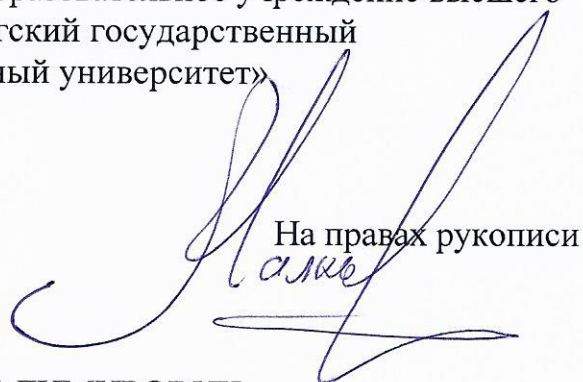


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

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

ДИССЕРТАЦИЯ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Васильев В. М.

Санкт-Петербург

2017 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ РАБОТЫ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ И СООРУЖЕНИЙ НА НИХ. ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	17
1.1 Анализ состояния канализационных коллекторов глубокого заложения и сооружений на них. Особенности и проблемы эксплуатации.....	17
1.2 Механизм образования агрессивных газов в подсводном пространстве канализационных коллекторов глубокого заложения. Коррозия сооружений. Влияние состава сточных вод на процессы газообразования.....	22
1.3 Движение газообразного вещества в канализационной сети. Особенности и негативные последствия. Выбросы агрессивных газов на дневную поверхность земли и их очистка.....	29
1.4 Влияние сооружений, расположенных на канализационной сети, на скорость разрушения сооружений сети и их конструктивные особенности.....	34
1.5 Влияние температуры, влажности и концентрации агрессивных газов в канализационных коллекторах и шахтах, на скорость разрушения сооружений сети.....	38
1.6 Существующие способы снижения концентрации агрессивных газов, скорости разрушения сооружений сети, предотвращения произвольного выброса газов из сети в атмосферу.....	39
1.7 Системы газообмена в различных подземных пространствах и тоннельных системах и методы их расчета.....	42
1.8 Выводы по главе 1.....	50
ГЛАВА 2 СОВМЕСТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА В КАНАЛИЗАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ.....	52
2.1 Совместное движение сточной жидкости и газообразного вещества в подсводном пространстве канализационного коллектора.....	52
2.2 Расчет количества газообразной среды, движущейся в самотечных канализационных коллекторах под действием увлекающей способности жидкости.....	55
2.3 Расчет количества газообразной среды, движущейся в самотечных канализационных коллекторах под действием естественной тяга.....	59

2.4 Расчет количества газообразной среды, движущейся в самотечных канализационных коллекторах под действием увлекающей способности жидкости и естественной тяги.....	61
2.5 Теоретическое исследование, расчет количества депрессии в КС глубокого заложения.....	66
2.6 Принудительное движение газообразной среды по канализационной сети при помощи побуждающих систем и сооружений.....	75
2.7 Определение типовых мест выделения агрессивных газов из сточной жидкости в подсводное, шахтное пространство канализационной сети, определение типовых мест и причин образования выбросов газа из канализационной сети в атмосферу.....	81
2.8 Расчет требуемой кратности газообмена в подсводном и шахтном пространстве канализационной сети.....	96
2.9 Выводы по главе 2.....	101
ГЛАВА 3 ПРОГРАММЫ И МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ.....	102
3.1 Сравнение экспериментальных данных количества газа, движущегося по КС и теоретических результатов расчета.....	102
3.2 Получение экспериментальных данных о величине и скорости выделения агрессивных газов CO_2 , H_2S , O_2 , CH_4 в подсводном, шахтном пространстве сети.....	102
3.3 Получение экспериментальных данных о величине и направлении движения газа в подсводном пространстве сети под действием поверхностной силы (увлекающей способности) потока сточной жидкости.....	106
3.4 Предотвращение коррозии конструкционных материалов в канализационной сети за счет организации газообмена, подтверждение возможность организации газообмена за счет использования конструкции «трубчатый перепад с глухим перекрытием в нижней части шахты, эжектором и стояком воздушником»	110
3.5 Подтверждение снижения концентрации агрессивных газов за счет вентиляции сети даже при малой кратности газообмена, организованной за счет естественной тяги.....	116
3.6 Выводы по главе 3.....	118

ГЛАВА 4 РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ ГАЗА ПО КАНАЛИЗАЦИОННОЙ СЕТИ.....	119
4.1 Метод расчета количества и направления движения газа по канализационной сети и сооружениям на ней.....	119
4.2 Метод перераспределения потока, изменения направления движения газа по канализационной сети, его количества и обеспеченность.....	125
4.3 Метод перераспределения потока с учетом установок по очистке газов.....	127
4.4 Экономические аспекты при выборе метода организации газообмена.....	128
4.5 Выводы по главе 4.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	131
СПИСОК ТЕРМИНОВ.....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ К.....	170

