

Известия вузов. Строительство. 2022. № 1. С. 70–81.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (1): 70–81.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 628.237

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-70-81

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫДЕЛЕНИЯ СЕРОВОДОРОДА В КАМЕРАХ ГАШЕНИЯ НАПОРА

Анна Максимовна Телятникова

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

Аннотация. Целью данного исследования стала оценка объемов выделения сероводорода из сточных вод в камерах гашения напора для возможности обеспечения безопасности их функционирования. Для достижения поставленной задачи проведены натурные измерения на действующем объекте, а также разработана масштабная лабораторная модель, соответствующая натурному прототипу. Определены основные тенденции изменения объемов выделения сероводорода в зависимости от расхода сточной жидкости, высоты падения потока, pH и концентрации растворенного сероводорода в сточной воде. Разработан математический аппарат, позволяющий оценить величину массового выброса сероводорода в камерах гашения напора. Полученные результаты могут быть применены для оценки воздействия выбросов сероводорода на окружающую среду, интенсивности коррозионных процессов, а также принятия решений о необходимости установки газоочистного оборудования или мер по снижению газовыделения.

Ключевые слова: канализационная сеть, сероводород, камера гашения напора, канализационный газ, сточные воды, массообменные процессы

Для цитирования: Телятникова А.М. Исследование процесса выделения сероводорода в камерах гашения напора // Известия вузов. Строительство. 2022. № 1. С. 70–81. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-70-81.

Original article

STUDY OF THE PROCESS OF HYDROGEN SULFIDE RELEASE IN ENERGY DISSIPATION CHAMBER

Anna M. Telyatnikova

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia

Abstract. Energy dissipation chamber (EDC) are a source of release of a large amount of hydrogen sulfide. The release of hydrogen sulfide has a negative impact on human health, the environmental situation and the condition of sewer networks. The purpose of this study is to estimate the volume of hydrogen sulfide release from wastewater in the EDC. This will ensure the safety of the work of the EDC. Research objectives: full-scale measurements on a real EDC, creation of a large-scale laboratory model corresponding to a full-scale prototype. The study identifies the main trends in the volume of hydrogen sulfide release

depending on the flow rate of wastewater, the height of the flow drop, pH and concentration of dissolved hydrogen sulfide in wastewater. A mathematical apparatus has been developed to estimate the mass release of hydrogen sulfide in the EDC. The results of the study can be used to assess the impact of hydrogen sulfide emissions on the environment, assessment of the intensity of corrosion processes and determining the need to install gas cleaning equipment or measures to reduce gas emissions.

Keywords: sewer network, hydrogen sulfide, energy dissipation chamber, sewer gas, wastewater, mass transfer processes

For citation: Telyatnikova A.M. Study of the process of hydrogen sulfide release in energy dissipation chamber. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (1): 70–81. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-70-81.

Введение. В результате протекания химических и биохимических процессов в канализационных сетях образуется ряд газов, таких как сероводород (H_2S), метилмеркаптан (CH_3SH), аммиак (NH_3), метан (CH_4) и др. Отметим, что особое внимание в научной литературе [1] уделяется сероводороду, как наиболее опасному и имеющему негативные последствия. В нормативной документации Российской Федерации^{1, 2} сероводород выделяется как основное маркерное вещество в смеси канализационных газов, требующее учета и нормирования.

Выделение H_2S в подводящее пространство системы канализации влечет за собой газовую коррозию конструктивных элементов сетей и сооружений [2, 3], а также физический и материальный урон как следствие взрывов и обрушений [4]. Результатом выделения данного соединения в атмосферный воздух становятся ощущение специфического канализационного запаха [5, 6], санитарно-гигиеническая опасность для населения [7, 8] и общее ухудшение экологической обстановки [9] городских территорий.

Однако интенсивность образования и выделения канализационных газов принципиальным образом зависит от условий протекания сточных вод, а также вида сооружений, встречающихся на сети. Наиболее активно образование сероводорода идет в анаэробных условиях напорных коллекторов [1]. Одними из основных источников выделения газа на канализационных сетях стали сооружения камер гашения напора (КГН), в которых происходит смена режима движения сточных вод с напорного на безнапорный.

Таким образом, поступающие в КГН сточные воды несут в себе повышенное содержание растворенного сероводорода и сульфидов. При этом в момент выхода сточных вод из подводящих трубопроводов в открытое пространство колодца возникает контакт потока с воздушной средой и начинается перенос образованных газов через границу раздела фаз. Кроме того, конструкции КГН подразумевают снижение энергии поступающего напорного потока за счет падения жидкости, что приводит к увеличению степени его турбулизации [10, 11] и дополнительной реэрации [12, 13], что усиливает массообменные процессы.

