

УДК 628.316.12

Н.А. Тихонова, Ю.Н. Мукминова, О.И. Ручкина

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ СУЛЬФИДОВ

Рассмотрены достоинства и недостатки физических, химических, биохимических методов дегазации воды, обоснована реагентная технология очистки бытовых сточных вод от сульфидов.

Ключевые слова: сточные воды, безреагентные, реагентные, биохимические и комбинированные методы дегазации воды, сульфиды, сероводород.

Проблема повышенной концентрации сульфидов в сточных водах городов является актуальной для большинства поселений, осуществляющих транспортировку сточных вод на очистные сооружения по напорным коллекторам.

Сульфиды и сероводород в стоках являются причиной коррозии трубопроводов, а сточные воды с концентрацией сульфидов 20 мг/л оказывают негативное воздействие на процесс биохимической очистки сточных вод [1]. Содержание сульфидов в сточных водах систем коммунальной канализации ограничивается до концентрации 1,5 мг/л [2, 24].

К факторам, способствующим образованию сульфидов при транспортировке сточных вод, относятся:

1. Наличие длинных напорных трубопроводов перед их присоединением к безнапорным коллекторным тоннелям или к приемной камере сточных вод. При движении сточных вод в напорных трубопроводах особенно быстро возрастает количество сульфидов и уменьшается количество растворенного в воде кислорода, что способствует протеканию химических реакций с выделением сероводорода. Результаты исследований НИИЖБ им. А.А. Гвоздева показали, что каждый километр напорного трубопровода увеличивает содержание сульфидов в сточной воде примерно на 10 %.

2. Низкое содержание в сточных водах растворенного кислорода, что создает благоприятные условия для образования

сероводорода, который при определенных гидравлических режимах течения сточной жидкости выделяется в подсводовое пространство коллектора.

3. Накопление осадка в коллекторе.

4. Подключение стоков, имеющих повышенную температуру и пониженное значение рН, а также стоков, загрязненных отходами кожевенного производства, предприятий по переработке мяса, рыбы, заводов безалкогольных напитков.

Сточные воды городской системы канализации, транспортируемые по напорным коллекторам, как правило, содержат сульфиды в концентрациях 5–25 мг/л, что не соответствует максимально допустимым концентрациям на биологические очистные сооружения – 1,5 мг/л. Такие сточные воды нуждаются в предварительной очистке от сульфидов до приемной камеры очистных сооружений.

К технологии предочистки хозяйственно-бытовых сточных вод от сульфидов, по мнению авторов, должны предъявляться следующие требования:

- простота технологии и возможность осуществления процесса очистки непосредственно в системе транспортировки стоков;
- достижение остаточной концентрации сульфидов в стоках на выходе из трубы 1,5 мг/л;
- неухудшение других показателей состава сточных вод;
- минимальная стоимость очистки сточных вод.

Существующие методы дегазации могут быть условно разделены на четыре группы: физические, химические, физико-химические, биохимические, или комбинированные.

1. Физические методы. В основе физических методов дегазации воды лежит изменение физических свойств обрабатываемой воды: температуры воды или парциального давления удаляемого газа [3].

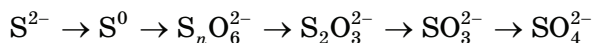
При нагревании воды от 0 до 30 °С степень насыщения ее сероводородом снижается более чем в 2–3 раза, а при нагревании до 100 °С растворимость сероводорода в воде снижается почти до нуля. Поэтому удаление из воды сероводорода принципиально возможно путем обработки ее в специальных термических деаэраторах либо понижением давления до уровня, при котором вода может закипеть при более низких температурах, что может быть осуществлено в специальных вакуумных деаэраторах.

Среди физических методов дегазации сероводородных вод отдается предпочтение аэрационному способу, отличающемуся простотой. Аэрационная дегазация воды обеспечивает создание развитой поверхности контакта обрабатываемой сероводородной воды с атмосферным воздухом, в котором обычно парциальное давление сероводорода равно нулю. В настоящее время для аэрационной дегазации воды используют аппараты-дегазаторы с принудительной и естественной аэрацией (пленочные с различного рода насадками, струйно-пленочные, барботажные).