ВВЕДЕНИЕ

История развития человечества, а также животного и растительного мира на Земле с первого дня существования и до настоящего времени тесно взаимосвязана с водой. Вода – самое распространенное вещество на Земле, его объем составляет около 1500 млн км³. И оно является не просто важным, но и незаменимым веществом, необходимым для существования всего живого на Земле. Как известно, человеческий организм на 68 % состоит из воды. Вода является своеобразным транспортом для обмена веществ в организме человека. Ежедневно человеку необходимо от 3 до 6 литров питьевой воды, при этом качественный состав воды напрямую связан с нормальной жизнедеятельностью не только человека, но и всего мира. В современном, цивилизованном мире, во времена глубокого разделения труда и стремительного развития технического прогресса, существует необходимость в обеспечении каждого человека жильем, теплом, электричеством, газом, водой и другими бытовыми системами и инженерными коммуникациями. На сегодняшний день в населенных пунктах, особенно в крупных городах и мегаполисах, важным является не только снабжение потребителя водой требуемого качества, но и отвод сточных вод от потребителя с последующей очисткой до требуемой предельно допустимой концентрации (ПДК) загрязняющих веществ. Состав сточной жидкости очень разнообразен как по химическому, так и по физическому составу, в ней содержатся различные кислоты, щелочи, летучие газы и другие опасные элементы. В случае нарушения работы системы водоотведения или аварии на сети возможен излив сточной жидкости на дневную поверхность земли с последующим заражением окружающей среды, что может привести к эпидемиям, заражениям и другим экологическим катастрофам. От правильной работы системы водоотведения зависит нормальная жизнедеятельность всего города и всей страны в целом. Поэтому вопросам касающимся эксплуатации, технического состояния и надежности работы сетей водоотведения, нужно уделять особое внимание.

Стоки отводятся от потребителя по домовым стоякам в дворовую канализацию. Далее по внутриквартальной канализации собираются из нескольких микрорайонов города в КС мелкого заложения, которая транспортирует сточную жидкость по самотечным, канализационным коллекторам вдоль улиц до ближайшей шахты. Шахты – сложные гидротехнические сооружения многоцелевого назначения, где размещаются перепады, обеспечивающие транспортирование сточной жидкости из верхнего бассейна канализования в нижний бассейн, в коллекторы глубокого заложения (тоннельные коллекторы). Как правило, такие тоннели являются главными коллекторами,

собирающими сточную жидкость из районов города и транспортирующие её к насосным станциям, поднимающим сточную жидкость к городским очистным сооружениям (ГОС) [113]. Рациональное решение конструкций шахт с техническим оснащением приобретает все большее значение в связи с увеличением глубины заложения коллекторов. Размеры шахт и их количество в большой степени определяются схемой канализования, конструкцией перепадов, условиями их эксплуатации.

Использование канализационных тоннельных коллекторов глубокого заложения обусловлено рядом факторов [113]:

- большая насыщенность подземного пространства коммуникациями жизнеобеспечения города на глубинах 3–4 м;
- интенсивное движение транспорта, наличие памятников архитектуры и других исторических застроек на пути прокладки канализационных тоннелей;
- уменьшение количества канализационных насосных станций;
- отсутствие транспортных проблем во время строительства;
- исключение перекладки существующих сетей.

В ряде случаев технически целесообразно строительство канализационной сети (КС) в виде тоннелей, выполненных методом щитовой проходки, состоящих из чугунных или железобетонных тубингов и железобетонной рубашки.

Появление коллектора глубокого заложения иногда определяется гидрогеологическими условиями прокладки и необходимостью заглубления его на более низкие отметки, но с устойчивыми грунтами. В этом случае возможна работа коллектора в самотечно-напорном режиме, т. е. в дюкерном варианте [97]. Такие тоннели являются коллекторами большого диаметра (более 1,5 м), позволяющими транспортировать расходы сточной жидкости, достигающие 40 м³/с и более, значительно сократить количество насосных станций, упростить процесс водоотведения в целом. Глубина заложения коллекторов достигает 80–85 м, что объясняется необходимостью их прокладки в устойчивых водонепроницаемых грунтах [97].

Актуальность выбранной темы. Опыт эксплуатации тоннельных коллекторов глубокого заложения (ТКГЗ) насчитывает более 70 лет. За это время были определены и отработаны методы расчета сооружений с точки зрения механики движения жидкости [48, 58, 68, 113, 117]. Накоплен достаточно большой объем информации о работе, эксплуатации и конструкционных особенностях сооружений. Нормативный срок эксплуатации ТКГЗ составляет 100 лет [113], но практика показывает, что реальный срок эксплуатации ТКГЗ составляет порядка 20 лет, в некоторых случаях — 4–5 лет [51].

