

УДК 628.2

DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-1-86-96

© Лю Хао, аспирант

© Liu Hao, post-graduate student

© А. В. Кудрявцев, канд. техн. наук, доцент

© A. V. Kudryavtsev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© В. В. Шабалин, д-р биол. наук, доцент

© V. V. Shabalin, Dr. Sci. Bio., Associate Professor

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

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

E-mail: a304329703@gmail.com, water@spbgasu.ru, vvshabalin@mail.ru

E-mail: a304329703@gmail.com, water@spbgasu.ru, vvshabalin@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ СЕРОВОДОРОДА В ПЕРЕПАДНОЙ ШАХТЕ СО СТУПЕНЧАТЫМ ПАДЕНИЕМ ПОТОКА СТОЧНЫХ ВОД

### STUDY OF HYDROGEN SULFIDE EMISSION IN A BAFFLE VERTICAL SHAFT WITH A STEPWISE WASTEWATER FLOW DROP

Исследован и проанализирован процесс дегазации потока сточных вод в вертикальных шахтах с поперечными перекрытиями, по которым происходит ступенчатое падение потока. Для этого выполнено моделирование в программном обеспечении ANSYS с применением стандартной модели турбулентности  $k-\epsilon$  и метода Эйлера для многофазных потоков, что позволило смоделировать работу шахты и определить параметры высвобождения сероводорода из результатов численного эксперимента. Кроме этого, выполнен лабораторный эксперимент, который позволил оценить влияние конструкции шахты на процесс выделения сероводорода, с использованием физической модели в масштабе 1:60. Результаты экспериментов показали, что коэффициент массопередачи сероводорода в вертикальной шахте со ступенчатым падением потока составляет от  $0,06 \times 10^{-7}$  до  $25,31 \times 10^{-7}$  мг/с. Полученные данные могут иметь практическое применение при разработке методов предотвращения выбросов вредных газов в системах водоотведения.

*Ключевые слова:* канализационные газы, сероводород, перепадная шахта, коэффициент массопередачи, численное моделирование.

This paper examines and analyzes the process of waste water flow degassing in vertical shafts with transverse overlaps, through which a stepwise flow drop occurs. For this purpose, modeling was performed in the ANSYS software using the standard  $k-\epsilon$  turbulence model and the Euler method for multiphase flows, which made it possible to simulate the operation of the shaft and determine the parameters of hydrogen sulfide emission basing on the results of the numerical experiment. In addition, a laboratory experiment was performed to evaluate the effect of the shaft design on the hydrogen sulfide emission process using a 1:60 scale physical model. According to the experimental results, the mass transfer coefficient of hydrogen sulfide in a vertical shaft with a stepwise flow drop ranges from  $0,06 \times 10^{-7}$  to  $25,31 \times 10^{-7}$  mg/s. The data obtained can have practical application in the development of methods for preventing emissions of harmful gases in wastewater disposal systems.

*Keywords:* harmful gases, hydrogen sulfide, baffle vertical shaft, mass transfer coefficient, numerical simulation.

#### Введение

Системы водоотведения являются важной частью городской инфраструктуры и играют

ключевую роль в поддержании нормального функционирования города и охране окружающей среды. В условиях ускоренной урба-

низации строительство и управление этими системами становятся особенно актуальными [1]. Эффективная работа водоотведения напрямую влияет на качество жизни, экологию, безопасность и устойчивое развитие города. Технология работы этих систем включает сбор, транспортировку, очистку, повторное использование или сброс сточных вод. Основной целью является предотвращение загрязнения окружающей среды и защита экосистемы, обеспечение здоровья граждан [2, 3].

Рост численности населения и ускорение темпов индустриализации значительно увеличивают объем сточных вод, что усложняет их обработку [4]. Водоотведение требует не только сбора и очистки сточных вод, но и обеспечения энергоэффективности, надежности и безопасности. Современные системы водоотведения становятся более интеллектуальными и эффективными, способными обрабатывать различные типы сточных вод [5, 6].

Основной вызов для этих систем — проектирование и обслуживание канализационных трубопроводов [7], так как с повышением объемов сточных вод увеличиваются масштабы и сложность сетей. В условиях увеличения времени задержки сточных вод в трубах условия становятся анаэробными, что способствует росту вредных микроорганизмов, выделяющих метан и сероводород [8]. Эти газы угрожают здоровью человека, вызывая коррозию труб и повышая риск взрывов. Метан при концентрации выше предела воспламеняемости может привести к взрыву, а сероводород — к отравлению [9].

