

УДК 628.237

© М. А. Саньков, аспирант

© С. В. Макарова, канд. биол. наук, доцент

© Ю. А. Феофанов, д-р техн. наук, профессор

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: maxsnkv@mail.ru, s.v.makarius@mail.ru,
ufofanov@rambler.ru

© Н. А. Черников, д-р техн. наук, профессор

(Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: nika_pgups@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-6-87-94

© М. А. Sankov, post-graduate student

© S. V. Makarova, PhD in Sci. Bio., Associate Professor

© Yu. A. Feofanov, Dr. Sci. Tech., Professor

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: maxsnkv@mail.ru, s.v.makarius@mail.ru,
ufofanov@rambler.ru

© N. A. Chernikov, Dr. Sci. Tech., Professor

(Emperor Alexander I St. Petersburg State
Transport University,
Saint Petersburg, Russia)

E-mail: nika_pgups@mail.ru

МЕТОД БОРЬБЫ С СЕРОВОДОРОДОМ НА НАПОРНЫХ СИСТЕМАХ КАНАЛИЗАЦИИ

METHOD OF HYDROGEN SULFIDE CONTROL AT PRESSURE SEWER SYSTEMS

В настоящее время существует проблема выброса сероводорода в системах водоотведения. Наиболее интенсивный выброс наблюдается в сооружениях сопряжения напорных и безнапорных потоков — камерах гашения напора (КГН). В результате анаэробного дыхания бактерий генерируется большое количество канализационных газов, в том числе и сероводорода, который интенсивно выделяется в результате падения в КГН. В настоящей работе предлагается исключить возникновение анаэробных условий путем создания узлов эжектирования воздуха на напорных трубопроводах канализационных систем. В программе ANSYS CFX разработана модель трубопровода с диафрагмой, имеющей подключение воздушной трубки. Результаты моделирования объемной доли двухфазного потока показали высокую эффективность предлагаемого метода. За счет поступления воздуха удастся получить водовоздушную смесь с содержанием кислорода в потоке воды 78,7 мг/л, что позволит обеспечить аэробные условия, замедлить или вовсе исключить процесс генерации канализационных газов и выделения в КГН.

Ключевые слова: напорный трубопровод, сероводород, эжектирование воздуха, компьютерное моделирование, ANSYS CFX.

Currently, there exists a problem of hydrogen sulfide emission in wastewater disposal systems. The most intense emission is observed in pressure and non-pressure flow coupling structures — pressure damping chambers (PDC). As a result of the anaerobic respiration of bacteria, there is generated a large amount of sewer gases, including hydrogen sulfide, which is intensively released as a result of falling into the PDC. In this paper, it is proposed to eliminate the occurrence of anaerobic conditions by creating air ejection nodes at the pressure pipelines of sewer systems. On the base of using ANSYS CFX program, there has been developed a pipeline model with a diaphragm having an air tube connection. The results of modeling the volume fraction of a two-phase flow show the high efficiency of the proposed method. Due to the intake of air, it is possible to obtain a water-air mixture with oxygen content in the water stream equal to 78.7 mg / l, which will ensure aerobic conditions, slow down or completely eliminate the process of generating of sewer gases and releasing into the PDC.

Keywords: pressure line, hydrogen sulfide, air ejection, computer modeling, ANSYS CFX.

Введение

Современный город невозможно представить без инженерных систем, обеспечивающих комфортную жизнь граждан. Важной

системой в этом перечне является система канализации, необходимая для отведения сточных вод от зданий и сооружений. За многие годы эксплуатации были опреде-

лены основные проблемы, возникающие на сетях. К одной из таких проблем относится выделение токсичных канализационных газов из городских сточных вод, негативно воздействующих как на сами трубопроводы и сооружения, по которым они транспортируются, так и на экологию в местах выхода из вентиляционных люков. К основным ядовитым газам, образующимся в результате химико-биологических процессов в ходе транспортировки сточных вод, относятся сероводород (H_2S), углекислый газ (CO_2), метан (CH_4), аммиак (NH_3) и др. [1–3]. Наибольшую опасность представляет сероводород, находящийся в растворенном состоянии в воде.