Данный факт обусловлен гидравлическими режимами течения жидкости, биохимическими и другими процессами, происходящими при транспортировке сточной жидкости в ТКГЗ и вызывающими их разрушение. В процессе движения сточной воды по КС в ней происходят анаэробные и аэробные процессы разложения органических веществ и, как результат реакций, в подсводном пространстве коллектора появляются агрессивные газы (АГ), которые в виде водорастворимых веществ проникают внутрь конструкций и способствуют вымыванию $\text{Ca}(\text{OH})_2$, вызывая разрушения рубашки коллектора и шахты и коррозию арматуры. Механизм разрушения бетонной поверхности от воздействия газов в настоящее время достаточно изучен и описывается различными авторами начиная с 1934 г. [4, 27, 38, 44, 46, 55, 82, 84, 90, 119, 132].

Наиболее интенсивно разрушения происходят при определенных гидравлических режимах протекания жидкости. Процессы разрушения особенно интенсифицируются в местах устройства канализационных перепадов и камерах гашения напора (КГН), что связано с изменением характера движения сточной жидкости (скорости, направления, траектории движения), что, в свою очередь, приводит к нарушениям на данных гидросооружениях фазового равновесия между газами, растворенными в сточной жидкости и газообразной среде и, как следствие, к насыщению воздуха в подсводном пространстве канализационного коллектора агрессивными газами. Воздух, выделяющийся из ТКГЗ, насыщен агрессивными газами (H_2S , CO_2 , CO , CH_4 , NH_3 , окислами азота NO и NO_2) с превышением ПДК в несколько раз [2, 3, 13, 88]. В работе Michael D. представлены данные, которые указывают, что подземные самотечные канализационные коллекторы являются важным источником N_2O . Микробные процессы (нитрификации и/или денитрификации) причастны к образованию N_2O в самотечных канализационных коллекторах при содействии гидравлического турбулентного (в периоды высокого потока) движения сточной жидкости. Предположительный коэффициент выбросов для самотечных канализационных коллекторов, получающих смесь бытовых и промышленных сточных вод, примерно равен 1,7 г N_2O на 1 чел./год [138].

В последующем газы конденсируются на поверхности канализационных сооружений, увеличивая агрессивность среды и скорость их разрушения. Наличие колебаний уровня жидкости приводит к вымыванию пораженных слоев бетона, что также приводит к увеличению скорости разрушения сооружений на КС и снижению их несущей способности [24].

Микроклимат канализационных подземных сооружений очень специфичен (постоянная температура в течение всего года, высокая влажность [22, 149], наличие

химических процессов разложения органических веществ) и способствует интенсивному протеканию различных биологических процессов, развитию большой численности и разновидности колоний грибов и бактерий [44].

Сточная жидкость имеет большую концентрацию органических и других соединений, что способствует активному протеканию различных химических и биохимических процессов, связанных с образованием, главным образом, серной кислоты. Серная кислота, в свою очередь, оказывает одно из основных негативных воздействий, приводящих к разрушениям сооружений КС.

Разрушению сооружений КС также способствуют следующие факторы [28, 46, 88]:

- залповые сбросы сточной жидкости с температурой более 24 градусов;
- наличие перед выпуском в коллектор протяженных, напорных трубопроводов (с анаэробными условиями движения сточной жидкости);
- наличие перепадов различных типов;
- сбросы сточных вод, не соответствующих требованиям ПДК [98] (сточные воды, способные выделять вредные газы и способствующие их образованию, а также нерастворимые вещества, способные выпадать в осадок, волокнистые и объемные примеси, содержащие жиры, масла, смолы, нефтепродукты, ядовитые вещества);
- выпадение конденсата, насыщенного агрессивными газами, на конструкции и стенки сооружений КС;
- осаждение ила в лотковой части канализационного коллектора.

Анализ эксплуатации коллекторов за последние годы показал, что процессы, происходящие при транспортировании больших расходов сточной жидкости в коллекторах больших диаметров и на большие расстояния, вызывают их разрушения в подсводном пространстве коллектора, особенно в районе колебания уровня сточной жидкости (на границе раздела фаз). Разрушения происходят в результате конкретных гидравлических условий протекания жидкости и в зависимости от качества сточной жидкости и процессов, происходящих в ней. Процессы разрушения интенсифицируются при наличии канализационных перепадов, которые негативно влияют на качество сточной жидкости и процессы, происходящие как в коллекторе, так и в самом перепаде [19, 30, 47], что требует разработки конструкций перепадов, в минимальной степени ухудшающих газовую обстановку в подсводном пространстве коллектора.

На определенных участках КС глубокого заложения из-за колебания уровня сточной жидкости происходят выбросы газообразной среды, насыщенной агрессивными газами, что представляет большую опасность в районе места выброса и ухудшает экологическую обстановку в целом.

Изучение процессов, проходящих в канализационной сети глубокого заложения (КСГЗ), прекращение негативного воздействия процессов газообразования представляет значительный научный и практический интерес.

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

Вопросам организации газообмена в канализационной сети (КС) посвящены работы различных российских и зарубежных авторов. В результате организации газообмена снизилась концентрация агрессивных, токсичных газов, снизилась скорость коррозии бетонных и др. конструкций КС, прекратились 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, большим количеством параметров, влияющих на количественные и качественные параметры системы газообмена, отсутствием программных комплексов, внедрением новых материалов, отличных по своим физическим, биохимическим свойствам от ранее используемых, отсутствием понимания о требуемой и достаточной кратности газообмена, а также отсутствием описанных математических зависимостей, наиболее полно отражающих природу протекания процессов движения газа по КС.

