УДК 628.3

© С. В. Федоров, канд. техн. наук, доцент
© В. М. Васильев, д-р техн. наук, профессор
© А. М. Телятникова, ассистент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru, 89119311522@bk.ru,
sik3000@list.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-168-174

© S. V. Fedorov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© V. M. Vasil'ev, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. M. Telyatnikova, assistant
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru, 89119311522@bk.ru,
sik3000@list.ru

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ КАНАЛИЗАЦИОННОЙ СЕТИ

DEVELOPMENT OF THE SEWERAGE NETWORK CONCEPTUAL MODEL

Обоснована проблема ухудшения санитарно-экологической обстановки окружающей городской среды от выбросов вредных газов из канализационной сети. Наиболее опасные газы — сероводород и метан, которые являются продуктами биохимических реакций, протекающих в процессе транспортировки по трубопроводам и сооружениям на сети. На основании существующих экспериментальных данных проведена оценка интенсивности выделения газов в зависимости от типа сооружения и условий протекания. Для обоснования мест интенсификации выделения газов предложен способ моделирования канализационной сети или отдельных участков. Разработана принципиальная модель на основе ANSYS CFX. Для оптимизации процесса создания расчетной геометрии использована программа, реализующая принцип BIM (Building Information Modeling) — Revit.

Ключевые слова: канализационная сеть, сероводород, метан, математическое моделирование, ANSYS CFX, Revit.

The article presents a substantiation of the problem of deterioration of sanitary and environmental conditions of the urban environment due to emissions of harmful gases from the sewerage network. The most dangerous gases are hydrogen sulfide and methane, which are products of biochemical reactions occurring during transportation through pipelines and facilities at the network. Based on the existing experimental data, estimation of gas emission intensity is presented, depending on the type of construction and flow conditions. In order to consider the places of intensification of gas emission, a method for simulation of the sewage network on the whole or its individual sections is proposed. There has been developed a conceptual model based on ANSYS CFX. In order to optimize the process of creating the calculation geometry, the authors used the Revit building information modeling software implementing the principle of BIM (Building Information Modeling).

Keywords: sewerage network, hydrogen sulfide, methane, mathematical simulation, ANSYS CFX, Revit.

В современном мире одним из важнейших критериев оценки функционирования системы канализации является безопасность сбора и транспортировки стоков. Причиной особого внимания к данному вопросу стало присутствие в сточных водах биологического загрязнения, а также веществ с высокой химической активностью и токсичностью. Наличие всех этих компонентов и постоянное перемешивание сточных вод обеспечивает протекание различных химических и биохимических процессов, позволяющих рассматривать канализацию как единый «биологический реактор».

Согласно проведенным исследованиям [1, 2] процесс течения сточной жидкости может рассматриваться как гетерогенная двухфазная многокомпонентная система, где в качестве первой фазы выступает водная среда, а второй фазой служит воздушная прослойка между поверхностью воды и подводящим пространством коллекторов или сооружений на сети.

Естественным процессом в канализационных системах является формирование биопленки по всей длине смоченного периметра стенок труб и выпадение осадка сточных вод на участках с замедлением потока сточной жидкости, что в ко-

нечном счете приводит к образованию сероводорода, углекислого газа, метана и аммиака.

Выделившиеся газы частично растворяются в сточной воде, остальная часть поступает в подводящее пространство канализационных сетей. Углекислый газ и сероводород растворяются в конденсационной пленке, образуя угольную и серную кислоты [1, 3]. Кислоты разрушают бетонное покрытие и интенсифицируют газовую коррозию. Данное явление и методы борьбы с ним изучены весьма подробно [4].

Наибольший интерес представляет сам процесс газообразования в сети, его особенности и зависимости от различных параметров системы. Выделяющиеся в канализации газы являются токсичными и оказывают ощутимое воздействие на здоровье человека и экологическую обстановку городских территорий. Важность данной проблемы подтверждается многими научными работами [5]. Наглядно отражают наличие загрязнения жалобы жителей. В Москве за 2015 год около 16 % обращений по вопросам загрязнения воздуха пришлось на запахи из канализации¹. Похожая ситуация наблюдается и в провинциальных городах². Острее вопрос стоит для эксплуатирующего персонала. Спуск в плохо вентилируемые участки сетей и колодцы нередко приводит к несчастным случаям, 27,5 % из которых составляют отравления или удушения [6].

