

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет»

На правах рукописи

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

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Федоров Святослав Викторович

Санкт-Петербург – 2026 г.

Оглавление

Введение.....	4
1. Проблема выделения сероводорода в шахтах городских системах водоотведения. Обзор существующих исследований.....	11
1.1 Предпосылки и значимость исследования.....	11
1.1.1 Актуальность проблемы выделения токсичных газов в системах водоотведения	11
1.1.2 Значимость исследования	17
1.1.3 Разработка конструкции шахты с сифонным стояком	23
1.2 Уровень изученности перепадных шахт.....	27
1.2.1 Увлекающая способность падающего потока	28
1.2.2 Гидравлический режим перепадных шахт.....	29
1.2.3. Оценка интенсивности выделения сероводорода в перепадных канализационных шахтах	31
1.2.4 Оценка коррозии в перепадных шахтах.....	31
1.3 Современное состояние исследований образования и контроля сероводорода в системах водоотведения.....	33
1.3.1 Сероводород и его свойства.....	33
1.3.2 Образование сероводорода в системах водоотведения	35
1.3.3 Основные факторы, влияющие на образование сероводорода в системе водоотведения	37
1.3.4 Методы контроля сероводорода в системах водоотведения.....	40
1.4 Методы выявления сероводорода и обеспечения безопасности в системах водоотведения.....	42
1.4.1 Современные методы контроля газов в системах водоотведения	42
1.4.2 Современное состояние безопасности и мониторинга в системах водоотведения	43
Выводы по первой главе.....	47
2. Постановка вычислительного и лабораторного эксперимента.....	50
2.1 Определение условий моделирования.....	50
2.1.1 Выбор модели массообмена.....	52
2.1.2 Создание численной модели различных типов шахт	54
2.1.3 Создание расчетной сетки.....	56
2.1.4 Определение начальных и граничных условий моделирования	57
2.1.5 Анализ результатов модельного расчета	59
2.2 Модель массообмена.....	62
2.2.1 Теоретические основы массообмена.....	62

2.2.2 Теории массообмена.....	63
2.3 Конвективный массообмен и модель проникновения	67
2.4 Постановка лабораторного эксперимента.....	71
2.4.1. Описание лабораторной установки.....	71
2.4.2 Подготовка воды для эксперимента.....	76
2.4.3 Программа и методика проведения исследований	79
2.4.4 Результаты эксперимента	79
2.5 Сравнение результатов моделирования и эксперимента	83
Выводы по второй главе.....	85
3. Моделирование процесса выделения сероводорода в перепадных шахтах разного типа	87
3.1 Результаты модельного расчета коэффициента массопередачи	87
3.1.1 Анализ распределения объемной доли сероводорода в перепадной шахте	87
3.1.2 Анализ коэффициента массопередачи.....	91
3.2 Математическая обработка результатов с помощью Пи-теоремы	96
3.2.1 Получение безразмерных комплексов.....	96
3.2.2 Модель прогнозирования выделения сероводорода	98
3.3. Влияние типа перепадной шахты и режима работы на коэффициент массопередачи	99
3.4. Эксперимент в перепадной шахте канализационной сети.....	104
Выводы по третьей главе	110
4. Экономическая оценка эффективности применения новой конструкции перепадной шахты, за счет сокращения выбросов сероводорода	113
4.1 Объемы выделения сероводорода в перепадных шахтах	113
4.2 Влияние на износ сооружения интенсивности газовыделения	114
4.3 Сравнительная экономическая оценка воздействия сероводорода на эксплуатационные характеристики перепадных шахт различных типов	115
4.4 Оценка стоимости очистки воздуха в перепадной шахте	120
Выводы по четвёртой главе	124
Заключение.....	126
Список литературы	129
Приложение А	140
Приложение Б	147
Приложение В	148

Введение

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 [32]. 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 газовой среды наружу в городскую среду [16].

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, 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, L. Carrera, 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 сероводород.

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 стояком. 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.).

1. Проблема выделения сероводорода в шахтах городских системах водоотведения. Обзор существующих исследований

1.1 Предпосылки и значимость исследования

1.1.1 Актуальность проблемы выделения токсичных газов в системах водоотведения

Увеличение темпов урбанизации на фоне глобальных климатических изменений приводит к снижению пропускной способности городских систем водоотведения. Подобная ситуация приводит к обострению таких проблем в Китае, как частые подтопления городских территорий, значительное загрязнение окружающей среды, и как следствие ухудшению качества воды в реках и озёрах. Снижение эффективности работы систем водоотведения приводит к затруднениям в работе других инфраструктурных объектов городской среды и ухудшению качества повседневной жизни населения, что в конечном итоге, серьезно угрожает развитию городов и безопасности жизни и имуществу горожан [157,93].

Канализационные коллекторы, будучи неотъемлемой частью системы водоотведения, выполняют функцию сбора и транспортировки бытовых промышленных и ливневых сточных вод [88]. Условия эксплуатации трубопроводов характеризуются высокой влажностью, близкой к 100% [77], относительно постоянной температурой 15-20 °С [165], анаэробной средой с концентрацией растворенного кислорода ниже 0,2–2,0 мг/л [143] и высокой органической нагрузкой (ХПК 1000–20000 мг/л) [6,188], являющимися

исключительно благоприятными для развития и роста микроорганизмов [114]. В результате роста численности бактерий и их метаболической активности формируются различные типы зловонных загрязняющих веществ (сероводород, метан и т.д.) [131,53]. В таблице 1.1 представлены микроорганизмы и продукты их жизнедеятельности в канализационной системе.

Таблица - 1.1. Микроорганизмы-продуценты канализационных газов и запахов

Субстрат	Наименование одоранта	Типичная характеристика запаха	Основные микроорганизмы-продуценты
Серосодержащие соединения	Сероводород (H ₂ S)	Запах тухлых яиц	<i>Desulfovibrio</i> (род <i>Desulfovibrio</i>), <i>Desulfobulbus</i> , <i>Desulfomicrobium</i> , <i>Desulfatiferula</i> , <i>Desulforegula</i> , <i>Porphyromonas</i>
	Метилмеркаптан (CH ₃ SH)	Запах гнилой капусты / чеснока	<i>Porphyromonas</i> (напр., <i>P. gingivalis</i> , <i>P. gulae</i>), <i>Fusobacterium nucleatum</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Clostridium</i> , <i>Desulfovibrio</i>
	Диметилсульфид	Запах варёных овощей	<i>Pseudomonas</i> (напр., <i>P. fluorescens</i> , <i>P. acidovorans</i>), <i>Alcaligenes</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Methanomethylovorans</i> (циклическое использование)
	Диметилдисульфид	Чесночный запах	<i>Pseudomonas</i> (напр., <i>P. acidovorans</i> , <i>P. testosteroni</i>), <i>Alcaligenes faecalis</i> , <i>Corynebacterium</i> , <i>Lactobacillus</i>
Азотсодержащие соединения	Индол	Фекальный запах	<i>Escherichia coli</i> , <i>Proteus vulgaris</i> , <i>Vibrio</i> , <i>Bacteroides</i> , <i>Fusobacterium</i> , <i>Clostridium</i>
	Скатол	Резкий фекальный / тошнотворный	<i>Clostridium</i> (напр., <i>C. scatologenes</i> , <i>C. drakei</i>), <i>Lactobacillus</i> , <i>Bacteroides</i> , <i>Olsenella scatoligenes</i>

	Аммиак (NH ₃)	Резкий (едкий) запах	<i>Enterobacter</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Citrobacter</i> , <i>Proteus</i> , <i>Pseudomonas</i>
	Путресцин / кадаверин	Запах разлагающейся плоти	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia</i> , <i>Salmonella</i> , <i>Citrobacter</i> , <i>Klebsiella</i>

Накопление токсичных газов, в том числе сероводорода, в подводящем пространстве коллекторов и сооружений на сети создает опасность для обслуживающего персонала, а последующее выделение газов и запахов при вентилировании сети оказывает негативное воздействие на здоровье населения.

По мере дальнейшего ускорения урбанизации масштабы городских канализационных сетей ежегодно растут и расширяются, а следовательно, возрастают и риски, связанные с образованием и выбросами токсичных газов. По этой причине, закономерности выделения зловонных загрязнителей в трубопроводах и технологии их контроля должны находиться в фокусе широкого научного внимания [166,156].

Перепадная шахта в системе водоотведения является важным элементом, обеспечивающим транспортировку сточных вод из районных неглубоко заложенных сетей в глубинные магистральные коллекторы (тоннели), осуществляющие централизованное отведение городских стоков на станцию очистки. Перепадная шахта имеет специальное технологическое оснащение, обеспечивающее снижение энергии потока сточных вод в процессе транспортировки [172,117]. Нерациональное конструктивное решение способно приводить к неблагоприятным гидравлическим условиям, характеризующимся чрезмерной турбулизацией и дроблением падающего потока [8]. Это в свою очередь может вызвать усиленное выделение сероводорода в воздушную среду и

интенсифицировать процесс газовой коррозии железобетонных конструкций шахт и тоннелей [129]. Разрушение стенок шахт и тоннелей может приводить к просадкам грунта и возникновению техногенных аварий, создавая серьезную угрозу развитию города и безопасности жизни и имущества населения [46]. Поэтому проведение исследований с целью оценки влияния условий транспортировки сточных вод в типовых перепадных шахтах на интенсивность выделения сероводорода в магистральных системах водоотведения имеет важное практическое значение для совершенствования рекомендаций проектирования в соответствии с требованиями по созданию надежных, энергоэффективных и экологически безопасных инженерных систем [105,145].

Весьма остро проблема дегазации сточных вод стоит в системах водоотведения Китая. Развитие городов и инженерных систем ведется с большой скоростью. Так, например, общая протяженность канализационной сети Пекина на сегодняшний день превысила 3800 км, из которых около 1700 км составляют сети бытовой канализации, около 1400 км — ливневая канализация, и более 700 км — общесплавная сеть [90]. Тенденция роста протяженности водоотводящих трубопроводов в Китае представлена в табл. 1.2. Сведения о развитии канализационных сетей в ключевых городах Китая, опубликованные в открытом доступе в сети Интернет (по состоянию на 2023 год) и приведены в табл. 1.3.

Таблица - 1.2. Тенденция роста суммарной протяженности городских водоотводящих трубопроводов в Китае (2021–2023 гг.)

Год	Суммарная протяженность городских водоотводящих трубопроводов по стране (10 ⁴ км)	Годовой прирост, %
2021	87,23	—
2022	91,35	4,73 %
2023	95,25	4,27 %

Таблица - 1.3. Статистика по строительству канализационных/водоотводящих сетей в отдельных ключевых городах Китая в 2022–2023 гг.

Город	Год	Общая протяжённость водоотводящих/канализационных трубопроводов (км)	Строительство сетей за год (км)	Годовой прирост
Пекин	2023	29 929	990	3,42 %
Гуанчжоу	2023	32 668	488	1,5 %
Ухань	2023	14 223	586	4,3 %

Достаточно часто как в Китае, так и за рубежом происходят случаи отравлений и разрушений, вызванных воздействием скапливающегося в системах канализации сероводорода.

Например, 14 июня 2024 года сотрудники компании по охране окружающей среды в высокотехнологичном промышленном парке зоны экономического и технологического развития Цзия в районе Цзинхай города Тяньцзинь проводили осмотр и очистку сети водосточных труб. В этот момент в воздушное пространство сети мгновенно выделился сероводород, что привело к смерти одного сотрудника, еще один получил серьезное отравление [58].

В 2005 г. в г. Ханьдань при обслуживании сооружений очистки сточных вод погибло от удушья 5 человек: 2 работника по техническому обслуживанию и 3 пожарных при их спасении. В результате проведения расследования, причиной гибели сотрудников была установлена высокая концентрация сероводорода в приемном резервуаре сточных вод 500-700 мг/л [171].

В 2005 и 2006 гг. в г. Цемо (Синьцзян) последовательно произошло несколько крупных инцидентов с гибелью и тяжелыми травмами сотрудников службы эксплуатации. В результате отравлений сероводородом зафиксирована гибель 24 человек [87].

В 2010 г. городе Арлингтон, штат Техас, обследование более чем 200 смотровых колодцев показало, что коррозия, вызванная сероводородом, приводит к серьезной структурной деградации. В зонах падения потока при возникновении гидравлических прыжков резко возрастает выделение сероводорода, что вызывает разрушение бетона и оголение арматуры. Высокие температуры летом повышают концентрацию сероводорода, ускоряя процесс разрушения, который в конечном итоге может привести к просадке дорожного покрытия и чрезвычайным ситуациям [169].

Учитывая вышесказанное, следует отметить, что образующийся в сетях водоотведения сероводород остается наиболее серьезной и актуальной проблемой, затрудняющей безопасную эксплуатацию сооружений. Наиболее интенсивно процесс дегазации сточных вод наблюдается в перепадных шахтах [96], где в результате падения происходит интенсивное выделение сероводорода в воздушную среду и нагнетание газовой смеси в нижележащий, принимающий сток, коллектор.

Интенсивная дегазация сточных вод и наличие избыточного давления газовой смеси в нижнем бьефе перепадной шахты приводит к выдавливанию загрязненного воздуха в окружающую городскую среду через близлежащие смотровые шахты и колодцы [68], что ухудшает состояние атмосферного воздуха и угрожает здоровью населения. Поэтому вопросы мониторинга, контроля и предупреждения высоких концентраций сероводорода в сети нельзя игнорировать и необходимо рассматривать с высокой степенью приоритетности.

Однако, в настоящее время, исследования процесса выделения токсичных и опасных газов в специальных сооружениях городских систем водоотведения весьма ограничены. Недостаточно изучен вопрос контроля и управления выбросами сероводорода применительно к перепадным шахтам [74,104]. Исследования зарубежных ученых показывают, что концентрации выбросов сероводорода в подобных сооружениях могут быть весьма высокими. По данным ученых [69] концентрации сероводорода фиксировались в диапазоне 50 - 1000 мг/л. Также интерес вызывают работы по мониторингу выбросов сероводорода вблизи функционирующих перепадов. Значение концентрации в окружающей среде вблизи люков составляло 10-100 мг/л [112].

Представленные работы по мониторингу функционирования перепадных шахт указывают на то, что процесс дегазации потока сточных вод достаточно сложен и зависит от множества факторов, включая тип сооружения, содержание сульфидов в сточных водах, температуры, степени турбулизации и дробления потока [62]. Изучение комплексного влияния данных факторов позволит определить условия работы сооружения, исключающие интенсивный выброс сероводорода.

1.1.2 Значимость исследования

Перепадная шахта достаточно часто встречается в системах водоотведения и является важным структурным элементом, обеспечивающим объединение расходов сточных вод от разных кварталов и районов города в единую централизованную систему транспортировки сточных вод. По этой причине

данное сооружение является весьма важным для реализации технологии работы всей системы водоотведения в целом и выход его из строя может создать крупную техногенную аварию, способную нанести существенный ущерб экологическому благополучию окружающей природной среды. В современной инженерной практике используется множество различных конструкций перепадных шахт. На рис. 1.1 представлены наиболее часто встречающиеся конструкции перепадов. Каждый вариант обладает рядом достоинств и недостатков при эксплуатации. В случае высоты перепада менее 3 м можно применять водослив практического профиля (рис. 1.1, а), который характеризуется простотой и надежностью конструкции, однако требует устройства водобойного колодца в нижнем бьефе [19], а это может значительно удорожать сооружение. Кроме этого, в процессе стекания потока формируется большая площадь контакта с воздушной средой, вовлекающая ее в движение. Наличие гидравлического прыжка приводит к сильной аэрации потока сточных вод и интенсификации массообменных процессов. Чтобы снизить аэрацию потока может быть рассмотрен вариант закрытого водосброса, выполненного в виде сифона [83].

Быстроток (рис. 1.1, б) представляет собой участок коллектора, который прокладывается с большим уклоном, определяемым условиями строительства [20]. Движение потока на быстротоке сопровождается большими скоростями, что приводит к увеличению длины гидравлического прыжка и сильной аэрации потока [15].

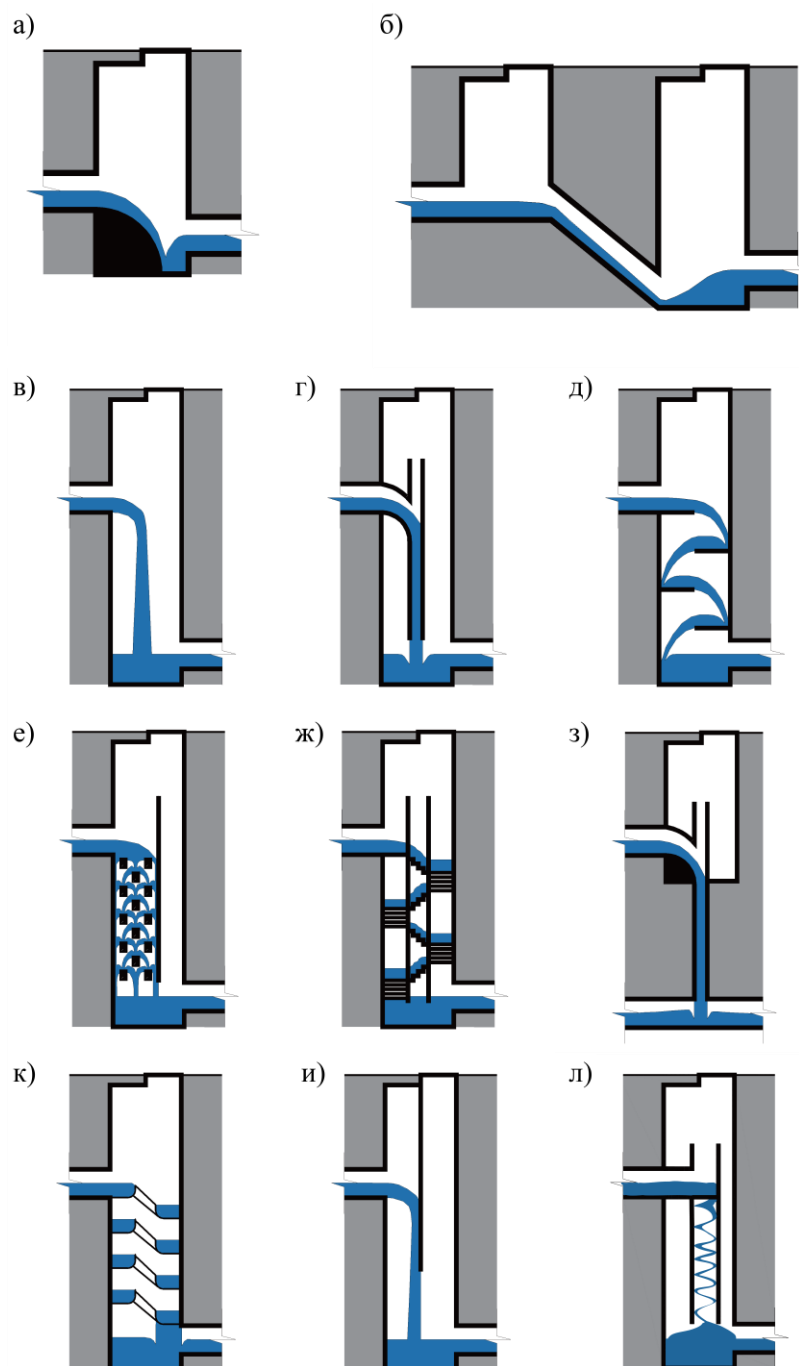


Рисунок 1.1 - Варианты конструкций канализационных перепадов [10]

В случае значительных перепадов наиболее экономичным вариантом является использование вертикальных перепадных шахт. Самым простым технологическим решением будет отсутствие внутри шахты какого-либо инженерного оснащения, обеспечивающего пропуск потока в нижний бьеф (рис. 1.1, в). Поток сточных вод, попадая в ствол шахты, сразу падает вниз, подобно

водопаду, либо стекает по стенке шахты [27]. К данному варианту также можно отнести конструкции с отбойной стенкой, касаясь которой поток стекает вниз (рис. 1.1, и). В работе [133] проводится оценка совместного движения воды и воздуха, и показано, что подобное решение, при устройстве каскада из данных перепадов, более эффективно по сравнению с устройством одиночной шахты большой глубины.

Устройство шахт с вертикальным трубопроводом (рис. 1.1, г) позволяет достаточно компактно транспортировать поток на большую глубину. Внутри стояка образуется кольцевое движение потока [1]. За счет увлекающей способности потока происходит захват воздушной среды в верхней части стояка и нагнетание ее в нижележащий коллектор. Захват воздуха в стояк приводит к сильной аэрации потока еще при движении по трубопроводу [174]. Падение потока в стояке сопровождается значительными изменениями давления, что приводит к сильной вибрации и значительному износу стенки трубы [37].

Эффективным гашением энергии падающего потока характеризуются конструкции многоступенчатых перепадов (рис. 1.1, д) [24]. За счет гашения энергии на каждой ступени значительно уменьшается нагрузка на водобойный колодец нижнего бьефа. Кроме этого, в данной конструкции наблюдается меньшее дробление и аэрация потока. В работе [132] устанавливается оптимальная величина высоты ступени перепада, обеспечивающая эффективное гашение энергии. Следует отметить, что минимальная высота ступени позволит получить наименьшее дробление и аэрацию потока [10].

Похожий принцип гашения энергии реализуется в конструкции с

поперечными балками (рис. 1.1, е), которые располагаются поперек шахты и обеспечивают частичное торможение и дробление потока [84]. Существенным недостатком является сильное дробление потока и интенсификация массообменных процессов в шахте.

В инженерной практике Китая встречаются конструкции перепадов со спиральным ступенчатым лотком (рис. 1.1, ж) [21]. Также можно отметить использование шахт, где используется гладкий спиральный лоток (рис. 1.1, к) [55]. В процессе движения энергия потока достаточно эффективно затрачивается на преодоление трения о боковую стенку шахты и ступенчатую шероховатость лотка [10].

Близким по характеру движения к спиральному лотку является перепадная шахта с вертикальным стояком к которому поток подводится тангенциально (рис. 1.1, л) [71]. Закручивание потока в стояке позволяет получить более длительную траекторию падающего потока и снижение его энергии.

Напоследок, можно рассмотреть конструкцию перепада, представляющую собой трубчатый стояк, который подключается к шельге нижележащего коллектора (рис. 1.1, з). Гашение энергии падающего потока обеспечивается за счет соударения его с потоком сточных вод в нижнем бьефе. Характер движения потока в стояке аналогичен конструкции (рис. 1.1, г) [10]. Значительным недостатком является сильная загазованность принимающего коллектора и его подтопление на участке, находящемся выше по течению от точки подключения стояка.

Безусловно, основным функциональным назначением представленных

сооружений является сопряжение канализационных коллекторов при условии максимального гашения энергии падающего потока. Однако, сильная турбулизация и эжектирование воздушной среды осложняет процесс, интенсифицируя дегазацию канализационных газов. В таблице 1.4 представлена статистика по количеству перепадных шахт в некоторых крупных городах мира. Принимая во внимание значительное количество подобных сооружений в городской канализации, важно отметить, что дегазация сточных вод приводит к ежедневному формированию большого объема токсичных газов, которые необходимо подвергать очистке.

Таблица 1.4 - Количество перепадных шахт в системах водоотведения

Город	Наименование проекта	Общее число шахт	Диапазон глубин (м)	Типы шахт
Сингапур	Глубокая туннельная канализационная система	~90	20–60 м	рис. 1.1 л/в/з...
Лондон	Туннель Thames Tideway	~24	30–66 м	рис. 1.1 ж/а/б
Гуанчжоу	Проект глубоко заложенных магистральных тоннелей	4 (первая очередь) / 63 (план)	40–50 м	рис. 1.1 к/д
Шэньчжэнь	Система водоотведения района Цяньхай	~5–7	40–106 м	рис. 1.1 в/и
Чжэнчжоу	Комплексный подземный коридор коммуникаций	>20	8–15 м	рис. 1.1 в/е/г

Руководствуясь данными работ [147,126,164] в таблице 1.5 представлены данные об ежесуточных объемах сероводорода, образующегося в сетях водоотведения.

Таблица 1.5 - Объем сероводорода в сетях водоотведения

Город	Объем сероводорода м ³ /сут	Средняя концентрация в системе, газовая фаза (ppm*), жидкая фаза (мг/л)	Скорость коррозии, мм/год	Увеличение протяженности сети за последние 5 лет.
Сидней (Sydney), Австралия	~1200 – 1500 м ³ /сут	Газовая фаза: 10–50 ppm (пиковые значения > 100 ppm) Жидкая фаза: 2–10 мг/л	1,0–3,0 мм/год	+861 км
Лос-Анджелес (Los Angeles), США	~3000 – 4000 м ³ /сут	Газовая фаза: 20–100 ppm (пиковые значения > 300 ppm) Жидкая фаза: 3–6 мг/л	2.5 – 3.5 мм/год	+420 км
Эдмонтон (Edmonton), Канада	~400 – 600 м ³ /сут	Газовая фаза: 5–25 ppm (в зоне перепада > 50 ppm) Жидкая фаза: 0,5–3 мг/л	~5.0 мм/год	+600 км

*1ppm=1mg/L

Принимая во внимание статистические данные, следует отметить, что вопросы мониторинга и контроля образования сероводорода в перепадных шахтах имеет приоритетное значение для благополучия и безопасности городской среды. С целью снижения интенсивности газовыделения, прогноза ожидаемого объема сероводорода и подбора оборудования для очистки загрязнённого воздуха в рамках настоящей работы следует провести углубленное исследования по влиянию конструкции перепадных шахт на рассматриваемый процесс.

1.1.3 Разработка конструкции шахты с сифонным стояком

В системах глубокого тоннельного водоотведения или городских

канализационных сетях высоконапорные перепады воды часто сопровождаются гашением кинетической энергии и сильным водовоздушным перемешиванием. Такой высокотурбулентный режим течения не только оказывает мощное механическое воздействие на дно шахты, но и значительно увеличивает площадь контакта между водой и воздухом, что приводит к обильному выделению и десорбции растворенных в воде летучих вредных газов (например, H_2S). Для исключения указанных факторов и обеспечения плавного движения потока, в том числе в условиях минимального притока сточных вод, предлагается использовать конструкцию шахты с сифонным стояком. (Рис. 1.2). Основная концепция данной конструкции заключается в использовании принципа сифонирования для преобразования открытого свободного падения потока в закрытое напорное полнотрубное течение.

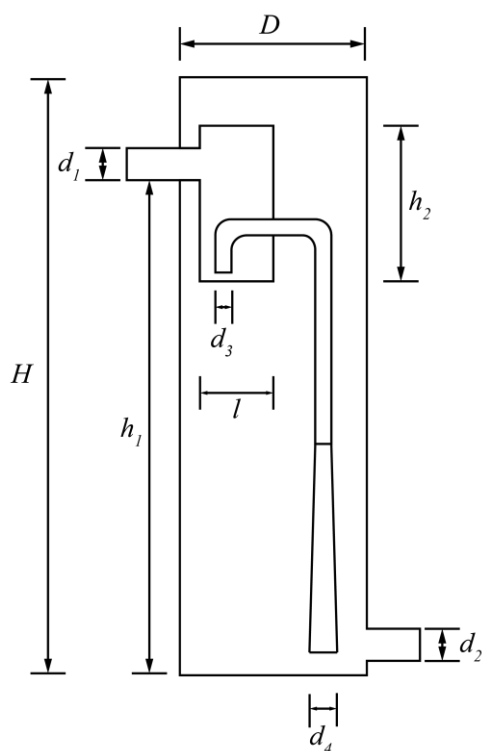


Рисунок 1.2 – Схема шахты с сифонным стояком

Кроме того, важным фактором снижения степени газовыделения выступает скорость движения потока [81], которую необходимо снижать по мере движения потока к нижнему бьефу, что позволит исключить формирование сильнотурбулентного течения в водобойном колодце. Исследование LANAV O. , SUN L. и др. [81, 146] показало, что снижение скорости потока в трубе и интенсивности турбулентности может способствовать снижению выбросов сероводорода. Так в результате уменьшения скорости потока в трубе с 0,96 м/с до 0,65 м/с позволило сократить концентрацию сероводорода с 22 мг/л до 5 мг/л в воздушном пространстве трубопровода. В связи с этим в случае с сифонным трубопроводом может быть предложено увеличение диаметра нижней части сифонного стояка, подводящего воду к водобойному колодцу. Увеличение площади живого сечения на выходе замедлит скорость выходящего потока, а наличие водяной подушки смягчит удар потока о дно шахты. Для оценки влияния диаметра сифона проводился эксперимент с двумя видами конструкции стояка: с постоянным диаметром трубы и сифоном, у которого сечение трубы на выходе увеличивается на 50% относительно диаметра входного сечения. Основные параметры конструкции сифона приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 Характеристики модели шахты с сифонным стояком

шахта с сифонным стояком (постоянного сечение)	размер камеры зарядки сифона	длина сифона	диаметр сифона (вход)	диаметр сифона (выход)	скорость потока на выходе
	0,06×0,1×0,12 м	0,87 м	0,020 м	0,020 м	0.2 м/с
шахта с сифонным стояком постоянного сечение (диаметр на выходе увеличен на 50%)	размер камеры зарядки сифона	длина сифона	диаметр сифона (вход)	диаметр сифона (выход)	скорость потока на выходе
	0,06×0,1×0,12 м	0,87 м	0,020 м	0,040 м	0.05 м/с

Эксперименты показали снижение газовыделения сероводорода на 82% для второго варианта (рисунок 1.3). В данном случае скорость потока на выходе снизилась до 0,05 м/с, что позволило снизить концентрацию сероводорода в воздушном пространстве шахты с 10,78 до 1,90 мг/м³. Полученный результат подтверждает эффективность предложенной конструкции сифона, работа которой может быть оценена в сравнении с существующими вариантами перепадных шахт.

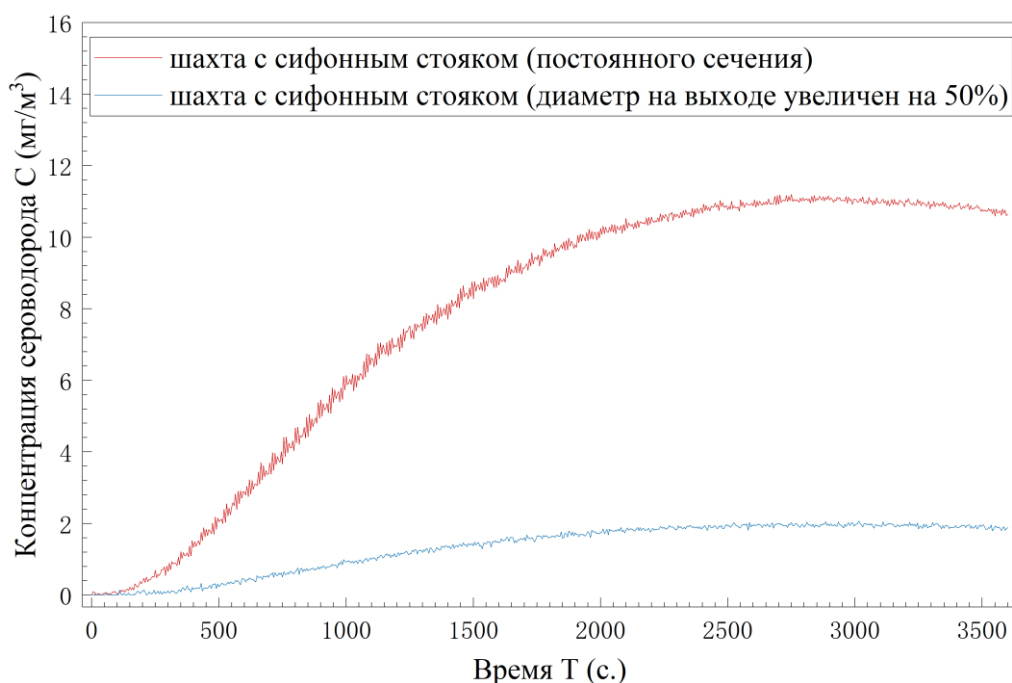


Рисунок 1.3 – Сравнение концентрации сероводорода до и после изменения диаметра трубопровода сифонного стояка.

Выпускное отверстие сифонного водоспускного трубопровода расположено в нижней части шахты и в условиях реальной эксплуатации постоянно находится под определенным слоем воды (затоплено), за счет чего на конечном участке формируется естественный гидравлический затвор. При поступлении притока из вышележащего участка в водоприемную камеру и затоплении входного отверстия трубы внутри водоспуска происходит быстрое

удаление воздуха с образованием разрежения, что инициирует сифонный эффект. В этот момент движение воды в водоспускном трубопроводе полностью переходит от смешанного падения со свободной поверхностью к однофазному напорному полнотрубному течению.

Согласно двухпленочной теории массопередачи [144] на границе раздела газ-жидкость такое изменение режима течения исключает образование поверхности раздела фаз в процессе падения жидкости, в результате чего удельная площадь контакта газ-жидкость стремится к нулю. В то же время стабильное полнотрубное гидродинамическое поле существенно снижает интенсивность турбулентности потока, уменьшая коэффициент массопередачи в жидкой пленке. За счет ликвидации физической границы раздела и подавления турбулентности сифонная конструкция стояка может снижать интенсивность десорбции сероводорода.

1.2 Уровень изученности перепадных шахт

Изучение функционирования перепадных колодцев и шахт с целью обеспечения требуемой пропускной способности, надежности и износостойкости началось еще в прошлом веке. Развитие систем водоотведения в крупных городах всегда требовало научного обоснования и расчета гидравлических характеристик потока, мероприятий по гашению кинетической энергии, подбору материалов и технологических решений, обеспечивающих повышенный износ конструкции, связанный с коррозионным процессом. Кроме

этого, отдельно следует отметить, направления, связанные с изучением двухфазных потоков «вода-воздух» с целью оценки гидравлических характеристик и работы, нацеленные на изучение массообменных процессов, протекающих при контакте загрязненного потока с воздушной средой. Кратко рассмотрим результаты исследований доступные на текущий момент.

1.2.1 Увлекающая способность падающего потока

Падение капельного потока передает импульс воздушному, создавая градиент давления по высоте перепадной шахты, что оказывает влияние на скорость движения воздушной среды в системе канализации в целом. Экспериментальные исследования [178] показали, что на величину давления в нижнем отводящем трубопроводе оказывают влияние скорость потока воды, высота перепада, наличие вентиляции и условия выхода из шахты (наличие подтопления отводящего коллектора). Нарушение целостности потока и наличие ударного воздействия в водобойном колодце является причинами формирования градиента давления по высоте шахты. За счет увлекающей способности потока в верхней части шахты формируется отрицательное давление [103], которое постепенно увеличивается и становится избыточным в нижнем бьефе. Руководствуясь результатами работы [159] следует отметить значительное влияние расхода падающего потока на величину градиента давления. Так результаты эксперимента показывали, что увеличение расхода с 18 л/с до 33 л/с способствует возрастанию градиента давления с 5 до 50 Па/м. При расходах

более 38 л/с фиксировался градиент свыше 160 Па/м.

