

На правах рукописи

Лю Хао

Лю Хао

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ПЕРЕПАДНОЙ ШАХТЫ
В СИСТЕМАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ НА ВЫДЕЛЕНИЕ
СЕРОВОДОРОДА ИЗ ПОТОКА СТОЧНЫХ ВОД**

Специальность 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные
системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: **Федоров Святослав Викторович**,
кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Терехов Лев Дмитриевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Петербургский
государственный университет путей
связи Императора Александра I»
кафедра «Водоснабжение, водоотведение
и гидравлика», профессор;

Мельник Ольга Валериевна,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет», кафедра водоснабжения
и водоотведения, старший
преподаватель.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Иркутский
национальный исследовательский
технический университет».**

Защита диссертации состоится «16» декабря 2026 г. В 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, аудитория 220.

Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/lyu-hao-0>.

Автореферат разослан «26» октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В. А. Пухкал

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: Надежная работа системы водоотведения обеспечивает экологическую и санитарную безопасность городской среды. С ростом населения и территории городов значительно увеличивается нагрузка на магистральные коллекторы и сооружения на них. Повышенное внимание вызывает функционирование перепадных шахт, которые могут иметь различное технологическое оснащение и принцип работы. Высота падения сточной жидкости в таких сооружениях может достигать десятков метров. Данный процесс сопровождается рядом негативных последствий, связанных с разрушением водобойного колодца, водопроводящих лотков или трубопроводов внутри шахты. Падение большого расхода сточных вод вызывает нагнетание воздуха в нижний бьеф, интенсифицирует массообменный процесс и выделение канализационных газов в подсводное пространство коллектора и шахты, приводя к развитию газовой коррозии ж/б конструкций, а также выдавливанию газовойоздушной среды наружу в городскую среду.

В связи с этим актуальным направлением является оценка степени газовыделения сероводорода на перепадных шахтах различной конструкции, получение расчетных зависимостей для оценки объема, выделяющегося сероводорода и разработка конструкций шахты позволяющих минимизировать этот процесс.

Степень разработанности темы исследования: Проблема выделения сероводорода в системах водоотведения широко освещена в научной литературе. Существующие исследования включают три основных направления: изучение биохимических процессов образования сульфидов в сточных водах, изучение гидравлических режимов работы коллекторов, перепадных шахт и водосбросов, а также исследование массообменных процессов, определяющих выделение канализационных газов из открытых потоков.

Теоретической основой диссертационного исследования послужили работы следующих российских и мировых ученых. Г. Я. Дрозд, В. М. Васильев, О. М. Ильина, Ю. В. Столбихин, А. В. Малков, Ю. Д. Шутов, М. И. Алексеев, Ю. А. Феофанов, Н. А. Черников, Л. Д. Терехов, О. В. Мельник, Smet E., Carty A., Fortescue G., Hamad N. F., Nielsen P. H., Norsker N. H., Pacheco Fernández M., Smet E., Yongsiri C., Carrera L., Лю Хуэй, Ван Яцзян, Чжан Лэй, Лю Цзиньян, Хуан Вэй, Ван Цюшо и др.

В настоящее время выделены основные факторы образования сульфидов в сточных водах, достаточно глубоко изучены процессы дегазации потока в самотечных коллекторах и сооружениях. Однако, несмотря на значительный объем накопленных знаний, вопросы количественной оценки интенсивности выделения сероводорода в перепадных шахтах с учетом конструктивных особенностей, а также разработка методов его снижения

путем изменения гидравлического режима работы этих сооружений остаются недостаточно изученными, что и определяет направление настоящего исследования.

Цель исследования заключается в разработке научно обоснованного технического решения перепадной шахты, обеспечивающей снижение степени газовыделения сероводорода из потока сточных вод.

Задачи исследования:

- литературный обзор применяемых конструкций перепадных шахт и методов расчета количества, выделяющегося в шахтах сероводорода.

- постановка эксперимента на лабораторной модели перепадной шахты для оценки интенсивности дегазации сероводорода в шахтах различной конструкции.

- проведение конечно-элементного анализа работы перепадных шахт реального размера;

- получение экспериментальных и модельных зависимостей коэффициента массопередачи для перепадных шахт различной конструкции и сравнение их с данными теории массообмена;

- разработка новой конструкции перепадной шахты, обеспечивающей снижение степени газовыделения.

Объект исследования: перепадные шахты различных типов в системах водоотведения.

Предмет исследования: процесс выделения сероводорода из сточной жидкости в воздушную среду перепадной шахты.

Рабочая гипотеза: влияние характеристик потока сточных вод и конструкции сооружения на процесс массопередачи сероводорода в воздушную среду перепадной шахты, уменьшение аэрации потока в сифонном стояке снижает интенсивность выделения сероводорода.

Методология и методы исследования: Методологической основой исследования послужили фундаментальные положения теории гидравлики, массообмена и газодинамики. Решение поставленных задач реализовано комплексным методом, включающим аналитический обзор существующих конструкций перепадных шахт, физическое моделирование на лабораторной установке с варьированием гидравлических и физико-химических параметров потока, а также конечно-элементный анализ процессов массопереноса для масштабирования результатов на реальные объекты. Достоверность полученных данных обеспечена применением поверенного оборудования, сопоставлением с экспериментальными данными других ученых и теорией массообмена, а также использованием современных методов математической статистики при обработке результатов.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК (шифр, наименования специальности):

2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов.

Пункты паспорта специальности, которому соответствует тема диссертации:

8. Гидравлические закономерности, определяющие эффективность работы водопроводных и канализационных сооружений и устройств, их отдельных элементов, систем водоподачи и водоотведения.

17. Предотвращение отложений, биологических обрастаний, коррозии трубопроводов, оборудования и сооружений в системах водного хозяйства.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Выявлены закономерности изменения концентрации сероводорода в воздушном пространстве для различных конструкций перепадных шахт с течением времени в зависимости от расхода сточных вод и концентрации сульфидов. Доказано влияние конструкции сооружения на газовыделение сероводорода из потока сточных вод.

2. Предложена зависимость коэффициента массопередачи сероводорода из сточной жидкости в воздух от типа конструкции, пропускной способности, высоты перепада и концентрации сульфидов в сточной воде. По каждому типу перепадной шахты установлено предельное значение критерия Fr, при котором величина коэффициента массопередачи становится постоянной и соответствует минимальному выделению сероводорода.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении области применения критериального уравнения оценки коэффициента массопередачи для перепадных шахт.

Практическая значимость заключается в том, что предложена конструкция перепадной шахты с применением сифонного стояка, обеспечивающая снижение интенсивности газовыделения сероводорода по сравнению с существующими конструкциями. Конструкция сифонного стояка внедрена в действующей системе канализации (подтверждено актом о внедрении).

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 10 статьях (4,99 п.л.), в числе которых 3 (2,22 п.л.) опубликованы в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК РФ, 3 (2,08 п.л.) в изданиях, входящих в международную базу Scopus и Web of Science.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности изменения концентрации сероводорода в воздушной среде перепадных шахт различного типа.

