УДК 628.3

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-175-181

© С. В. Федоров, канд. техн. наук, доцент
© В. М. Васильев, д-р техн. наук, профессор
© Ю. В. Столбихин, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru, 89119311522@bk.ru,
stolbikhin@bk.ru
© Н. А. Черников, д-р техн. наук, профессор
(Петербургский государственный университет
путей сообщения императора Александра I)
E-mail: vvig@pgups.ru

© S. V. Fedorov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© V. M. Vasilyev, Dr. Sci. Tech., Professor
© Yu. V. Stolbikhin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru, 89119311522@bk.ru,
stolbikhin@bk.ru
© N. A. Chernikov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University)
E-mail: vvig@pgups.ru

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ЗАГАЗОВАННОСТИ КАНАЛИЗАЦИОННОЙ СЕТИ

DEVELOPMENT OF MEASURES AIMED AT REDUCING GAS CONTAMINATION OF THE SEWER NETWORK

Повышенная загазованность канализационной сети на участках функционирования перепадных колодцев и шахт приводит к нарушению норм эксплуатации канализационных сетей, ухудшению санитарно-экологической обстановки окружающего воздушного пространства и преждевременному износу железобетонных конструкций и труб от газовой коррозии. Для снижения загазованности в перепадных шахтах предлагается применение трубчатых стояков из эластичных материалов. Для исследования гидравлического режима проведен эксперимент, показавший сжатие стенок эластичной трубы, обеспечивающее работу стояка полным сечением. С целью оценки интенсивности газовыделения в шахте с эластичным трубчатым стояком была проведена серия модельных расчетов в пакете конечно-элементного анализа ANSYS CFX для нестационарной задачи. Были получены поле скоростей и давлений в водной и газовой среде (в качестве канализационного газа был принят сероводород), а также объемная доля водной и газовой среды. По сравнению с классической конструкцией трубчатого перепада загазованность подводящего пространства канализационной шахты ниже.

Ключевые слова: канализационная сеть, сероводород, эластичный трубчатый стояк, математическое моделирование, ANSYS CFX.

The paper considers the problem of increased gas contamination of the sewer network in the areas of drop wells and shafts functioning, which leads to violation of the sewer networks operation standards, deterioration of the surrounding airspace sanitary and environmental conditions and premature deterioration of reinforced concrete structures and pipes due to gas (microbial) corrosion. In order to reduce gas contamination in drop shafts, the use of tube risers made of elastic materials is proposed. In order to investigate the hydraulic regime, there was carried out an experiment that showed the compression of the elastic tube walls providing the performance of the riser with a full cross-section. For the proper estimation of the gas emission intensity in the shaft equipped with elastic tubular riser, there was carried out a series of model calculations in the ANSYS CFX finite element analysis package for the unsteady problem. There were obtained the velocity and pressure fields in water and gas-air media (hydrogen sulfide was assumed as a sewage gas), as well as the volume fraction of water and gas-air media. In comparison with the classical design of the tubular drop, a decrease in the gas content of the subsurface space of the sewer shaft was evident.

Keywords: sewer network, hydrogen sulfide, elastic tube riser, mathematic simulation, ANSYS CFX.

Процесс транспортирования сточных вод в водоотводящих сетях сопровождается образованием и выделением в окружающую среду канализационных газов, таких как сероводород, метан, углекислый газ, аммиак и т. д. [1, 2]. Эти

газы, попадая в окружающую среду, негативно воздействуют на здоровье обслуживающего персонала канализационных сетей и городских жителей [3–6]. Кроме этого, избыточная загазованность подводящего пространства сооружений

приводит к интенсификации процесса газовой (микробиологической) коррозии железобетонных конструкций (обделка тоннельных коллекторов, стены и перекрытия канализационных шахт) [7, 8]. Коррозия в конечном счете приводит к существенному сокращению периода эксплуатации отдельных участков и сооружений и возникновению аварийных ситуаций [9]. Канализационная сеть крупного города включает в себя комплекс различных сооружений, таких как колодцы, шахты, насосные станции, камеры гашения напора, быстротоки. Колодцы и шахты при этом могут быть оборудованы водосливами практического профиля, ступенчатыми или, наиболее часто, трубчатыми перепадами. Поэтому гидравлические условия движения потока сточной жидкости подвержены постоянному изменению, что непосредственно влияет на газовыделение. Исходя из практического и экспериментального опыта, можно заключить, что интенсивное газовыделение присутствует в сооружениях с повышенной турбулизацией потока (резервуары насосных станций, быстротоки, перепадные колодцы и т. д.). Данная научная работа посвящена снижению интенсивности газовыделения в перепадных шахтах со стояком. Ряд натурных экспериментов, посвященных изучению трубчатых перепадов, позволил получить диапазон концентраций сероводорода в воздушной среде подсводного пространства сооружения: 29,8–60,9 мг/м³ [10–14].

