

УДК 628.16

DOI: 10.31774/2658-7890-2020-1-43-59

Ю. М. Косиченко, В. Ф. Сильченко

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

ТЕХНОЛОГИИ УДАЛЕНИЯ СЕРОВОДОРОДА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Цель: обзор экономически выгодных и экологически безопасных методов очистки сероводородсодержащих природных вод, улучшающих их качество и санитарно-гигиенические характеристики. Во многих регионах страны источником водоснабжения населения, объектов коммунально-бытового назначения и сельского хозяйства являются подземные воды. Сероводород высокотоксичен и оказывает негативное воздействие на здоровье человека при употреблении воды с высоким его содержанием, а также вызывает коррозию металлических труб, баков, котлов и т. д. Удаление сероводорода из подземных вод, используемых в хозяйственно-питьевых целях, является необходимым мероприятием, требующим применения современных технологий водоочистки. Конкретный метод очистки определяется исходя из качества и состава воды, а также содержания в подземных водах других загрязнителей. **Материалы и методы:** на основании исследований известных ученых, таких как С. А. Дуров, А. А. Кастальский, С. Н. Линевич, Л. Н. Фесенко, специализировавшихся в области обработки сероводородсодержащих природных вод, авторами выполнен обзор наиболее эффективных, современных и экономически выгодных технологий очистки загрязненных вод, а также рассмотрены основные методы очистки вод от сероводорода. **Результаты:** разработанная С. Н. Линевичем высокоэффективная многофункциональная технологическая схема очистки подземных вод от железа, марганца, сероводорода и аммиака, по мнению авторов, является наиболее эффективной и целесообразной для применения среди рассмотренных технологий. **Выводы:** в результате контактной коагуляции в выбранной технологии обеспечивается глубокое осветление, обесцвечивание воды. Помимо удаления железа, марганца, сероводорода и аммиака технология предусматривает обеззараживание методом озонирования, который в свою очередь является современным и эффективным.

Ключевые слова: водоподготовка; сероводородсодержащие подземные воды; методы очистки; сорбция; дегазация; контактная коагуляция.

Yu. M. Kosichenko, V. F. Silchenko

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

HYDROGEN SULPHIDE REMOVAL TECHNOLOGIES IN GROUNDWATER TREATMENT

Purpose: a review of cost-effective and environmentally friendly methods of hydrogen sulfide-containing natural waters treatment that improve their quality and sanitary and hygienic characteristics. In many regions of the country, groundwater is a source of water supply for population, public utilities and agriculture. Hydrogen sulphide is highly toxic and has a negative effect on human health when drinking water with its high content, and also causes corrosion of metal pipes, tanks, boilers, etc. Hydrogen sulphide removal from groundwater used for drinking and household purposes is a necessary process requiring the use of modern



water treatment technologies. A specific treatment method is determined on the basis of water quality and composition as well as the content of other pollutants in groundwater. **Materials and methods:** a review of the most effective, modern and cost-effective technologies for contaminated water treatment as well as the basic methods of water purification from hydrogen sulphide based on the research of such famous scientists as S. A. Durov, A. A. Kastal'sky, S. N. Linevich, L. N. Fesenko, who specialized in hydrogen sulfide-containing natural waters treatment was performed. **Results:** according to the authors, the highly efficient multifunctional technological scheme developed by S. N. Linevich for groundwater purification from iron, manganese, hydrogen sulphide and ammonia is the most effective and appropriate for use among the technologies considered. **Conclusions:** a deep clarification and water discoloration is provided by the selected technology as a result of contact coagulation. Besides removing iron, manganese, hydrogen sulphide and ammonia, the technology provides disinfection using the advanced and effective ozonation method.

Key words: water treatment; hydrogen sulphide-containing groundwater; treatment methods; sorption; degassing; contact coagulation.

Введение. Проблема очистки природных вод от загрязнений, а также выбора наиболее эффективных методов очистки является актуальной на сегодняшний день. Расположенные на территории страны подземные воды – единственный источник хозяйственно-питьевого водоснабжения для многих регионов. Состав и качество воды таких источников требует современных методов очистки и доведения воды до требуемых норм. Присутствие сероводорода в подземных водах препятствует их использованию для водоснабжения населения. Сероводород в подземной воде находится в виде ионов S^{2-} и HS^- либо в молекулярном состоянии (H_2S). Зависит это в большей степени от показателя pH, который имеет вода. Конкретный метод очистки определяется исходя из качества и состава воды, а также содержания в подземных водах других загрязнителей.

Технологии удаления сероводорода в процессе водоподготовки были отражены в работах С. А. Дурова [1], А. А. Кастальского [2], С. Н. Линеви-ча [3–7], Л. Н. Фесенко [8–10]. В них представлены современные и эффективные технологические схемы очистки сероводородсодержащих вод, рассмотрены методы и технологии удаления сероводорода и других загрязнений из природных вод.

Материалы и методы. Материалами обзора послужили исследования ученых [1–10], специализировавшихся в области удаления сероводорода из природных водоисточников.

В работе рассмотрены основные методы очистки сероводородсодержащих вод, которые подразделяются: на физический (аэрация), химический (с применением сильных окислителей), сорбционный (с применением активированного угля) и биохимический (окисление бактериями).

Физический метод – аэрирование. Использование данного метода позволяет удалить только молекулярную часть сероводорода H_2S и в незначительных количествах HS . Полное удаление сероводорода возможно при дополнительном подкислении воды, снижающем уровень pH ниже 5. При этом повышенная концентрация ионов водорода подавляет диссоциацию сероводорода и переводит в молекулярную форму. Использование аэраторов позволяет удалить 65–70 % растворенного в воде сероводорода. Главным условием является оптимальное количество подаваемого воздуха [11].