На сетях общесплавной канализации происходят преобразования соединений серы по всему пути следования сточных вод. В трубопроводах, особенно при малой скорости течения, высоком времени пребывания и большой продолжительности сети, происходят окислительно-восстановительные процессы, в результате которых сера, содержащаяся в органических соединениях, превращается в сульфиды, меркаптаны, соединения сероводорода и пр. [4].

Органическая сера от фекальных загрязнений человека, других органических загрязнений, сульфатов из сбросов промышленных предприятий и пр. окисляется за счет анаэробных сульфатредуцирующих бактерий, которые скапливаются в биопленке на поверхности трубопровода. Бактерии взаимодействуют с органическими веществами, транспортируемыми сточными водами, расщепляя их на H_2S (диссоциированные ионы HS^- и H^+) и CO_2 . При значениях водородного показателя $pH = 6,5–8$ в виде растворенного вещества находится 25–35 % сероводорода [5]. Остальная же часть в виде газа выделяется в подсводное пространство канализационного коллектора и растворяется в биопленке. При более низких показателях pH концентрация растворенного H_2S умень-

шается, и он переходит в газообразную форму [6].

При нормальной работе естественной вентиляции канализационной сети содержание кислорода в бытовых сточных водах составляет 2–3 мг/л. При нарушении работы вентиляции или продолжительной протяженности канализационного участка плюс малой скорости потока воды концентрация кислорода может сильно снижаться — до значений, близких к 0,1 мг/л, — за счет окисления органики. При этом возникают восстановительные процессы, приводящие к образованию сульфидов.

Растворенный в сточной воде сероводород поглощается группой бактерий *Thiobacillus*, *Thiomonas*, *Hallothiobacillus*, *Starkeya*, *Thiospira* и *Paracoccus*, образуя серную кислоту, которая, в свою очередь, проникает в биопленку, расположенную по внутреннему диаметру коллектора. Там она реагирует с силикатными и карбонатными соединениями, входящими в состав железобетонных труб, формируя механически непрочный гипс [5, 7].

В местах, где происходит перепад отметок водоотводящей сети и присутствует сильная турбулизация потока (перепадные колодцы, камеры гашения напора — КГН), наблюдается значительное выделение сероводорода, изначально растворенного в воде, в подсводное пространство сооружений [1].

КГН представляет собой инженерное сооружение, предназначенное для сопряжения напорных и безнапорных потоков, обычно располагающееся после напорных трубопроводов от канализационных насосных станций. Как правило, в процессе перекачивания сточных вод в закрытых трубопроводах в условиях анаэробного дыхания происходит интенсивное образование растворенного сероводорода. Попадая из напорного трубопровода в КГН, сточная жидкость контактирует с воздухом, в результате чего растворенный сероводород, образовавшийся

в анаэробных условиях напорного участка, переходит в газообразное состояние и скапливается в подсводном пространстве камеры, самотечных трубопроводов и колодцев ниже на сети.

Возникающий в канализационных системах сероводород приводит к интенсификации процесса газовой коррозии. Протекание газовой коррозии приводит к стремительному износу ж/б трубопроводов и конструкций сооружений, что в свою очередь увеличивает риск возникновения аварийных ситуаций и нарушения работы системы водоотведения города [5, 7–9]. Кроме этого, значительные выбросы сероводорода в окружающую городскую среду оказывают негативное воздействие на здоровье людей [10].

На сегодняшний день выделяют различные способы борьбы с канализационным сероводородом. Как за рубежом, так и в России существует практика добавления в поток сточных вод подщелачивающих реагентов, которые позволяют ослабить процесс образования молекулярного сероводорода за счет удержания серы в растворенном виде [11, 12]. Также известны подходы, предусматривающие применение газоочистного оборудования и организации принудительной вентиляции канализационных коллекторов; методы с принудительным нагнетанием воздуха для истощения сульфидов [5, 13]. Однако следует отметить, что при этом тратится много ресурсов.

