

На правах рукописи



МАЛКОВ АНТОН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ КОРРОЗИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ОРГАНИЗАЦИИ ГАЗООБМЕНА**

**Специальность 05.23.04 – водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Васильев Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: **Орлов Владимир Александрович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет", заведующий кафедрой водоснаб-
жения и водоотведения;

Чупин Роман Викторович

кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследо-
вательский технический университет», старший
научный сотрудник кафедры городского строи-
тельства и хозяйства

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное обра-
зовательное учреждение высшего образования
**«Петербургский государственный универси-
тет путей сообщения Императора Алек-
сандра I».**

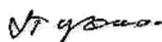
Защита диссертации состоится 27 декабря 2017 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.06 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/malkov-anton-vladimirovich>.

Автореферат разослан 02 ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



Пухкал Виктор Алексеевич

І ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Эксплуатация тоннельных коллекторов глубокого заложения (ТКГЗ) имеет ряд нерешенных на сегодняшний день задач.

Практика показывает, что реальный срок эксплуатации ТКГЗ составляет примерно 20 лет, в некоторых случаях – 4-5 лет, при нормативном сроке эксплуатации ТКГЗ 100 лет. Малый срок эксплуатации канализационной сети (КС) связан с быстрым ее разрушением (коррозией), потерей самонесущей способности КС и сооружений на ней. Как показывают исследования, коррозия КС связана с наличием в подсводном, шахтном пространстве КС агрессивных (токсичных) газов (АГ), от концентрации которых напрямую зависит скорость ее разрушения. Образование АГ в подсводном, шахтном пространстве КС связано с анаэробными процессами протекающими в анаэробных условиях в напорных трубопроводах и отложениях осадка в лотке коллектора с последующим выделением АГ в результате восстановления фазового равновесия между сточной жидкостью и газом. Процессы выделения особенно явно наблюдаются в местах изменения турбулентности потока и на участках КС, расположенных после протяженных напорных трубопроводов. Наличие больших концентраций газов затрудняет пребывание и работу персонала служб эксплуатации КС. Процессы движения сточной жидкости, естественная тяга, значительные колебания уровня заполнения КС и другие процессы сопровождаются движением газа по КС, насыщением газа агрессивными токсичными веществами, выбросами этих газов из КС в атмосферу, что ухудшает экологическую обстановку.

Одним из решений выше описанных проблем считается организация газообмена между канализационной сетью и атмосферой земли (вентиляция КС).

Вопросам организации газообмена в канализационной сети (КС) посвящены работы различных российских и зарубежных авторов. В результате организации газообмена снижается концентрация АГ, снижается скорость коррозии конструктивных материалов системы водоотведения, прекращаются выбросы АГ в нежелательных местах за счет организации и перераспределения потока газов.

Существующие методы не позволяют прогнозировать и производить расчеты газообмена КС, обосновывать необходимость внедрения систем газообмена, а также моделировать и внедрять рациональные, экономически обоснованные решения. Это связано со сложностью расчета движения газа по КС из-за большого количества параметров, влияющих на параметры системы газообмена.

Настоящая диссертация является продолжением научной работы, посвященной канализационным тоннельным коллекторам и связанными с их работой сооружениям, начатой в ЛИСИ (ныне – СПбГАСУ).

Степень разработанности темы исследования. Процессы движения газа по КС в советской и российской науке широко рассматриваются в работах В. М. Васильева, также вопросы газообмена, коррозии, оптимизации работы КС изучали: Алексеев М. И., Гайфутдинов М. Г., Дрозд Г. Я., Ким А. Н., Лапшев Н. Н., Мишуков Б. Г., Новикова А. М., Орлов В. А., Протасовский Е. М., Столбихин Ю. В., Чупин Р. В. и др. Вопросами газообмена в смежных отраслях промышленности

(подземных пространств метрополитена, автомобильных тоннелей и горной выработки) занимались: Клебанов Ф. С., Красюк А. М., Фомичев В. И., Воронина В. Н., Воропаев А. Ф. и др.

Изучаемой теме, в том числе посвящены работы зарубежных авторов: Foster A., James J., James P., Witherspoon J., Apgar D., Matthew W., Dr. Wayne Parker и др.

Часть авторов изучала вопрос организации газообмена между канализационной сетью и атмосферой, как один из методов противодействия процессам коррозии. Авторами проводились различные эксперименты на действующих участках КС. Изучались вопросы движения газа, силы, их побуждающие, и конструктивные элементы, способствующие движению газа или, наоборот, их тормозящие. Были получены эмпирические зависимости, которые позволяют производить расчет количества газа, движущегося по участку канализационного коллектора. Особенности КС являются: высокая агрессивность среды, состав газа, отличный от воздуха, относительно постоянная шероховатость тоннелей на протяженных участках КС. Организация газообмена производится за счет естественной тяги, увлекающей сточной жидкости и эжекции трубчатых перепадов.

В работах, посвященных газообмену других подземных пространств, описываются методики расчета газообмена, приведены основные зависимости и законы движения газа, описаны различные схемы вентиляции тоннелей. Организация газообмена, в каждом описываемом случае, осуществлялась за счет вентиляционных установок и вытяжных труб.

В зарубежной литературе описаны работы, где требуемая мощность оборудования определялась опытным путем. Данный подход связан со сложностью расчета газообмена в КС.

Проведенный литературный обзор показывает недостаточную проработку вопросов расчета и организации движения газа по КС, отсутствие теоретических зависимостей, позволяющих наиболее полно описать и рассчитать количество газа, движущегося по КС, в зависимости от различных ее параметров.

Цель исследования заключается в предотвращении (снижении скорости) коррозии конструкционных материалов в системах водоотведения путем организации газообмена между канализационной сетью и атмосферой земли.

Задачи исследования:

– определить типовые места выделения АГ из сточной жидкости в подсводное и шахтное пространство КС, определить типовые места и причины образования выбросов газа из КС в атмосферу;

– определить требуемую кратность газообмена в КС, получить данные о скорости выделения АГ в подсводное, шахтное пространство КС;

– подтвердить эффективность вентиляции КС, как способа снижения концентрации АГ даже при малой кратности газообмена, организованной за счет естественной тяги;

– подтвердить эффективность газообмена в КС, как способа предотвращения (уменьшения скорости) коррозии конструкционных материалов в системах водоотведения; подтвердить эффективность использования конструкции «трубчатый перепад с глухим перекрытием в нижней части шахты, эжектором и стояком воздушником», как способа организации газообмена;

– рассмотреть процесс совместного движения двух несмешивающихся фаз (сточной жидкости и газа) в канализационных коллекторах; вывести уравнения, математически описывающие процесс движения газа по самотечному канализационному коллектору, в зависимости от различных параметров эксплуатации КС;

– разработать метод расчета движения газа в КС позволяющий на стадии проекта: определять расход, движущегося по КС, газа, требуемую кратность газообмена, скорость коррозии КС, период эксплуатации; прогнозировать места образования АГ в сточной жидкости, их выделения в подсводное и шахтное пространство КС, прогнозировать места и количество выбросов газа из КС в атмосферу, моделировать процессы перераспределения потока газа, за счет вентиляционных установок, вытяжных труб и других побуждающих систем и сооружений с целью предотвращения (снижения скорости) коррозии конструкционных материалов в системах водоотведения.

Объект исследования – процесс совместного движения газа и сточной жидкости в канализационных коллекторах и сооружениях на них.

Предмет исследования – канализационные коллекторы и сооружения на них, включая технологическое оснащение шахт и конструкции перепадов.

Научная новизна исследования заключается в достижении автором следующих конкретных результатов:

1 Выявлены и теоретически обоснованы типовые места выделения АГ из сточной жидкости в подсводное, шахтное пространство КС, определены типовые места и причины образования выбросов газа из КС в атмосферу.

2 Впервые определена и обоснована требуемая кратность газообмена в КС, получены экспериментальные данные о скорости выделения АГ в подсводное, шахтное пространство КС.

3 Экспериментально доказано снижение концентрации АГ за счет вентиляции сети даже при малой кратности газообмена, организованной за счет естественной тяги.

4 Экспериментально доказано предотвращение коррозии конструкционных материалов в КС за счет организации газообмена, экспериментально доказана возможность организации газообмена за счет использования конструкции «трубчатый перепад с глухим перекрытием в нижней части шахты, эжектором и стояком воздушником».

5 Впервые предложены уравнения, математически описывающие процесс движения газа по самотечному канализационному коллектору, в зависимости от различных параметров эксплуатации КС.

6 Разработан метод расчета движения газа по КС позволяющий на стадии проекта: определять расход, движущегося по КС, газа, требуемую кратность газообмена, скорость коррозии КС, период эксплуатации; прогнозировать места образования АГ в сточной жидкости, их выделения в подсводное и шахтное пространство КС, прогнозировать места и количество выбросов газа из КС в атмосферу, моделировать процессы перераспределения потока газа, за счет вентиляционных установок, вытяжных труб и других побуждающих систем и сооружений с целью предотвращения (снижения скорости) коррозии конструкционных материалов в системах водоотведения.

Теоретическая значимость работы заключается в составлении наиболее полного представления о совместном двухфазном несмешиваемом движении газа и сточной жидкости в коллекторах глубокого заложения и определении конструктивных элементов, влияющих на эти процессы. Разработаны и предложены уравнения, математически описывающие процессы движения газа по самотечному канализационному коллектору, в зависимости от различных параметров эксплуатации КС. Определены условия и места образования АГ в КС, места выбросов этих газов из КС в атмосферу. Подтверждена эффективность газообмена, как способа борьбы с высокой концентрацией АГ в КС и коррозией в системах водоотведения.