¹ СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021. 469 с. (Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru)

² СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения (с изменениями от 27.12.2021). М., 2021. 126 с. (Минстрой России <https://minstroyrf.gov.ru>)

Данные натуральных измерений концентраций H_2S в подводящем пространстве КГН подтверждают их влияние на десорбцию сероводорода. Натурные измерения в Португалии [14] показали наличие H_2S в концентрациях до 300 ppm (424,16 мг/м³). В рамках измерений австралийских исследователей [15] в КГН, расположенной после напорного коллектора протяженностью 15 км, были установлены концентрации H_2S от 100 до 850 ppm (от 141,39 до 1201,78 мг/м³). Мониторинг концентраций H_2S в окружающем атмосферном воздухе у КГН показал наличие загрязнения.

В г. Бедфорд штата Массачусетс [16] у люка сооружения были зафиксированы концентрации H_2S до 81 ppm (114,52 мг/м³). Схожие результаты были получены в вентиляционном стояке из КГН в Португалии [17]. Максимальная величина выброса H_2S составляла 60 ppm (84,83 мг/м³), при среднем значении 20 ppm (28,28 мг/м³). Отметим, что согласно действующей в РФ природоохранной документации³ предельно допустимые концентрации (ПДК) сероводорода составляют для воздуха рабочей зоны (внутреннего пространства сооружений) ПДК_{р,з} = 10 мг/м³ и для атмосферного воздуха населенных мест ПДК_{м,п} = 0,008 мг/м³.

К настоящему моменту исследованию процессов массообмена внутри транспортирующей канализационной сети посвящен широкий ряд научных работ. Однако одним из наиболее изученных вопросов является процесс переноса сероводорода через границу раздела фаз в самотечных коллекторах. В связи с тем, что опытное определение коэффициента переноса для сероводорода K_{L,H_2S} (1/м² · с) крайне затруднительно, большинство подобных исследований сводятся к эмпирическому изучению величины коэффициента переноса кислорода K_{L,O_2} (1/м² · с) и разработке математического аппарата для его прогнозирования [13, 18, 19]. Взаимосвязь между K_{L,H_2S} и K_{L,O_2} может быть описана уравнением

$$\frac{K_{L,H_2S}}{K_{L,O_2}} = 0,87^n,$$

где n – безразмерный коэффициент, для коллекторов $n = 0,5–0,67$.

В работах [1, 20] встречается математическая модель, позволяющая оценить концентрации сероводорода в сточной воде до и после падения потока в сооружениях:

$$\ln r_o = K_H H,$$
$$\ln \left(f \frac{C_{L,H_2S_inlet}}{C_{L,H_2S_outlet}} \right) = K_H H \frac{K_{L,H_2S}}{K_{L,O_2}},$$

где r_o – коэффициент дефицита растворенного кислорода для reaэрации на канализационном перепаде;

C_{L,H_2S_inlet} и C_{L,H_2S_outlet} – концентрация сероводорода в жидкости до и после падения потока, г/м³;

K_H – коэффициент reaэрации в перепаде, 1/м;

³ СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021. 469 с. (Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru)

H – высота перепада, м;

f – параметр, учитывающий диссоциацию сульфидов.

Иные варианты эмпирических зависимостей между r_0 , K_H и H для перепадов встречаются в работах [21, 22].

В исследовании украинских ученых [23] предложено уравнение, позволяющее спрогнозировать концентрации H_2S в подсводном пространстве перепадного колодца с водобойным устройством

$$H_2S = 7T^{0,034} [H_2S]^{0,33} \cdot T^{0,357} + [H_2S] \cdot 5,8 \cdot 10^{-3} \cdot (Re \cdot 10^{-6})^{3,524},$$

где $[H_2S]$ – концентрация сероводорода в воде, мг/л;

H_2S – концентрация сероводорода в газовой фазе в месте изменения турбулентности потока, мг/м³;

T – температура воды, °С;

Re – число Рейнольдса.

Однако отметим, что все представленные исследования направлены на описание процессов дегазации в перепадных колодцах на самотечной сети и не учитывают в полной мере специфику работы КГН. В соответствии с анализом научной литературы был установлен следующий перечень основных факторов, влияющих на выделение H_2S в КГН: состав стока (концентрация сульфидов и растворенного сероводорода в сточной воде C_{L,H_2S} (мг/л) и ее рН) [1, 6]; степень турбулизации потока (расход поступающей жидкости Q (м³/с), высота падения потока H) [20]; физические свойства (температура T) [12, 24].

С практической точки зрения наибольший интерес представляет прогнозирование массовых выбросов сероводорода M_{H_2S} (мг/с) в КГН, а не определение концентраций в подсводном пространстве C_{G,H_2S} (мг/м³). Понимание массовых расходов газа позволит осуществлять деятельность по оценке воздействия выбросов сероводорода на окружающую среду, интенсивности коррозионных процессов, а также принимать решения о необходимости установки газоочистного оборудования или мер по снижению газовыделения.