Аэрационные установки, используемые в настоящее время, делятся:

- на дегазаторы пленочные, представляющие собой колонки, оснащенные различными насадками, по которым пленкой стекает вода;
- дегазаторы пенные, основным элементом которых служит перфорированная пластина, вдоль которой протекает вода тонким слоем и вспенивается под действием поперечного тока воздуха;
- дегазаторы барботажные, в которых сжатый воздух продувается через слой воды, проходящей медленную дегазацию;
- дегазаторы вакуумные, в которых за счет использования пароструйных и водоструйных эжекторов и вакуумных насосов создается вакуум, вызывающий кипение жидкости.

Химические методы позволяют добиться полной дегазации. Главным фактором очистки является окисление сероводородсодержащих соединений либо их связывание с молекулами других веществ и перевод в формы, менее активные в воде [12]. Сера, полученная в результате химической реакции, удаляется фильтрованием с использованием коагуляции. Неприятные запахи полностью устраняются посредством фильтрования через загрузку активированного угля [13].

В настоящее время альтернативным вариантом очистки подземных вод от сероводорода является непрерывное добавление в фильтры, предварительно обработанные марганцево-глауконитовым песком (MGS), 1–4 % раствора перманганата калия. Он применяется для выведения из воды сероводорода, растворенного марганца и железа. Регенерация песка выполняется перманганатом калия [14].

В сорбционном методе применяют адсорбенты, чаще всего древесные активированные угли, а также рекуперационный уголь AP-3, анионит АН-31, аминолигнин, черный (омарганцованный) песок и др. [15]. Иногда их совмещают с окислителями, что приводит к уменьшению требуемого количества реагентов и сорбентов. Процесс адсорбции прямо зависит от структуры используемого угля, концентрации H_2S в воде и структур образующихся на угле оксидов. Реализуют указанные методы на напорных или открытых угольных или напорных фильтрах с предварительным введением в обрабатываемую воду окислителя.

Наибольшее распространение получили химические (реагентные) и комбинированные методы очистки воды от сероводорода. В качестве реагентов при химической обработке используется хлор и его производные, озон, перекись водорода, марганцовокислый калий и др. Чаще всего из перечисленных реагентов используется хлор, как наиболее изученный и экономичный [16].

С. А. Дуровым были произведены исследования и сравнение эффективности следующих методов аэрации: продувка, дождевание, фонтанирование, выветривание с поверхности в длинном желобе, пропуск через градирни [1]. При выветривании в желобе и продувке воздухом наблюдалась опалесценция обрабатываемой воды. С помощью градирен удалось удалить всего лишь 60 % сероводорода. Из всех рассмотренных способов аэрации наилучший результат, по данным С. А. Дурова, дало фонтанирование. Однако дальнейшие, более тщательные исследования не были проведены.

По утверждению С. А. Дурова, методы аэрирования не приводят к уменьшению прозрачности воды и дают высокий эффект очистки от сероводорода. Однако это утверждение противоречиво и вызывает много сомнений.

А. А. Кастальским было предложено удалять сероводород с помощью дегазатора с насадкой из пластмассовых или керамических колец, работающих в условиях противотока воды и воздуха, подаваемого вентилятором. Сам автор в своей работе [2] отмечал, что для очистки от сероводорода данным методом необходимо предварительное подкисление до $\text{pH} = 5$ или менее. А. А. Кастальским не были также решены проблемы образования элементарной серы и карбоната кальция. Поэтому даже хордовая насадка из деревянных реек имела некоторое преимущество перед насадкой из колец Рашига.

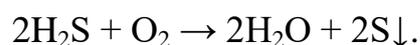
Вопросами дегазационной обработки сероводородных вод занимался С. Н. Линевич. Исследования проводились на трех экспериментальных установках: дождевальная, барботажная колонка и дегазаторы с насадками из колец Рашига. В результате было установлено, что эффект удаления сероводорода на дождевальной установке составил 30 %, на барботажной колонке после 60 мин обработки – 56 %, на дегазаторах с кольцами Рашига – 56 %. После этих исследований С. А. Линевич предлагал метод удаления из воды сероводорода способом пенной дегазации и способом напорной аэрации. Было установлено, что при использовании пенной дегазации и закрытой аэрации можно повысить эффект удаления сероводорода из воды на 20–25 % [5]. Однако ни один из исследованных методов не смог обеспечить эффективное удаление сероводорода до норм, установленных для питьевой воды.

Результаты и обсуждение. Растворяясь в воде, сероводород диссоциирует в два этапа, образуя раствор сероводородной кислоты:



Растворимость H_2S в воде зависит от pH [3, 4]. В кислой среде пре-

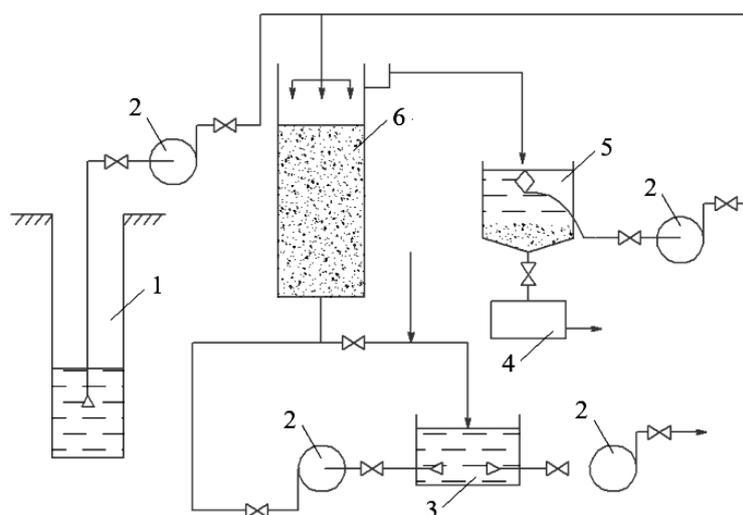
имущественно присутствует H_2S , в нейтральной и слабощелочной среде – HS^- , а в щелочной среде, при $\text{pH} > 10$ обнаруживается ион S^{2-} . Сероводород активно взаимодействует со многими окислителями. Кислород воздуха при обычных условиях, особенно на свету, способен окислять H_2S , поэтому сероводород, постоянно образующийся в природе, в процессе естественных процессов и как продукт деятельности человека не накапливается в атмосфере. Сероводородсодержащая вода мутнеет при контакте с воздухом вследствие образования коллоидной мелкодисперсной серы:



Рассматривая H_2S как восстановитель в окислительно-восстановительных реакциях, следует отметить, что, восстанавливая окислитель, ионы HS^- или S^{2-} окисляются до свободной серы или до сульфат-ионов в зависимости от активности и концентрации окислителя, температуры и pH . Процессы восстановления и окисления H_2S имеют большое значение при выборе способов обработки природных сероводородных вод [17, 18]. Ярко выраженные восстановительные свойства H_2S обусловлены тем, что ионы S^{2-} легко отдают свои электроны, превращаясь в нейтральные атомы [19].

Л. Н. Фесенко была разработана технология обработки подземных вод с содержанием сероводорода до 20 мг/л и минерализацией до 1500 мг/л для питьевого водоснабжения, включающая реактор-окислитель [8]. Данная технологическая схема представлена на рисунке 1.

В качестве загрузки реактора был использован антрацит крупностью 1–3 мм с высотой слоя 1,5 м. При скорости фильтрования до 1,5 м/ч в течение фильтроцикла продолжительностью до 24 ч снижение количества сероводорода происходило с 15,4 до 0 мг/л, запахи исчезали от 4–5 до 0 баллов. Водовоздушная промывка обеспечивала восстановление каталитических свойств загрузки и удаление из нее осадка. Производственная станция, реализующая данную технологию в одной из станций Краснодарского края, использует подземную воду из артезианских скважин с их общей производительностью 2400 м³/сут [20].

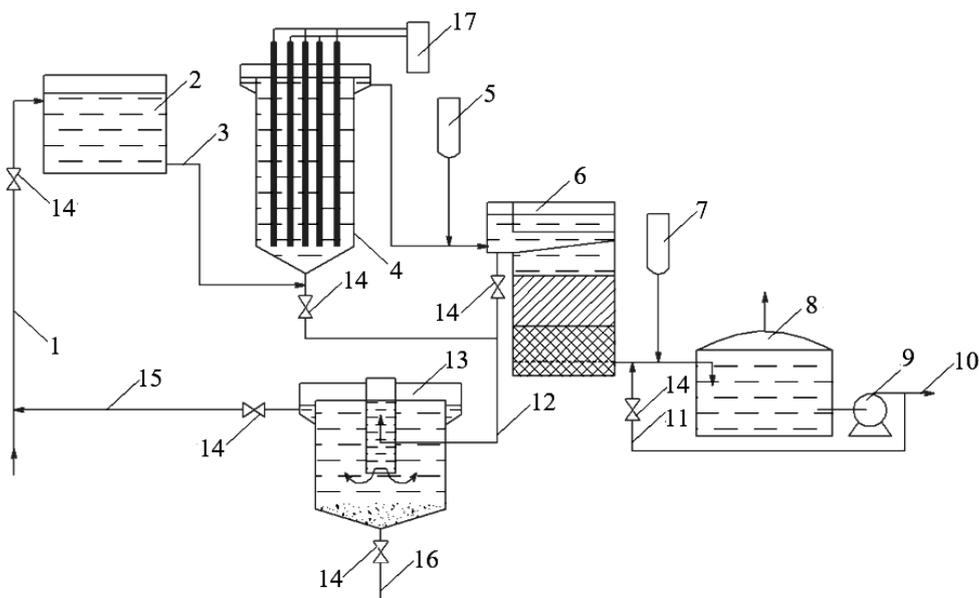


1 – скважина; 2 – насосы; 3 – резервуар чистой воды;
4 – блок обеззараживания; 5 – отстойник; 6 – реактор-окислитель

Рисунок 1 – Технологическая схема очистки подземной сероводородной воды электрохимическим методом

С. Н. Линеви́чем был проведен ряд экспериментальных исследований, посвященных установлению эффективности электрохимической обработки сероводородных вод [13]. Позже им была разработана и предложена технология комплексной очистки подземных вод от сероводорода, коллоидной серы и железа с применением электроокислительного (электрохимического) метода водообработки и контактных, двухслойных фильтров (рисунок 2).

Согласно данной технологии, подземная вода из водозаборных скважин подается в резервуар-усреднитель, в котором происходит накопление и усреднение качественного состава обрабатываемой воды, что обеспечивает стабильность и повышает надежность работы всего водоочистного комплекса. Далее вода поступает в электроокислитель, в котором в процессе электродиссоциации происходит образование гипохлорита натрия (NaClO), хлората натрия (NaClO_3) и озона (O_2). Они реагируют с присутствующими в обрабатываемой воде сероводородом (H_2S) и железом (Fe^{2+}), окисляя H_2S до S^0 , Fe^{2+} до Fe^{3+} . Одновременно с окислением гипохлорит натрия производит обеззараживание воды, что является несомненным преимуществом данной технологии.