В работе [128] представлена зависимость для оценки расхода увлекаемого воздуха Q :

$$\frac{Q}{Q_w} = A' Q_w^{*B'} \quad (1.1)$$

где A' и B' - параметры, которые зависят от типа перепадной шахты, соотношения высоты перепада H к диаметру шахты D , а также от их фактического значения.

Для условия, что капли воды имеют одинаковый размер d была разработана теоретическая зависимость между градиентом давления и состоянием потока воды:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{3Q_w}{\pi D_{MH}^2 d} C_d \rho V_d \left(1 - \frac{V_{MH}}{V_d}\right)^2 \quad (1.2)$$

где z – вертикальная координата; V_d – конечная скорость капли воды; V_{MH} – скорость воздуха в перепадной шахте; C_d - коэффициент сопротивления между воздушным потоком и каплей воды.

1.2.2 Гидравлический режим перепадных шахт

Многочисленные исследования [43, 109, 124] показывают, что число Фруда (Fr) является ключевым параметром, определяющим гидравлические характеристики перепадной шахты. При анализе работы перепадной или водосбросной шахты руководствуются критерием Fr с учетом высоты

сооружения [43]. Рассмотрим основные диапазоны критерия Fr и характерное для них состояние водного потока. В случае $Fr < 1$ наблюдается преимущественно субкритический режим, при котором свободная поверхность будет сравнительно спокойной, а дробление потока и вовлечение воздушной среды проявляется слабо [43]. В диапазоне критерия $Fr \approx 1-1.5$ наблюдается около критическое состояние потока, когда заметно усиливаются колебания свободной поверхности, происходит локальное разрушение потока и вовлечение воздушной среды. Данное значение критерия можно считать начальным пороговым значением при определении коэффициента массообмена [109]. При значениях $Fr \approx 1.5-2.5$ проявляются наиболее типичные условия при шахтном водосбросе, когда присутствует интенсивное дробление и обновление свободной поверхности потока и происходит значительное вовлечение в процесс движения воздушной среды. Так в работе [124] при изучении тангенциального перепада использовались условия движения потока при значениях $Fr = 1.77, 2.01, 2.18, 2.32$. При дальнейшем возрастании критерия $Fr \approx 2.5-5$ возникают условия сверхвысокого дробления и аэрации потока. Обычно такие условия присутствуют в нижнем бьефе, где происходит гашение энергии потока в водобойном колодце и формирование гидравлического прыжка. Например, в работе [124] при исследовании аэрации гидравлического прыжка рассматривался диапазон $2.4 < Fr_1 < 5.1$.

Руководствуясь вышесказанным, можно отметить, что оценку изменения коэффициента массообмена в условиях перепадных шахт имеет смысл производить для диапазона критерия $Fr=0.8-5.0$, позволяющего учесть все

варианты состояния потока.

1.2.3. Оценка интенсивности выделения сероводорода в перепадных канализационных шахтах

Скорость выделения сероводорода можно оценить с использованием коэффициента массопередачи, применяя методику, представленную в работе [175], где величина удельного массового расхода определяется как:

$$J = K \times C_A \quad (1.3)$$

где, K - коэффициент массопередачи, C_A - Концентрация сульфида в воде

Для оценки суточного выделения сероводорода в перепадной шахте необходимо руководствоваться площадью поперечного сечения шахты с целью упрощения расчета [36]. Поскольку наиболее часто применяется круглая форма шахты, то площадь сооружения вычисляется по следующей зависимости:

$$A = \pi r^2 \quad (1.4)$$

Тогда массовый расход сероводорода в поперечном сечении шахты будет равен:

$$W = J \times A \quad (1.5)$$

Умножая полученный расход на количество секунд в сутках, можно оценить среднесуточную массу сероводорода:

$$M = W \times s = W \times 86400 \quad (1.6)$$

1.2.4 Оценка коррозии в перепадных шахтах

Исследования показывают, что при концентрации сульфидов выше 2 мг/л

[50] возможно развитие коррозии железобетонных трубопроводов. Во многих странах канализационные сети испытывают проблемы коррозии, обусловленной H_2S . В США H_2S в канализационных трубопроводах ежегодно вызывает коррозию на уровне 1–10 мм, что приводит к экономическим потерям до 14 млрд долларов. В Китае большая часть канализационных трубопроводов была построена начиная с 1950-х годов, причем значительная часть — из бетона, и во многих трубопроводах постоянно проявляются коррозионные явления [57]. Лю Хуапин и др. [94] с применением технологий телевизионной диагностики трубопроводов (CCTV) детально обследовали коррозионное состояние репрезентативных участков канализационных сетей и установили, что практически во всех обследованных трубах присутствуют коррозионные повреждения различной степени, вызванные сероводородом, причем во многих случаях — весьма тяжелые [31].

В работе [22] отражается влияние конструкции сети и сопрягающих сооружений на протяженность участков влияния биологической коррозии. При перепаде от 1D до 3D зона влияния в нижележащем коллекторе варьируется в диапазоне от 150D до 300D. В подводящем коллекторе коррозия проявляется в меньшей степени, и зона влияния находится в диапазоне от 10D до 30D.

Для оценки средней скорости развития коррозии бетона труб $v_{к.б}$ в мм/год может быть использована зависимость, представленная в работе [7]:

$$mv_{к.б} = 0,073 \cdot H_2S_{пов} + 0,136 \quad (1.7)$$

$H_2S_{пов}$ — концентрация сероводорода в атмосфере сооружения, мг/м³.

1.3 Современное состояние исследований образования и контроля сероводорода в системах водоотведения

1.3.1 Сероводород и его свойства

Значительное время транспортировки сточных вод в сети ($T = 2-6$ час [79,189]) в анаэробных условиях придает коллектору свойства биологического реактора, в котором происходит деструкция органических соединений и образование сероводорода [106]. Сульфид водорода (H_2S) является чрезвычайно токсичным газом. Сероводород немного тяжелее воздуха, поэтому он накапливается в низменностях или подземных пространствах. Различные подземные сооружения, коллекторы и технологические камеры являются ожидаемыми местами, где может встречаться сероводород. Чрезмерное накопление в канализационных сетях приводит к нарушению санитарной безопасности системы [89].

Сероводород (H_2S) является типичным зловонным веществом: при низких концентрациях ощущается запах тухлых яиц, при крайне низких — серный запах [142]. Исследования многих ученых подтверждают факт того, что H_2S является одним из ключевых веществ, обуславливающих зловонные выбросы из канализационных трубопроводов [47]. Запах и пары H_2S , легко вызывают утомление и головокружение, а при распространении в воздухе существенно снижает качество жизни населения в прилегающих районах [44].

Кривая «воздействия — отклика» (рис. 1.4) у H_2S весьма крутая, по этой причине он может вызвать мгновенную потерю сознания уже при довольно низкой концентрации (от 250 мг/л). Вдыхание даже низких концентраций

человеком может вызывать острое отравление и хронические поражения органов дыхания. Токсические уровни концентраций приведены в табл. 1.7 [49,130,170]. Острое отравление сероводородом подразделяют на три степени: легкую, среднюю и тяжелую. При легкой степени отмечаются светобоязнь, слезотечение, резь в глазах, ощущение инородного тела, насморк, жжение в носу и глотке; также возможны легкие головокружение, головная боль и слабость. При средней степени симптомы возникают немедленно: головокружение, головная боль, слабость, тошнота, рвота, атаксия; возможны кратковременные нарушения сознания, а также раздражение слизистой дыхательных путей и глаз.

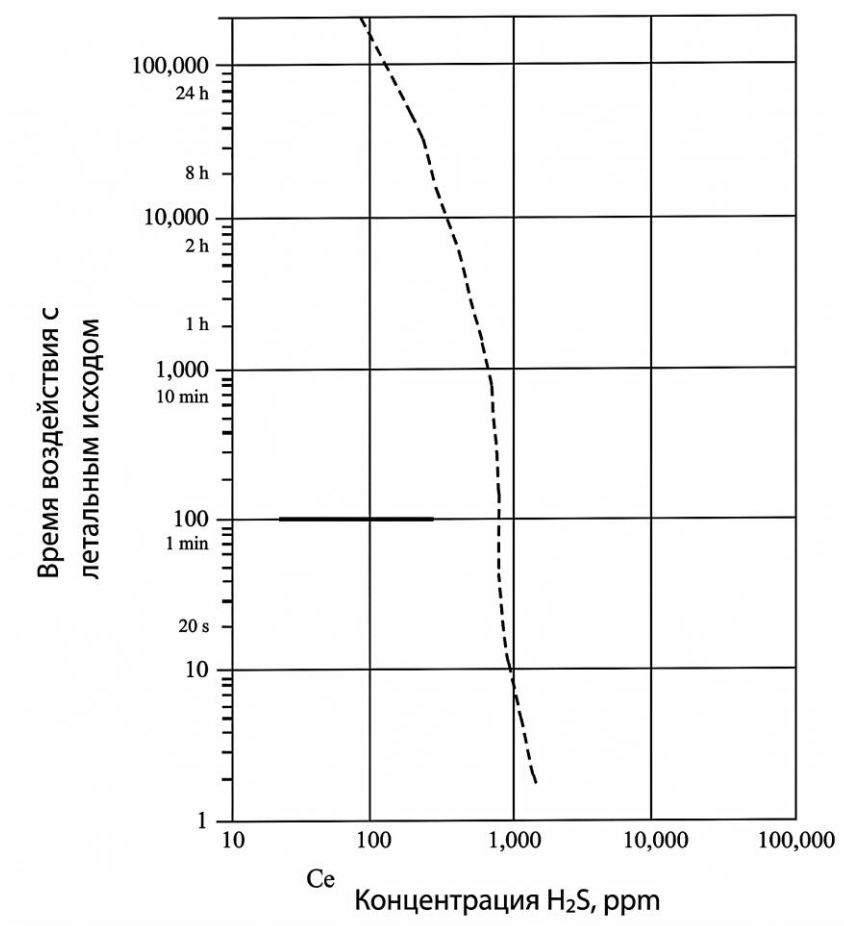


Рисунок 1.4 - Кривая зависимости времени наступления летального исхода от концентрации H_2S [60].

При тяжелой степени проявляются выраженные симптомы со стороны

центральной нервной системы: сначала — головокружение, сердцебиение, одышка, замедленность движений; затем — возбуждение, спутанность сознания, рвота, диарея, боли в животе и судороги, быстрое развитие комы и, в конечном счете, смерть вследствие паралича дыхания [135]. При контакте с чрезвычайно высокими концентрациями сероводорода возможно «электрошоковое» отравление: пострадавший внезапно падает, в течение нескольких секунд дыхание прекращается. Длительное повторяющееся вдыхание определенного количества сероводорода может приводить к снижению обоняния, а также к развитию астеноневротического синдрома и расстройств вегетативной нервной системы [158,92]. В Китае инциденты отравления сероводородом происходят нередко; по статистике, в последние годы число инцидентов с H_2S достигло 120, а число пострадавших — 656 человек, что вызывает особое внимание к решению проблемы [186,171].

Таблица 1.7 - Токсические уровни концентрации сероводорода

Эффект	Концентрация (ppm*)
Раздражающий запах («тухлые яйца»)	3-10
Головная боль, тошнота, раздражение горла и глаз	10-50
Поражение глаз	50-100
Конъюнктивит, поражения дыхательных путей, утрата обоняния	100-300
Отёк лёгких	300-500
Остановка дыхания	500-1000
Летальный исход	1000-2000

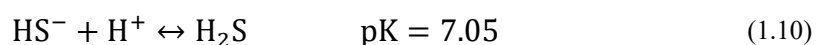
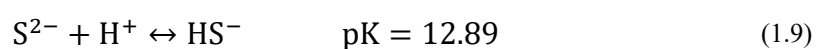
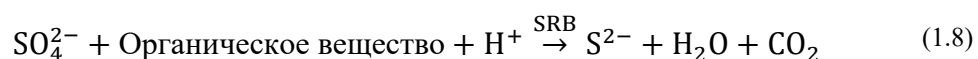
*1ppm=1mg/L

1.3.2 Образование сероводорода в системах водоотведения

В городской системе водоотведения одновременно протекают сложные биохимические и физико-химические процессы [161]. Движение сточных вод в

коллекторе является гетерогенной двухфазной многокомпонентной системой [4]. В качестве основной фазы выступает сточная вода, которая несет в себе взвесь, органические и минеральные загрязнения, а также биомассу. Основными участниками серного цикла являются сульфатвосстанавливающие бактерии (Sulfate Reducing Bacteria, SRB), которые преимущественно относятся к гетеротрофным и смешанно-трофным микроорганизмам [85]. Под действием аэробных микроорганизмов растворенный кислород в воде быстро потребляется, вследствие чего среда в системе водоотведения становится анаэробной. Одновременно сточные воды содержат различные серосодержащие вещества, такие как сульфаты, белки, аминокислоты и др., что создает благоприятные условия для роста и метаболизма SRB [97,61]. H₂S в основном образуется SRB в биопленке и отложениях на дне и стенках трубопроводов [120,119].

Основными донорами электронов при восстановлении сульфата служат легко биodeградируемые органические вещества в сточных водах либо летучие жирные кислоты (Volatile Fatty Acid, VFA), формирующиеся в результате ферментации. Процесс образования H₂S представляется следующим образом [138,66]:



1.3.3 Основные факторы, влияющие на образование сероводорода в системе водоотведения

Содержание сульфидных частиц внутри потока сточных вод постоянно изменяется. С одной стороны, активные микроорганизмы в ходе роста и метаболизма преобразуют серосодержащую органику в новые порции сульфид-ионов, с другой стороны — в процессе движения потока сточных вод уже имеющийся молекулярный сероводород может легко растворяться в жидкой фазе, либо выделяться в воздушное пространство. Образование молекул сероводорода в потоке определяется рядом условий: pH среды, температурой, концентрацией органических соединений, а также метаболической активностью микроорганизмов [140].

Из уравнений 1-1, 1-2 и 1-3, следует, что сульфиды в сточных водах существуют преимущественно в трех формах: сульфид-ион (S^{2-}), гидросульфид-ион (HS^-) и молекулярный сероводород (H_2S). Взаимные превращения этих форм тесно связаны со значением pH среды (рис. 1.5).

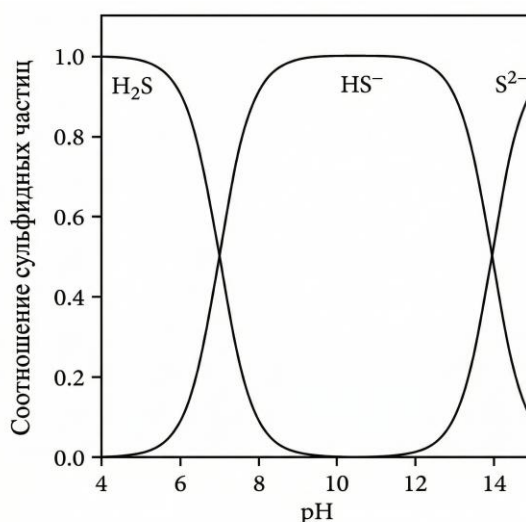


Рисунок 1.5 - Видовое распределение сульфидов при различных значениях pH среды [183]

Оптимальная температура роста SRB составляет 22–23 °C. Доля SRB среди микробных сообществ и их метаболическая активность неизбежно влияют на скорость превращения сульфата в сульфиды. Температура также влияет на формы существования сернистых ионов в сточных водах: при увеличении температуры воды на 7 °C количество образующихся сернистых ионов удваивается; при температуре воды выше 15 °C подавляющая часть сернистых ионов существует в форме молекулярного сероводорода [134]. Исследования Nielsen [94] и др. также показали, что при повышении температуры сточных вод способность микроорганизмов потреблять кислород существенно возрастает, что облегчает формирование анаэробного состояния и усиливает образование сульфидов.

Органические вещества, используемые SRB в сточных водах, в основном представлены биodeградируемым органическим веществом (Biodegradable Organic Matter, BOM). BOM может служить электронным и водородным донором для реакции восстановления сульфата и является необходимым субстратом для роста биопленки на стенках канализационных труб. Исследования показали, что этанол, уксусная кислота, пропионовая кислота, глюкоза, молочная кислота и другие органические вещества способны ускорять восстановление сульфата микроорганизмами [118]. Поэтому концентрации сульфидов в трубопроводах, собирающих промышленные сточные воды с повышенным содержанием BOM, выше, чем в трубопроводах, транспортирующих бытовые сточные воды [70].

Окислительно-восстановительный потенциал (Oxidation-Reduction Potential, ORP) сточных вод влияет как на состав микробных сообществ, так и на

метаболическую активность SRB. При ORP от -100 до -300 мВ SRB наиболее активны, что ускоряет превращение сульфата в сульфиды [91,41].

Толщина биопленки на стенках труб является одним из важных факторов, влияющих на восстановление сульфата в системе водоотведения. Нижний слой биопленки длительно находится в анаэробной среде, SRB могут постоянно использовать сульфат для восстановления и образовывать сульфиды [48,31]. Наружный слой биопленки, находясь под воздействием растворенного кислорода в сточных водах, часто испытывает чередование аэробных и анаэробных условий [70,38]. При низкой скорости течения толщина биопленки может вырастать более чем до 50 мм, тогда как при повышении скорости до 0,5–1 м/с толщина биопленки быстро уменьшается до 1–5 мм. Скорость течения влияет не только на биопленку, но и существенно определяет накопление донных отложений; отложения в канализационных трубопроводах вносят значительный вклад в образование сульфидов и метана [98,56]. Исследование Santy и др. [126] установило связь между скоростью течения и образованием сероводорода: при низкой скорости ($V \leq 0,8$ м/с) биопленка хорошо развивается, ее толщина значительна, а на дне трубопровода накапливается больше отложений; такие условия благоприятны для роста и метаболизма SRB и часто приводят к повышенным концентрациям сероводорода. При высокой скорости ($1,5 \text{ м/с} \leq V$), хотя толщина биопленки и накопление отложений эффективно снижаются, возникающая турбулентность, напротив, облегчает диффузию образовавшегося сероводорода в воздушную среду.

Конфигурация системы водоотведения может влиять на образование

сероводорода в сточных водах путем изменения характеристик течения [3]. Сопряжения различных компонентов системы часто вызывают интенсивную турбулентность потока, что приводит к выходу сероводорода из сточных вод. Для «свежих» сточных вод содержание сульфидов относительно невелико; турбулентность способствует увеличению содержания растворенного кислорода и может на достаточно протяженных участках препятствовать его истощению. Однако на практике в сточных водах присутствует значительное количество летучего сероводорода, и турбулентность ускоряет его выделение. Кроме того, шероховатая внутренняя поверхность трубопроводов и нерациональная конструкция сооружений способствуют налипанию и накоплению отложений, формированию анаэробных условий и образованию сульфидов [91,78].

1.3.4 Методы контроля сероводорода в системах водоотведения

На протяжении многих лет для решения проблем запахов и коррозии стенок труб, обусловленных выделением сероводорода, одним из ключевых направлений исследований в Китае и за рубежом являлись методы, предусматривающие дозирование реагентов в сточные воды. Механизмы химического контроля H_2S в целом можно разделить на четыре типа: внесение окислителей для подавления активности SRB и окисления уже образовавшихся сульфидов; осаждение нерастворимых сульфидов из раствора; повышение pH сточных вод; внесение электронных акцепторов (например, нитратов) для подавления восстановления сульфата [182].

Сравнение методов контроля сероводорода представлено в таблице 1.8

Таблица 1.8 - Сравнение методов контроля сероводорода

Тип метода	Описание метода	Химические реакции	Описание технологии
Дозирование сильных окислителей	Прямое окисление растворённых сульфидов (HS^- / H_2S) в сточных водах сильными окислителями; одновременно оказывает бактерицидное действие. При повышении pH продукты окисления смещаются от элементарной серы к сульфатам	Кислая среда: $\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{S}^0 + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{H}_2\text{S} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{S}^0 + 2\text{HCl}$ Щелочная среда: $\text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$ $\text{HS}^- + 4\text{Cl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 8\text{Cl}^- + 9\text{H}^+$ Перманганат: $3\text{HS}^- + 2\text{MnO}_4^- \rightarrow 3\text{S}^0 + 2\text{MnO}_2 \downarrow + 2\text{OH}^-$	Дозирование H_2O_2 , Cl_2 , NaOCl , KMnO_4 осуществляется на насосных станциях или на начальном участке сети.
Аэрационно-окислительный метод	Повышение концентрации растворённого кислорода (DO) в сточных водах для подавления анаэробных условий и интенсификации биологического либо химического окисления сульфидов	Химическое окисление: $\text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$ Биологическое окисление (SOB): $\text{HS}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{S}^0 + \text{OH}^-$ $\text{S}^0 + 1.5\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	Аэрация в перепадной шахте. Подача воздуха или чистого O_2 . Эффект наблюдается уже при повышении концентрации кислорода до 0,2–1 мг/л
Повышение pH сточных вод	Изменение кислотно-основного равновесия сульфидов за счёт повышения pH: перевод H_2S в HS^- / S^{2-} с фиксацией в жидкой фазе, а также подавление активности SRB	Диссоциационное равновесие сульфидов: $\text{H}_2\text{S} \rightleftharpoons \text{HS}^- + \text{H}^+$ $\text{HS}^- \rightleftharpoons \text{S}^{2-} + \text{H}^+$ Растворение $\text{Mg}(\text{OH})_2$: $\text{Mg}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + 2\text{OH}^-$	Дозирование $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (или NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Часто применяется при высоких концентрациях сульфидов. Обладает длительным эффектом подавления повторного образования H_2S

Дозирование нитратов	Введение нитратов, свободной азотистой кислоты для формирования микроаэробных условий и стимулирования сероокисляющих бактерий к окислению сульфидов до сульфатов, при этом SRB не подавляются	Денитрифицирующее окисление сульфидов: $5HS^- + 8NO_3^- + 3H^+ \rightarrow 5SO_4^{2-} + 4N_2 + 4H_2O$ Свободная азотистая кислота: $HS^- + HNO_2 \rightarrow S^0 + NO + OH^-$	Дозирование $Ca(NO_3)_2$, $NaNO_3$ или HNO_2 . Чаще применяется прерывистое дозирование. Точки дозирования обычно размещают на начальных участках сети
Дозирование солей железа	Осаждение либо окисление растворённых сульфидов солями железа с фиксацией серы в жидкой фазе без изменения анаэробных условий	Осаждение: $Fe^{2+} + HS^- \rightarrow FeS \downarrow + H^+$ Окисление: $2Fe^{3+} + HS^- \rightarrow 2Fe^{2+} + S^0 + H^+$	Дозирование $FeCl_2$, $FeSO_4$, $FeCl_3$ на начальных участках сети.

1.4 Методы выявления сероводорода и обеспечения безопасности в системах водоотведения

1.4.1 Современные методы контроля газов в системах водоотведения

Наличие сильной загазованности сетей водоотведения требует обязательного применения качественного и количественного анализа газовоздушной среды. В настоящее время по удобству применения методы контроля вредных газов делятся на две основные группы: экспресс-анализ с помощью переносных газоанализаторов и высокоточный лабораторный анализ

[173]. В таблице 1.9 представлены примеры приборов для контроля газовой среды.

Таблица 1.9 - Оборудование для мониторинга канализационных газов

Наименование оборудования	Диапазон измерений	Точность/разрешение	Страна/производитель	Срок службы
Industrial Scientific Ventis MX4 (портативный «4-в-1»)	Горючие газы: 0–100% LEL; CH ₄ : 0–5% vol; O ₂ : 0–30% vol; CO: 0–1000 ppm*; H ₂ S: 0–500 ppm	Разрешение: LEL – 1%; CH ₄ – 0,01% vol; O ₂ – 0,1% vol; CO – 1 ppm*; H ₂ S – 0,1 ppm*	США (Industrial Scientific)	Срок службы газовых сенсоров - 2–5 лет
Dräger X-am 2500 (портативный «4-в-1»)	Горючие газы: 0–100% LEL; O ₂ : 0–25% vol; CO: 0–2000 ppm*; H ₂ S: 0–200 ppm*	O ₂ – менее ±1% от показания; CO – менее ±2% от показания; H ₂ S – менее ±2% от показания	Германия (Dräger)	Срок службы газовых сенсоров - 3 года
Figaro FECS50-100 (электрохимический сенсор H ₂ S; для портативных и стационарных решений)	0–100 ppm* (макс. перегрузка 500 ppm)	0,1 ppm*	Япония (Figaro)	Срок службы газовых сенсоров - 2 года
Эколаб	Сероводород H ₂ S 0.004–200	0.0001 мг/м ³	Россия (Russia)	Срок службы газовых сенсоров - 2–7 лет

*1ppm=1mg/L

1.4.2 Современное состояние безопасности и мониторинга в системах водоотведения

За последнее десятилетие анализ материалов по Японии, Франции, Великобритании, Италии показывает, что их канализационные системы — по

проектированию, конструкциям, материалам и эксплуатации — опережают китайские. Более упорядоченные бытовые и производственные сбросы, высокая экологическая осознанность населения и лучшее состояние коммунальной инфраструктуры снижают эксплуатационные риски. Взрывов и отравлений, вызванных газами из канализационных сетей в этих странах, не отмечалось [121]. В Сингапуре, где 74,1 % населения составляют этнические китайцы, строгие регламенты и их соблюдение также не допускали подобных инцидентов [185]. Вместе с тем, отравления H_2S при подземных работах у обслуживающего персонала время от времени происходят. Так, в 2005 г. во Франции 22-летний рабочий, спустившись в колодец без СИЗ отравился сероводородом и скончался менее чем через сутки от обширного некроза миокарда [25].

Взрывы и отравления в городских канализационных системах КНР происходят достаточно часто. В последние годы масштабы таких инцидентов растут, что привлекло большое внимание общества и стимулировало развитие системы контроля газов в коллекторах. Муниципальные ведомства и научные организации задействовали значительные ресурсы и добились определенного прогресса. Города Гуанчжоу, Пекин и Чунцин одними из первых запустили мониторинг горючих, взрывоопасных и токсичных газов в городских сетях [1, 107].

В Гуанчжоу городской мониторинговый центр водоотведения с апреля 2003 г. ведет наблюдения за горючими, взрывоопасными и токсичными газами в канализационных коллекторах. Первоначально система мониторинга включала 40 постов (объекты охраны культурного наследия, пешеходные зоны и места

массового скопления людей, плотная жилая застройка, автостанции сжиженного газа, АЗС и химические терминалы, крупные коллекторы и т. п). Сеть охватывает районы Дуншань, Юэсю, Ливань, Хайчжу, Байюнь, Фанчунь и др. Частота измерений составляет примерно раз в месяц на точку. С марта по май в сезон «сливовых дождей» повышенная влажность и пониженное давление препятствуют выветриванию газов, увеличивая риск взрывов и отравлений. Эти месяцы определены как приоритетные для усиленного мониторинга. Дополнительные обследования проводятся также накануне крупных собраний, праздников и длинных выходных. В настоящее время контролируются NH_3 , Cl_2 , CO , SO_2 и LEL (нижний концентрационный предел воспламенения газовой смеси), планируется поэтапное расширение мониторинга для охвата — H_2S , CO_2 , TVOC (общая концентрация летучих органических соединений, ароматические углеводороды и др. в воздухе). Центр не только организовал регулярные обходы смотровых колодцев, но и развернул стационарную сеть наблюдений, ведет НИОКР по онлайн-мониторингу «горючих и токсичных газов подземного городского пространства» [40, 59].

В Пекине отмечалось множество несчастных случаев при подземных работах; ключевые риски — гипоксия, отравление H_2S и взрывы горючих газов, из которых наиболее типичным является H_2S -интоксикация. В августе 2004 г. муниципальная служба ввела автоматические системы мониторинга газовой среды. Первые два комплекса установлены на участке фекального коллектора у Цяньмынь и под эстакадой Гочжумао. Для защиты персонала использовались также переносные мини-газоанализаторы. Дополнительно создана

специализированная мобильная группа с газоаналитическим автомобилем для регулярного контроля качества и расхода сточных вод и содержания токсичных газов по всей сети. Ежемесячно обследуется свыше 200 участков, с приоритетом для ключевых и торговых зон. При выявлении превышений оперативно информируются службы эксплуатации и принимаются меры для устранения загазованности [33].

Несмотря на запуск систем контроля в Гуанчжоу, Пекине и Чунцине (Рис. 1.6), отсутствие знаний о пространственно-временной структуре газовых полей в сетях приводит к ошибкам — ложным срабатываниям и пропускам. В худшем случае точки размещаются нерационально: опасные зоны остаются без мониторинга, тогда как безопасные — оборудуются, что ведет к неэффективному расходованию ресурсов. На сегодняшний день в КНР механизмы генерации горючих и токсичных газов в канализационных сетях изучены достаточно подробно, однако исследования закономерностей изменения их концентраций в сетях практически отсутствуют. Это серьезно ограничивает эффективность систем предупреждения, препятствует оптимальному распределению ресурсов и снижает предотвращаемость взрывов и отравлений.



Рисунок 1.6 - Пункты мониторинга в основных регионах Китая

Выводы по первой главе

1. Развитие современных городов характеризуется увеличением объема сбрасываемых сточных вод и увеличением протяженности сети в среднем на 4.5%. Обслуживание сетей осложняется процессами газообразования, которые создают потенциальную угрозу санитарной и экологической безопасности городской среды. В среднем ежедневно в системе водоотведения крупного города Китая образуется около 1200 м^3 сероводорода. В силу высокой токсичности сероводорода данная проблема обладает высокой актуальностью для общества и требует более детального анализа условий работы системы водоотведения. Одним из наиболее часто встречающихся сооружений в системе является перепадная шахта. В среднем в системе магистральных коллекторов в крупных городах Китая встречается до 5 шахт (40% всех сооружений). Функционирование работы перепадов увеличивает турбулизацию потока и интенсифицирует массообменные процессы в сточной жидкости. По этой причине приоритетным направлением научного исследования является определение коэффициента массообмена для перепадной шахты с учетом комплексного влияния условий работы.

2. В инженерной практике используются различные конструкции перепадных шахт. Технология работы сооружений предусматривает гашение энергии падающего потока. Гашение энергии реализуется за счет дробления потока, слоистого стекания по стенке шахты, устройства водобойного колодца с водяной подушкой, а также организации ступенчатого падения потока. Скорость падающего потока попадает в диапазон 5–8 м/с. Процесс движения сточных вод

сопровождается увлечением воздушной среды и аэрацией потока. В нижнем бьефе перепадной шахты присутствует гидравлический прыжок [10]. В настоящее время в отечественной и зарубежной науке выполнен большой объем исследований, связанных с уточнением гидравлических характеристик сооружения и улучшения эффективности энергогашения. Исследований, посвященных оценке выделения токсичных газов (в том числе H_2S) в перепадных шахтах, встречается крайне мало и недостаточно для полноценной оценки процесса в сооружениях с разной конструкцией.

3. Рассмотрен механизм образования H_2S в сточной воде. Основными факторами, влияющими на образование молекулярного сероводорода, являются pH водной среды, температура в системе, концентрация органики (BOM/VFA), ORP, скорость потока, толщина биопленки и конструктивно-эксплуатационное состояние сооружений. Основным источником появления сульфид-ионов в сточных водах является метаболизм SRB в биопленке и отложениях в трубопроводах.

В части контроля концентрации сероводорода выделены основные технологические направления: применение сильных окислителей, аэрационное окисление, повышение pH, дозирование нитратов, дозирование солей железа (осаждение/окисление). Отмечается, что применение реагентных методов борьбы не позволяют достичь пролонгированного действия при высоких финансовых затратах и имеют ряд побочных последствий, связанных влиянием на работу очистных сооружений, заиливанием сети и высвобождением других токсичных газов.

4. Проведен анализ современных методов контроля концентрации сероводорода в системах водоотведения, которые делятся на две группы: полевые портативные измерения с использованием переносных газоанализаторов. Для проведения лабораторных экспериментов выбран газоанализатор «ЭКОЛАБ», точность измерения $0,0001 \text{ мг/м}^3$. Современные тенденции развития систем водоотведения требуют развития непрерывного мониторинга концентрации газов. В Пекине, Гуанчжоу, Чунцин, Шанхай и т. д. внедрены и расширяются системы контроля качества воздуха в канализационных коллекторах. Следует отметить, что на сегодняшний день существуют проблемы технического плана (нестабильная работа датчиков) и недостаточности нормативной базы по измерению H_2S в условиях городской канализации, что связано с отсутствием данных о пространственно-временном распределении и закономерностях изменения концентраций газов в сооружениях на сети.

Вышеизложенное обосновывает необходимость исследований закономерностей дегазации потока сточных вод в перепадных шахтах с целью обеспечения их энергоэффективности и санитарной безопасности.

2. Постановка вычислительного и лабораторного эксперимента

2.1 Определение условий моделирования

Функционирование перепадной шахты представляет собой сложную многокомпонентную систему. С целью упрощения моделирования принимаются следующие условия. Поток сточной жидкости представляется как смесь воды и молекулярного сероводорода, который вводится в отмасштабированную модель реальной перепадной шахты. В настоящем исследовании, с целью повышения инженерно-практической ценности результатов физического и численного моделирования, в качестве прототипа для определения размеров модели использовались данные реальных перепадных шахт главного коллектора г. Санкт-Петербурга. Для сбора и транспортировки сточных вод от районов города на главном коллекторе используется более 14 перепадных шахт (рис. 2.1) [5]. Диаметр перепадных шахт по данным проектной документации [17] варьируется в диапазоне от 6 до 13,6 м, а высота перепада (расстояние между отметками лотка подводящего и отводящего коллектора) от 6,24 до 93,76 м.

С технологической точки зрения все шахты оснащены трубчатыми стояками для сброса сточных вод в нижний бьеф. Диаметр и количество стояков для каждой шахты определяется расчетным расходом стоков. Согласно статистическим данным по проектным расходам комплекса, расход воды для различных шахт существенно различаются в зависимости от периода однократного превышения расчетной интенсивности дождя и попадает в диапазон от 0,54 до 4,65 м

Для назначения размеров модели в качестве реальных принимались средние

значения из полученных диапазонов. Средняя высота перепада составила 9,8 м, а диаметр сооружения 60 м.

Масштабирование выполнялось по критерию Фруда, поскольку определяющей в процессе падения потока является сила тяжести:

$$Fr_H = Fr_M \quad (2.1)$$

$$\frac{V_H^2}{gL_H} = \frac{V_M^2}{gL_M} \quad (2.2)$$

Масштаб модели к существующей шахте составил 1:60.

