

Исследование гомогенного каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха в реакторе с мембранным разделителем

Л.Н. Фесенко, С.А. Щукин, А.Ю. Черкесов

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия*

Аннотация: Приведены результаты исследований кинетики железо-каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха в реакторе с мембранным разделителем. Исследования проводили на лабораторном экспериментальном комплексе. Экспериментально получены зависимости, отображающие влияние доза катализатора – $\text{Fe}(\text{OH})_3$, pH среды и времени контакта очищаемой воды с реакционной средой на эффект очистки воды от сероводорода.

Ключевые слова: сероводород, железо-каталитическое окисление, кислород воздуха, гидроксид железа, мембранное разделение, ультрафильтрация.

Сера – один из наиболее распространенных химических элементов в мире. В водных источниках природного происхождения сера по распространенности занимает шестое место и представлена отношением изотопов $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ в виде окисленных соединений в последовательности: S^{2-} , S^0 , SO_2 , SO_3^{2-} , SO_4^{2-} [1]. В ходе геохимических и биологических процессов, происходящих в геологических структурах, одним из распространённых серосодержащих веществ в подземных водах является сероводород.

В водной среде сероводород представлен в виде растворимого газа, не имеющего окраса. Использование сероводородных вод для хозяйственно-питьевого или технического водоснабжения ввиду высокой коррозионной активности и токсичности вещества без предварительного кондиционирования не рекомендуется. Предельно-допустимая концентрация сероводорода в воде согласно СанПиН 1.2.3685-21, должна быть менее $0,05 \text{ мг/дм}^3$, а гидросульфидов (HS^-) - менее $3,0 \text{ мг/дм}^3$.

В практике очистки природных вод от сероводорода на сегодняшний день наиболее распространенными способами, получившие широкое развитие, стали процессы химического (реагентного) [2,3] и каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха [4,5]. Кислород, как самый

доступный из всех окислителей, является наиболее привлекательным в водоподготовке. Кислородное окисление H_2S может осуществляться как с применением катализаторов, так и без них, однако, скорость протекания реакции окисления сероводорода в таком случае крайне мала. Некаталитическое окисление H_2S кислородом воздуха, как правило, является сопутствующим процессом, протекающим вместе с дегазационной или каталитической обработкой воды. Отдельно данный процесс в чистом виде сложно реализуем и наиболее полно протекает при температурах более 100 °С.

Для каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха могут быть использованы как гетерогенные (многокомпонентные) катализаторы [5,6,7], так и гомогенные, водорастворимые катализаторы на основе соединений переменного валентных металлов, таких как Fe, Ni, Cr, Cu, Co, и др. [8,9]. Получение в практике процессов гетерогенного каталитического окисления сероводорода с использованием фильтрующей загрузки как носителя катализатора, в основном многостадийный процесс, протекающий при температурах от 85 до 350 °С. Использовать такого рода способ удаления сероводорода в водоподготовке технологически сложно и экономически нецелесообразно.

При гомогенном каталитическом окислении сероводорода кислородом воздуха нашли применение органические катализаторы, такие, как антрахинондисульфокислота, водные растворы хелатов многовалентных металлов или же их гидроксиды. В случае с антрахинондисульфокислотой или водными растворами хелатов, процесс ведётся с добавлением в воду большого объема органического водорастворимого катализатора с предварительным насыщением кислородом и последующим его безвозвратным отделением. Главный недостаток такого способа — потеря дорогостоящего катализатора, наличие остаточных концентраций реагента в

очищенной от сероводорода воде и необходимость последующей доочистки от него.

Во втором случае процесс окисления сероводорода кислородом воздуха может производиться с многократным использованием одного и того же катализатора.

Наиболее широкое распространение в технологиях очистки воды от сероводорода с применением гомогенных катализаторов получил метод железо-каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха [9] с применением в качестве катализатора трехвалентного железа в форме гидроокиси. Метод железо-каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха, несмотря на свою известность практическое применение нашел только недавно. Принцип железо-каталитического окисления лег в основу технологии очистки высококонцентрированных сернисто-щелочных сточных вод нефтеперерабатывающих производств с суммарным содержанием сульфид- и гидросульфид-ионов более 100 мг/л по $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, разработанной научно-производственным предприятием «ЭКОФЕС» совместно с кафедрой «Водное хозяйство, инженерные сети и защита окружающей среды» ФГБОУ ВО ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова [10].

В предлагаемой ранее технологии был решен вопрос повторного использования гомогенного катализатора – гидроксида железа (III). Многократный цикл с попеременным окислением сульфидов и регенерацией железа значительно расширил возможности метода, однако в условиях очистки природных сероводородсодержащих вод данная технология не рассматривалась, т.к. при концентрациях H_2S менее 100 мг/л более экономичными и простыми считались методы окисления (гипохлоритом натрия, хлором, перманганатом калия, озоном, перекисью и т.д.), а железо-каталитическая технология представлялась достаточно сложной, поскольку включала несколько этапов: связывание, сепарирование

(отстаивание) и регенерацию гидроксида железа (III) в отдельных технологических аппаратах.