2. Зависимости для определения коэффициента массопередачи сероводорода из сточной жидкости в воздух, учитывающие тип конструкции шахты.

3. Результаты апробации канализационного перепада с сифонным стоком. Экономический эффект от применения новой конструкции перепада.

Степень достоверности и апробация результатов.

При проведении расчетов использовалось сертифицированное программное обеспечение: ANSYS CFX, SOLIDWORKS, IBM SPSS Statistics. При проведении эксперимента использовалось поверенное оборудование (Газоанализатор, ультразвуковой расходомер, pH-метр.). Экспериментальные данные подвергались математической обработке с целью оценки доверительного интервала. Результаты исследования докладывались на Межвузовской научно-практической конференции «Современные проблемы водоснабжения и водоотведения» (01–02 декабря 2022 года), Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Инженерные системы и городское хозяйство» (20–24 марта 2023 года), XI Международной научно-практической конференции «Новые достижения в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов» (16 ноября 2023 г.), Международной научно-технической конференции «Экология и техносферная безопасность» (24–30 марта 2024 г.), Международной научно-технической конференции «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» (08–14 сентября 2024 г.), LXXVII Национальной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (15–18 октября 2024 г.), Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве» (24–28 марта 2025 г.).

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, акты об использовании результатов работы, изложенные на 149 стр. В работу включены 41 рисунок, 23 таблицы, 87 формул, список литературы из 189 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы, а также отражены основные положения диссертации, вынесенные на защиту.

В первой главе рассматриваются вопросы развития городских систем водоотведения в Китае и в мире. Представлен обзор применяемых в сетях водоотведения перепадных шахт. Выполнена оценка влияния эксплуатации перепадов на объем, выделяющегося сероводорода в городскую среду. Рассмотрены процессы, способствующие образованию сероводорода в потоке сточных вод и факторы, интенсифицирующие процесс дегазации. Выполнен обзор современных методов мониторинга канализационных газов. Установлено, что все применяемые типы перепадных шахт являются источниками значительных выбросов сероводорода. В этой связи обоснована необходимость получения зависимостей, позволяющих выполнить оценку

объема, выделяющегося сероводорода, а также предложения технологических решений, направленных на минимизацию газовыделения.

Во второй главе разработана численная модель перепадной шахты с учетом конструктивных особенностей сооружения, откалиброванная по данным лабораторного эксперимента. Получены закономерности изменения концентрации сероводорода в воздушном пространстве для различных конструкций перепадных шахт с течением времени в зависимости от расхода сточных вод и концентрации сульфидов. Показано влияние конструкции сооружения на концентрацию сероводорода.

В третьей главе представлены результаты модельного расчета коэффициента массопередачи сероводорода, полученные с помощью откалиброванной модели для перепадной шахты реальных размеров в зависимости от типа конструкции, пропускной способности, высоты перепада и концентрации сульфидов в сточной воде. Используя Пи-теорему получены формулы для расчета коэффициента массопередачи. По каждому типу перепадной шахты представлены графики зависимости коэффициента массопередачи от критерия Fg , позволяющие оценить значение Fg , при котором величина коэффициента становится постоянной и соответствует минимальному выделению сероводорода. Сравнение результатов моделирования показало минимальное газовыделение для конструкции перепада с сифонным стояком по сравнению с другими вариантами шахт.

В четвертой главе представлены результаты расчета степени коррозионного воздействия в шахтах различных типов в зависимости от концентрации сероводорода. С помощью оценки капитальных и эксплуатационных затрат методом чистой приведенной стоимости (Net Present Value – NPV) выполнен анализ эффективности различных типов перепадов. Также представлены данные стоимости очистки газозооной смеси от сероводорода при функционировании шахт. Полученные результаты показали минимальные затраты на газоочистку в шахтах с трубчатым и сифонным стояком.

В заключении работы приведены основные выводы по результатам диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Закономерности изменения концентрации сероводорода в воздушной среде перепадных шахт различного типа.

Функционирование перепадной шахты представляет собой сложную многокомпонентную систему. Поэтому для упрощения моделирования поток сточной жидкости представлялся как смесь воды и молекулярного сероводорода.

Для определения габаритов модели и лабораторной установки в качестве прототипа использовались перепадные шахты Продолжения Главного

канализационного коллектора северной части Санкт-Петербурга (ПГКС), имеющие по проектным данным диаметр в диапазоне $D = 6\text{--}13,6$ м и высоту перепада $H = 6,24\text{--}93,76$ м. С помощью масштабирования средних геометрических размеров ($D_{\text{ср}} = 9,8$ м и $H_{\text{ср}} = 60$ м) по критерию Фруда были установлены размеры экспериментальной шахты с соотношением 1:60. Температура воды принималась равной $T = 20^\circ\text{C}$, как наиболее благоприятная для дегазации сероводорода.

Для математического описания процесса движения многофазного потока применялась модель «Эйлер-Эйлер».

Уравнения импульса для непрерывной фазы (вода) и дисперсной фазы (воздух) имеют следующий вид:

$$\frac{\partial(\alpha_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}v_{\text{ж}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}v_{\text{ж}}v_{\text{ж}}) - \nabla \cdot (\alpha_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}\tau_{\text{ж}}) = -\alpha_{\text{ж}}\nabla p_{\text{ж}} + \alpha_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}g - M \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_{\text{г}}\rho_{\text{г}}v_{\text{г}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{\text{г}}\rho_{\text{г}}v_{\text{г}}v_{\text{г}}) - \nabla \cdot (\alpha_{\text{г}}\rho_{\text{г}}\tau_{\text{г}}) = -\alpha_{\text{г}}\nabla p_{\text{г}} + \alpha_{\text{г}}\rho_{\text{г}}g + M \quad (2)$$

Здесь нижние индексы г и ж обозначают переменные дисперсной и непрерывной фаз соответственно; α – объёмная доля фазы, ρ – плотность (кг/м^3), v – скорость (м/с), p – давление (Н/м^2), τ – тензор эффективных напряжений (Н/м^2), g – вектор ускорения свободного падения (м/с^2), M – суммарная межфазная сила (Н/м^3), характеризующая перенос импульса между фазами на единицу объёма.

Решение уравнений (1) и (2) выполнялось с помощью конечно-элементного анализа в программе ANSYS CFX. Геометрия расчетной области перепадной шахты разрабатывалась в SolidWorks. В рамках исследования изучалась работа наиболее часто встречающихся в практике эксплуатации конструкций перепадов (КНР, др. страны) (рис.1.). В качестве альтернативы существующим конструкциям перепада может быть предложена шахта с сифонным стояком (рис.1, е). Использование сифонирования позволяет исключить открытое свободное падение потока при различных расходах сточных вод.

