

УДК 628.237

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-6-85-91

© А. М. Телятникова, ст. преподаватель

© С. В. Федоров, канд. техн. наук, доцент

© В. А. Сухова, студентка

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

E-mail: kononova.a.m@lan.spbgasu.ru,

svyatoslavfedorov@mail.ru,

sukhova.v_aqua@mail.ru

© А. М. Telyatnikova, senior lecturer

© S. V. Fedorov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© V. A. Suhova, student

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

E-mail: kononova.a.m@lan.spbgasu.ru,

svyatoslavfedorov@mail.ru,

sukhova.v_aqua@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСШТАБНОГО КРИТЕРИЯ МАССООТДАЧИ СЕРОВОДОРОДА В КАМЕРАХ ГАШЕНИЯ НАПОРА*

ESTIMATION OF THE SCALE CRITERION OF HYDROGEN SULFIDE MASS TRANSFER IN ENERGY DISSIPATION CHAMBERS

Выявлена проблема количественной оценки сероводорода, выделяющегося при транспортировке в камерах гашения напора. Для разработки математического аппарата, позволяющего выполнить данную оценку, необходимо выявление масштабного критерия массоотдачи сероводорода, что стало целью данной работы. В исследовании при помощи метода конечно-элементного анализа изучалось влияние изменения геометрических, гидродинамических характеристик системы и качественных характеристик потока на процесс массоотдачи. В результате исследования были определены закономерности изменения интенсивности массообмена, а также выявлен масштабный критерий массоотдачи сероводорода.

Ключевые слова: сероводород, массообмен, камера гашения напора, ANSYS CFX.

In this article, the problem of quantitative estimation of hydrogen sulfide emitting during transportation in energy dissipation chambers is considered. In order to develop a mathematical apparatus to perform this estimation, it is necessary to identify the scaling criterion of hydrogen sulfide mass transfer, which was the purpose of this work. In the study, the effect of changing the geometric, hydrodynamic characteristics of the system and the qualitative characteristics of the flow on the mass transfer process was investigated using finite element analysis. As a result of the study, there were revealed regularities of changes in the intensity of mass transfer, as well as a large-scale criterion for mass transfer of hydrogen sulfide.

Keywords: hydrogen sulfide, mass transfer, energy dissipation chamber, ANSYS CFX.

Введение

В научной среде и практической деятельности давно известна проблема образования и выделения сероводорода (H_2S) в канализационных сетях. Одними из наиболее подверженных процессам десорбции газов в подводное пространство

считаются камеры гашения напора (КГН) на канализационных сетях. Обзор основных причин образования сероводорода, последствий его выделения, а также факторов, способствующих газовой выделению в КГН, представлен в научных работах [1, 2]. Также в [2, 3] приводится обзор данных натурных измерений концентраций сероводорода, выполненных исследователями

* Работа выполнена в рамках темы НИР №57С23 при финансовой поддержке гранта СПбГАСУ.

из различных стран и самими авторами, подтверждающий актуальность данной проблемы.

Действующая сейчас в Российской Федерации нормативная документация¹ регламентирует производить учет выделения сероводорода в КГН. Однако в документах не представлено математических аппаратов для выполнения данной задачи. Проектировщикам рекомендуется осуществлять учет процесса газовой выделения на основании данных действующих объектов-аналогов.

Научная литература также не содержит математических аппаратов для учета десорбции сероводорода в КГН. Большая часть работ в данной области посвящена оценке концентраций сероводорода в перепадных колодцах [4, 5]. Полный обзор научных работ по данной тематике также был опубликован авторами ранее [1].

Отличительной особенностью изучения массообменных процессов является необходимость совокупного изучения всех факторов, оказывающих воздействие на работу рассматриваемой системы, за счет возможного наличия синергетических эффектов [6, 7]. На основании этого возможно сделать заключение о некорректности переноса методик для перепадных колодцев на конструкции КГН. Кроме того, согласно теории массообмена, данные процессы не поддаются масштабированию по классическим критериям подобия, и закономерность их изменения будет определяться видом и свойствами рассматриваемой системы [8]. В связи с этим становится возможным сделать вывод, что использование данных объектов-аналогов также не является корректным по причине возможного отличия некоторых из параметров работы, например, расхода транспортируемой сточной жидкости. К настоящему моменту в ряде научных работ уже представлен опыт масштабирования массообменных

процессов — как для элементов канализационной сети [9, 10], так и для иных систем [11, 12].