Продолжая научно-исследовательскую деятельность в направлении каталитического окисления сульфидов, сероводорода и его производных, на кафедре водного хозяйства ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова совместно с ООО НПП «ЭКОФЕС» ведётся разработка новой технологии железо-каталитического окисления сероводорода, в основе которой лежит совмещение этапов связывания, отделения гидроксида и сульфидов железа, а также регенерация в одном технологическом аппарате с мембранным разделителем [11]. Данное решение позволяет адаптировать технологию железо-каталитического окисления сероводорода под нужды хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения.

Экспериментально-исследовательская деятельность ведётся по двум направлениям:

- исследование кинетики гомогенного каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха в реакторе с мембранным разделителем;
- оптимизация гидромеханических режимов работы реактора-окислителя в условиях совмещенного и выносного мембранного разделителя.

Цель работы – изучение кинетики процесса каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха в присутствии гомогенного катализатора – гидроксида железа (III), и влияние на процесс основных физико-химических факторов.

Материалы и методы исследований

Изучение кинетики железо-каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха в реакторе с мембранным разделением (далее ЖКО) выполняли посредством проведения серии активных однофакторных и многофакторных экспериментов [11]. Исходя из теоретических и

практических данных, в качестве основных факторов, влияющих на процесс ЖКО, были выделены как наиболее значимые: концентрация катализатора – $\text{Fe}(\text{OH})_3$ в реакторе-окислителе, время контакта сероводородной воды с реакционной средой (далее время контакта), содержание сероводорода в отчищаемой воде, расход воздуха, подаваемый для окисления сероводорода и регенерации железа, а также pH и температура среды.

В данной статье представлены результаты исследования влияния на каталитическое окисление сероводорода дозы гидроксида железа (III), pH среды в реакторе-окислителе и времени контакта очищаемой воды с катализатором.

В качестве критерия оценки эффективности каталитического окисления сероводорода в воде приняты основные технологические параметры – остаточной сероводород и эффект очистки.

Сероводород в исходной и очищенной воде определяли: при концентрации менее 1 мг/дм^3 по методике РД 5.24.450-2010 «Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-n-фенилендиамином», при концентрации более 1 мг/дм^3 по методике ПНД Ф 14.1:2:4.178-02 «Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации сульфидов, гидросульфидов и сероводорода в пробах питьевых, природных и сточных вод фотометрическим методом». Исходную модельную воду готовили непосредственно перед использованием для исключения потери концентрации сероводорода при контакте с кислородом воздуха или в процессе естественной дегазации. Для приготовления модельной воды использовали сернистый натрий 9-водный (ч.д.а.) и дистиллированную воду. Для обеспечения проведения экспериментов в заданных диапазонах pH исходной воды и среды в реакторе-окислителе, применяли растворы соляной кислоты и гидроксида натрия.

Для подкисления вод и среды в реакторе-окислителе применяли растворы соляной кислоты, для подщелачивания - растворы гидроксида натрия.

Эксперименты выполняли на лабораторном комплексе (рисунок 1 и 2) Для поддержания постоянных температурных условий среды реактор-окислитель и бак исходной воды помещали в зону крио-термостатирования. Описание работы экспериментальной установки подробно представлено в работе [11].



Рис. 1. – Экспериментальный лабораторный комплекс

В качестве мембранного разделительного элемента в реакторе-окислителе в лабораторной установке применяли полволоконную ультрафильтрационную мембрану из полиэфирсульфона фирмы BASF, с удельной нагрузкой по очищаемой воде $6 \div 14$ л/ч·м².

При проведении однофакторных экспериментов в качестве постоянных точек эксперимента были приняты следующие значения:

- концентрация сероводорода в исходной воде – $50 \pm 1,0$ мг/дм³;
- концентрация катализатора Fe(OH)₃ – $500 \pm 5,0$ мг/дм³;
- время контакта – 0,25 ч;

- pH среды – $7,0 \pm 0,1$;
- расход подаваемого воздуха $0,3 \text{ дм}^3$ на $1,0 \text{ дм}^3$ объёма реактора;
- температура среды $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

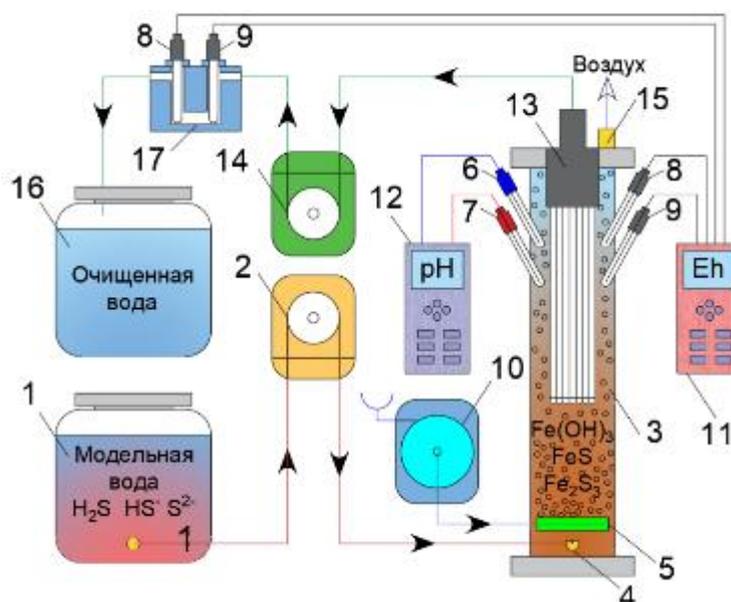


Рис.2. – Принципиальная схема лабораторной установки железокаталитического окисления H_2S кислородом воздуха с мембранным разделением:

1 – ёмкость с исходно (модельной) водой; 2 – насос подачи модельной воды; 3 – реактор-окислитель; 4 – распределитель сероводородной воды; 5 – аэратор; 6 – электрод pH; 7 – датчик температуры; 8 – хлор-серебряный электрод; 9 – платиновый электрод; 10 – компрессор; 11 – вольтметр; 12 – pH – метр; 13 – ультрафильтрационный разделитель; 14 – насос пермеата (очищенной воды); 15 – воздухоотводчик; 16 – ёмкость очищенной воды; 17 – ячейка для измерения редокс–потенциала.