В предпроцессоре Meshing создавалась тетраэдрическая сетка с средним размером ячейки 0.004 м, определённым из условия сходимости решения. В областях с большими градиентами скорости и давления, а также в местах контакта с твердой стенкой выполнено локальное измельчение сетки до 0.001 м с помощью функции Sizing и Inflation (рис. 2).

В процессе моделирования решалась нестационарная задача. Общее время расчета определялось условием прохождения потоком воды всего сооружения и наступления установившегося движения.

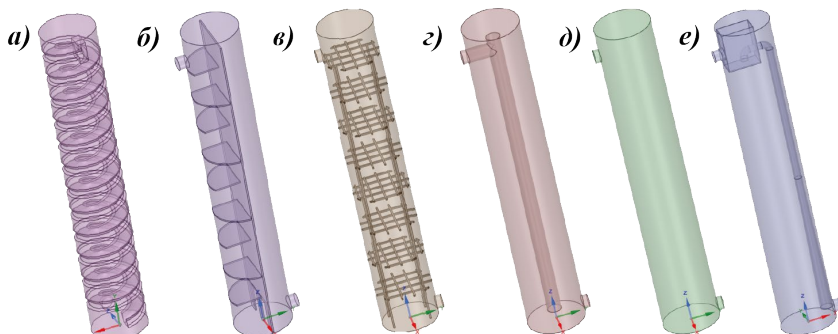


Рисунок 1 – Геометрия расчетной области перепадной шахты: а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком

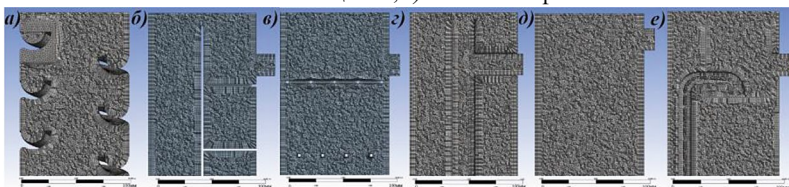


Рисунок 2 – Расчетная сетка: а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком

Для моделирования процесса были установлены граничные условия, показанные на рисунке 3. В расчётной области определялось присутствие трех веществ: (вода, воздух, сероводород). Вода и воздух являлись непрерывной фазой, а сероводород дисперсной. Для учета перемешивания сред использовалась модель Mixture. Для обеспечения падения потока задавалась гравитация по оси z ($g_z = 9,81 \text{ м/с}^2$). Моделирование турбулизации потока обеспечивалось с помощью модели $k-\epsilon$.

В начальный момент времени в шахте присутствует только статичная воздушная среда с атмосферным давлением $P_m = 0 \text{ Па}$. На входной границе задавалось условие Inlet, где определялось значение нормальной скорости входящего потока (табл. 1). Для учета концентрации сероводорода на границе задавалась объемная доля веществ. По воздуху объемная доля соответствовала нулю. По воде и сероводороду коэффициенты указаны в табл 1. Для поступления воздуха на верхней грани шахты задавалось условие Opening, на котором учитывалось присутствие атмосферного давления $P_m = 0 \text{ Па}$. Выход частично аэрированного и дегазированного потока из расчетной области

обеспечивался с помощью условия Outlet на отводящей трубе. На этой грани также задавалось присутствие атмосферного давления $P_m = 0$ Па. Все оставшиеся грани геометрии определялись твердыми стенками, для которых задавались условия прилипания потока (no-slip).

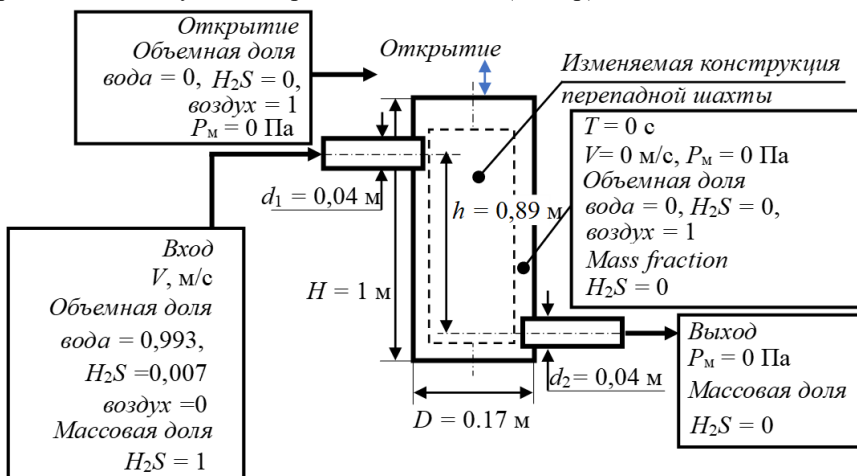


Рисунок 3 – Настройка граничных условий численной модели перепадной шахты

Таблица 1 – Граничные условия

Входная скорость потока воды			Объемная доля воды			Объемная доля сероводорода (концентрация сульфида натрия, мг/л*)		
0.05м/с	0.075м/с	0.1м/с	0.993	0.985	0.971	0.007 (1.014)	0.015 (2.028)	0.029 (3.978)

* концентрация сульфида натрия в эксперименте на лабораторной установке

На рисунке 4 показаны поля объемной доли сероводорода в воздушном пространстве перепадной шахты для установившегося движения потока воды. Результаты моделирования показывают высокую интенсивность выделения сероводорода в шахте со спиральным лотком и многоступенчатым перепадом, 4.93 и 11.32 мг/м³ соответственно. Наименьшая интенсивность получена для конструкции с сифонным стояком 1.37 мг/м³.

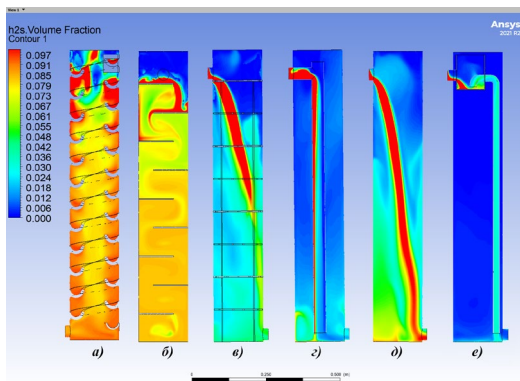


Рисунок 4 – Объемная доля сероводорода в перенпадной шахте: а) – шахта со спиральным лотком; б) – шахта с многоступенчатым перепадом; в) – шахта с поперечными балками; г) – шахта с трубчатым стояком; д) – шахта без технологического оснащения; е) – шахта с сифонным стояком.

Экспериментальные исследования в рамках данной работы проводились в лаборатории ФГБОУ ВО «СПбГАСУ». Геометрические характеристики экспериментальной установки шахты и свойства модельного раствора соответствовали настройкам численной модели. Установка включала в себя следующие компоненты: корпус шахты из оргстекла высотой 1 м и диаметром 0,17 м, резервуар с модельным раствором, циркуляционный насос для подачи воды, систему трубопроводов для подачи воды в шахту $d = 40\text{ мм}$ и отведения в резервуар $d = 40\text{ мм}$, емкость с размещением газоанализатора Эколаб. Эксперимент предусматривал циркуляцию сульфидсодержащего модельного раствора в герметичной установке и фиксацию концентрации выделяющегося сероводорода до момента наступления равновесного состояния в сооружении. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 5.