Определение зависимостей, наиболее полно описывающих природу протекания процессов движения газа по сети, составление алгоритма расчета КС, определение требуемой и достаточной кратности газообмена, описание алгоритма экономического обоснования и расчета применения систем газообмена в КС, описание других мероприятий и их расчет, направленных на организацию движения газа, увеличения количества газа, движущегося по сети, снижения вероятности образования застойных зон и др. негативных процессов позволит: экономически обосновать применения системы газообмена в КС, организовать газообмен в КС, снизить (практически прекратить) процессы коррозии конструктивных материалов системы водоотведения, ликвидировать произвольные выбросы в атмосферу, снизить концентрацию агрессивных токсичных газов в КС, увеличить срок эксплуатации ТКГЗ и КС в целом.

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 способности сточной жидкости и эжекции трубчатых перепадов.

В работах, посвященных газообмену других подземных пространств, описываются методы 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 предложенных 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 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.

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 натурных 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), 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 методы 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.

Научная работа выполнена на кафедре Водопользования и экологии Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ). Автор выражает искреннюю признательность и благодарность д.т.н., профессору Васильеву Виктору Михайловичу за научное руководство, постоянное внимание к выполняемой работе, организацию полевых исследований и решение многих иных вопросов. Автор выражает благодарность: за помощь с математической обработкой результатов моделирования к.т.н. Семенову Алексею Александровичу.

Отдельно автор благодарит за всестороннюю помощь и поддержку на протяжении всех лет написания работы к.т.н. Федорова Святослава Викторовича, к.т.н. Столбихина Юрия Вячеславовича.

Работа выполнялась на кафедре «Водопользования и экологии» СПбГАСУ в 2009–2017 гг.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ РАБОТЫ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ И СООРУЖЕНИЙ НА НИХ. ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ

1.1 Анализ состояния канализационных коллекторов глубокого заложения и сооружений на них. Особенности и проблемы эксплуатации

Под канализационным коллектором глубокого заложения следует понимать трубопровод диаметром 1,2 м и более, выполненный с помощью проходческого щита горным способом, из отдельных элементов открытым способом, собирающий сточные воды одного или нескольких районов города и транспортирующий их к следующему бассейну канализования, к канализационной насосной станции или очистным сооружениям города [113]. Глубина заложения таких коллекторов в Санкт-Петербурге достигает 85 м ниже отметки дневной поверхности земли [97].

В канализационных тоннелях устраивают шахты с расстояниями между ними в среднем 150–500 м, служащие для размещения гидравлических сооружений (перепадов), узлов подключения сточных вод от вышележащей сети, а также для спуска людей и грузов, необходимых в процессе эксплуатации и проведения ремонтных работ. Диаметр шахты, как правило, составляет 6–9 м [113].

В канализационные тоннели поступают сточные воды, содержащие загрязняющие вещества в концентрациях, не превышающих установленных нормативов ПДК загрязняющих веществ по перечню [98]. Не подлежат приему без предварительной очистки сточные воды, способные выделять вредные газы и способствующие их образованию, а также нерастворимые вещества, способные выпадать в осадок, волокнистые и объемные примеси, которые закупоривают проходное отверстие тоннелей и подключений к ним. Запрещается сброс без предварительной очистки сточных вод, содержащих жиры, масла, смолы, нефтепродукты, ядовитые вещества в концентрациях, препятствующих биологической очистке и сбросу в водоемы [103].

Однако регулярно фиксируются факты сброса сточной жидкости, превышающей установленные нормативы ПДК загрязняющих веществ, что также является побуждающим фактором для неблагоприятных химических и биохимических процессов разрушения (коррозии) КС (приложение А). А резкое снижение pH сточных вод, вызванное сбросом кислых промышленных сточных вод в городскую канализацию, вызывает интенсивное выделение сероводорода, что отрицательно влияет на условия эксплуатации КС, вызывая отравление рабочих и локальные разрушения участков коллекторов [9,16, 32, 83, 91, 94, 95, 10, 102, 118].

Как уже отмечалось ранее, ТКГЗ собирают стоки из нескольких районов города или всего города в целом. Сточные воды поступают в коллектор непрерывно в течение всего срока эксплуатации [113], поэтому обследование, ремонт, реконструкция и другие виды работ производятся на функционирующем коллекторе (без вывода его из работы), что создает значительные сложности [15, 86]. Также работы в коллекторе усложняются в связи с высокой агрессивностью газообразной среды в подсводном и шахтном пространстве сети, значительной глубиной заложения и стесненностью условий.