Функционирование шахты с трубчатым перепадом приводит к активной дегазации падающе-

го потока сточной жидкости и последующему накоплению газа в пространстве шахты. Ранее проведенные работы [15, 16] по моделированию канализационных коллекторов наглядно подтверждают проблему загазованности. На рис. 1, 2 показаны результаты моделирования канализационной сети в ANSYS CFX. Рассматриваемая система включает основные технологические сооружения. Вода последовательно проходит путь от колодцев с выпусками по участкам канализационной сети, на которой также предусмотрены смотровые и перепадные колодцы. Сеть заканчивается резервуаром канализационной насосной станции. На рис. 1 представлен результат расчета по совместному движению воды и воздуха. На рис. 2 показана объемная доля сероводорода, выделяющегося в подсводное пространство коллектора и шахт. Результаты представлены для установившегося движения потока. В данном случае моделировалась сеть с диаметром трубопроводов 200 мм с целью изучения механики движения газовой среды и оценки мест накопления сероводорода. Важно отметить, что по ходу движения жидкости давление газовой среды меняется. За счет увлекающей способности потока в газовой среде на участках канализационной сети присутствует вакуумметрическое давление [16]. При наличии перепадного колодца наблюдается эффект эжекции газовой среды, которая начинает нагнетаться в глубоко заложенную сеть. Поэтому в самой перепадной шахте наблюдается избыточное давление газа, что способствует дальнейше-

Рис. 1. Моделирование работы трубчатого перепада в ANSYS CFX

Рис. 2. Газовыделение в канализационной сети (моделирование в ANSYS CFX)

му распространению газа по сети. На рис. 2 наблюдается повышенная загазованность шахты с трубчатым перепадом.

В соответствии со сказанным выше, одним из вариантов снижения загазованности может быть создание такой конструкции стояка, которая исключит эффект эжектирования воздуха в стояк и последующее нагнетание его в подсводное пространство шахты. В качестве такого решения нами была предложена замена классического трубчатого стояка перепада (из жесткой трубы) на трубопровод из эластичного материала (например, геотекстиль или резина). Для оценки гидравлического режима работы такого стояка был проведен эксперимент в лаборатории гидравлики СПбГАСУ. Установка работает следующим образом. Вода по стальному трубопроводу $\varnothing$ 50 мм поступает в камеру от погружного насоса, находящегося в подвале. На врезке к этому трубопроводу было ответвление, на котором установлен шаровой кран. Затем вода движется по шлангу, соединяющемуся с тройником из оргстекла, к которому снизу был прилеплен эластичный трубопровод из полиэтиленовой пленки. Вода из стояка сбрасывается в гидравлический лоток и отводится в накопительный резервуар.

На рис. 3 показана экспериментальная установка в режиме работы. При поступлении потока в эластичный трубопровод происходит его сжатие, в результате чего стояк работает полным сечением, без эффекта эжектирования воздуха,

характерного для традиционного кольцевого движения.

Необходимо отметить, что применение эластичного стояка не снижает его пропускную способность по сравнению с жесткой трубой. Гибкость стенок также обеспечивает возможность пропуска с потоком воды по стояку твердых включений и мусора. Из наблюдения за работой эластичного стояка важно отметить, что верхняя его часть (тройник) обязательно должна быть выполнена из жесткого материала, для того чтобы исключить гидродинамическое воздействие потока на эластичный материал и тем самым обеспечить его вертикальное положение. Также важно закрепить нижнюю часть стояка тросом, чтобы ее не сносило потоком, выходящим из водобойного колодца в отводящий коллектор.