В обычных условиях кислород воздуха способен частично окислять растворенный в воде сероводород с образованием коллоидной и мелкодисперсной серы. При аэрационной дегазации этот процесс несколько интенсифицируется и протекает по реакции $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 = 2 \text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$.

К достоинствам методы относятся: сравнительно низкая стоимость, простота оформления и эксплуатации дегазационных аппаратов. Однако эти методы имеют и свои недостатки: выделение токсичного сероводорода, загрязняющего окружающую среду; выдувание CO_2 , приводящее к смещению карбонатного равновесия в сторону увеличения щелочности и образования карбоната кальция CaCO_3 ; увеличение щелочности воды способствует переходу свободного сероводорода H_2S в гидросульфидные и сульфидные ионы (HS^- и S^{2-}), которые не удаляются из воды при аэрации. Наличие коллоидной и мелкодисперсной серы в воде придает ей мутность и опалесценцию. В связи с этим после аэрации сероводородных вод часто возникает необходимость в их осветлении и обесцвечивании.

В промышленности получил распространение способ окисления в жидкой фазе кислородом воздуха под давлением. Окисление гидросульфидов и сульфидов протекает через ряд последовательных стадий [4, 5]:



При $\text{pH} = 7,0 \dots 13,75$ основным продуктом окисления Na_2S , NaHS , H_2S является тиосульфат. В щелочной среде ($\text{pH} = 9,0 \dots 9,5$) протекают реакции с образованием сульфитов, сульфатов. При этом pH сточной воды понижается. При окислении в щелочной среде ($\text{pH} = 12,15 \dots 12,75$) сульфидов и гидросульфидов до сульфита и сульфата изменения pH сточной воды не происходит.

Повышение температуры и давления увеличивает скорость и глубину окисления сульфидов и гидросульфидов, не изменяя механизм реакции [4]. Теоретически на 1 г сульфидной серы расходуется 1 г кислорода. При температуре от 60–80 до 100–120 °С, давлении 0,1–0,8 МПа и расходе воздуха 80–150 м³/м³ эффективность очистки сточных вод от сульфидов достигает 90–95 % [4].

Каталитическое окисление кислородом воздуха. В случае применения катализаторов скорость окисления возрастает. Высокими каталитическими свойствами обладают графитовые материалы. При использовании кристаллического графита окисление гидросульфида и сульфида натрия идет в основном до тиосульфата, а при использовании коллоидно-дисперсных материалов – до элементарной серы. Исследования показали, что скорость окисления пропорциональна концентрации сульфидов. Скорость окисления сульфидов повышается с увеличением давления.

Процессу окисления сульфидов мешают органические и взвешенные вещества. Поэтому очистку производят в две стадии. На первой, предварительной стадии производят удаление органических и взвешенных веществ путем отстаивания в течение 3–4 ч с последующей реагентной в течение 40–50 мин. При этом используются добавки коагулянта FeSO₄ в зависимости от степени загрязненности стока в количестве до 1,2 г/л и флокулянта ПАА в количестве до 5 мг/л. Сток, прошедший флоатационную установку, направляют на вторую, основную стадию собственно каталитического окисления сульфидов кислородом воздуха в течение 6 ч. Катализатором являются растворимые в воде соли Ni или Mn в количествах, зависящих от содержания сульфидов в сточных водах и состоящих из 0,4–0,5 мг Ni²⁺ или Mn²⁺/мг S²⁻ при значении pH = 10 [6].

Недостатками этого способа являются: загрязнение сточной воды солями железа (от добавки коагулянта) и никеля или марганца (от добавки катализатора), дороговизна коагулянтов и катализаторов, низкая скорость окисления, сложность аппаратурного оформления, недостаточная степень очистки, большая длительность обработки.

Разработан способ очистки сточных вод от сульфидов окислением последних кислородом воздуха с образованием элементарной серы [25]. Процесс ведется в две стадии. На стадии предварительной очистки вводят при перемешивании в качестве

добавки фосфогипс в сухой, порошкообразной, нерастворимой форме в количестве 0,5–10 г/л с последующим отстаиванием в течение 10–30 мин, а стадию окисления проводят при значении $pH = 9...12$ в присутствии катализатора из текстильных объемных структур при времени контакта 5–45 мин. Достоинство способа – достижение высокой степени очистки от сульфидов 98–99,1 %.