В рамках данной работы предлагается использование нового подхода для снижения газовыделения в камерах гашения напора — с помощью создания аэробных условий в напорных трубопроводах от канализационной насосной станции. В работе [9] отмечается, что при диффузии кислорода в сточные воды окислительные анаэробные процессы образования сероводорода замедляются, а при концентрации O_2 в воде более 1 мг/л полностью прекращаются. Аэробные условия в напорном трубопроводе могут быть обе-

спечены за счет эжектирования воздушной среды самим потоком сточных вод. Данного эффекта можно достичь за счет разности давлений, возникающей при кратковременном сужении трубопровода, и установки в его верхней части трубки для всасывания воздуха (рис. 1). Об образовании вакуума в зоне уменьшения сечения можно судить по результатам исследования Д. Чисхолма [14], который провел ряд экспериментов по оценке вакуумметрического давления в переходах. На рис. 2 показан график изменения давления, отражающий положение зоны максимально низкого давления на переходе в самом начале участка сужения трубопровода, руководствуясь которым можно выбрать место подключения воздушной трубки. При дальнейшем движении потока в узком трубопроводе давление повышается и затрачивается на преодоление сопротивления по длине. В связи с этим наиболее целесообразным в конструкции узла эжекции является применение коротких по длине диафрагм с организацией плавного перехода на меньший диаметр. Такая конструкция обеспечит минимальное сопротивление участка трубопровода и снизит нагрузку на насосное оборудование.

Методы

Для изучения работы эжекционного узла разрабатывалась расчетная модель в программе конечно-элементного анализа ANSYS CFX. Конструктивно модель представляла собой горизонтальный участок трубопровода $d_{\text{внеш}} = 44$ мм (рис. 3), который в конце заканчивался гусак. На расстоянии одного метра от начала трубопровода предусматривалось устройство диафрагмы диаметром $d_d = 20$ мм. К верху диафрагмы осуществлялось присоединение воздушной трубки диаметром $d_t = 6$ мм, высота которой была принята больше, чем у гусака.

Для моделирования процесса совместного движения потоков воды и воздуха применялась система уравнений Навье–Стокса,