Практическая значимость работы заключается в возможности на стадии проекта определять расход газа, движущегося по КС, определять места выделения АГ из сточной жидкости, прогнозировать места выбросов газов из КС в атмосферу, определять причины появления выбросов на действующей КС, совершенствовать существующую и проектируемую КС с точки зрения движения газа путем включения или отключения отдельных конструктивных элементов КС; рассчитывать различные варианты реконструкции или совершенствования КС, с точки зрения движения газа; экономически обосновывать принятые решения; производить расчет перераспределения потоков газа по КС; определять фактическую и требуемую кратность газообмена; получать необходимые расчетные данные для фильтров и систем очистки газов; моделировать различные процессы движения газа по КС для предотвращения (снижения скорости) коррозии конструкционных материалов в системах водоотведения.

Методология и методы исследования. В работе использовались методы: анализ литературных источников по изучаемой теме; экспериментального исследования концентраций газов во времени в действующих ТКГЗ; проведения экспериментов по замеру скорости и направлению движения газа на действующем ТКГЗ; сравнения теоретических и экспериментальных данных; натурного эксперимента по изучению влияния эжектора трубчатого перепада на концентрацию АГ и скорость коррозии шахты КС; математического моделирования совместного движения сточной жидкости и газа в канализационном коллекторе при помощи программы MAPLE 14.

Положения, выносимые на защиту:

1 Выявлены и теоретически обоснованы типовые места выделения АГ из сточной жидкости в подсводное, шахтное пространство КС, определены типовые места и причины образования выбросов газа из КС в атмосферу.

2 Впервые определена и обоснована требуемая кратность газообмена в КС, получены экспериментальные данные о скорости выделения АГ в подсводное, шахтное пространство КС.

3 Экспериментально доказано снижение концентрации АГ за счет вентиляции сети даже при малой кратности газообмена, организованной за счет естественной тяги.

4 Экспериментально доказано предотвращение коррозии конструкционных материалов в КС за счет организации газообмена, экспериментально доказана

возможность организации газообмена за счет использования конструкции «трубчатый перепад с глухим перекрытием в нижней части шахты, эжектором и стояком воздушником».

5 Впервые предложены уравнения, математически описывающие процесс движения газа по самотечному канализационному коллектору, в зависимости от различных параметров эксплуатации КС.

6 Разработан метод расчета движения газа по КС позволяющий на стадии проекта: определять расход, движущегося по КС, газа, требуемую кратность газообмена, скорость коррозии КС, период эксплуатации; прогнозировать места образования АГ в сточной жидкости, их выделения в подводящее и шахтное пространство КС, прогнозировать места и количество выбросов газа из КС в атмосферу, моделировать процессы перераспределения потока газа, за счет вентиляционных установок, вытяжных труб и других побуждающих систем и сооружений с целью предотвращения (снижения скорости) коррозии конструкционных материалов в системах водоотведения.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 05.23.04 – Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов, а именно п. 17 «Предотвращение отложений, биологических обрастаний, коррозия трубопроводов и конструкционных материалов в системах водного хозяйства», п.1 «Создание научных основ и математическое моделирование систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов, промышленных предприятий, объектов энергетики и сельского хозяйства с разработкой и реализацией методов оптимизации систем по экономическим, технологическим и экологическим критериям оптимальности».

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечивается использованием современных средств научных исследований, в том числе, использованием высокоточного оборудования при проведении полевых и лабораторных экспериментов, применением передовых средств компьютерного математического моделирования, соответствие результатов математического моделирования результатам натуральных экспериментов и данным других авторов.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях: на 62-й Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (СПбГАСУ) (г. Санкт-Петербург, 23–24 апреля 2009), 63-й Международной научно-технической конференции молодых учёных (СПбГАСУ) (г. Санкт-Петербург, 5–7 апреля 2010 г.), 68-й международной научно-технической конференции молодых ученых (аспирантов, докторантов) и студентов (СПбГАСУ) (г. Санкт-Петербург, 2–4 февраля 2011 г.), I Международном конгрессе «Актуальные проблемы современного строительства» (СПбГАСУ) (г. Санкт-Петербург, 10–12 апреля 2012 г.), 69-й межвузовской научно-практической конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (СПбГАСУ) (г. Санкт-Петербург, 6–8 апреля 2016 г.), 72-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов

Университета (СПбГАСУ) (г. Санкт-Петербург, 5–7 октября 2016 г.), X Ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых (г. Вологда, 23–25 ноября 2016 г.), заседании научно-технического совета «Проблемы водопользования в Санкт-Петербурге и Ленинградской области» Санкт-Петербургского регионального отделения Российской Экологической Академии Наук (СПбГАСУ) (г. Санкт-Петербург 15 марта 2017г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 15 печатных работах, общим объемом 4,3 п. л., в том числе 8 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация содержит 179 страниц машинописного текста, 1 таблицу, 85 рисунков, 107 формул, 9 приложений и список использованной литературы из 150 наименований работ.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, словаря терминов, списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи работы.

В первой главе проведен анализ состояния канализационных коллекторов глубокого заложения и сооружений на них, изучены особенности и проблемы их эксплуатации. Проведен литературный обзор по изучаемой теме. Представлены выводы.

Во второй главе приведены теоретические исследования, выведены теоретические зависимости количества и направления движения газа по КС, описаны места и причины образования АГ в сточной жидкости, места и причины выделения АГ из сточной жидкости в подсводное, шахтное пространство КС, описаны места и причины выбросов газа из КС в атмосферу, их количество и периодичность, представлен расчет применения побуждающих систем и сооружений, представлен расчет требуемой кратности газообмена в КС. Представлены выводы.

В третьей главе представлены программы и методики проведения экспериментов: сравнение данных, полученных по представленным теоретическим зависимостям, с имеющимися экспериментальными данными. Представлены экспериментальные данные: о величине и скорости изменения концентрации АГ в шахтном пространстве КС, о величине и направлении потока газа, движущегося под действием увлекающей способности жидкости; об эффективности вентиляции КС как способа снижения концентрации АГ даже при малой кратности газообмена; об эффективности вентиляции, организованной за счет естественной тяги; о положительном эффекте в виде снижения скорости коррозии шахты благодаря организации газообмена, об эффективности конструкции «трубчатый перепад с глухим перекрытием в нижней части шахты, эжектором и стояком воздушником», как способа организации газообмена.

В четвертой главе представлен расчет движения газа в КС позволяющий: определять расход газа, движущегося по КС, требуемую кратность газообмена, скорость коррозии КС, период эксплуатации; прогнозировать места образования АГ в сточной жидкости, их выделения в подсводное и шахтное пространство КС,

прогнозировать места и количество выбросов газа из КС в атмосферу, моделировать процессы перераспределения потока газа, за счет вентиляционных установок, вытяжных труб и других побуждающих систем и сооружений. Представлен расчет экономического обоснования целесообразности и окупаемости системы газообмена.

В заключении изложены основные итоги выполненного исследования, сделаны предложения о возможных направлениях продолжения исследования.

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1 Выявлены и теоретически обоснованы типовые места выделения АГ из сточной жидкости в подсводное, шахтное пространство КС, определены типовые места и причины образования выбросов газа из КС в атмосферу

Наиболее вероятными местами образования АГ в сточной жидкости являются участки КС с анаэробными условиями. К таким местам относятся напорные трубопроводы и самотечные коллекторы с отложением осадка в лотке коллектора. Наиболее вероятными местами выделения АГ из сточной жидкости в подсводное и шахтное пространство КС являются:

- участки КС, расположенные после напорных трубопроводов, дюкеров;
- участки КС с увеличением турбулентности потока (сооружения перепадов различных конструкций, узлы подключения);
- участки с заиленными лотками канализационных коллекторов, шахты с обильными осадками на банкетках, площадках, лестницах и перилах;
- места подключений с высокой температурой, большим содержанием сульфидов и сульфатов, а также низким рН воды.

На рисунках 1–4 представлены шахты с различными конструктивными элементами, вызывающими образование АГ и их выделение в газоздушное пространство КС.

На рисунках 2, 3, 5–8 представлены некоторые случаи (варианты) образования осадка в КС.

Выбросы АГ происходят при определенных условиях, когда давление в шахтном пространстве КС больше, чем на поверхности, и достаточно для преодоления выходящим газом щелевых неплотностей в крышке, а иногда и подъема люков.

Выбросы происходят за счет естественной тяги и образования воздушной пробки в шахтном пространстве при превышении количества поступающих газов, над количеством удаляемых (рисунок 11) и зависят от следующих параметров:

- скорости потока сточной жидкости;
- заполнения коллектора (высота потока газа b);
- гидравлического уклона коллекторов;
- образования застойных зон (выпадение осадка);
- температуры.

На рисунках 2, 4–11 представлены шахты с различными конструктивными элементами, вызывающими увеличение избыточного давления в шахте и, как следствие, выбросы АГ в атмосферу.