К недостаткам данного способа можно отнести использование катализаторов, в качестве которых применяют объемные текстильные структуры, а также соли кобальта или марганца или железные стружки. Кроме того, для окисления используют двадцатикратный объем воздуха.

2. Химические методы. Сущность химических методов удаления из воды сероводорода и сульфидов заключается в добавлении к обрабатываемой воде химических реагентов, вступающих в реакцию с H_2S и S^{2-} , в результате которой происходит связывание или перевод их в менее активные соединения. В качестве реагентов при химической обработке сероводородных вод рекомендуется использовать: хлор и его производные, гидрат окиси железа и железо, пиролюзит, марганцовокислый калий, кислород и перекись водорода [7, 8–13]. Наиболее широкое практическое применение для обработки сероводородных вод нашел хлор, как наиболее изученный и сравнительно дешевый реагент.

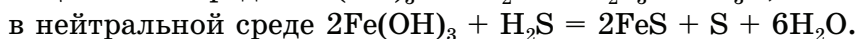
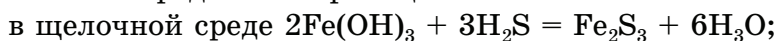
Окисление хлором. Скорость и глубина реакции окисления хлором зависят от природы примесей, от температуры, pH , концентрации окислителя, времени контакта и т.д. При добавлении в сероводородную воду хлора происходит окисление H_2S до свободной серы – при малых расходах хлора и до сульфатов – при больших его расходах. При этом образуются кислоты и ионы водорода, что приводит к заметному снижению pH обрабатываемой воды. В работе [10] описаны исследования по окислению H_2S двуокисью хлора ClO_2 . В зависимости от дозы ClO_2 и $pH = 6,8...8,5$ продуктами окисления могут быть: сера элементарная, тиосульфат-, сульфат-ионы. При малых расходах хлор-реагента сероводород окисляется до элементарной серы, которая придает воде мутность и характерную опалесценцию.

К преимуществам хлорирования сероводородных вод относятся: обеззараживание обрабатываемой воды, одновременно с окислением H_2S , простота и компактность установок для хлорирования воды, доступность и дешевизна хлора и его произ-

водных. Ограничивают применение метода очистки сточных вод активным хлором следующие факторы: недостаточная глубина окисления органических примесей, образование токсичных хлорорганических соединений, необходимость применения высоких доз активного хлора, высокая токсичность самого хлора.

Использование для обработки сероводородных вод железа и его соединений. Обработку сероводородных вод осуществляли в специальных барабанах, заполненных железной стружкой [14]. Железо реагирует с сероводородом по реакции $\text{H}_2\text{S} + \text{Fe} = \text{FeS} + \text{H}_2 \uparrow$

Разновидностями воздействия железа на сероводородные воды является фильтрование сероводородных вод через слой феррогеля и обработка воды гидратом окиси железа [8]. Феррогель представляет собой материал, на поверхности которого нанесен гидроксид железа. Взаимодействие сероводорода с феррогелем можно представить реакциями:



Метод теоретически обеспечивает замкнутый процесс обработки сероводородных вод гидратом окиси железа с многократным использованием ее путем попеременного перевода то в сернистое железо, то в гидроксид железа. Однако постепенное накопление серы в процессе водообработки приводит к необходимости вывода из замкнутого процесса части загрязненного серой гидроксида железа и замены его свежими порциями гидроксида, для чего рекомендуется к обрабатываемой сероводородной воде добавлять какую-либо соль железа (FeCl_3 или FeSO_4).

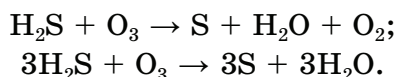
Известен способ очистки сточных вод от сульфидов их обработкой сульфатом железа с последующим осаждением сульфида железа [15]. К основным недостаткам способа относится использование дорогостоящей соли – сульфата железа. Вместе с тем, использование сульфата железа приводит к появлению в сточной воде дополнительных примесей в виде ионов сульфата.