В соответствии с представленным анализом целью данной работы стало определение объемов выделения сероводорода из сточных вод в КГН. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи: проведение натуральных измерений концентраций сероводорода на действующем объекте КГН; разработка масштабной лабораторной установки, соответствующей натурному прототипу КГН; проведение лабораторных измерений концентраций выделившегося сероводорода в зависимости от Q , H , рН и C_{L,H_2S} ; разработка математического аппарата, позволяющего оценить M_{H_2S} в КГН.

Результаты натуральных измерений. Проведение натуральных измерений в подсводном пространстве КГН было выполнено на сооружении с максимальной производительностью 3200 м³/ч. Фиксация концентраций H_2S осуществлялась при помощи газоанализаторов Микросенс 001.001.001.РЭ (диапазон показаний $C_{G,H_2S} = 0-200$ ppm, относительная погрешность ± 20 %). Для определения физических характеристик, таких как температура, давление и влажность, применялись термогигрометры ИВТМ-7м (влажность воздуха $\varphi = 0-99$ %, погрешность $\pm 2,0$ %; температура $T = 20-50$ °С, погрешность $\pm 0,2$ °С; давление $P = 84-106$ кПа, погрешность ± 3 гПа). Осуществлялся

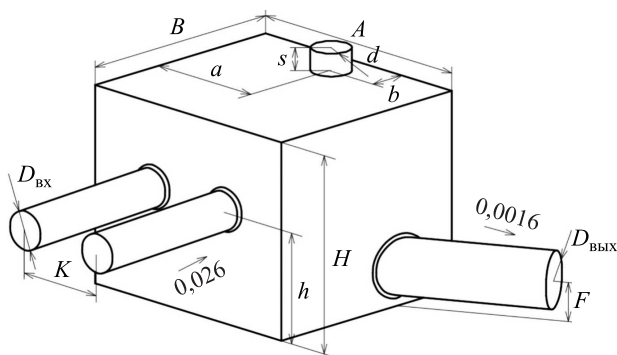


Рис. 1. Конструкция моделируемой КГН

Fig. 1. The design of the simulated KGN

отбор проб сточной воды из падающего потока для анализа на содержание растворенного сероводорода и сульфидов.

По результатам натурных измерений в подсводном пространстве КГН была зафиксирована максимальная $C_{G,H_2S} = 64 \text{ мг/м}^3$. При проведении опыта наблюдалось пульсационное изменение C_{G,H_2S} , что связано с аэродинамическими процессами в сооружении и его проветриванием за счет неполной герметичности. Периодические изменения концентраций газов отмечались и на поверхности земли у люка и сопровождалось усилением запаха, а также высвобождением тепловой энергии. Максимальное значение концентраций растворенного сероводорода в пробе сточной жидкости из падающего потока составляло $C_{L,H_2S} = 0,418 \pm 0,105 \text{ мг/л}$ [25].

В рамках исследования выполнялась разработка масштабной лабораторной модели, прототипом для которой стал действующий натуральный объект КГН. Масштабирование геометрических характеристик камеры выполнялось пропорционально размерам реального объекта. Для лабораторных исследований были определены три варианта моделей, общий вид и габаритные размеры которых представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Масштабирование протекающего в моделях Q выполнялось по критерию подобия Фруда

$$Fr = \frac{V^2}{gH},$$

где V – скорость движения жидкости, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Таблица 1. Габаритные размеры моделей КГН, мм

Table 1. Overall dimensions of KGN models, mm

| Модель | $D_{ВХ}$ | A | B | H | h | $D_{ВЫХ}$ | K | F | a | b | s | d |
|-----------------|----------|-------|-------|-------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|
| Реальный объект | 700 | 4400 | 4000 | 3500 | 2000 | 924 | 1700 | 700 | 2000 | 650 | 440 | 700 |
| 1 | 20 | 125,7 | 114,3 | 100,0 | 57,1 | 26,4 | 48,6 | 20,0 | 57,1 | 18,6 | 12,6 | 20,0 |
| 2 | 25 | 157,1 | 142,9 | 125,0 | 71,4 | 33,0 | 60,7 | 25,0 | 71,4 | 23,2 | 15,7 | 25,0 |
| 3 | 32 | 201,1 | 182,9 | 160,0 | 91,4 | 42,2 | 77,7 | 32,0 | 91,4 | 29,7 | 20,1 | 32,0 |