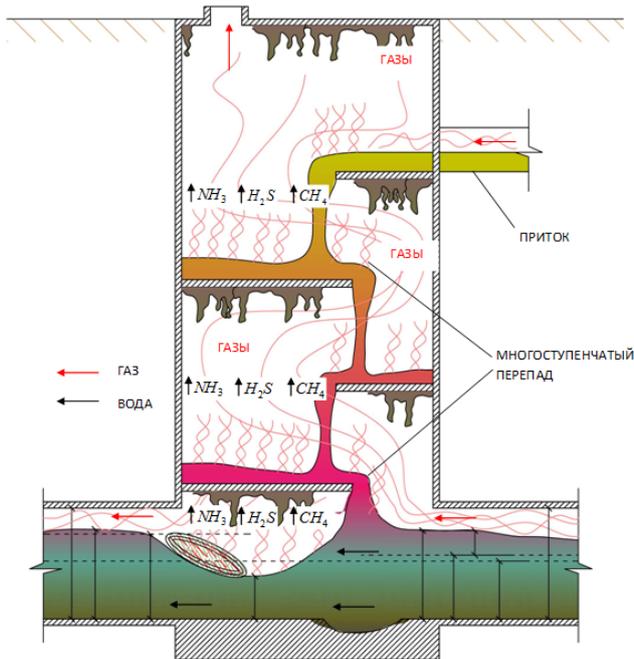


Рисунок 1 – Шахта с перепадом конструкции многоступенчатого вида

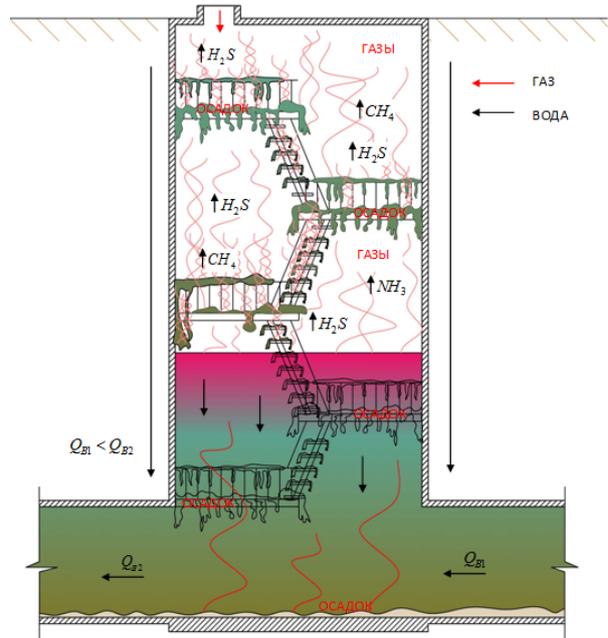


Рисунок 2 – Заполнение КС. Шахта с осадком на перекрытиях. Загнивание и газообразование

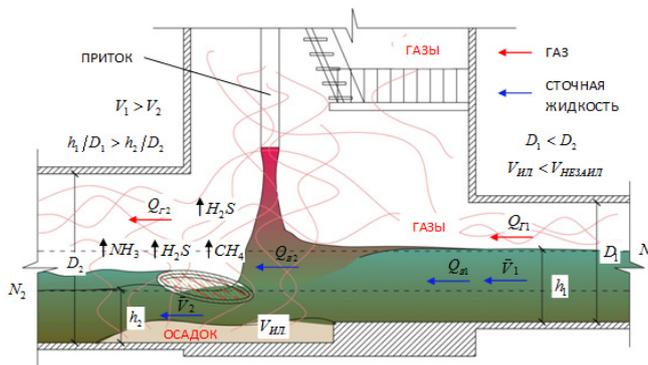


Рисунок 3 – Увеличение диаметра отводящего коллектора в шахте на КС при малых расходах на притоке

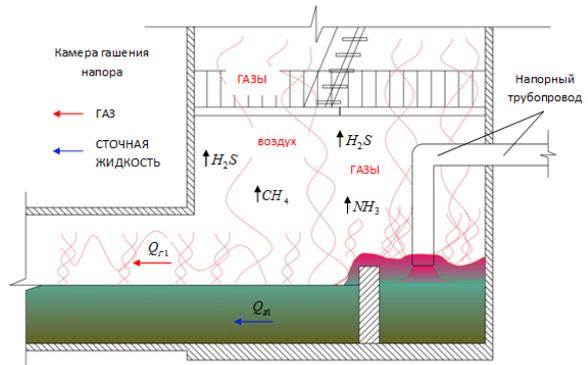


Рисунок 4 – Шахта с камерой гашения напора. Смена режима течения потока сточной жидкости с анаэробного режима на аэробный

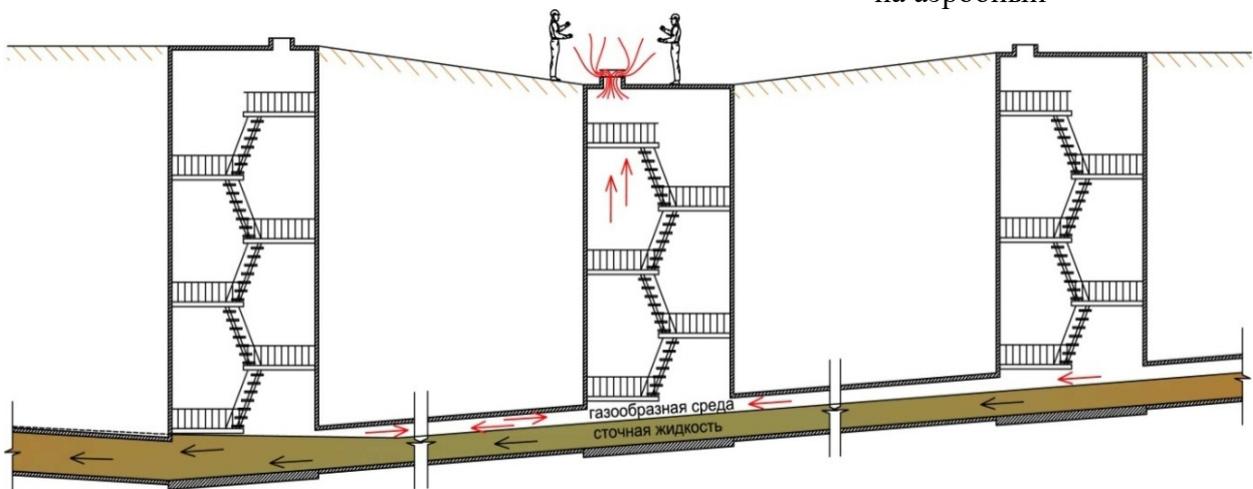


Рисунок 5 – Работа коллектора в режиме «дюкер» приводит к выбросам газов из шахты, расположенной выше по КС, образованию застойных зон, выпадению осадка, его загниванию и выделению продуктов гниения в подсводное пространство КС