Следующим этапом исследования было проведение модельных расчетов в ANSYS CFX с учетом использования в перепадной шахте эластичного стояка. Для этого была создана модель перепадной шахты с подводящим коллектором (рис. 4).

Процесс моделирования предполагает поступление в расчетную область шахты потока воды по подводящему коллектору $\varnothing$ 200 мм. Через лоток подводящего коллектора в поток воды подается сероводород, имитируя газообразование в вышележащей сети. Подача газа в поток осуществляется через 10 секунд после начала движения воды, после наступления установившегося движения в подводящем коллекторе.

Рис. 3. Гидравлический эксперимент по работе эластичного стояка

Для моделирования втекающего потока устанавливались следующие начальные и граничные условия. Во входном сечении коллектора задавались два условия. В первом условии (точка *A*, *Inlet*) задавалась скорость входящего потока V , м/с, и наполнение h/d . Во втором условии (точка *B*, *Opening*) учитывалось поступление газовой среды, увлекаемой потоком воды. В данном граничном условии задавалось избыточное давление, равное 0 Па. Поступление сероводорода задавалось по поверхности лотка. На этапе создания геометрии домена (расчетной области) на лотке была выделена прямоугольная область вдоль участка трубопровода, для которой было определено условие поступления сероводорода.

Массовый расход сероводорода был принят равным 0,01 кг/с.

Эластичный стояк имитировался суженным сечением (по сравнению с аналогичным трубчатым стояком) по аналогии с результатами, полученными на экспериментальном стенде. Размер сечения эластичного стояка был подобран таким образом, чтобы отсутствовало подтопление подводящего трубопровода.

Отводящий трубопровод был принят $\varnothing 200$ мм. Условие по выходу сточной воды и газовой среды из расчетной области (точка *C*, *Outlet*) характеризовалось значением избыточного давления 0 Па.

В качестве начального состояния системы (в момент времени $t = 0$ с) устанавливается условие присутствия в расчетной области только воздушной среды с избыточным давлением $P_{\text{изб}} = 0$ Па.

Качественная верификация результатов расчета выполнялась по данным таблиц гидравлического расчета Лукиных¹. При достижении установившегося движения в подводящем и отводящем коллекторе в расчетных сечениях фиксировался расход воды, соответствующий установленному уклону и заполнению.

На рис. 5 и 6 показаны результаты моделирования работы перепадной шахты с эластичным стояком. Важно отметить, что у данного стояка отсутствует эжекционная способность, и поэтому поступающий из подводящего коллектора

Рис. 4. Модель перепадной шахты с эластичным стояком:
A — *Inlet* (вход); *B* — *Opening* (условие атмосферного давления); *C* — *Outlet* (выход)

¹ Лукиных А. А., Лукиных Н. А. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н. Н. Павловского.

Рис. 5. Моделирование работы перепадной шахты, оборудованной эластичным стояком. Объемная доля сероводорода в шахте

Рис. 6. Моделирование работы перепадной шахты, оборудованной эластичным стояком с закрытой входной воронкой. Объемная доля сероводорода в шахте

сероводород накапливается во входной воронке стояка и с течением времени начинает выделяться в подсводное пространство шахты (см. рис. 5). Чтобы исключить этот эффект, необходимо предусмотреть возможность перекрытия входной воронки стояка. В таком случае сероводород будет накапливаться во входной воронке, до тех пор пока в этой зоне не установится его равновесная (с водой) концентрация (см. рис. 6). Также на рис. 5 и 6 видно, что обрез стояка заглублен под уровень жидкости в водобойном колодце, чтобы исключить дробление и дегазацию выходящей из стояка тонкослойной струи.

В заключение необходимо отметить, что, на наш взгляд, применение эластичных стояков в качестве основного элемента перепадных шахт на сетях канализации возможно. При расположении обреза стояка ниже уровня воды в водобойном колодце шахты возможно значительное снижение газовыделения, тем самым — снижение темпов газовой коррозии железобетонных конструкций шахты и продление срока ее безаварийной эксплуатации. Снижение газовыделения также позволит улучшить санитарное состояние атмосферного воздуха в районе расположения люка канализационной шахты.