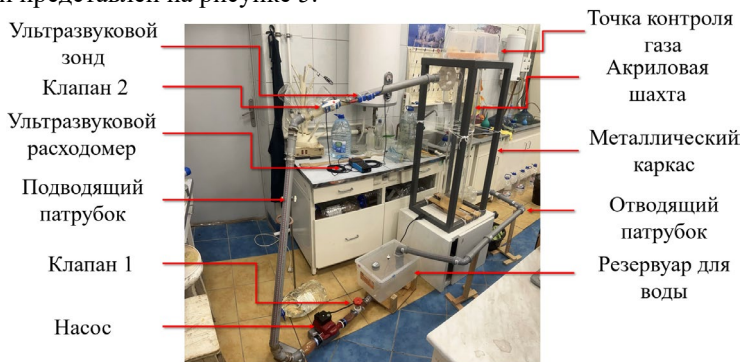


Рисунок 5 – Фотография лабораторной установки

На подводящем трубопроводе был установлен ультразвуковой расходомер, предназначенный для контроля скорости потока и расхода воды на входе в шахту.

Для исследования перепадных шахт различной конструкции было изготовлено технологическое оснащение с помощью 3D-печати (рис. 6), которое монтировалось в корпусе шахты. Размеры трубопроводов, лотков, перекрытий принимались на основании методических рекомендаций в справочной литературе (табл. 2), кроме варианта с сифонным стояком (предложенного автором), конструкция которого предусматривала увеличение сечения трубопровода в нижнем бьефе на 50 %.

В эксперименте использовался модельный раствор вместо реальных сточных вод, чтобы исключить влияние посторонних соединений и измерить интенсивность выделения молекулярного сероводорода при известной концентрации иона S^{2-} . Модельный раствор изготавливался из нонагидрата сульфида натрия ($Na_2S \cdot 9H_2O$), который хорошо растворим в воде, а его водный раствор имеет сильную щёлочность ($pH > 7,5$). С помощью соляной кислоты pH раствора понижался до 5, чтобы создать наиболее благоприятные условия для перехода сероводорода в молекулярную форму, соответствующие условиям реальных сточных вод. Раствор готовили в трёх концентрациях: 1,014; 2,028 и 3,978 мг/л. Для этого сначала приготавливали 1 л концентрированного раствора (497 мг/л по Na_2S), а затем отбирали 20, 40 и 80 мл, разбавляя дистиллированной водой объемом 10 л.

Таблица 2 – Размеры технологического оснащения шахт

Тип шахты	Размеры		
Шахта со спиральным лотком	шаг спирали	число витков	ширина лотка
	0,076 м	12шт.	0,040 м
Шахта с многоступенчатым перепадом	расстояние между ступенями	число ступеней	угол ступени к стенке шахты
	0,100 м	9шт.	90°
Шахта с поперечными балками	шаг сетки	число секций	размер в свету между балками ($l \times h$)
	0,112 м	8шт.	0,032×0,032 м
Шахта с трубчатым стояком стояком	длина стояка	диаметр стояка	угол подключения входа
	0,93 м	0,040 м	90°
Шахта с сифонным стояком	размер камеры зарядки сифона	длина сифона	диаметр сифона
	0,06×0,1×0,12 м	0,87 м	0,020 м – 0,040 м
Шахта без технологического оснащения	высота шахты	диаметр шахты	-
	1 м	0,17 м	-

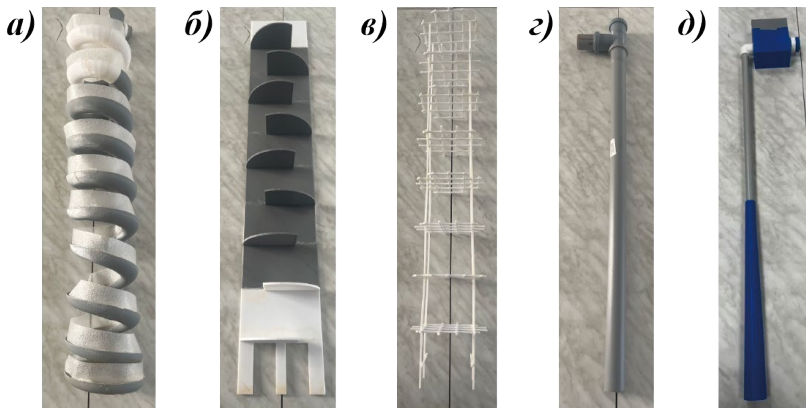


Рисунок 6 – Технологическое оснащение шахт из PLA: а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта с сифонным стояком

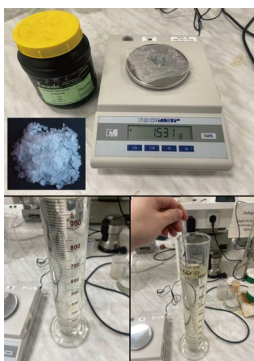


Рисунок 7 – Подготовка модельного раствора

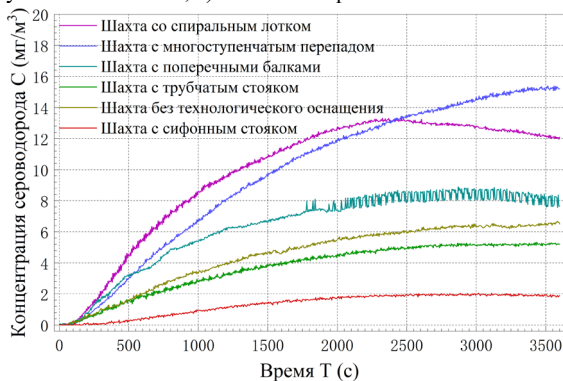


Рисунок 8 – Графики зависимости концентрации H_2S от времени, зафиксированные газоанализатором Эколаб для эксперимента при скорости входящего потока 0,05 м/с и концентрации сульфида натрия в воде 3,978 мг/л

В результате лабораторного эксперимента были получены графики изменения концентрации сероводорода в воздушном пространстве шахты (рис. 8). В процессе функционирования перепада фиксировался рост концентрации сероводорода в воздухе, после которого устанавливалось постоянное значение. Наиболее неблагоприятная ситуация наблюдалась в сооружениях со спиральным лотком и ступенчатым перепадом. Низкая интенсивность отмечалась также для шахты с сифонным стояком.

На рис. 9 показаны графики изменения концентрации сероводорода в воздушном пространстве шахты от скорости входящего потока, концентрации сульфида натрия в воде и типа шахты. На основе диаграмм установлено, что максимальная концентрация H_2S в шахте достигается при минимальной скорости потока и максимальной концентрации Na_2S в воде. Исключением является шахта с поперечными балками, в которой рост скорости сопровождается интенсивным дроблением потока, интенсифицируя выделение H_2S .