Вертикальные перепадные шахты системы водоотведения играют важную роль в транспортировке сточных вод [10]. Однако их проектирование требует не только учета возможности соединения коллекторов разных уровней, но и эффективного контроля энергии потока воды [11]. Падение сточных вод характеризуется увеличением скорости

и возникновением сильной турбулизации потока. В условиях высокой турбулентности и дробления потока растворенные в воде канализационные газы легче высвобождаются в газоздушное пространство сооружения и могут в дальнейшем попадать на улицы города через вентиляционные отверстия системы, создавая неприятный запах и оказывая токсическое действие на жителей города.

Для обеспечения стабильной работы системы необходимо контролировать концентрацию вредных газов в трубопроводах и применять методы их удаления [12], такие как промывка труб или использование дезодораторов [13]. Современные технологии мониторинга позволяют отслеживать газовые концентрации в реальном времени и принимать меры для предотвращения угроз безопасности. В данном исследовании, используя экспериментальные методы и моделирование с помощью ANSYS FLUENT, анализируется высвобождение сероводорода в вертикальных шахтах с различными режимами потока и концентрациями сульфидов.

## **1. Математическая модель**

### **1.1. Моделирование расчетной области и построение расчетной сетки**

В масштабе 1:60 была создана геометрия расчетной области модели шахты с использованием программного обеспечения SpaceClaim. Характеристики модели представлены в табл. 1. Геометрия расчетной области показана на рис. 1.

Программа GAMBIT позволяет использовать структурированные, неструктурированные и гибридные расчетные сетки, автоматически уточняя или упрощая их в зависимости от требований. Для структурированных сеток часто используется гексагональная ячейка, что улучшает качество и снижает количество ячеек в объеме расчетной области. Неструктурированные сетки включают смешанные элементы, такие



Рис. 1. Геометрия расчетной области модели вертикальной перепадной шахты

как тетраэдры, призмы и пирамиды. Для сложных объектов, например перепадных шахт, применяют гибридные сетки, обеспечивая точность и качество. Также на данном этапе определялись грани геометрии для последующей настройки граничных условий [14, 15]. На рис. 2 показаны результаты генерирования расчетной сетки для разработанной геометрии перепадной шахты. Для представленной расчетной области принимался размер ячейки 4 мм. В местах контакта потока с твердыми стенками перекрытий и шахты осуществлялось

дополнительное изменение масштаба сетки — уменьшение ячеек до 2 мм для моделирования пограничного слоя. В местах входа и выхода потока в расчетную область, в местах ожидаемого поворота и резкого ускорения за счет падения также выполнялось дополнительное уменьшение ячеек сетки до размера 0,4 мм.

## 1.2. Граничные условия

Для входа потока в сооружение используется граничное условие скорости, аналогичное экспериментальным данным. Давление на верхней границе шахты принимается равным атмосферному (101,325 кПа). Для выхода из системы используется условие свободного выхода. Для стенок шахты и поверхности поперечных перекрытий применялось условие прилипания потока. Численное решение уравнений энергии и импульса проводится методом конечных объемов с использованием алгоритма Coupled для сжимаемых потоков [16, 17].

## 2. Лабораторная модель

### 2.1. Материалы и параметры узла перепадной шахты

Эта экспериментальная модель была изготовлена в масштабе 1 : 60 на основе реального проекта перепадной шахты в Санкт-Петербурге (рис. 3).

Корпус перепадной шахты изготовлен из оргстекла, которое проявляет стойкость к механическому и химическому воздействию, а также позволяет наглядно наблюдать процесс движения потока [18]. Внутреннее оснащение перепадной шахты выполнено из пластика с помощью технологии 3D-печати [19]. Геометрические размеры лабораторной установки соответствовали

Таблица 1

Параметры расчетной области модели вертикальной перепадной шахты

Общие размеры модели		Размер поперечного перекрытия		
Высота	Диаметр	Расстояние между перекрытиями	Количество перекрытий	Угол между поперечным перекрытием и стеной шахты
1000 мм	170 мм	100 мм	9 шт.	90°