Проведенный анализ научной литературы и нормативной документации подтверждает актуальность темы исследования и ее практическую значимость для проектной деятельности. Для дальнейшей возможности подготовки математического аппарата, позволяющего оценить процесс десорбции сероводорода в КГН, необходимо определение критерия, характеризующего влияние на процесс массоотдачи сероводорода, масштабирования геометрических и гидравлических характеристик КГН, что и стало целью данной работы.

Для определения масштабного критерия были поставлены следующие задачи:

- 1) выявление основных параметров, влияющих на интенсивность процесса выделения сероводорода в сооружениях канализации;
- 2) определение геометрических и гидравлических характеристик для трех масштабных моделей, имитирующих внутреннее пространство камеры гашения напора;
- 3) разработка математических моделей камеры гашения напора в программе ANSYS CFX;
- 4) обработка вычислительных данных и получение масштабного критерия.

Методы

Для получения искомого критерия на первых этапах исследования проводились лабораторные опыты на масштабных моделях малых габаритов. Результаты данного этапа были опубликованы авторами ранее [1]. В рамках выполненной работы был сформирован основной перечень факторов, которые будут оказывать воздействие на интенсивность выделения H_2S в КГН. К данным факторам относятся: состав стока (концентрация сульфидов и растворенного сероводорода в сточной воде C_L и ее pH) [13]; степень турбулизации потока (расход поступающей жидкости Q и высота паде-

¹ СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. М.: Стандартинформ, 2019. 70 с.

ния потока H) [4]; физические свойства (температура T) [14].

Для дальнейшего изучения закономерностей изменения процесса массоотдачи сероводорода на моделях большего размера был выбран метод конечно-элементного анализа с использованием программного продукта *ANSYS CFX*. Данный подход позволяет снизить экономические затраты на проводимое исследование, оптимизировать процесс поиска искомых величин и получить данные высокой степени достоверности. Разработка компьютерной модели исходного сооружения КГН, принимаемого для дальнейшего масштабирования, и ее верификация на базе натурных измерений в реальном сооружении представлены в статьях [2, 15].

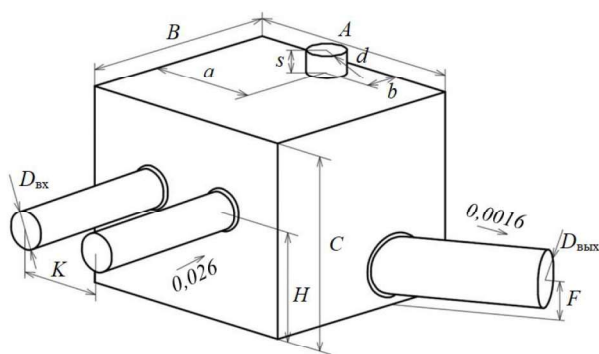


Рис. 1. Конструкция моделируемой КГН

Для конечно-элементного моделирования были определены 3 типоразмера камер (рис. 1, табл. 1).

Для масштабирования характеристики Q был использован критерий подобия Фруда (Fr). Полученные величины данного параметра представлены в табл. 2.

Показатели качества сточной жидкости, определяемые для моделирования, были установлены на основании статистических данных качества стока, пребывающего на юго-западные очистные сооружения Санкт-Петербурга, и были приняты равными: $pH = 5, 6$ и 7 ; $C_L = 2, 6$ и 12 мг/л. Определение концентрации H_2S , поступающего с водой (C_{L,H_2S}), выполнялось в соответствии с методикой, представленной в работах Т. Hvitved-Jacobsen [13].

При моделировании камер всех типоразмеров конструировалась твердотельная расчетная область, имитирующая внутреннее пространство КГН. Расчетная сетка генерировалась из тетраэдрических элементов с максимальным размером ячейки 0,175; 0,088 и 0,044 мм соответственно. Для пристеночных слоев предусматривалось дополнительное измельчение сеточного поля. Граничными условиями были определены условия поступления и отведения сточной жидкости

Таблица 1

Габаритные размеры моделей КГН

№ модели	$D_{вх}$, мм	A , мм	B , мм	C , мм	H^* , мм	$D_{вых}$, мм	K , мм	F , мм	a , мм	b , мм	s , мм	d , мм
Реальный объект	700	4400	4000	3500	2000 3000 4000	924	1700	700	2000	650	440	700
4	350	2200	2000	1750	1000 1500 2000	462	850	350	1000	325	220	350
5	175	1100	1000	875	500 750 1000	231	425	175	500	162	110	175
6	87,5	550	500	437,5	250 375 500	115,5	212,5	87,5	250	81,3	55,0	87,5

Примечание: для каждой модели имитировали три варианта высоты падения потока сточной жидкости, эквивалентные высотам в реальном объекте: $H = 2, 3$ и 4 м.