Проведенные наблюдения показали, что фактический срок эксплуатации коллекторов варьируется от 30 до 10 лет при концентрации сероводорода 120 ppm и более [88]. Согласно зарубежным данным, коррозионные потери бетонных поверхностей канализационного коллектора в г. Мельбурн, Австралия за 20 лет в среднем составили 30 мм при относительно небольшой концентрации сероводорода (до 40 ppm) [149]. В Австрии в г. Перт зафиксирована скорость коррозии 11,4 мм/год [149]. Теоретически скорость коррозии, при концентрации раствора H_2SO_4 1:1, может достигать 40 мм/год [46] (рисунок 1.1).

Приведенные данные подтверждают результаты наблюдений эксплуатирующих организаций Санкт-Петербурга.

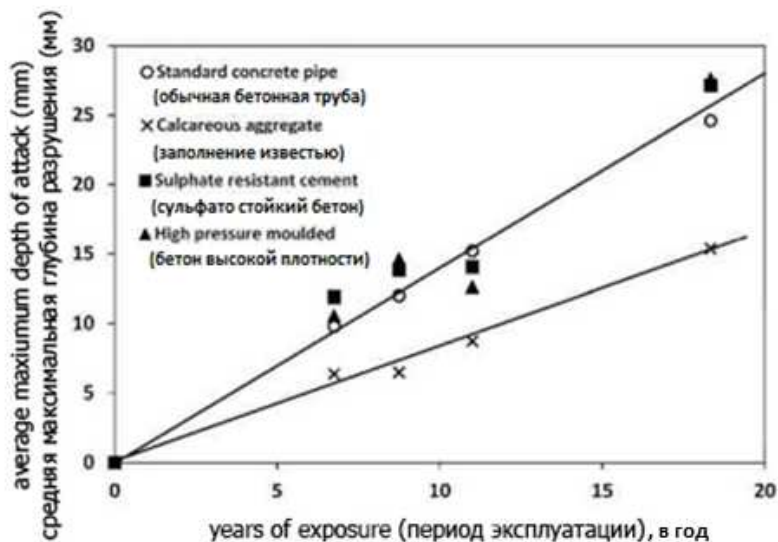


Рисунок 1.1 – Коррозионные потери бетонных поверхностей канализационных коллекторов в г. Мельбурн, Австралия в период с 1975 по 1993 гг. Концентрация H_2S от 5 до 40 ppm

Диктующим критерием при определении срока эксплуатации является несущая способность сооружения (выполнение своего функционального назначения), которая зависит от скорости разрушения несущих конструкций сооружения, выполненных из железобетона. Также разрушению подвержены другие конструктивные элементы сооружения и технологическое оборудование (оснащение), выполненное из железобетона и металла. Причем сроки эксплуатации отдельных сооружений, расположенных на одном ТКГЗ, могут значительно различаться, что связано с местными условиями эксплуатации.

Наиболее сильные разрушения на ТКГЗ наблюдаются в местах размещения перепадов и местах, имеющих особые гидравлические и аэродинамические режимы (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Визуальный контроль. Коррозионные потери бетонных поверхностей канализационных коллекторов на шахте № 10 в Санкт-Петербурге, ул. Верности (май 2011 г.)

На сегодняшний день реальный срок службы КС невозможно определить на стадии проектирования или строительства. Срок службы ТКГЗ определяется на стадии эксплуатации путем наблюдения и замеров скорости разрушения сооружений.

Особое значение в поддержании системы канализационных тоннелей в рабочем состоянии имеют своевременное диагностирование разрушений сооружений и коллектора, заиливания лотковой части коллектора, профилактика заторов на сети, т. е. проведение осмотров, и при наличии процессов разрушений выявление их причин, заблаговременное планирование восстановления несущих элементов сооружения [87, 96]. В настоящее время службами эксплуатации сети не используются приборы, которые в текущем режиме времени определяют параметры процессов, протекающих в КСГЗ, приводящие к разрушениям тоннелей. Существующая оценка состояния КС не совершенна. Отсутствие постоянного контроля в ТКГЗ связано с крайне агрессивной средой пространства, заполненного газообразным веществом (в подсводном и шахтном пространстве сети), не позволяющего разместить оборудование на длительный период времени, а также отсутствием стационарного электропитания, что также связано с особыми условиями эксплуатации. На сегодняшний день службами эксплуатации канализационных тоннелей производится регулярный визуальный осмотр шахт и сети (рисунок 1.2–1.3) с фиксацией результатов обследования в отчетах (Приложение Б).

При проведении плановых осмотров ТКГЗ обнаружить разрушения в лотковой части тоннеля достаточно трудно без осушения последнего [86]. Это в конечном итоге приводит к бесконтрольному разрушению железобетонной конструкции. В процессе эксплуатации тоннелей отмечены истирание лотка и коррозия свода тоннеля (рисунок 1.3). Именно последнее, по наблюдениям службы эксплуатации, все чаще становится причиной аварии [16, 85].