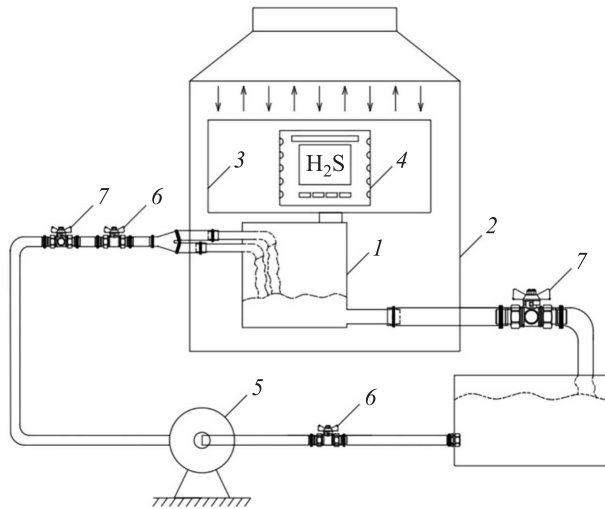


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки

Fig. 2. Schematic diagram of the laboratory installation

На рис. 2 представлена принципиальная схема разработанной лабораторной установки. В целях безопасности модель КГН (1) располагалась в вытяжном шкафу (2). Над люком модели КГН устанавливалась закрытая емкость (3), в которой находился измерительный прибор – газоанализатор Эколаб АР (4) с техническими характеристиками: $C_{G,H_2S} = 0,004\text{--}200$ мг/м³ и относительной погрешностью ± 20 %. Фиксация C_{G,H_2S} при проведении лабораторного опыта осуществлялась непрерывно, данные сохранялись в памяти газоанализатора. Подача модельного раствора к модели КГН выполнялась при помощи насосного оборудования (5), а отведение – в самотечных условиях. Лабораторная установка являлась замкнутой, с рециркуляцией модельного раствора. Кроме того, установка была оснащена регулирующей, запорной арматурой (6) и пробоотборниками (7).

Проведение лабораторных исследований осуществлялось при постоянной $T = 18$ °С, что соответствовало средней температуре, зафиксированной в реальном объекте при натурных измерениях. В рамках исследования проводились опыты со следующими характеристиками модельного раствора: рН = 5, 6 и 7, содержание растворенного сероводорода и сульфидов $C_L = 2, 6$ и 12 мг/л. Модельный раствор создавался на основе водопроводной воды с содержанием 70–80 мг/л за счет добавления 9-водного сернистого натрия $Na_2S \cdot 9H_2O$. Регулирование рН осуществлялось при помощи соляной кислоты HCl и гидроксида натрия NaOH. Количество серы, находящееся в сточной воде в форме H_2S и сульфидов, принципиальным образом определяется рН среды. При этом массоперенос серы между воздушной и водной средой может происходить лишь в форме H_2S . Таким образом, C_{G,H_2S} зависит от C_{L,H_2S} , а взаимосвязь между C_{L,H_2S} и C_L может быть определена в соответствии с рис. 3 и быть описана уравнением

$$C_{L,H_2S} = k_{pH} C_L,$$

где k_{pH} – безразмерный коэффициент, определяющий долевое соотношение сульфидов и H_2S в сточной воде.

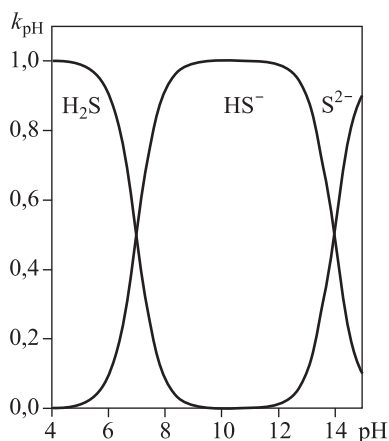


Рис. 3. Диаграмма для определения k_{pH} [1]

Fig. 3. Diagram for determining k_{pH} [1]

Кроме того, при лабораторном моделировании имитировались турбулентные условия, эквивалентные условиям в реальном сооружении $Q_{эКВ} = 3200, 2400$ и $1600 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $H_{эКВ} = 2, 3$ и 4 м. Время проведения одного опыта составляло $\tau = 1$ ч.

Результаты измерений C_{G,H_2S} , получаемые в одном лабораторном опыте, представлены на рис. 4, они являются результатом осреднения записанных газоанализатором значений с шагом по времени 5 мин. Как видно, в подводном пространстве лабораторной установки и закрытой емкости над ним наблюдается постепенное накопление H_2S . Основная тенденция изменения C_{G,H_2S} с высокой степенью точности может быть описана линейной функцией.

На рис. 5 представлены закономерности изменения C_{G,H_2S} в зависимости от основных исследуемых параметров: Q, H, pH и C_L .

В результате выполненных лабораторных исследований были установлены основные тенденции изменения объемов выделения сероводорода. Количество выделяемого в КГН сероводорода возрастало при повышении содержания растворенного сероводорода и сульфидов в сточной воде; снижении pH сточной жидкости; увеличении производительности сооружения и высоты падения потока.