1 – трубопровод, подающий исходную подземную воду на обработку;
2 – резервуар-усреднитель; 3 – подача воды на электроокислитель;
4 – электроокислитель (электролизер); 5 – дозатор, подающий рабочий раствор коагулянта (полиоксихлорид алюминия); 6 – контактный фильтр с двухслойной загрузкой (антрацитовая крошка и ОДМ-2Ф); 7 – дозатор, подающий рабочий раствор гипохлорида натрия; 8 – резервуар-накопитель очищенной воды; 9 – насос второго подъема; 10 – подача воды к потребителю; 11 – трубопровод, подающий воду на промывку контактного фильтра; 12 – сброс промывных вод на регенерацию; 13 – блок регенерации подземных вод; 14 – запорно-регулирующая арматура; 15 – возврат осветленной промывной воды на утилизацию; 16 – отвод осадка на утилизацию; 17 – блок электропитания электролизера

Рисунок 2 – Технологическая схема очистки подземных вод от сероводорода, коллоидной серы и железа с использованием электроокислительного метода и контактных фильтров

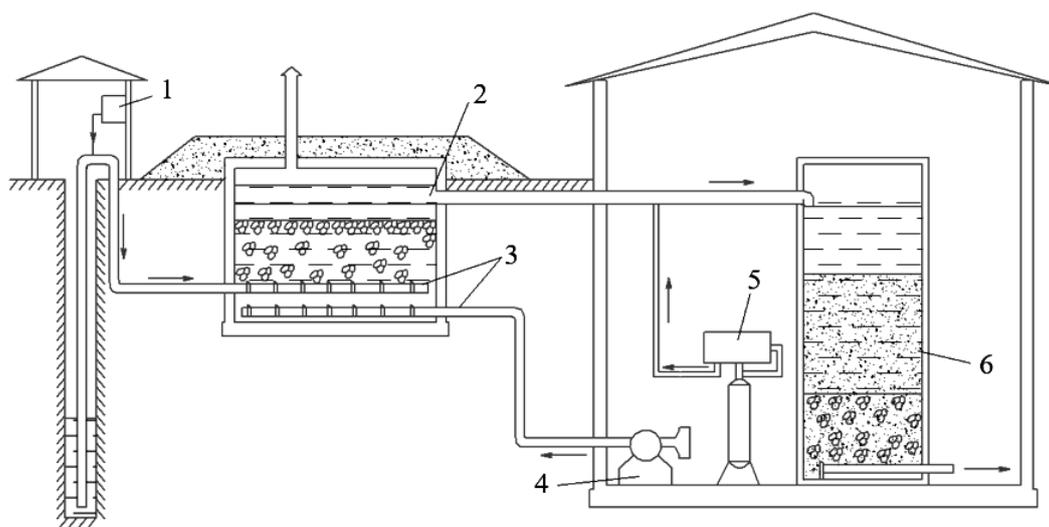
Предложенная технология с использованием электрохимического метода в сравнении с использованием жидкого хлора позволяет:

- обеспечить электролитическое получение гипохлорита натрия;
- исключить расходы на приобретение, транспортирование и хранение реагентов-окислителей;
- производить одновременное удаление железа, сероводорода и коллоидной серы;
- упростить требования по технике безопасности.

Биохимический метод используется при необходимости очистки биологически загрязненной воды от сероводорода, основан на использова-

нии окислительной способности серобактерий. Данный метод осуществляется по двухступенчатой схеме – аэроокислитель и скорый фильтр. Чтобы предотвратить появление в нижних слоях фильтров анаэробных бактерий и процессы восстановления сернистых соединений до сероводорода, в водяную подушку фильтра вводится хлор либо выполняется периодическая продувка снизу вверх с использованием сжатого воздуха [21].

Во ВНИИ «ВОДГЕО» был разработан новый метод очистки воды от сероводорода [22]. Сущность его заключается в том, что при пропуске воды и воздуха снизу вверх через затопленную зернистую загрузку при определенном значении окислительно-восстановительного потенциала создаются благоприятные условия для развития микроорганизмов, использующих сероводород. Схема установки для очистки биохимическим методом приведена на рисунке 3.



1 – дозатор биогенных компонентов P, N (нитрофоска); 2 – реактор для биохимического окисления сероводорода; 3 – система из дырчатых труб для распределения воды и воздуха; 4 – воздуходувка; 5 – хлоратор; 6 – песчаный фильтр

Рисунок 3 – Технологическая схема установки для очистки воды от сероводорода биохимическим методом

Рекомендуемые технологические параметры реактора биохимического окисления для очистки воды от сероводорода следующие: содержание сероводорода в исходной воде до 20 мг/л, после реактора биохимиче-

ского окисления 0,1–0,3 мг/л; время пребывания воды в реакторе биохимического окисления 0,5 ч; расход воздуха 2–5 м³/м³ воды [22].

Площадь биореактора ($F_{бр}$) рассчитывается по принятой удельной гидравлической нагрузке и суточному расходу природных вод:

$$F_{бр} = \frac{Q}{q_{уд}},$$

где Q – суточный расход водопроводной станции, м³/сут;

$q_{уд}$ – удельная гидравлическая нагрузка на 1 м² площади реактора, принимается по таблице 17 [22], м³/(м²·сут).