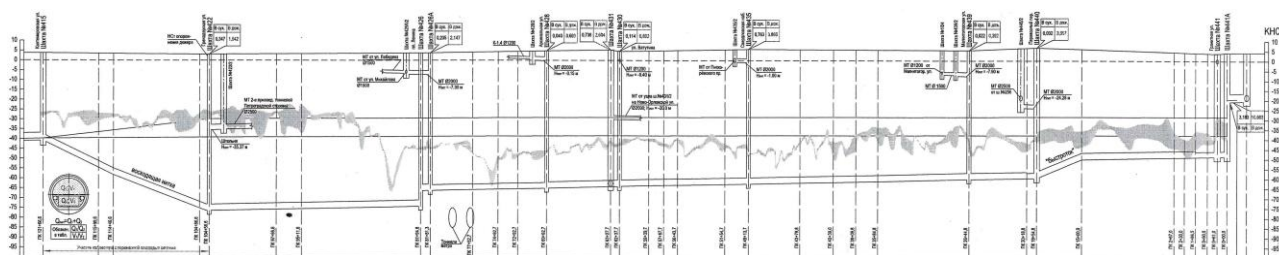


Рисунок 2.1 - Профиль по объектам ПГКС

Концентрация сульфидов в сточных водах соответствует диапазону значений $C = 12-42$ мг/л, зафиксированных в процессе мониторинга [62,152]. В процессе движения потока происходит дегазация сероводорода и переход в воздушную среду. Температура системы принималась постоянной, теплообмен между фазами не учитывался, что обосновывается постоянством температуры в границах одного сооружения в системе водоотведения. Температура потока воды принята равной $T_0 = 20^\circ\text{C}$, как наиболее благоприятная для дегазации сероводорода [180]. В процессе моделирования рассматривался нестационарный процесс. Общее время расчета или эксперимента t определялось с учетом наступления установившегося движения потока и наступления равновесного

состояния системы по концентрации сероводорода в воздушном пространстве шахты и в воде. Процесс протекает при наличии атмосферного давления [8].

Скорость движения потока в подводящем коллекторе натурального объекта по данным научного отчета [2] изменялась в диапазоне $V_k = 3.54-6.58 \text{ м/с}$ [2], а в процессе падения в шахте увеличивается до $V_{ш} = 4.97-7.22 \text{ м/с}$. Значения критерия Re составляло более 25000, поэтому рассматриваемый поток можно отнести к сильнотурбулентному.

2.1.1 Выбор модели массообмена

Для описания процесса движения многофазного потока можно применить модель «Эйлер-Эйлер».

Уравнения импульса для непрерывной и дисперсной фазы имеют следующий вид [168]:

$$\frac{\partial(\alpha_j \rho_j v_j)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_j \rho_j v_j v_j) - \nabla \cdot (\alpha_j \rho_j \tau_j) = -\alpha_j \nabla p_j + \alpha_j \rho_j g - M \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g v_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g v_g v_g) - \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \tau_g) = -\alpha_g \nabla p_g + \alpha_g \rho_g g + M \quad (2.4)$$

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

Уравнение неразрывности для непрерывной и дисперсной фаз может быть записано как [154]:

$$\frac{\partial(\alpha_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}\mathbf{v}_{\text{ж}}) = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(\alpha_{\text{г}}\rho_{\text{г}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{\text{г}}\rho_{\text{г}}\mathbf{v}_{\text{г}}) = 0 \quad (2.6)$$

Суммарная межфазная сила M может включать в себя: силу сопротивления M_{drag} , подъёмную силу M_{lift} , силу турбулентной диффузии M_{turb} и силу смачивания стенок M_{wall}

Сила сопротивления записывается как

$$M_{\text{drag}} = \frac{3}{4} \alpha_{\text{г}} \rho_{\text{ж}} C_D \frac{1}{d_d} |\mathbf{v}_{\text{ж}} - \mathbf{v}_{\text{г}}| (\mathbf{v}_{\text{ж}} - \mathbf{v}_{\text{г}}) \quad (2.7)$$

где C_D — коэффициент сопротивления.

Уравнение для подъёмной силы имеет вид:

$$M_{\text{lift}} = \alpha_{\text{г}} C_L \rho_{\text{ж}} \mathbf{v}_{\text{г}} \times (\nabla \times \mathbf{v}_{\text{ж}}) \quad (2.8)$$

где C_L — коэффициент подъёмной силы, а $\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_{\text{ж}} - \mathbf{v}_{\text{г}}$ — относительная скорость фаз.

Сила турбулентной диффузии определяется выражением:

$$M_{\text{turb}} = C_T \rho_{\text{ж}} k_{\text{ж}} \nabla \alpha_{\text{г}} \quad (2.9)$$

где C_T — коэффициент турбулентной диффузии.

Модель силы смачивания стенок имеет следующий вид:

$$M_{\text{wall}} = C_{\text{wall}} \cdot \rho_{\text{ж}} \alpha_{\text{г}} |\mathbf{v}_{\text{ж}} - \mathbf{v}_{\text{г}}|^2 \cdot \mathbf{n} \quad (2.10)$$

Здесь C_{wall} обозначает коэффициент пристенной смачивающей силы, а $\mathbf{n}$ — нормаль к стенке.

Турбулентность является определяющим фактором, оказывающим влияние на дегазацию потока сточных вод. Для сильнотурбулентного процесса наиболее

оптимальным вариантом является двухпараметрическая модель $k-\varepsilon$ [162]. Модель $k-\varepsilon$ вводит в систему уравнений (2.3 - 2.4) две новые переменные. Уравнение для кинетической энергии турбулентности k имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}k_{\text{ж}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}\mathbf{v}_{\text{ж}}k_{\text{ж}}) \\ = \nabla \cdot \left[\alpha_{\text{ж}} \left(\mu_{\text{ж}} + \frac{\mu_{t,\text{ж}}}{\sigma_k} \right) \nabla k_{\text{ж}} \right] + \alpha_{\text{ж}}G_{\text{ж}} - \alpha_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}\varepsilon_{\text{ж}} (+S_{k,\text{жГ}}) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Уравнение для скорости диссипации турбулентности ε имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}\varepsilon_{\text{ж}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}\mathbf{v}_{\text{ж}}\varepsilon_{\text{ж}}) \\ = \nabla \cdot \left[\alpha_{\text{ж}} \left(\mu_{\text{ж}} + \frac{\mu_{t,\text{ж}}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_{\text{ж}} \right] + \alpha_{\text{ж}}C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon_{\text{ж}}}{k_{\text{ж}}} G_{\text{ж}} \\ - \alpha_{\text{ж}}C_{2\varepsilon} \rho_{\text{ж}} \frac{\varepsilon_{\text{ж}}^2}{k_{\text{ж}}} (+S_{\varepsilon,\text{Г}}) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Здесь $\rho_{\text{ж}}$ -плотность сплошной фазы; $\rho_{\text{Г}}$ -плотность дисперсной фазы; $\mu_{\text{ж}}$ -молекулярная динамическая вязкость сплошной фазы; $\mu_{\text{Г}}$ -молекулярная динамическая вязкость дисперсной фазы; $\mathbf{v}_{\text{ж}}$ -вектор скорости сплошной фазы; $\mathbf{v}_{\text{Г}}$ -вектор скорости дисперсной фазы; $v_{\text{ж},i}$ - i -я компонента скорости сплошной фазы; x_i -пространственная координата ($i = 1, 2, 3$); t -время; $P_{\text{ж}}$ -давление сплошной фазы; $P_{\text{Г}}$ -давление дисперсной фазы; $\mathbf{g}$ -вектор ускорения свободного падения; $\tau_{\text{ж}}$ -тензор эффективных напряжений сплошной фазы; $\mu_{\text{eff},\text{ж}}$ - эффективная вязкость сплошной фазы; $\mu_{t,\text{ж}}$ -турбулентная вязкость сплошной фазы; $\mu_{\text{eff},\text{ж}} = \mu_{\text{ж}} + \mu_{t,\text{ж}}$ - сумма молекулярной и турбулентной вязкостей .

2.1.2 Создание численной модели различных типов шахт

Для подготовки модели перепадной шахты использовался пакет ANSYS CFX, который реализует метод конечных объемов [18]. В данном случае

расчетная область разбивается на неперекрывающиеся контрольные объемы, для которых решается система представленных выше уравнений относительно искомых величин в узлах [42].

Создание геометрии расчетной области осуществлялось в программах *SpaceClaim* (ANSYS) и *SolidWorks*. Расчетная область представляла собой внутреннее пространство сооружения, в котором предполагалось движение водного и воздушного потока. На рис. 2.2 представлена геометрия расчетной области перепадных шахт различных конструкций [11].

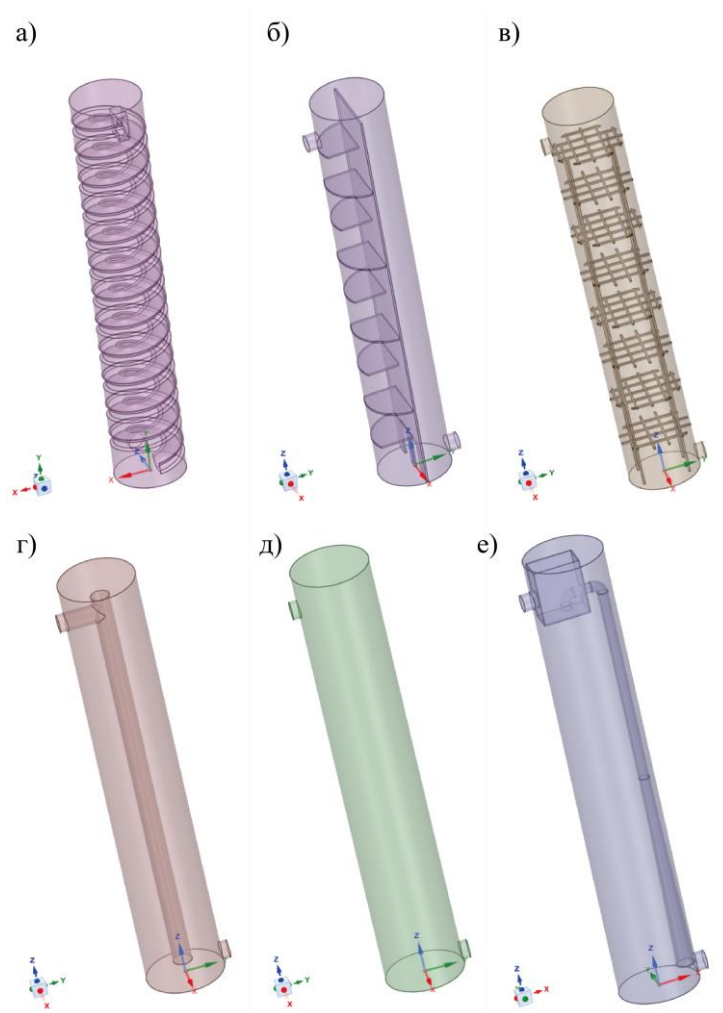


Рисунок 2.2 – Геометрия расчетной области перепадной шахты, а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком [9].

2.1.3 Создание расчетной сетки

Разбиение геометрии на контрольные объемы выполнялось в предпроцессоре *Meshing*. В силу сложности геометрии разных конструкций шахт для разбиения использовалась неструктурированная тетраэдрическая сетка. Оптимальный размер ячейки устанавливался на основе результатов последовательного расчета при достижении сходимого и неменяющегося решения [181]. Средний размер ячейки в домене составлял 0.004 м.

В ожидаемых местах присутствия большого градиента скорости и давления (в области падающего потока воды, в месте формирования гидравлического прыжка) использовалось дополнительное умеление сетки с помощью функции *Sizing* [23]. Размер ячейки в данной области был принят 0.001м.

В зоне контакта потока с твердыми стенками также выполнялось уменьшение ячеек с целью более точного моделирования пограничного слоя [116]. Для оценки толщины размера ячейки первого слоя сетки, прилегающего к стенке и ориентировочной толщины пограничного слоя выполнялись предварительные расчеты, учитывающие толщину и среднюю скорость потока, а также величину критерия *Re* согласно [167]. Для создания структурированной сетки около стенки использовалась функция *Inflation*.

Результаты генерации сетки показаны на рис. 2.3.

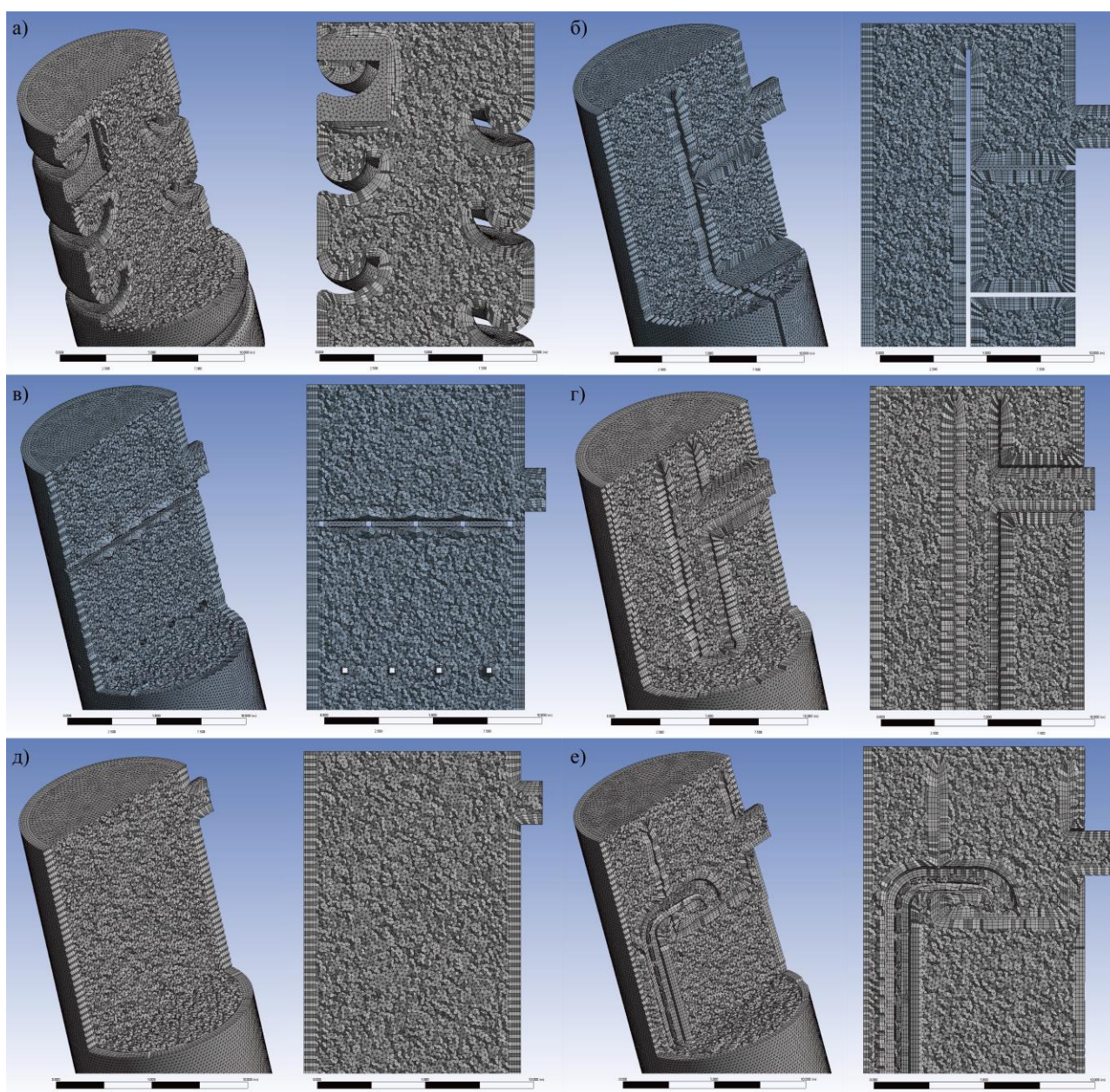


Рисунок 2.3 - Расчетная сетка, а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком [9].

2.1.4 Определение начальных и граничных условий моделирования

В настройках расчетной области определяется присутствие трех веществ: воды, воздуха и сероводорода, свойства которых добавлены из стандартной библиотеки и соответствуют принятой температуре. Вода и воздух являются непрерывной фазой, а сероводород дисперсной. Взаимное перемешивание фаз и

выделение сероводорода в воздух учитывалось с помощью уравнений (2.3), которые активировались настройкой – *Mixture* [110]. Для обеспечения падения потока в шахте в уравнениях (2.4) учитывалось наличие гравитации по вертикальной оси путем введения ускорения свободного падения $g_z = 9,81 \text{ м/с}^2$. Турбулизация водной и воздушной среды моделировалась с помощью применения модели турбулентности $k-\epsilon$ [10], которая использует уравнения (2.11-2.22). В начальный момент времени в шахте присутствует только статичная воздушная среда с атмосферным давлением $P_M = 0 \text{ Па}$.

Постановка граничных условий показана на рис. 2.4.

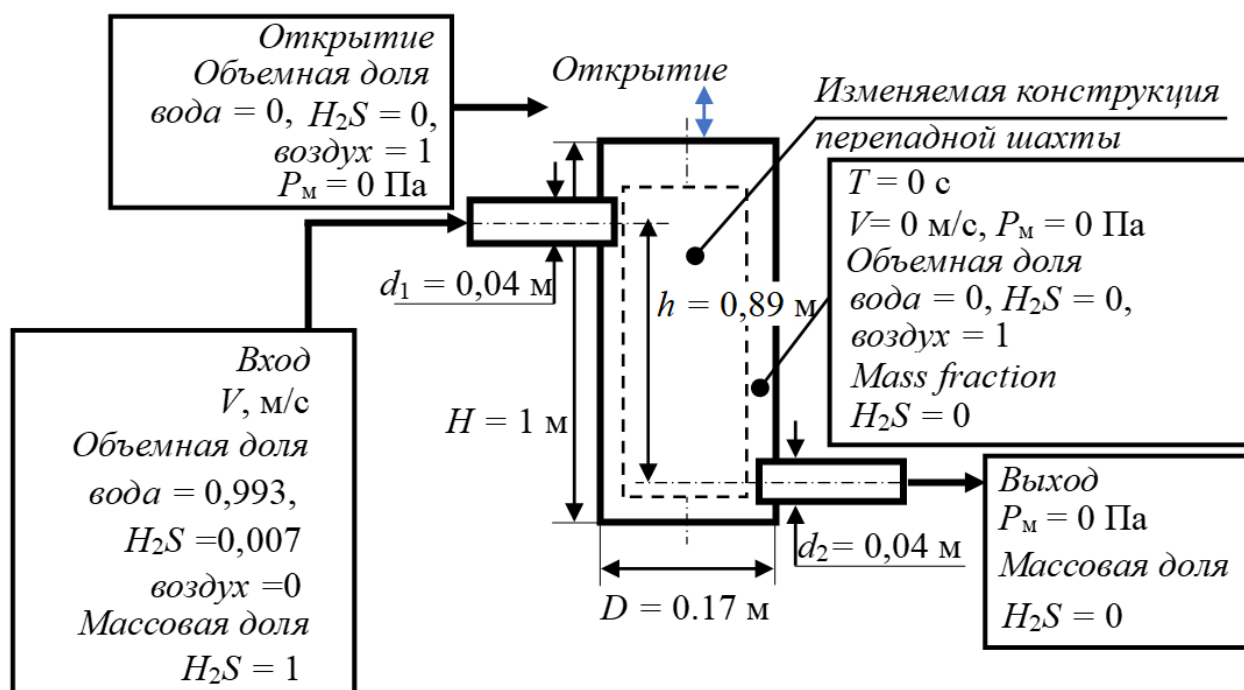


Рисунок 2.4 - Настройка граничных условий моделирования

На входной границе задавалось условие *Inlet*, на котором определялось значение нормальной скорости входящего потока (табл 2.1). Для учета концентрации сероводорода на границе задавалась объемная доля веществ. По воздуху объемная доля соответствовала нулю. По воде и сероводороду

коэффициенты указаны в табл 2.1. Для поступления воздуха на верхней грани шахты задано условие *Opening*, на котором учитывалось присутствие атмосферного давления $P_m = 0$ Па [10]. 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 [14]. Все оставшиеся грани геометрии определялись твердыми стенками, для которых задавались условия прилипания потока (*no-slip*).

При выполнении расчета достигалась величина невязок характеристик потока менее 0.0001, соответствующая сходимости задачи в CFX [153].

Таблица 2.1 - Граничные условия

Входная скорость			Объемная доля воды			Объемная доля сероводорода (концентрация сульфида натрия, мг/л)		
$V_1 =$ 0.05м/с	$V_2 =$ 0.075м/с	$V_3 =$ 0.1м/с	0.993	0.985	0.971	0.007 (1.014)	0.015 (2.028)	0.029 (3.978)

2.1.5 Анализ результатов модельного расчета

По данным моделирования для каждой шахты были построены трехмерные графики зависимости концентрации сероводорода в воздушной среде шахты от скорости входного потока и концентрации сероводорода в воде (рис. 2.5). По итогам анализа графиков установлено, что при минимальной скорости потока и максимальной концентрации растворённого H_2S в воде концентрация сероводорода, поступающего в шахту, достигает наибольших значений. При этом максимальные значения характерны для шахты с

многоступенчатым перепадом, а минимальные — для шахты с сифонным стояком.

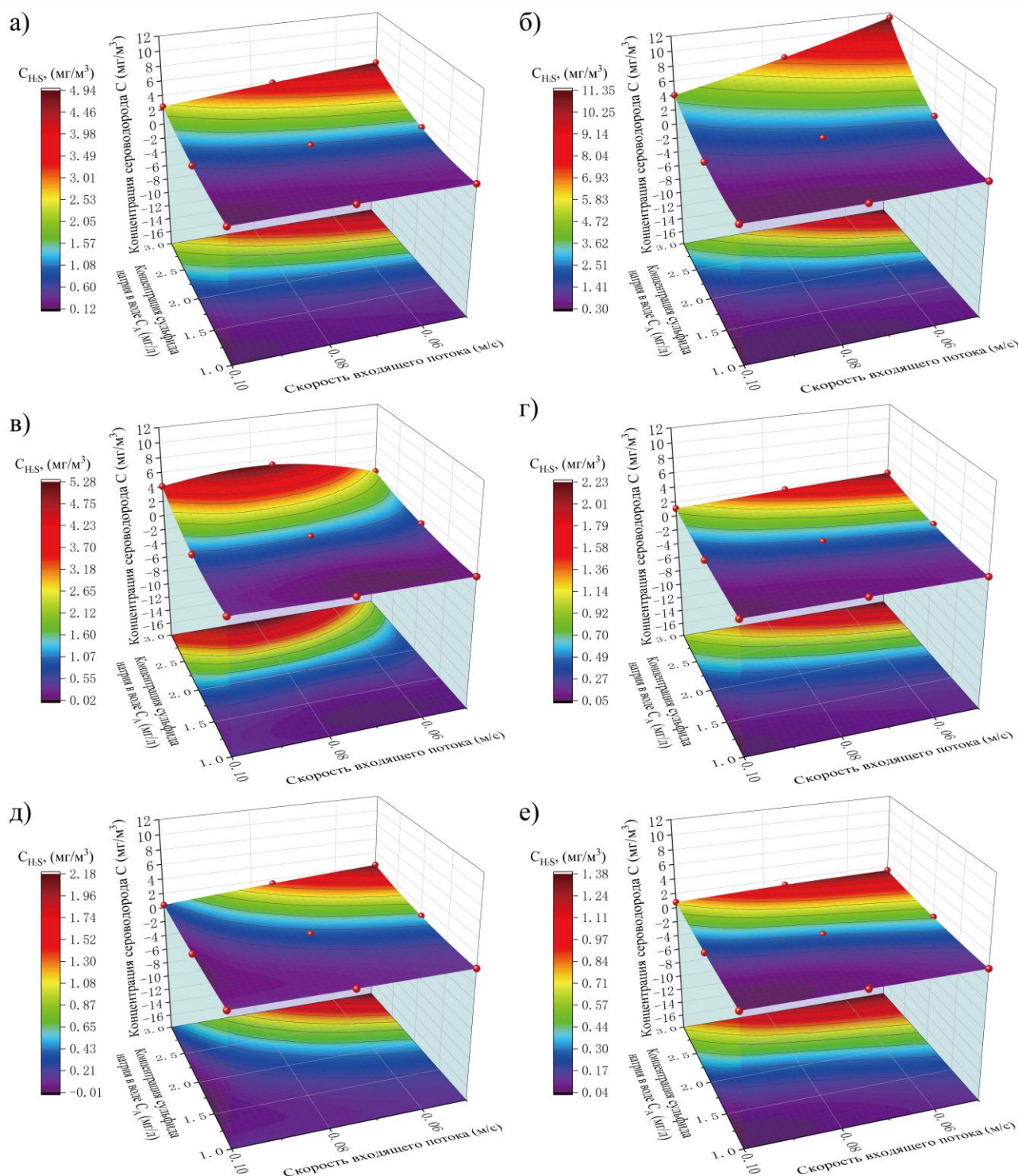


Рисунок 2.5 - Зависимость концентрации H_2S в воздушном пространстве перепадной шахты от скорости входящего потока, концентрации сульфидов и типа перепада: а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком [10].

Также были вычислены средние коэффициенты массопередачи для шахт каждого типа и построены графики изменения коэффициента массопередачи во времени с начального момента функционирования до момента наступления равновесного состояния. Из графика на рис. 2.6 следует, что при устойчивой работе шахты коэффициент массопередачи для шахты со спиральным лотком [99] ниже теоретической кривой на 2,62 %, для шахты с многоступенчатым перепадом – ниже теоретической кривой на 5,64 %, для шахты с поперечными балками – выше теоретической кривой на 10,36 %, для шахты с трубчатым стояком – ниже теоретической кривой на 4,54 % [12], для шахты без технологического оснащения [101] – ниже на 4,55 %, а для шахты с сифонным стояком – ниже на 4,75 % [9]. Сравнение данных на рисунке показывает, что в имитационном эксперименте коэффициент массопереноса для шахты сифонной конструкции ниже по сравнению с другими шахтами конструкций. Кроме того, данные моделирования слишком занижены и нуждаются в калибровке перед использованием в моделировании реальной модели.

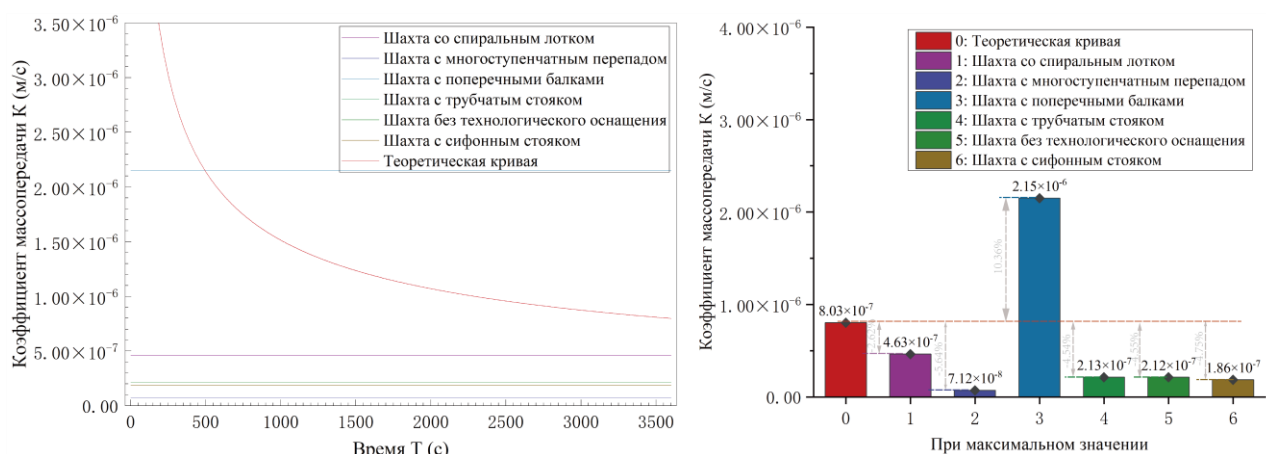


Рисунок 2.6 - Сопоставление коэффициента массопередачи различных типов шахт

2.2 Модель массообмена

2.2.1 Теоретические основы массообмена

В 1855 г. А. Фик сформулировал первый и второй законы. Первый закон при постоянных температуре и давлении устанавливает связь между молекулярной диффузией и градиентом концентрации вещества. Второй закон, объединяющий первый с уравнением сохранения массы, описывает нестационарную задачу распространения вещества вследствие молекулярной диффузии. Эти два фундаментальных положения составляют теоретическую основу газожидкостного массообмена [155]. В вертикальной шахте массообмен включает молекулярную диффузию и конвективный перенос. Последний преимущественно обусловлен турбулентностью, что существенно усложняет моделирование. Поскольку строгое описание турбулентности затруднено, ранние модели, опираясь на первый закон Фика, использовали упрощённое выражение для потока J_A вещества:

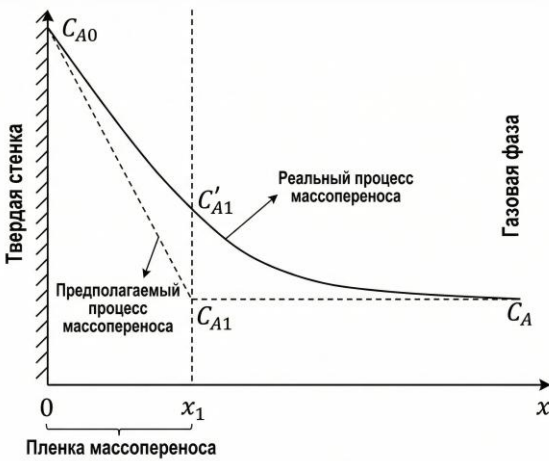
$$J_A = \frac{D_A + \varepsilon}{z} \Delta C_A \quad (2.13)$$

где D_A — молекулярный коэффициент диффузии компонента A , ε — турбулентный коэффициент диффузии, z — характерная диффузионная длина, ΔC_A — градиент концентрации вещества. Величина $k_A = (D_A + \varepsilon)/z$ называется коэффициентом массоотдачи, который является ключевым параметром, характеризующим скорость переноса вещества через газожидкостную границу и служащим критерием эффективности массообмена. Обычно k_A определяют экспериментально.

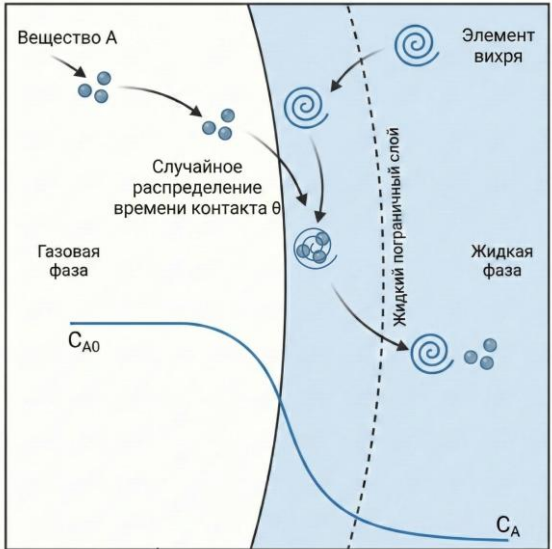
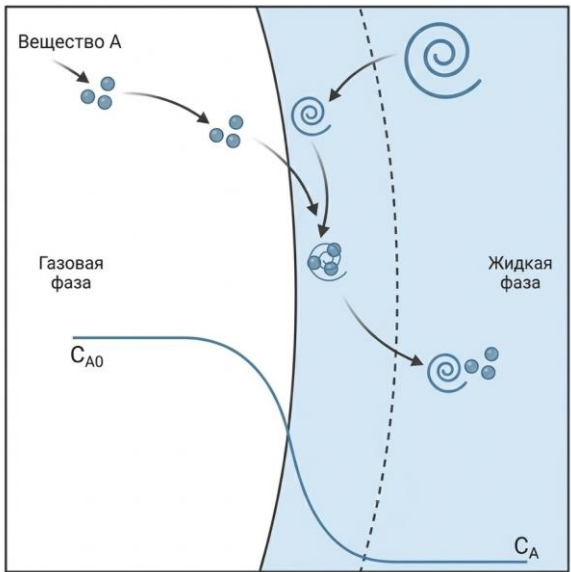
2.2.2 Теории массообмена

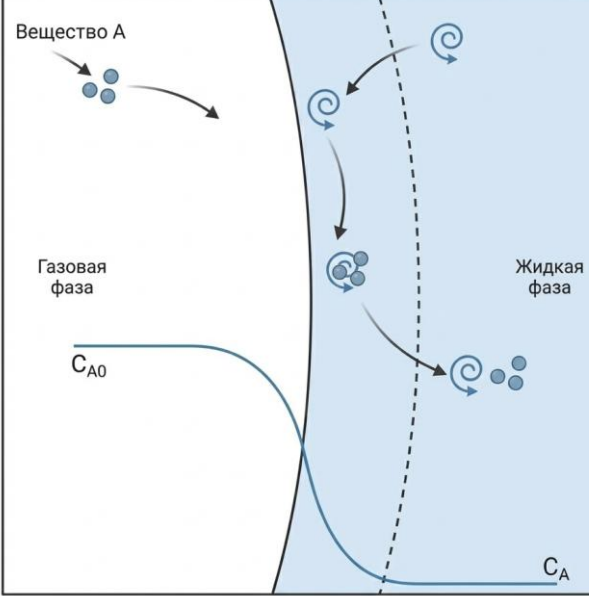
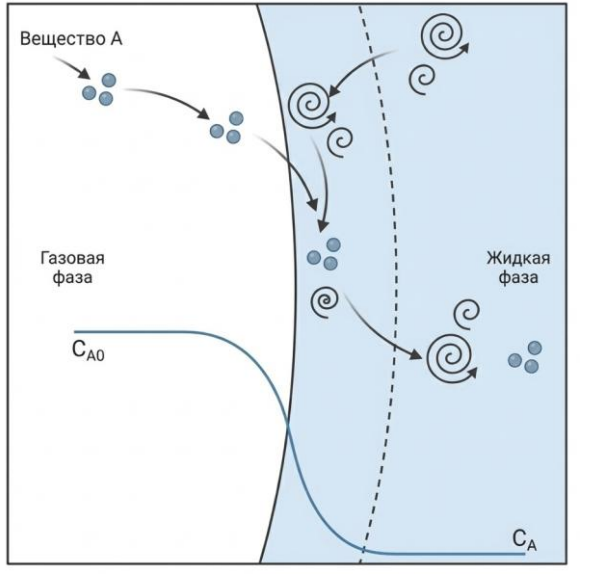
В настоящее время на основе обширных экспериментальных данных и теоретических выводов предложены различные методики для оценки коэффициента массоотдачи [177-139]. Основные теоретические положения представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – теории массообмена

Название теории	Автор и год	Зависимость для оценки коэффициента массоотдачи	Расчетная схема
			Описание теории
Теория плёнки	Нернст (1904)	$k \approx D/\delta$ (или поток $J \sim D(C_{A0} - C_{Ai})/\delta$)	
			Предполагается наличие у границы раздела фаз тонкого «неподвижного» слоя, внутри которого перенос определяется главным образом молекулярной диффузией, тогда как вне слоя турбулентность/конвекция обеспечивает практически равномерную концентрацию в объеме. Модель в высокой степени идеализирована.