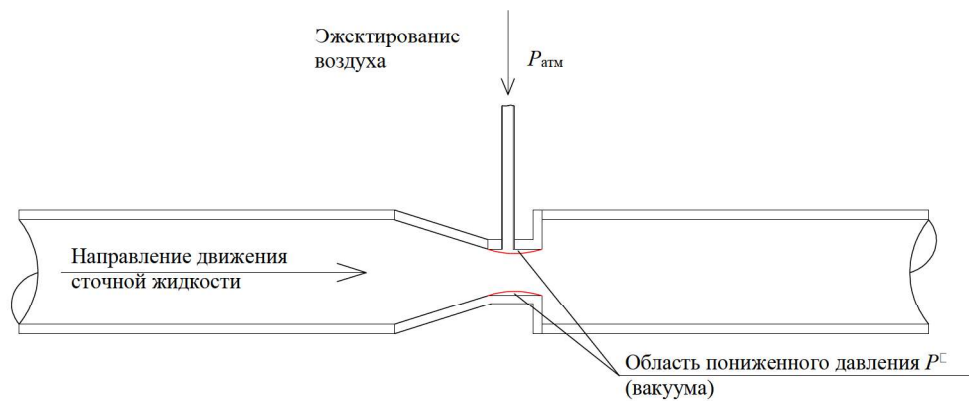


Рис. 1. Узел эжекции воздуха потоком сточных вод

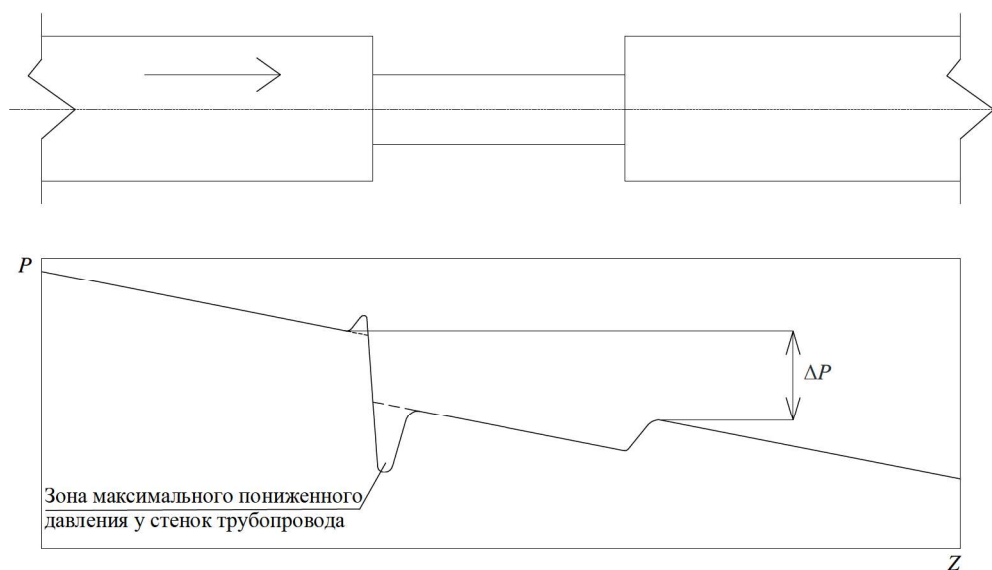


Рис. 2. Продольное сечение канала и распределение статического давления

которая решалась для каждой фазы [15]. Главной задачей моделирования была оценка расхода эжектируемой воздушной среды. Внутреннее воздушное пространство трубопровода и воздушной трубки (см. рис. 3) имитировалось с помощью твердотельного элемента в программе Design Modeler. В качестве основных веществ в настройках модели выбирались вода и воздух, плотность которых соответствовала температуре $T = 25^\circ\text{C}$. Для обеспечения турбулизации потока применялась стандартная модель $k-\epsilon$. Процесс эжекции воздуха рассматривался в условиях нестационарной задачи. Общее вре-

мя модельного расчета составляло $t = 10$ с. Для достижения сходимости расчета шаг по времени принимался равным $t_{\text{ш}} = 0,1$ с. Для моделирования процесса смешения водного и воздушного потоков применялась модель частиц. С этой целью для водной фазы использовалась настройка сплошного потока, а для воздушной среды — диспергированного потока с размером частиц 1 мм. Настройки земной гравитации не применялись.

Для генерации расчетной сетки использовалось стандартное приложение Meshing. В данном случае применялись тетраэдральные сетки с размером ячейки 0,01 м. С целью