Изучение влияния концентрации железного катализатора на эффективность окисления сероводорода проводили, изменяя дозу гидроксида железа (III) в реакторе, начиная от 1 стехиометрической дозы (необходимой для окисления $50 \text{ мг H}_2\text{S}$), равной 100 мг/дм^3 и до 3000 мг/дм^3 (момента

полного отсутствия сероводорода в пермеате (фильтрате)). Динамика работы реактора-окислителя отслеживалась и фиксировалась при помощи показателя окислительно-восстановительного потенциала среды (Eh-потенциала). В экспериментах по изучению влияния рН на кинетику каталитического окисления сероводорода при постоянных условиях и фиксированной дозе гидроксида железа, изменяли значения водородного показателя в пределах от 6 до 10 единиц с шагом в 0,5. Эксперимент проводился с дозами $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – 100, 500 и 1000 мг/дм³.

При изучении влияния времени контакта в однофакторных экспериментах при постоянных условиях значения пребывания очищаемой воды в реакторе-окислителе изменялись в диапазоне от 0,25 ч до 1,0 ч, с шагом в 0,25 ч. Эксперимент проводился с дозами $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – 100, 500 и 1000 мг/дм³.

Обсуждение результатов исследований

В результате исследования влияния дозы железного катализатора на эффективность окисления сероводорода была получена зависимость концентрации остаточного сероводорода в пермеате от дозы $\text{Fe}(\text{OH})_3$ представленная на рисунке 3.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наилучший эффект каталитического окисления сероводорода достигается при дозах гидроксида железа (III) – 500 – 1000 мг/дм³. В интервале дозы железа от 100 до 800 мг/дм³, несмотря на высокий эффект окисления 99,18 – 99,84 %, остаточный сероводород в пермеате превышал требуемое значение предельно-допустимой концентрации в питьевой и технической воде (ПДК=0,05 мг/дм³). Увеличение дозы катализатора (> 1200 мг/дм³) дополнительного эффекта не дало.

Фиксируемая в динамике работа реактора-окислителя (рис.4) показала, что наиболее стабильное окисление сероводорода в реакторе достигается при дозах катализатора, начиная от 400 мг/дм³.

При меньших значениях катализатора редокс-потенциал в реакторе достаточно нестабилен, а его отрицательные значения свидетельствуют о наличии несвязанного или не окисленного сероводорода в реакционной смеси. Следовательно, последнее и приводит к проскоку сероводорода в пермеат.

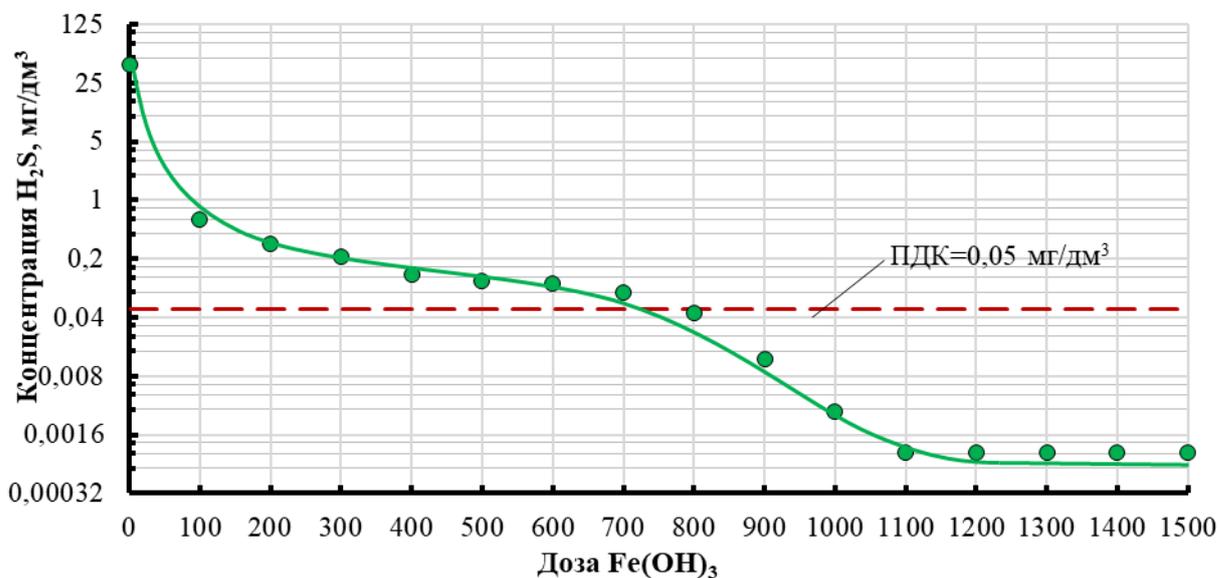


Рис.3. – Зависимость остаточного сероводорода в пермеате от дозы катализатора – Fe(OH)₃ (H₂S^{исх.}=50 мг/дм³, рН среды 7,0 ед., время контакта 0,25 ч, t=20°C q^{во3}=0,3 дм³/дм³)