Для борьбы с проблемой газообразования на сетях существует множество методов очистки воздуха, однако, согласно проведенным исследованиям [7], ни один из них не является достаточным. Необходимо использование комбинированных методов, требующих значительных затрат. Фактически в настоящее время процесс газообразования не может эффективно устраняться эксплуатирующими службами.

Также недостаточно учтен процесс газовой выделения на этапе проектирования. В СП 32.13330.2012³ отражены лишь рекомендации по борьбе с газовой коррозией. Поэтому применение закономерностей газообразования для оцен-

ки санитарной безопасности проектируемой сети является перспективным направлением.

Современные возможности позволяют решить подобную задачу с помощью компьютерного моделирования. В научных работах встречаются гидродинамические модели [8], модели, учитывающие процессы транспортировки, осаждения и накопления субстрата [9], а также распространение загрязнений сточных вод в сетях [10]. Для изучения вопроса газовой выделения необходимо применять комплексную модель с учетом всех указанных факторов и конструктивных особенностей сооружений. На практике встречаются следующие сооружения: смотровые колодцы (узел Б на рис. 1), ступенчатые и трубчатые перепады (узлы А, Е на рис. 1), насосные станции (КНС) (узел Г на рис. 1), камеры гашения напора (КГН) (узел В на рис. 1), быстротокки, водосливы практического профиля (узел Д на рис. 1), объекты «*Sewer mining*» [11] и т. п.

Как показывает практический и экспериментальный опыт, тип сооружения влияет на режим движения потока и вместе с ним на интенсивность эмиссии газов. По данным работы [12] концентрация сероводорода в резервуаре КНС может достигать величины 347 мг/м³. На участках сети с быстротокками фиксировались значения до 170 мг/м³, а в колодцах с трубчатыми перепадами — в диапазоне 29,8...60,9 мг/м³ [13]. В КГН величина концентрации ниже, но тоже превышает допустимые значения — от 22 до 44 мг/м³ [4]. В работе N. Marleni и др. [11] по моделированию канализационной сети Мельбурна было выявлено возрастание концентраций газа на участке сети до значения 28,3 мг/м³ после сооружения «*Sewer mining*». Особого внимания заслуживает сброс в канализацию теплых вод, повышающий скорость образования сероводорода на 25–30 % [15]. Удельное количество сероводорода, выделяющееся из сети, оценено в работе I. Ciobotici [16] и составляет 6,4 мг/м³ на один кубометр сточной воды.

Для реализации модели канализационной сети или ее участков необходимо решать систему дифференциальных уравнений гидродинамики и тепломассопереноса, к которой добавляются уравнения, описывающие биохимические процессы [10]. С аналитической точки зрения эта задача трудно решается. Поэтому наиболее пер-

¹ Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2015 году».

² Отчет о состоянии окружающей среды городского округа — город Волжский Волгоградской области в 2016 году.

³ СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. М.: Министерство регионального развития РФ, 2011.

спективной альтернативой является создание модели в программе конечно-элементного анализа (ANSYS CFX).

Для моделирования сети (рис. 1) необходимо предварительно сконструировать расчетную область, в которой предполагается совместное движение сточной жидкости и газозвоздушной смеси. Расчетная область представляет собой внутреннее пространство трубопроводов и колодцев. Сборка расчетной области в графическом редакторе *DesignModeler* или *AutoCad* представляется достаточно трудоемкой задачей, поскольку по ходу течения воды меняется диаметр участка сети, конфигурация колодца и его технологическое оборудование. Для решения данной проблемы авторами использовался программный комплекс *Revit*, реализующий принцип *BIM (Building Information Modeling)*, позволяющий создать типовые семейства участков и колодцев сети. Таким образом, модель быстро собирается и поддается оперативным изменениям в ходе расчетов.