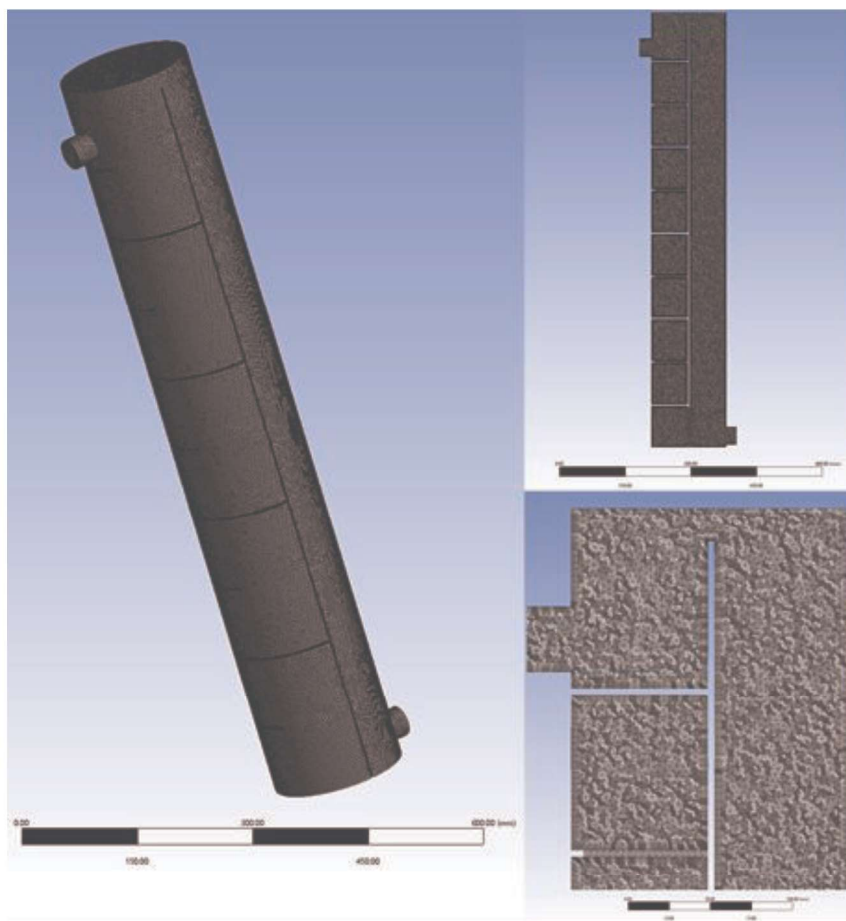
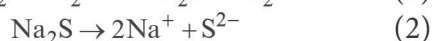
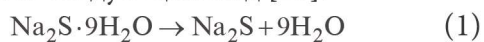


Рис. 2. Расчетная сетка в геометрии перепадной шахты

размерам расчетной области, представленным в табл. 1.

## 2.2. Параметры модельного раствора

Руководствуясь существующим опытом лабораторного моделирования, а также объективными сложностями использования реальных сточных вод в лабораторном эксперименте, для моделирования потока воды была использована вода, приготовленная с добавлением девятиводного сульфида натрия. Химическое уравнение его растворения в воде имеет следующий вид [20]:



Эксперимент проведен при концентрациях ионов серы 10, 20 и 40 мг/л. Концентрация ионов серы для эксперимента рассчитана на основе формулы молекулярной массы



Рис. 3. Узел перепадной шахты

$$M_a = \frac{M_b}{m_b} m_a, \quad (3)$$

где  $M_a$  — требуемая масса девятиводного сульфида натрия;  $M_b$  — необходимая масса сульфид-ионов;  $m_a$  — молярная масса девятиводного сульфида натрия,  $m_a = 240,18$  г/моль;  $m_b$  — молярная масса серы,  $m_b = 32,07$  г/моль.

Таким образом, для приготовления растворов с соответствующей концентрацией ионов серы необходимое количество девятиводного сульфида натрия указано в табл. 2.

Поскольку возникновение сероводорода в потоке воды зависит от рН среды (рис. 4), то для того, чтобы растворенный в воде сероводород наиболее точно соответствовал условиям работы реальной шахты, в эксперименте использовалась вода с рН = 5.

Для расчета массового расхода выделяющегося газа может быть использовано следующее уравнение [21]:

$$M = \frac{(C_2 - C_1)}{t} V_{\text{gas}}, \quad (4)$$

где  $M$  — массовый расход газа;  $C_1$  — концентрация сероводорода в воздухе до падения потока воды;  $C_2$  — концентрация сероводорода в воздухе во время падения потока в шахте;  $t$  — время работы шахты;  $V_{\text{gas}}$  — сумма объемов шахты и пространства, занимаемого газоанализатором.

Коэффициент массопередачи может быть вычислен по следующей зависимости:

$$K_{\Delta} = \frac{M}{S} / (C_3 - C_4), \quad (5)$$

где  $C_3$  — концентрация сероводорода в воде;  $C_4$  — концентрация сероводорода в воздухе;  $S$  — площадь свободной поверхности потока.

### 2.3. Схема лабораторной установки

Таблица 2

Параметры модельного раствора

Концентрация ионов серы в растворе, мг/л	Количество $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , г
10	0,374
20	0,749
40	1,498

Для того чтобы лабораторная установка могла адаптироваться к различным экспериментальным условиям и обеспечивать удобство проведения эксперимента, в лаборатории была создана система циркуляции воды, как показано на рис. 5. Для измерения скорости и расхода потока на подводящей трубе был установлен ультразвуковой расходомер, который показан на рис. 6. Перед расходомером был предусмотрен вентиль для регулировки потока. В верхней части шахты размещен газоанализатор (показан на рис. 7), предназначенный для регистрации концентрации сероводорода, выделяющегося в шахте. Фотография лабораторной установки приведена на рис. 8.