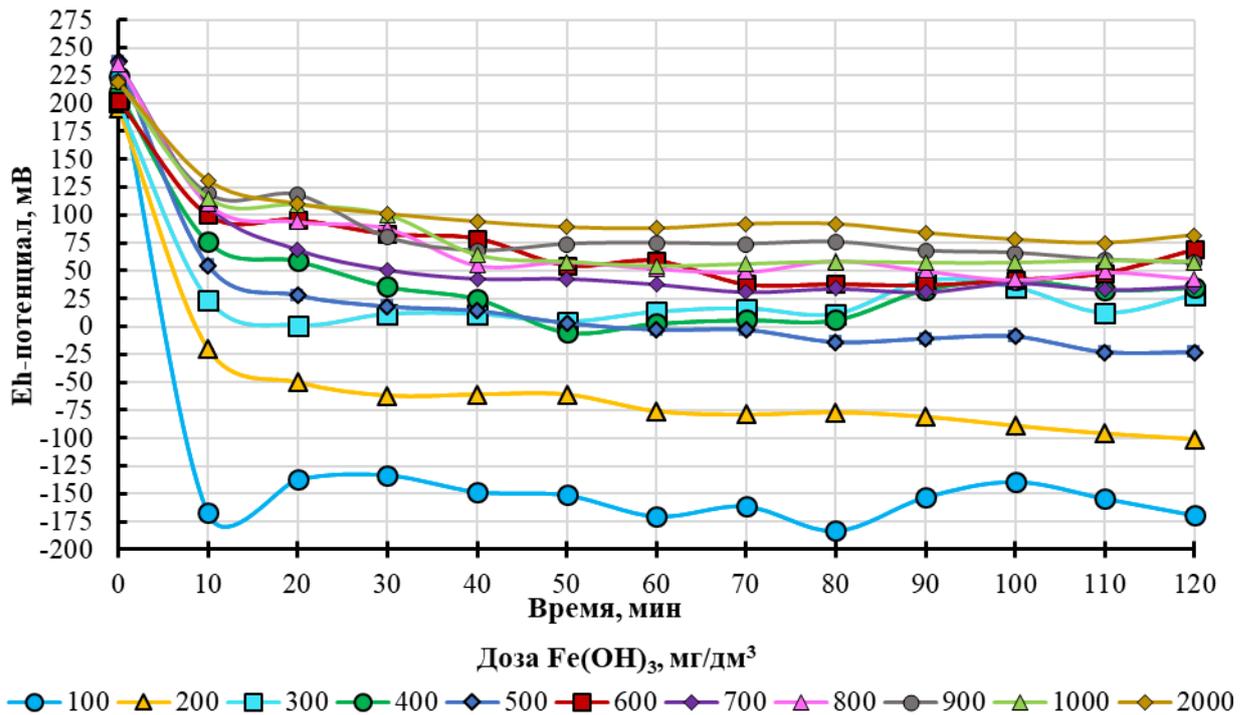


Рис.4. – Динамика работы реактора-окислителя при разных дозах катализатора ($H_2S^{исх.}=50$ мг/дм³, рН среды 7,0 ед., время контакта 0,25 ч, $t=20^{\circ}C$ $q^{воз}=0,3$ дм³/дм³)

Результаты исследования влияния рН на величину остаточного сероводорода в пермеате при дозах Fe(OH)₃ – 100, 500 и 1000 мг/дм³ представлены на рисунке 5.