Отметим, что все представленные закономерности соответствуют ожиданиям. Параметры C_L и pH напрямую определяют количество H_2S в сточной жидкости, которое потенциально может выделиться в воздушное пространство. Для группы параметров Q и H установленные зависимости связаны

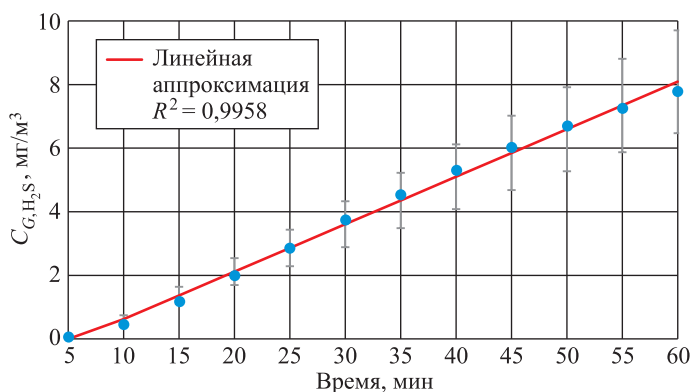


Рис. 4. Результаты измерений C_{G,H_2S} на примере модели 1 с характеристиками: $C_L = 6 \text{ мг/л}$, $pH = 5$, $Q_{эКВ} = 3200 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $H_{эКВ} = 2$

Fig. 4. Measurement results of C_{G,H_2S} on the example of model No. 1 with the characteristics: $C_L = 6 \text{ mg/l}$, $pH = 5$, $Q_{эКВ} = 3200 \text{ м}^3/\text{ч}$ and $N_{эКВ} = 2$

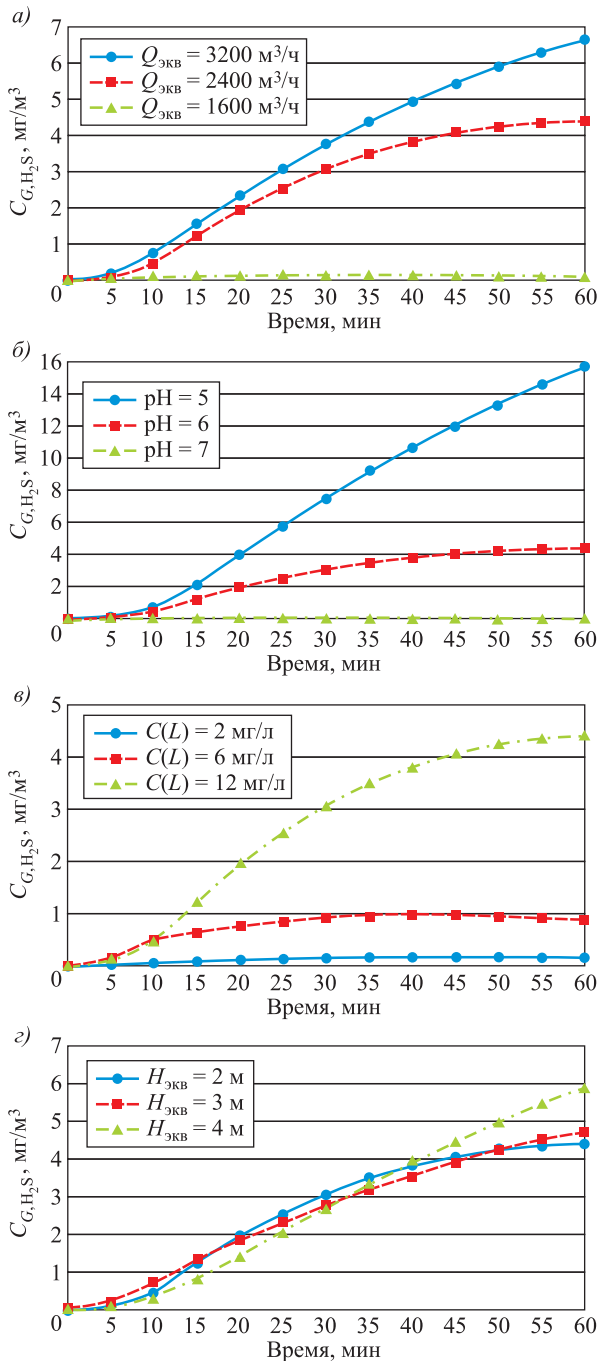


Рис. 5. Результаты изменения C_{G,H_2S} на примере модели 1 в зависимости:
 а – от расхода, поступающего в КГН модельного раствора (pH = 6, $C_L = 12$ мг/л, $H_{эКВ} = 2$ м);
 б – pH модельного раствора ($Q_{эКВ} = 2400$ м³/ч, $C_L = 12$ мг/л, $H_{эКВ} = 2$ м); в – содержания растворенного сероводорода и сульфидов в модельном растворе C_L ($Q_{эКВ} = 2400$ м³/ч, pH = 6, $H_{эКВ} = 2$ м);
 з – высоты падения потока H ($Q_{эКВ} = 2400$ м³/ч, pH = 6, $C_L = 12$ мг/л)