На рис. 2 в качестве примера представлено семейство типового смотрового колодца. В нем параметризованы основные технологические характеристики: внутренний диаметр колодца (D_k) и его высота (H_k), диаметры трубопроводов подключения (d_1, d_2, d_3, d_4), диаметр люка ($d_{\text{люк}}$). Также предусмотрены настройки глубины заложения лотков труб (h_1, h_2, h_3, h_4) и углы подключения в плане. Отметим, что стенки трубопроводов и водонепроницаемых поверхностей внутри колодцев моделируются в виде пустых областей.

В режиме проекта, с использованием типовых семейств, выполняется сборка любых участков сети. В ходе сборки необходимо обеспечить полное совпадение плоскости патрубка колодца и конца трубопровода, избегая образования пустых областей или пересечек плоскостей, которые в дальнейшем могут создать дополнительные грани и проблемы с генерацией расчетной сетки. Поверхность люка привязана к опорному уровню семейства, от которого вниз отсчитывается глубина колодца. Поэтому новый колодец быстро ориентируется по вертикальной отметке.

Рис. 1. Схема канализационной сети

Рис. 2. Семейство смотрового или поворотного колодца

Далее устанавливаются глубина и угол подключаемых патрубков.

Затем полученное геометрическое тело экспортируется в *DesignModeler* (ANSYS). Экспорт может осуществляться целиком для всей модели сети или поэлементно: каждый колодец и участок сети отдельно. Выбор варианта принципиально зависит от протяженности сети. Если рассматривается небольшая сеть с длиной магистрального коллектора до 0,5–1 км, то имеет смысл экспортировать сеть целиком как единый объект и осуществлять генерацию сетки для всей расчетной области. Если сеть имеет существенные размеры, как на рис. 1, то необходимо выполнить поэлементный экспорт, поскольку иначе могут возникнуть трудности с генерацией расчетной сетки. При этом каждый элемент экспортируется в отдельный блок *DesignModeler* с привязкой к началу координат и для него выполняется генерация сетки — *Mesh*. Чтобы выполнить это условие, нужно предварительно перед экспортом выбрать опорную точку у каждого элемента и, привязавшись к ней, перенести тело в начало координат. После этого в *Workbench* создается единый блок *CFX*. С помощью простых связей

передачи данных выполняется перенос сгенерированных сеток в блок *CFX*. Необходимо отметить, что первоначально в блоке *CFX* расчетные сетки всех участков и колодцев сети находятся в центре координат и накладываются друг на друга. Чтобы произвести расстановку сеточных элементов в соответствии с проектным положением колодцев и трубопроводов в пространстве, применяется меню *Transform mesh*, в котором указываются координаты опорных точек. Далее необходимо связать соседние сеточные элементы между собой с помощью меню *Connectivity*. Данная операция позволит получить единую расчетную сетку.

Следующим этапом является установка граничных и начальных условий (рис. 3). Граничные условия — поступление жидкости в расчетную область (*inlet*), условие выхода (*outlet*) и наличие воздушной атмосферы (*opening*). В соответствии с рис. 1 условие поступления сточной воды с фиксированным расходом задается на грани одного из патрубков в колодцах подключения. Кроме этого на грани люка ставят условие атмосферного давления, обеспечивающее поступление и отток газозвдушной масс в ходе движе-

Рис. 3. Граничные условия

ния жидкости по участкам сети. В данном случае во всех колодцах избыточное давление принято равным нулю, что соответствует движению газа только за счет увлекающей способности потока жидкости. Выход потока сточных вод и увлекаемого воздуха определяется на торцевой грани последнего по ходу течения участка сети. В качестве начального условия принимается присутствие в расчетной области только статичной газовой среды с избыточным давлением, равным

нулю. Расчет выполняется для установившегося движения. В дополнение к указанным условиям также могут задаваться условия по температуре воды и окружающего газового пространства и вводиться дополнительные условия по концентрации вредных газов. Для всех остальных граний расчетной области задается условие стенки.