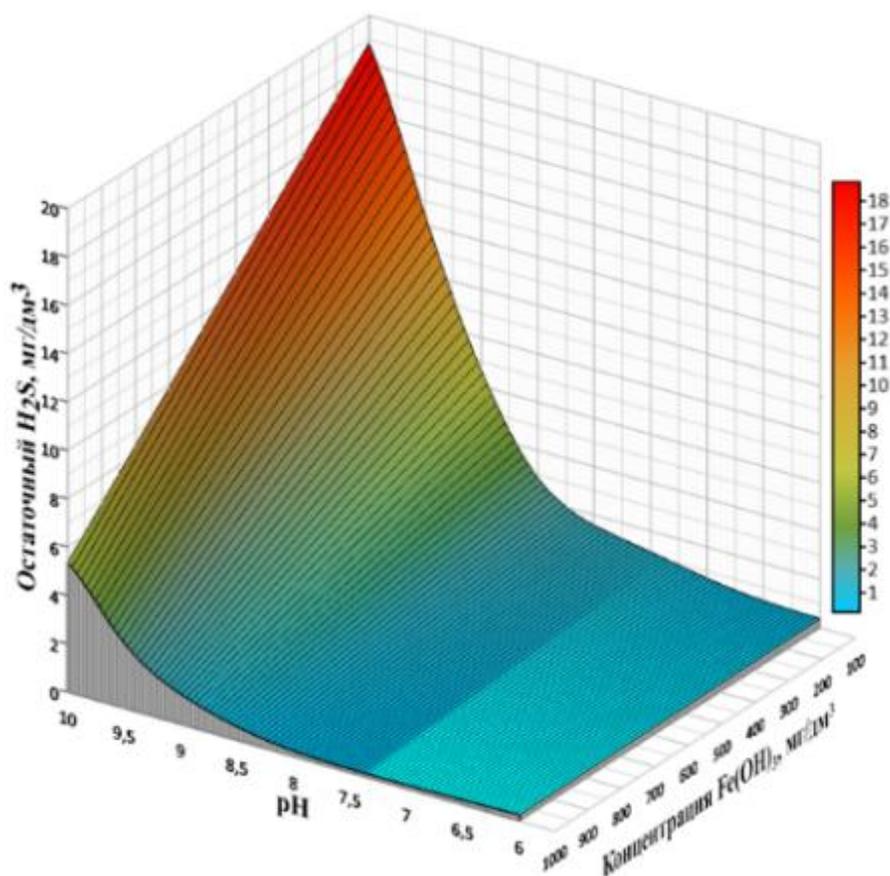


Рис.5. – Влияние рН при разных дозах катализатора ($H_2S^{исх.}=50$ мг/дм³, рН среды 7,0 ед., время контакта 0,25 ч, $t=20^{\circ}C$ $q^{воз}=0,3$ дм³/дм³)

Полученные результаты показали, что наилучший эффект очистки воды от сероводорода достигнут при рН от 6,0 до 8,0. Наиболее высокое содержание остаточного сероводорода зафиксировано в экспериментах при рН от 8,5 до 10,0 единиц. Последнее связано с тем, что концентрация активных ионов железа в растворе, участвующих в процессах связывания и каталитического окисления сероводорода, обусловлена величиной рН. В интервале рН=6,0÷8,5 концентрация ионов железа в растворе находится в пределах от $3,8 \cdot 10^{-14}$ до $1,2 \cdot 10^{-21}$ моль/дм³. В среде с рН=8,5÷10,0 концентрация ионов железа составляет всего $3,8 \cdot 10^{-23}$ ÷ $3,8 \cdot 10^{-26}$ г·моль/дм³. Из полученного следует, что при рН 6,0÷8,5 доля активного железа составляет 62,5 – 76,0% в то время как при значениях рН 8,5÷10,0 не превышает 30,5 – 35,0 %, следовательно, скорость образования сульфида железа в щелочных

средах мала и для полного связывания HS^- необходимо многократное увеличение дозы $\text{Fe}(\text{OH})_3$ или времени контакта.

Результаты исследования влияния времени контакта на величину остаточного сероводорода в диапазоне pH 6,0 ÷ 10,0 и дозах $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – 100, 500 и 1000 мг/дм³ представлены на рисунках 6, 7 и 8 соответственно.

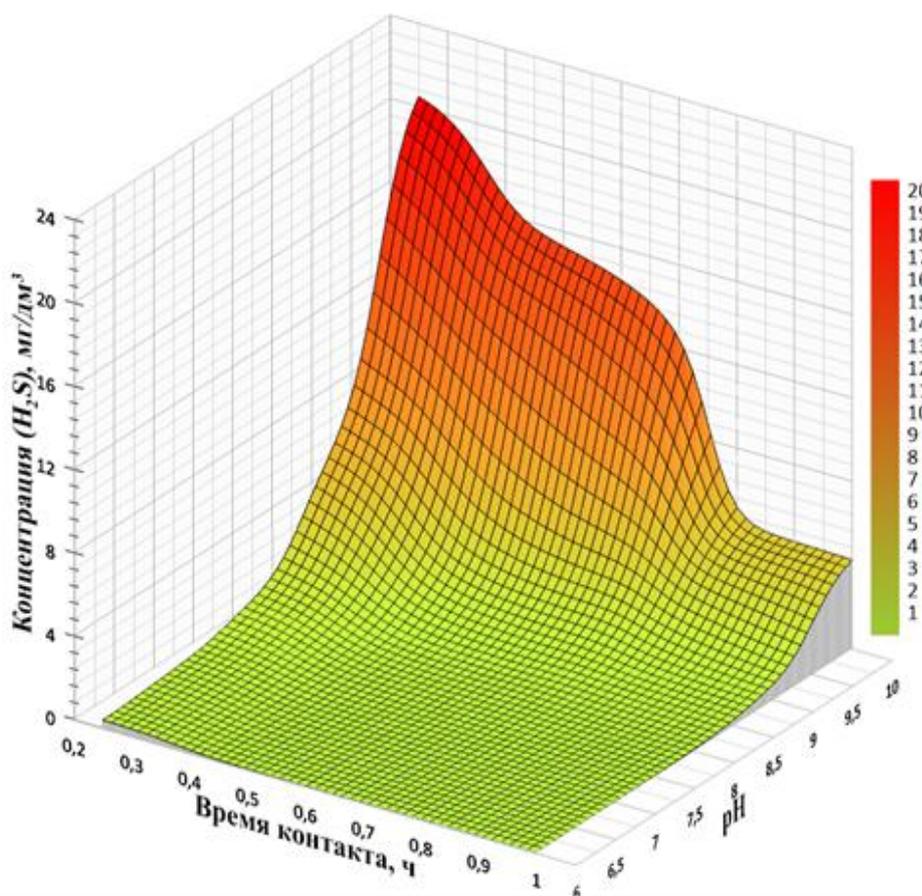


Рис. 6. – Влияние времени контакта на остаточную величину сероводорода в пермеате в диапазоне pH 6-10 при дозе катализатора – $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – 100 мг/дм³ ($\text{H}_2\text{S}^{\text{исх.}}=50$ мг/дм³, $t=20^\circ\text{C}$ $q^{\text{воз}}=0,3$ дм³/дм³)