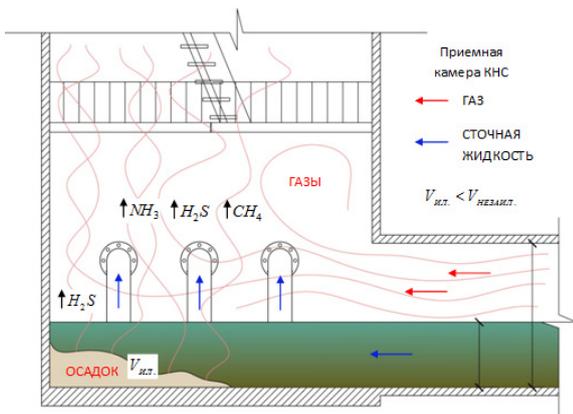


Рисунок 6 – Приемная камера КНС

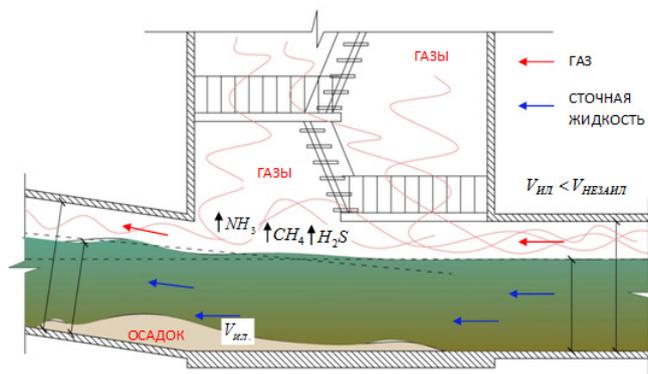


Рисунок 7 – Шахта с контруклоном

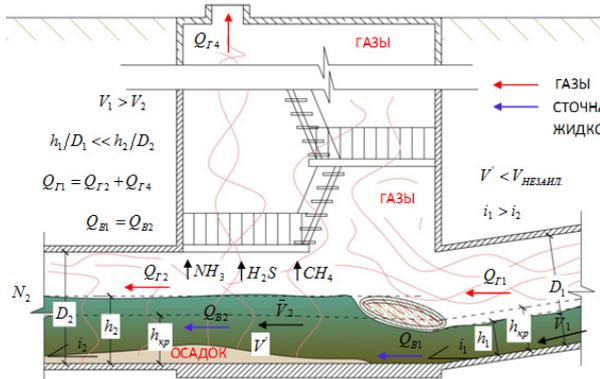


Рисунок 8 – Шахта с уменьшением геометрического уклона коллектора

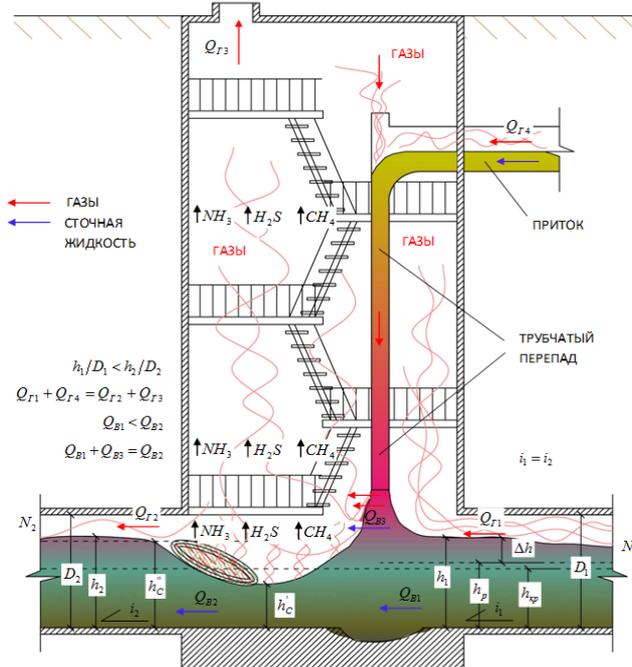


Рисунок 9 – Приток через перепад с гашением энергии за счет соударения потоков

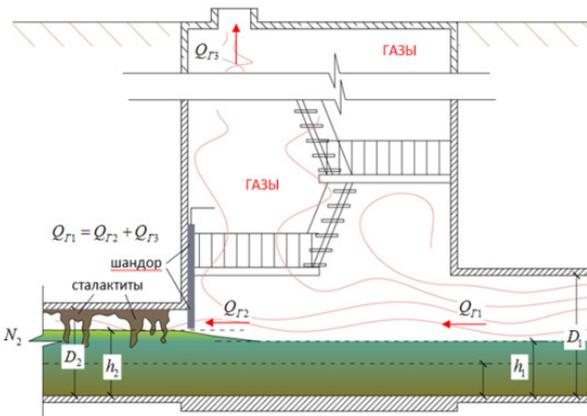


Рисунок 10 – Шахта с местным сопротивлением на КС

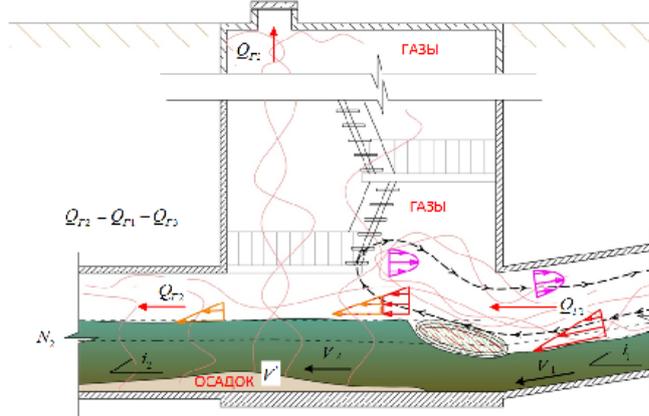


Рисунок 11 – Воздушная пробка. Часть потока газа возвращается обратно из-за уменьшения поверхностной силы потока сточной жидкости

Для снижения количества газов, выделяющихся из сточной жидкости в газозавоздушное пространство КС и сооружений на ней, необходимо:

- избегать транспортировки сточной жидкости по напорным трубопроводам и дюкерам;
- снижать время пребывания сточной жидкости в анаэробных условиях путем сокращения протяженности напорных трубопроводов и дюкером или увеличения скорости транспортирования сточной жидкости;
- применять современные конструкции камер гашения напора, позволяющие производить гашение энергии потока с минимальными выделениями АГ из сточной жидкости в газоздушное пространство камеры и КС в целом;
- применять конструкции перепадов, позволяющие производить транспортировку потока с минимальными выделениями АГ из сточной жидкости в газоздушное пространство КС;
- предотвращать заиливание сетей, регулярно производить промывку лотковой части канализационных коллекторов, застойных зон других сооружений КС и шахт, загрязненных продуктами гниения в результате подтопления КС;
- не допускать подъема уровня сточной жидкости и подтопления КС;
- не допускать сбросов сточной жидкости с относительно высокой температурой, с большими концентрациями сульфидов, сульфатов и другими серосодержащими соединениями (низким рН).

Образование избыточного давления в шахтном пространстве связано с различными факторами, которые следует учитывать на стадии проектирования и строительства КС и производить разработку и реализацию проекта с учетом минимизации таких выбросов, как по мощности, так и по периодичности.

Следует предусматривать различные конструктивные элементы в шахтах КС (фильтры, клапаны, заглушки, «трубчатые» перепады и т. д.), способствующие уменьшению количества газа, выбрасываемого на поверхность земли.

Также на стадии разработки и реализации КС следует предусматривать мероприятия, направленные на объединение очагов образования газов, минимизацию количества точек выбросов, изменение расположения точек выбросов газов в атмосферу (при необходимости).

2 Впервые определена и обоснована требуемая кратность газообмена в КС, получены экспериментальные данные о скорости выделения АГ в подсводное, шахтное пространство КС

На действующем канализационном коллекторе гудокого заложения был произведен эксперимент по измерению в течении времени концентрации газов CO_2 , H_2S , O_2 , CH_4 .

Ниже представлен один из полученных графиков изменения в течение времени концентрации газов CO_2 , H_2S , O_2 , CH_4 в шахте (рисунок 12). Наибольший интерес представляет график изменения концентрации сероводорода.

Максимальная скорость изменения концентрации сероводорода была зафиксирована со значением 90 ppm/ч ($120 \text{ мг/м}^3 \cdot \text{ч}$). Полученные результаты позволяют произвести расчет требуемой кратности газообмена в КС, гарантирующей поддержание концентрации сероводорода в подсводном и шахтном пространстве КС в допустимых пределах.

ПДК по H₂S для КС составляет 5 мг/м³. В таком случае требуемая кратность газообмена при скорости изменения концентрации сероводорода 90 ppm/ч (120 мг/м³·ч) составит 24 объема в час.

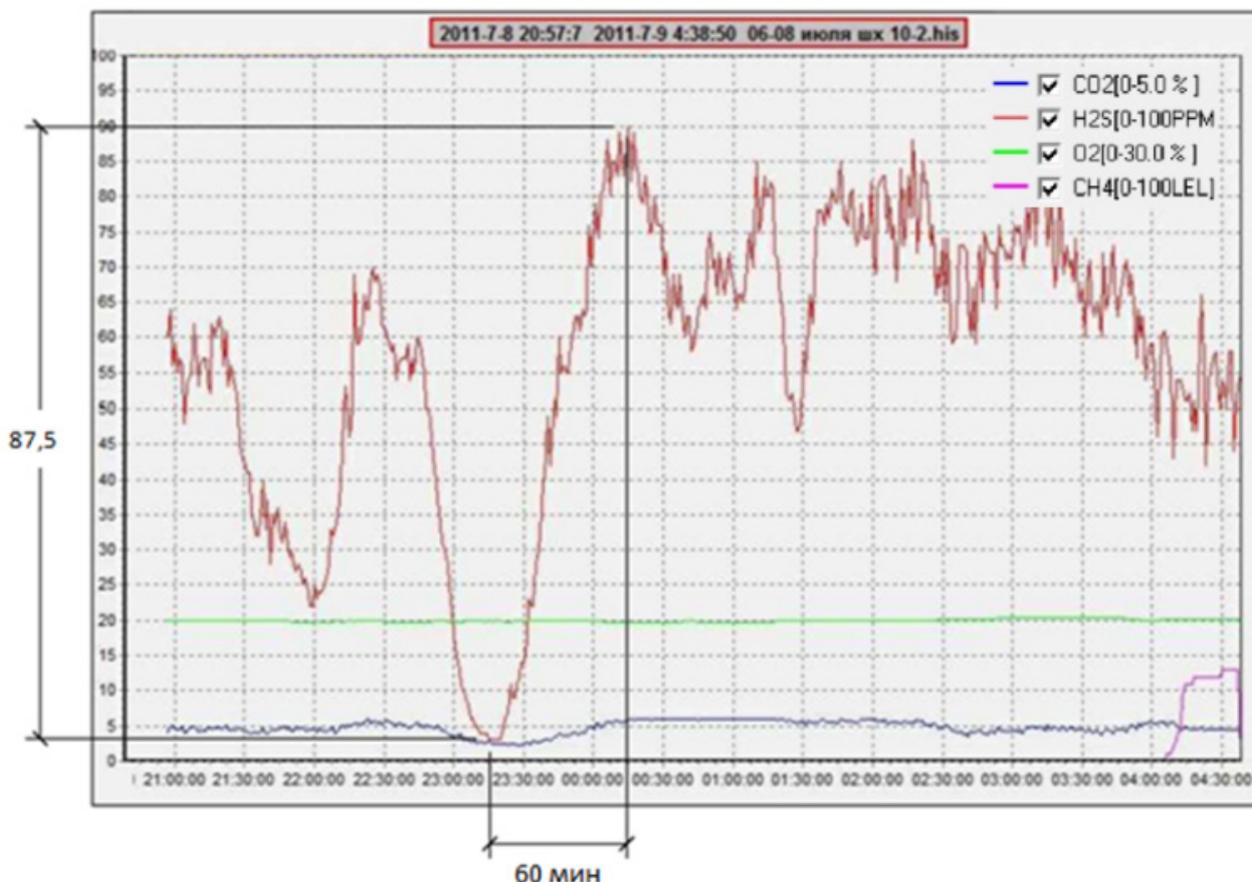


Рисунок 12 – График изменения концентрации газов (O₂, H₂S, CO₂, CH₄) в шахте № 10 в период с 20:57 08.07. 2011 г. по 04:38 09.07.2011 г.

3 Экспериментально доказано снижение концентрации АГ за счет вентиляции сети даже при малой кратности газообмена, организованной за счет естественной тяги

При вентиляции КС происходит конкуренция двух процессов: удаление сероводорода из подсводного шахтного пространства КС; окисление сероводорода кислородом воздуха (при участии микроорганизмов). Поэтому при малой интенсивности воздухообмена возможен обратный эффект, виде увеличения скорости коррозии КС.

Под руководством автора на действующем канализационном коллекторе был проведен эксперимент. Шахта 350Б была провентилирована естественным путем. Во время эксперимента проводился непрерывный замер концентрации АГ (O₂, H₂S, CO₂, CH₄) (рисунок 13) и скорость движения газа из шахтного пространства.