Двухплёночная теория	Уильям Уитмен (1923) — две пограничные плёнки по обе стороны от границы раздела фаз	$J_A = k(C_{A0} - C_A), \quad k = \frac{D_A}{\delta}$ (модель «плёночное сопротивление» отражает)	Считается, что основное сопротивление сосредоточено в двух плёнках — газовой и жидкой; на границе раздела принимается приближённое равновесие, межфазное сопротивление пренебрежимо мало. Удобна для инженерных оценок, однако при турбулентно интенсифицированной массопередаче нередко даёт заметные отклонения.
Модель проникновения	Хигби (1935)	$k = \sqrt{\frac{4D_L}{\pi\theta}}$	Во время кратковременного контакта микрообъёма жидкости с границей раздела фаз протекает процесс нестационарной диффузии. В постановке Хигби принимается одинаковое время контакта – θ. Подходит для описания массопередачи при непрерывном контакте границы раздела фаз с новыми порциями жидкости.

Теория обновления поверхности и	Данквертс (1951)	Теория обновления поверхности: $\bar{k} = \sqrt{D_L S}$ обновления поверхности с растяжением: $\bar{k} = \left(\frac{4D_L}{\pi} \sqrt{\frac{U_G g}{\nu}} \right)^{1/2}$	 Граница раздела фаз рассматривается как поверхность, постоянно «обновляемая» турбулентными вихрями. Время пребывания турбулентных вихрей подчиняются экспоненциальному закону, а влияние турбулентного обновления обобщается через скорость изменения площади контакта (S).
Модель крупных вихрей	Фортескью и Пирсона (1967)	$\bar{k} = 1.46 \left(\frac{D_L \sqrt{\tilde{U}^2}}{\Lambda} \right)^{1/2}$	 Обновление области контакта фаз осуществляется крупными вихрями. Время контакта (обновления) и величина k_L определяется в зависимости от турбулентного масштаба скорости ($\tilde{U}$) и интегрального масштаба турбулентности (Λ).

Модель мелких вихрей	Ламонт и Скотт (1970)	$k = c(\varepsilon\nu)^{1/4}Sc^{-1/2}$	 Перенос у границы раздела фаз осуществляется мелкомасштабными вихрями. Коэффициент k_L зависит от скорости диссипации турбулентной энергии (ε), кинематической вязкости (ν) и числа Шмидта (Sc). Эта модель наиболее часто применяется в случае сильнотурбулентных потоков.
Вихревая модель с широким диапазоном масштаба вихрей	Хан и др. (2011)	Стационарный процесс: $k = 0.682D_L^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\int_{n_{\min}}^{n_{\max}} [E(n)^{5/4} n^{3/4} dn]}{\int_{n_{\min}}^{n_{\max}} [E(n) dn]}$ Нестационарный процесс: $k_L = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \bar{k}_\lambda(\lambda) \Omega(a, b, \lambda) d\lambda$	 Обновление поверхности контакта фаз осуществляется не только «крупными или мелким вихрями, но и вихрями различного масштаба. Модель наиболее близко описывает массопередачу в реальных технологических процессах.

Исследования [29] показали, что по сравнению с другими теориями модель

Хигби более применима к условиям многопоточного течения в шахтах с

различной конструкцией. В связи с этим в рамках данного исследования использовалась теория модели Хигби для оценки эмпирического коэффициента массопередачи сероводорода.

2.3 Конвективный массообмен и модель проникновения

С учётом реальных режимов работы перепадных шахт модель проникновения представляется наиболее предпочтительной для анализа выделения сероводорода в случае вариативности конструкций шахт.

В соответствии с моделью проникновения растворённый компонент A внутри жидкого микрообъёма подчиняется одномерной нестационарной диффузии. При отсутствии химической реакции дифференциальное уравнение (второй закон Фика) принимает вид

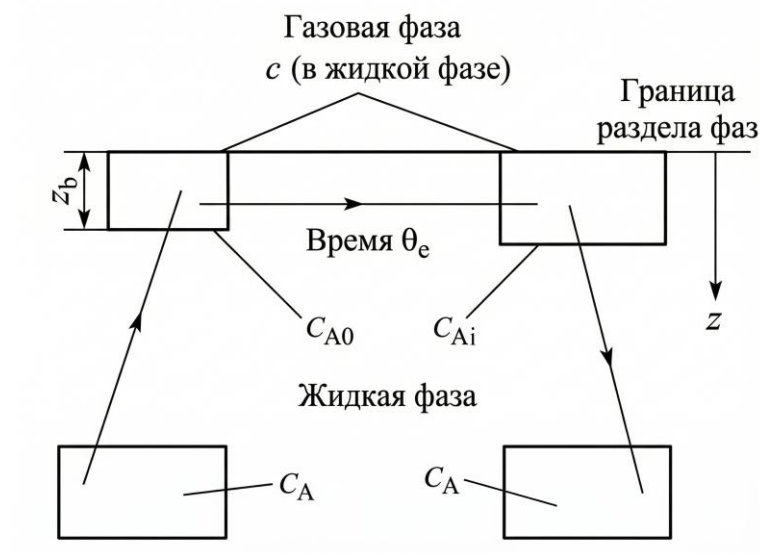


Рисунок 2.7 - Схема модели проникновения

$$\frac{\partial c_A}{\partial T} = D \frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2} \quad (2.14)$$

Уравнение (2.14) решается при условиях: 1) $T = 0$: $c_A = c_{A0}$ (для $z \geq 0$);
2) при $z = 0$: $c_A = c_{Ai}$ (для $T > 0$); 3) при $z \rightarrow \infty$: $c_A = c_{A0}$ (для $T \geq 0$).

Отсюда получаем

$$\frac{c_{Ai} - c_A}{c_{Ai} - c_{A0}} = \text{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta \quad (2.15)$$

Где

$$\eta = \frac{z}{\sqrt{4DT}} \quad (2.16)$$

Выражение (2.15) задаёт распределение концентрации c_A при произвольных z, T ; $\text{erf}(\eta)$ — функция ошибок.

Пусть мгновенный диффузионный поток компонента A через границу контакта равен N_{AT} . По первому закону Фика:

$$N_{AT} = -D \frac{\partial c_A}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (2.17)$$

Имеем

$$\frac{\partial c_A}{\partial z} \Big|_{z=0} = \left(\frac{\partial c_A}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (2.18)$$

Дифференцируя (2.15), и подставляя (2.16), получаем

$$\frac{\partial c_A}{\partial z} \Big|_{z=0} = -(c_{Ai} - c_{A0}) \frac{1}{\sqrt{\pi DT}} \quad (2.19)$$

поэтому

$$N_{AT} = (c_{Ai} - c_{A0}) \sqrt{\frac{D}{\pi T}} \quad (2.20)$$

Отсюда мгновенный коэффициент массопередачи будет равен:

$$k_{сг} = \sqrt{\frac{D}{\pi T}} \quad (2.21)$$

За время T_c суммарный перенесённый (на единицу площади) компонент A :

$$\int_0^{T_c} N_{AT} dT = (c_{Ai} - c_{A0}) \sqrt{\frac{D}{\pi}} \int_0^{T_c} \frac{dT}{\sqrt{T}} = 2(c_{Ai} - c_{A0}) \sqrt{\frac{DT_c}{\pi}} \quad (2.22)$$

Средний по времени поток будет равен:

$$N_{Am} = \frac{2(c_{Ai} - c_{A0}) \sqrt{\frac{DT_c}{\pi}}}{T_c} = 2(c_{Ai} - c_{A0}) \sqrt{\frac{D}{\pi T_c}} \quad (2.23)$$

и, следовательно, средний коэффициент массопередачи составит:

$$k = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi T_c}} \quad (2.24)$$

Формула (2.24) представляет собой расчётное выражение для конвективного коэффициента массопередачи, выведенное в модели проникновения. Коэффициент k зависит от коэффициента молекулярной диффузии D и времени протекания процесса T_c . Также из (2.24) следует пропорциональность $k \propto D^{1/2}$, что подтверждено данными Шервуда и соавт. для слоистого стекания жидкости [76].

Адаптируем базовую модель массопередачи к условиям перепадной шахты. Время газожидкостного контакта приближённо принимается равным времени пребывания жидкой плёнки в пределах сооружения.

Допустим, что время контакта стремится к времени свободного падения

потока:

Для оценки скорости падения потока можно воспользоваться известной формулой:

$$v = v_0 + gt \quad (2.25)$$

Если имеется начальная скорость, то можно оценить время падения потока в шахте по следующей зависимости:

$$T_c(z) \approx t(z) = \frac{v - v_0}{g} \quad (2.26)$$

Тогда подставляя (2.25) в (2.26) получим окончательную зависимость для коэффициента массопередачи:

$$k(h) = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi \frac{v - v_0}{g}}} \quad (2.27)$$

где: $\theta_c(z)$ – время газожидкостного контакта на различной глубине; v – средняя скорость потока в перепадной шахте; g – ускорение свободного падения; v_0 – начальная скорость входного потока; D – коэффициент диффузии; $k(h)$ – коэффициент массопередачи.

Используя зависимость (2.27) можно построить графики изменения коэффициента массопередачи в зависимости от средней скорости падения потока (Рис. 2.6).

График отображает стабилизацию коэффициента массопередачи в результате увеличения скорости падения. Уменьшение скорости приводит к увеличению коэффициента и интенсификации выделения сероводорода. На рис. 2.7 показан график зависимости коэффициента для входной скорости потока 0,1

м/с. На график вынесены экспериментальные данные Namran F. Hamad, Micaela Pacheco Fernández, Letian Sun, Lucie Carrera [176,123,63]. Экспериментальные данные частично попадают в доверительный интервал теоретической кривой.

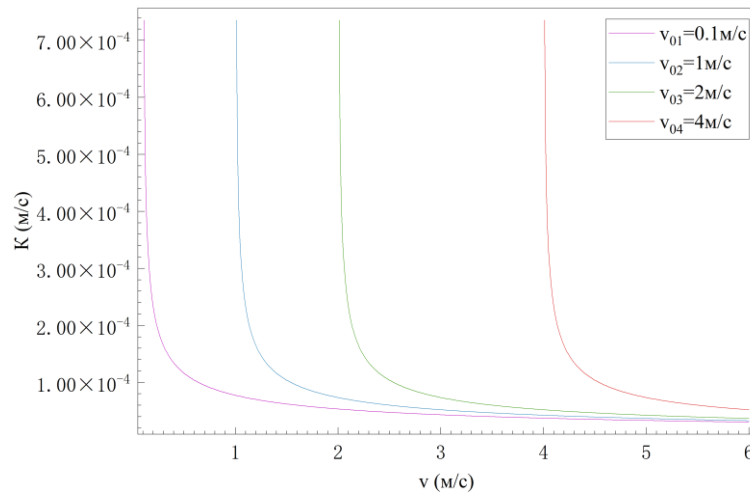


Рисунок 2.8 - Графики зависимости коэффициента массопередачи от средней скорости падения потока

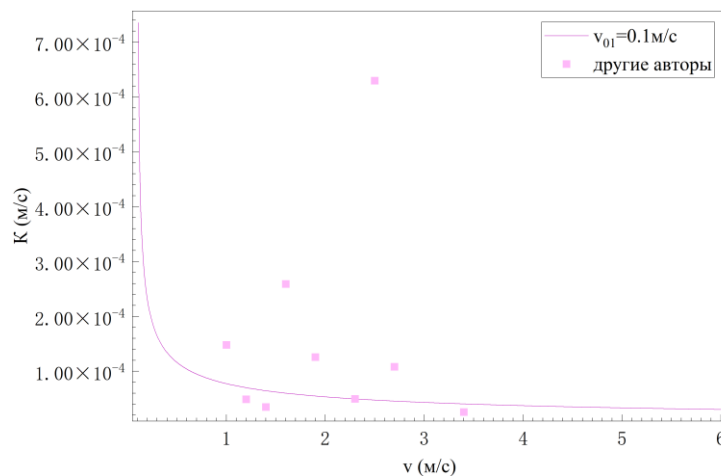


Рисунок 2.9 - Графики зависимости коэффициента массопередачи для входной скорости 0.1 м/с, [176,123,63]

2.4 Постановка лабораторного эксперимента

2.4.1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 2.7) представляет собой стенд с циркуляцией потока воды. На монтажной раме смонтирован корпус перепадной шахты

высотой 1 м и диаметром 0,17 м, изготовленной из оргстекла. Внутри корпуса предусмотрено крепление для устройства технологического оснащения различного типа, которое изготавливалось из PLA пластика (рис 2.8.).

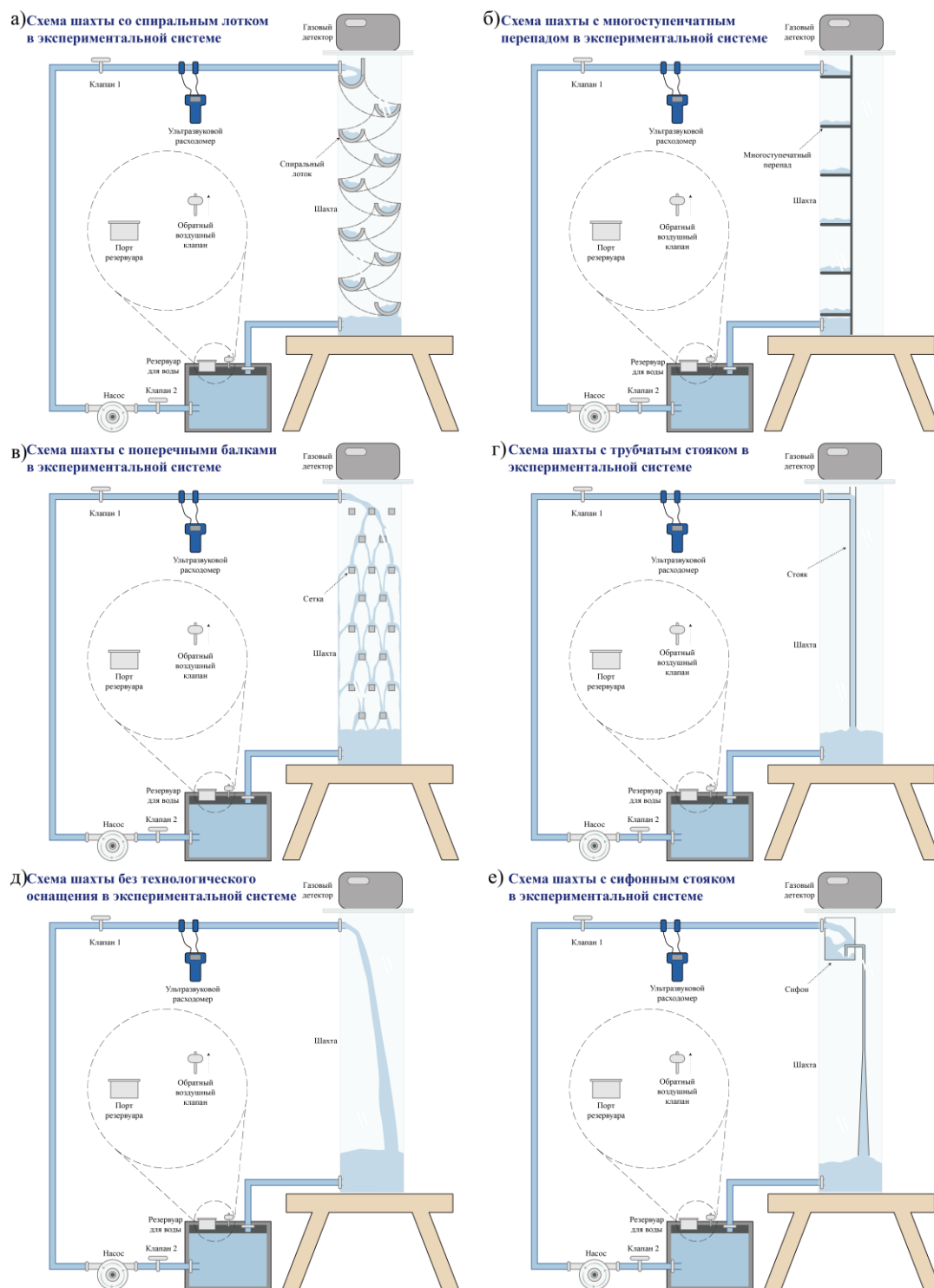


Рисунок 2.10 - Схема лабораторной установки, а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком [9].

Над перепадной шахтой размещался газоанализатор в закрытой емкости, которая герметично соединялась патрубком с воздушным пространством шахты. В верхнюю часть шахты осуществлялось подключение подводящего воду трубопровода. В нижней части к водобойному колодцу осуществлялось подключение отводящего трубопровода. Подача воды выполнялась из закрытого герметичного резервуара с помощью циркуляционного насоса. На напорном (подводящем) трубопроводе был установлен шаровый кран и расходомер.

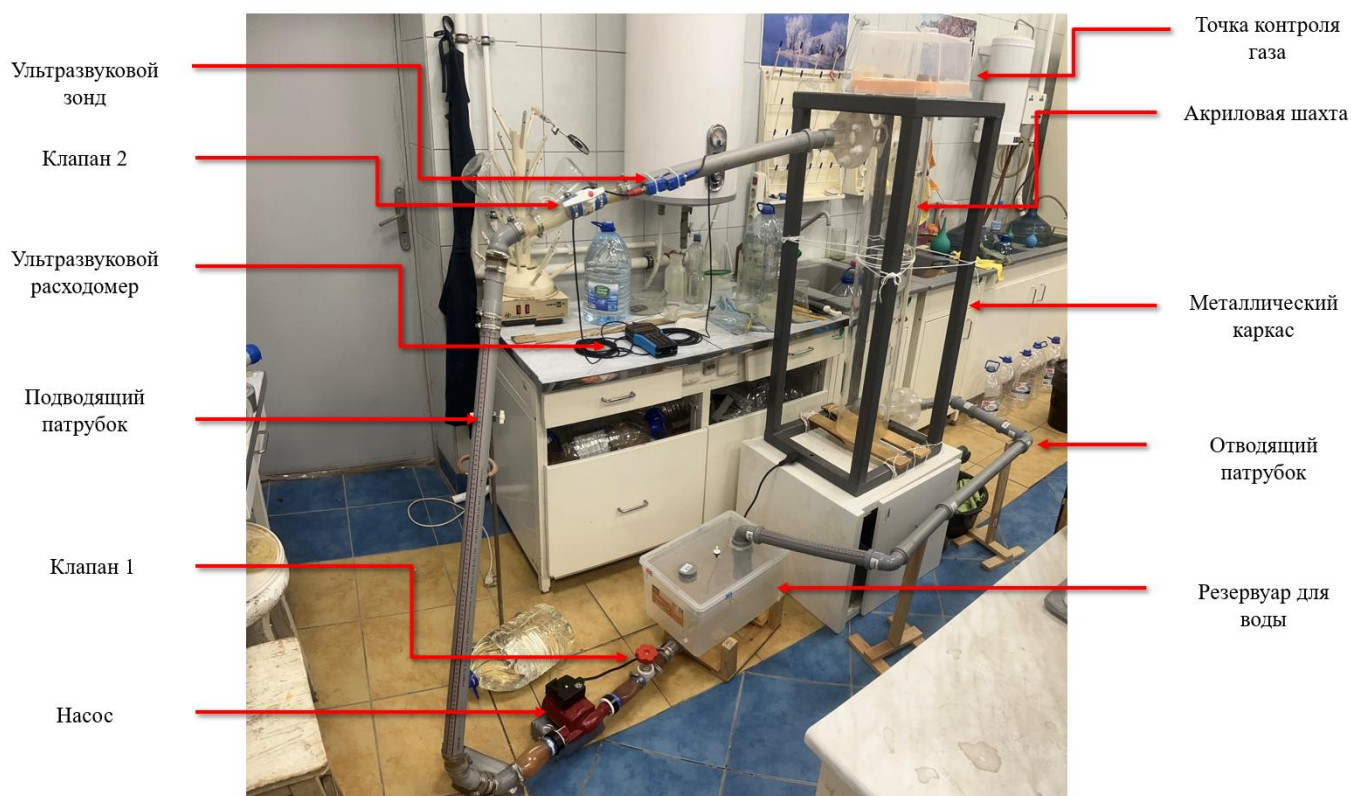


Рисунок 2.11 – Фотография лабораторной установки

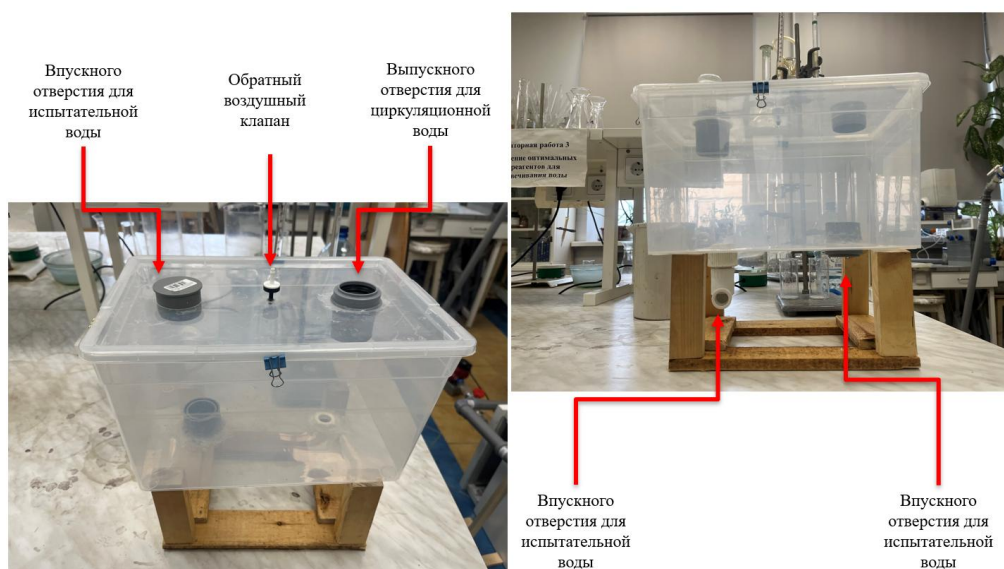


Рисунок 2.12 – Резервуар для воды

Резервуар с водой объемом $V = 0.02\text{м}^3$ (рис. 2.9) был оснащен обратным воздушным клапаном и патрубками: для заливки модельного раствора и подключения циркуляционных трубопроводов.

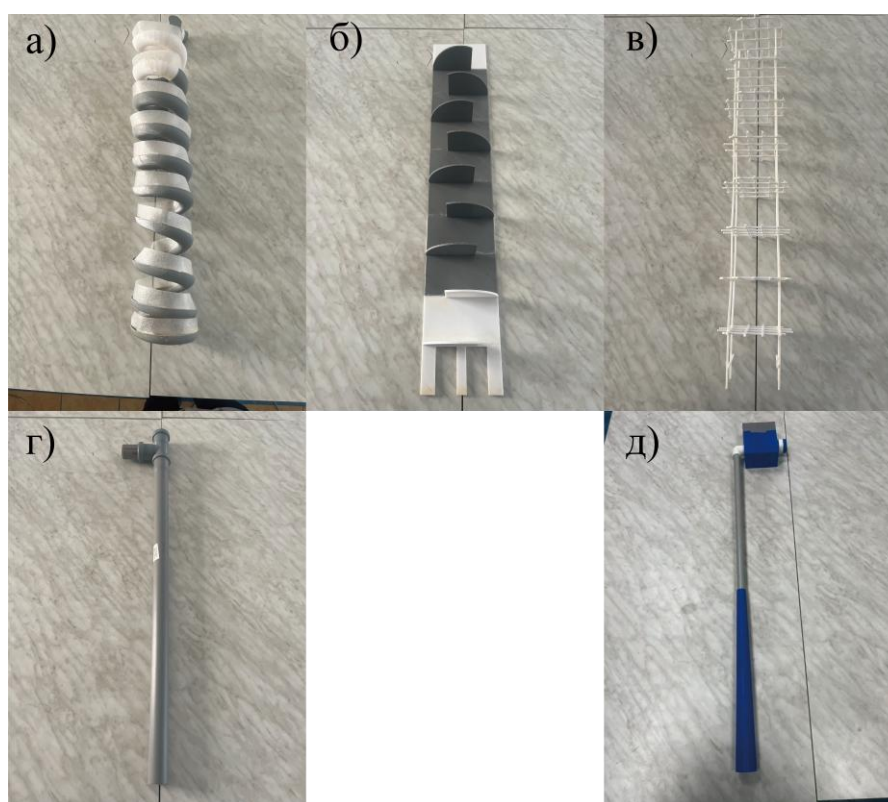


Рисунок 2.13 – Технологическое оснащение шахт из PLA, а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта с сифонным стояком [9].

В таблице 2.3 представлены размеры элементов технологического оснащения перепадной шахты [13].

Таблица 2.3 - 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	-

Для измерения скорости и расхода потока воды использовался ультразвуковой расходомер марки «Нанкин Лантеван» LTWSD-2000H (рис. 2.16). Фиксация концентрации, выделяющегося сероводорода осуществлялась газоанализатором сероводорода марки «ЭКОЛАБ», который выполнял непрерывную запись значений в течении всего времени эксперимента.



Рисунок 2.14 – Ультразвуковой расходомер



Рисунок 2.15 – Газовый детектор

Эксперимент продолжался в течении $T = 1$ часа. Перед началом эксперимента выполнялось проветривание корпуса шахты и емкости с газоанализатором при закрытом шаровом кране на подводящем и отводящем трубопроводе.

2.4.2 Подготовка воды для эксперимента

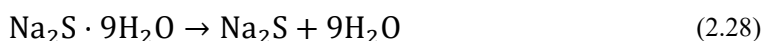
В работе было принято решение использовать модельный раствор, а не реальные сточные воды. Это решение обосновывается многообразием загрязняющих веществ и необходимостью рассмотрения процесса в чистых условиях, без каких-либо помех от других химических соединений. В эксперименте ставилась задача определения интенсивности выделения молекулярного сероводорода при известной в модельном растворе концентрации иона S^{2-} . Для приготовления модельного раствора использовался нонагидрат сульфида натрия $Na_2S \cdot 9H_2O$. Вещество представляет собой бесцветные или бледно-жёлтые кристаллы (рис. 2.18), гигроскопичен (поглощает влагу из

воздуха), обладает характерным запахом сероводорода (H_2S), хорошо растворим в воде, а водный раствор имеет сильную щёлочность (рН более 7,5) [179,75].

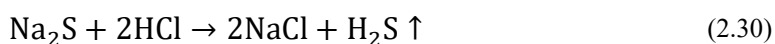


Рисунок 2.16 – Нонагидрат сульфида натрия

Реакции при растворении $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в воде имеют следующий вид:



Регулирование рН в модельном растворе осуществлялось с помощью соляной кислоты:



Согласно формуле молекулярных масс требуемая концентрация сульфида натрия в эксперименте вычислялась следующим образом:

$$M_a = \frac{M_b}{m_b} \cdot m_a \quad (2.31)$$

где M_a – требуемая масса $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, г; M_b – требуемая масса Na_2S , г; m_a –

молярная масса $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, принимается равной $m_a = 240.18$ г/моль; m_b — молярная масса Na_2S , принимается равной $m_b = 78.05$ г/моль.

Модельный раствор готовился при трёх концентрациях сульфида натрия. Для удобства сначала готовили 1 л концентрированного раствора $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Для этого 1,53 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ растворяли в 1 л дистиллированной воды и по формуле (2.75) получали раствор с концентрацией сульфида натрия 497 мг/л [8]. Затем отбирая 20, 40 и 80 мл концентрированного раствора и разбавляя их объемом дистиллированной воды в 10 л получали модельный раствор с концентрациями соответственно 1,014 мг/л, 2,028 мг/л и 3,978 мг/л [8]. Схема приготовления приведена в табл. 2.2.

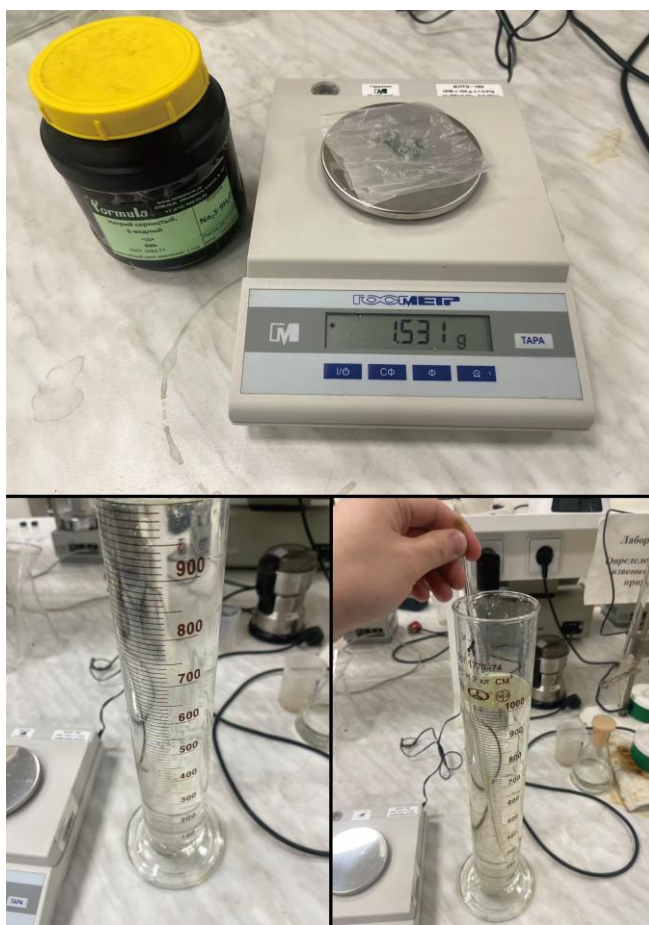


Рисунок 2.17 – Подготовка модельного раствора

Поскольку форма существования сероводорода в воде зависит от pH (см. рис. 1.1), при высоком pH он преимущественно присутствует в виде S^{2-} и HS^- , а H_2S практически отсутствует; при снижении pH происходит переход к молекулярному состоянию H_2S , особенно при $pH \leq 7$, когда сульфиды в основном находятся в форме H_2S . Чтобы смоделировать «наихудший» вариант по содержанию сероводорода, pH экспериментальной воды понижали до величины – 5. [183]

2.4.3 Программа и методика проведения исследований

В ходе подготовки эксперимента для каждого типа шахты в качестве варьируемых факторов были выбраны:

Q – расход сточных вод, m^3/c ;

C_{H_2S} – концентрация сульфидов, мг/л;

В таблице представлены значения варьируемых характеристик.

Таблица 2.4 - Параметры эксперимента

Характеристика	Номер серии эксперимента								
	1			2			3		
Расход (m^3/c)	6.28×10^{-5}			9.43×10^{-5}			1.26×10^{-4}		
Концентрация сульфида натрия (мг/л)	1.014	2.028	3.978	1.014	2.028	3.978	1.014	2.028	3.978
Скорость входного потока (м/с)	0.05			0.075			0.1		
pH	5			5			5		

2.4.4 Результаты эксперимента

Зависимость концентрации H_2S , записанной газоанализатором для различных типов шахт в зависимости от величины входной скорости потока и

концентрации сульфида натрия (Na_2S), растворённого в экспериментальной воде, показана в виде трёхмерной поверхностной диаграммы (рис. 2.18)

На основании анализа графиков установлено, что максимальная концентрация сероводорода, поступающего в шахту, достигается при минимальной скорости потока и максимальной концентрации растворённого Na_2S в воде [8]; при этом наибольшие значения характерны для шахты со спиральным лотком, а наименьшие – для шахты с сифонным стояком. Однако, не все конструкции вследствие специфики падения потока демонстрируют такое поведение. Так, шахта с поперечными балками характеризуется существенным рассеиванием и дроблением потока, которое усиливается в следствии возрастания скорости входного потока. Поэтому увеличение скорости для данной конструкции вызывает рост выделения сероводорода, что противоположно тенденции, наблюдаемой для других типов шахт.

Наиболее благоприятными типами шахт для выделения сероводорода стали шахта со спиральным лотком и шахта с многоступенчатым перепадом.

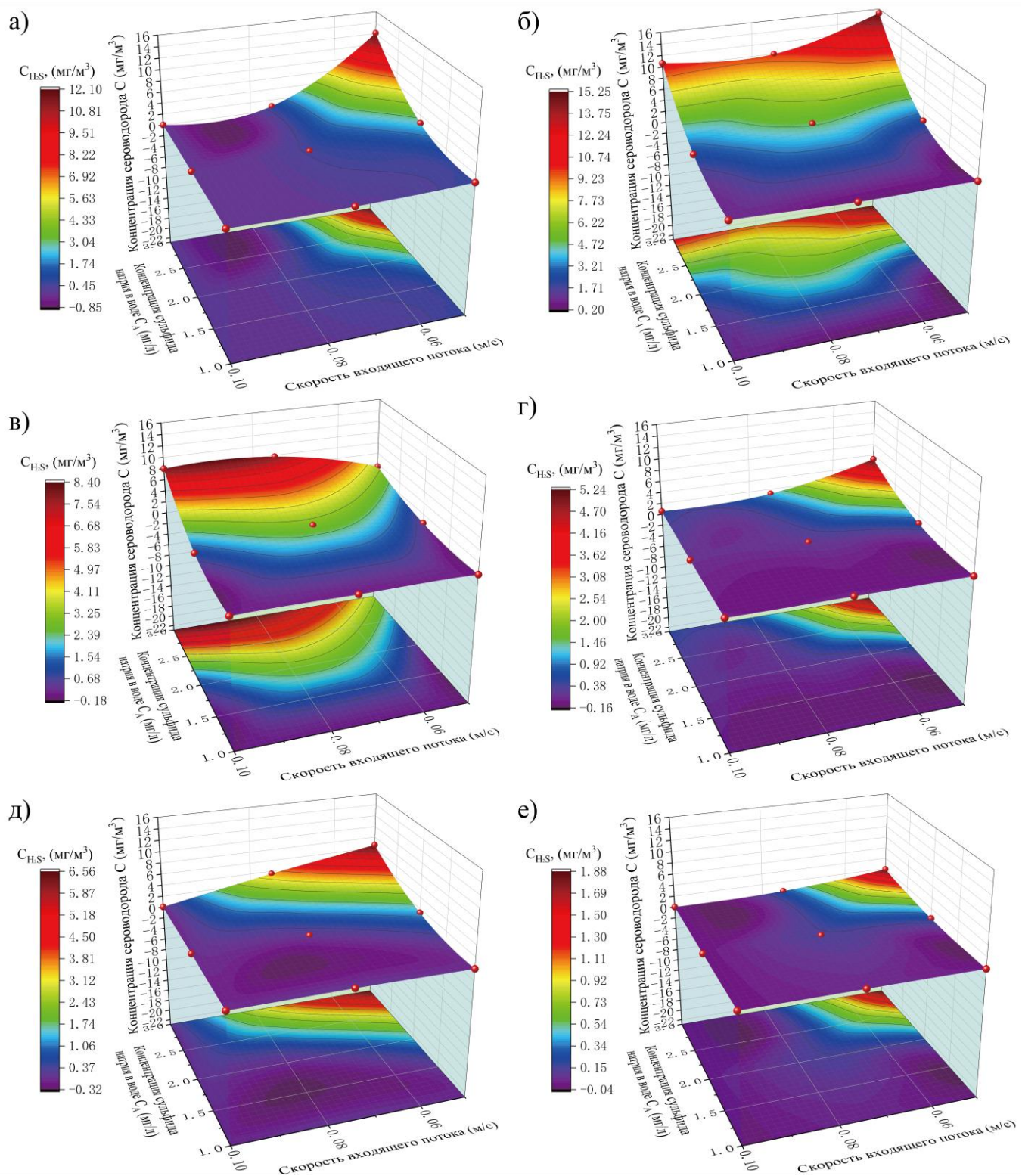


Рисунок 2.18 - Графики концентрации сероводорода в воздушном пространстве перепадной шахты, а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком [9].