Количество воздуха ($Q_{возд}$), необходимое для обработки воды:

$$Q_{возд} = Q \cdot q_{уд,в},$$

где $q_{уд,в}$ – удельный расход воздуха на 1 м³ обрабатываемой воды, принимается по таблице 17 [22], м³/м².

Реактор биохимического окисления представляет собой резервуар, загруженный гравием крупностью зерен 20–50 мм. Высота гравийной загрузки 1 м, высота слоя воды над загрузкой не менее 1 м. По дну резервуара прокладываются две распределительные системы из дырчатых труб для равномерного распределения воды и воздуха. Диаметр отверстия для распределения воды равен 10 мм, воздуха – 2 мм. Скорость движения воды в начале дырчатой трубы 1,0–1,5 м/с, воздуха 15–20 м/с. Отверстия для разлива воды должны располагаться через 30 см, трубы через 0,5 м; для подачи воздуха расстояния между трубами равны 30 см, отверстия устраиваются через 15 см.

Отвод фильтрата предусматривается желобами, расположенными горизонтально в верхней части резервуара. Расстояние между желобами не более 2 м. Следует предусматривать дозатор для ввода в случае необходимости в исходную воду перед реактором раствора биогенных элементов – азота и фосфора.

В качестве реагента, содержащего азот и фосфор, можно применять нитрофоску (содержание азота 13–17 %, фосфорной кислоты 11–30 %) дозой до 2 мг/л. Желательно также запроектировать возможность введения в воду перед фильтрами коагулянта – сернокислого алюминия дозой 25–35 мг/л в пересчете на $Al_2(SO_4)_3$.

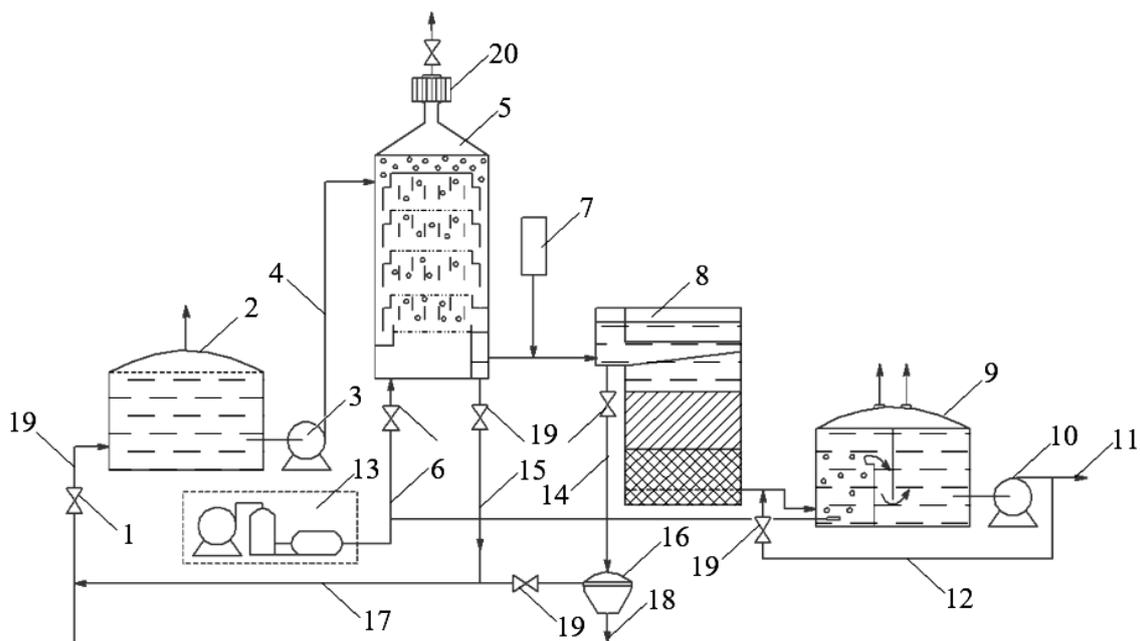
В результате многолетних экспериментально-теоретических исследований дегазационной водообработки природных и сточных вод С. Н. Линеви́чем был разработан ряд новых методов и технологий очистки и обеззараживания подземных вод сложного состава [4].

Марганец так же, как и железо, присутствует в подземных водах в различных формах. В подземных водах марганец находится обычно в форме двухвалентных солей. Такая вода неприятна на вкус, обладает вяжущим привкусом и имеет розоватую окраску, а при избыточном содержании вызывает различные заболевания [11].

Методы удаления марганца из воды подразделяются на реагентные и безреагентные. Достаточно известными методами демангана́ции являются окислительные, заключающиеся в окислении присутствующего в воде растворенного двухвалентного марганца до трех- или четырехвалентного, образующего в результате гидроксиды, что значительно упрощает удаление марганца из воды. В качестве окислительных реагентов применяются: перманганат калия, озон, хлор и его соединения, кислород воздуха.

Профессором С. Н. Линеви́чем разработана и предложена высокоэффективная многофункциональная технология очистки и обеззараживания подземных вод, содержащих железо, марганец, сероводород и аммиак совместно или в различных комбинациях [6]. Данная схема представлена на рисунке 4.

В зависимости от исходного состава воды, величины рН, количественного содержания загрязняющих веществ выбирается соответствующий режим работы дегазатора.