### 3. Анализ результатов эксперимента

#### 3.1. Анализ многофазного потока внутри перепадной шахты

На рис. 9 показано распределение объемной доли сероводорода в шахте во время эксплуатации. Шкала слева соответствует объемной доле в процентах. Когда поток воды в начальный момент времени попадает в расчетную область шахты, большая часть сероводорода все еще растворена в воде. В ходе дальнейшей работы перепадной шахты поток воды перетекает с одного перекрытия на другое, постепенно достигая нижнего бьефа, в результате чего газообразный сероводород выделяется из воды и заполняет воздушное пространство между соседними перекрытиями. Наибольшее скопление выделившегося сероводорода зафиксировано в средней и нижней части сооружения. Увлекающая способность потока в данной шахте ниже, чем у сооружений со спиральным лотком [22].

#### 3.2. Концентрация сероводорода в подсводном пространстве перепадной шахты

Для фиксации объемной доли сероводорода в подсводном пространстве шахты использовалась точка мониторинга. Местоположение этой точки обозначено желтым крестом на рис. 10. Точка расположена в месте положе-

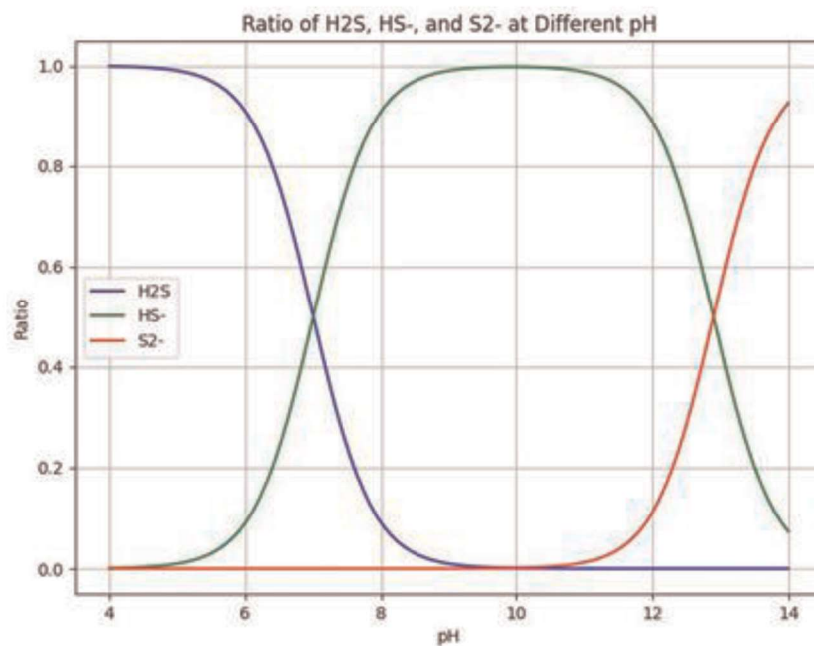


Рис. 4. Соотношение H<sub>2</sub>S, HS<sup>-</sup>, S<sub>2</sub><sup>-</sup> в зависимости от pH среды

ния монтажного проема, через неплотность которого скопившийся газ может выделяться в окружающую среду. Эта точка мониторинга также соответствует положению газоанализатора в лабораторной установке.

По результатам моделирования в ANSYS FLUENT были получены графики, отражающие процесс дегазации сероводорода из потока воды (рис. 11). На графике рис. 11, а при скорости входного потока 0,05 м/с и концен-



Рис. 5. Схема лабораторной установки



Рис. 6. Ультразвуковой расходомер



Рис. 7. Газоанализатор

трации сульфид-ионов в воде 10 мг/л объемная доля сульфид-ионов, выделяющихся в воздух и достигающих точки мониторинга, составила  $0,30 \times 10^{-3} \%$ . При концентрации сульфид-ионов в воде 20 мг/л эта величина

на возросла до  $0,64 \times 10^{-3} \%$ , а при 40 мг/л — до  $1,24 \times 10^{-3} \%$ . На рис. 11, б при скорости входного потока 0,075 м/с и концентрации 10 мг/л объемная доля сульфид-ионов, выделяющихся в воздух, составляла  $0,44 \times 10^{-3} \%$ , при концентрации 20 мг/л —  $0,96 \times 10^{-3} \%$ , а при 40 мг/л —  $1,86 \times 10^{-3} \%$ . На рис. 11, в при скорости потока 0,1 м/с объемная доля сульфид-