Fig. 5. The results of measurements of C_{G,H_2S} on the example of model 1 depending on:
 а – from the flow rate entering the KGN of the model solution (pH = 6, $C_L = 12$ mg/l, $H_{эКВ} = 2$ м);
 б – pH of the model solution ($Q_{эКВ} = 2400$ m³/h, $C_L = 12$ mg/l, $H_{эКВ} = 2$ м); в – the content of dissolved hydrogen sulfide and sulfides in the model solution C_L ($Q_{эКВ} = 2400$ m³/h, pH = 6, $H_{эКВ} = 2$ м);
 з – the height of the fall of the flow H ($Q_{эКВ} = 2400$ m³/h, pH = 6, $C_L = 12$ mg/l)

с ростом скорости движения жидкости в подводящих трубопроводах и падающем потоке, что влечет за собой усиление турбулентных процессов.

С целью определения величины массового выброса M_{H_2S} была выполнена обработка результатов лабораторных измерений в соответствии с уравнением

$$M_{H_2S} = V_G \Delta C_{G,H_2S},$$

где $\Delta C_{G,H_2S}$ – среднее изменение концентрации H_2S в газовой среде при проведении лабораторного опыта, $mg/m^3 \cdot c$;

V_G – суммарный объем заполняемой газовой среды (объем подводящего пространства модели КГН и закрытой емкости над ним), m^3 .

Полученные эмпирическим путем результаты величин массового выброса дали возможность разработать математический аппарат, позволяющий оценить M_{H_2S} (mg/c) в КГН в зависимости от основных параметров ее функционирования

$$M_{H_2S} = 1000ak_{pH}C_LQ,$$

где a – безразмерный коэффициент, полученный на основании эмпирических данных и определяемый в зависимости от H , Q и C_L .

Выводы. 1. Выполнены натурные измерения концентраций сероводорода на действующем объекте КГН.

2. Разработана масштабная лабораторная установка и проведены лабораторные исследования при различных параметрах Q , H , pH и C_{L,H_2S} .

3. Определены основные тенденции изменения объемов выделения сероводорода в зависимости от Q , H , pH и C_{L,H_2S} .

4. Создан математический аппарат, позволяющий оценить величину массового выброса сероводорода в камерах гашения напора в зависимости от Q , H , pH и C_{L,H_2S} .

Практическая значимость результатов исследования состоит в возможности их применения для выполнения работ по оценке воздействия на окружающую среду выбросов канализационного сероводорода в рамках природоохранных проектов и разделов в соответствии с требованиями законодательства. Результаты исследования могут быть использованы для оценки потенциальных величин накопления сероводорода внутри сетей и сооружений, что в свою очередь позволит обеспечить безопасность обслуживающего персонала, а также оценить интенсивность протекания коррозионных процессов. Кроме того, знание величины потенциально возможного массового выброса позволит принимать решения о необходимости установки газоочистного оборудования или мер по снижению газовыделения, в том числе и на стадии проектирования объектов.

Научная значимость результатов работы заключается в возможности адаптации предложенного подхода для определения величины массового выброса для других видов сооружений на сетях, а также других канализационных газов.

Список источников

1. *Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A. H. Sewer processes. Microbial and chemical process engineering of sewer networks.* Miami: LLC, 2013. 399 p.