- 1 – подача исходной воды; 2 – промежуточный резервуар-усреднитель; 3 – насос, подающий воду в пенный дегазатор-реактор; 4 – подающий трубопровод; 5 – пенный дегазатор-реактор; 6 – трубопровод, подающий (периодически) в дегазатор-реактор воздух или озono-воздушную смесь; 7 – дозатор реагентов; 8 – контактный фильтр; 9 – резервуар-накопитель очищенной воды, совмещенный с контактной камерой вторичного озонирования; 10 – насос второго подъема; 11 – подача воды потребителю; 12 – трубопровод, подающий воду на промывку контактного фильтра; 13 – блок подачи сжатого воздуха и озono-воздушной смеси; 14 – трубопровод, отводящий воду после промывки контактного фильтра; 15 – трубопровод опорожнения от воды пенного дегазатора; 16 – центрифуга; 17 – возврат очищенной промывной воды; 18 – отвод осадка; 19 – запорно-регулирующая арматура; 20 – блок газоочистки

Рисунок 4 – Высокоэффективная многофункциональная технологическая схема очистки подземных вод от железа, марганца, сероводорода и аммиака, присутствующих в воде отдельно или в комбинации

Присутствующие в обрабатываемой воде двухвалентные ионы марганца и железа играют роль катализаторов при окислении сероводорода кислородом воздуха и озоном [4, 6].

Несмотря на относительную простоту и компактность, данная технология отличается своей высокой эффективностью, надежностью, экологичностью и позволяет вести очистку и обеззараживание подземных вод сложного химического состава.

Выводы. Наличие растворенного сероводорода придает воде непри-

ятный запах и обуславливает ее коррозионную активность при контакте с металлом, а также оказывает негативное воздействие на трубопроводы и сантехническое оборудование. Необходимость очистки сероводородсодержащих подземных вод, используемых в качестве источников хозяйственно-питьевого водоснабжения, обусловлена вредным воздействием сероводорода на организм человека.

Выбор эффективной схемы очистки воды от сероводорода зависит в первую очередь от исходного содержания загрязняющих веществ и их концентрации в очищаемой воде. Помимо этого, технология должна отличаться простотой в эксплуатации и быть экономически выгодной. Разработанная С. Н. Линевичем высокоэффективная многофункциональная технологическая схема очистки подземных вод от железа, марганца, сероводорода и аммиака, присутствующих в воде отдельно или в комбинации, по мнению авторов, является наиболее эффективной и целесообразной для применения среди рассмотренных технологий. В результате контактной коагуляции обеспечивается глубокое осветление, обесцвечивание воды. Помимо удаления железа, марганца, сероводорода и аммиака технология предусматривает обеззараживание методом озонирования, который в свою очередь является современным и эффективным.

Список использованных источников

- 1 Дуров, С. А. Очистка питьевой воды от сероводорода / С. А. Дуров. – Ростов н/Д.: Азчеркукх, 1935. – 99 с.
- 2 Кастальский, А. А. Проектирование устройств для удаления из воды растворенных газов в процессе водоподготовки / А. А. Кастальский. – М.: Стройиздат, 1957. – 120 с.
- 3 Линевич, С. Н. Применение метода контактной коагуляции в технологии обработки сероводородных вод и некоторые вопросы работы контактных осветлителей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. Н. Линевич. – Новочеркасск, 1958. – 18 с.
- 4 Линевич, С. Н. Комплексная обработка и рациональное использование сероводородсодержащих природных и сточных вод / С. Н. Линевич. – М.: Стройиздат, 1987. – 87 с.
- 5 Линевич, С. Н. Эффект удаления сероводорода из природных и сточных вод при аэрации / С. Н. Линевич, И. Н. Рождов // Изв. Сев.-Кавк. НЦ. – 1988. – С. 87–90.
- 6 Линевич, С. Н. Водные ресурсы, их подготовка и использование в хозяйственно-питьевом водоснабжении. Проблемы и пути решения / С. Н. Линевич; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – 242 с.
- 7 Линевич, С. Н. Теоретические основы и экспериментально-производственные исследования очистки подземных вод от сероводорода и серы / С. Н. Линевич, С. В. Гетманцев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 8. – С. 17–22.

8 Фесенко, Л. Н. Очистка воды от сероводорода с использованием электрохимических процессов / Л. Н. Фесенко. – Ростов н/Д.: Из-во СКНЦ ВШ, 2001. – 149 с.

9 Фесенко, Л. Н. Очистка воды от сероводорода на антрацитовой загрузке / Л. Н. Фесенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – № 4-1. – С. 20–24.

10 Выбор и обоснование метода очистки высококонцентрированных сероводородосодержащих вод / Л. Н. Фесенко, М. В. Тамадаева, И. В. Новосельцева, С. И. Игнатенко, А. Ю. Черкесов // Технологии очистки воды «Техновод-2006»: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 10-летию пром. пр-ва и использования оксихлорид. коагулянта «ОХА» в России, г. Кисловодск, 2–5 окт. 2006 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: Темп, 2006. – С. 60–65.

11 Шапиев, Б. И. Методы очистки природных вод от растворенного сероводорода и получение свободной серы / Б. И. Шапиев, З. М. Алиев // Проблемы экологической медицины: материалы IV Респ. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию проф. Д. Г. Хачирова. – Махачкала: ДГМА, 2015. – С. 218–224.

12 Семин, П. С. Очистка подземной воды от сероводорода / П. С. Семин // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сб. тр. XX Междунар. междувуз. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, г. Москва, 26–28 апр. 2017 г. – М.: Изд-во Моск. гос. строит. ун-та, 2017. – С. 1061–1063.

13 Усовершенствование технологии обезжелезивания и деманганации подземных вод г. Ульяновска / М. Г. Журба, С. П. Савельев, Д. Ю. Урусов, Ю. А. Габляя, С. А. Дячук, В. В. Лыков, Д. В. Парусов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – № 2. – С. 40–45.