Методы обработки сероводородных вод с использованием железа не получили распространения из-за сложности инженерного оформления и эксплуатации, необходимости расходования часто дефицитного железа, а также последующей доочистки от сернистого железа и обеззараживания обрабатываемой воды.

Кроме соединений железа для очистки от сульфидов используют хлорид алюминия с образованием осадка сульфида

алюминия [16]. К недостаткам данного способа можно отнести использование достаточно дорогостоящей соли – хлорида алюминия. Вместе с этим использование хлорида алюминия приводит к появлению в сточной воде дополнительных примесей в виде хлорид ионов.

Окисление озоном. Экологически чистым окислителем является озон O_3 , окисляющий H_2S согласно следующим реакциям [8, 14–17]:



В процессе озонирования происходят одновременное окисление примесей, обесцвечивание, дезодорация, обезвреживание сточной воды и насыщение ее кислородом.

Достоинством метода является то, что в воду не вносятся химические реагенты. Применение хлора экономически и технологически предпочтительнее, чем озонирование, но экологически целесообразнее применение в качестве окислителя озона. Это объясняется легкостью отдачи им атома кислорода ($O_3 = O_2 + O$). К недостаткам метода относятся: токсичность и взрывоопасность озона, низкая растворимость озона в воде и зависимость растворимости от температуры. Низкая растворимость в воде приводит к потере 20–30 % озона, что значительно загрязняет воздушную среду.

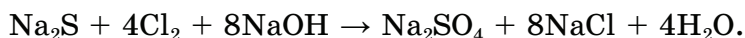
Окисление пероксидом водорода H_2O_2 . Наиболее эффективно под действием H_2O_2 окисляются сероводород и растворимые сульфиды. При значении рН, близких к нейтральным (~8), сероводород в течение 15–60 мин окисляется пероксидом водорода до элементарной серы. В щелочной среде сульфиды окисляются до сульфатов. По отношению к сероводороду и сульфидам пероксид водорода является селективным окислителем. Эта селективность обусловлена относительно быстрым протеканием реакции окисления соединений серы и химической инертностью пероксида водорода по отношению к аммонийным и другим органическим соединениям.

По сравнению с озоном пероксид водорода [7] обладает рядом преимуществ: он хорошо растворим в воде, устойчив в растворе в широком диапазоне рН и температур, позволяет осуществить высокоселективное окисление различных примесей сточных вод при подборе условий проведения процесса, может инициировать неспецифические радикальные процессы окисле-

ния с участием радикалов ОН. Плюс к этому высокая стабильность по сравнению с другими окислителями, сравнительная простота аппаратного оформления процессов окисления с участием H_2O_2 , отсутствие токсичности. Остаточный пероксид водорода способствует процессам последующей аэробной биологической очистки и благоприятно сказывается на состоянии водных экосистем. В силу своих технологических преимуществ пероксид водорода получил широкое распространение в зарубежной практике очистки промышленных сточных вод. Однако применение пероксида водорода в нашей стране для очистки сточных вод сдерживается его высокой стоимостью и дефицитностью.

3. Физико-химические методы. Электрохимическое окисление. При плотности тока $200\text{--}800 \text{ А/м}^2$ в электролизере с асбестовой или хлориновой диафрагмой и графитовым анодом достигается $98\text{--}99 \%$ удаление сульфидов, меркаптанов и других соединений в результате их анодного окисления до элементарной серы, тиосульфатов и сульфатов [18].

В катодите накапливается щелочь, которая может быть вновь использована на производстве. При добавлении в сточную воду 50 г/л NaCl окисляемость в течение 8 ч снижается со 180 до $0,4 \text{ г/л}$. Без добавления хлоридов окисляемость уменьшается с $24,2$ до $2,2 \text{ г/л}$. Более существенное снижение окисляемости при добавлении в электролит NaCl связано, по-видимому, с окислением сернистых соединений молекулярным хлором, образующимся при окислении хлорид-иона на аноде. Хлор окисляет сернистые соединения в соответствии с реакцией



Для очистки сточных вод от сульфидов, образующихся при нефтедобыче и нефтепереработке, на кожевенных предприятиях и на других химических производствах предложен способ электрохимической обработки сточной воды при электродной плотности тока $67\text{--}200 \text{ мА/см}^2$ с использованием растворимого железного анода, материалом для которого служит железный металлолом. Образовавшийся осадок сульфида железа осаждают и отделяют. Способ имеет преимущество – удешевление очистки сточных вод за счет использования металлолома [6].