На рис. 4 показаны результаты расчета по объемной доле распределения жидкости (красная область) и газа (синяя область), а также век-

Рис. 4. Визуализация результатов моделирования

торы движения газа. За счет движения воды на участках сети наблюдается увлечение газовой среды в подсводное пространство через границу люка. Заполнение трубопроводов соответствует расчету по гидравлическим таблицам.

В качестве основного результата проделанной работы выступает математическая модель, разработанная на базе программы ANSYS CFX. Полученная модель позволяет реализовать принципиально новый подход к дальнейшему исследованию канализационной сети, который рассматривает систему водоотведения как единый химический аппарат. В данном случае в расчете совокупно учитываются процессы взаимного движения жидкой и газо-воздушной фазы и процессы теплообмена, которые определяют поле концентрации вредных газов (сероводорода, метана) и места их наиболее интенсивного выделения. Также существенным достоинством предлагаемой модели является возможность выполнять инженерные расчеты для различных режимов функционирования сети и климатологических условий. Таким образом, на этапе проектирования появится возможность оптимизировать технологические характеристики и решить существующую проблему газовой выделения. Кроме того, необходимо отметить, что подобное моделирование можно использовать для уточнения размеров санитарных зон вблизи сооружений, наиболее подверженных газообразованию в ходе эксплуатации.

Библиографический список

1. 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.
2. 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.
3. Дрозд Г. Я., Хвортова М. Ю. Методика определения качества эксплуатационной среды канализационных коллекторов // Агротехника и энергообеспечение. 2015. № 5 (9). С. 77–84.
4. Васильев В. М. Филевский коллектор — проблемы эксплуатации, причины разрушений // Подземное пространство мира. 1995. № 3–4. С. 109.
5. 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. 80–83.
6. Burlet-Vienney D., Chinniah Y., Bahloul A., Roberge B. Occupational safety during interventions in confined spaces // Safety Science. 2015. № 79. Pp. 19–28.
7. 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.
8. Teuber K., Broecker T., Barjenbruch M., Hinkelmann R. High-Resolution Numerical Analysis of Flow Over a Ground Sill Using OpenFOAM // Conference Paper: 12th International Conference on Hydrosience & Engineering. Tainan, Taiwan. 2016.
9. Mannina G., Viviani G. An urban drainage stormwater quality model: model development and uncertainty quantification // Journal of Hydrology. 2010. № 381, Issue 3. Pp. 248–265.
10. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A. H. Sewer processes. Microbial and chemical process engineering of sewer networks. Boca Raton: CRC Press, 2013. 399 p.
11. Marleni N., Gray S., Sharma A., Burn S., Muttill 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.
12. Лейбович Л. И., Пацурковский П. А. Моделирование динамики поступления сероводорода в окружающую среду при работе насосов канализационных насосных станций // Вестник ХНАДУ. 2016. № 72. С. 176–181.
13. Столбихин Ю. В. Разработка методов предотвращения коррозии канализационных коллекторов и сооружений на основе совершенствования камер гашения напора: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГАСУ, 2016. 171 с.
14. Васильев В. М. и др. Отчет о результатах обследования дублера канализационного коллектора в районе площади Мужества. СПб.: ООО «ПИБ «Инженерные Экосистемы», 2010. 188 с.
15. Лебедева Е. С., Юрченко В. А., Свергузова С. В. Количественная оценка влияния температурного фактора на накопление сероводорода в подсводном пространстве канализационного коллектора // Вестник Казанского технологического ун-та. 2014. Т. 17. № 24. С. 141–143.

16. 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. România, Bacău, 2017. 30 p.