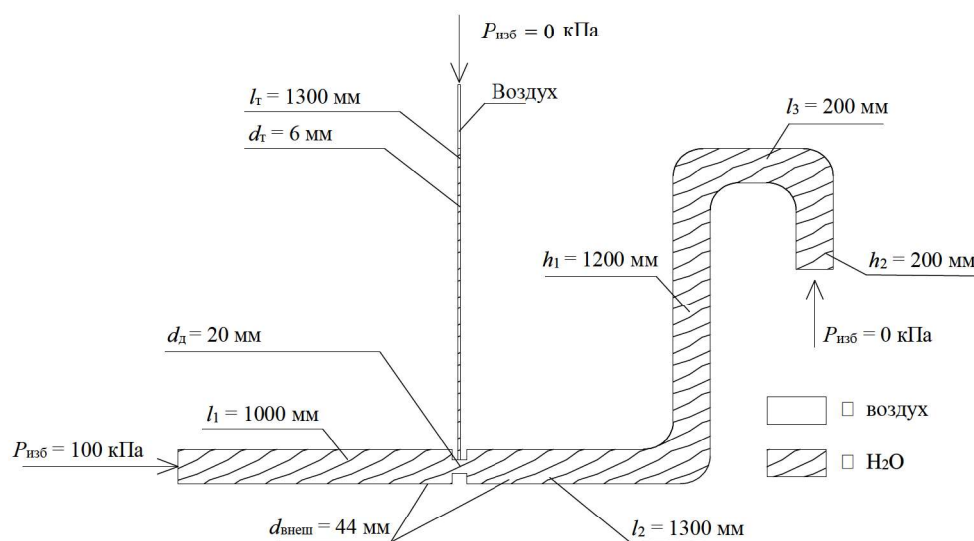


Рис. 3. Расчетная область модели узла эжекции

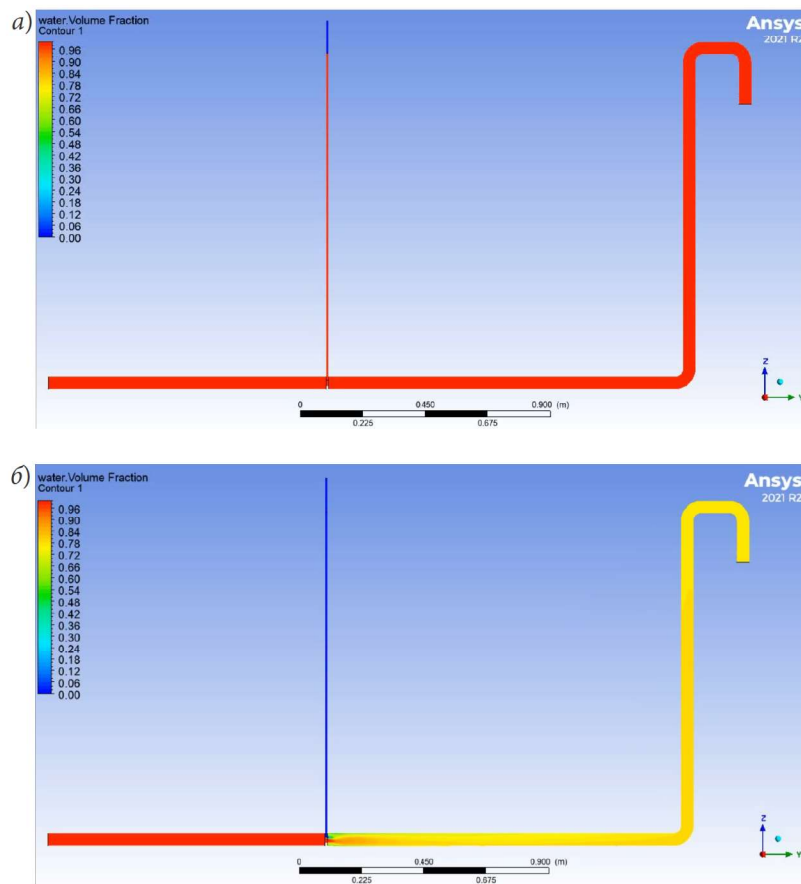
моделирования пограничного слоя в месте контакта потока воды и воздуха со стенками трубопровода выполнялось умельчение расчетной сетки с помощью функции Inflation. С помощью этой функции выполнялось построение структурированной сетки, состоящей из 10 слоев общей толщиной 1 мм.

На рис. 3 также показаны граничные условия модели. Для имитации одностороннего входа потока воды в трубопровод на торце использовалось условие Inlet, которое задавалось с помощью избыточного давления $P_{изб} = 100$ кПа. Объемная доля для воды задавалась равной 1, а для воздуха соответственно — 0. Для торца воздушной трубки применялось условие Opening, предусматривающее двустороннее движение двухфазного потока. Данное условие имитирует наличие окружающей атмосферы и задается с помощью избыточного давления $P_{изб} = 0$ Па. В начальный момент времени на данной границе предусматривается присутствие воздушной среды, поэтому объемная доля по воде задавалась равной 0, по воздуху — 1. Выход водовоздушной смеси обеспечивается с помощью условия Opening, которое задавалось на торцевой поверхности гусака. Настройки этого граничного условия аналогичны усло-