Движение сточной жидкости сопровождается биологическими процессами, в результате которых выделяются вредные газы, разрушающие тело бетона в подсводной части коллектора. Одним из самых АГ считается сероводород (H_2S). В результате взаимодействия сероводорода и других веществ с бетоном происходит образование растворимых соединений (гипса) [27, 128]. Это впоследствии приводит к оголению арматурной сетки коллектора, снижению несущей способности бетона и последующей аварии на сети (рисунок 1.3) [9, 10, 32, 42, 83, 85, 91, 94, 102, 118].



Рисунок 1.3 – Фото слева. Оголение арматурной сетки вследствие бетонной коррозии сооружений КС. Фото справа. Классическая ситуация в шахте на КС

Разрушение ТКГЗ и сооружений на них впоследствии приводит к катастрофе, вызванной подвижкой грунтовых массивов в области аварии с последующими разрушениями на уровне дневной поверхности земли и гибелью людей (рисунок 1.4) [95].

Аварии на КС в виде обрушения подсводной части коллектора, срыв крышек, выбросы токсичных, АГ на дневную поверхность земли и другое связаны с образованием АГ (сероводорода, углекислого газа, метана, аммиака, меркаптана, азота и др.) в подсводном и шахтном пространстве сети, выделяющихся из сточной жидкости в процессе 2-фазного несмешиваемого расслоенного течения сточной жидкости и газообразной среды. Большая концентрация сероводорода и других газов в подсводном и шахтном пространстве сети создает значительные трудности для эксплуатирующего персонала, такие как локальное проветривание участка сети на время проведения работ,

использование средств индивидуальной защиты в виде герметичных костюмов с подачей кислорода. Нарушение правил техники безопасности может привести к отравлению персонала и причинению вреда здоровью вплоть до летального исхода [2, 39, 92].



Рисунок 1.4 – Провал дневной поверхности земли из-за разрушения подсводной части канализационного коллектора

Вопросам надежности КС посвящены работы многих авторов [51, 53, 89, 118 и др.]. Согласно статистическим данным, наиболее вероятными местами разрушения КС являются [46]: места изменения режима движения жидкости (из анаэробного в аэробный), то есть в КГН; места изменения гидравлических условий течения жидкости; места притока сточной жидкости с более высокой температурой или более низким значением pH).

Еще одним негативным фактором эксплуатации ТКГЗ являются выбросы газов, насыщенные АГ, на дневную поверхность земли. Выбросы как правило, происходят (выходят на поверхность) в определенных местах (шахтах). Особенность данных негативных процессов состоит в том, что с ними сталкиваются не только службы эксплуатации КС, но и простое население города [14, 49, 67, 100]. Выход агрессивного газа на дневную поверхность оказывает негативное воздействие на экологическую обстановку примыкающей территории и всего города (рисунок 1.5) [14, 67]. Газ является токсичным и представляет реальную опасность для обслуживающего персонала и всего населения [24, 47, 126].



Рисунок. 1.5 – Выброс газообразного вещества, насыщенного агрессивными газами, на дневную поверхность земли в Санкт-Петербурге

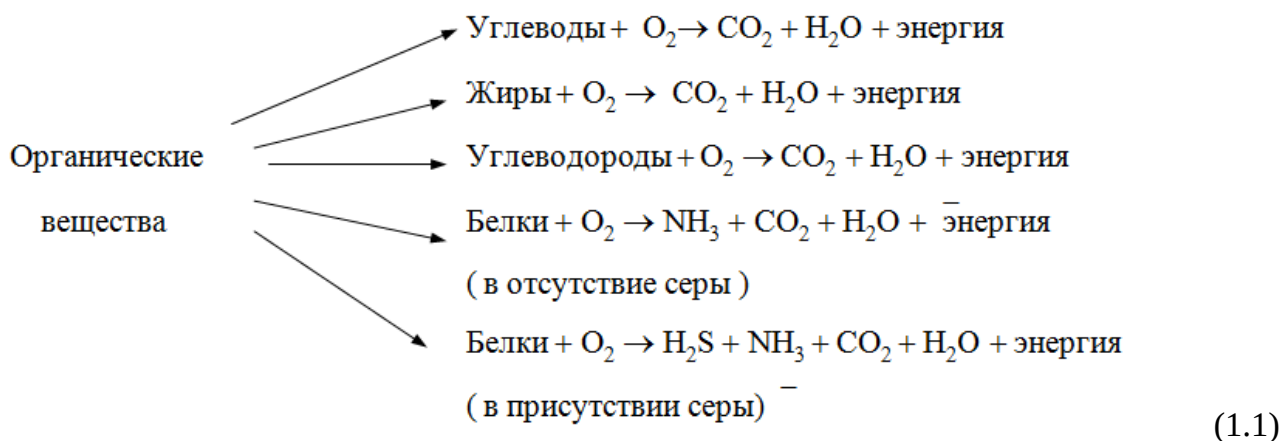
1.2 Механизм образования агрессивных газов в подсводном пространстве канализационных коллекторов глубокого заложения. Коррозия сооружений. Влияние состава сточных вод на процессы газообразования

Сточные воды от абонентов собираются коллекторами КС и транспортируются до очистных сооружений города, как правило, по самотечным коллекторам с уклоном под действием гравитационных сил. Коллекторы разных бассейнов канализования транспортируют стоки в общий (главный) коллектор. Коллекторы разных бассейнов канализования находятся на разных геодезических высотах, и транспортировка сточных вод из верхних бассейнов канализования в нижний производится посредством специальных сооружений — перепадов [113]. В условиях невозможности транспортировки стоков самотеком ввиду различных геодезических, гидравлических, физических, экономических и других причин транспортировка сточной жидкости производится насосами под напором по специальным напорным трубопроводам.