Таблица 2

Величина расхода для разрабатываемых моделей

Q реального объекта, м³/час	Q, л/с		
	Модель № 4	Модель № 5	Модель № 6
3200	157,13	27,778	4,910
2400	117,85	20,834	3,682
1600	78,57	13,888	2,456

из области моделирования, а также параметры стенок трубопроводов и колодца. Для граничного условия входа задавались следующие параметры: расход поступающей сточной жидкости в соответствии с табл. 2; долевое соотношение сероводорода и воды, установленное на основании C_{L,H_2S} , C_L и pH . Значения показателей долевого соотношения представлены в табл. 3.

Моделируемые задачи решались в условиях нестационарности на промежутки, эквивалентный 5 мин. реального времени. Для сконструированных моделей выполнялась качественная и количественная оценка параметров самой модели и ее результатов, уровень средних невязок составлял менее 10^{-4} .

Результаты

Гидродинамические характеристики, полученные при моделировании камер всех типов, в полной мере соответствовали прогнозируемым по классическим методикам².

На рис. 2 представлены закономерности, полученные при обработке результатов моделирования на примере данных модели № 4. Осреднение результатов моделирования производилось с шагом по времени равным 1 мин. Полученные закономерности описывают изменения концентраций сероводорода в газовой среде C_{G,H_2S} в зависимости от основных исследуемых параметров работы КГН: Q , H , pH и C_L .

Таблица 3

Долевое соотношение H_2S и H_2O , определяемое при моделировании

pH	Доля	C_L , мг/л		
		2	6	12
5	H_2S	0,00138504	0,00415512	0,00831025
	H_2O	0,99861496	0,99584488	0,99168975
6	H_2S	0,00124654	0,00373961	0,00747922
	H_2O	0,99875346	0,99626039	0,99252078
7	H_2S	0,00069252	0,00207756	0,00415512
	H_2O	0,99930748	0,99792244	0,99584488

Обсуждение

Результаты, полученные при конечно-элементном моделировании камер № 4–6, хорошо соотносились с данными, полученными ранее при лабораторном моделировании камер № 1–3 [1]. Авторами были подтверждены основные тенденции изменения объемов выделения сероводорода, установленные ранее, а именно, что количество выделяемого в КГН сероводорода возрастает при соблюдении следующих условий:

- увеличении содержания растворенного сероводорода и сульфидов в сточной воде;
- снижении pH сточной жидкости;
- увеличении производительности сооружения;
- увеличении высоты падения потока.

С целью выявления закономерностей изменения интенсивности массообменных процессов при масштабировании моделей была выполнена дальнейшая обработка результатов моделирования с выявлением безразмерного коэффициента k :

$$k = \frac{M_{G,H_2S}}{M_{G,H_2O}}, \quad (1)$$

где M_{G,H_2S} — массовый расход H_2S , выделяющегося в подводящее пространство КГН, г/с; M_{G,H_2O} — массовый расход воды, поступающий в КГН, г/с.

На рис. 3 представлена закономерность изменения коэффициента k в зависимости от поступающего расхода воды для моде-

² Курганов А. М., Федоров Н. Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Л.: Стройиздат, 1978. 424 с.