Замер скорости и направления движения газа через людской лаз шахты показал, что газ движется из шахты на дневную поверхность со скоростью 0,5–1,0 м/с. Расход газа составил примерно 0,7 м³/с. При данном расходе в шахте 350Б получается 6-кратный воздухообмен.

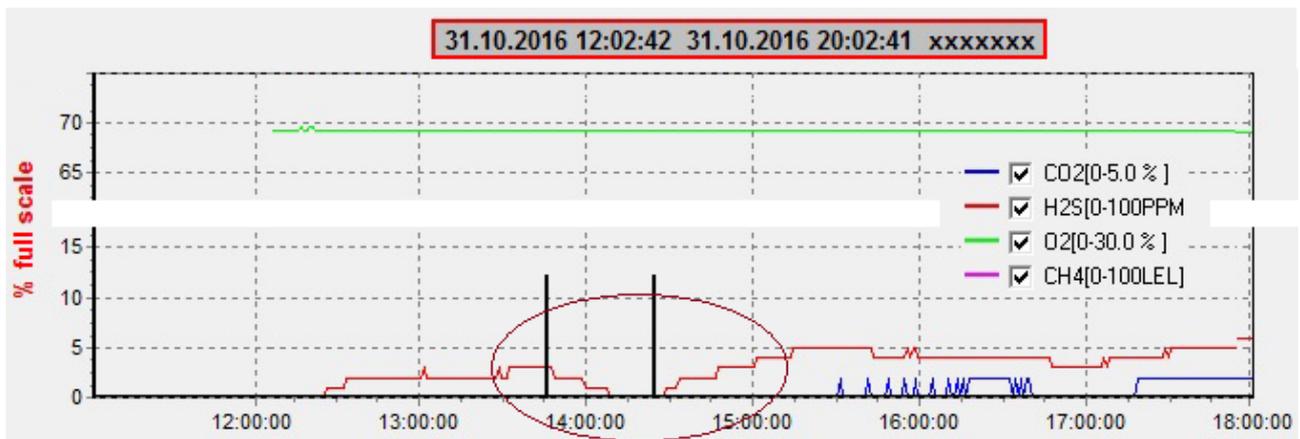


Рисунок 13 – График измерения концентрации АГ в шахте 350Б при вентиляции шахты естественным путем

Как видно на графике, естественная вентиляция шахты снижает концентрацию АГ до показаний, близких к нулю (см. H_2S), концентрация кислорода при этом остается неизменной, что подтверждает эффективность данного метода борьбы с высокой концентрацией газов в шахтном пространстве. Дальнейший анализ графика показывает, что после закрытия людского лаза и прекращения вентиляции концентрация вернулась в первоначальное состояние до показаний 4–6 мг/м³.

4 Экспериментально доказано предотвращение коррозии конструкционных материалов в КС за счет организации газообмена, экспериментально доказана возможность организации газообмена за счет использования конструкции «трубчатый перепад с глухим перекрытием в нижней части шахты, эжектором и стояком воздушником»

В процессе эксплуатации шахта 350Б была подвержена активному разрушению в виде биологической коррозии. Концентрация сероводорода более 10 мг/м³. В 2002 г. была произведена реконструкция шахты. Основными изменениями в технологической схеме работы шахты стало устройство эжектора на трубчатом перепаде, киоска для впуска воздуха, перекрытия над водобойным колодцем с клапаном, стояка-воздушника. Выполненная конструкция перепада, представлена в патенте на изобретение № 2394965 приоритет от 29.12.08 г. Авторы В. М. Васильев, Ф. В. Васильев. Данные изменения позволили организовать вентиляцию шахты 350Б и отделить зону образования агрессивной газовой смеси.

В 2016 г. под руководством автора был проведен замер концентрации АГ в теле шахты в период с 12:03 31.10.16 г. по 22:59 01.11.16 г. который показал, что концентрация таких газов, как O_2 , CO_2 , CH_4 не превышает ПДК. H_2S в 92 % не превышает ПДК, которая для бетона составляет 5 мг/м³ (рисунок 14).

Замер скорости потока газа на всасывании в эжектор показал значения в интервале от 1,2 до 3,2 м/с. Данные результаты говорят о хорошей всасываемости газа из тела шахты в водобойный колодец через эжектор, что соответствует результатам замера концентрации АГ в шахте. Непрерывное удаление газа из тела шахты в эжектор говорит об удовлетворительной кратности газообмена в теле шахты и малой концентрации АГ в ней.

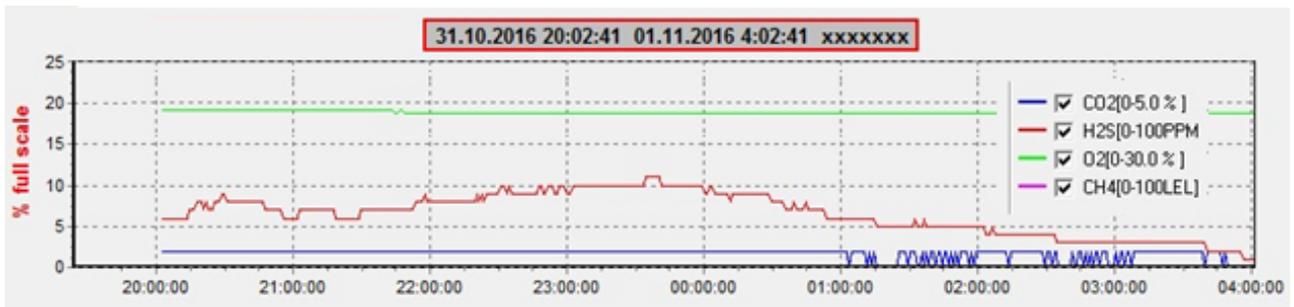


Рисунок 14 – Концентрация углекислого газа, метана, кислорода и сероводорода в шахте 350Б

Визуальное обследование состояния шахты показало отсутствие разрушения бетонных конструкций, технологического оборудования и шахты в целом. Шахта находится в хорошем работоспособном состоянии без видимых следов коррозии и разрушения, что подтверждает эффективность работы конструкции и газообмена в целом.

5 Впервые предложены уравнения, математически описывающие процесс движения газа по самотечному канализационному коллектору, в зависимости от различных параметров эксплуатации КС

Рассмотрено совместное движение двух несмешивающихся веществ – жидкости и газа в тонкой щели длиной L и шириной dz (рисунок 15), где газообразная среда движется под действием естественной тяги и увлекающей способности жидкости, а жидкость движется под влиянием гравитационной силы. При этом щель частично заполнена водой и частично газообразной средой.

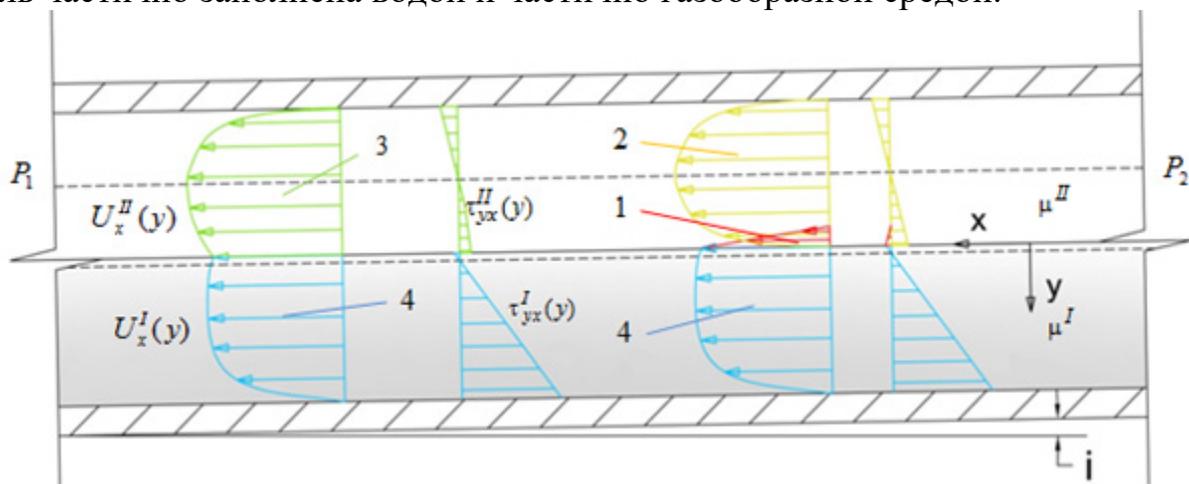


Рисунок 15 – Расчетная схема 2-фазного движения сточной жидкости и газа:

- 1 – эпюра распределения скоростей газа, движущегося под действием увлекающей способности жидкости; 2 – эпюра распределения скоростей газа, движущегося под действием естественной тяги; 3 – эпюра распределения скоростей газа, движущегося под действием увлекающей способности жидкости и естественной тяги; 4 – эпюра распределения скоростей сточной жидкости, движущейся под действием гравитационной силы

Уравнение для определения расхода газообразной среды, движущейся в подводном пространстве канализационного коллектора под действием увлекающей способности жидкости и естественной тяги, базируется на уравнении Навье-Стокса динамики вязкого газа и уравнении закона вязкости Ньютона. При попутном направлении движения потока сточной жидкости и действия естественной тяги (см. рисунок 15) примет вид:

– при $0,0 < h/D < 0,5$

$$Q = \int_0^{\sqrt{R^2-z^2}-(h-R)} \int_{-r}^r \left(\frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h - R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} \right) dydz +$$

$$+ \int_0^{\frac{V_{\text{воды}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r \left(V_{\text{В.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} \right) dydz + 2 \cdot \int_0^{2 \cdot \sqrt{R^2-z^2}} \int_r^R \left(\frac{(P_2 - P_1) \cdot 2 \cdot \sqrt{R^2 - z^2}}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} \right) dydz, \quad (1)$$

– при $0,5 < h/D < 1$

$$Q = \int_0^{\sqrt{R^2-z^2}-(h-R)} \int_{-r}^r \frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h - R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dydz,$$

$$+ \int_0^{\frac{V_{\text{воды}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r V_{\text{В.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} dydz, \quad (2)$$

где $P_2 - P_1$ – разность давления между шахтами, Па; L – длина участка КС, м; μ – динамическая вязкость газа, Па·с; y – расстояние от потока сточной жидкости до расчетной точки, м; ρ – плотность газообразной среды, кг/м³; g – ускорение свободного падения м/с²; i – геометрический уклон, м/м; $V_{\text{В.ПОВ.}}$ – скорость сточной жидкости на поверхности, м/с; R – радиус коллектора, м; h – высота потока сточной жидкости, м; r – половина ширины потока сточной жидкости, м.