Электрохимические методы получения веществ или обработки воды имеют определенные недостатки. Одним из них яв-

ляется большой расход электроэнергии, что при сравнительно высокой стоимости электроэнергии делает этот метод более дорогим, чем методы, не требующие расхода электроэнергии. Гипохлорит натрия, получаемый электролитически, обладает всеми достоинствами обычного жидкого хлора – активного окислителя. В то же время он лишен существенных недостатков. Так, например, отсутствует необходимость в транспортировке и хранении этого токсичного вещества. По имеющимся данным [19], стоимость обеззараживания воды жидким хлором в 1,5–1,8 раза дешевле обеззараживания хлорной известью и гипохлоритом, выпускаемым промышленностью.

4. Биохимические методы. Принцип биологической очистки воды от сероводорода и продуктов его диссоциации основан на использовании микроорганизмов, окисляющих серосодержащие соединения. Считается, что основную роль в биологическом круговороте серы играют две группы микроорганизмов:

1) продуцирующие сероводород (к ним относятся гнилостные, сульфатредуцирующие и серовосстанавливающие бактерии);

2) окисляющие сероводород и неорганические соединения серы [18, 20].

Серобактерии сравнительно широко распространены в природе. Различные группы сероокисляющих бактерий отличаются друг от друга типом питания, физиологическими свойствами и экологическими особенностями.

Тионовые и серные бактерии окисляют одни и те же соединения, но разница заключается в том, что тионовые, или несерные бактерии откладывают образующуюся серу вне своих клеток, а истинные серобактерии накапливают ее внутри клеток. При отсутствии сероводорода в окружающей среде и те и другие бактерии окисляют серу до тиосульфатов и далее до сульфатов.

В сооружениях типа аэрофилтра [21] была проведена очистка от сероводорода. Удаление сероводорода из воды в аэрофилтре происходит в результате трех параллельно протекающих процессов: десорбции сероводорода выдуванием, химического окисления сероводорода кислородом воздуха, микробиологического окисления сероводорода при контакте воды с образующейся на загрузке биопленкой серобактерий.

Проведенные испытания показали, что при эксплуатации аэроокислителя возникают определенные трудности сравнительно быстрого зарастания загрузки карбонатом кальция с некото-

рым количеством серы, что является следствием десорбции растворенной углекислоты.

Исследования методов биохимической очистки воды от сероводорода были выполнены во ВНИИВОДГЕО [14]. Эти работы были проведены на лабораторных моделях аэротенка-смесителя с рециркуляцией активного ила и биофильтров с искусственной и естественной аэрацией. В активном иле развивались тионовые бактерии, главным образом, *Thiobacillus thiooxidans* (до 10^9 клеток на 1 г ила). *Th. thiooeparus* развивался очень слабо. В результате интенсивной аэрации весь H_2S окислялся до серной кислоты и значение рН воды снижалось до 3,8 на модели биофильтра с естественной, а также принудительной вентиляцией, основная роль принадлежит *Th. thiooeparus*. Наряду с аэробными тионовыми бактериями *Th. thiooeparus* и *Th. thiooxidans* на некотором расстоянии от поверхности биофильтра в анаэробных условиях развивались сульфатредуцирующие и денитрифицирующие бактерии (около 30 % микрофлоры биофильтра). По данным химических анализов, сероводород полностью не окислялся до сульфатов.

Аналогичные исследования были выполнены по очистке сероводородных сточных вод сульфатно-целлюлозного производства на модели биофильтра с естественной аэрацией. Исходная вода имела рН = 7,6 и содержала 33–103 мг/л H_2S . Микробиологические исследования показали, что доминирующую роль в очистке сточных вод от сероводорода принадлежит *Th. thiooeparus*. По данным химических анализов, сероводород окислялся как до серы, так и до сульфатов, остаточная концентрация сероводорода в воде после биофильтра составляла 3–12 мг/л.