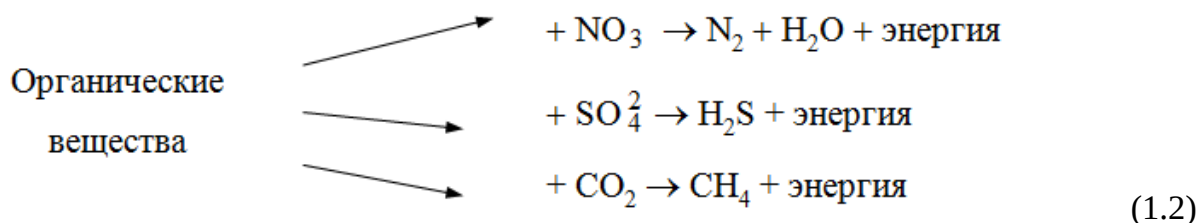
Пространства коллекторов и сооружений на них являются закрытыми (имеющиеся «продухи» через люки колодцев малозаглубленной канализации незначительны) от внешней (дневной) среды, что способствует созданию собственного климата, отличного от внешнего (дневного). Постоянная температура в КС в течение всего года около 26 °С [22] за счет большой глубины заложения (более 7 м), температуры сточной жидкости и различных процессов, выделяющих тепло, высокой влажности (порядка 98 %) [149] за счет стесненного закрытого пространства являются определяющим критерием климата подсводного и шахтного пространства КС. Особый климат, а также наличие сточной жидкости, имеющей в составе самые различные химические, органические и физические элементы и соединения, способствуют протеканию различных процессов в сточной жидкости и в подсводном и шахтном пространстве сети.

Во время движения в сточной жидкости протекают процессы распада органических соединений, в результате чего происходит гидролиз углеводов и их превращение в растворимые сахара, распад белков на аминокислоты и жиров на жирные кислоты с короткой углеродной цепью [40, 44, 66]. Процесс может происходить как в аэробных, так и анаэробных условиях. Аэробный биораспад приводит к образованию углекислого газа, воды, аммиака. Процессы разложения органических соединений в присутствии свободного кислорода идут по следующим реакциям (1.1) [24].

Как видно из уравнений, продукты химической реакции, образовавшиеся в процессе разложения органических соединений, в присутствии свободного кислорода не являются агрессивными и не несут опасности для сооружений КС



Ввиду замкнутости пространства и протекания в сточной жидкости большого количества химических процессов окисления органических веществ, количество растворенного кислорода весьма ограничено и с течением времени резко сокращается. Когда концентрация свободного кислорода достигает 0,1 мг/л и менее, процессы разложения (распад) органических соединений в сточной жидкости начинают протекать иначе, с использованием других соединений, содержащих кислород (нитраты, сульфаты, уголекислоты) [84], что, в свою очередь, приводит к образованию органических кислот, спиртов и других соединений, находящихся в растворенном состоянии. Также образуются газообразные соединения: уголекислый газ, метан, сероводород (1.2) [24]

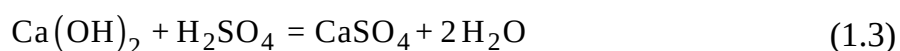


Все процессы разложения органических веществ происходят в присутствии и под воздействием различных сульфатредуцирующих бактерий, которые способны участвовать в процессах как окисления, так и восстановления, как в аэробных, так и в анаэробных процессах [44]. В процессе протекания химических реакций в сточной жидкости с образованием новых химических соединений происходит нарушение фазового равновесия химического состава веществ, содержащихся в сточной жидкости и подводном газовойздушном пространстве сети. В процессе восстановления фазового равновесия элементов между сточной жидкостью и газообразной средой в сети происходят процессы выделения веществ из сточной жидкости в подводное газовойздушное пространство сети. Исследования, проведенные советскими, российскими и зарубежными учеными, показали, что газовая среда канализационных коллекторов состоит из кислорода, сероводорода, уголекислого газа, метана, аммиака и азота [20, 121, 130].

Также в результате поступления в канализационную сеть промышленных сточных вод, кроме перечисленных газов, могут встречаться пары бензина, пары эфира, толуола, индол, скатол, метилмеркаптаны, имеющие отвратительный запах, и окислы азота [55, 71, 146]. Наиболее часто встречающийся газ в подсводном пространстве коллектора – сероводород, который является продуктом круговорота серы и сернистых соединений при активном участии серобактерий [46].