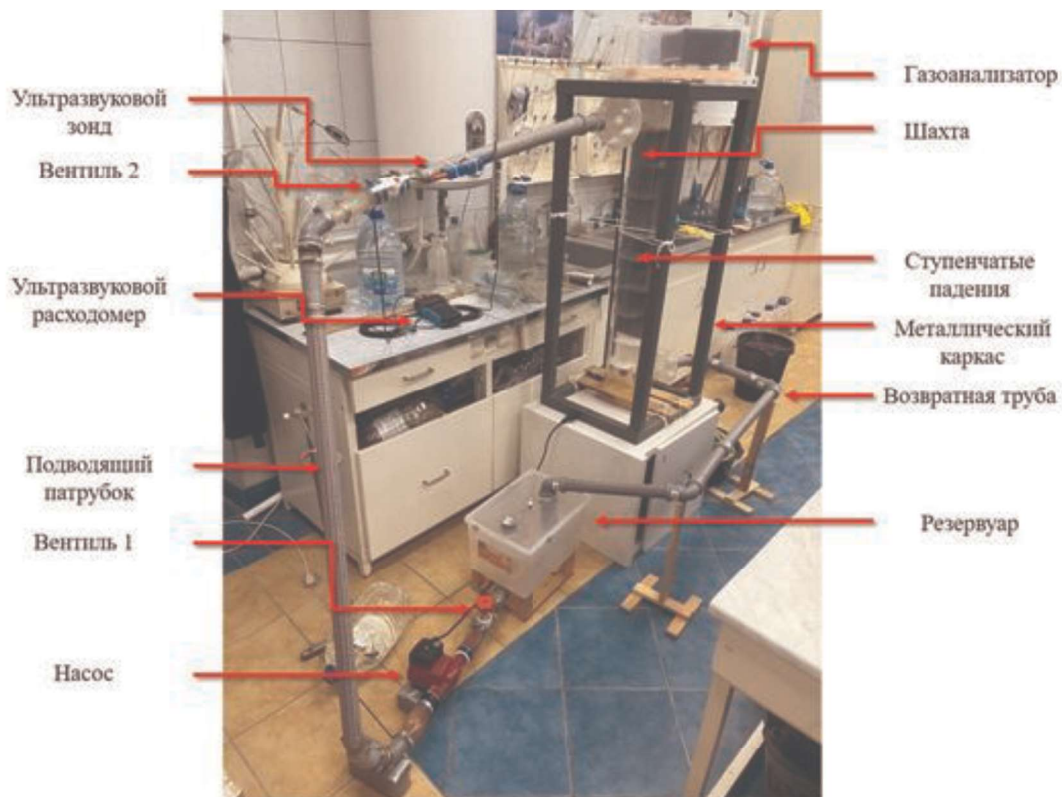


Рис. 8. Вид лабораторной установки

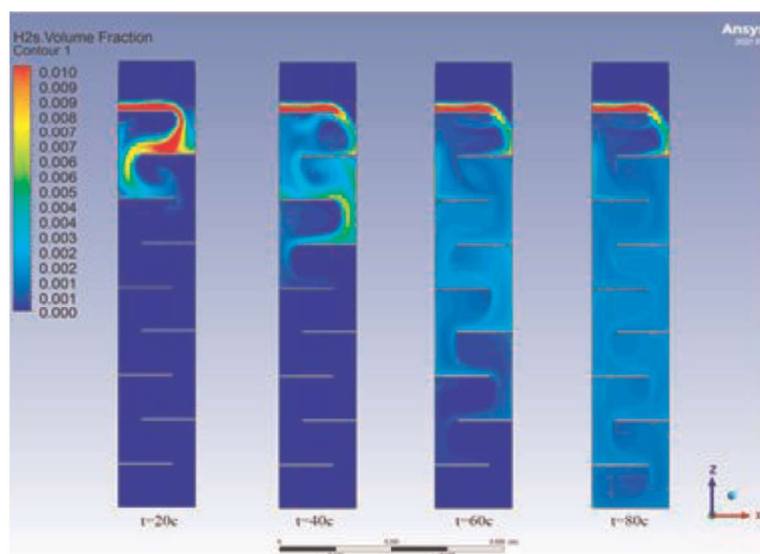


Рис. 9. Поле объемной доли сероводорода в перепадной шахте в различные периоды времени



Рис. 10. Положение точки мониторинга

фид-ионов составила: для концентрации 10 мг/л —  $0,59 \times 10^{-3} \%$ , 20 мг/л —  $1,27 \times 10^{-3} \%$ , 40 мг/л —  $2,45 \times 10^{-3} \%$ .