При разнопутном направлении движения потока сточной жидкости и действия естественной тяги:

– при $0,0 < h/D < 0,5$

$$Q = \int_0^{\frac{V_{\text{воды}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r V_{\text{В.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} dydz -$$

$$- \int_0^{\sqrt{R^2-z^2}-(h-R)} \int_{-r}^r \frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h - R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dydz -$$

$$- 2 \cdot \int_0^{2 \cdot \sqrt{R^2-z^2}} \int_r^R \frac{(P_2 - P_1) \cdot 2 \cdot \sqrt{R^2 - z^2}}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dydz, \quad (3)$$

– при $0,5 < h/D < 1$

$$Q = \int_0^{\frac{V_{\text{воды}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r V_{\text{В.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} dydz -$$

$$- \int_0^{\sqrt{R^2-z^2}-(h-R)} \int_{-r}^r \frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h - R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dydz \quad (4)$$

Формулы (1 и 3) для расчета движения газа только за счет увлекающей способности жидкости примут вид

$$U_x = V_{\text{В.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i}{\mu} \cdot y, \quad (5)$$

где U_x – скорость газообразной среды в рассматриваемой точке, м/с.

Формула для расчета количества газа, движущегося за счет увлекающей способности жидкости, по КС

$$Q_B = \frac{V_{B.ПОВ.}^2 \cdot d \cdot \mu}{2\rho g i}, \quad (6)$$

где d – ширина поверхности сопряжения сточной жидкости и газообразной среды, м.

Сравнение результатов расчета по формулам (1–4) с имеющимися экспериментальными данными, полученными на каф. Гидравлики СПбГАСУ под руководством проф. д.т.н. В. М. Васильева, показали, что относительная погрешность в 70 % случаев составила менее 9%.

Для подтверждения полученной зависимости (5) были произведены замеры скорости движения газа на действующем канализационном коллекторе. На основании полученных экспериментальных и расчетных данных были построены эпюры распределения потока газообразной среды. Полученные экспериментальные данные подтверждают теоретические результаты расчета. Зависимость (5) можно применять для расчета количества газа, движущегося по канализационному коллектору под действием увлекающей способности жидкости.

6 Разработан метод расчета движения газа по КС позволяющий на стадии проекта: определять расход, движущегося по КС, газа, требуемую кратность газообмена, скорость коррозии КС, период эксплуатации; прогнозировать места образования АГ в сточной жидкости, их выделения в подсводное и шахтное пространство КС, прогнозировать места и количество выбросов газа из КС в атмосферу, моделировать процессы перераспределения потока газа, за счет вентиляционных установок, вытяжных труб и других побуждающих систем и сооружений с целью предотвращения (снижения скорости) коррозии конструкционных материалов в системах водоотведения

Расчет количества газа, движущегося по КС, определяется по одной из имеющихся формул (1–4).

Для расчета естественной тяги определяется избыточное давление относительно плоскости сравнения в каждом портале КС (рисунок 16).

Разность давления сопряженных порталов показывает направление действия силы естественной тяги и ее количество. Расчет относительного давления в портале КС можно произвести по зависимости

$$P_{ОТН} = g \cdot h_{ОТН} \cdot \rho_{АТ} + g \cdot h_{ПОРТ} \cdot \rho_{ПОРТ} \quad (7)$$

где $P_{ОТН}$ – это избыточное давление относительно плоскости сравнения, Па; $h_{ОТН}$ – высота плоскости сравнения относительно верхнего перекрытия портала, м; $\rho_{АТ}$ – плотность воздуха на дневной поверхности, кг/м³; $h_{ПОРТ}$ – высота от точки определения давления до верхнего перекрытия портала, м; $\rho_{ПОРТ}$ – плотность воздуха в портале, кг/м³.

После определения давления в порталах, количества и направления движения газа в подсводном пространстве КС (по 1-4), необходимо произвести расчет узла (рисунок 17).

Расчет узла основан на 1-м законе Кирхгофа (закон сохранения массы)

$$\sum_i^n Q_i = 0 \quad (8)$$

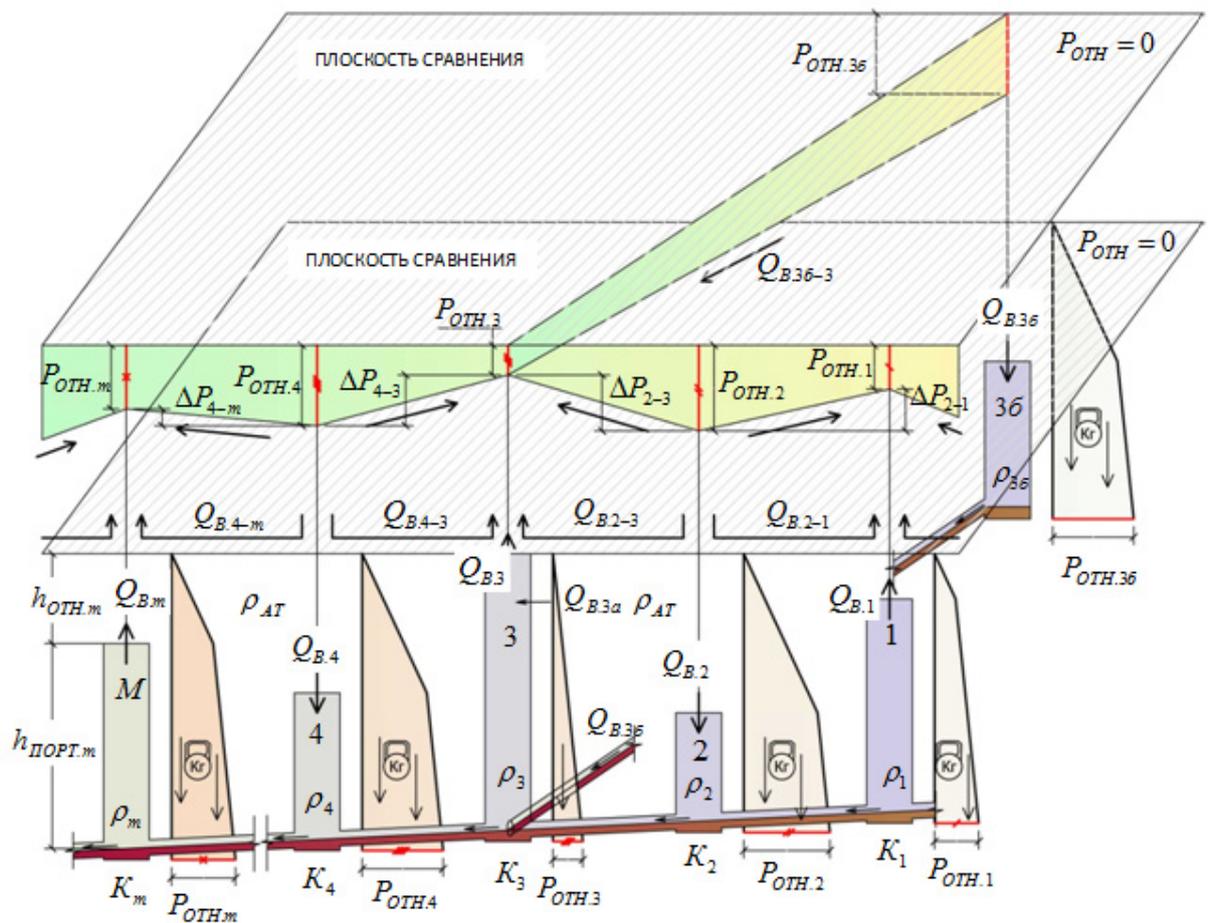


Рисунок 16 – Графическое изображение относительного давления в шахтах КС

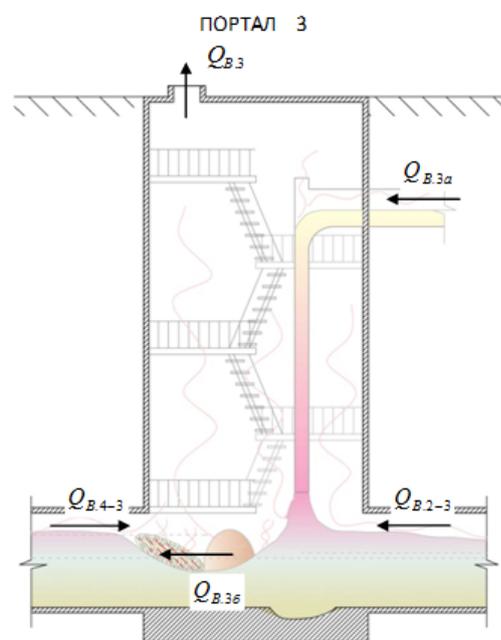


Рисунок 17 – Схема движения газа внутри узла № 3

Формула расчета применительно к рисунку 4 будет выглядеть

$$Q_{B.3} = Q_{B.2-3} + Q_{B.36} + Q_{B.4-3} + Q_{B.3a} \quad (9)$$

Результаты расчета узла показывают нам направление движения и количество газа из (или в) шахты(у) (рисунок 18).