Библиографический список

1. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A. H. Sewer processes. Microbial and chemical process engineering of sewer networks. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013. 399 p.
2. Васильев В. М., Панкова Г. А., Столбихин Ю. В. Разрушение канализационных тоннелей и сооружений на них вследствие микробиологической коррозии // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 9. С. 67–76.
3. Богомолов М. В., Кармазинов Ф. В., Костюченко С. В. Методы удаления запахов в системах транспортировки и очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 7. С. 33–43.
4. Телятникова А. М., Федоров С. В. Моделирование процесса газовыделения из канализационного перепада // Сб. науч. тр. IX Молодежной экологической конф. «Северная Пальмира» (22–23 ноября 2018 г.). СПб.: НИЦЭБ РАН, 2018. С. 235–238.
5. Телятникова А. М., Федоров С. В. Санитарно-экологическая безопасность воздушной среды вблизи канализационных сетей // Актуальные проблемы строительства: материалы 71-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (4–5 апреля 2018 г.). В 3 ч. СПб.: СПбГАСУ, 2018. Ч. 3. С. 109–113.
6. Фомичев В. Т., Чурикова В. И. Сероводород как фактор экологической опасности городской среды // Вестник Волгоградского гос. архит.-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44 (63). Ч. 2. С. 80–85.

7. Дрозд Г. Я., Хворткова М. Ю. Методика определения качества эксплуатационной среды канализационных коллекторов // Агротехника и энергообеспечение. 2015. № 5 (9). С. 77–84.

8. Васильев В. М. Филевский коллектор — проблемы эксплуатации, причины разрушений // Подземное пространство мира. 1995. № 3–4. С. 36–41.

9. Перминов Н. А., Васильев В. М., Столбихин Ю. В., Перминов А. Н., Клементьев М. Н. Геотехнические и технологические аспекты обеспечения безопасности тоннельных коллекторов в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 11. С. 19–27.

10. Marleni N., Gray S., Sharma A. K., Burn S., Muttil N. Modeling the Effects of Sewer Mining on Odour and Corrosion in Sewer Systems // 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1–6 December 2013. Pp. 2813–2819.

11. Ciobotici I. C. Ecological modernisation – an eco-innovative solution for the process of strategic planning and design of wastewater collection infrastructure executive summary of the PhD thesis // Ministerul Educației-naționale Universitatea «Vasile Alecsandri» din Bacău. 2017. Bacău. 27 с.

12. Васильев В. М., Ильина О. М., Верхотуров В. П. Влияние массообменных процессов на загрязненность воздуха в канализационных коллекторах // Вестник гражданских инженеров. 2007. № 2 (11). С. 80–82.

13. 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.

14. Малков А. В. Расчет количества газообразной среды, движущейся в самотечных канализационных коллекторах глубокого заложения под действием увлекающей способности жидкости // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 160–165.

15. Fedorov S., Feskova A., Asaul V. Digital Simulation of Sewer Networks and Structures Operation in ANSYS CFX to Increase Energy Efficiency // ICDT-2019, Saint Petersburg. Pp. 73–76.

16. Федоров С. В., Васильев В. М., Клементьев М. Н. Исследование газовыделения на участке канализационной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 5. С. 54–59.

References

1. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A. H. *Sewer processes. Microbial and chemical process engineering of sewer networks*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press Publ., 2013, 399 p.

2. Vasil'ev V. M., Pankova G. A., Stolbikhin Yu. V. *Razrushenie kanalizatsionnykh tonneley i sooruzheniy na nikh vsledstvie mikrobiologicheskoy korrozii* [Destruction of sewer tunnels and structures located on them due to microbiological corrosion]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Supply and sanitary equipment*, 2013, no. 9, pp. 67–76.

3. Bogomolov M. V., Karmazinov F. V., Kostyuchenko S. V. *Metody udaleniya zapakhov v sistemakh transportirovki i ochistki stochnykh vod* [Methods of odor removal in the systems of sewage transportation and treatment]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Supply and sanitary equipment*, 2016, no. 7, pp. 33–43.

4. Telyatnikova A. M., Fedorov S. V. *Modelirovanie protsessa gazovydeleniya iz kanalizatsionnogo perepada* [Modeling of process of gas emission from sewage drop]. *Trudy IX Molodezhnoy ehkologicheskoy konf. «Severnaya Pal'mira» (22–23 noyabrya 2018 g.)* [Proc. of the IX Youth environmental conference. “North Palmyra” (November 22–23, 2018)]. St. Petersburg, NITsEhB RAN Publ., 2018, pp. 235–238.