14 Dohnalek, D. A. The chemistry of reduced sulfur species and their removal from groundwater supplies / D. A. Dohnalek, D. A. Fritzpatrick // Journal of American Water Works Association. – 1983. – Vol. 75. – P. 298–308.

15 Обоснование эффективности фильтровально-сорбционной загрузки при очистке подземных вод / Ю. Ю. Арискина, Л. А. Митяева, Ю. Е. Домашенко, С. М. Васильев // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2019. – № 4(36). – С. 31–42. – Режим доступа: www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec633-field6.pdf. – DOI: 10.31774/2222-1816-2019-4-31-42.

16 Бахметьев, А. В. Сравнительный анализ методов очистки воды от сероводорода / А. В. Бахметьев // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Инженерные системы зданий и сооружений. – 2005. – № 2. – С. 71–73.

17 Edwards, S. Removal of hydrogen sulphide from water / S. Edwards, R. Alharhi, A. E. Ghaly // American Journal of Environmental Sciences. – 2011. – Vol. 7, № 4. – P. 295–305.

18 Черкесов, А. Ю. Технология очистки сульфидных сточных вод нефтеоргсинтеза от сероводорода / А. Ю. Черкесов // Водоочистка. – 2015. – № 8. – С. 26–43.

19 Косиченко, Ю. М. Очистка подземных вод от сероводорода и других вредных соединений: учеб.-метод. пособие / Ю. М. Косиченко, Е. Г. Угроватова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2017. – 35 с.

20 Седлухо, Ю. П. Влияние аэрационных процессов на методы и технологию очистки подземных вод от сероводорода / Ю. П. Седлухо, Ю. О. Станкевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 8. – С. 90–94.

21 Седлухо, Ю. П. Биологическая очистка подземных вод от железа, марганца и сероводорода – опыт Беларуси / Ю. П. Седлухо, С. А. Иванов, В. Л. Еловик // Вода Magazine. – 2016. – № 8(108). – С. 20–25.

22 Журба, М. Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова. – М.: АСВ, 2004. – 820 с.

References

- 1 Durov S.A., 1935. *Ochistka pit'evoy vody ot serovodoroda* [Purification of Drinking Water from Hydrogen Sulfide]. Rostov-on-Don, Azcherkukkh Publ., 99 p. (In Russian).
- 2 Kastal'sky A.A., 1957. *Proektirovanie ustroystv dlya udaleniya iz vody rastvorennykh gazov v protsesse vodopodgotovki* [Designing Equipment for Removing Dissolved Gases from Water During Water Treatment]. Moscow, Stroyizdat Publ., 120 p. (In Russian).
- 3 Linevich S.N., 1958. *Primenenie metoda kontaktnoy koagulyatsii v tekhnologii obrabotki serovodorodnykh vod i nekotorye voprosy raboty kontaktnykh osvetlitley: Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk* [Application of Contact Coagulation Method in Treatment Technology of Hydrogen Sulphide Waters and Some Issues of Contact Clarifiers Performance: Abstract of cand. tech. sci. diss.]. Novocherkassk, 18 p. (In Russian).
- 4 Linevich S.N., 1987. *Kompleksnaya obrabotka i ratsional'noe ispol'zovanie serovodorodsoderzhashchikh prirodnykh i stochnykh vod* [Comprehensive Treatment and Rational Utilization of Hydrogen Sulfide-Containing Natural Waters and Sewage]. Moscow, Stroyizdat Publ., 87 p. (In Russian).
- 5 Linevich S.N., Rozhdov I.N., 1988. *Effekt udaleniya serovodoroda iz prirodnykh i stochnykh vod pri aeratsii* [Effect of hydrogen sulphide removal from natural and waste waters during aeration]. *Izvestiya Severo-Kavkazskogo nauchnogo tsentra* [Bull. North Caucasus Scientific Centre], pp. 87-90. (In Russian).
- 6 Linevich S.N., 2005. *Vodnye resursy, ikh podgotovka i ispol'zovanie v khozyaystvenno-pit'evom vodosnabzhenii. Problemy i puti resheniya* [Water resources, their treatment and use in domestic water supply. Problems and solutions]. South-Russian State Technical University, Novocherkassk, SRSTU Publ., 242 p. (In Russian).
- 7 Linevich S.N., Getmantsev S.V., 2006. *Teoreticheskie osnovy i eksperimental'no-proizvodstvennyye issledovaniya ochistki podzemnykh vod ot serovodoroda i sery* [Theoretical foundations and experimental-industrial studies of groundwater purification from hydrogen sulfide and sulfur]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Technique], no. 8, pp. 17-22. (In Russian).
- 8 Fesenko L.N., 2001. *Ochistka vody ot serovodoroda s ispol'zovaniem elektrokhimicheskikh protsessov* [Water Purification from Hydrogen Sulfide Using Electrochemical Processes]. Rostov-on-Don, SKNTs VSh Publ., 149 p. (In Russian).
- 9 Fesenko L.N., 2004. *Ochistka vody ot serovodoroda na antratsitovoy zagruzke* [Water purification from hydrogen sulfide at anthracite loading]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Technique], no. 4-1, pp. 20-24. (In Russian).
- 10 Fesenko L.N., Tamadaeva M.V., Novoseltseva I.V., Ignatenko S.I., Cherkesov A.Yu., 2006. *Vybor i obosnovanie metoda ochistki vysokokontsentrirrovannykh serovodorodsoderzhashchikh vod* [Choice and justification of highly concentrated hydrogen sulfide-containing water treatment method]. *Tekhnologii ochistki vody "Tekhnovod-2006": materialy III Mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 10-letiyu promyshlennogo proizvodstva i ispol'zovaniya oksikhlorid. koagulyanta «OKHA» v Rossii, Kislovodsk* [Water Treatment Technologies "Tekhnovod-2006": Proc. III International Scientific-Practical Conference devoted to the 10th anniversary of the industrial production and use of oxychloride coagulant "OXA" in Russia, Kislovodsk]. South Russian State Technical University (NPI), Novocherkassk, Temp Publ., pp. 60-65. (In Russian).
- 11 Shapiev B.I., Aliev Z.M., 2015. *Metody ochistki prirodnykh vod ot rastvorennogo serovodoroda i poluchenie svobodnoy sery* [Methods of natural waters purification from dissolved hydrogen sulfide and obtaining free sulfur]. *Problemy ekologicheskoy meditsiny: materialy IV Respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu prof. D. G. Khachirova* [Issues of Environmental Medicine: Proc. IV Republican Scientific-Practical Conference devoted to the 80th anniversary of prof. D. G. Khachirov]. Makhachkala, DGMA Publ., pp. 218-224. (In Russian).