вию на торце воздушной трубки. Стенки трубопроводов являются непроницаемыми. Для этих поверхностей применялось граничное условие Wall с отсутствием шероховатости. В начальный момент времени все трубопроводы заполнены водой, которая находится в состоянии покоя. Процесс моделирования предполагает подачу воды в трубопровод под избыточным давлением. Через некоторое время расчета процесс движения потока должен установиться, а расход воды и эжектируемого воздуха — стабилизироваться. В ходе расчета решателем были получены требуемые значения невязок скорости и давления, объемной доли и параметров турбулентности.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 показаны результаты моделирования объемной доли водовоздушного потока в расчетной области трубопровода для начального момента времени (а) и состояния установившегося движения (б). Поле объемной доли качественно отражает ожидаемый результат. В начальный момент времени расчетная область трубопровода и воздушной трубки заполнена водой, находящейся в состоянии потока. По мере поступления новых порций воды через входное гранич-

Рис. 4. Поле объемной доли водовоздушного потока: а — $t = 0$ с; б — $t = 3$ с

ное условие за счет избыточного давления происходит постепенное выдавливание начального объема через оба условия Opening. Это выражается в колебании уровня воды в воздушной трубке. К моменту времени 1 с движение воды полностью устанавливается, и поток покидает расчетную область только через торцевую поверхность гусака, а через воздушную трубку в диафрагме наблюдается эжектирование воздушной среды в водный поток.

На рис. 5 представлены графики зависимости расхода воды и воздуха от времени расчета, зафиксированного на входном сечении трубопровода и воздушной трубки. Из графиков видно, что в момент времени 1 с процесс движения водовоздушного потока устанавливается, а расходы водной и воздушной среды стабилизируются. Средняя

скорость потока воды в трубопроводе составляет 2,6 м/с. На входе в диафрагму средняя скорость потока зафиксирована равной 11,5 м/с. Среднее значение расхода воды составило 3,83 л/с. Среднее значение эжектируемого расхода воздуха равно 1,09 л/с. В результате перемешивания поступающего воздуха с водным потоком на выходе получается пересыщенный раствор кислорода в воде. Содержание кислорода (в растворенном и газообразном виде) будет составлять 78,7 мг/л.

Полученные результаты позволяют заключить, что предложенный способ позволяет эффективно насыщать поток сточных вод растворенным кислородом, что впоследствии позволит в напорном трубопроводе поддерживать аэробные условия и избежать негативного процесса газовыделения в ка-

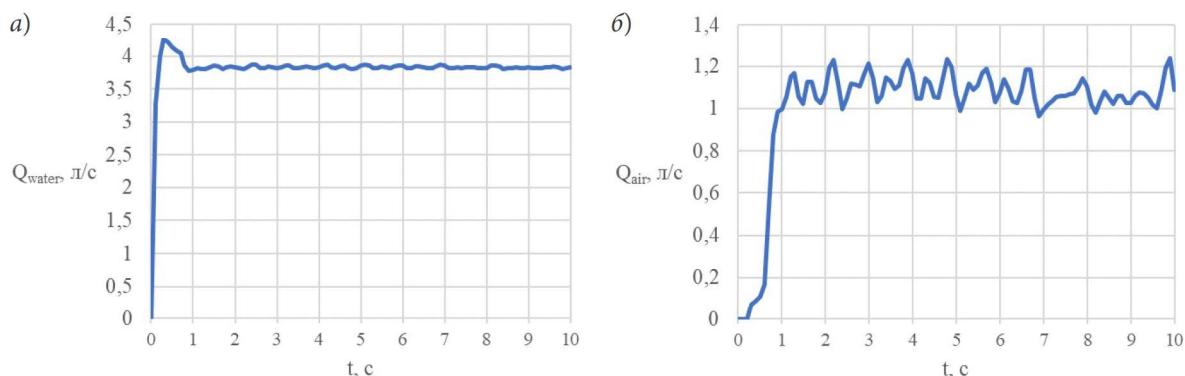


Рис. 5. Расход водного потока (а) и эжектируемого воздуха (б)

мерах гашения напора. Подготовленная модель может быть использована в дальнейшей научной практике для изучения процесса эжектирования применительно к напорным трубопроводам канализационных насосных станций.