Чтобы оценить массовый расход сероводорода M (кг/с), выделяющегося в шахте воспользуемся следующей зависимостью:

$$M = \frac{(C_2 - C_1)}{t} \cdot V_{\text{gas}} \quad (2.32)$$

где C_1 – концентрация H_2S в момент запуска шахты (по показанию газоанализатора), кг/м^3 ; C_2 – концентрация H_2S , соответствующая равновесному состоянию в сооружении, кг/м^3 ; t – время протекания процесса до установления равновесного состояния, с; V_{gas} – сумма объёмов шахты и емкости с газоанализатором [100].

Используя величину массового расхода, можно оценить значение коэффициента массопередачи K_Δ м/с:

$$K_\Delta = \frac{M}{S_0} / (C_3 - C_4) \quad (2.33)$$

где C_3 – концентрация H_2S в воде в определенный момент времени, кг/м^3 ; C_4 – концентрация H_2S в воздухе в определенный момент времени, кг/м^3 ; S_0 – площадь свободной поверхности жидкости, м^2 .

Используя представленные выражения были вычислены экспериментальные значения коэффициента массопередачи для различных типов перепадной шахты. На рисунке 2.19 представлены графики зависимости коэффициента от времени процесса, а также средние значения, соответствующие равновесному состоянию системы. Также на график вынесена теоретическая функция, полученная по зависимости (2.33).

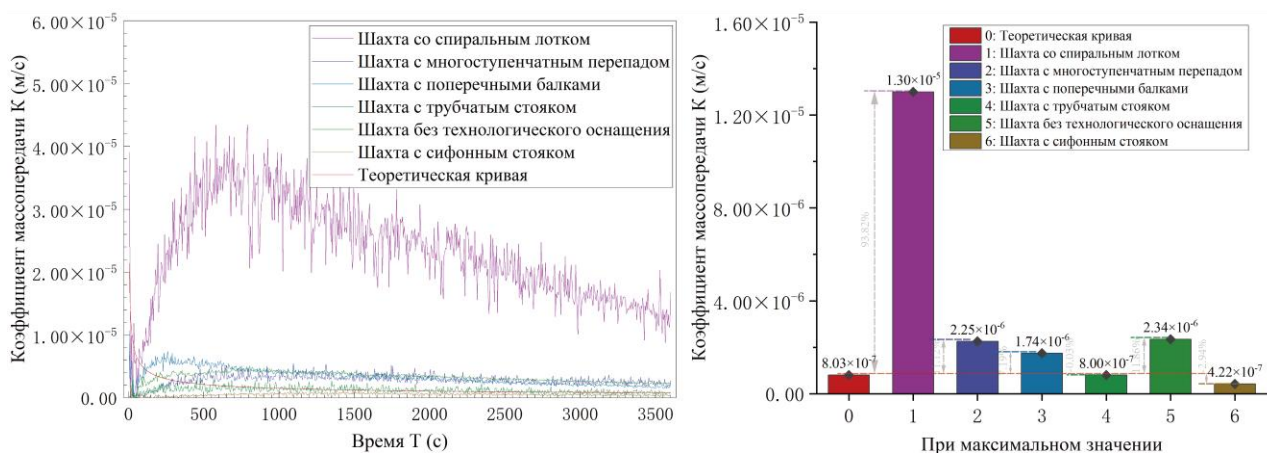


Рисунок 2.19 – Коэффициент массопередачи для различных типов перепадной шахты

Из графика на рис. 2.19 следует, что при установившемся движении потока коэффициент массопередачи для шахты со спиральным лотком существенно выше теоретической кривой на 93,82 %, для шахты с многоступенчатым перепадом – выше на 11,12 %, для шахты с поперечными балками – выше на 7,19 %, для шахты с трубчатым стояком – значение коэффициента близко к теоретической кривой, ниже её на 0,03 %, для шахты без технологического оснащения – значение превышает теоретическое на 11,86 %. Для шахты с сифонным стояком зафиксирован коэффициент ниже теоретического на 2,94 %.

2.5 Сравнение результатов моделирования и эксперимента

Сопоставление экспериментальных данных с результатами численного моделирования показало, что вычисленная по модели концентрация в шахте несколько занижена по сравнению с данными лабораторных измерений. Сопоставляя данные эксперимента (рис. 2.5) и соответствующего трёхмерного графика для моделирования (рис. 2.18) следует, что оба результата демонстрируют одинаковую тенденцию изменения концентрации в шахте. В связи с этим в работе введён весовой поправочный коэффициент для калибровки численной модели и согласования данных расчетного и лабораторного

экспериментов. Графики зависимости калибровочного коэффициента от концентрации сульфидов в исходной воде представлены на рис 2.20. При увеличении концентрации сульфидов наблюдается стабилизация коэффициента.

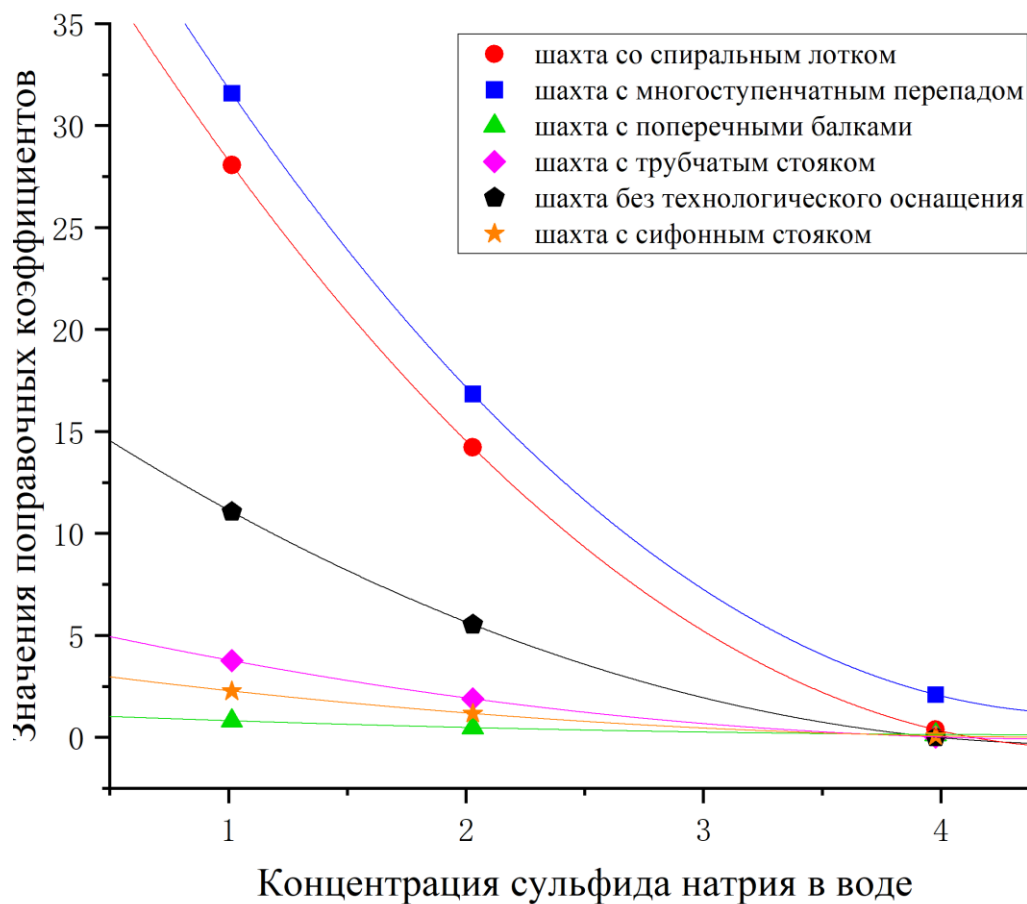


Рисунок 2.20 - Зависимость калибровочного коэффициента от концентрации сульфидов в исходной воде

В соответствии с введенными поправочными коэффициентами выполнен перерасчет коэффициентов массопередачи для модельных данных. Результаты сравнения представлены на рис. 2.21. Значения коэффициентов массопередачи расположились внутри доверительного интервала лабораторных экспериментов. Руководствуясь этим результатом, можно отметить, что разработанная модель может быть использована для расчета натуральных сооружений с учетом калибровочных коэффициентов.

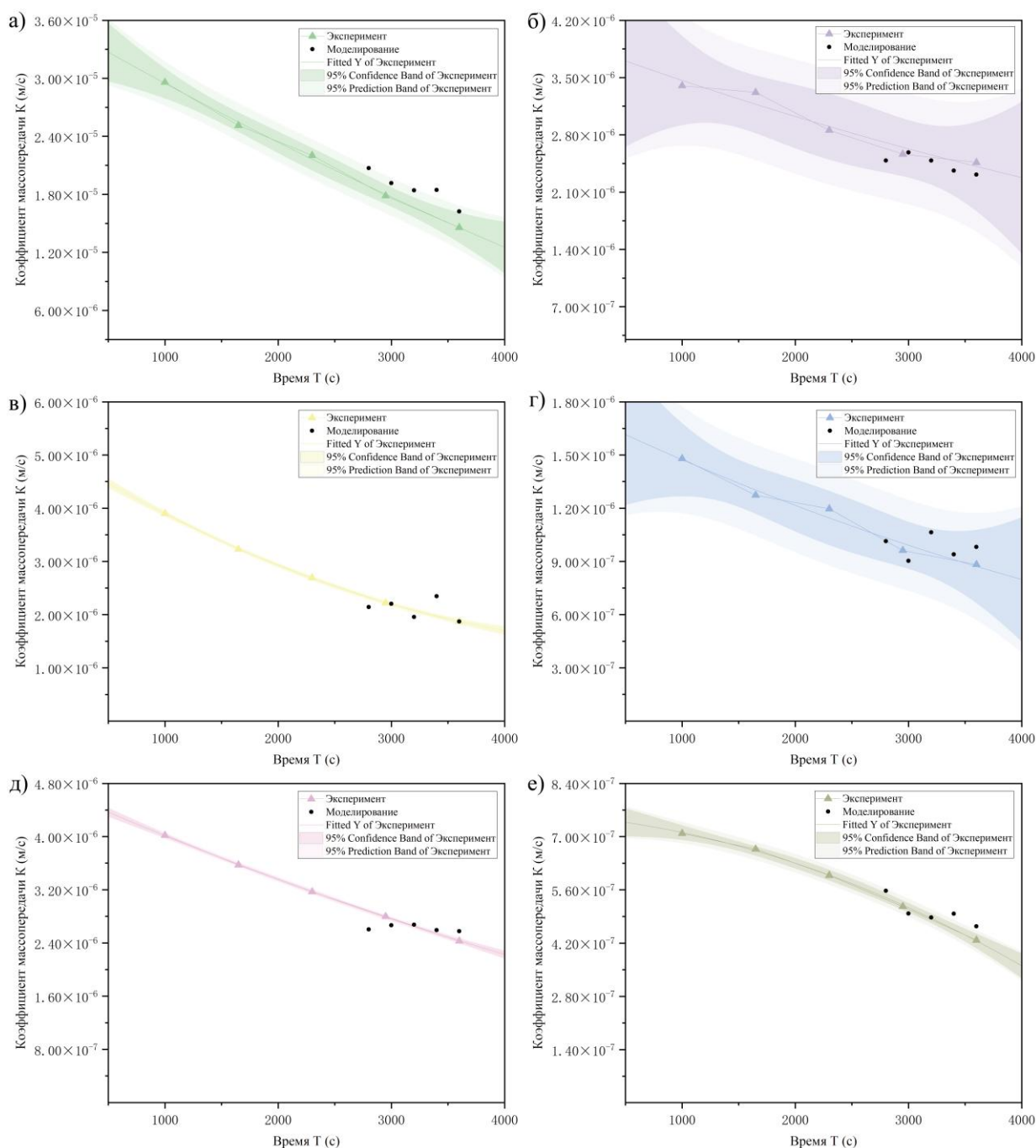


Рисунок 2.21 - Соотношение доверительных интервалов для расчётных моделируемых и экспериментальных данных, а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком [9].

Выводы по второй главе

1. Выполненный обзор существующих теорий массообмена показал, что наиболее предпочтительной для оценки газовыделения сероводорода в шахте является теория Хигби. Используя данную теорию, получена теоретическая

зависимость для оценки коэффициента массопередачи применительно к перепадной шахте в зависимости от скорости входного потока и высоты перепада.

2. Подготовлена численная модель для лабораторной геометрии перепадной шахты. Получены результаты, отражающие влияние конструкции перепада на интенсивность выделения сероводорода. Результаты подтвердили значительное влияние конструкции перепадных шахты на концентрацию сероводорода. Наибольшая концентрация сероводорода зафиксирована в шахте со спиральным лотком. В шахте с сифонным стояком наблюдалась наименьшая концентрация. В большинстве конструкций концентрация сероводорода увеличивается при снижении скорости входного потока и роста концентрации, растворённого Na_2S в воде.

3. Разработана лабораторная установка перепадной шахты. Лабораторные результаты качественно подтвердили закономерность изменения концентрации сероводорода, полученную при моделировании. После калибровки модели с помощью экспериментальных данных результаты расчета хорошо согласуются с опытными данными (1 - 5 %). Конечно-элементную модель можно использовать для прогнозирования выделения сероводорода на натурной перепадной шахте [8].

4. Сравнение концентрации сероводорода, вычисленной с помощью теории массообмена Хигби показало, что теоретический расчет дает заниженные результаты по сравнению с данными эксперимента и модельного расчета на 10-94% для различных шахт [8].

3. Моделирование процесса выделения сероводорода в перепадных шахтах разного типа

Принимая во внимание сходимость результатов экспериментальных и модельных расчетов можно, заключить о возможности применения предложенной численной модели для анализа дегазации сероводорода в сооружении реальных размеров с целью оценки величины коэффициента массопередачи для различных вариантов конструкции шахты (см. рис2.1). В таблице 3.1 представлены значения расчетных характеристик, используемых для проведения вычислительного эксперимента.

Таблица 3.1 - Параметры расчета.

Характеристика	1			2			3		
Расход ($\text{м}^3/\text{с}$)	1.72			2.67			4.51		
Концентрация сульфида натрия (мг/л)	1.014	2.028	3.978	1.014	2.028	3.978	1.014	2.028	3.978
Скорость входного потока (м/с)	1.09			1.19			1.33		
Размер ячеек расчетной сетки (м)	0.004			0.004			0.004		

3.1 Результаты модельного расчета коэффициента массопередачи

3.1.1 Анализ распределения объемной доли сероводорода в перепадной шахте

С использованием постпроцессора CFD-Post получены поля распределения объёмной доли сероводорода (рис. 3.1) и давления (рис. 3.2) по высоте для каждой перепадной шахты с течением времени до момента наступления установившегося движения потока. Градиент давления

верифицировался по зависимости (1.2). Результаты сравнения показали хорошую сходимость градиентов давления, диапазон расхождения составил от 5.73 до 18.03%. Для конструкции со спиральным лотком (см. рис. 3.1, а) после поступления потока в шахту вода движется вниз по спиральному лотку прижимаясь к стенке шахты. По мере увеличения скорости потока и развития турбулентности наблюдается выделение сероводорода воды. Установившееся спиральное движение воды увлекает окружающий воздух, формируя восходящий воздушный поток. Поэтому часть выделившегося сероводорода поднимается воздухом вверх. Можно отметить, что для шахты данной конструкции характерно преимущественно восходящее перемещение сероводорода, что потенциально приводит к его выходу через верхний люк в окружающую среду.

В шахте с многоступенчатым перепадом (см. рис. 3.1, б) осуществляется последовательное падение потока по ступеням. При контакте с каждой ступенью поток у её конца разворачивается и перетекает на следующую, ориентированную в противоположном направлении, что вызывает локальные зоны турбулентности. Возникновение турбулентности приводит к выделению сероводорода в воздушное пространство шахты. Поскольку общий поток воды направлен строго вниз, то воздух преимущественно вовлекается в нисходящее движение. При этом наличие межступенчатых полостей подавляет возмущения воздуха, направленные вверх, и тем самым ограничивает подъём сероводорода. В целом сероводород перемещается вниз совместно с воздухом. Это снижает вероятность переноса сероводорода к верхней части шахты и вынос в окружающую среду.

В случае шахты с поперечными балками (см. рис. 3.11, в) поток воды

взаимодействует с решётчатой конструкцией, составленной из поперечных балок. Взаимодействие с решеткой эффективно гасит энергию потока максимально рассеивая его, однако существенно повышает турбулентность и аэрацию окружающим воздухом, вследствие чего сероводород интенсивно выделяется в газовую среду шахты. Поскольку общий поток направлен вниз, сероводород также преимущественно перемещается вниз вместе с воздухом, частично накапливаясь в нижней части шахты.

В шахте с трубчатым стояком (см. рис. 3.1, г) вода, содержащая сероводород, транспортируется по вертикальному трубопроводу вниз до водобойного колодца. Внутри стояка интенсивность турбулентности невелика, однако за счёт действия силы тяжести скорость потока при достижении дна остаётся высокой и составляет от 14.42 до 20.37 м/с. Поэтому после удара и формирования гидравлического прыжка большая часть сероводорода выделяется в газовую среду вблизи водобойного колодца. Поскольку поток в стояке эжектирует воздух из верхней части шахты, то в процессе работы часть сероводорода может подниматься в вертикальном направлении, вплоть до заполнения всего объема сооружения.

Для шахты без технологического оснащения (см. рис. 3.1, д) вода, содержащая сероводород, после входа движется по параболической траектории и падает на дно. В отсутствие внутренних перегородок часть сероводорода уже высвобождается в верхней части воздушного пространства шахты. Кроме этого, вследствие высокой скорости при ударе о дно возникает разбрызгивание, что приводит к интенсивному выделению сероводорода в нижней части. Поскольку

отсутствуют строительные элементы, препятствующие перемешиванию и движению воздушных масс, то падающий поток формирует вихревое движение воздуха с высокой турбулентностью, что приводит к подъему скопившегося внизу сероводорода на более высокие отметки сооружения.

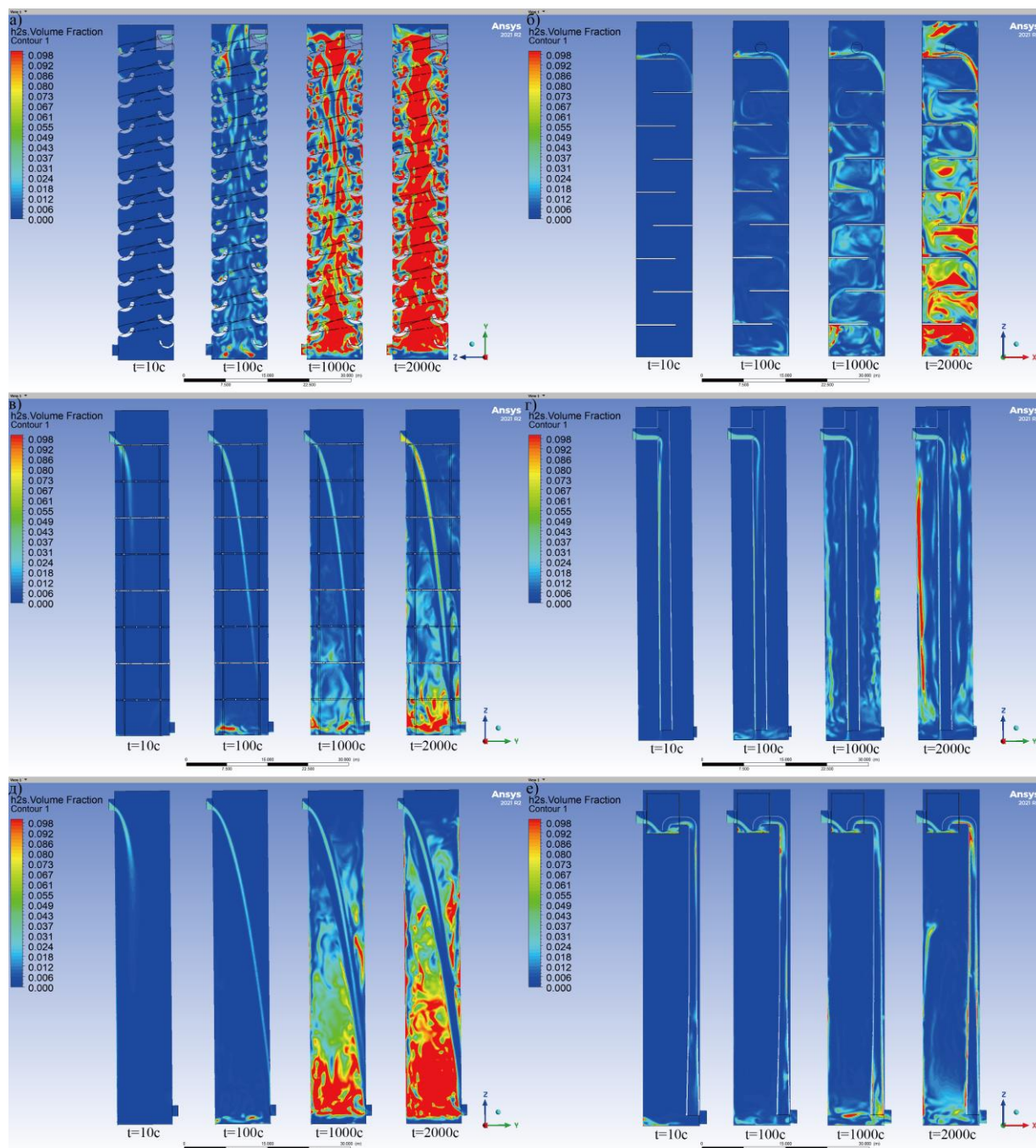


Рисунок 3.1 - Поле объёмной доли концентрации сероводорода в перепадной шахте: а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком [9].

В шахте с сифонным стояком (см. рис. 3.1, е) вода первоначально поступает в приемную емкость, с помощью которой осуществляется зарядка сифона. После начала работы осуществляется всасывание сточной воды и скопившегося сероводорода в трубопровод, который начинает работать полным сечением. Чтобы снизить энергию потока вертикальный трубопровод уширяется на 50% к низу и выполняется в форме диффузора. Увеличение площади сечения трубопровода позволяет уменьшить скорость потока и снизить степень турбулизации. В случае стабильной работы сифона с постоянным расходом исключается интенсивное выделение сероводорода в нижнем бьефе. Выделение газа фиксировалось в момент неустановившегося движения, когда работа сифона прекращалась или менялся режим работы в силу уменьшения поступающего расхода.

3.1.2 Анализ коэффициента массопередачи

На основе полученных результатов моделирования и расчётов построены графики зависимости коэффициента массопередачи в зависимости от времени работы перепадной шахты (рис. 3.3). На графики также вынесена функция, соответствующая значениям коэффициента, вычисленным с помощью теории проникновения. Модельные значения коэффициента соответствуют условиям максимального ($V = 1,09$ м/с, $C_{H_2S} = 3,978$ мг/л) и минимального ($V = 1,33$ м/с, $C_{H_2S} = 1,014$ мг/л) газовыделения. Для большинства конструкций отмечается значительное расхождение результатов моделирования и значений коэффициента,

прогнозируемых по теории проникновения.

Для шахты со спиральным лотком при наиболее неблагоприятных условиях зафиксировано превышение на 99,80 % относительно теоретических значений коэффициента, а при минимальной концентрации сероводорода – ниже на 0,17 %. В случае шахты с многоступенчатым перепадом, для случая максимального газовыделения, получено превышение результатов коэффициента на 42,63 %, при минимальном газовыделении – ниже на 2,36 %; Соответственно для шахты с поперечными балками при максимуме – выше на 15,18 %, при минимуме – ниже на 0,20 %; для шахты с трубчатым стояком при максимуме – выше на 0,53 % [10], при минимуме – ниже на 0,19 %; для шахты без технологического оснащения при максимуме – выше на 43,38 %, при минимуме – ниже на 0,19 %; для шахты с сифонным стояком при максимуме – выше на 0,26 %, при минимуме – ниже на 0,19 %. Из сопоставления следует, что в наиболее неблагоприятных условиях коэффициент массопередачи для шахты с сифонным стояком является наименьшим. Это согласуется с результатами лабораторных экспериментов: в обоих случаях наблюдается минимальное выделение сероводорода.

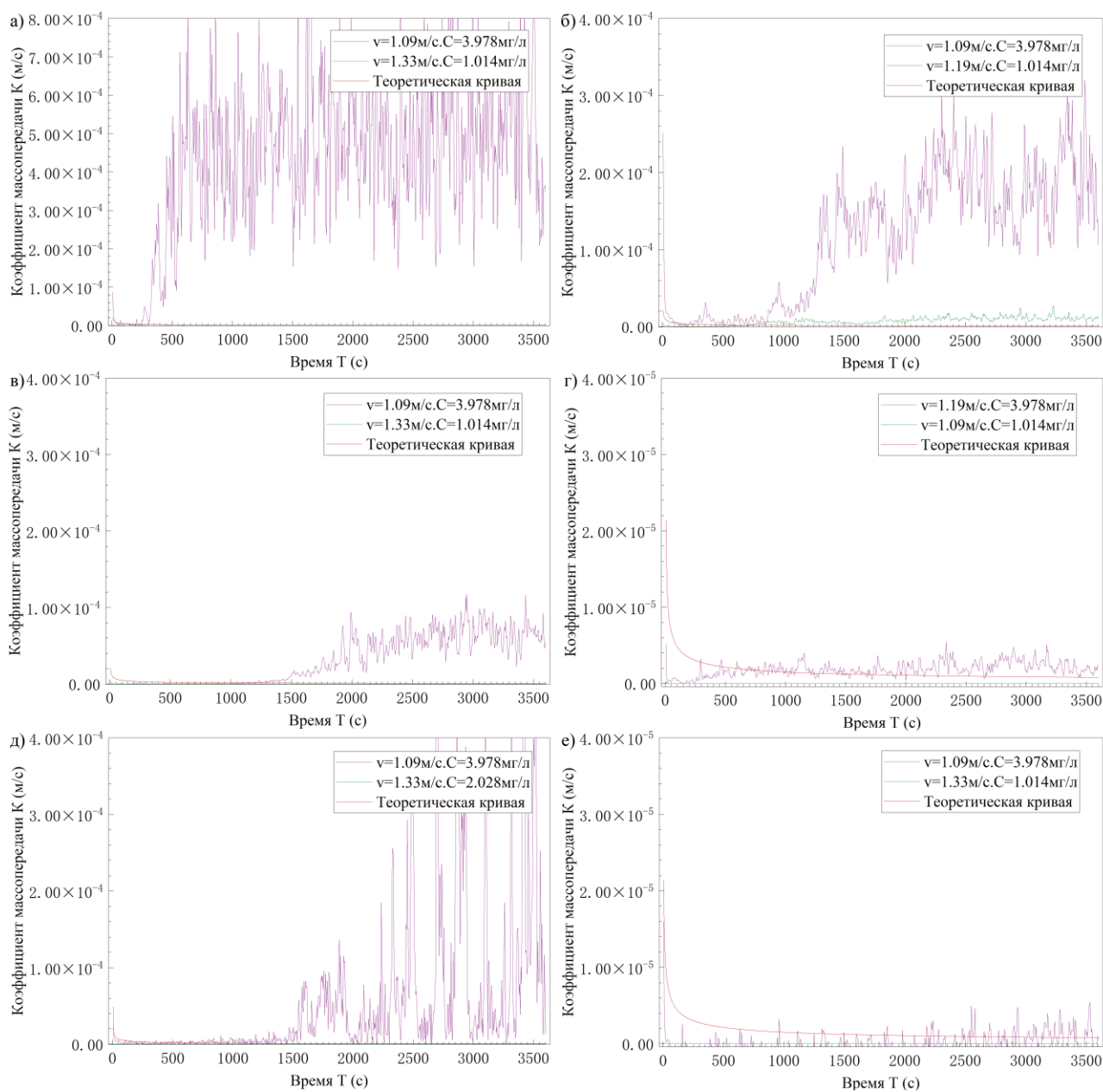


Рисунок 3.3 - Графики зависимости коэффициента массопередачи от времени работы перепадной шахты: а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком [9].

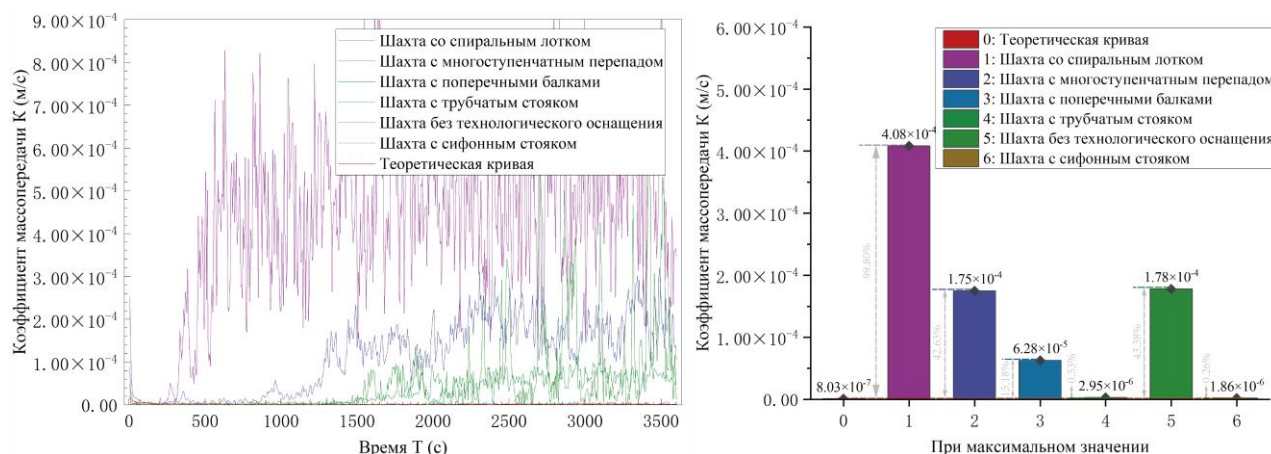


Рисунок 3.4 - Сравнение коэффициентов массопередачи для различных конструкций перепадной шахты

Аналогично лабораторным результатам был построен трёхмерный график зависимости коэффициента массопередачи в зависимости от исходной концентрации сероводорода в воде и скорости входного потока (рис. 3.5). Из графика видно, что тенденция трёхмерного распределения коэффициента массопередачи для реального сооружения качественно соответствует результатам, полученным на лабораторной установке (рис. 2.5). В дальнейшем используем полученные результаты для получения общей закономерности изменения коэффициента массопередачи для различного масштаба сооружений.

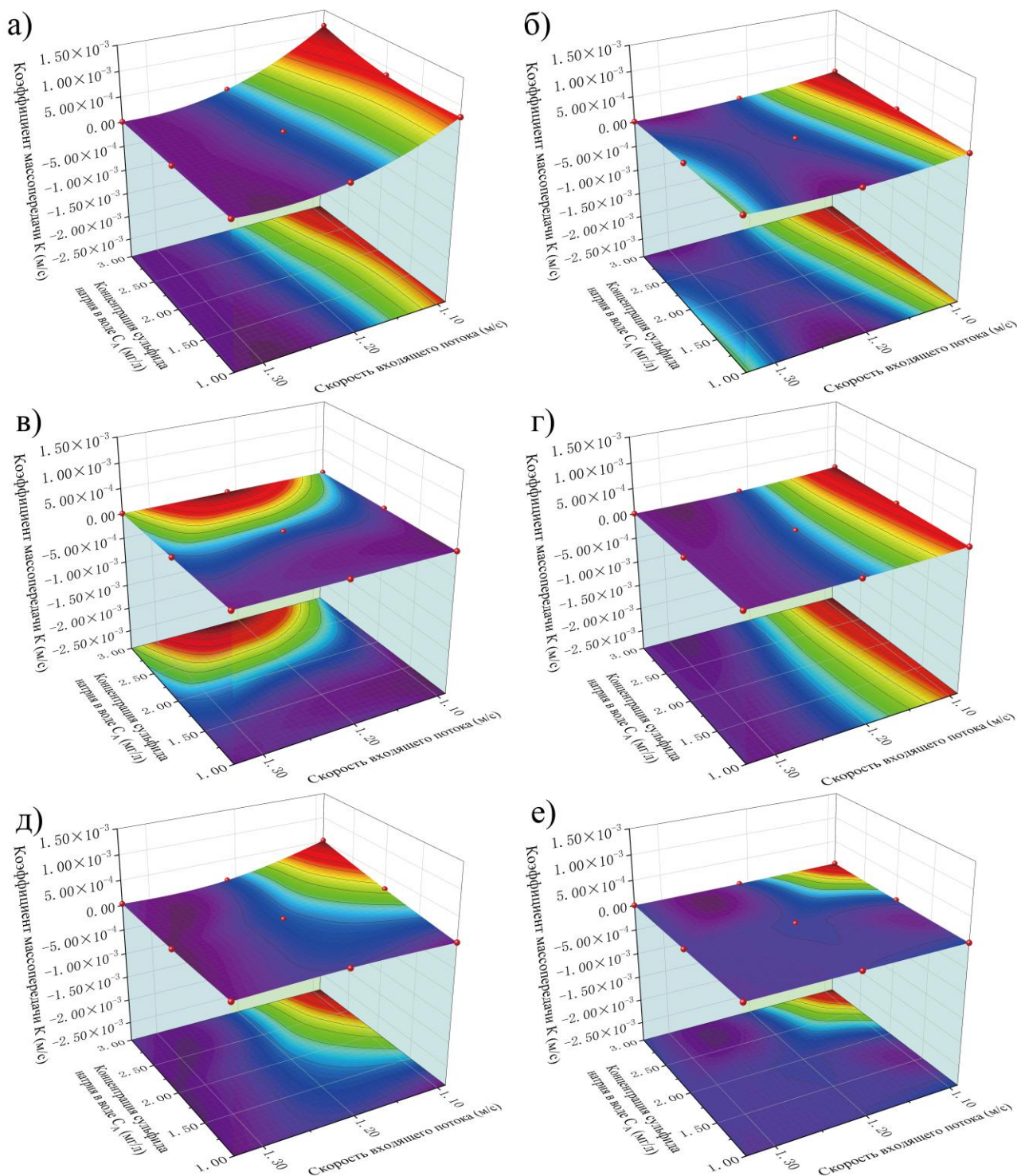


Рисунок 3.5 - Графики зависимости коэффициента массопередачи от концентрации сероводорода в исходной воде и скорости входного потока: а) шахта со спиральным лотком; б) шахта с многоступенчатым перепадом; в) шахта с поперечными балками; г) шахта с трубчатым стояком; д) шахта без технологического оснащения; е) шахта с сифонным стояком [9].