12 Semin P.S., 2017. *Ochistka podzemnoy vody ot serovodoroda* [Purification of ground water from hydrogen sulfide]. *Stroitel'stvo – formirovaniye sredi zhiznedeyatel'nosti: sb. tr. XX Mezhdunarodnoy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Civil Engineering - Formation of the Living Environment: Proc. XX International Interuniversity Scientific-Practical Conference of Students, Undergraduates, Postgraduates and Young Scientists]. Moscow, Moscow State Civil Engineering University Publ., pp. 1061-1063. (In Russian).

13 Zhurba M.G., Savel'ev S.P., Urusov D.Yu., Gabliya Yu.A., Dyachuk S.A., Lykov V.V., Parusov D.V., 2013. *Usovershenstvovaniye tekhnologii obezhelezivaniya i demanganatsii podzemnykh vod Ulyanovska* [Improving the technology of deferrization and demanganization of groundwater in Ulyanovsk]. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Technique], no. 2, pp. 40-45. (In Russian).

14 Dohnalek D.A., Fritzpatrick D.A., 1983. The chemistry of reduced sulfur species and their removal from groundwater supplies. *Journal of American Water Works Association*, vol. 75, pp. 298-308.

15 Ariskina Yu.Yu., Mityaeva L.A., Domashenko Yu.E., Vasiliev S.M., 2019. [Justification of the efficiency of filter-sorption loading in groundwater treatment]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 4(36), pp. 31-42, available: www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec633-field6.pdf, DOI: 10.31774 / 2222-1816-2019-4-31-42. (In Russian).

16 Bakhmet'ev A.V., 2005. *Sravnitel'nyy analiz metodov ochistki vody ot serovodoroda* [Comparative analysis of methods for purifying water from hydrogen sulphide]. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Inzhenernyye sistemy zdaniy i sooruzheniy* [Scientific Bull. Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Engineering Systems of Buildings and Structures], no. 2, pp. 71-73. (In Russian).

17 Edwards S., Alharhi R., Ghaly A.E., 2011. Removal of hydrogen sulphide from water. *American Journal of Environmental Sciences*, vol. 7, no. 4, pp. 295-305.

18 Cherkesov A.Yu., 2015. *Tekhnologiya ochistki sul'fidnykh stochnykh vod nefteorgsintezy ot serovodoroda* [The process of organic oil synthesis sulphide drainage waters cleaning of hydrogen sulphide]. *Vodoochistka* [Water Treatment], no. 8, pp. 26-43. (In Russian).

19 Kosichenko Yu.M., Ugrovatova E.G., 2017. *Ochistka podzemnykh vod ot serovodoroda i drugikh vrednykh soedineniy: ucheb.-metod. posobie* [Purification of Groundwater from Hydrogen Sulphide and Other Harmful Compounds: a teaching guide]. Novocheerkassk, SRSPU (NPI) Publ., 35 p. (In Russian).

20 Sedlukho Yu.P., Stankevich Yu.O., 2014. *Vliyanie aeratsionnykh protsessov na metody i tekhnologiyu ochistki podzemnykh vod ot serovodoroda* [The impact of aeration processes on the methods and technology of purification of groundwater from hydrogen sulfide]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnyye nauki* [Bull. Polotsk State University. Series F: Civil Engineering. Applied Sciences], no. 8, pp. 90-94. (In Russian).

21 Sedlukho Yu.P., Ivanov S.A., Elovik V.L., 2016. *Biologicheskaya ochistka podzemnykh vod ot zheleza, margantsa i serovodoroda – opyt Belarusi* [Biological treatment of groundwater from iron, manganese and hydrogen sulfide - the experience of Belarus]. *Voda Magazin* [Water Journal], no. 8(108), pp. 20-25. (In Russian).

22 Zhurba M.G., Sokolov L.I., Govorova J.M., 2004. *Vodosnabzheniye. Proektirovaniye sistem i sooruzheniy* [Water Supply. Design of Systems and Structures]. Moscow, DIA Publ., 820 p. (In Russian).

Косиченко Юрий Михайлович

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: профессор

Должность: главный научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: kosichenko-11@mail.ru

Kosichenko Yuriy Mikhailovich

Degree: Doctor of Technical Sciences

Title: Professor

Position: Chief Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: kosichenko-11@mail.ru

Сильченко Виктория Федоровна

Должность: инженер-исследователь

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: vika-silchenko@mail.ru

Silchenko Viktoriya Fedorovna

Position: Research Engineer

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: vika-silchenko@mail.ru