5. Telyatnikova A. M., Fedorov S. V. *Sanitarno-ehkologicheskaya bezopasnost' vozdukhnoy sredy vblizi kanalizatsionnykh setey* [Sanitary and ecological safety of the air environment near sewer networks]. *Trudy 71-y Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (4–5 aprelya 2018 g.) «Aktual'nye problemy stroitel'stva»* [Proc. of the 71-st vseros. sci.- pract. conf. of students, postgraduates and young scientists (April 4–5, 2018) “Actual problems of construction”]. In 3 pts. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2018, Pt. 3, pp. 109–113.

6. Fomichev V. T., Churikova V. I. *Serovodorod kak faktor ehkologicheskoy opasnosti gorodskoy sredy* [Hydrogen sulfide as a factor of ecological risk of the urban environment]. *Vestnik Volgogradskogo gos. arkhitekt.-stroit. un-ta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Ser.: Construction and Architecture*, 2016, no. 44 (63), pt. 2, pp. 80–85.

7. Drozd G. Ya., Khvortova M. Yu. *Metodika opredeleniya kachestva ehkspluatatsionnoy sredy kanalizatsionnykh kollektorov* [Method of evaluating the quality of the operational environment of sewer collectors]. *Agrotekhnika i ehnergoobespechenie – Agro-engineering and power supply*, 2015, no. 5 (9), pp. 77–84.

8. Vasil'ev V. M. *Filevskiy kollektor — problemy ehkspluatatsii, prichiny razrusheniy* [Filevsky collector: problems of operation, causes of destruction]. *Podzemnoe prostranstvo mira – Underground space of the world*, 1995, no. 3–4, pp. 36–41.

9. Perminov N. A., et al. *Geotekhnicheskie i tekhnologicheskie aspekty obespecheniya bezopasnosti tonnel'nykh kollektorov v usloviyakh slabyykh gruntov Sankt-Peterburga* [Geotechnical and technological aspects of safety

provision of tunnel collectors in conditions of weak soils of St. Petersburg]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary equipment*, 2018, no. 11, pp. 19–27.

10. Marleni N., et al. *Modelling the effects of sewer mining on odour and corrosion in sewer systems*. Proc. of the 20-th International Congress on Modeling and Simulation. Adelaide, Australia, 1–6 December 2013, pp. 2813–2819.

11. Ciobotici I. C. *Ecological modernisation – an eco-innovative solution for the process of strategic planning and design of wastewater collection infrastructure executive summary of the PhD thesis*. Ministerul Educației naționale Universitatea «Vasile Alecsandri» din Bacău Publ., 2017, Bacău, 27 p.

12. Vasil'ev V. M., Il'ina O. M., Verkhoturov V. P. *Vliyanie massoobmennyykh protsessov na zagryaznennost' vozdukh v kanalizatsionnykh kollektorakh* [The influence of mass transfer processes on air pollution in sewers]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2007, no. 2 (11), pp. 80–82.

13. Stolbikhin Yu. V. *Razrabotka metodov predotvrashcheniya korrozii kanalizatsionnykh kollektorov*

i sooruzheniy na osnove sovershenstvovaniya kamer gasheniya napora. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of methods of preventing corrosion of sewers and structures on the basis of pressure damping chambers improvement. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2016, 227 p.

14. Malkov A. V. *Raschet kolichestva gazoobraznoy sredy, dvizhushcheysya v samotechnykh kanalizatsionnykh kollektorakh glubokogo zalozheniya pod deystviem uvlekayushchey sposobnosti zhidkosti* [Calculation of the amount of gaseous medium moving in gravity sewers of deep laying under the action of the entrainment ability of the liquid]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2011, no. 3 (62), pp. 160–165.

15. Fedorov S., Feskova A., Asaul V. Digital simulation of sewer networks and structures operation in ANSYS CFX to increase energy efficiency. *ICDT-2019*, Saint Petersburg, pp. 73–76.

16. Fedorov S. V., Vasil'ev V. M., Klement'ev M. N. *Issledovanie gazovydeleniya na uchastke kanalizatsionnoy seti* [Investigation of gas emission at the site of the sewer network]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary equipment*, 2019, no. 5, pp. 54–59.