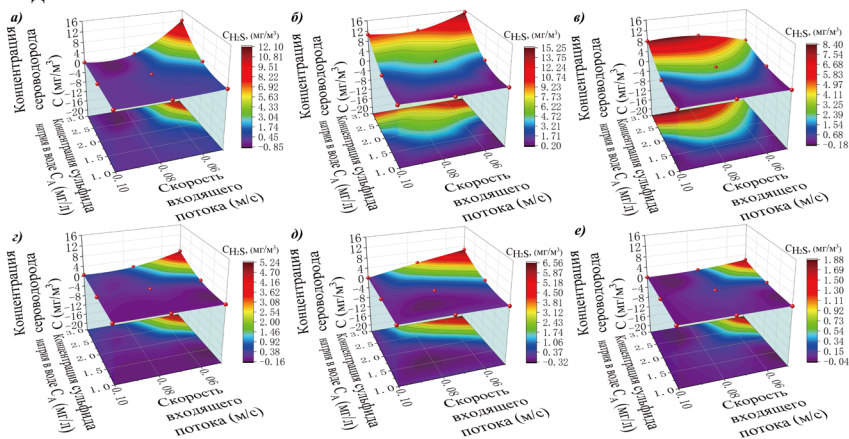


Рисунок 9 – Графики концентрации H_2S в воздушном пространстве перепадной шахты в зависимости от скорости входящего потока, концентрации сульфида натрия и типа перепада, полученные по данным лабораторного эксперимента: а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом;

в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком

По данным моделирования в ANSYS также были построены аналогичные графики концентрации H_2S (рис. 10). Полученные закономерности подтвердили схожий с экспериментом характер газовыделения. Количественное сравнение результатов показало превышение экспериментальных концентраций в диапазоне от 28 до 78 % для различных шахт. С целью достижения соответствия между данными моделирования и лабораторного эксперимента выполнялась калибровка численной модели, предусматривающая определение поправочных коэффициентов. На рис. 11 показаны графики зависимости калибровочного коэффициента от концентрации сульфида натрия в воде. Как видно для всех видов перепада величина коэффициента устанавливается с ростом концентрации сульфида натрия. Среднее значение коэффициента при концентрации сульфида натрия свыше 4 мг/л составило 0.3. Применение поправочного коэффициента в

дальнейшем позволило использовать численную модель для расчетов перепадных шахт реальных размеров.

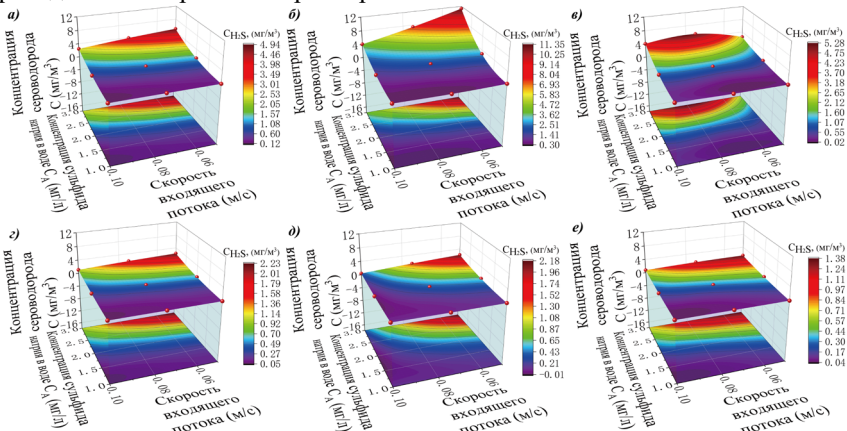


Рисунок 10 – Графики концентрации H_2S в воздушном пространстве перепадной шахты в зависимости от скорости входящего потока, концентрации сульфида натрия и типа перепада, полученные по данным модельного расчета: а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком

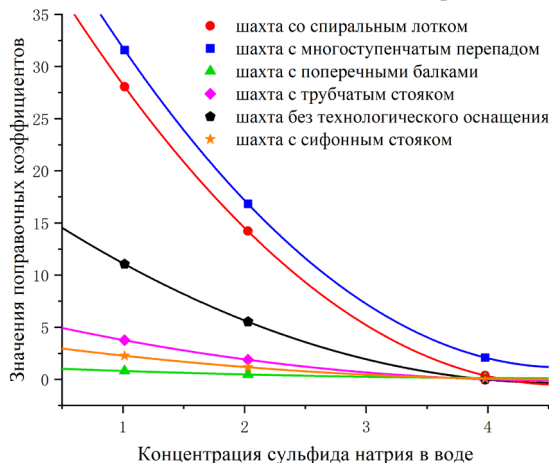


Рисунок 11 – Графики изменения калибровочного коэффициента в зависимости от концентрации сульфида натрия в воде и типа конструкции шахты

Полученные результаты подтвердили значительное влияние конструкции перепада на интенсивность выделения сероводорода. Максимальная

дегазация потока свойственна условиям изменения режима функционирования сооружения, когда происходит уменьшение расхода сточных вод или возрастает концентрация сульфидсодержащих органических соединений.

2. Зависимости для определения коэффициента массопередачи сероводорода из сточной жидкости в воздух, учитывающие тип конструкции шахты.

Принимая во внимание многофакторность процессов, сопровождающих эксплуатацию шахт, в настоящем исследовании использовалась Питеорема для получения зависимостей коэффициента массопередачи сероводорода из потока сточных вод в воздушную среду.

Процесс дегазации сероводорода из воды зависит от следующих характеристик: расхода Q ($\text{м}^3/\text{с}$) [L^3T^{-1}], высоты падения потока H (м) [L], концентрации сероводорода в воздушном пространстве шахты C ($\text{кг}/\text{м}^3$) [ML^{-3}], начальной концентрации сероводорода в воде C_A ($\text{кг}/\text{м}^3$) [ML^{-3}], ускорения свободного падения g ($\text{м}/\text{с}^2$) [LT^{-2}], кинематической вязкости воды ν ($\text{м}^2/\text{с}$) [L^2T^{-1}], площади поверхности контакта водной и воздушной фазы A (м^2) [L^2] и коэффициента массопередачи K ($\text{м}/\text{с}$) [LT^{-1}].

На основании вышеуказанных основных параметров и с применением вывода, базирующегося на Питеореме, было получено обобщенное критериальное уравнение для оценки коэффициента массопередачи:

$$K = \frac{\nu}{H} a \times Fr^m \times C_r^n \quad (3)$$

Fr – критерий Фруда $Fr = \frac{v^2}{g \cdot H}$; C_r – отношение концентраций сероводорода C/C_A .

Используя данные численного моделирования для перепадных шахт реального размера (при условии $H = 60$ м) и зависимость (3), были выполнены регрессионные расчёты с помощью программы SPSS с целью определения значения коэффициентов a , m , n . Для каждого типа конструкции шахты были получены расчетные зависимости для оценки коэффициента массопередачи (табл. 3).