3.2 Математическая обработка результатов с помощью Пи-теоремы

3.2.1 Получение безразмерных комплексов

Для анализа результатов расчета использовалась теорема Бекингема. Процесс дегазации сероводорода из воды зависит от следующих характеристик: расход Q ($\text{м}^3/\text{с}$), высота падения потока H (м), концентрация сероводорода в воздушном пространстве шахты C ($\text{кг}/\text{м}^3$), начальная концентрация сероводорода в воде C_A ($\text{кг}/\text{м}^3$), ускорение свободного падения g ($\text{м}/\text{с}^2$), кинематическая вязкость воды ν ($\text{м}^2/\text{с}$), площадь поверхности контакта водной и воздушной фазы A (м^2), коэффициент массопередачи K ($\text{м}/\text{с}$).

Форма записи производных физических величин через основные механические единицы представлена в таблиц 3.2:

Таблица 3.2 - Размерность производных физических величин

Физическая величина	Размерность
расход Q	$[\text{L}^3 \text{T}^{-1}]$
высота падения потока H	$[\text{L}]$
измеренная концентрация C	$[\text{M L}^{-3}]$
начальная концентрация C_A	$[\text{M L}^{-3}]$
ускорение свободного падения g	$[\text{L T}^{-2}]$
кинематическая вязкость воды ν	$[\text{L}^2 \text{T}^{-1}]$
площадь контакта газ–жидкость A	$[\text{L}^2]$
коэффициент массопередачи K	$[\text{L T}^{-1}]$

Для применения π -теоремы в качестве независимых переменных выбраны H , C и Q .

Запишем зависимости для безразмерных π -членов.

Для C_A :

$$\pi_{C_A} = C_A \times H^{a_1} \times C^{b_1} \times Q^{c_1} \quad (3.1)$$

Тогда первый π -член выраженный через размерности имеет вид:

$$[ML^{-3}] \times [L]^{a_1} \times [ML^{-3}]^{b_1} \times [L^3T^{-1}]^{c_1} = M^{\{1+b_1\}} L^{\{-3+a_1-3b_1+3c_1\}} T^{\{-c_1\}} \quad (3.2)$$

Решение линейных уравнений позволяет получить:

$$\pi_{C_A} = \frac{C_A}{H} \quad (3.3)$$

Для g выражение имеет вид:

$$\pi_g = g \times H^{a_2} \times C^{b_2} \times Q^{c_2} \quad (3.4)$$

Тогда:

$$[LT^{-2}] \times [L]^{a_2} \times [ML^{-3}]^{b_2} \times [L^3T^{-1}]^{c_2} = M^{b_2} L^{\{1+a_2-3b_2+3c_2\}} T^{\{-2-c_2\}} \quad (3.5)$$

а выражение для π -члена примет вид:

$$\pi_g = \frac{gH^5}{Q^2} \quad (3.6)$$

Для A :

$$\pi_A = A \times H^{a_3} \times C^{b_3} \times Q^{c_3} \quad (3.7)$$

Тогда:

$$[L^2] \times [L]^{a_3} \times [ML^{-3}]^{b_3} \times [L^3T^{-1}]^{c_3} = M^{b_3} L^{\{2+a_3-3b_3+3c_3\}} T^{\{-c_3\}} \quad (3.8)$$

Решение:

$$\pi_A = \frac{A}{H^2} \quad (3.9)$$

Для K :

$$\pi_K = K \times H^{a_4} \times C^{b_4} \times Q^{c_4} \quad (3.10)$$

Тогда:

$$[LT^{-1}] \times [L]^{a_4} \times [ML^{-3}]^{b_4} \times [L^3T^{-1}]^{c_4} = M^{b_4} L^{\{1+a_4-3b_4+3c_4\}} T^{\{-1-c_4\}} \quad (3.11)$$

Решение:

$$\pi_K = \frac{KH^2}{Q} \quad (3.12)$$

Для v :

$$\pi_v = v \times H^{a_5} \times C^{b_5} \times Q^{c_5} \quad (3.13)$$

Тогда:

$$[L^2T^{-1}] \times [L]^{a_5} \times [ML^{-3}]^{b_5} \times [L^3T^{-1}]^{c_5} = M^{b_5} L^{\{2+a_5-3b_5+3c_5\}} T^{\{-1-c_5\}} \quad (3.14)$$

Решение:

$$\pi_v = \frac{vH}{Q} \quad (3.15)$$

Выразим зависимость для определения коэффициента массопередачи в виде степенного уравнения с постоянным коэффициентом a и показателями степеней m, n , получаем:

$$K = \frac{v}{H} \times a \times \left(\frac{Q}{A\sqrt{gH}} \right)^m \times \left(\frac{C}{C_A} \right)^n \quad (3.16)$$

Применяя соотношения безразмерных критериев Fr получим следующий вид уравнения:

$$K = \frac{v}{H} a \times Fr^m \times C^n \quad (3.17)$$

3.2.2 Модель прогнозирования выделения сероводорода

Используя зависимость (3.14), были выполнены регрессионные расчёты с помощью программы SPSS [72] с целью определения значения коэффициентов a ,

m, n, s . Для каждой конструкции перепадной шахты были получены расчетные зависимости для оценки коэффициента массопередачи.

Таблица 3.3 -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

Для шахты со спиральным лотком:

$$K = 1.42 \times 10^{-10} \times Fr^{-0.999} \times C^{1.005} \quad (3.18)$$

Для шахты с многоступенчатым перепадом:

$$K = 5.81 \times 10^{-13} \times Fr^{-2.44} \times C^{0.938} \quad (3.19)$$

Для шахты с поперечными балками:

$$K = 1.42 \times 10^{-10} \times Fr^{-1.115} \times C^{1.022} \quad (3.20)$$

Для шахты со стояком:

$$K = 1.38 \times 10^{-11} \times Fr^{-1.565} \times C^{1.001} \quad (3.21)$$

Для шахты без конструктивных элементов:

$$K = 1.42 \times 10^{-10} \times Fr^{-1.091} \times C^{1.018} \quad (3.22)$$

Для шахты с сифонным стояком:

$$K = 1.10 \times 10^{-12} \times Fr^{-2.025} \times C^{1.012} \quad (3.23)$$

3.3. Влияние типа перепадной шахты и режима работы на коэффициент массопередачи

На основе регрессионных уравнений для различных конструкций шахт

для случая максимальной концентрации растворенного сероводорода в воде (3,978 мг/л) были построены функции зависимости $K=f(Fr)$ (рис. 3.6). Используя график, можно выделить область наименьших значений коэффициента, которая отражает условия минимального выделения сероводорода в перепадной шахте. Для различных конструкций граница стабилизации коэффициента массопередачи индивидуальна. Отметим, что основными факторами, определяющими увеличение интенсивности выделения, выступает увеличение высоты перепада и уменьшение расхода сточных вод. Согласно представленным на рисунке данным, значения коэффициента массопередачи для шахты со спиральным лотком, шахты с многоступенчатым перепадом, шахты с поперечными балками [8], шахты с трубчатым стояком, шахты без технологического оснащения и шахты с сифонным стояком стабилизируются при значениях числа Фруда, равных 0,28; 0,29; 0,3; 0,46; 0,62 и 0,83 соответственно.

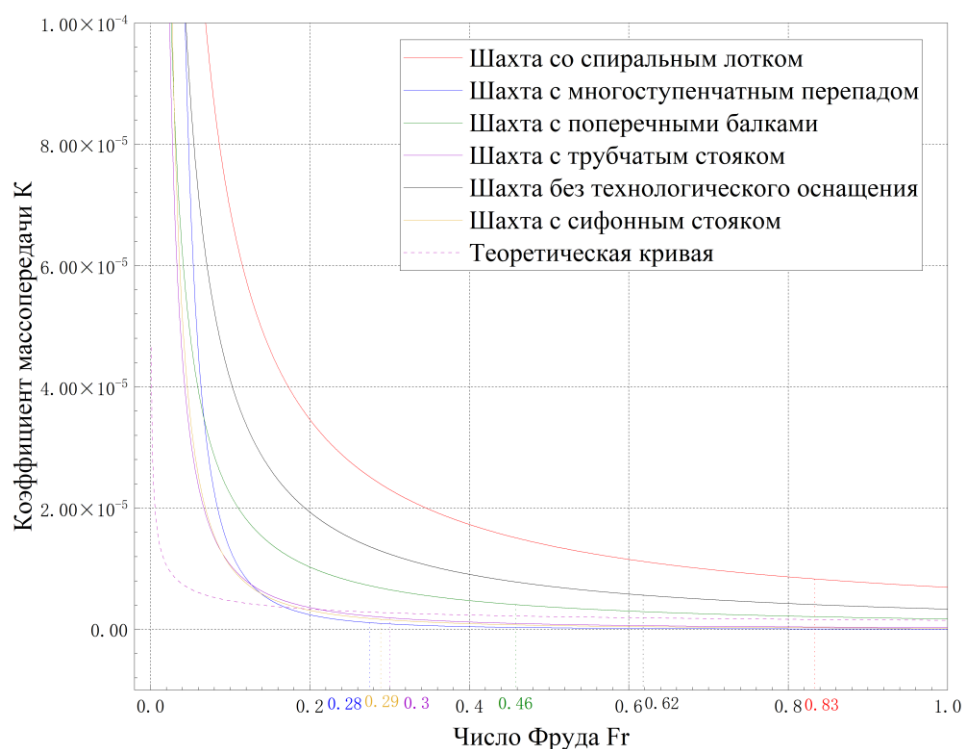


Рисунок 3.6 – Зависимости коэффициента массопередачи от критерия Fr

Для оценки достоверности полученных закономерностей были использованы экспериментальные данные следующих авторов Yongsiri C, Pacheco, Hamada N F. и др. [176,123,63]. Большинство из экспериментальных точек попадает в 95 % прогнозный интервал (рис. 3.7), что подтверждает возможность применения прогностической модели для оценки выделения сероводорода в шахтах без технологического оснащения.

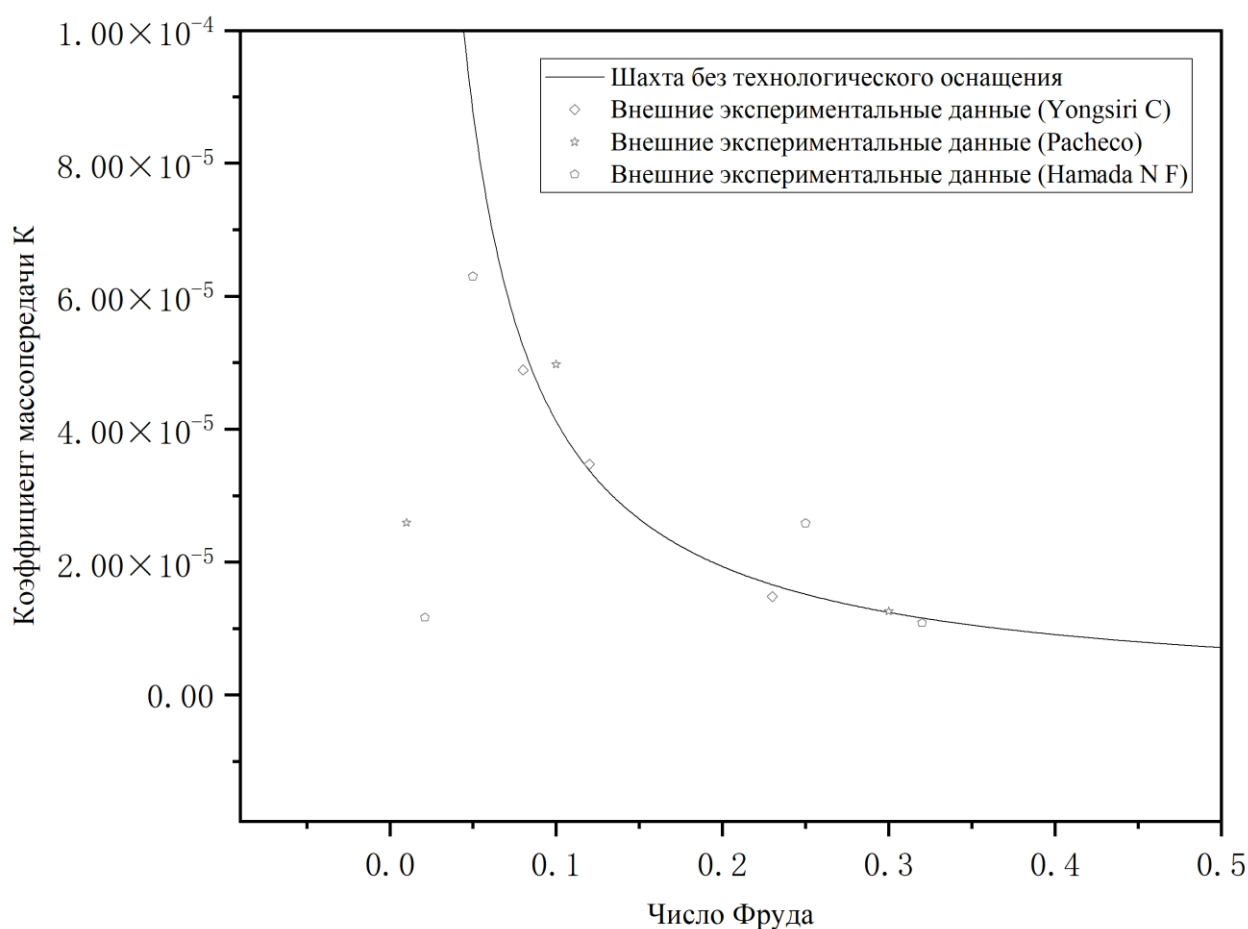


Рисунок 3.7 – Сравнения модельных и экспериментальных значений коэффициента массопередачи [176,123,63]

На рис. 3.8 для оценки проверки расчетных зависимостей коэффициента массопередачи вынесены результаты модельных расчетов для перепадов разной высоты – 15, 30 и 60 м по каждому типу шахты. Результаты моделирования показали хорошую сходимость для условий разной скорости падения потока.

Руководствуясь результатом, можно отметить, что полученные с помощью Питеоремы зависимости могут быть использованы для проектирования перепадных шахт с различной высотой падения.

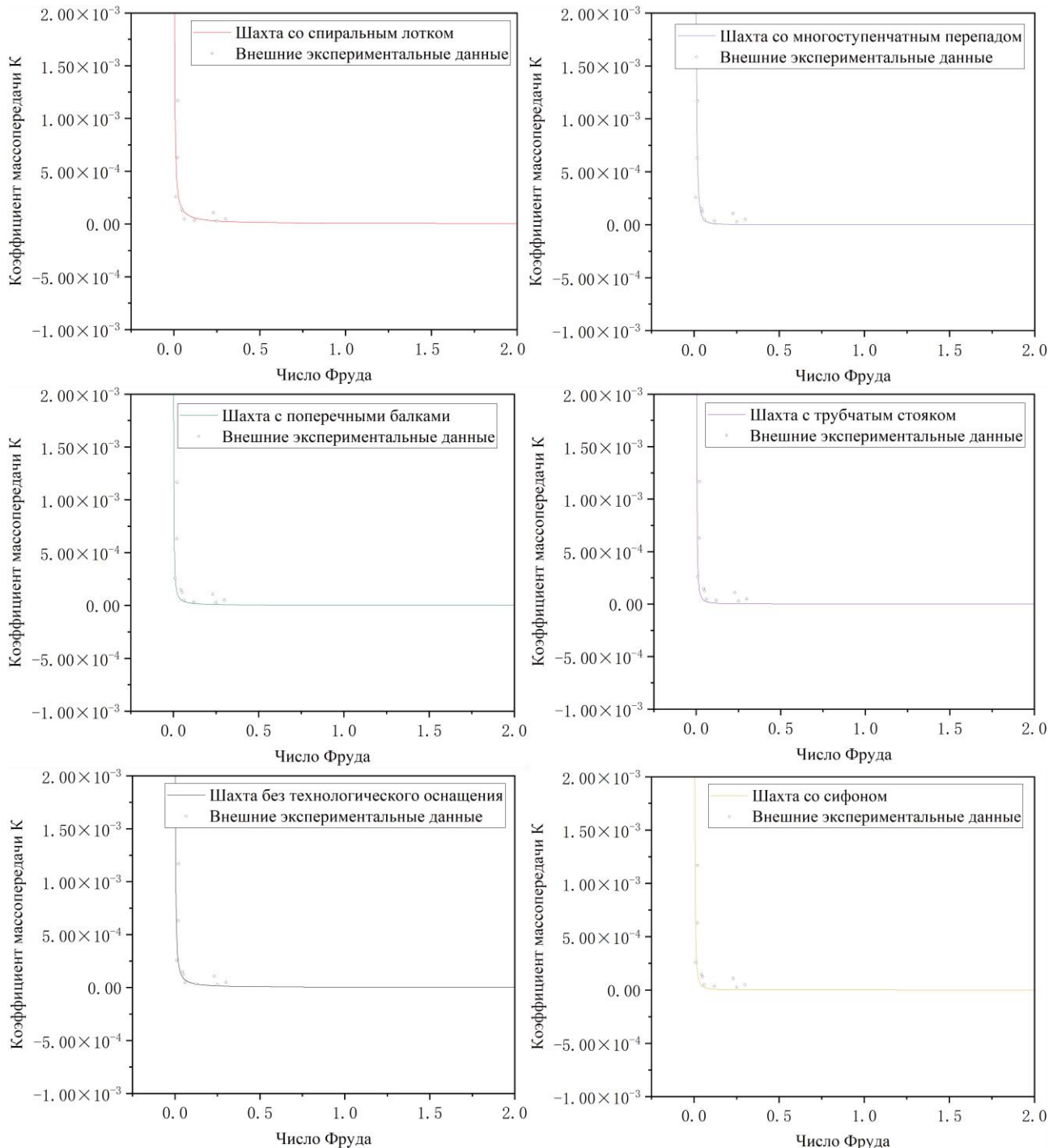


Рисунок 3.8 - Зависимость коэффициента массопередачи от числа Фруда Fr при различной высоте шахты.

На основе регрессионных уравнений (3.17) для различных конструкций

шахт построены функции $K=f(Fr)$ (рис. 3.9). В качестве примера представлен график для соотношения $Cr = 0,003$. 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 3.4 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 3.4 – 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 (3.17) использовались экспериментальные данные Yongsiri C, Pacheco, Hamada N F. и др, а также

результаты численного моделирования для перепадных шахт с другой высотой перепада (15 и 30 м). На рис. 9 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.

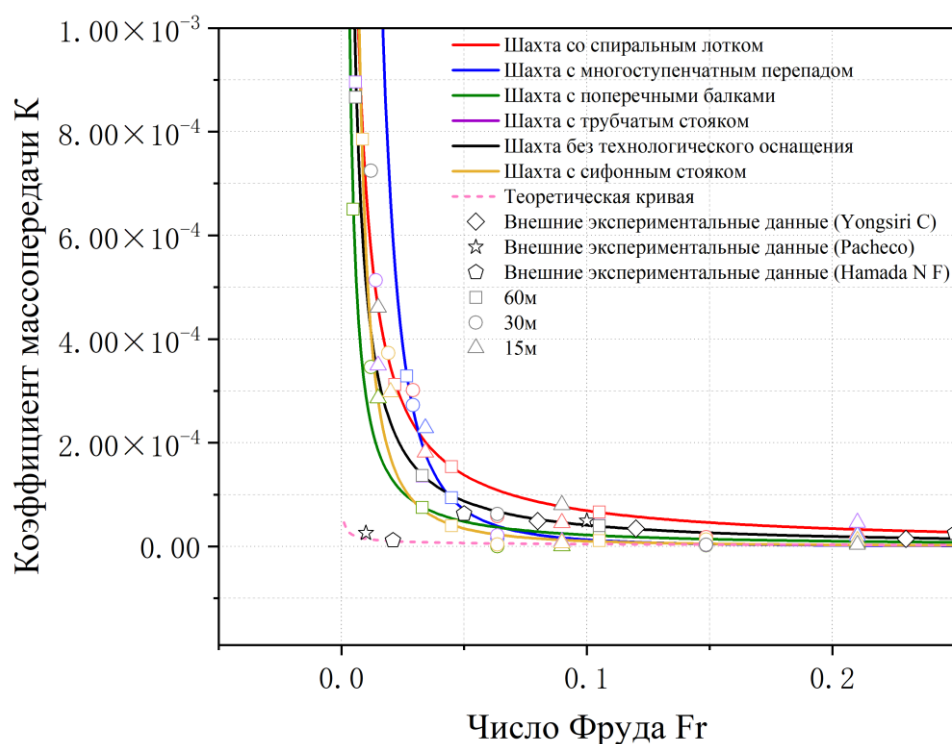


Рисунок 3.9 – Зависимости коэффициента массопередачи от критерия Fr

3.4. Эксперимент в перепадной шахте канализационной сети

Для проверки эффективности подавления выделения сероводорода в новой конструкции перепадной шахты выполнялись исследования работы сифонного стояка на участке муниципальной канализационной сети (общесплавная) в восточной части проспекта Фэнсян г. Пиндиншань (пров. Хэнань, КНР). Для

сравнения интенсивности выделения сероводорода также рассматривалась работа перепадной шахты без технологического оснащения. На рис. 3.10 а) показана схема сооружения колодца, диаметр подводящего и отводящего трубопровода составлял $d = 0.1$ м, диаметр перепадного колодца – $D = 0.6$ м, а высота перепада равнялась $H = 1$ м. На рис. 3.10 б) показана схема сооружения сифонной структуры, подводящего трубопровода составлял $d_1 = 0.1$ м, диаметр сифона $d_2 = 0.05$ м, общая высота сифонной конструкции $h_1 = 1.2$ м, сифонная коробка $l \times h_2 \times b = 31.5 \times 45.5 \times 20.5$ м. Расход сточных вод на рассматриваемом участке системы находился в диапазоне $Q = 2.12 - 4.15$ л/с. Для фиксации концентрации сероводорода в воздушном пространстве колодца использовался газоанализатор Пулитонг PLT-804, который подвешивался на веревке рядом с подводящим трубопроводом. Также для качественной индикации присутствия сероводорода закреплялся образец из низкоуглеродистой стали, в шахте без технологического оснащения – №1, в шахте с сифонным стояком – №2 (рис. 3.10).

Во влажной среде канализации контакт сероводорода с образцом из низкоуглеродистой стали провоцирует возникновение электрохимической коррозии металла. На первом этапе газообразный H_2S растворяется в водной пленке на поверхности стали, диссоциируя на ионы H^+ и HS^- . Железо в составе низкоуглеродистой стали выступает в качестве анода отдает электроны и переходит в раствор в виде ионов Fe^{2+} . Ионы H^+ в воде выступают в качестве катода присоединяют электроны и восстанавливаются до атомарного водорода. Впоследствии ионы Fe^{2+} взаимодействуют с ионами S^{2-} (или HS^-) в растворе, образуя нерастворимый черный осадок сульфида железа (II) (FeS), который

осаждается на поверхности металла. При этом присутствие H_2S затормаживает стадию перехода атомарного водорода в газообразный молекулярный водород (H_2), что приводит к диффузии значительного количества атомарного водорода вглубь стали и вызывает водородное повреждение металла [150]. Химическое уравнение реакции коррозии имеет следующий вид:

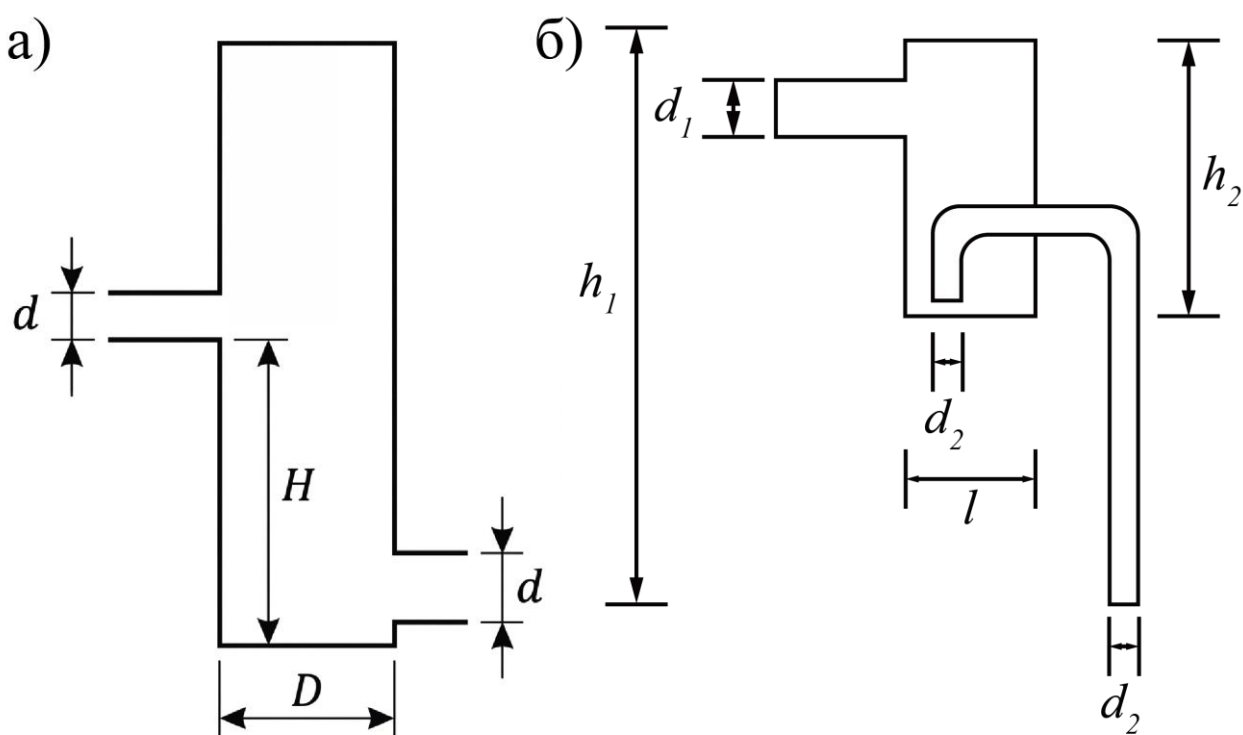
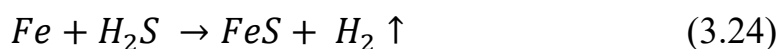


Рисунок 3.10. схема сооружения: а) колодец; б) сифонная структура.

Первоначально в эксперименте исследовалась колодец без технологического оснащения № 1 (см. рис. 3.11, а), на фотографии показан образец из металла и газоанализатор, которые в последствии опускались в точку подключения подводящего трубопровода. На втором этапе в колодце производился монтаж сифонного стояка и эксперимент повторялся (см. рис. 3.11, б). Глубина подвешивания стальных пластин и газоанализаторов в обоих случаях

была абсолютно идентичной. Эксперимент на каждом этапе продолжался в течение одного месяца, при этом фиксация показаний выполнялась ежедневно каждый час (по 24 значения в сутки).

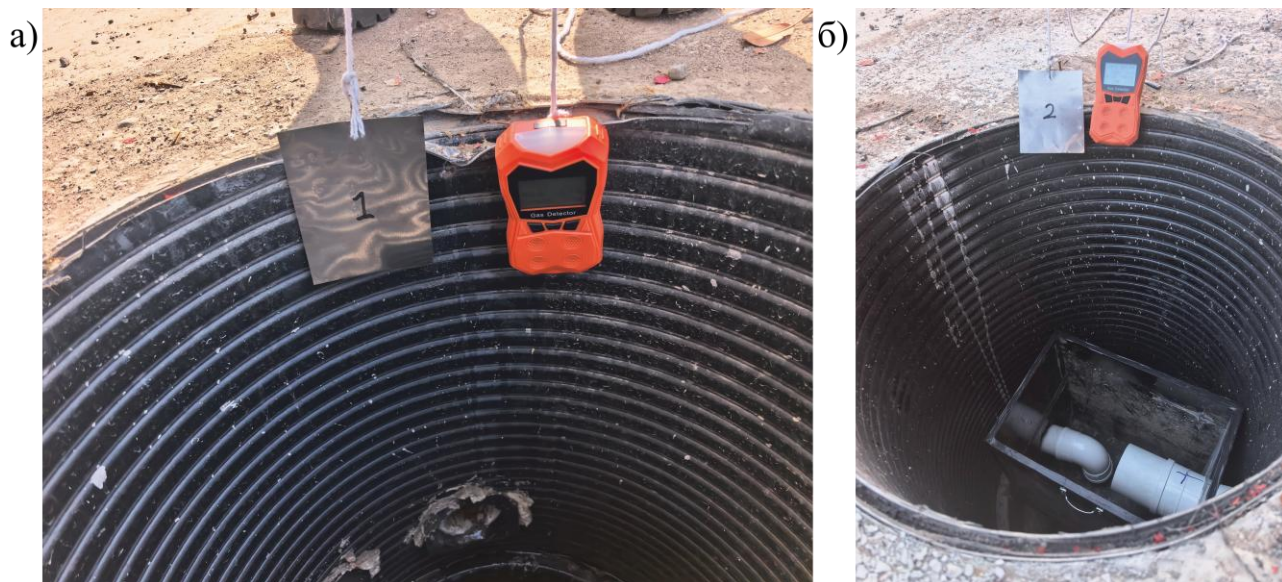


Рисунок 3.11. Перепадной колодец в муниципальной канализационной сети: а) без технологического оснащения (№1); б) с сифонным стояком (№2).

На рис. 3.12 представлены результаты фиксации сероводорода в воздушном пространстве колодца в течение месяца. Как видно из графиков, в течение месяца в шахте с сифонным стояком и в шахте без технологического оснащения практически ежедневно в период активного водопотребления (около 8:00 и 19:00) фиксировались пиковые концентрации сероводорода. Это показывает, что в периоды низкого водопотребления сточные воды задерживаются в канализационном трубопроводе на длительное время, что способствует генерации основного объема сероводорода. При увеличении притока, сточные воды, содержащие высокую концентрацию сероводорода, поступают в шахту. Вследствие перехода потока в турбулентный режим при входе в шахту происходит интенсивная десорбция сероводорода в воздушную

среду пространства шахты. Сопоставление данных показывает, что концентрация газообразного сероводорода, зафиксированная в шахте с сифонным стояком, существенно ниже, чем в шахте без технологического оснащения.

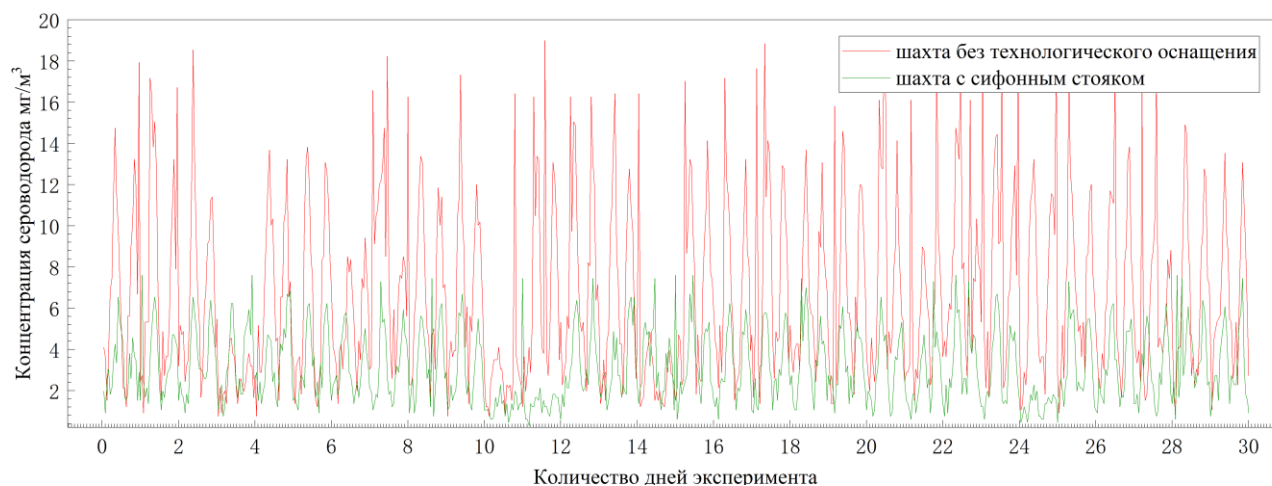


Рисунок 3.12. Данные мониторинга концентрации сероводорода в колодце

В процессе математической обработки данных сравнивались значения концентраций в периоды пикового выделения сероводорода для каждого типа колодца (т. е. ежедневно в 8:00 и 19:00), и производилось сопоставление полученных зависимостей (рис. 3.13). Из графика видно, что средняя концентрация выделяющегося сероводорода в шахте с сифонным стояком оказалась на 54,82 % ниже, чем в шахте без технологического оснащения. Этот результат согласуется с данными численного моделирования (рис. 3.4) [9], согласно которым показатели для шахты с сифонным стояком были на 43,12 % ниже аналогичных показателей для шахты без технологического оснащения. Проведенный эксперимент свидетельствует о том, что интенсивность выделения сероводорода в шахтах и колодцах с сифонным стояком значительно ниже, чем в сооружениях без технологического оснащения.