2. Xuan L., O'Moore L., Yarong S., Bond P., Zhiguo Y., Simeon W., Hanzic L., Guangmin J. The rapid chemically induced corrosion of concrete sewers at high H₂S concentration // *Water Research*. 2019. No. 162. P. 95–104.
3. Kuliczowska E., Parka A. The structural integrity of corroded concrete sewers // *Engineering Failure Analysis*. 2019. No. 104. P. 409–421.
4. 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.
5. Sivret E., Stuetz R. Sewer odour abatement monitoring – An Australian survey // *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 2012. No. 66. P. 1716–1721.
6. Веремеев А.М., Томилов А.А., Чухланцев А.В., Ручкинова О.И. Направления решения проблемы с запахами в системе водоотведения в городе Перми // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2018. № 2. С. 366–373.
7. Ventura Matos R., Ferreira F., Gil C., Saldanha Matos J. Understanding the effect of ventilation, intermittent pumping and seasonality in hydrogen sulfide and methane concentrations in a coastal sewerage system // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. No. 26. P. 3404–3414.
8. Vollertsen J., Revilla N., Hvitved-Jacobsen T., Asbjorn H. Modeling odors and Hydrogen Sulfide in the Sewers of San Francisco // *Proceedings of the Water Environment Federation*. 2014. No. 2014. P. 1–11.
9. Ren Y.G., Wang J.H., Li H.F., Zhang J., Qi P.Y., Hu Z. Nitrous oxide and methane emissions from different treatment processes in fullscale municipal wastewater treatment plants // *Environmental Technology*. 2013. No. 34. P. 2917–2927.
10. Федоров С.В., Васильев В.М., Клементьев М.Н. Исследование газовыделения на участке канализационной сети // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2019. № 5. С. 54–59.
11. Mannina G., Calabrò P., Viviani G. Mathematical modelling of in-sewer processes as a tool for sewer system design // *New Trends in Urban Drainage Modelling*. UDM 2018, Palermo, 23–26 sep., 2018. Palermo, 2018. P. 814–819.
12. Yongsiri C., Vollertsen J., Hvitved-Jacobsen T. Effect of temperature on air–water transfer of hydrogen sulfide // *Journal of Environmental Engineering*. 2004. No. 130. P. 104–109.
13. Yongsiri C., Vollertsen J., Hvitved-Jacobsen T. Hydrogen sulfide emission in sewer networks: a two-phase modelling approach to the sulfur cycle // *Water Science and Technology*. 2004. No. 4. P. 161–168.
14. Matos J.S., Aires C.M. Mathematical modelling of sulphides and hydrogen sulphide gas build-up in the Costa do Estoril sewerage system // *Water Science Technology*. 1995. No. 31. P. 255–261.
15. Liu Y., Sharma K.R., Murthy S., Johnson Ia., Evans T., Yuan Zh. On-line monitoring of methane in sewer air // *Scientific Reports*. 2014. No. 4. P. 1–8.
16. Churchill P., Elmer D. Hydrogen sulfide odor control in wastewater collection systems // *Newea Journal*. 1999. No. 33. P. 57–63.
17. Ventura Matos R., Ferreira F., Saldanha Matos J. Influence of intermittence and pressure differentials in hydrogen sulfide concentration in a gravity sewer // *Water*. 2019. No. 11. P. 1–12.
18. Huisman J.L., Gienal C., Kühni M., Krebs P., Gujer W. Oxygen mass transfer and biofilm respiration rate measurement in a long sewer, evaluated with a redundant oxygen balance // *Proceedings of the 8th International Conference on Urban Storm Drainage*, Sydney, 30 aug. – 3 sep., 1999. Australia: Sydney, 1999. P. 306–314.
19. Jensen N.A. Empirical modeling of air-to-water oxygen transfer in gravity sewers // *Water Environment Research*. 1995. No. 67. P. 979–991.

20. Carrera L., Springer F., Lipeme Kouyi G., Buffière P. A review of sulfide emissions in sewer networks: overall approach and systemic modelling // *Water Science and Technology*. 2016. No. 73. P. 1231–1242.
21. Thistlethwayte D.K.B., Goleb E.E. The composition of sewer air // *Proceedings from the 6th International Conference on Water Pollution Research, Israel, 18–23 jun., 1972. Israel, 1972. P. 281–289.*
22. Matos J.S., Sousa E.R. The forecasting of hydrogen sulphide gas build-up in sewerage collection systems // *Water Science and Technology*. 1992. No. 26. P. 915–922.
23. Дрозд Г.Я., Хвортова М.Ю. Обеспечение эксплуатационной надежности канализационного коллектора на стадии проектирования // *Агротехника и энергообеспечение*. 2016. № 1. С. 72–82.
24. Бородина А.А., Ручкинова О.И. Влияние охлаждения сточных вод на образование сероводорода в канализационной сети // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2020. № 1. С. 158–161.
25. Телятников А.М., Федоров С.В., Кудрявцев А.В. Контроль состояния атмосферного воздуха и воздуха рабочей зоны камеры гашения напора // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2020. № 4. С. 58–66.