Таблица 3 – Значения коэффициентов в зависимости от типа перепадной шахты

Тип шахты	a	m	n
шахта со спиральным лотком	$1 \cdot 10^{-3}$	-0.999	1.005
шахта с многоступенчатым перепадом	$4.1 \cdot 10^{-6}$	-2.440	0.938
шахта с поперечными балками	$1 \cdot 10^{-3}$	-1.115	1.022
шахта с трубчатым стояком	$9.8 \cdot 10^{-3}$	-1.565	1.001
шахта без технологического оснащения	$1 \cdot 10^{-3}$	-1.091	1.018
шахта с сифонным стояком	$7.7 \cdot 10^{-6}$	-2.025	1.012

Руководствуясь зависимостью (3), можно производить оценку количества выделяющегося сероводорода в перепадной шахте в зависимости от условий работы.

На основе регрессионных уравнений (3) для различных конструкций шахт построены функции $K=f(Fr)$ (рис. 12). В качестве примера представлен график для соотношения $C_r = 0,003$.

Используя графики, можно выделить области наименьших значений коэффициента, которые отражают условия минимального выделения сероводорода в перепадной шахте. Для различных конструкций перепада значение критерия Fr , после которого устанавливается минимальное значение коэффициента массопередачи, индивидуально и зависит от концентрации сероводорода в исходной воде C_A . В таблице 4 представлены диапазоны критерия Fr при котором наблюдается минимальное газовыделение в зависимости от концентрации C_A .

Основными факторами, интенсифицирующими процесс дегазации падающего потока, выступает увеличение высоты перепада и снижение расхода сточных вод.

Таблица 4 – Диапазоны критерия Fr для условий минимального газовыделения сероводорода

Тип шахты	Концентрация сульфидов в воде C_A (мг/л)	Fr
шахта со спиральным лотком	4*	0.833
	42**	0.903
шахта с многоступенчатым перепадом	4	0.275
	42	0.304
шахта с поперечными балками	4	0.458
	42	0.591
шахта с трубчатым стояком	4	0.301
	42	0.343
шахта без технологического оснащения	4	0.618
	42	0.716
шахта с сифонным стояком	4	0.289
	42	0.331

* – концентрация сероводорода в лабораторном эксперименте автора

** – концентрация сероводорода в сточных водах по данным Vollertsen, J.

С целью оценки достоверности зависимости (3) использовались экспериментальные данные Yongsiri C., Pacheco, Namada N. F. и др, а также результаты численного моделирования для перепадных шахт с другой высотой перепада (15 и 30 м). На рис. 12 вынесены результаты экспериментов и модельных расчетов, которые попадают в 95 % доверительный интервал полученной зависимости. Данный результат подтверждает достоверность полученных закономерностей и возможность применения в инженерной

практике для прогнозирования газовыделения в шахтах с различной высотой перепада.

Для оценки процесса выделения сероводорода также можно воспользоваться известной теорией проникновения Хигби. Согласно модели, растворённый сероводород в жидкой фазе подчиняется одномерному нестационарному уравнению диффузии (второй закон Фика):

$$\frac{\partial c_A}{\partial T} = D \frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2} \quad (4)$$

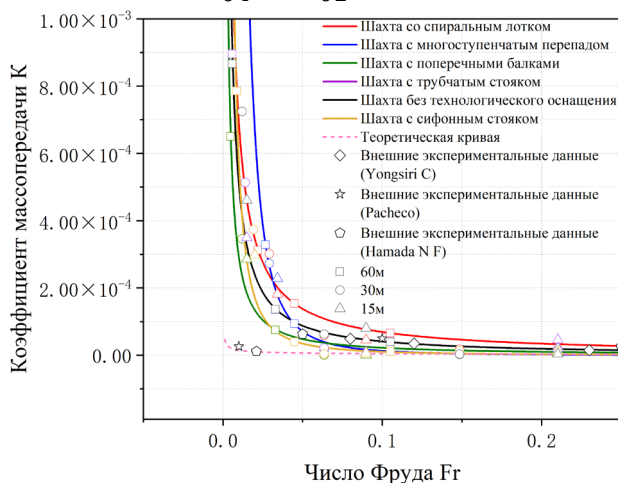


Рисунок 12 – Зависимости коэффициента массопередачи от критерия Fr

Для условий перепадной шахты, принимая время контакта водного потока с воздушной средой равным времени свободного падения или стекания жидкой плёнки можно записать зависимость для коэффициента массопередачи:

$$K(h) = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi \frac{v - v_0}{g}}} \quad (5)$$

где v – средняя скорость падающего потока, v_0 – начальная скорость входящего потока в шахту.

Используя зависимость (5) на рис. 12 вынесено теоретическое значение коэффициента массопередачи. Видно, что полученные зависимости позволяют более точно оценить величину коэффициента массопередачи. Кроме этого, в области наибольшего газовыделения модель проникновения дает заниженные значения коэффициента.

В ходе численного моделирования шахт реального размера определялись закономерности изменения коэффициента массопередачи во времени

для каждой из шахт, представленные на рис. 13. Из графика на рис. 13 следует, что при установившемся движении потока среднее значение коэффициента массопередачи для шахты со спиральным лотком, шахты со многоступенчатым перепадом, шахты с поперечными балками и шахты без технологического оснащения было зафиксировано превышение относительно теоретического значения: на 99,8 %, 42,63 %, 15,18 % и 43,38 %, соответственно. В случае шахт с трубчатым и сифонным стояком были получены значения близкие к теоретическим. Величина коэффициента массопередачи превышала теоретическое на 0,53 % и 0,26 % соответственно.

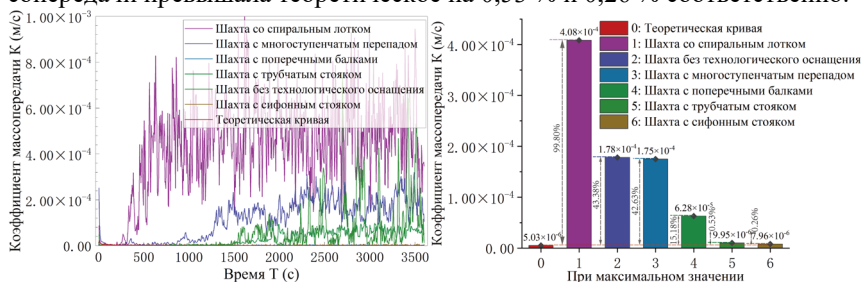


Рисунок 13 – Сравнение коэффициентов массопередачи для различных конструкций перепадной шахты

На основании выполненного сравнения видно, что работа шахты с сифонным стояком характеризуется минимальным выделением сероводорода.

3. Результаты апробации канализационного перепада с сифонным стояком. Экономический эффект от применения новой конструкции перепада.

В целях апробации эффективности шахты с сифонным стояком в подавлении выделения сероводорода, в рамках данного исследования, наблюдалась его работа в муниципальной канализационной сети (г. Пиндиншань КНР.) (рис. 14).