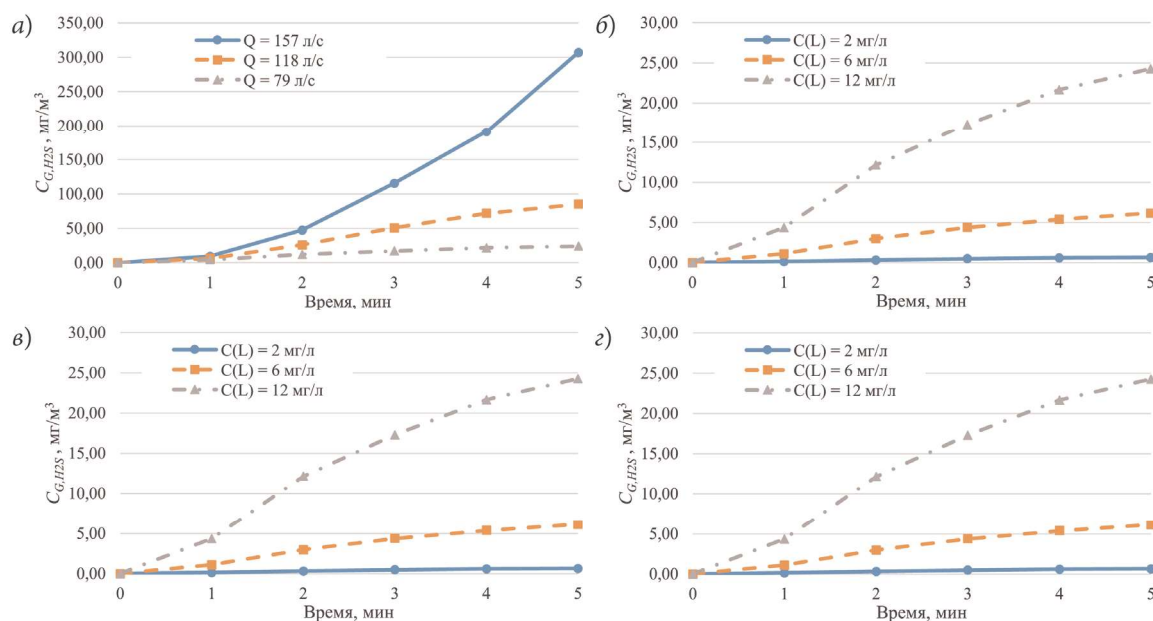


Рис. 2. Результаты изменения C_{G,H_2S} на примере модели № 4 в зависимости от: а — расхода, поступающего в КГН модельного раствора ($pH = 7$, $C_L = 12$ мг/л, $H = 2$ м); б — содержания растворенного сероводорода и сульфидов в модельном растворе C_L ($Q = 157$ л/с, $pH = 7$, $H = 2$ м); в — pH модельного раствора ($Q = 157$ л/с, $C_L = 12$ мг/л, $H = 2$ м); г — высоты падения потока H ($Q = 157$ л/с, $pH = 7$, $C_L = 12$ мг/л)

лей всех типоразмеров на примере потока с исходными характеристиками: $C_L = 2$ мг/л, высота падения потока эквивалентна высоте реального сооружения, $H_{экр} = 2$ м (модель № 4 — $H = 1$ м, модель № 5 — $H = 0,5$ м, модель № 6 — $H = 0,25$ м) и $pH = 5$.

Для возможности прогнозирования коэффициента k , а соответственно и M_{G,H_2S} , выделяющегося в подводящее пространство КГН, была выполнена аппроксимация результатов для различных по масштабу моделей в виде степенных зависимостей, функции которых представлены на рис. 3. Полученные степенные зависимости, описывающие закономерность изменения интенсивности массообменных процессов, имеют высокую статистическую значимость, что подтверждается коэффициентом детерминации, также приведенном на рис. 3.

Полученные закономерности позволяют сделать следующие выводы:

- при уменьшении габаритных размеров сооружений, а соответственно и их пропускной способности, происходит увеличение

интенсивности процесса массоотдачи (коэффициент k возрастает). Данное явление может быть обусловлено тем, что малые объемы жидкости обладают меньшей возможностью удерживать сероводород, что в свою очередь связано с увеличением площади контакта фаз воздух–сточная вода и, как следствие, усилением процесса реаэрации потока;

- изменение интенсивности процесса массоотдачи нелинейно и не пропорционально изменению геометрических и гидродинамических характеристик. При линейном изменении масштабов объектов процесс массоотдачи определяется степенным законом. Так, для задачи отраженной на рис. 3, увеличение коэффициента k происходит в 6–7,5 раз при пропорциональном уменьшении масштаба в 2 раза.