Дальнейшие исследования, выполненные в ЦНИИ Курортологии и физиотерапии [14], позволили определить оптимальные параметры биохимической очистки воды от H_2S на аэрофильтрах. Согласно предложенному способу, аэрацию осуществляют через загрузку (гравий, щебень крупностью 10–40 мм) при расходе воздуха 5–6 объемов на один объем обрабатываемой воды, а серобактерии (*Th. thiooeparus*) используют в количестве 10^{10} – 10^{15} клеток в 1 м³ загрузки. Показано, что при крупности загрузки менее 10 мм происходит быстрое заиливание, а при крупности более 40 мм не обеспечивается необходимое количество бактерий в 1 м³ загрузки и не достигается требуемая степень очистки, что приводит к выдуванию сероводорода и за-

грязнению воздушного бассейна. Был разработан новый способ биохимической очистки вод от сероводорода, особенностью которого является применение аэрофильтра с затопленной загрузкой, названного авторами реактором биохимического окисления или биореактором [14]. По мнению автора [14], наиболее предпочтительными являются методы обработки воды в аэроокислителе и метод окисления сероводорода в биореакторе. В методе, описанном в работе [22], также для окисления сероводорода применяли бактерии *Th. thioparus*.

Несомненно, биологические методы обработки имеют определенные преимущества перед химическими и физическими методами. Как правило, себестоимость очистки воды биохимическим методом ниже себестоимости ее очистки другими методами. Кроме того, при удалении H_2S из воды биохимическими методами исключается необходимость применения громоздкого реагентного хозяйства. Биохимическая очистка позволяет получить значительный экологический эффект, так как ее принцип основан на дублировании одного из этапов биологического круговорота серы в природе. Но при этом необходимость исключить загрязнение окружающей среды частично выдуваемым при аэрации сероводородом. Однако при биологическом окислении в обрабатываемой воде будет усиливаться мутность из-за частичного выноса лишней биомассы. Применение для очистки сернисто-щелочных стоков экологически наиболее приемлемого микробиологического способа требует предварительной подготовки стоков для приведения величины рН и концентрации сернистых соединений к уровню, подходящему для деятельности сероокисляющих бактерий.

В настоящее время разработаны и используются для уничтожения запаха от насосных станций, напорных трубопроводов, коллекторов хозяйственно-бытовых сточных вод и очистных сооружений программы дезодорации Amelin ChemEngR.

Органические биомодификаторы ChemEngR препятствуют образованию сульфидов в анаэробных системах. Бактерии более охотно поглощают нитратсодержащие компоненты, чем сульфаты, благодаря чему сульфаты не переходят в сульфиды.

Эти органические продукты препятствуют образованию сульфидов, или химически с ними соединяются, вследствие чего устраняется запах и выделение газов. Эти специальные продукты минимизируют накопления ила, так как соединения остаются в виде раствора.

Авторами [24] разработана технология, позволяющая снизить концентрации сульфидов в ходе их транспортировки (с применением реагентов российского производства), базирующаяся на принципах программы дезодорации Amelin ChemEngR.

Проведенный анализ показал, что большинство из рассмотренных методов имеют ряд существенных недостатков:

1. Физические методы связаны с выделением в атмосферу токсичного сероводорода и образованием осадков карбоната кальция и золь элементарной серы, их применение целесообразно с устройством локальных очистных сооружений для высококонцентрированных сероводородсодержащих сточных вод.

2. Химические и физико-химические методы связаны с применением токсичных или дорогих реагентов, сложны в эксплуатации, требуют значительного расхода реагентов или больших затрат энергии.

3. Биохимические методы весьма чувствительны к режиму подачи сточных вод, величине рН, концентрации соединений серы, азота, фосфора, требуют предварительного удаления или снижения концентрации биотоксикантов, добавки питательных веществ, строгого температурного режима, получения культур тиобактерий с заданными свойствами и больших финансовых затрат.

Все рассмотренные способы очистки сточных вод от сульфидов имеют определенные недостатки, делающие эти способы неприменимыми в чистом виде для очистки коммунальных стоков непосредственно в системе транспортировки. Прежде всего, это высокая эксплуатационная стоимость, сложность технологии, экологическая неприемлемость ряда методов.