В эксперименте с дозой $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – 100 мг/дм³ снижение содержания сероводорода до значений ПДК было зафиксировано при времени контакта 0,5 ч и pH=7,0, а также при времени контакта 1,0 ч и pH=8,0 мг/дм³. При времени контакта 0,25 ч концентрация остаточного сероводорода находилась в пределах 0,35 – 0,5 мг/дм³.

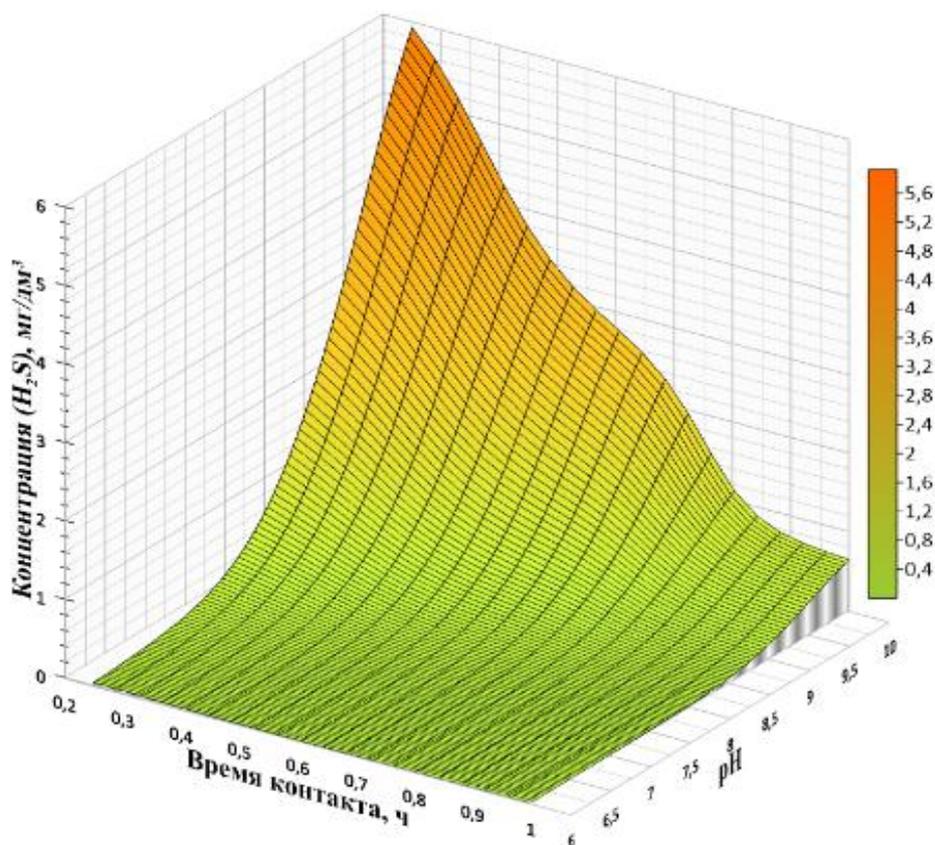


Рис. 7. – Влияние времени контакта на остаточную величину сероводорода в пермеате в диапазоне рН 6-10 при дозе катализатора – $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – 500 мг/дм^3 ($\text{H}_2\text{S}^{\text{исх.}}=50 \text{ мг/дм}^3$, $t=20^\circ\text{C}$ $q^{\text{воз}}=0,3 \text{ дм}^3/\text{дм}^3$)

В эксперименте с дозой $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – 500 мг/дм^3 снижение содержания сероводорода до значений ПДК было зафиксировано уже при времени контакта 0,25 ч и рН=6,0. При времени контакта 0,5 ч значение остаточного сероводорода находилось в требуемом пределе при рН=8,0 мг/дм^3 , а при времени контакта 1,0 ч при рН=9,0.

Наилучший эффект очистки был достигнут в эксперименте с дозой $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – 1000 мг/дм^3 . Снижение содержания сероводорода до значений ПДК было зафиксировано при времени контакта 0,25 ч и рН=8,0. При времени контакта 0,5 ч значение остаточного сероводорода находилось в требуемом пределе при рН=8,5 – 9,0, а с временем контакта 1,0 ч при рН=9,0 – 9,5.