На рисунке 18 видно направление движения газа его количество, места и объемы выхода газа в атмосферу.

Имея данные о расходе воздуха (газа) на участках КС, можно рассчитать кратность газообмена на расчетном участке по формуле

$$K_{ГАЗА} = \frac{3600 Q_B}{W_{уч}}, \quad (10)$$

где $K_{ГАЗА}$ – кратность газообмена на участке КС ч⁻¹; Q_B – расход воздуха на вентилируемом участке, м³/с; $W_{уч}$ – объем вентилируемого участка, подверженного действию АГ, м³.

Далее возможно определить значение фоновой концентрации АГ (сероводорода) при данной кратности газообмена

$$C_{H_2S_{фон}} = \frac{C_{H_2S_{ГАЗ}}}{t_{ГАЗ} \cdot K_{ГАЗА}}, \quad (11)$$

где $C_{H_2S_{ГАЗ}}$ – фоновая концентрация сероводорода в период отсутствия газообмена (насыщенная концентрация по H₂S), мг/м³; $C_{H_2S_{фон}}$ – фоновая концентрация сероводорода на расчетном участке канализационном КС при данной кратности газообмена, мг/м³; $t_{ГАЗ}$ – время насыщения шахтного пространства сероводородом до максимальных концентраций, ч.

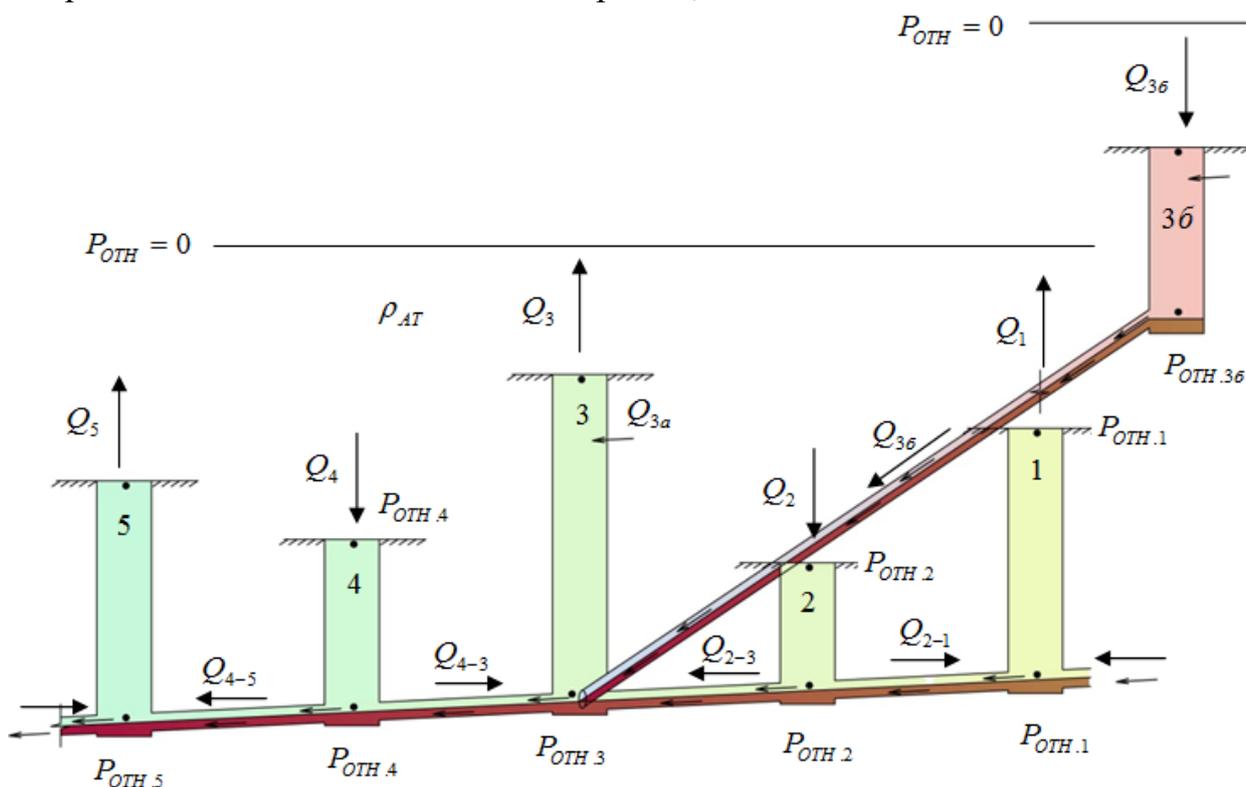


Рисунок 18 – Результаты расчета КС

Концентрация сероводорода в период отсутствия газообмена, зависит от ряда параметров: турбулентность потока, температура сточной жидкости, концентрация растворенного сероводорода в сточной жидкости и др. Имея фоновую концентрацию сероводорода в КС, можно определить скорость разрушения бетонного слоя сооружений на КС и расчетный период эксплуатации КС.

В случае необходимости увеличения кратности газообмена на участке КС или перераспределения потока газа, возможно изменение схемы движения газа и его количества за счет увеличения тяги в отдельных шахтах КС путем:

- установки вентиляционных труб;
- устройства вентиляционных установок на вытяжку;
- включения в схему или вывод из схемы КС одной или нескольких шахт КС.

Вентиляционные трубы предназначены для увеличения естественной тяги и устанавливаются на портале, работающем на выброс газа в атмосферу (рисунок 19 вариант 2). Диаметр таких труб принимается 600–800 мм. При расчете относительного давления в портале формула (7) примет следующий вид

$$P_{\text{ОТНПОРТ}} = g \cdot (h_{\text{ОТН}} - h_{\text{ТР}}) \cdot \rho_{\text{АТ}} + g \cdot (h_{\text{ПОРТ}} + h_{\text{ТР}}) \cdot \rho_{\text{ПОРТ}} \quad (12)$$

Вентиляционные установки могут устанавливаться на вытяжку аналогично вентиляционным трубам на портале, работающем на выброс газа в атмосферу. При расчете относительного давления в портале формула 12 примет следующий вид

$$P_{\text{ОТНПОРТА}} = g \cdot h_{\text{ОТН}} \cdot \rho_{\text{АТ}} + g \cdot h_{\text{ПОРТАЛА}} \cdot \rho_{\text{ПОРТАЛА}} - P_{\text{ВЕНТ}} \quad (13)$$

Исключение из схемы одного из порталов путем герметизации шахты позволяет исключить ее действие на КС, увеличить протяженность участка путем объединения 2-х участков и уменьшения количества газа, движущегося по участку (см. рисунок 19 вариант 2). Возможно также изменение направления движения газа на одном из объединяемых участков (см. рисунок 19 вариант 2).

Включение шахты в схему КС позволяет: уменьшить протяженность участка КС, увеличить количество газа, движущегося в подсводном пространстве КС на разделяемом участке, изменить направление движения газа на части разделяемого участка. Направление движения газа в шахте 2 определяется на стадии расчета (рисунок 19 вариант 1). Возможно, исключить шахту 2 из схемы движения газа путем установки глухого перекрытия в шахте 2. Установка вентиляционной трубы на вытяжку в шахте 1 увеличит естественную тягу на данном участке КС (см. рисунок 19 Вариант 2).

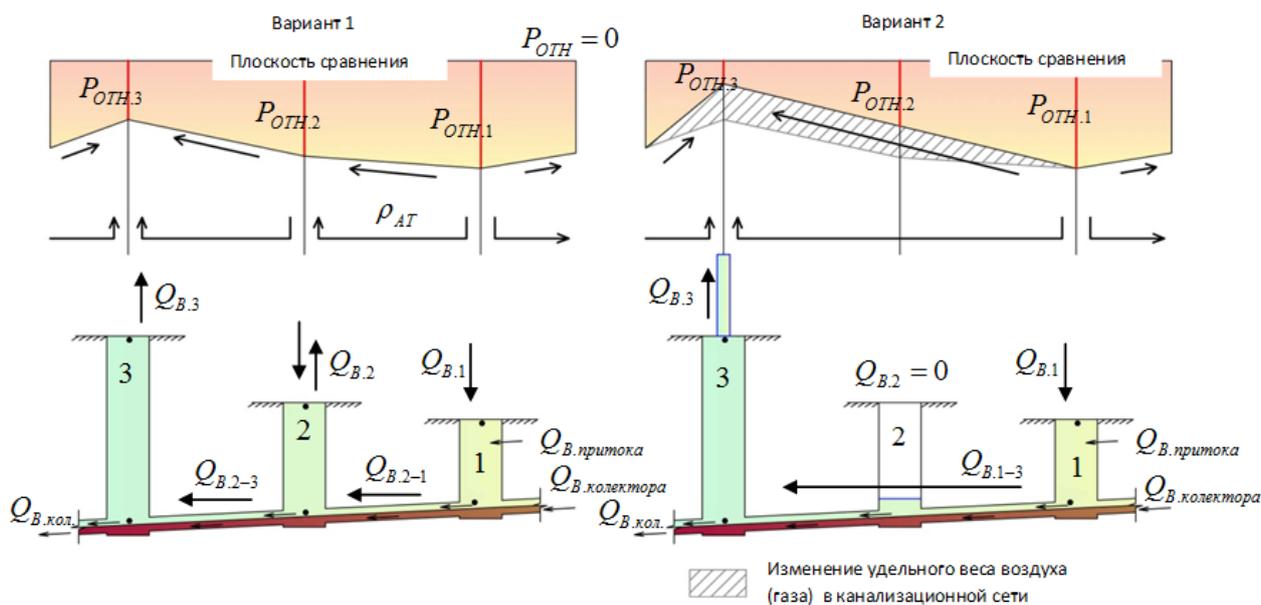


Рисунок 19 – Вариант изменения схемы движения газа по КС

Представленный метод позволяет произвести расчет количества и направления движения газа по КС под действием увлекающей способности жидкости и естественной тяги с учетом различных физических, гидравлических параметров сточной жидкости и газа, конструктивных параметров КС, температуры дневной поверхности. Метод позволяет производить расчеты на стадии проекта и определять следующие параметры: количество и направление движения газа по КС, кратность газообмена, ожидаемую фоновую концентрацию АГ при заданной кратности газообмена, скорость коррозии КС, период эксплуатации. При расчете учитывается работа вентиляционных установок, фильтров и вытяжных труб. Сравнение различных вариантов газообмена можно рассчитать по зависимости