Выводы

В результате выполненной работы были проанализированы основные этапы выделения токсичного газа сероводорода на системах бытового водоотведения. Для предотвращения его образования предложен новый метод: путем создания аэробных условий в напорных трубопроводах за счет естественной гидравлической эжекции воздуха. Результаты моделирования в программном комплексе ANSYS CFX показывают большой прирост содержания кислорода в рассматриваемом трубопроводе, что подтверждает возможность использования данного метода на практике.

Библиографический список

1. Телятникова А. М. Исследование процесса выделения сероводорода в камерах гашения напора // Известия вузов. Строительство. 2022. № 1 (757). С. 70–81. DOI 10.32683/0536-1052-2022-757-1-70-81.
2. Gutierrez O., Park D., Sharma K. R., Yuan Z. Effects of long-term pH elevation on the sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms // Water Research. 2009. Vol. 43 (9). Pp. 2549–2557.
3. Joseph A. P., Keller J., Bustamante H., Bond P. L. Surface neutralization and H₂S oxidation at early stages

of sewer corrosion: influence of temperature, relative humidity and H₂S concentration // Water Research. 2012. Vol. 46 (13). Pp. 4235–4245.

4. Мелехин А. Г., Третьяков С. Ю. Решение проблемы, связанной с образованием сульфидов в бытовых сточных водах города // Вестник Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Урбанистика. 2011. № 1 (1). С. 118–122.

5. Столбихин Ю. В. Разработка методов предотвращения коррозии канализационных коллекторов и сооружений на основе совершенствования камер гашения напора: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 227 с.

6. Ручкинова О. И. Изменение концентрации сульфидов в хозяйственно-бытовых сточных водах в процессе транспортирования // Вестник Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 3 (35). С. 138–149. DOI 10.15593/2409-5125/2019.03.10.

7. Васильев В. М., Ильина О. М. Массообменные кислородные процессы на трубчатых перепадах при вентиляции канализационного коллектора и их влияние на коррозию бетона // Новые технологии и материалы в подземном строительстве: альманах научно-технической информации. 1995. Вып. 1. С. 8–12.

8. Jensen H. S., Lens P. N. L., Nielsen J. L., Bester K., Nielsen A. H., Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J. Growth kinetics of hydrogen sulfide oxidizing bacteria in corroded concrete from sewers // Journal of Hazardous Materials. 2011. Vol. 189 (3). Pp. 685–691.

9. Малков А. В. Предотвращение коррозии конструкционных материалов в системах водоотведения на основе организации газообмена: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 179 с.

10. Bokowa A. H. The Review of the Odour Legislation // Proceedings of the Water Environment Federation. 2010. Vol. 3. Pp. 492–511.

11. Третьяков С. Ю., Мелехин А. Г. Технологии обезвреживания сульфидов в бытовых сточных водах // Экология и промышленность России. 2012. № 1. С. 12–16.

12. Jameel P. The use of ferrous chloride to control dissolved sulfides in interceptor sewers // Journal of the Water Pollution Control Federation. 1989. Vol. 61 (2). Pp. 230–236.

13. Boon A. G., Lister A. R. Formation of sulphide in rising main sewers and its prevention by injection of oxygen // Progress in Water Technology. 1975. Vol. 7 (2). Pp. 289–300.

14. Чисхолм Д. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках / пер. с англ. М.: Недра, 1986. 204 с.

15. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Балтийский гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.

References

1. Telyatnikova A. M. *Issledovanie protsessa vydeleniya serovodoroda v kamerakh gasheniya napora* [Investigation of the process of hydrogen sulfide separation in the chambers of head quenching]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo – Higher School Proceedings. Construction*, 2022, no. 1 (757), pp. 70–81. DOI 10.32683/0536-1052-2022-757-1-70-81.