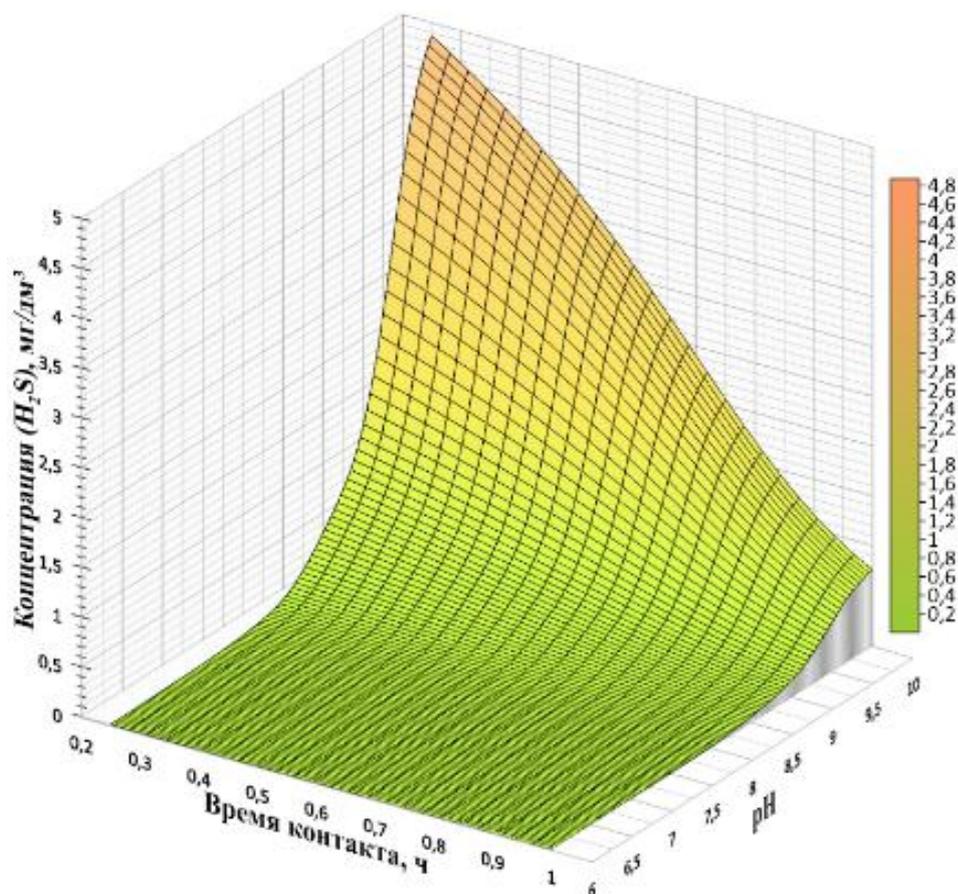


Рис. 8. – Влияние времени контакта на остаточную величину сероводорода в пермеате в диапазоне pH 6-10 при дозе катализатора – $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – 1000 мг/дм^3
($\text{H}_2\text{S}^{\text{исх.}}=50 \text{ мг/дм}^3$, $t=20^\circ\text{C}$ $q^{\text{воз}}=0,3 \text{ дм}^3/\text{дм}^3$)

Из проведенных экспериментальных исследований следует, что наибольшее влияние на эффект отчистки воды от сероводорода оказывает pH. Оптимальные значения pH, в зависимости от других факторов, находятся в интервале от 6,5 до 8,5 единиц. Следующим по значимости выступает время контакта, оптимальное значение которого, согласно исследованиям, находится в пределах от 0,5 – до 1,0 ч. Исследования дозы катализатора показали, что изменение его общей массы в реакторе имеет значение только при высоких значениях pH и времени контакта не менее 0,5 ч.

Проведенные исследования были направлены на получение экспериментальных данных с целью разработки ортогонального центрального композиционного плана и последующей оптимизации

разрабатываемой технологии. Полученное в будущем уравнение регрессии второго порядка позволит более целостно взглянуть на кинетику протекающего процесса железо-каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха в реакторе - окислителе с мембранным разделителем.

Одними из главных преимуществ технологии являются экономичность, экологичность и простота аппаратного оформления [11]. В защиту авторских прав получен патент на изобретение RU 2020127777 А – «Способ очистки воды от сероводорода».

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта «Аспиранты» по договору №20-35-90048\20 на тему «Исследование гомогенного каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха в реакторе с мембранным разделителем».

Выводы

1. Экспериментально установлено влияние дозы катализатора – $\text{Fe}(\text{OH})_3$ на эффективность удаления сероводорода из воды. Наилучший эффект каталитического окисления сероводорода достигается при дозах гидроксида железа (III) – 500 – 1000 мг/дм³. Динамика работа реактора-окислителя показала, что наиболее стабильная работа реактора достигается при дозах катализатора, начиная от 400 мг/дм³.
 2. Установлено влияние pH на величину остаточного сероводорода в воде. Наилучший эффект очистки воды от сероводорода был достигнут при pH от 6,0 до 8,0. Наиболее высокое содержание остаточного сероводорода зафиксировано в экспериментах при pH от 8,5 до 10,0 единиц.
 3. Установлено влияние времени контакта на эффективность железо-каталитического окисления сероводорода кислородом воздуха. Наилучшие
-

результаты были получены при контакте 1,0 ч. Достижение значений ПДК в очищенной воде при минимальном времени контакта (0,25 ч) было зафиксировано только при pH 6,0÷8,0 и дозах Fe(OH)₃ – 500 и 1000 мг/дм³ соответственно.

4. Предлагаемая технология отличается простотой и экологичностью – качества, которые являются основными условиями при разработке новых технологий очистки сероводородных подземных вод.