$$\Delta D = \frac{\sum K_2 + \sum \mathcal{E}_2}{T_2} - \frac{\sum K_1 + \sum \mathcal{E}_1}{T_1}, \text{ руб./год}, \quad (14)$$

где $\sum K_1$ – сумма капитальных затрат в случае эксплуатации КС без организации газообмена, руб.; $\sum K_2$ – сумма капитальных затрат в случае эксплуатации КС с организацией газообмена, руб.; $\sum \mathcal{E}_1$ – сумма эксплуатационных затрат за весь период в случае эксплуатации КС без организации газообмена, руб.; $\sum \mathcal{E}_2$ – сумма эксплуатационных затрат за весь период в случае эксплуатации КС с организацией газообмена, включая затраты на оплату экологического ущерба, руб.; T_1 – расчетный период эксплуатации КС без организации газообмена, год.; T_2 – расчетный период эксплуатации КС с организацией газообмена, год; ΔD – экономия, руб./год.

Экономическое сравнение различных вариантов эксплуатации участка КС представлено на рисунке 20, где 1 – Эксплуатация КС без вентиляции; 2 – Эксплуатация КС с вентиляцией естественным путем; 3 – Эксплуатация КС с вентиляцией с использованием вентиляционной трубы; 4 – Эксплуатация КС с вентиляцией с фильтром очистки газов и вентиляционной установкой на вытяжной шахте.

Представленное экономическое сравнение учитывает основные технико-экономические параметры эксплуатации вентиляционной системы КС, позволяет оценить различные варианты вентиляции КС, произвести их сравнение, определить наиболее экономически целесообразный вариант и рассчитать экономический эффект.

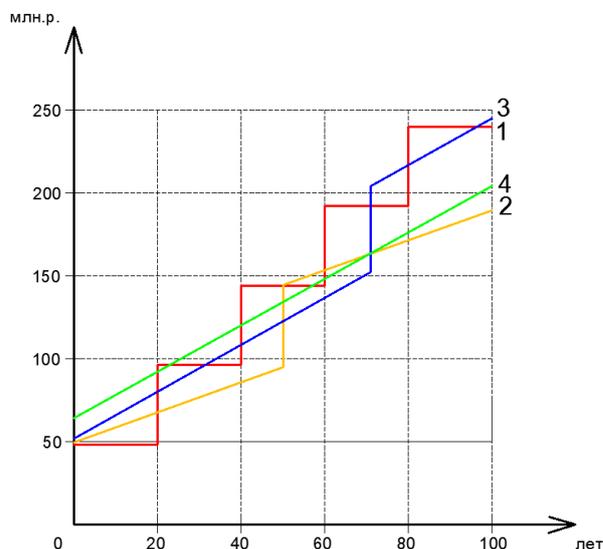


Рисунок 20 – Сравнение затрат на строительство и эксплуатацию участка КС, с учетом затрат на возмещение экологического ущерба

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 В диссертационной работе выявлены и теоретически обоснованы типовые места выделения АГ из сточной жидкости в подсводное, шахтное пространство КС, определены типовые места и причины образования выбросов газа из КС в атмосферу.

2 Впервые определена и обоснована требуемая кратность газообмена в КС, получены экспериментальные данные о скорости выделения АГ в подсводное, шахтное пространство КС.

3 Экспериментально доказано снижение концентрации АГ за счет вентиляции сети даже при малой кратности газообмена, организованной за счет естественной тяги.

4 Экспериментально доказано предотвращение коррозии конструкционных материалов в КС за счет организации газообмена, экспериментально доказана возможность организации газообмена за счет использования конструкции «трубчатый перепад с глухим перекрытием в нижней части шахты, эжектором и стояком воздушником».

5 Впервые предложены уравнения, математически описывающие процесс движения газа по самотечному канализационному коллектору, в зависимости от различных параметров эксплуатации КС.

6 Разработан метод расчета движения газа по КС позволяющий на стадии проекта: определять расход, движущегося по КС, газа, требуемую кратность газообмена, скорость коррозии КС, период эксплуатации; прогнозировать места образования АГ в сточной жидкости, их выделения в подсводное и шахтное пространство КС, прогнозировать места и количество выбросов газа из КС в атмосферу, моделировать процессы перераспределения потока газа, за счет вентиляционных установок, вытяжных труб и других побуждающих систем и сооружений с целью предотвращения (снижения скорости) коррозии конструкционных материалов в системах водоотведения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации.

1. **Малков А. В.** Теоретическое исследование, расчет количества газообразной среды, движущейся в самотечном канализационном коллекторе глубокого заложения под действием разности давления на концах расчетного участка (Естественная тяга) / А. В. Малков // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – №4 (57). – С. 140-144. (0,313 п. л.)

2. **Малков А. В.** Определение мест выброса агрессивных газов из канализационной сети на поверхность и условия их образования [Текст] / В. М. Васильев, А. В. Малков, Г. А. Панкова, М. Н. Клементьев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – №10. – С. 59-66 (0,563 п. л.)

3. **Малков А. В.** Расчет количества газообразной среды, движущейся по канализационной сети под действием увлекающей способности жидкости и разности давления на концах расчетного участка (Естественная тяга) [Текст] / А. В. Малков // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – №5 (58). – С. 115-119 (0,313 п. л.)

4. **Малков А. В.** Места образования агрессивных газов в канализационной сети / В. М. Васильев, А. В. Малков, М. Н. Клементьев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2017. – №1. – С. 66-74. (0,563 п. л.)

5. **Малков А. В.** Расчет требуемой кратности воздухообмена в подсводном пространстве канализационной сети / А. В. Малков // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №2 (61). – С. 184-187 (0,250 п. л.)

6. **Малков А. В.** Расчет количества газообразной среды, движущейся в самотечных канализационных коллекторах глубокого заложения под действием увлекающей способности жидкости / А. В. Малков // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №3 (62). – С. 160-165 (0,375 п. л.)

7. **Малков А. В.** Методика расчета количества газа и направления его движения в канализационной сети / В. М. Васильев, А. В. Малков, В. Г. Вербицкий [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2017. – №6. – С. 55-62. (0,563 п. л.)

8. **Малков А. В.** Пример организации воздухообмена на проектируемом участке канализационной сети и его расчет [Текст] // В. М. Васильев, А. В. Малков, М. Н. Клементьев / Водоснабжение и санитарная техника. – 2017. – №8. – С. 52-57. (0,375 п. л.)

Публикации в других изданиях:

9. **Малков А. В.** Разработка новой схемы водоотведения г. Уфы [Текст] // В. М. Васильев, А. В. Малков / Вода и экология проблемы и решения. – 2009. – №3. – С. 31-35 (0,250 п. л.)

10. **Малков А. В.** Новая схема водоотведения г. Уфы [Текст] // В. М. Васильев, А. В. Малков / Сантехника. – 2009. – №6. – С. 40-42 (0,188 п. л.)

11. **Малков А. В.** К разработке генеральной схемы г. Уфа [Текст] // В. М. Васильев, А. В. Малков / Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №7 (9). – С. 30-32 (0,188 п. л.)

12. **Малков А. В.** Газы в канализационной сети их вред и пути ликвидации [Текст] // В. М. Васильев, А. В. Малков / Техника и технологии мира. – 2016. – №3-4 (81-82). – С. 48-53 (0,375 п. л.)

13. **Малков А. В.** Теоретическое исследование, расчет количества газообразной среды, движущейся в самотечном канализационном коллекторе глубокого заложения под действием увлекающей способности жидкости / А. В. Малков // Материалы 72-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета 5–7 октября 2016 г.: Ч. 2 / С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб. – 2016. – с. 137 (0,250 п. л.)

14. **Малков А. В.** Расчет требуемой и достаточной кратности газообмена в подсводном пространстве канализационной сети. [Текст] // В. М. Васильев, А. В. Малков / Материалы межрегиональной научной конференции X ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых, ВоГУ. В 4 т. Т.2. – 2016. – с. 404 (0,250 п. л.)

15. **Малков А. В.** Проблемы эксплуатации канализационной сети глубокого заложения и пути их решения/ В. М. Васильев, А. В. Малков // Вода MAGAZINE. – 2017. – №3 (115). – С. 28-30 (0,188 п. л.)

Компьютерная верстка И. А. Яблоковой

Подписано к печати 18.10.2017. Формат 60·84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 101.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на ризографе. 190005, Санкт-Петербург, ул. Егорова, д. 5/8, лит. А.