Анализ результатов показывает, что увеличение скорости потока и исходной концентрации сульфидов вызывает рост объемной

доли сероводорода в воздушном пространстве шахты в области точки мониторинга. Увеличение турбулизации потока способствует росту интенсивности дегазации сероводорода, что соответствует ожиданиям. Вычисленный по модельным данным коэффициент массопередачи находится в пределах от  $7,67 \times 10^{-7}$  до  $25,31 \times 10^{-7}$  м/с.

### 3.3. Анализ результатов лабораторного эксперимента

На рис. 12 представлены графики, отражающие зависимость концентрации сероводорода в воздухе, мг/м<sup>3</sup>, от исходной концентрации сульфидов в воде, мг/л, при разной скорости входного потока. На рис. 12, а при скорости входного потока 0,05 м/с и концентрации сульфид-ионов в воде 10 мг/л концентрация сероводорода, зафиксированная прибором в равновесном состоянии, составляла  $0,75 \text{ мг/м}^3$ . При концентрации 20 мг/л концентрация сероводорода увеличивалась до  $2,67 \text{ мг/м}^3$ , а при 40 мг/л — до  $15,40 \text{ мг/м}^3$ . На рис. 12, б при большей скорости потока, 0,075 м/с, концентрация сероводорода при 10 мг/л составляла  $0,85 \text{ мг/м}^3$ , при 20 мг/л —  $5,23 \text{ мг/м}^3$ , при 40 мг/л —  $11,63 \text{ мг/м}^3$ . На рис. 12, в при скорости потока 0,1 м/с и концентрации

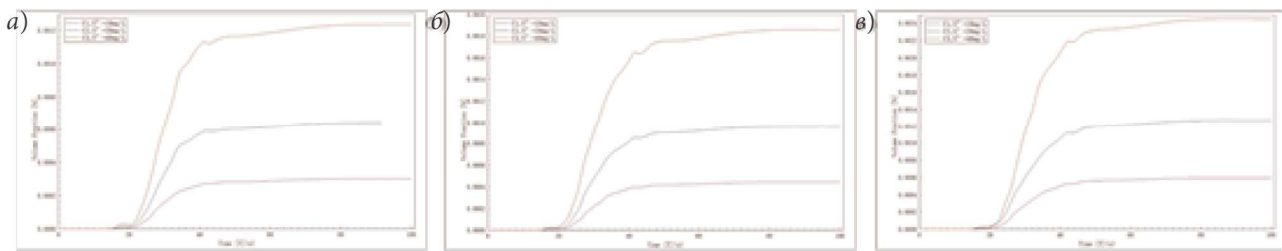


Рис. 11. Графики зависимости объемной доли сероводорода от времени при скорости входного потока воды  $V$ : а — 0,05 м/с; б — 0,075 м/с; в — 0,1 м/с

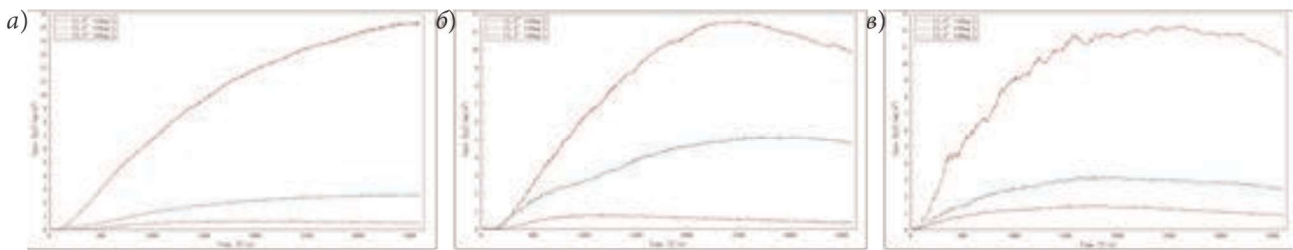


Рис. 12. Графики записи концентрации сероводорода газоанализатором при скорости входного потока  $V$ : а — 0,05 м/с; б — 0,075 м/с; в — 0,1 м/с

10 мг/л сероводород достигал концентрации 1,50 мг/м<sup>3</sup>, при 20 мг/л — 3,21 мг/м<sup>3</sup>, при 40 мг/л — 12,29 мг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, при постоянной скорости входного потока концентрация сероводорода в воздухе увеличивалась с повышением концентрации сульфид-ионов в воде, а увеличение скорости потока также способствовало интенсификации газовой выделению.

На основе расчетов было установлено, что коэффициент массопередачи сероводорода в процессе работы перепадной шахты в лабораторных условиях попадает в диапазон от  $0,06 \times 10^{-7}$  до  $0,43 \times 10^{-7}$  мг/с.

