educational and methodological complex]. Astrakhan, Izd-vo AGTU, 2013. 192 p.
2. Fisenko L. N., Cherkesov A. Yu., Ignatenko S. I., Kostyukov V. P. Issledovanie tekhnologii ochistki vysokokontsentrirrovannykh serovodorodsoderzhashchikh stochnykh vod [Investigation of the technology of purification of highly concentrated hydrogen sulfide-containing wastewater]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 2012, no 4, pp. 67-73.
3. Fisenko L. N., Cherkesov A. Yu., Ignatenko S. I. Udalenie serovodoroda iz sernisto-shchelochnykh stokov neftekhimicheskikh proizvodstv. *Neftepererabotka i neftekhimiya*, 2007, no. 4, pp. 39-43.
4. Liu X. B., Rong Q., Tan J., Chen C., Hu Y. L. Recent Advances in Catalytic Oxidation of Organic Sulfides: Applications of Metal-Ionic Liquid Catalytic Systems. *Frontiers in Chemistry*, 2022, vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.798603>.

5. Clovis A. L., Cuning H., Randy J. UV photochemical oxidation of aqueous sodium sulfide to produce hydrogen and sulfur Fowler. *Journal of Photochemistry and Photobiology Chemistry*, 2004, vol. 168, pp. 153-160.
6. Mohajeri S., Aziz H. A., Isa M. H., Bashir M. J. K., Mohajeri L., Adlan M. N. Influence of Fenton reagent oxidation on mineralization and decolorization of municipal landfill leachate. *Journal of Environmental Science and Health*, 2010, vol. 45(6), pp. 692-698. <https://doi.org/10.1080/10934521003648883>.
7. El Brahmī A., Abderafi S. Hydrogen sulfide removal from wastewater using hydrogen peroxide in-situ treatment: Case study of Moroccan urban sewers. *Materials Today: Proceedings*, 2021, no. 45. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.641>.
8. Shepard Dzh. A., Khobbs M. F. *Ochistka stochnykh vod perekis'yu vodoroda* [Wastewater treatment with hydrogen peroxide]. Patent US 3705098A, 05.12.1972.
9. El Brahmī A., Abderafi S. Performance of hydrogen peroxide 35 % treatment for sulfide mitigation in sanitary sewers: sewage characterization and response surface methodology. *International Journal of Environmental Science*

Technology, 2023, vol. 20, pp. 2127-2140. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04130-x>.

10. Ukhanov S. E., Ukhanova N. Yu. Primenenie peroksida vodoroda dlya ochistki podtovarnoj vody separacii zhirnogo gaza ot serovodoroda i sul'fidov konferenciya [Application of hydrogen peroxide for purification of raw water,

separation of fatty gas from hydrogen sulfide and sulfides conference]. *Vestnik PGTU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2008, no. 8, pp. 143-152.

11. Aljuboury Dr. Dh., Palaniandy P., Aziz H., Feroz S. A Review on the Fenton Process for Wastewater Treatment. *Journal of Innovative Engineering*, 2014, no. 2 (3), p. 4.

Статья поступила в редакцию 19.01.2026; одобрена после рецензирования 20.02.2026; принята к публикации 04.03.2026
The article was submitted 19.01.2026; approved after reviewing 20.02.2026; accepted for publication 04.03.2026

Информация об авторах / Information about the authors

Любовь Михайловна Титова – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; titovalybov@mail.ru

Lyubov M. Titova – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; titovalybov@mail.ru

Вадим Александрович Вакуленко – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; vvakulenko766@gmail.com

Vadim A. Vakulenko – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; vvakulenko766@gmail.com