Литература

1. Бусев А. И, Симонова Л. Н. Аналитическая химия серы. Москва: Наука, 1975. 7 с.
2. Марьяш, С. А., Дрововозова Т. И., Дрововозова Г. С. Технические решения очистки подземных вод, содержащих сероводород // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4969
3. Марьяш, С. А., Дрововозова Т. И. Очистка подземных вод, содержащих сероводород, пероксидом водорода // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4444
4. Гириков О.Г. Пат. 2361822 Российская Федерация, МПК C02F1/74, B01D37/02, C02F103/02. Способ очистки воды от сероводорода и сульфидов; патентообладатель ГОУ ВПО Новосибирский гос. архит.-строит. ун-т (Сибстрин). – № 2007129872/15; заявл. 03.08.07; опубл. 20.07.09.
5. Startsev, A., Kruglyakova, O., Chesalov, Yu., Paukshtis, E., Avdeev, V., Ruzankin, S., Zhdanov, A., Molina, I., Plyasova, L. (2016). Low-temperature catalytic decomposition of hydrogen sulfide on metal catalysts under layer of solvent. Journal of Sulfur Chemistry. 37. 229-240. 10.1080/17415993.2015.1126593.



6. Исмагилов З. Р., Хайрулин С. Р., Филиппов А. Г., Прямое гетерогенно-каталитическое окисление сероводорода для очистки попутных нефтяных газов // Химия в интересах устойчивого развития. 2017. Т. 25. № 6. С. 589-597. DOI 10.15372/KhUR20170601.
7. Кочетков А. Ю., Кочеткова Р. П., Резников С. А. Катализаторы жидкофазного окисления сернистых соединений в сточных водах // Водоочистка. 2007. № 7. С. 13-20.
8. Козырев Д. П., Купцов И. Г. Удаление сероводорода из артезианских вод посредством гидрата окиси железа с последующей их регенерацией // Москва: Гостоптехиздат, 1946. – 28 с.
9. Poulton, Simon & Krom, Michael & Rijn, Jaap & Raiswell, Robert. (2002). The use of hydrous iron (III) oxides for the removal of hydrogen sulfide in aqueous systems. Water research. 36. 825-34. 10.1016/S0043-1354(01)00314-1.
10. Черкесов А. Ю. Очистка сернисто-щелочных сточных вод нефтеоргсинтеза от сероводорода: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.04 / Черкесов А. Ю; [Место защиты: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет ГУВПО]. Волгоград, 2015. 173 с.
11. Черкесов А. Ю., Щукин С. А., Денисова И. А. Исследование железокаталитического окисления сероводорода кислородом воздуха в реакторе с мембранным разделителем // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 1. С. 6-11. DOI 10.35776/VST.2021.01.01.

References

1. Busev A. I, Simonova L. N. Analiticheskaya khimiya sery`. [Analytical chemistry of sulfur]. Moskva: Nauka, 1975. 7 p.
2. Mar`yash, S. A., Drovovozova T. I., Drovovozova G. S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4969

3. Mar`yash, S. A., Drovovozova T. I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4444
4. Girikov O.G. Pat. 2361822 Rossijskaya Federaciya, MPK S02F1/74, B01D37/02, S02F103/02. Sposob ochistki vody` ot serovodoroda i sul`fidov [Method of water purification from hydrogen sulfide and sulfides]; patentoobladatel` GOU VPO Novosibirskij gos. arxit.-stroit. un-t (Sibstrin). № 2007129872/15; zayavl. 03.08.07; opubl. 20.07.09.
5. Startsev, A., Kruglyakova, O., Chesalov, Yu., Paukshtis, E., Avdeev, V., Ruzankin, S., Zhdanov, A., Molina, I., Plyasova, L. (2016). Journal of Sulfur Chemistry. 37. 229-240. 10.1080/17415993.2015.1126593.
6. Ismagilov Z. R., Xajrulin S. R., Filippov A. G., Ximiya v interesax ustojchivogo razvitiya. 2017. № 6. pp. 589-597. DOI 10.15372/KhUR20170601.
7. Kochetkov A. Yu., Kochetkova R. P., Reznikov S. A. Vodoochistka. 2007. №7. pp. 13-20.
8. Kozy`rev D. P., Kupczov I. G. Uдалenie serovodoroda iz artezijskix vod posredstvom gidrata okisi zheleza s posleduyushchej ih regeneraciej [Removal of hydrogen sulfide from artesian waters by means of iron oxide hydrate with their subsequent regeneration]. Moskva: Gostoptexizdat, 1946. 28 p.
9. Poulton, Simon & Krom, Michael & Rijn, Jaap & Raiswell, Robert. (2002). Water research. 36. 825-34. 10.1016/S0043-1354(01)00314-1.
10. Cherkesov A. Yu. Ochistka sernisto-shhelochny`x stochny`x vod nefteorgsinteza ot serovodoroda [Purification of sulphurous-alkaline waste water from oil and gas synthesis from hydrogen sulphide]: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk: 05.23.04 Cherkesov A. Yu. Mesto zashhity: Volgogradskij gosudarstvenny`j arxitekturno-stroitel`ny`j universitet- GUVPO.Volgograd, 2015. 173 p.
11. Cherkesov A. Yu., Shhukin S. A., Denisova I. A. Vodosnabzhenie i sanitarnaya texnika. 2021. № 1. p. 6-11. DOI 10.35776/VST.2021.01.01.