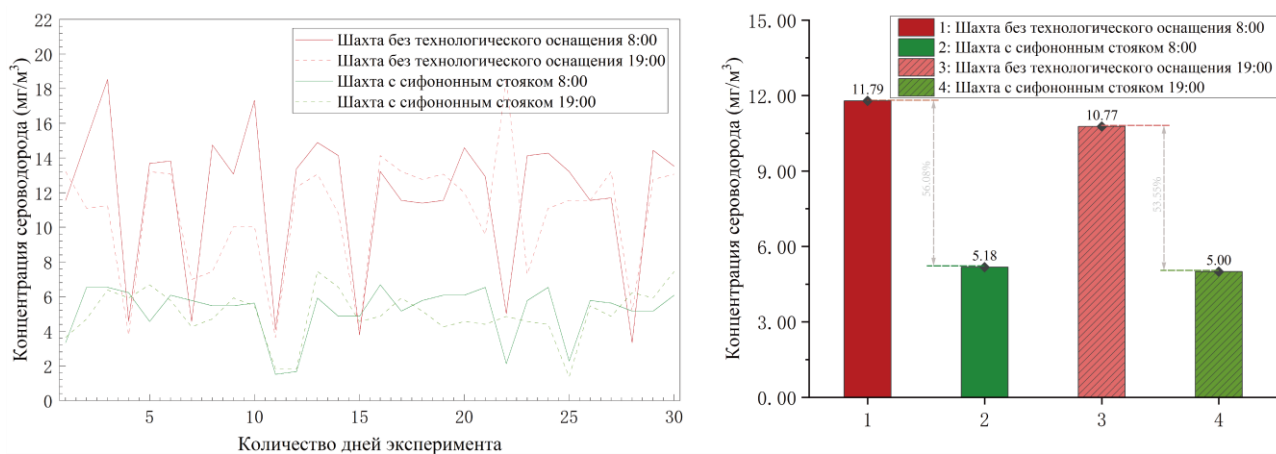


Рисунок 3.13. Пиковые концентрации сероводорода в период максимального газовыделения

Для качественной оценки также извлекались образцы из низкоуглеродистой стали, подвешенные в колодце во время эксперимента (см. рис. 3.14). На фотографиях обеих пластин наблюдается образование черного осадка, что подтверждает фактическое выделение газообразного сероводорода в шахтах. При этом степень коррозионного поражения пластины № 1 выражена более явно, а на ее верхней части также присутствуют заметные следы коррозии металла. В сравнении с пластиной № 1, степень коррозии пластины № 2 визуально ниже. Кроме того, при условии идентичной глубины подвешивания обоих образцов, на пластине № 2 заметные следы коррозии присутствуют исключительно в нижней ее половине. Это свидетельствует о том, что в шахте с сифонным стояком эффект вовлечения (эжекции) газа выражен слабее, что позволяет удерживать газообразный сероводород на большей глубине шахты, тем самым снижая его эмиссию во внешнюю среду. При рассмотрении локальных участков по центру пластин (5×3см) видно, что площадь коррозии пластины № 1 в два раза превышает площадь у пластины № 2. Данный факт хорошо согласуется с результатами инструментального замера концентрации.



Рисунок 3.14. Сравнение образцов из низкоуглеродистой стали; 1 – колодец без технологического оснащения, 2 – колодец с сифонным стояком

Проведенный натурный эксперимент подтвердил, что шахта с сифонным стояком, по сравнению с шахтой без технологического оснащения, обеспечивает более эффективное подавление газовыделения сероводорода. Данный факт позволяет верифицировать результаты численного моделирования, выполненного в программном комплексе ANSYS, доказывая их достаточную достоверность и практическую значимость.

Выводы по третьей главе

1. С помощью моделирования выполнен расчет выделения сероводорода в перепадной шахте реального размера. Полученные зависимости коэффициента массопередачи повторяют тенденцию установленных закономерностей на основе лабораторного эксперимента. Коэффициент массопередачи для перепадной шахты в зависимости от конструкции изменяется в диапазоне от 3.13×10^{-9} до 4.08×10^{-4} м/с

2. Расчет коэффициента массопередачи по существующей теории

позволяет получить заниженные результаты и не учитывает всех конструктивных особенностей сооружения. Модельные значения коэффициента превышают теоретические на 99.80% для шахты со спиральным лотком, на 42.63% для шахты со ступенчатым перепадом, на 15.18% для шахты с поперечными балками, на 0.53% для шахты с трубчатым стояком, на 43.38% для шахты без технологического оснащения, на 0.26% для шахты с сифонным стояком [9].

3. На основе π -теоремы Бекингема получено безразмерное степенное уравнение, позволяющее оценить коэффициент массопередачи в зависимости от критерия Fr и концентрации сульфидов в исходной воде. С помощью данных моделирования и программы SPSS вычислены показатели степени уравнения и построены графики зависимости коэффициента от критерия Fr . Анализ закономерностей показал область критерия Fr при которой ожидается минимальное выделение сероводорода. Для исследуемых типов конструкций — шахты со спиральным лотком, шахты со многоступенчатым перепадом, шахты с поперечными балками, шахты с трубчатым стояком, шахты без технологического оснащения и шахты с сифонным стояком — стабилизация коэффициента массопередачи наблюдается при значениях числа Фруда, равных 0,28; 0,29; 0,3; 0,46; 0,62 и 0,83 соответственно. Основными факторами интенсифицирующими газовыделение следует считать уменьшение расхода сточных вод и увеличение высоты перепада.

4. Получена хорошая сходимость зависимости коэффициента массопередачи сероводорода и экспериментальных данных других авторов (Namran F. Hamad, Micaela Pacheco Fernández, Letian Sun, Lucie Carrera) для

перепадной шахты без технологического оснащения. Большинство экспериментальных точек других авторов лежит в пределах 95%-ного доверительного интервала расчетной зависимости автора.

5. Результаты модельного расчета коэффициента массопередачи в случае изменения высоты перепада шахт на 15 и 30 м также лежат в пределах 95%-ного доверительного интервала, что подтверждает возможность применения полученных зависимостей в инженерной практике.

4. Экономическая оценка эффективности применения новой конструкции перепадной шахты, за счет сокращения выбросов сероводорода

В настоящей главе для оценки предотвращенного ущерба от уменьшения объема выделяющегося сероводорода в качестве расчетного принят период – 50 лет. На основе подхода чистой приведённой стоимости (Net Present Value – NPV) [51] выполнена оценка экономического эффекта от применения шахты с сифонным стояком по сравнению с другими конструкциями перепадов. Расчеты выполнялись (по модельным данным) для высоты перепада 60 м [163], расхода сточных вод 1,72 м³/с [148] и концентрации сульфидов 3,978 мг/л [113].

4.1 Объемы выделения сероводорода в перепадных шахтах

Используя полученные в работе зависимости (1.3-1.6) производилась оценка концентрации сероводорода в перепадной шахте каждой конструкции, а также устанавливался массовый расход сероводорода, выделяющегося в результате падения потока.

В табл. 4.1. представлены среднесуточные массовые расходы выделения сероводорода

Таблица 4.1 - Средние суточные объемы сероводорода

Тип шахты	Суточное выделение сероводорода (г/сут)
шахта со спиральным лотком	11021,79
шахта с многоступенчатым перепадом	4720,08
шахта с поперечными балками	1695,26
шахта с трубчатым стояком	79,76
шахта без технологического оснащения	4803,02
шахта с сифонным стояком	50,09

Из таблицы видно, что шахта с сифонным стояком характеризуется существенно меньшим выделением сероводорода по сравнению с другими вариантами конструкции шахты, демонстрируя минимальный массовый расход.

4.2 Влияние на износ сооружения интенсивности газовыделения

Образующийся при эксплуатации шахты сероводород вызывает интенсификацию биохимической коррозии, приводящей к разрушению шахты. Используя значения суточного выделения сероводорода (табл. 4.1), были вычислены средние концентрации сероводорода в сооружении и с использованием формулы (4.1) была оценена скорость коррозии бетонных конструкций шахты. Руководствуясь материалами работы [187] толщина стенки шахты принималась – 1.5 м. По результатам расчета составлена сравнительная таблица по степени коррозии (табл. 4.2), результат получен с помощью зависимости (1.7):

Таблица 4.2 - Скорость коррозии шахты

Тип шахты	Скорость коррозии шахты (мм/год)	Степень коррозии стенки шахты (%/год)
шахта со спиральным лотком	17,21	1,15
шахта с многоступенчатым перепадом	7,45	0,50
шахта с поперечными балками	2,76	0,18
шахта с трубчатым стояком	0,26	0,02
шахта без технологического оснащения	7,58	0,51
шахта с сифонным стояком	0,21	0,01

Из расчетов следует, что шахта со спиральным лотком имеет наибольшую скорость коррозии и ежегодно подвергаться разрушению на 1,15 % от толщины стенки шахты, поэтому при применении данной конструкции в шахтах

потребуется проведение значительного объема работ по удалению сероводорода. Использование новой шахты с сифонным стояком позволяет снизить скорость разрушения конструкции до 0,01 % в год.

4.3 Сравнительная экономическая оценка воздействия сероводорода на эксплуатационные характеристики перепадных шахт различных типов

Экономическая оценка выполняется на основе затрат на материалы, оплату труда и иных расходов, принятых для Китая на 2022 г. [35,111].

Метод чистой приведенной стоимости является основным подходом к оценке экономической эффективности инженерных проектов на протяжении всего жизненного цикла. Он позволяет привести будущие затраты к текущей стоимости посредством ставки дисконтирования. Базовая формула имеет следующий вид [52]:

$$PV = -I_0 - \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+i)^t} + \frac{R_n}{(1+i)^n} \quad (4.1)$$

где:

I_0 : первоначальные капитальные вложения.

M_t : затраты на эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт в t -м году.

i : социальная ставка дисконтирования. В настоящем исследовании с учетом долгосрочной ставки дисконтирования для инфраструктурных объектов принято значение 8 % [52].

R_n : остаточная стоимость на конец n-го года.

n : расчетный период (50 лет).

Выполним оценку первоначальной стоимости строительства (I_0). Согласно нормативной базе сметных цен на строительные работы в Китае укрупненная стоимость крупных подземных бетонных сооружений включает затраты на труд, материалы, механизмы, управление и прибыль [115].

1. Укрупненная стоимость строительства с учетом разработки сверхглубокой шахты, крепления, подачи бетона насосами, заработной платы рабочих и налога на добавленную стоимость (9 %) принимается равной $C_{und} = 5600$ юань/м³[136].

2. Объем бетона шахты (V) рассчитывается следующим образом:

$$V = \frac{\pi}{4} \times (D_{out}^2 - D_{in}^2) \times H = \frac{\pi}{4} \times (13^2 - 10^2) \times 60 \approx 3251.55 \text{ м}^3 \quad (4.2)$$

Тогда первоначальная стоимость строительства сооружения составит:

$$I_0 = 3251.55 \text{ м}^3 \times 5600 \text{ юаней/м}^3 \times \approx 17883625 \text{ Юань} \quad (4.3)$$

Далее выполняется оценка стоимости ремонта (M_t):

Стоимость ремонта зависит от глубины коррозии и вида восстановительных работ. На основе [34], с учетом эталонных методов ремонта и цены материалов, комплексная стоимость единицы ремонта установлена на уровне 850 юаней/м².

Площадь внутренней стенки шахты (A_{int}), подверженной коррозии, рассчитывается следующим образом:

$$A_{\text{int}} = \pi \times D_{\text{in}} \times H = \pi \times 10 \times 60 \approx 1884.96 \text{ м}^2 \quad (4.4)$$

Общая сумма за один ремонт составит:

$$M_{\text{repor}} = 1884.96 \text{ м}^2 \times 850 \text{ юаней/м}^2 \approx 1602216 \text{ юаней} \quad (4.5)$$

Для шахты со спиральным лотком характерен сценарий исключительно высокой частоты ремонтов. Расчет периодичности ремонта оценивается исходя из толщины защитного слоя, принятого равным $s = 70$ мм и вычисленной скорости коррозии $v = 17,21$ мм/год. Время до первого ремонта составит – $t_1 = 70/17.21 \approx 4.07$ лет. Для упрощения расчетов принимается выполнение капитального ремонта каждые 4 года. За 50 лет общее число ремонтов составит $50/4-1 \approx 12$.

Сумма приведенных затрат на ремонт с учетом ставки дисконтирования (8%) составит:

$$V_{\text{repar}} = \sum_{k=1}^{12} \frac{1602216}{(1.08)^{4k}} \quad (4.6)$$

Далее определяется остаточная стоимость сооружения:

$$V_{\text{repris}} = 1602216 \times \frac{x(1-x^{13})}{1-x} \approx 1602216 \times \frac{0.73503 \times (1-0.083)}{0.26497} \approx 4310652 \text{ Юань} \quad (4.7)$$

Чистая приведенная стоимость сооружения составит:

$$NPV_1 = -17883625 - 4310652 = -22184177 \text{ Юань} \quad (4.8)$$

Отрицательный знак результата свидетельствует о наличии износа сооружения.

Для шахты с многоступенчатым перепадом также характерен сценарий высокой частоты ремонтов. Периодичность ремонтов с учетом скорости

коррозии $v = 7,45$ мм/год составляет каждые 9 лет.

Сумма приведенных затрат на ремонт с учетом ставки дисконтирования (8%) составит:

$$PV_{repairs} = \sum_{k=1}^9 \frac{1602216}{(1.08)^{4k}} \quad (4.9)$$

Остаточная стоимость сооружения составит:

$$PV_{repairs} = 1602216 \times \sum_{k=1}^9 x^k = 1602216 \times \frac{0.50025(1 - 0.50028^6)}{1 - 0.50025} \quad (4.10)$$

$$\approx 1602216 \times 0.969 \approx 1552547 \text{ Юань}$$

Чистая приведенная стоимость шахты со ступенчатым перепадом будет равна:

$$NPV_2 = -17883525 - 1552547 = -19436072 \text{ Юань} \quad (4.11)$$

В случае шахты с поперечными балками характерен сценарий технического обслуживания со средним межремонтным периодом. Периодичность ремонтов при скорости коррозии $v = 2,76$ мм/год будет равна 25 годам. При достижении сооружением конца срока службы (на 50-ом году) нужно учитывать только остаточную стоимость, стоимость ремонта не учитывается.

Остаточная стоимость сооружения будет равна:

$$PV_{repairs} = \frac{1602216}{(1.08)^{25}} \approx \frac{1602216}{6.848} \approx 233808 \text{ Юань} \quad (4.12)$$

Чистая приведенная стоимость шахты с поперечными балками составит:

$$NPV_3 = -17883525 - 233968 = -18117408 \text{ Юань} \quad (4.13)$$

Для шахты с трубчатым стояком и шахты с сифонным стояком характерен безремонтный сценарий. Учитывая скорость коррозии $v = 0,26$ мм/год (трубчатый стояк) и $v = 0,21$ мм/год (сифон) разрушение стенки составит менее 70 мм. В данном случае учитываются только затраты на текущую эксплуатацию (осмотры шахты), которые на основании данных принимаются равными 10 000 юаней/год.

Величина эксплуатационных затрат составит:

$$PV_{\text{madai}} = 10000 \times \frac{1 - (1.08)^{-10}}{0.08} \approx 10000 \times 12.233 = 122330 \text{ Юань} \quad (4.14)$$

Тогда чистая приведенная стоимость для этих шахт будет равна:

$$NPV_{4,6} \approx -17883525 - 122330 = -18005855 \text{ Юань} \quad (4.15)$$

У шахты без технологического оснащения также характерен сценарий частых ремонтов. Ее расчет аналогичен шахте с многоступенчатым перепадом.

В табл. 4.3 приведено сопоставление экономических показателей шахт за жизненный цикл при различных скоростях коррозии (при этом относительные потери определялись по отношению к шахте с трубчатым стояком как доля прироста приведенных затрат на обслуживание остальных вариантов):

Таблица 4.3 — Сопоставление NPV перепадных шахт

Тип шахты	Скорость коррозии (мм/год)	Время до первого ремонта (лет)	Число ремонтов за 50 лет	Приведенная стоимость обслуживания (тыс. юаней)	NPV за жизненный цикл (тыс. юаней)	Относительные потери (%)
шахта со спиральным лотком	17,21	4	12	4310,7	-22194,2	23,26 %
шахта с многоступенчатым перепадом	7,45	9	5	1552,5	-19436,1	7,94 %
шахта с поперечными	2,76	25	1	234,0	-18117,5	0,62 %

балками						
шахта с трубчатым стояком	0,26	>50	0	122,3	-18005,9	0,00 %
шахта без технологического оснащения	7,58	9	5	1552,5	-19436,1	7,94 %
шахта с сифонным стояком	0,21	>50	0	122,3	-18005,9	0,00 %

Из анализа данных видно, что между скоростью коррозии и экономическими потерями существует выраженная нелинейная зависимость. При увеличении скорости с 0,26 мм/год до 2,76 мм/год экономическое влияние в течение 50 лет остается незначительным (рост затрат составляет лишь 0,62 %), поскольку первый капитальный ремонт приходится на 25-й год, а приведенная стоимость расходов на восстановление сооружения существенно уменьшается вследствие дисконтирования. Когда скорость коррозии превышает 7 мм/год, относительные потери быстро возрастают почти до 8 %. В случае шахты со спиральным лотком наблюдается наиболее неблагоприятная ситуация, когда потери на износ превышают 23 %. По результатам оценки чистой приведенной стоимости шахта с трубчатым стояком и сифоном характеризуется наименьшими затратами на обслуживание и потерями в результате износа и поэтому являются более предпочтительными для технологического оснащения перепадов.

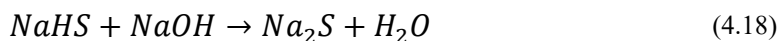
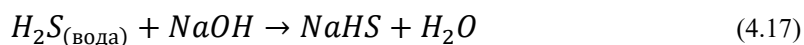
4.4 Оценка стоимости очистки воздуха в перепадной шахте

Экономическое влияние выделения сероводорода на очистку воздушной среды в шахтах разной конструкции может быть определено с помощью оценки расходов на реагенты и поглощающие материалы для удаления сероводорода.

Методы очистки сероводорода можно разделить на три основные группы:

1. Поглощение сероводорода гидроксидом натрия

Гидроксид натрия как сильное основание обладает в водном растворе очень высокой реакционной способностью. В абсорбционной колонне сероводород сначала растворяется в жидкой пленке, а затем в жидкой фазе последовательно диссоциирует и вступает в реакцию нейтрализации с ионами OH^- [137]:

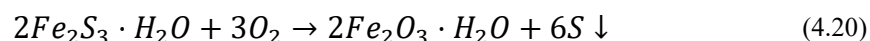
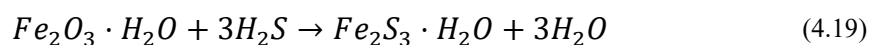


В промышленной практике для обеспечения степени удаления сероводорода выше 95 % обычно необходимо поддерживать избыточное количество щелочи. Это связано с тем, что содержащийся в воздухе диоксид углерода (CO_2) может также поглощаться щелочным раствором как конкурирующий компонент, что приводит к дополнительному расходу реагента. Согласно данным экологических станций мониторинга [122] и фактическим данным со станций очистки воздуха [122], на обработку 1 кг сероводорода в среднем расходуется около 2,4 кг технического гидроксида натрия.

2. Процесс сухой десульфуризации с помощью гидрата оксида железа

Сухая десульфуризация основана на хемосорбции сероводорода гидратом оксида железа. Технология предусматривает пропуск газовой смеси с сероводородом через гранулированную засыпку. В результате контакта происходит химическое взаимодействие сероводорода с гидратом оксида железа

с образованием сульфида железа. В дальнейшем для регенерации засыпки в нее подается кислород с выделением элементарной серы.



Экономическая эффективность данного процесса в значительной степени зависит от «рабочей сероемкости» десульфуризатора. При инженерном проектировании рабочая сероемкость оксида железа обычно принимается равной 25–30 % по массе. Это означает, что для поглощения 1 кг сероводорода теоретически требуется не менее 4 кг гранулированной засыпки [184].

3. Адсорбция на активированном угле.

Эта технология применима при крайне низких концентрациях сероводорода либо в качестве конечной доочистки газовой среды. За счет пропитки поверхности активированного угля щелочными веществами (например, КОН или NaOH) его способность к химической адсорбции может быть существенно повышена [141].

В присутствии кислорода каталитическое действие поверхности активированного угля может переводить H_2S в элементарную серу или сульфаты:



Эффективность адсорбции активированного угля, пропитанного раствором NaOH, может более чем в 5 раз превышать эффективность обычного активированного угля. С учетом насыпной плотности активированного угля

около 0,515 г/см³ расчет показывает [26], что для обработки 1 кг сероводорода требуется примерно 2,6 кг высокоэффективного каталитического активированного угля.

В таблице 4.4. представлены актуальные рыночные цены на используемые материалы для очистки воздуха [39]

Таблица 4.4 - Стоимость материалов для очистки воздуха от сероводорода

Технология очистки	Расход реагента/адсорбента (кг/кг H ₂ S)	Цена реагента/адсорбента (юаней/кг)	Удельная стоимость очистки (юаней/кг H ₂ S)
Мокрое поглощение NaOH	2,3366	2,72	6,35
сухая десульфуризация оксидом железа	4,0000	4,00	16,00
каталитическая адсорбция на активированном угле	5,0000	16,50	82,50

Для оценки стоимости очистки газовой смеси был произведен расчет годового объема выброса сероводорода при функционировании перепадной шахты (табл. 4.5).

Таблица 4.5 - Годовой объем выброса сероводорода в перепадной шахте

Тип шахты	Годовой суммарный выброс (кг/год)
шахта со спиральным лотком	4022,95
шахта с многоступенчатым перепадом	1722,83
шахта с поперечными балками	618,77
шахта с трубчатым стояком	29,11
шахта без технологического оснащения	1753,10
шахта с сифонным стояком	18,28

Годовые затраты для каждого поглощающего материала приведены в табл.

4.6. Из таблицы затрат следует, что среди трех типов поглощающих материалов наименьшая стоимость очистки сероводорода достигается при мокром

поглощении гидроксидом натрия. Среди рассмотренных вариантов шахта с сифонным стояком характеризуется минимальными затратами на мокрое поглощение сероводорода с использованием NaOH, минимальные годовые расходы на адсорбцию составляют лишь 116,8 юаня. С точки зрения охраны окружающей среды шахта с сифонным стояком также характеризуется наименьшими затратами.

Таблица 4.6 - Годовая общая стоимость использования реагентов и поглощающих материалов для очистки воздуха

Тип шахты	Годовые затраты на NaOH, юань	Годовые затраты на гидрат оксида железа, юань	Годовые затраты на активированный уголь, юань
шахта со спиральным лотком	25546,35	64367,75	331894,50
шахта с многоступенчатым перепадом	10939,05	27564,80	142134,65
шахта с поперечными балками	3927,40	9898,80	51048,90
шахта с трубчатым стояком	186,15	467,20	2401,70
шахта без технологического оснащения	11132,50	28050,25	144631,25
шахта с сифонным стояком	116,80	292,00	1507,45

Выводы по четвёртой главе

1. Наилучшие показатели подавления выделения сероводорода демонстрирует сифонная конструкция. При сопоставлении различных конструкций шахт перепад с сифонным стояком имеет наименьшее суточное выделение сероводорода — всего 50,09 г/сут. Для сравнения, у шахты без технологического оснащения этот показатель достигает 4803,02 г/сут, тогда как максимальное значение наблюдается у шахты со спиральным лотком — 11021,79 г/сут. Это указывает на то, что сифонная конструкция способна существенно снижать уровень выделения сероводорода.

2. Технология функционирования перепадной шахты оказывает прямое

влияние на скорость коррозии и срок службы. Различия в скорости коррозии для разных конструкций весьма значительны. Наибольшая скорость по оценочным расчетам наблюдается у шахты со спиральным лотком, где глубина разрушения может достигать 17,21 мм/год. В то же время применение шахты с сифонным стояком позволяет эффективно снижать коррозионное разрушение. Годовая степень разрушения снижается до 0,21 мм/год. Это означает, что оптимизация конструкции является ключевым фактором защиты бетонных шахт и снижением степени износа.

3. Шахта с сифонным стояком и шахта с трубчатым стояком обладают наилучшими экономическими показателями по полному жизненному циклу. Анализ чистой приведенной стоимости (NPV) для расчетного периода 50 лет показывает, что для шахты с сифонным стояком и шахты с трубчатым стояком в пределах расчетного срока службы порог ремонта не достигается. Эти сооружения характеризуются увеличением безремонтного периода и снижением общих потерь на эксплуатацию. Напротив, для шахты со спиральным лотком [9], требующей капитального ремонта каждые 4 года, относительные экономические потери достигают 23,26 %.

4. При оценке методов очистки сероводорода минимальная удельная стоимость очистки достигается при мокром поглощении NaOH (6,35 юаня/кг H_2S). С учетом годовых объемов выбросов затраты на применение NaOH для шахты с сифонным стояком составляют всего 116,80 юаня, что является минимальным значением среди всех конструкций перепадов и в наибольшей степени отвечает экономическим требованиям охраны окружающей среды.

Заключение

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 П-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 Fr 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, Hamada 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 перспективная 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 заключается в усовершенствовании численной модели перепадной шахты с учетом присутствия в потоке сточных вод смеси канализационных газов: сероводорода, метана, аммиака и углекислого газа.

Список литературы

1. Алексеев М. И. Авторское свидетельство № 785444 А1 СССР, МПК E03F 5/00. Перепадный колодец для канализационных сетей : № 2685677 : заявл. 20.11.1978 : опубл. 07.12.1980 / М. И. Алексеев, В. М. Васильев, А. В. Кудрявцев ; заявитель ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ. – EDN RXWUEA.
2. ВАСИЛЬЕВ В М, ЛАПШЕВ Н Н. Гидравлические процессы, протекающие в коллекторе и их влияние на окружающую среду[R]. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2005.
3. Васильев В М, Панкова Г А, Столбихин Ю В. Разрушение канализационных тоннелей и сооружений на них вследствие микробиологической коррозии [J]. Водоснабжение и санитарная техника, 2013(9): 67.
4. Васильев, В.М., Газовыделение в перепадных устройствах и участках коллектора при движении по ним сточной жидкости / В. М. Васильев, О.М. Ильина // Новые технологии и материалы в подземном строительстве Альманах научно-технической информации. 1995. №1. С. 3-7.
5. Гидравлические процессы, протекающие в коллекторе и их влияние на окружающую среду : отчет по научно-исследовательской теме / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет ; исполн.: В. М. Васильев, Н. Н. Лапшев. — Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2005. — 42 с.
6. Группа по разработке стандартов сброса загрязняющих веществ в текстильной и красильной промышленности. Пояснительная записка к стандартам сброса загрязняющих веществ в текстильной и красильной промышленности (Проект для обсуждения) [S]. 2008.
7. Дрозд, Г. Я. Методика определения качества эксплуатационной среды канализационных коллекторов / Г. Я. Дрозд, М. Ю. Хвортова // Агротехника и энергообеспечение. – 2015. – № 5(9). – С. 77-84.
8. Лю Х. Исследование влияния конструкции перепадной шахты на процесс выделения сероводорода. Инновации и инвестиции. 2025. № 1. С. 365-371. <http://elibrary.ru/item.asp?id=80361055>
9. 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.
10. Лю Х., Федоров С.В., Васильев В.М., Феофанов Ю.А., Черников Н.А. Оценка выделения сероводорода в канализационных перепадах. Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 3. С. 64-71. <http://elibrary.ru/item.asp?id=65624755>
11. 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.
12. 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.
13. 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.
 14. 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.
 15. Михеев П.А. Исследование аэрации потока на лотке быстроготока / П.А. Михеев, В.А. Храпковский // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. № 4. С.72-76
 16. Надежность канализации городов как основа экологической безопасности [Электронный ресурс] : монография / Ч. А. Дзиминскас, А. Л. Васильев, М. О. Жакевич ; Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. - Н.Новгород : ННГАСУ, 2016. - 1 CD ROM.
 17. Общие виды по объектам ПГКС / ООО «Группа компаний «Инженерные Экосистемы». — Санкт-Петербурга : ООО «ГК «Инженерные Экосистемы», 2005. — 103 с.
 18. Орлов, В. А. Моделирование работы водоотводящей сети при использовании приточной вентиляции ее подсводного пространства для удаления вредных газов / В. А. Орлов, О. В. Мельник, Д. В. Подолян // Строительство и техногенная безопасность. – 2022. – № 27(79). – С. 71-78. – EDN TVWVRQ.
 19. Соловьев А.А. Радиус сопряжения поверхности водослива практического профиля с водобоем / А.А. Соловьев, Д.А. Соловьев, Л.А. Шилова // Вестник МГСУ. Том 13 Выпуск 7, 2018. С.885-891.
 20. Ткачёв А.А. Определение формы движения потока в лотке быстроготока Новотроицкого водохранилища при минимальном расходе / А.А. Ткачев, К.Г. Гурин // Экология и водное хозяйство. 2022. Т. 4, № 3. С. 128–142.
 21. Чжан, И. Анализ существующих конструкций и перспективы развития перепадных шахт в системах канализации / И. Чжан // Современные проблемы водоснабжения и водоотведения : Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 01–02 декабря 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 132-136.
 22. Чижик, К. И. Микробиологическая коррозия канализационных камер и коллекторов / К. И. Чижик, К. В. Семенов, Н. В. Белоокая // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 11(94). – С. 180-183.
 23. Численное моделирование пропускной способности деформированного канализационного коллектора с целью обоснования применения метода CIPP для его ремонта / Д. Ван, Л. Д.

- Терехов, Е. Л. Терехова, Ш. Б. Майны // Вестник гражданских инженеров. – 2025. – № 5(112). – С. 59-66. – DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-5-59-66. – EDN LMFTEQ.
24. Шутов Ю. Д. Авторское свидетельство № 494487 А1 СССР, МПК Е02В 8/06. Многоступенчатый канализационный перепад : № 1960126 : заявл. 17.09.1973 : опубл. 05.12.1975 / Ю. Д. Шутов, А. И. Цветков, П. П. Крупнов ; заявитель ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ. – EDN WZTQ GK.
 25. A Christia-Lotter, C Bartoli, M D Piercecchi-Marti, D Demory, A L Pelissier-Alicot, A Sanvoisin, G Leonetti. Fatal occupational inhalation of hydrogen sulfide [J]. Forensic Science International, 2007, (169): 206-209.
 26. Activated Carbon for H₂S Adsorption. <https://rxchemicals.com/product/activated-carbon-h2s-adsorption>.
 27. Adriana Camino, G., Zhu, D. Z., & Rajaratnam, N. (2015). Flow Observations in Tall Plunging Flow Dropshafts. Journal of Hydraulic Engineering, 141(1), 06014020. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.000093
 28. Angelo J B, Lightfoot E N, Howard D W. Generalization of the penetration theory for surface stretch: Application to forming and oscillating drops[J]. AIChE Journal, 1966, 12(4): 751-760.
 29. B.P. Mandal, S.S. Bandyopadhyay, Simultaneous absorption of carbon dioxide and hydrogen sulfide into aqueous blends of 2-amino-2-methyl-1-propanol and diethanolamine, Chemical Engineering Science, Volume 60, Issue 22, 2005, P. 6438-6451.
 30. Ba Zhenning, Kuang Tian, Liang Jianwen, Wang Zhikai. Research on risk assessment of urban drainage networks [J]. Municipal Engineering Technology, 2021, 39(01): 90-93.
 31. Bai He. Study on biofilm growth and mass transfer processes of sulfate-reducing bacteria [D]. Tianjin University, 2014.
 32. Bai Yang. Optimization design analysis of urban sewer networks [J]. Smart City, 2017, 3(03): 180+184.
 33. Beijing will equip manholes with toxic gas detectors [EB/OL]. <http://news.sina.com.cn/c/2004-08-24/14173481901s.shtml>
 34. Bidding, Design and Pricing Center of the Municipal Planning and Natural Resources Bureau. Notice on comprehensive price information for construction projects in Wuhan. https://zrzyghg.wuhan.gov.cn/bsfw_18/blcxfw/blcxfw_cxjsl/bsfw_zjgl/202601/t20260130_2722475.shtml
 35. Budget report: The central budget allocated 33 billion yuan for air pollution prevention and 25.7 billion yuan for water pollution prevention. <http://acef-water.com.cn/display.php?id=1606>
 36. CARRERA L, SPRINGER F, LIPEME-KOUYI G, et al. Sulfide emissions in sewer networks: focus on liquid to gas mass transfer coefficient [J]. Water Science and Technology, 2017, 75 (8): 1899-1908.
 37. Carty, A., O' Neill, C., Nash, S., Clifford, E., & Mulligan, S. (2019). Hydrodynamic modelling approaches to assess mechanisms affecting the structural performance and maintenance of vortex drops shaft structures. Journal of Structural Integrity and Maintenance, 4(3), 162–178.
 38. Chang Xiaolei. Study on the microstructure and mass transfer kinetics of SRB biofilms in wastewater treatment [D]. Tianjin University, 2007.
 39. Chemical Materials Purchasing Network. <https://www.lookchem.cn/>
 40. Chen Bing, Wang Hailong, Zhang Jinfeng, Huang Wenhong. Mechanism of explosive gas formation

- in confined spaces of urban drainage systems and countermeasures [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2011, 7(05): 67-71.
41. Chen Wei, Song Peidi, Zheng Xingcan, et al. Influencing factors and control measures of hydrogen sulfide poisoning in sewer systems [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006(01): 15-19.
 42. Chen Wenluo. Study on the resistance characteristics of sludge transportation pipelines in wastewater treatment plants based on CFD numerical simulation [D]. Jilin Jianzhu University, 2023.
 43. Crispino, G.; Contestabile, P.; Vicinanza, D.; Gisonni, C. Energy Head Dissipation and Flow Pressures in Vortex Drop Shafts. *Water* 2021, 13, 165.
 44. Cui Huanyu. Study on odorous gas treatment technologies in urban wastewater treatment plants and their engineering application [D]. Beijing Forestry University, 2022.
 45. Danckwerts P V. Gas-Liquid Reactions[M]. New York: McGraw-Hill, 1970, 129-131.
 46. Dastpak, P.; Sousa, R.L.; Dias, D. Soil Erosion Due to Defective Pipes: A Hidden Hazard Beneath Our Feet. *Sustainability* 2023, 15, 8931.
 47. Dillon P J. Sulfur in the environment part II: Ecological impacts : edited by Jerome O. Nriagu. Wiley, \$33.95, 482 pp. 1978[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1980,44(5):769.
 48. Dou Hongyu. Study on the kinetics and thermodynamics of sulfate-reducing bacteria biofilms [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2023.
 49. Edwards H. Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants.[M]. 1989.
 50. Esoy A, Osterhus S W, Bentzen G. Controlled treatment with nitrate in sewers to prevent concrete corrosion[J]. *Water Science & Technology Water Supply*, 2002,2(4):137-144.
 51. EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Regional and Urban Policy. Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects: Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014–2020[M/OL]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.
 52. Explanation materials on the basic budget cost of subway and tunnel projects in China, 2022.
 53. Fang Deqiong. Study on the detection and distribution patterns of harmful gases in sewer pipes of mountainous cities [D]. Chongqing University, 2012.
 54. Fortescue G, Pearson J. On gas absorption into a turbulent liquid[J]. *Chemical Engineering Science*, 1967, 22(9): 1163-1176.
 55. Fricker S, Lagerberg I, Plant J, Georgaki S. Thames Tideway Tunnel: design responsibilities, phases and system-wide design challenges[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering*, 2025, 178(6): 23–36.
 56. Gao Qiuying, Zeng Wenguang, Wang Heng, Liu Yuancong, Hu Junying. Study on the influence of fluid flow erosion on the corrosion behavior of SRB [J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2023, 43(05): 1087-1093.
 57. Gao Wenqiao. H₂S-induced corrosion of sewer pipes and its control [J]. *Anhui Architecture*, 2001(01): 15-18.
 58. Guan Huabin. Experimental study on domestic wastewater treatment in a new type of septic tank [D]. Harbin Institute of Technology, 2012.
 59. Guangzhou adds a safety barrier: first to introduce sewer gas monitoring [EB/OL]. <http://www.southen.com/news/gdnews/gdtodayimportant/200305090142.htm>
 60. Guidotti TL, Cecutti A, Gascon B, Arnold IM, Weeks JL, Nickerson K. Occupational medicine in Canada in 1996. *Occup Med (Lond)*. 1997 Jan;47(1):45-51.