References

1. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A.H. Sewer processes. Microbial and chemical process engineering of sewer networks. Miami: LLC, 2013. 399 p.
2. Xuan L., O'Moore L., Yarong S., Bond P., Zhiguo Y., Simeon W., Hanzic L., Guangmin J. The rapid chemically induced corrosion of concrete sewers at high H₂S concentration. *Water Research*. 2019; (162): 95–104.
3. Kuliczowska E., Parka A. The structural integrity of corroded concrete sewers. *Engineering Failure Analysis*. 2019; (104): 409–421.
4. Stolbikhin Yu.V. Development of methods for preventing corrosion of sewer collectors and structures based on the improvement of pressure damping chambers: dis. ... PhD. Saint Petersburg, 2016. 227 p. (In Russ.).
5. Sivret E., Stuetz R. Sewer odour abatement monitoring – An Australian survey. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 2012; (66): 1716–1721.
6. Veremeyev A.M., Tomilov A.A., Chukhlantsev A.V., Ruchkinova O.I. Directions for solving the odor problem on the sewerage system in the city of Perm. *Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika = Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2018; (2): 366–373. (In Russ.).
7. Ventura Matos R., Ferreira F., Gil C., Saldanha Matos J. Understanding the effect of ventilation, intermittent pumping and seasonality in hydrogen sulfide and methane concentrations in a coastal sewerage system. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019; (26): 3404–3414.
8. Vollertsen J., Revilla N., Hvitved-Jacobsen T., Asbjorn H. Modeling odors and hydrogen sulfide in the sewers of San Francisco. *Proceedings of the Water Environment Federation*. 2014; (2014): 1–11.
9. Ren Y.G., Wang J.H., Li H.F., Zhang J., Qi P.Y., Hu Z. Nitrous oxide and methane emissions from different treatment processes in fullscale municipal wastewater treatment plants. *Environmental Technology*. 2013; (34): 2917–2927.
10. Fedorov S.V., Vasil'yev V.M., Klement'yev M.N. Study of gas evolution in a sewer section. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary equipment*. 2019; (5): 54–59. (In Russ.).
11. Mannina G., Calabrò P., Viviani G. Mathematical Modelling of In-Sewer Processes as a Tool for Sewer System Design. *New Trends in Urban Drainage Modelling. UDM 2018, Palermo, 23–26 sep., 2018. Palermo, 2018. P. 814–819.*

12. Yongsiri C., Vollertsen J., Hvitved-Jacobsen T. Effect of temperature on air–water transfer of hydrogen sulfide. *Journal of Environmental Engineering*. 2004; (130): 104–109.
13. Yongsiri C., Vollertsen J., Hvitved-Jacobsen T. Hydrogen sulfide emission in sewer networks: a two-phase modelling approach to the sulfur cycle. *Water Science and Technology*. 2004; (4): 161–168.
14. Matos J.S., Aires C.M. Mathematical modelling of sulphides and hydrogen sulphide gas build-up in the Costa do Estoril sewerage system. *Water Science Technology*. 1995; (31): 255–261.
15. Liu Y., Sharma K.R., Murthy S., Johnson Ia., Evans T., Yuan Zh. On-line monitoring of methane in sewer air. *Scientific Reports*. 2014; (4): 1–8.
16. Churchill P., Elmer D. Hydrogen sulfide odor control in wastewater collection systems. *Newea Journal*. 1999; (33): 57–63.
17. Ventura Matos R., Ferreira F., Saldanha Matos J. Influence of Intermittence and Pressure Differentials in Hydrogen Sulfide Concentration in a Gravity Sewer. *Water*. 2019; (11): 1–12.
18. Huisman J.L., Gienal C., Kühni M., Krebs P., Gujer W. Oxygen mass transfer and biofilm respiration rate measurement in a long sewer, evaluated with a redundant oxygen balance. Proceedings of the 8th International Conference on Urban Storm Drainage, Sydney, 30 aug. – 3 sep., 1999. Australia: Sydney, 1999. P. 306–314.
19. Jensen N.A. Empirical modeling of air-to-water oxygen transfer in gravity sewers. *Water Environment Research*. 1995; (67): 979–991.
20. Carrera L., Springer F., Lipeme Kouyi G., Buffière P. A review of sulfide emissions in sewer networks: overall approach and systemic modelling. *Water Science and Technology*. 2016; (73): 1231–1242.
21. Thistlethwayte D.K.B., Goleb E.E. The composition of sewer air. Proceedings from the 6th International Conference on Water Pollution Research, Israel, 18–23 jun., 1972. Israel, 1972. P. 281–289.
22. Matos J.S., Sousa E.R. The forecasting of hydrogen sulphide gas build-up in sewerage collection systems. *Water Science and Technology*. 1992; (26): 915–922.
23. Drozd G.Ya., Khvortova M.Yu. The reliability of the sewage collector at the design stage. *Agrotekhnika i energoobespecheniye = Agrotechnics and energy supply*. 2016; (1): 72–82. (In Russ.).
24. Borodina A.A., Ruchkinova O.I. Effect of wastewater cooling on hydrogen sulfide formation in the sewer network. *Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika = Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2020; (1): 158–161. (In Russ.).
25. Telyatnikova A.M., Fedorov S.V., Kudryavtsev A.V. State control of energy dissipation chamber working area air and ambient air. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya = Water and ecology: problems and solutions*. 2020; (4): 58–66. (In Russ.).

Информация об авторе

А.М. Телятникова – аспирант

Information about the authors

A.M. Telyatnikova – Post-graduate Student

Статья поступила в редакцию 19.11.2021
Одобрена после рецензирования 20.12.2021
Принята к публикации 27.12.2021

The article was submitted 19.11.2021
Approved after reviewing 20.12.2021
Accepted for publication 27.12.2021