Выводы

Компьютерное моделирование масштабных моделей КГН в ANSYS CFX позволило установить основные тенденции влияния таких факторов, как расход, высота падения потока, концентрация растворенного серо-

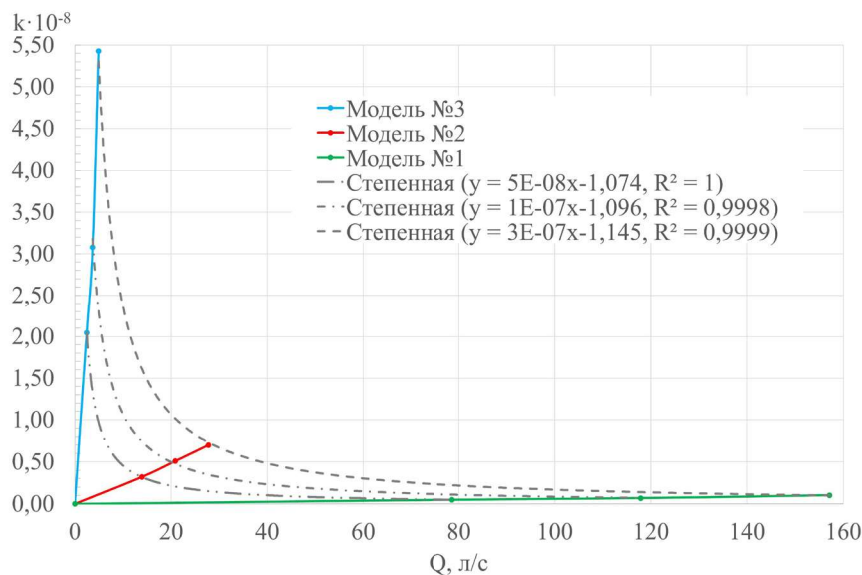


Рис. 3. Результаты изменения k в зависимости от Q при условиях: $C_L = 2$ мг/л, $H_{\text{эко}} = 2$ м и $pH = 5$

водорода и сульфидов в сточной воде и pH среды. Полученные при моделировании закономерности хорошо согласуются с результатами, полученными ранее в лабораторных условиях [1].

Обработка результатов расчета позволила получить масштабный критерий k и выявить закономерности его изменения: масштабирование массообменных процессов в КГН не линейно и не пропорционально изменению геометрических и гидродинамических характеристик системы.

В дальнейшем определение критерия массоотдачи позволит осуществить разработку математического аппарата, что даст возможность оценить процесс десорбции сероводорода в КГН.

Библиографический список

1. Телятникова А. М. Исследование процесса выделения сероводорода в камерах гашения напора // Известия вузов. Строительство. 2022. № 1. С. 70–81.
2. Телятникова 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 (84). С. 58–66.
3. Телятникова А. М., Федоров С. В., Шабалин В. В. Влияние сооружений на сетях канализации на каче-

ство атмосферного воздуха // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 66–71.

4. 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. Pp. 1231–1242.

5. Дрозд Г. Я., Хвортова М. Ю. Обеспечение эксплуатационной надежности канализационного коллектора на стадии проектирования // Агротехника и энергообеспечение. 2016. № 1. С. 72–82.

6. LiangBo Wu, Zhen Li, YaoZu Song. Field synergy principle of heat and mass transfer // Chinese Science Bulletin. 2009. № 54 (24). Pp. 4604–4609.

7. Min Q., Yongliang Zh., Xilong Zh., Yuyue J., Cuicui F., Qi Ya., Jianxia C. A review: Analysis and development of heat-mass synergy theory // Energy Reports. 2022. № 8. Pp. 14830–14851.

8. Кафаров В. В. Основы массопередачи. М.: Высшая школа, 1972. 496 с.

9. Carrera L., Springer F., Lipeme Kouyi G., Buffière P. Sulfide emissions in sewer networks: Empirical and numerical modelling // 8 th International Conference on Sewer Processes and Networks (SPN 8), Rotterdam, 31 aug.–2 sep., 2016. Netherlands: Rotterdam, 2016. Pp. 1–14.

10. Teuber K. A three-dimensional two-phase model for flow, transport and mass transfer processes in sewers: dissertation of the doctor of sciences / K. Teuber. Berlin: Technical University of Berlin, 2020. 174 p.

11. Ali H., Zhu S., Solsvik J. Effects of geometric parameters on volumetric mass transfer coefficient of non-Newtonian fluids in stirred tanks // International

Journal of Chemical Reactor Engineering. 2022. № 7. Pp. 697–711.

12. Ahmed S., Phan A., Harvey A. Scale-Up of Gas-Liquid Mass Transfer in Oscillatory Multiorifice Baffled Reactors (OMBRs) // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019. № 58. Pp. 5929–5935.

13. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A. H. *Sewer processes. Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks*. Miami: Taylor & Francis Group, LLC, 2013. 399 p.

14. Yongsiri C., Vollertsen J. and Hvitved-Jacobsen T. Effect of temperature on air–water transfer of hydrogen sulfide // *Journal of Environmental Engineering*. 2004. № 130. Pp. 104–109.

15. Телятникова А. М. Моделирование процесса выделения сероводорода в камере гашения напора // *Молодой ученый*. 2022. № 45 (440). С. 42–46.

References

1. Telyatnikova A. M. *Issledovanie protsessy vydeleniya serovodoroda v kamerakh gasheniya napora* [Investigation of the process of hydrogen sulfide transfer in the chambers of energy dissipation]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo – Bulletin of Higher Schools. Construction*, 2022, no. 1, pp. 70–81.

2. Telyatnikova A. M., Fedorov S. V., Kudryavtsev A. V. *Kontrol' sostoyaniya atmosfernogo vozdukha i vozdukha rabochey zony kamery gasheniya napora* [Control of the atmospheric air condition and air of the working zone of the energy dissipation chamber]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya – Water and Ecology: Problems and Solutions*, 2020, no. 4 (84), pp. 58–66.

3. Telyatnikova A. M., Fedorov S. V., Shabalin V. V. *Vliyanie sooruzheniy na setyakh kanalizatsii na kachestvo atmosfernogo vozdukha* [Impact of structures on sewerage networks on the quality of atmospheric air]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Construction*, 2022, no. 5, pp. 66–71.

4. Drozd G. Ya., Khvortova M. Yu. *Obespechenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti kanalizatsionnogo kollektora na stadii proektirovaniya* [Provision of operational reliability of sewer collector at the design stage]. *Agrotekhnika i energoobespechenie – Agro-engineering and energy supply*, 2016, no. 1, pp. 72–82.

5. Carrera L., Springer F., Lipeme Kouyi G., Buffière P. A review of sulfide emissions in sewer networks: overall approach and systemic modeling. *Water Science and Technology*, 2016, no. 73, pp. 1231–1242.

6. Liang Bo Wu, Zhen Li, Yao Zu Song. Field synergy principle of heat and mass transfer. *Chinese Science Bulletin*, 2009, no. 54 (24), pp. 4604–4609.

7. Min Q., Yongliang Zh., Xilong Zh., Yuyue J., Cuicui F., Qi Ya., Jianxia C. A review: Analysis and development of heat–mass synergy theory. *Energy Reports*, 2022, no. 8, pp. 14830–14851.

8. Kafarov V. V. *Osnovy massoperedachi* [Fundamentals of mass transfer]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1972, 496 p.

9. Carrera L., Springer F., Lipeme Kouyi G., Buffière P. Sulfide emissions in sewer networks. Empirical and numerical modeling. *Proceedings of the 8-th International Conference on Sewer Processes and Networks (SPN 8)*, Rotterdam, 31 aug.–2 sep., 2016. Netherlands, Rotterdam, 2016, pp. 1–14.

10. Teuber K. *A three-dimensional two-phase model for flow, transport and mass transfer processes in sewers: dissertation of the doctor of sciences*. Berlin, Technical University of Berlin Publ., 2020, 174 p.

11. Ali H., Zhu S., Solsvik J. Effects of geometric parameters on volumetric mass transfer coefficient of non-Newtonian fluids in stirred tanks. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2022, no. 7, pp. 697–711.

12. Ahmed S., Phan A., Harvey A. Scale-Up of Gas-Liquid Mass Transfer in Oscillatory Multiorifice Baffled Reactors (OMBRs). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, no. 58, pp. 5929–5935.

13. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A. H. *Sewer processes. Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks*. Miami, Taylor & Francis Group Publ., LLC, 2013, 399 p.

14. Yongsiri C., Vollertsen J. and Hvitved-Jacobsen T. Effect of temperature on air–water transfer of hydrogen sulfide. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, no. 130, pp. 104–109.

15. Telyatnikova A. M. *Modelirovanie protsessy vydeleniya serovodoroda v kamere gasheniya napora* [Modeling of the process of hydrogen sulfide emission in the chamber of energy dissipation]. *Molodoy ucheniy – Young Scientist*, 2022, no. 45 (440), pp. 42–46.