### Заключение

Данное исследование посвящено газовой выделению в перепадной шахте, в которой для гашения энергии потока используются поперечные перекрытия, обеспечивающие ступенчатое падение потока. С помощью использования метода конечных элементов (ANSYS) проведено моделирование работы шахты, учитывающее движение двухфазного турбулентного потока и массоперенос сероводорода из жидкой фазы в газовую. Для обеспечения

надежности результатов моделирования авторы создали масштабную модель в лаборатории и провели соответствующие эксперименты. По данным комплексного анализа имитационных и лабораторных экспериментов получено, что коэффициент массопередачи сероводорода изменяется в большом диапазоне значений: от  $0,06 \times 10^{-7}$  до  $25,31 \times 10^{-7}$  мг/с. Результаты моделирования дают завышенные значения коэффициента массопередачи по сравнению с экспериментом.

Результаты модельного расчета и лабораторного эксперимента показали, что увеличение концентрации сульфид-ионов в исходной воде приводит к возрастанию скорости выделения сероводорода в шахте. Кроме этого, увеличение расхода воды приводило к повышению скорости и турбулизации падающего потока, что, в свою очередь, ожидаемо интенсифицировало процесс дегазации. Поэтому в процессе эксплуатации системы канализации необходимо минимизировать концентрацию растворенного сероводорода и применять сооружения, обеспечивающие снижение турбулентности сточных вод.

Полученные данные имеют практическую значимость для применения в проектировании перепадных шахт на коллекторах канализации. Учитывая конструктивные особенности шахт и параметры потока, можно прогнозировать возможные объемы выделяемого газа и осуществлять подбор оборудования для очистки газовой смеси, поступающей из сети.

Оптимизация конструкции шахты и очистка воздуха позволят обеспечить санитарную безопасность системы канализации и повысить качество городской среды.

### Библиографический список

1. Li X. Research on Vertical Planning of Urban Large-Scale Water Disposal Systems. Dissertation. Beijing University of Architecture, 2020.
2. Xing Y., Cao X., Liu T., et al. Current Status, Problems, and Suggestions for the Development of China's Urban Water Disposal Systems // *China Water & Wastewater*. 2020. Vol. 36 (10). Pp. 19–23.
3. Wang P. Application and Development of Sustainable Urban Water Disposal Systems // *Zhushe*. 2017. Vol. 28. P. 10.
4. Qing X. Problems and Solutions of Industrial Wastewater Treatment in Environmental Engineering // *Leather Technology and Environmental Protection*. 2024. Vol. 5 (19). Pp. 8–12.
5. Hu H. Research on Resource Utilization and Environmental Protection of Urban Wastewater // *New Farmer*. 2024. Vol. 22. Pp. 78–80.
6. Fan B. Thinking and Misunderstanding Analysis of Rural Domestic Sewage Resource Treatment and Utilization // *China Water & Wastewater*. 2024. Vol. 40 (16). Pp. 1–7.
7. Zhang Y. Application of intelligent technology in urban sewerage network management // *Green Building and Smart Buildings*. 2024. Vol. 10. Pp. 169–171.
8. Shao X., Wang C., Yang C. Case study on digital and intelligent maintenance system of urban sewerage network // *Theoretical Research on Urban Construction*. 2024. Vol. 21. Pp. 22–24.
9. Lu J., Zhou Y., Ding Y., et al. Harmful Gas Release from Wastewater Pipeline System and Its Solutions // *Journal of Environmental Engineering*. 2019. Vol. 13 (4). Pp. 757–764.
10. Ma Y. Research on Gas Vortex and Energy Loss in Water Drainage System Structures. Dissertation. Zhejiang University, 2016.
11. Xu J. Application of Vertical Vortex Wells in Mountain Cities Water Drainage Systems // *Water Treatment Technology*. 2022. Vol. 41 (1). Pp. 135–172.
12. Fang D. Research on the Detection and Distribution of Harmful Gases in Mountain Cities' Sewage Pipes. Dissertation. Chongqing University, 2012.
13. Bao L. Development and Application of Combustible Gas Monitoring and Warning System in Urban Sewage Systems and Septic Tanks. Dissertation. Chongqing University, 2009.
14. Lu S. Numerical Simulation of Water and Gas Two-Phase Flow Characteristics in a Vertical Sink Well and Structure Optimization. Dissertation. Lanzhou University of Science and Technology, 2023.
15. Cai H., Zhang J., Chen X., et al. Study on Hydrodynamic and Transport Properties of Vertical Vortex Flow Wells // *Hydropower Research*. 2023. Vol. 41 (3). Pp. 112–116.
16. Yang X. Research on Ventilation and Disaster Prevention Technology of Underwater Tunnels of Urban Sewage Systems. Dissertation. Chongqing Jiaotong University, 2008.
17. Gao M. Modeling the Hydrodynamic Characteristics of a Vertical Vortex Well Using FLUENT // *Water Resources and Hydropower*. 2022. Vol. 8. Pp. 4–8.
18. Zhang X. Study on corrosion resistance of acrylic fibers. Dissertation. North-East University, 2021.
19. Bai Y. Study on 3D Printing of Concrete Walls of Vertical Wells. Dissertation. China University of Mining and Technology, 2018.
20. Zhou Z. Basic Research on Hydrogen Sulfide Removal Using Ionic Liquids from Natural Gas. Dissertation. Beijing University of Chemical Technology, 2023.
21. Coulson J. M., Richardson J. F. *Chemical Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. 1983. Vol. 2. Chemical Mass Transfer and Separation Processes.
22. Liu H. Research and Prevention of Harmful Gases in Special Structures of Urban Deep Drainage Systems // *Water*. 2024. Vol. 16 (17). 2481.