Наиболее перспективной, на взгляд авторов, является технология введения в сточную воду биомодификаторов, препятствующих образованию сульфидов в анаэробных системах. Такая технология может быть осуществлена непосредственно на насосной станции, перекачивающей стоки на биологические очистные сооружения.

Библиографический список

1. Иванов В.Г. Водоснабжение промышленных предприятий. – СПб., 2003.
2. МДК 3-01.2001. Методические рекомендации по расчету количества и качества принимаемых сточных вод и загрязняющих веществ в системы канализации населенных пунктов: утв. приказом Госстроя России от 06.04.2001 № 75.

3. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия. – М.: Высшая школа, 1999.
4. Алферова Л.А., Алексеев А.А. Химическая очистка сточных вод в производстве сульфатной целлюлозы. – М.: Лесная промышленность, 1968.
5. Алферова Л.А., Титова Г.А. Изучение скорости и механизма реакции окисления сероводорода, гидросульфида натрия и сульфидов натрия, железа и меди в водных растворах кислородом воздуха // Журн. прикл. химии. – 1969. – Т. 42, № 1.
6. Пат. 2078053 РФ, МКИ С 02 F 1/58. Способ очистки сернисто-щелочных вод от сульфидов / Кочинашвили М.В., Анфиногенова Т.С., Меньшикова Н.Н., Карасев В.Н.; опубл. 20.10.1997, Бюл. № 12.
7. Глинка Н.Л. Общая химия. – Л.: Химия, 1985.
8. Водоотводящие системы промышленных предприятий / С.В. Яковлев [и др.]. – М.: Стройиздат, 1990.
9. Гавриков М.А. Очистка сточных вод от изопропанола и сульфидов // Химическая промышленность. – 1976. – № 2.
10. Золотова Е.Ф., Асс Г.Ю. Очистка воды от железа, фтора, марганца и сероводорода. – М.: Стройиздат, 1975.
11. Клячко В.А., Апельцин И.Э. Очистка природных вод. – М.: Стройиздат, 1971.
12. Окислительная конверсия сероводородсодержащих газов / А.В. Плечев [и др.] // Экология и промышленность России. – 2000. – Июнь.
13. Кульский Л.А., Строкач П.П. Технология очистки природных вод. – Киев: Высшая школа, 1981.
14. Линевич С.Н. Комплексная обработка и рациональное использование сероводородсодержащих природных и сточных вод. – М.: Наука, 1987.
15. Технические записки по проблемам воды: пер. с англ.: в 2 т. – Т. 2 / К. Бараке [и др.]; под ред. Т.А. Карюхиной, И.Н.Чурбановой. – М.: Стройиздат, 1983.
16. Пат. 2099292 РФ, МКИ С 02 F 1/74. Способ очистки сточных вод от сульфидов / Витковская Р.Ф., Панов В.П., Петров С.В., Терещенко П.Я., Уханова Е.И.; опубл. 12.10.1997, Бюл. № 35.
17. Введение в экологическую химию / Ю.И. Скурлатов [и др.]. – М.: Недра, 1994.
18. Проскураков В.А., Шмидт Л.И. Очистка сточных вод в химической промышленности. – Л.: Химия, 1977.
19. Установка малой производительности для очистки и обеззараживания питьевых и сточных вод / А.М. Перлина [и др.]. – М.: Стройиздат, 1974.
20. Экологическая химия сернистых соединений / С.С. Тимофеева [и др.]. – М.: Наука, 1991.
21. Очистка сбросных и минеральных вод бальнеолечебниц от сероводорода биохимическим методом / Г.Ю. Асс [и др.] // Химия и технология воды. – 1983. – Т. 5, № 1.

22. Калюжный С.В., Федорович В.В. Безреагентная биокаталитическая очистка сероводородсодержащих газов // Экология и промышленность России. – 2000. – Февраль.

23. Ласков Ю.М., Федоровская Т.Г., Жмаков Г.Н. Очистка сточных вод предприятий кожевенной и меховой промышленности. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – С. 70–77.

24. Мелехин А.Г., Третьяков С.Ю. Решение проблемы, связанной с образованием сульфидов в бытовых сточных водах города // Вестник ПГТУ. Урбанистика. – Пермь, 2011. – № 1. – С. 118–122.

Получено 2.11.2011