2. Gutierrez O., Park D., Sharma K. R., Yuan Z. Effects of long-term pH elevation on the sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms. *Water Research*, 2009, vol. 43 (9), pp. 2549–2557.

3. Joseph A. P., Keller J., Bustamante H., Bond P. L. Surface neutralization and H₂S oxidation at early stages of sewer corrosion: influence of temperature, relative humidity and H₂S concentration. *Water Research*, 2012, vol. 46 (13), pp. 4235–4245.

4. Melekhin A. G., Tretyakov S. Yu. *Reshenie problemy, svyazannoy s obrazovaniem sulfidov v bytovykh stochnykh vodakh goroda* [Solving the problem associated with the formation of sulfides in domestic wastewater of the city]. *Vestnik Permskogo nats. issled. politekhn. un-ta. Urbanistika – Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Urbanistics*, 2011, no. 1 (1), pp. 118–122.

5. Storbikhin Yu. V. *Razrabotka metodov predotvrashcheniya korrozii kanalizatsionnykh kollektorov i sooruzheniy na osnove sovershenstvovaniya kamer gasheniya napora*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of methods of prevention of corrosion of sewer collectors and constructions on the basis of perfection of chambers of damping of a head. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2016, 227 p.

6. Ruchkinova O. I. *Izmenenie kontsentratsii sulfidov v khozyaystvenno-bytovykh stochnykh vodakh v protsesse transportirovaniya* [Changes in the concentration of sulfides in household wastewater in the process of transportation]. *Vestnik Permskogo nats. issled. politekhn. un-ta. Urbanistika – Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Urbanistics*, 2019, no. 3 (35), pp. 138–149. DOI 10.15593/2409-5125/2019.03.10.

7. Vasilev V. M., Il'ina O. M. *Massoobmennyye kislorodnye protsessy na trubchatykh perepadakh pri ventilyatsii kanalizatsionnogo kollektora i ikh vliyanie na korroziyu betona* [Mass-exchange oxygen processes on tubular drops during ventilation of a sewer collector and their influence on concrete corrosion]. *Novye tekhnologii i materialy v podzemnom stroitel'stve: al'manakh nauchno-tekhnicheskoy informatsii* [In: New technologies and materials in underground construction: almanac of scientific and technical information]. 1995, iss. 1, pp. 8–12.

8. Jensen H. S., et al. Growth kinetics of hydrogen sulfide oxidizing bacteria in corroded concrete from sewers. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 189 (3), pp. 685–691.

9. Malkov A. V. *Predotvrashchenie korrozii konstruksionnykh materialov v sistemakh vodootvedeniya na osnove organizatsii gazoobmena*. Diss. kand. tekhn. nauk [Prevention of corrosion of structural materials in water drainage systems on the basis of gas exchange control. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2017, 179 p.

10. Bokowa A. H. Review of the Odour Legislation. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2010, vol. 3, pp. 492–511.

11. Tretyakov S. Yu., Melekhin A. G. *Tekhnologii obezvrezhivaniya sulfidov v bytovykh stochnykh vodakh* [Technologies of sulfide neutralization in domestic wastewater]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii – Ecology and Industry of Russia*, 2012, no. 1, pp. 12–16.

12. Jameel P. The use of ferrous chloride to control dissolved sulfides in interceptor sewers. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 1989, vol. 61 (2), pp. 230–236.

13. Boon A. G., Lister A. R. Formation of sulphide in rising main sewers and its prevention by injection of oxygen. *Progress in Water Technology*, 1975, vol. 7 (2), pp. 289–300.

14. Chiskholm D. *Dvukhfaznye techeniya v truboprovodakh i teploobmennikakh* [Two-phase flows in pipelines and heat exchangers]. Transl. from English. Moscow, Nedra Publ, 1986, 204 p.

15. Belov I. A., Isaev S. A. *Modelirovanie turbulentnykh techeniy* [Modeling of turbulent flows]. St. Petersburg, Baltiyskiy gos. tekhn. un-t Publ., 2001, 108 p.