### References

1. Li X. *Research on Vertical Planning of Urban Large-Scale Water Disposal Systems*. Dissertation. Beijing University of Architecture, 2020.
2. Xing Y., Cao X., Liu T., et al. Current Status, Problems, and Suggestions for the Development of China's Urban Water Disposal Systems. *China Water & Wastewater*, 2020, vol. 36 (10), pp. 19–23.
3. Wang P. Application and Development of Sustainable Urban Water Disposal Systems. *Zhushe*, 2017, vol. 28, p. 10.
4. Qing X. Problems and Solutions of Industrial Wastewater Treatment in Environmental Engineering.

*Leather Technology and Environmental Protection*, 2024, vol. 5 (19), pp. 8–12.

5. Hu H. Research on Resource Utilization and Environmental Protection of Urban Wastewater. *New Farmer*, 2024, vol. 22, pp. 78–80.

6. Fan B. Thinking and Misunderstanding Analysis of Rural Domestic Sewage Resource Treatment and Utilization. *China Water & Wastewater*, 2024, vol. 40 (16), pp. 1–7.

7. Zhang Y. Application of intelligent technology in urban sewerage network management. *Green Building and Smart Buildings*, 2024, vol. 10, pp. 169–171.

8. Shao X., Wang C., Yang C. Case study on digital and intelligent maintenance system of urban sewerage network. *Theoretical Research on Urban Construction*, 2024, vol. 21, pp. 22–24.

9. Lu J., Zhou Y., Ding Y., et al. Harmful Gas Release from Wastewater Pipeline System and Its Solutions. *Journal of Environmental Engineering*, 2019, vol. 13 (4), pp. 757–764.

10. Ma Y. *Research on Gas Vortex and Energy Loss in Water Drainage System Structures*. Dissertation. Zhejiang University, 2016.

11. Xu J. Application of Vertical Vortex Wells in Mountain Cities Water Drainage Systems. *Water Treatment Technology*, 2022, vol. 41 (1), pp. 135–172.

12. Fang D. *Research on the Detection and Distribution of Harmful Gases in Mountain Cities' Sewage Pipes*. Dissertation. Chongqing University, 2012.

13. Bao L. *Development and Application of Combustible Gas Monitoring and Warning System in Urban Sewage*

*Systems and Septic Tanks*. Dissertation. Chongqing University, 2009.

14. Lu S. *Numerical Simulation of Water and Gas Two-Phase Flow Characteristics in a Vertical Sink Well and Structure Optimization*. Dissertation. Lanzhou University of Science and Technology, 2023.

15. Cai H., Zhang J., Chen X., et al. Study on Hydrodynamic and Transport Properties of Vertical Vortex Flow Wells. *Hydropower Research*, 2023, vol. 41 (3), pp. 112–116.

16. Yang X. *Research on Ventilation and Disaster Prevention Technology of Underwater Tunnels of Urban Sewage Systems*. Dissertation. Chongqing Jiaotong University, 2008.

17. Gao M. Modeling the Hydrodynamic Characteristics of a Vertical Vortex Well Using FLUENT. *Water Resources and Hydropower*, 2022, vol. 8, pp. 4–8.

18. Zhang X. *Study on corrosion resistance of acrylic fibers*. Dissertation. North-East University, 2021.

19. Bai Y. *Study on 3D Printing of Concrete Walls of Vertical Wells*. Dissertation. China University of Mining and Technology, 2018.

20. Zhou Z. *Basic Research on Hydrogen Sulfide Removal Using Ionic Liquids from Natural Gas*. Dissertation. Beijing University of Chemical Technology, 2023.

21. Coulson J. M., Richardson J. F. *Chemical Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. 1983. Vol. 2. Chemical Mass Transfer and Separation Processes.

22. Liu H. Research and Prevention of Harmful Gases in Special Structures of Urban Deep Drainage Systems. *Water*, 2024, vol. 16 (17), 2481.