References

1. Vasil'ev V. M., Pankova G. A., Stolbikhin Yu. V. *Razrushenie kanalizatsionnykh tonneley i sooruzheniy na nikh v sledstvie mikrobiologicheskoy korrozii* [Destruction of sewer tunnels and nearby located facilities owing to microbiological corrosion]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and the sanitary technique*, 2013, no. 9, pp. 67–76.
2. Vasil'ev V. M., Il'ina O. M., Verkhotur V. P. *Vliyanie massoobmennyykh protsessov na zagryaznennost' vozdukh v kanalizatsionnykh kollektorakh* [The effect of mass exchange processes on air impurity in sewage collectors]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2007, no. 2 (11), pp. 80–82.
3. Drozd G. Ya., Khvortova M. Yu. *Metodika opredeleniya kachestva ehkspluatatsionnoy sredy kanalizatsionnykh kollektorov* [Methods of determining the quality of the sewage collectors' operational environment]. *Agrotekhnika i ehnergoobespechenie – Agrotechnology and power supply*, 2015, no. 5 (9), pp. 77–84.
4. Vasil'ev V. M. *Filevskiy kollektor — problemy ehkspluatatsii, prichiny razrusheniy* [Filevskiy sewage collector: problems of operation, the causes of destruction]. *Podzemnoe prostranstvo mira – Underground space of the world*, 1995, no. 3–4, p. 109.
5. Fomichev V. T., Churikova V. I. *Serovodorod kak faktor ehkologicheskoy opasnosti gorodskoy sredy* [Hydrogen sulfide as a factor of ecological danger to the urban environment]. *Vestnik Volgogradskogo gos. arkhitekt.-stroit. un-ta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil engineering. Construction and Architecture*, 2016, no. 44 (63), pt. 2, pp. 80–83.
6. Bulet-Vienney D., Chinniah Y., Bahloul A., Roberge B. Occupational safety during interventions in confined spaces. *Safety Science*, 2015, no. 79, pp. 19–28.
7. Bogomolov M. V., Karmazinov F. V., Kostyuchenko S. V. *Metody udaleniya zapakhov v sistemakh transportirovki i ochistki stochnykh vod* [Odor removal techniques in the systems of transportation and sewage treatment]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and the sanitary technique*, 2016, no. 7, pp. 33–43.
8. Teuber K., Broecker T., Barjenbruch M., Hinkelmann R. *High-Resolution Numerical Analysis of Flow Over a Ground Sill Using OpenFOAM*. Conference Paper. 12th International Conference on Hydro-science & Engineering, 2016. Tainan, Taiwan.
9. Mannina G., Viviani G. An urban drainage storm water quality model: model development and uncertainty quantification. *Journal of Hydrology*, 2010, no. 381, iss. 3, pp. 248–265.
10. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A. H. *Sewer processes. Microbial and chemical process engineering of sewer networks*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2013, 399 p.
11. Marleni N., Gray S., Sharma A., Burn S., Muttill 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.
12. Leybovich L. I., Patsurkovskiy P. A. *Modelirovanie dinamiki postupleniya serovodoroda v okruzhayushchuyu sredu pri rabote nasosov kanalizatsionnykh nasosnykh stantsiy* [Simulation of dynamics of hydrogen sulfide ingress in the environment at operation of pumps of sewer pumping stations]. *Vestnik KhNADU – Bulletin of HNAHU*, 2016, no. 72, pp. 176–181.
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 the corrosion of sewage pipes and facilities on the basis of improving the pressure blanking cameras' design. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2016, 171 p.
14. Vasil'ev V. M., et al. *Otchet o rezul'tatakh obsledovaniya dublera kanalizatsionnogo kollektora v rayone ploshchadi Muzhestva* [Report on the inspection results of the secondary tunnel sewer near Muzhestva Square]. St. Petersburg, Inzhenernye Ehkositemy Publ., 2010, 188 p.
15. Lebedeva E. S., Yurchenko V. A., Sverguzova S. V. *Kolichestvennaya otsenka vliyaniya temperaturnogo faktora na nakoplenie serovodoroda v podsvodovom prostranstve kanalizatsionnogo kollektora* [Quantitative impact assessment of the temperature factor on accumulation of hydrogen sulfide in the subsurface of the sewer collector]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo un-ta – Bulletin of the Kazan Technological University*, 2014, vol. 17, no. 24, pp. 141–143.
16. 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. România, Bacău, 2017, 30 p.