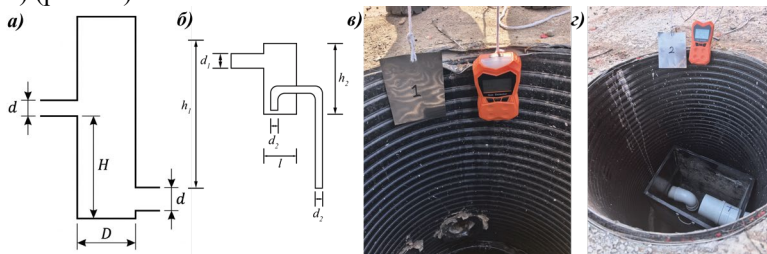


Рисунок 14 – Перепадной колодец в муниципальной канализационной сети: а) схема колодца; б) схема сифона; в) без технологического оснащения (№1); г) с сифонным стояком (№2)

В ходе эксперимента осуществлялся мониторинг выделения сероводорода в шахте с сифонным стояком и шахте без технологического оснащения. Как показано на рис. 15, интенсивность выделения сероводорода в шахте без технологического оснащения превышает аналогичный показатель в шахте с сифонным стояком. Согласно расчетам, средняя концентрация выделяемого H_2S в шахте с сифонным стояком значительно снизилась – в среднем на 50 % по сравнению с шахтой без технологического оснащения, что демонстрирует сходимость с данными численного моделирования.

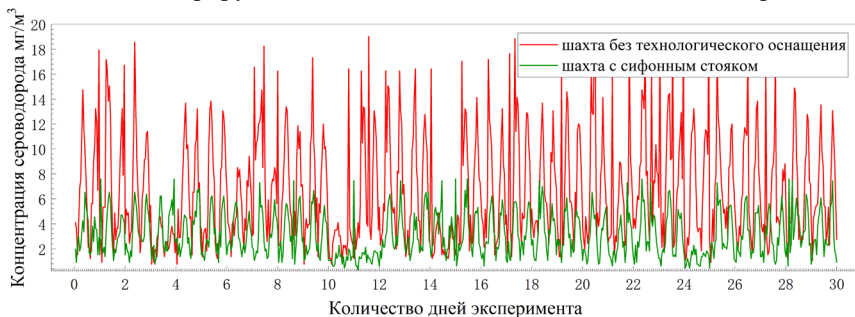


Рисунок 15 – Данные мониторинга концентрации сероводорода в колодце

Наряду с этим, результаты качественных коррозионных испытаний пластин из низкоуглеродистой стали (см. рис. 16) показали, что площадь коррозии пластины в шахте с сифонным стояком № 2 составляет лишь половину от площади коррозии в шахте без технологического оснащения № 1. Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что натурные эксперименты в полной мере подтвердили высокую эффективность шахты с сифонным стояком в подавлении эмиссии газов, а также верифицировали результаты численного моделирования.



Рисунок 16 – Сравнение образцов из низкоуглеродистой стали: 1 – колодец без технологического оснащения, 2 – колодец с сифонным стояком

Для оценки эффективности конструкций использовалась методика NPV (чистой приведённой стоимости). В качестве расчетной продолжительности эксплуатации принимался период – 50 лет. В таблице 5 представлены результаты расчета затрат, связанных с износом шахт от газовой коррозии и затрат на очистку газозооушной смеси.

Перепадная шахта с сифонным стояком значительно превосходит другие конструкции по всем ключевым показателям: она обеспечивает минимальное суточное выделение сероводорода (18 кг/год против 4023 кг/год у шахты без технологического оснащения), снижает скорость коррозии бетона до 0,21 мм/год (годовое разрушение стенки — всего 0,01 %), что позволяет избежать капитальных ремонтов в течение всего срока службы. По чистой приведённой стоимости (NPV) шахта с сифонным и трубчатым стояком демонстрируют наилучший результат (около –18 млн юаней/180 млн рублей), тогда как у конструкции со спиральным лотком потери достигают 23,26 % из-за ремонта каждые 4 года. Годовые затраты на очистку воздуха от сероводорода (рассматривая метод поглощения с помощью NaOH, 6,35 юаня/кг H₂S) для шахты с сифоном составили всего 116,8 юаня (1168 руб.), что является минимальным среди всех рассмотренных вариантов. Таким образом, сифонная конструкция является наиболее экономически и экологически предпочтительной для оснащения перепадных шахт.

Таблица 5 – Таблица статистических данных о затратах на строительство

Тип шахты	Годовой суммарный выброс (кг/год)	Скорость коррозии (мм/год)	Число ремонтов за 50 лет	Приведенная стоимость обслуживания, тыс. юаней (тыс. рублей)	NPV за жизненный цикл, тыс. юаней (тыс. рублей)	Годовые затраты на NaOH, юань (руб.)	Годовые затраты на гидрат оксида железа, юань (руб.)	Годовые затраты на активированный уголь, юань (руб.)	Общие затраты, тыс. юаней (тыс. рублей)
шахта со спиральным лотком	4023	17,21	12	4310,7 (43107)	-22194,2 (-221942)	25546,35 (255463,5)	64367,75 (643677,5)	331894,50 (3318945)	26507,45 (265074,5)
шахта с многоступенчатым перепадом	1723	7,45	5	1552,5 (15525)	-19436,1 (-194361)	10939,05 (109390,5)	27564,80 (275648)	142134,65 (1421346,5)	20999,54 (209995,4)
шахта с поперечными балками	619	2,76	1	234,0 (2340)	-18117,5 (-181175)	3927,40 (39274)	9898,80 (98988)	51048,90 (510489)	18355,43 (183554,3)
шахта с трубчатым стояком	29	0,26	0	123 (1230)	-18006 (-180060)	186,15 (1861,5)	467,20 (4672)	2401,70 (24017)	1813,09 (18130,9)
шахта без технологического оснащения	1753	7,58	5	1552,5 (15525)	-19436,1 (-194361)	11132,50 (111325)	28050,25 (280502,5)	144631,25 (1446312,5)	20999,73 (209997,3)
шахта с сифонным стояком	18	0,21	0	122,3 (1223)	-18005,9 (-180059)	116,80 (1168)	292,00 (2920)	1507,45 (15074,5)	1813,01 (18130,1)

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Для проведения сравнительных исследований интенсивности выделения сероводорода в канализационных перепадных шахтах различных типов (включая новую конструкцию шахты с сифонным стояком) были разработаны численная и физическая модели перепадной шахты. Численная модель учитывает конструктивные особенности перепадов, концентрацию сульфидов в исходной воде и скорость входного потока. Модель верифицирована с помощью лабораторного эксперимента на масштабной модели перепадной шахты. Данные эксперимента позволили получить калибровочные коэффициенты для дальнейшего исследования процесса массообмена на сооружениях реального масштаба в рамках численного моделирования. Результаты эксперимента и численного моделирования показали одинаковые закономерности газовыделения и значительное влияние конструкции перепада на выделение сероводорода в воздушное пространство шахты.