61. Guisasola A, Sharma K R, Keller J, et al. Development of a model for assessing methane formation in rising main sewers[J]. *Water Research*, 2009,43(11):2874-2884.
62. HAMAD N F, NILE B K, ALAMIR H T A, *et al.* Case study of hydrogen sulfide release in the sulfate-rich sewer drop structures[J]. *Journal of Water & Climate Change*, 2023, 14(10): 3713–3725.
63. Hamada N F, Nile B K, Alamir H T A, Faris A M, Ismaile H K, Hassan W H, Ahmed L M, Alesary H F, Barton S. Case study of hydrogen sulfide release in the sulfate-rich sewage drop structure[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2023, 14(10): 3713. DOI:10.2166/wcc.2023.283.
64. Han L, Fu J, Li M, et al. A theoretical unsteady-state model for kL of bubbles based on the framework of wide energy spectrum[J]. *AIChE Journal*, 2016, 62(4): 1007-1022.
65. Han L, Luo H, Liu Y, et al. A multi-scale theoretical model for gas-Liquid interface mass transfer based on the wide spectrum eddy contact concept[J]. *AIChE Journal*, 2011, 57(4): 886-896.
66. Han Tianwen. Study on the mechanism of sulfate reduction by sulfate-reducing bacteria [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2023.
67. Higbie R. The rate of absorption of a pure gas into a still liquids during a short time of exposure[J]. *AIChE Journal*, 1935, 31:365-389.
68. Huang Jianhong. Study on the calculation of generation and emission factors of exhaust gases in urban domestic drainage systems [D]. Kunming University of Science and Technology, 2013.
69. Huang Wei. Study on biofilm growth kinetics and microbial community structure in gravity drainage pipelines [D]. Chongqing University, 2015.
70. Hvitvedjacobsen T. Sewer processes: microbial and chemical process engineering of sewer networks.[J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology & Nutrition*, 2004,60(3).
71. Ibikunle O, Kojeku O. Lessons Learned from Using Vortex Flow Insert for H₂S Sewer Corrosion and Odour Prevention[C]//Pipelines 2024. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2024.
72. IBM SPSS Statistics. <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>
73. Jajuee B, Margaritis A, Karamanev D, et al. Application of surface-renewal-stretch model for interface mass transfer[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(12): 3917-3929.
74. Ji Junqing. Calculation of waste gas generation and emission volume in the domestic drainage system of Lanzhou City and research on control strategies [D]. Lanzhou Jiaotong University, 2013.
75. Ji Shengwang, Liu Chengwei, Huang Hongming, Tong Wenhao. Application of acrylic materials in popular science exhibits [J]. *Anhui Science and Technology*, 2024(07): 41-43.
76. Jia Shaoyi, Chai Chengjing. Principles of Chemical Engineering. Vol 2. Mass Transfer and Separation Processes in the Chemical Industry [M]. 3rd ed., Chemical Industry Press, 2020.
77. Jiang G M, Keller J, Bond P L. Determining the long-term effects of H₂S concentration, relative humidity and air temperature on concrete sewer corrosion[J]. *Water Research*, 2014, 65: 157–169.
78. Jiang Ming, Zhao Gang, Tang Jianguo. Research progress on the generation characteristics, emissions, and prediction of methane and hydrogen sulfide in urban sewer pipes [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 60(03): 154-162.
79. Kapo KE, Paschka M, Vamshi R, Sebasky M, McDonough K. Estimation of U.S. sewer residence time distributions for national-scale risk assessment of down-the-drain chemicals. *Sci Total Environ*. 2017 Dec 15;603-604:445-452.
80. Kawase Y, Halard B, Moo-Young M. Theoretical prediction of volumetric mass transfer coefficients in bubble columns for Newtonian and non-Newtonian fluids[J]. *Chemical Engineering Science*, 1987, 42(7): 1609-1617.

81. LAHAV O, SAGIV A, FRIEDLER E. A different approach for predicting H₂S(g) emission rates in gravity sewers[J]. *Water Research*, 2006, 40(2): 259-266. DOI: 10.1016/j.watres.2005.10.026.
82. Lamont J C, Scott D. An eddy cell model of mass transfer into the surface of a turbulent liquid[J]. *AIChE Journal*, 1970, 16(4): 513-519.
83. Larbi Houichi Experimental comparative study of siphon spillway and over-flow spillway / Larbi Houichi, Ghassan Ibrahim, Bachir Achour // *Courrier du Savoir*. №09, Mars 2009, pp.95-100.
84. Li Liangfu, Li Lianwei, Lin Xueshan, Na Guiping. Design of grid-type drop wells in mountainous urban drainage systems [Проектирование колодцев решетчатого типа в городских канализационных системах в горах]. *China Water Supply and Drainage*, 2019, vol. 35(22), pp. 48-51.
85. Li Rong. Study on sludge granulation and biological flora characteristics under SRB inhibition by denitrification [D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
86. Li Ruhui. Fundamentals of Mass Transfer [M]. Beijing: Beihang University Press, 1987: 232.
87. Li Weihua, Wang Jiaxiong, Deng Qigen. Discussion on the characteristics and prevention methods of hydrogen sulfide accidents in China [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2022, 48(09): 40-44.
88. Li Xiaoyu. Research on urban vertical planning based on the construction of major drainage systems [D]. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
89. Li Yali. Identification of hydrogen sulfide hazards and prevention and control measures [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2013(12): 50.
90. Liang Fengchao. Modeling of urban drainage networks and research on their application technologies [D]. Qingdao University of Technology, 2018.
91. Liang Yu. Discussion on the growth factors of sulfate-reducing bacteria [J]. *Shanxi Architecture*, 2010, 36(30): 199-200.
92. Lin Zhen, Gao Zhonghui, Zhou Jianqin, Xu Danjun, Cheng Dabao. Imaging manifestations of lung injury in acute hydrogen sulfide poisoning [J]. *Modern Practical Medicine*, 2016, 28(06): 801-802+841.
93. Liu Dongmei. Research on optimization and reconstruction strategies of urban drainage systems [D]. Dalian University of Technology, 2015.
94. Liu Huaping, Li Tian, Duan Xiaoping. Hydrogen sulfide corrosion of sewer pipes and control methods [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2004, 22(5): 282-284.
95. Liu Huaping, Li Tian. Investigation and analysis of hydrogen sulfide corrosion in Shanghai drainage pipes [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2005(06): 91-94.
96. Liu Jinyan. On the sources, hazards, and preventive measures of hydrogen sulfide in drainage systems [J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2008(24): 123+125.
97. Liu Wei. Study on the hydraulic regulation mechanisms of biological methane and sulfide metabolism in sewer pipes [D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.
98. Liu Y, Ni B, Ganigué R, et al. Sulfide and methane production in sewer sediments[J]. *Water Research*, 2015,70:350-359.
99. 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.

100. Liu, H. Research and Prevention of Harmful Gases in Special Structures of Urban Deep Drainage Systems. *Water* 2024, 16, 2481.
101. 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.
102. Los Angeles Sanitation & Environment. Sewer System Management Plan (Version 3.0)[R]. Los Angeles: Los Angeles Sanitation & Environment, 2019.
103. LU J S, ZHANG E F, LI K. Enhancing the ventilation of sewers by using inhaled air in the vertical stack of a building[J]. *Water Practice and Technology*, 2018, 13(3): 555-565.
104. Lu Jinsuo, Zhou Yapeng, Ding Yanping, Zheng Cailin, Liao Bangyou, Song Guangshun, Chen Jun. Emission of harmful gases in wastewater collection and transportation pipeline systems and its solutions [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 13(04): 757-764.
105. Ma Nian. Application of grid energy dissipation basins in drainage systems of mountainous cities [J]. *China Water & Wastewater*, 2005(05): 54-58.
106. Ma Ruohan, Li Zhouyan, Cai Teng, Niu Chengxin, Wang Xueye, Wang Zhiwei. Research progress on emissions and control of non-CO₂ greenhouse gases in municipal drainage networks [J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(11): 1-12.
107. Ma Wei, Zhu Si, Wang Shenghua, Zhu Jianmiao. Application of hazardous gas monitoring systems to prevent gas explosions in urban drainage systems [J]. *Safety*, 2017, 38(08): 28-31.
108. Ma Youguang, Bai Peng, Yu Guocong. Research progress on gas-liquid mass transfer theory [J]. *Chemical Engineering*, 1996(06): 9-13+3.
109. Mahmoudi-Rad M, Najafzadeh M. Experimental evaluation of the energy dissipation efficiency of the vortex flow section of drop shafts. *Sci Rep*. 2023 Jan 30;13(1):1679.
110. Manninen M, Taivassalo V, Kallio S. On the mixture model for multiphase flow[R]. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 1996. (VTT Publications 288)
111. Material Purchasing Price Index (MPPI) for engineering construction in China, August 2022 <http://wz.cacem.com.cn/info/754>
112. Matos R V, Ferreira F, Matos J S. Influence of ventilation in H₂S exposure and emissions from a gravity sewer[J]. *Water Science & Technology*, 2020, 81(10): 2043–2056.
113. Matos, R. V., et al. (2021). *Model-Driven Strategies for Sulfide Control in a Regional Wastewater System...* *Water*, 13(20), 2838.
114. McLellan SL, Roguet A. The unexpected habitat in sewer pipes for the propagation of microbial communities and their imprint on urban waters. *Curr Opin Biotechnol*. 2019 Jun;57:34-41.
115. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. JGJ/T 259-2012 Technical specification for repair and durability protection of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
116. Moro D, Nguyen N C, Peraire J, Drela M. Mesh topology preserving boundary-layer adaptivity method for steady viscous flows[J]. *AIAA Journal*, 2017, 55(6).
117. Mu Yi. Study on the calculation model of flow discharge and energy dissipation in drop shafts with baffles for urban deep tunnel drainage systems [D]. Southwest Jiaotong University, 2019.
118. Nielsen P H, Hvitved-Jacobsen T. Effect of Sulfate and Organic Matter on the Hydrogen Sulfide

- Formation in Biofilms of Filled Sanitary Sewers[J]. Journal, 1988,60(5):627-634.
119. Nielsen P H, Raunkjær K, Hvitved-Jacobsen T. Sulfide production and wastewater quality in pressure mains[J]. Wat.sci.tech, 1998,31(37):97-104.
 120. Norsker N H, Nielsen P H, Hvitved-Jacobsen T. Influence of oxygen on biofilm growth and potential sulfate reduction in gravity sewer biofilm[J]. Water Science & Technology, 1995,31(7):159-167. [86]
 121. OECD. OECD Environmental Performance Reviews: Japan – Assessment and Recommendations[R]. Paris: OECD Publishing, 2010.
 122. Official website of the Ecology and Environment Bureau. <https://sthjj.suzhou.gov.cn/>
 123. Pacheco Fernández M, Barjenbruch M. Experimental determination of the H₂S mass transfer coefficient across the liquid–gas interface in gravity sewers[J]. Water Science & Technology, 2022, 86(3): 445. DOI:10.2166/wst.2022.198.
 124. Padulano, R.; Del Giudice, G.; Carravetta, A. Experimental Analysis of a Vertical Drop Shaft. Water 2013, 5, 1380-1392.
 125. Perlmutter D. Surface-renewal models in mass transfer[J]. Chemical Engineering Science, 1961, 16(3-4): 287-296.
 126. Pomeroy R D. Flow velocities in small sewers[J]. J Water Pollut Control Fed, 1967,39(9):1525-1548.
 127. Prasher B D, Wills G B. Mass transfer in an agitated vessel[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1973, 12(3): 351-354.
 128. QIAN Y, SHAO W, ZHU D Z, et al. Airflow and gas emissions in a sewer system with a drop manhole[J]. Water Research, 2019, 161: 638-651.
 129. Qiao Linran. Prediction of reliability and service life of concrete subjected to microbial corrosion in sewer pipes [D]. Henan University of Technology, 2024.
 130. Qin Ge, Wu Xiaojun, Zhao Peng, Yu Zhongshan, Wei Chunming, Wu Shihao, Chen Wanjun, Jia Zhenjun, Zhang Yunfeng. Hydrogen sulfide poisoning: research progress on metabolic mechanisms and testing methods [J]. Environmental Chemistry, 2025, 44(05): 1802-1814.
 131. Qin Xiaofang. Discussion on problems and solutions for industrial wastewater treatment in environmental engineering [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2024, 5(19): 8-9+12.
 132. Qinghua Yang Numerical investigation of the turbulence characteristics and energy dissipation mechanism of baffle drop shafts // Qinghua Yang, Qian Yang // Water Sci Technol (2021) 83 (9): 2259–2270.
 133. Rajaratnam, N., Mainali, A., & Hsung, C. Y. (1997). Observations on Flow in Vertical Dropshafts in Urban Drainage Systems. Journal of Environmental Engineering, 123(5), 486–491.
 134. Ren Nanqi, Wang Aijie, Zhao Yangguo. Ecology of sulfate-reducing bacteria in anaerobic wastewater treatment [M]. Science Press, 2009.
 135. Ruan Huiliang, Huang Shungen, Han Ziqian. Characteristics of acute hydrogen sulfide poisoning and preventive measures [J]. Occupational Health and Emergency Rescue, 2001(01): 43.
 136. Shaft management and maintenance job information network. <https://fushun.zgsrcw.com/job/339812964.html>
 137. Shang Fangyu. Industrial technology for producing sodium sulfide by absorbing hydrogen sulfide with sodium hydroxide solution [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2012, 44(2): 42-44.
 138. Sharma K R, Yuan Z, Haas D D, et al. Dynamics and dynamic modelling of production H₂S in sewer systems.[J]. Water Research, 2008,42(10-11):2527-2538.

139. Sharma M M, Danckwerts P V. Chemical methods of measuring interfacial area and mass transfer coefficients in two-fluid systems[J]. *British Chemical Engineering*, 1970, 15(4): 522-528.
140. Sherief, M.; Aly Hassan, A. The Impact of Wastewater Quality and Flow Characteristics on H₂S Emissions Generation: Statistical Correlations and an Artificial Neural Network Model. *Water* 2022, 14, 791.
141. Sitthikhankaew, R., Predapitakkun, S., Kiattikomol, R. W., Pumhiran, S., Assabumrungrat, S., & Laosiripojana, N. (2011). Comparative Study of Hydrogen Sulfide Adsorption by using Alkaline Impregnated Activated Carbons for Hot Fuel Gas Purification. *Energy Procedia*, 15-24. Elsevier BV.
142. Smet E, Lens P, Langenhove H V. Treatment of Waste Gases Contaminated with Odorous Sulfur Compounds[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1998,28(1):89-116.
143. Spietz RL, Williams CM, Rocap G, Horner-Devine MC. A Dissolved Oxygen Threshold for Shifts in Bacterial Community Structure in a Seasonally Hypoxic Estuary. *PLoS One*. 2015 Aug 13;10(8):e0135731.
144. SUETINA T, BURLACHENKO A, CHERNYKH O, et al. Hydrodynamics of siphons and similar tubular constructions in transient modes[C]//Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Application 2022 (ICERA 2022). AIP Publishing, 2023, 2936(1): 020007. DOI:10.1063/5.0178073.
145. Sun Jiazheng. Design and simulation analysis of drainage systems and energy dissipation structures on steep slopes in mountainous areas of Chongqing [D]. Chongqing Jiaotong University, 2023.
146. SUN L, ZHANG W, ZHU D Z. Emission of Hydrogen Sulfide from Falling Droplets in Sewage Drop Structures[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, 146(12): 04020131. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001819.
147. Sydney Water. Sydney Water Annual Report 2023-2024[R]. Sydney: Sydney Water, 2024.
148. Tchobanoglous, G., et al. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (Metcalf & Eddy)*. McGraw-Hill Education.
149. Turney D, Banerjee S. Transport phenomena at interfaces between turbulent fluids[J]. *AIChE Journal*, 2008, 54(2): 344-349.
150. Vakili, M.; Koutník, P.; Kohout, J. Addressing Hydrogen Sulfide Corrosion in Oil and Gas Industries: A Sustainable Perspective. *Sustainability* 2024, 16, 1661. <https://doi.org/10.3390/su16041661>
151. Van Swaaij W P M, Versteeg G F. Mass transfer accompanied with complex reversible chemical reaction in gas-liquid systems: an overview[J]. *Chem. Eng. Sci.*, 1992, 47: 3181-3195.
152. Vollertsen, J., Revilla, N., Hvitved-Jacobsen, T. and Nielsen, A.H. (2015), Modeling Sulfides, pH and Hydrogen Sulfide Gas in the Sewers of San Francisco. *Water Environment Research*, 87: 1980-1989.
153. Vyavahare P, Rao L B, Patil N. CFD analysis of double suction centrifugal pump with double volute[J]. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2018, 62(1): 74–82.
154. Wang Changwei. Numerical simulation and experimental study of unsteady multiphase flow in siphon pipelines [D]. Fuzhou University, 2018.
155. Wang Jinfu. Fundamental research on gas-liquid interfacial mass transfer and integration of separation and reaction processes. Beijing: Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, 2004.
156. Wang Ping. Application and development of sustainable urban drainage systems [J]. *Jiushe*, 2017,

- (28): 10.
157. Wang Shilong. Research on the optimization of urban drainage systems [D]. University of Science and Technology Liaoning, 2016.
 158. Wang Yao, Zhang Jinsong, Fan Bowen, He Bin, Zhang Huazhong, Sun Hao, Fang Xi, Chen Ke, Guo Shiguang, Wu Hao. Study on risk factors and prognostic value of acute hydrogen sulfide poisoning complicated with central nervous system injury [J]. Journal of Nanjing Medical University (Natural Sciences), 2023, 43(12): 1650-1655+1680.
 159. Wei J, Ma Y, Zhu D Z, et al. Experimental Study of Plunging-Flow Dropshafts with an Internal Divider for Air Circulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(9).
 160. Welty J R, Wicks CE, Wilson R E. Fundamentals of Momentum. Heat and Mass Transfer[M]. 3" Edition. John Wiley & Sons. Inc. 1984, 472-714.
 161. Wu Jiuru. Causes of hydrogen sulfide generation in sewers and its monitoring during construction [J]. Science and Technology Information, 2011(02): 120-122.
 162. Wu Peng. Numerical simulation of a new type of horizontal swirling energy dissipator in drop shafts [D]. Hefei University of Technology, 2010.
 163. Wu, H., et al. (2016). *Deep Tunnel for Regulating Combined Sewer Overflow Pollution and Flood Disaster: A Case Study in Guangzhou City, China*. Water, 8(8), 329.
 164. Wu, L.; Hu, C.; Liu, W.V. The Sustainability of Concrete in Sewer Tunnel—A Narrative Review of Acid Corrosion in the City of Edmonton, Canada. *Sustainability* 2018, 10, 517.
 165. Xie, F.; Tian, C.; Ma, X.; Ji, L.; Zhao, B.; Danish, M.E.; Gao, F.; Yang, Z. Seasonal Temperature Effects on EPS Composition and Sludge Settling Performance in Full-Scale Wastewater Treatment Plant: Mechanisms and Mitigation Strategies. *Fermentation* 2025, 11, 532.
 166. Xing Yukun, Cao Xiuqin, Liu Ting, et al. Current status, problems, and development suggestions for urban drainage systems in China [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(10): 19-23.
 167. Xu Jianlin, Gong Peilin, Zhang Chunbo, Jia Yongxing, Li Rui, Yang Yonggang. Large eddy simulation (LES) of aerodynamic noise of a single cylinder under different boundary conditions [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(12): 78–88..
 168. Xu Mingquan. Numerical simulation of erosion-corrosion of pipelines in multiphase flow [D]. Zhejiang University, 2005.
 169. Yajian Wang, Jiaxing Hu, Dingtao Kou, Wei Li, Yalin Liu, Comparative assessment of concrete degradation in sewage pipelines: Biogenic vs. mineral sulfuric acid and sewage liquid, Case Studies in Construction Materials, 10.1016/j.cscm.2025.e05169, 23, (e05169), (2025).
 170. Yang Lihong. Discussion on clinical characteristics and first aid measures of hydrogen sulfide poisoning [J]. Electronic Journal of Clinical Medical Literature, 2016, 3(38): 7555+7558.
 171. Yang Meng. Statistical analysis of hydrogen sulfide poisoning accidents and countermeasures [J]. Safety, Health & Environment, 2018, 18(04): 8-10.
 172. Yang Qian, Yang Qinghua, Zheng Lining, Tian Qiang, Liu Yongquan, Yao Jintao, Mu Yi, Yao Yuan. Experimental study on flow discharge and energy dissipation in drop shafts with baffles for deep tunnel drainage systems [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(06): 1247-1256.
 173. Yang Shengjue. Design and research of sensors for detecting harmful gases in the environment [D]. Jilin Jianzhu University, 2024.
 174. Yiyi M. Air Entrainment in a Tall Plunging Flow Dropshaft / M. Yiyi, Z. Zhu David, R. Nallamuthu // Journal of Hydraulic Engineering. 2016.

175. Yongsiri C, Vollertsen J, Rasmussen M, Hvitved-Jacobsen T. Air-water transfer of hydrogen sulfide: an approach for application in sewer networks. *Water Environ Res.* 2004 Jan-Feb;76(1):81-8.
176. Yongsiri C, Vollertsen J, Rasmussen M, Hvitved-Jacobsen T. Air–water transfer of hydrogen sulfide: An approach for application in sewer networks[J]. *Water Environment Research*, 2004, 76(1): 81-88. DOI:10.2175/106143004X141618.
177. Yu Liming. Study on the Marangoni effect in gas-liquid mass transfer processes [D]. Tianjin University, 2005.
178. YU T, DING Q, WANG L, et al. Experimental study on air pressure variation in a horizontal pipe of single-stack drainage system [J]. *Water Science and Technology*, 2019, 79(1): 114-125.
179. Zhang Changlin. Improvement of gas experimental setups using a combination of acrylic tubes [J]. *Teaching of Chemistry*, 2025(05): 73-76.
180. Zhang Chengyuan. Odor analysis in municipal drainage networks and countermeasures [J]. *Technology Wind*, 2021, (09): 147-148.
181. Zhang Hang, Fu Junfeng, Wang Haijun, Yang Rong, Huang Baotong. Selection of flow field mesh generation methods for intersecting pipelines based on ICFM CFD [J]. *Chinese Shipping*, 2019, 19(20): 230-231.
182. Zhang L, De Schryver P, De Gusseme B, De Muynck W, Boon N, Verstraete W. Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review [J]. *Water Research*, 2008, 42(1–2): 1–12.
183. Zhang L, De Schryver P, De Gusseme B, et al. Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review [J]. *Water Research*, 2008,42(1-2):1-12.
184. Zhang Ming, Chen Hui, Liu Yang. Research progress on dry desulfurization and sulfur recovery technology of hydrogen sulfide [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52.
185. Zhang Na. Research on combustible gas monitoring systems in sewers based on GPRS networks [D]. Chongqing University, 2006.
186. Zhang Yindou, Tian Hong'er, Li Zhiyuan, et al. Case analysis of occupational hydrogen sulfide poisoning and countermeasures [J]. *Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health*, 2009, 36(4): 200-203.
187. Zhang, C.; Zhang, Y.; Yang, W.; Yin, J.; Zhang, T. Study on Evolution of the Thermophysical and Mechanical Properties of Inner Shaft Lining Concrete during Construction Period. *Appl. Sci.* 2022, 12, 10141.
188. Zheng Guohui. Study on the establishment and application of a COD concentration model for wastewater in sewer networks [D]. Guangdong University of Technology, 2012.
189. Zillien C, Posthuma L, Roex E, Ragas A. The role of the sewer system in estimating urban emissions of chemicals of emerging concern [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2022, 21: 957–991.

Приложение А

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

ν : кинематическая вязкость

λ : масштаб вихря

θ : контактное время

ε : турбулентный коэффициент диффузии

$\Omega(a, b, \lambda)$: функция распределения масштабов вихрей

v : средняя скорость потока в перепадной шахте

t : время протекания процесса до установления равновесного состояния

n : нормаль к стенке

g : ускорение свободного падения

$erf(\eta)$: функция ошибок

Sc : число Шмидта

Q : расход увлекаемого воздуха.

$E(n)$: спектральная плотность энергии турбулентности

$T_{жс}$: тензор эффективных напряжений сплошной фазы

τ : тензор эффективных напряжений

ρ : плотность

ρ_g : плотность дисперсной фазы

$\rho_{ж}$: плотность сплошной фазы

$\mu_{t,ж}$: турбулентная вязкость сплошной фазы

$\mu_{eff,ж}$: эффективная вязкость сплошной фазы

$\mu_{eff,ж}$: сумма молекулярной и турбулентной вязкостей

μ_g : молекулярная динамическая вязкость дисперсной фазы

$\mu_{ж}$: молекулярная динамическая вязкость сплошной фазы

L : интегральный масштаб турбулентности

δ : толщина «неподвижной» плёнки

z : глубина от границы раздела фаз (контактной поверхности)

x_i : пространственная координата ($i = 1, 2, 3$)

W : массовый расход сероводорода в поперечном сечении шахты

V_M : скорость в модели

V_H : скорость в натурных условиях

v_g : вектор скорости дисперсной фазы

$v_{ж}$: вектор скорости сплошной фазы

$v_{ж,i}$: i -я компонента скорости сплошной фазы

T_0 : температура потока воды

T : время

S : скорость (доля) обновления поверхности

R : радиус шахты

P_m : атмосферное давление

P_d : давление дисперсной фазы

$P_{ж}$: давление сплошной фазы

p : давление

NPV, PV : чистая приведённая стоимость

N : расчетный период (50 лет)

M_b : требуемая масса Na_2S

m_b : молярная масса Na_2S

M_a : требуемая масса $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$

m_a : молярная масса $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$

M : среднесуточная масса сероводорода

M : суммарная межфазная сила

L_M : линейный размер модели

L_H : линейный размер натурального объекта

K : коэффициент массопередачи

J : удельный массовый расход

I : социальная ставка дисконтирования. В настоящем исследовании с учетом долгосрочной ставки дисконтирования для инфраструктурных объектов принято значение 8 %

$H_2S_{нов}$: концентрация сероводорода в атмосфере сооружения, мг/м³

H : высота перепада

Fr : число Фруда

D : коэффициент диффузии

d : размер (диаметр) капли воды.

D : коэффициент молекулярной диффузии

C_A : исходная концентрация сульфида в воде

c : константа (0.4)

C : измеренная концентрация

$ж, г$: непрерывная фаза и дисперсная фаза

A : площадь контакта газ–жидкость

a : объёмная доля фазы

A', B' : параметры, которые зависят от типа перепадной шахты, соотношения высоты перепада H к диаметру шахты D , а также от их фактического значения.

ΔC_A : градиент концентрации вещества

$v_{к.6}$: средняя скорость развития коррозии бетона труб

$\lambda_{min}, \lambda_{max}$: минимальный и максимальный масштабы вихрей

v_0 : начальная скорость входного потока

k_{CT} : мгновенный коэффициент массопередачи

k_L : общий коэффициент массоотдачи

$\bar{k}$: средний коэффициент массоотдачи

$\frac{dp}{dz}$: градиент давления.

c_{Ai} : концентрация на границе раздела фаз

c_{A0} : начальная или объемная концентрация

$V_{reprirs}$: сумма приведенных затрат на ремонт

V_d : конечная скорость капли воды.

V_{MH} : скорость воздуха в перепадной шахте.

V_{gas} : сумма объёмов шахты и емкости с газоанализатором

v_r : относительная скорость фаз

v_G : скорость газа

$\tilde{U}$: турбулентный масштаб скорости

T_c : Время протекания процесса

S_0 : площадь свободной поверхности жидкости

R_n : остаточная стоимость на конец n-го года

Q_w^* : безразмерный расход воды (относительный параметр).

Q_w : расход воды.

N_{Am} : Средний по времени поток компонента А

N_{AT} : мгновенный диффузионный поток компонента А через границу контакта

M_t : затраты на эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт в t-м году

M_{repor} : общая сумма за один ремонт

M_{wall} : силу смачивания стенок

M_{turb} : силу турбулентной диффузии

M_{lift} : подъёмную силу

M_{drag} : силу сопротивления

J_A : потока вещества

I_0 : первоначальные капитальные вложения

D_{MH} : диаметр перепадной шахты (или модели).

D_L : коэффициент диффузии в жидкой фазе

D_A : молекулярный коэффициент диффузии компонента А

C_d : коэффициент сопротивления между воздушным потоком и каплей воды.

C_T : коэффициент турбулентной диффузии

C_L : коэффициент подъёмной силы

C_D : коэффициент сопротивления

C_{Ai} : концентрация на границе раздела фаз

C_{A0} : концентрация у твердой стенки

C_{wall} : коэффициент пристенной смачивающей силы

C_4 : концентрация H_2S в воздухе в определенный момент времени

C_3 : концентрация H_2S в воде в определенный момент времени

C_2 : концентрация H_2S , соответствующая равновесному состоянию в сооружении

C_1 : концентрация H_2S в момент запуска шахты (по показанию газоанализатора)

A_{int} : площадь внутренней стенки шахты

$\bar{k}_\lambda(\lambda)$: локальный коэффициент массоотдачи для вихря масштаба λ

Приложение Б

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Муниципальная инженерно-строительная компания города Пиндиншань

АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта кафедры
«водопользования и экологии» ФГБОУ ВО СПбГАСУ
ЛЮ Хао

Настоящим актом подтверждается, что по поручению аспиранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Лю Хао была проведена оценка практического применения результатов его диссертационного исследования «Оценка влияния конструкции перепадной шахты в системах водоотведения на выделение сероводорода из потока сточных вод». Внедрение осуществлялось в ООО «Муниципальная инженерно-строительная компания города Пиндиншань».

С целью подтверждения практической ценности и надежности разработанной в диссертации сифонной конструкции шахты нашей компанией было осуществлено ее внедрение в действующие системы водоотведения. Кроме того, был выполнен расчет и прогноз выделения сероводорода в процессе эксплуатации шахты с применением предложенной в диссертации расчетной формулы эмиссии сероводорода. В ходе монтажа и ввода конструкции в эксплуатацию проведен комплекс оценочных испытаний.

В ходе практического применения были выявлены следующие преимущества данного диссертационного исследования:

- Шахта с сифонным стояком эффективно подавляет выделение сероводорода: по сравнению с шахтами, не оборудованными сифонной конструкцией, объем эмиссии сероводорода был существенно снижен;
- Шахта с сифонным стояком отличается быстротой и удобством процессов монтажа и демонтажа; после сборки и установки общая структурная прочность соответствует действующим проектным требованиям;
- Шахта с сифонным стояком более проста при проведении повседневного технического обслуживания;
- После нескольких недель эксплуатации по сравнению с традиционными шахтами в шахтах с сифонным стояком отмечено значительное снижение коррозионных процессов;
- Применение предложенной в диссертации расчетной формулы для определения выбросов сероводорода позволяет точно прогнозировать выделение сероводорода в существующих шахтах, обеспечивая заблаговременную защиту в рамках мероприятий по контролю за эмиссией сероводорода.

Результаты оценки исследования Лю Хао «Оценка влияния конструкции перепадной шахты в системах водоотведения на выделение сероводорода из потока сточных вод» оказались весьма удовлетворительными. В связи с этим наша компания считает, что шахты с сифонным стояком, а также расчетная формула для сероводорода обладают широкой практической ценностью для применения в системах водоотведения.

ООО «Муниципальная инженерно-строительная компания города Пиндиншань»

Генеральный директор: 

Дата: 2026.08.16

Приложение В

ПАТЕНТЫ

证书号第9986589号



专利公告信息

外观设计专利证书

外观设计名称：排水管道接头

专利权人：刘昊

地址：467100 河南省平顶山市郏县福万城小区10号楼

设计人：刘昊

专利号：ZL 2025 3 0665708.8 授权公告号：CN 309971043 S

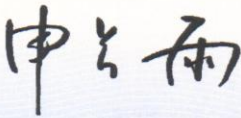
专利申请日：2025年11月12日 授权公告日：2026年05月08日

申请日时申请人：刘昊

申请日时设计人：刘昊

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨



第1页(共1页)



Юридический центр Восстания 6, Бюро переводов
Санкт-Петербург, ул. Восстания, 6.
Тел. +7 812 660 06 06
Факс: +7 812 719 95 71
E-mail: trans@v6.spb.ru

Vosstaniya 6 Legal Centre, Translation Agency
St. Petersburg, Ul. Vosstaniya, 6
Tel. +7 812 660 06 06
Fax: +7 812 719 95 71
E-mail: trans@v6.spb.ru

Перевод с китайского языка

Номер патента: №9986589

[QR-код]

Информация о публикации патента

[Логотип]

ПАТЕНТ НА ПРОМЫШЛЕННЫЙ ОБРАЗЕЦ

Наименование Соединительный элемент для канализационного
промышленного образца: трубопровода

Патентообладатель: Лю Хао

Адрес: 467100 Провинция Хэнань, город Пиндиншань, уезд Цзясянь,
жилой комплекс «Фуваньчэн», д. 10

Автор промышленного образца: Лю Хао

Номер патента: ZL 2025 3 0665708.8 Номер патентной публикации: CN 309971043 S

Дата подачи патентной заявки: 12 ноября 2025 года Дата публикации патента: 08 мая 2026 года

Заявитель по состоянию на дату подачи заявки: Лю Хао

Автор промышленного образца по состоянию на дату подачи заявки: Лю Хао

Государственное управление по интеллектуальной собственности КНР, проведя экспертизу в соответствии с Законом Китайской Народной Республики «О патентах», приняло решение о выдаче патента и опубликовало соответствующее уведомление. Исключительное право на патент вступает в силу с даты публикации уведомления о его выдаче.

Сведения о действительности патентных прав, а также информация об изменениях в отношении патентообладателя и иные юридически значимые данные определяются на основании записей, содержащихся в реестре патентов.

Начальник управления

Шэнь Чаньюй [подпись]

08 мая 2026 года .

[Гербовая печать: Государственное управление по интеллектуальной собственности КНР]

Стр. 1 (из 1)

[Штрихкод]

-----Конец перевода документа-----