2. Экспериментально установлены закономерности интенсивности выделения сероводорода в канализационных перепадных шахтах различных типов (в 6 -ти типах шахт, включая конструкцию шахты с сифонным стояком). Лабораторные исследования показали, что максимальное выделение H_2S наблюдается в шахтах со спиральным лотком и многоступенчатым перепадом, а минимальная дегазация зафиксирована в конструкции с сифонным стояком. Подтверждено влияние расхода воды и концентрации сульфидов: чем ниже скорость входного потока и выше содержание сульфидов, тем интенсивнее газовыделение. Исключением стала шахта с поперечными балками, где дробление потока при росте скорости усиливает дегазацию.

3. С помощью Пи-теоремы получено безразмерное уравнение для оценки коэффициента массопередачи сероводорода от критерия Fr и соотношения концентраций сероводорода в исходной сточной воде и воздушном пространстве перепадной шахты. С помощью регрессионного анализа для каждого типа шахты определены коэффициенты a , m , n , позволяющие

количественно оценивать выделение H_2S в зависимости от режима эксплуатации.

4. Определены предельные значения критерия Fg для минимизации газовыделения. Руководствуясь максимальными концентрациями сульфидов, зафиксированных в системах водоотведения (42 мг/л) для каждой конструкции шахты были установлены значения критерия Fr , после которого коэффициент массопередачи стабилизируется и принимает минимальное значение. Показано, что снижение расхода сточных вод и увеличение высоты перепада приводят к росту коэффициента массопередачи. Достоверность зависимостей для коэффициента массопередачи подтверждена значительным объемом численных экспериментов для шахт с высотой перепада (15, 30 и 60 м), сравнением с данными экспериментальных наблюдений Yongsiri C., Pacheco, Namada N. F. и др., а также сравнением с теорией проникновения Хигби. Следует отметить, что полученные закономерности показали хорошую сходимость с данными экспериментальных наблюдений (95 %) и позволяют более точно, по сравнению с теорией проникновения, прогнозировать выделение сероводорода в широком диапазоне высоты перепада.

5. Предложена и обоснована конструкция перепадной шахты с сифонным стояком. По сравнению с другими типами перепадов шахта с сифонным стояком обеспечивает минимальное суточное выделение H_2S (18 кг/год против 4023 кг/год у шахты без технологического оснащения) и снижает скорость коррозии бетона до 0,21 мм/год (без капремонта за 50 лет).

6. Экономическая оценка износа сооружений (NPV) и затрат на очистку воздуха подтверждают преимущество сифонной конструкции, которая позволяет получить экономию средств в диапазоне от 16542.42 до 24694.45 тыс. руб. по сравнению с другими вариантами шахт.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в усовершенствовании численной модели перепадной шахты с учетом присутствия в потоке сточных вод смеси канализационных газов: сероводорода, метана, аммиака и углекислого газа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Лю, Х.** Исследование влияния конструкции перепадной шахты на процесс выделения сероводорода / Х. Лю // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 1. – С. 365–371 (0,83 п.л., авторский вклад 100 %).

2. **Лю, Х.** Оценка выделения сероводорода в канализационных перепадах / Л. Хао, С. В. Федоров, В. М. Васильев [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 3. – С. 64–71 (0,79 п.л., авторский вклад 80 %).

3. **Лю, Х.** Исследование выделения сероводорода в перепадной шахте со ступенчатым падением потока сточных вод / Х. Лю, А. В. Кудрявцев, В. В. Шабалин // Вестник гражданских инженеров. – 2026. – №1(114). – С. 86–96 (0,6 п.л., авторский вклад 80 %).

Статьи в журналах, входящих в Scopus

4. **Liu, H.** Research and Prevention of Harmful Gases in Special Structures of Urban Deep Drainage Systems / H. Liu // Water. Special Issue «Advances in Biological Technologies for Wastewater Treatment». – 2024. – Vol. 16(17), 2481. – URL: <https://doi.org/10.3390/w16172481> (дата обращения 01.04.2026) (1,25 п.л., авторский вклад 100 %)

5. **Liu, H.** Research and Analysis of Energy Dissipation in Spiral Channel Shaft / H. Liu, S. V. Fedorov // Advances in Ecology and Environmental Engineering: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. – Cham: Springer, 2024. – P. 193–202. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-64423-8_17 (0,45 п.л., авторский вклад 80 %).

6. **Liu, H.** Studying Release of Hydrogen Sulfide from Wastewater Flow in Drop Shaft / H. Liu, S. V. Fedorov // Lecture Notes in Civil Engineering. Vol 565. Proceedings of the 8th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. ICCATS 2024. – Cham: Springer, 2025. – P. 520–527 https://doi.org/10.1007/978-3-031-80482-3_49 (0,38 п.л., авторский вклад 80 %)

Публикации в других изданиях

7. **Лю, Х.** Численное моделирование многоступенчатых перепадных шахт / Х. Лю // Современные проблемы водоснабжения и водоотведения : Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 01–02 декабря 2022 года. – СПб.: СПбГАСУ, 2023. – С. 78–82 (0,14 п.л., авторский вклад 100 %).

8. **Лю, Х.** Численное моделирование шахты со спиральным лотком / Х. Лю, С. В. Федоров // Инженерные системы и городское хозяйство : Материалы Национальной (всероссийской) научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 20–24 марта 2023 года. – СПб.: СПбГАСУ, 2023. – С. 45–49 (0,15 п.л., авторский вклад 80 %).

9. **Лю, Х.** Анализ и исследование шахт различных конструкций / Х. Лю, С. В. Федоров // Новые достижения в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов : Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции, посвященной 210-летию со дня рождения выпускника Университета, инженер-генерала А.И. Дельвига, в продолжение традиционных Академических чтений РААСН, основанных академиком РААСН В.С. Дикаревским, Санкт-Петербург, 15–17 ноября 2023 года. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2024. – С. 104–107 (0,13 п.л., авторский вклад 80 %).

10. **Лю, Х.** Анализ и исследование выбросов сероводорода в канализационных перепадных шахтах различного типа / Х. Лю, С. В. Федоров // Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве : Сборник материалов II Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 24–28 марта 2025 года. – СПб.: СПбГАСУ, 2025. – С. 25–31 (0,27 п.л., авторский вклад 80 %).

Патенты, базы данных и программы для ЭВМ, имеющие госрегистрацию

11. **Лю Х.** Соединительный элемент для канализационного трубопровода : патент 202530665708.8 КНР : Промышленный образец / Лю Хао; заявитель и патентообладатель Лю Хао. – № 202530665708.8; заявл. 15.11.2025; опубл. 08.05.2026, CN 309971043 S (пер. с китайского) (0,01 п.л., авторский вклад 100 %).

Компьютерная верстка *О. Н. Комиссаровой*

Подписано к печати 09.10.2026. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 108.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А