Различные наблюдения показали, что процессы образования сероводорода лучше проходят в трубах, полностью заполненных сточной жидкостью, т. е. в анаэробном режиме [44]. Г. Я. Дрозд пишет, что образование сероводорода может происходить только в анаэробных условиях, то есть в напорных трубопроводах или в заиленных лотках самотечных коллекторов КС. Другими словами, напорные трубопроводы, расположенные выше по сети, интенсифицируют процессы газообразования в самотечной сети, расположенной ниже по течению сточной жидкости. В заиленных лотках КС и на банкетах сооружений преобладают факультативно и облигативно анаэробные процессы, где белки и аминокислоты подвергаются гниению, сопровождающемуся выделением токсичных, зловонных запахов и газов (сероводорода, аммиака, меркаптана и др.) [43].

Сероводород, испарившийся с поверхности сточной жидкости, конденсируется на поверхности сооружений КС, где под действием тионовых бактерий происходит преобразование сероводорода в серную кислоту (H_2SO_4). Кислота, полученная таким образом, реагирует с щелочными минералами бетонной матрицы, что приводит к преобразованию бетона в гипс (1.3) [24, 128]



Эксперимент, проведенный В. М. Васильевым, показал, что при диффузии кислорода (воздуха) в сточные воды процесс образования сероводорода в них замедляется, а при концентрациях растворенного кислорода более 1 мг/л выделение сероводорода прекращается полностью [24]. При наличии растворенного кислорода в сточных водах он проникает внутрь биопленки и потребляется аэробными бактериями, находящимися в аэробном слое биологической пленки. Под аэробным слоем находится анаэробный слой, где происходит образование сероводорода. В самом низу непосредственно на стенке трубы находится инертный анаэробный слой, бактерии которого не получают достаточно пищи для своего развития. При отсутствии достаточного количества кислорода, растворенного в сточных водах ($\text{O}_2 < 0,1$ мг/л), процесс образования сероводорода интенсифицируется и начинается его выделение в атмосферу коллектора.

Другим источником образования сероводорода в коллекторе является сброс сточных вод промышленных предприятий, содержащих сульфиды [122]. В работе [142, 143] показано, что процессы преобразования сульфатов в сульфиды протекают наиболее активно при температуре 38 °С, а при температуре ниже 15 °С интенсивность образования сульфидов падает. Также влияет рН сточных вод. Наиболее активно этот процесс происходит при $\text{pH} = 5,5\text{--}8,5$. Резкое снижение рН сточных вод, вызванное сбросом кислых промышленных сточных вод в городскую канализацию, также вызывает интенсивное выделение сероводорода [125, 131, 139, 144].

В работах [6, 13, 20, 30] показано, что наличие перепадов определенных конструкций (особенно многоступенчатого типа), быстотоков, каскадов и других конструктивных элементов, изменяющих гидравлический режим течения жидкости (скорость, направление, турбулентность потока, режим течения), из-за смещения фазового равновесия вода–газ интенсифицирует процессы выделения сероводорода и других газов.

Как уже отмечалось ранее, коллектор и сооружения на нем подвержены разрушению — коррозии. Коррозии подвержены практически все материалы, но степень их разрушения различна.

Разрушение бетона

Как уже показано, под действием сероводорода и других сопутствующих процессов происходит коррозия бетона с преобразованием его в гипс. При коррозии бетона стен и канализационных труб имеет место сочетание химических и микробиологических процессов. Разрушение бетона осуществляется в несколько этапов разными группами бактерий, которые сменяют друг друга. Последовательность этапов разрушения бетона описана в различных работах [27, 44, 82, 108] (рисунок 1.6).

При затвердевании бетон покрывается защитной пленкой из углекислого кальция, которая предотвращает попадание внутрь влаги, органических веществ и микроорганизмов. На начальной стадии микроорганизмы не способны существовать на поверхности бетона из-за его высокой щелочности — $\text{pH} = 11\text{--}13$. Впоследствии газы конденсируются на своде коллектора, подсводная (бетонная) часть коллектора контактирует с газами и подвергается действию углекислого газа и сероводорода, выделяющегося из проходящей сточной жидкости. Результатом этого является снижение рН на стенке бетона и разрушение щелочного защитного слоя. Одновременно за счет окисления сероводорода кислородом воздуха происходит образование тиосульфата и полиотионата, которые снижают рН до 7,5. Уже начиная с $\text{pH} 9\text{--}10$ на поверхности бетона способны закрепиться и начать размножение группа аэробных нейтральных тионовых бактерий (например, *Thiobacillus thioparus*) и грибы-микробиоты, считающиеся ацидофильными и осмоотолерантными

организмами. Их жизнедеятельность не прекращается при низких значениях pH и высокой концентрации солей. Они образуют многочисленные споры, обладающие высокой устойчивостью в разнообразных неблагоприятных условиях. Грибы-микровицеты своими нитевидными клетками (гифами) оказывают сильное механическое воздействие на бетон, проникая в его поры, микротрещины и углубления на поверхности и разрыхляя поверхностный слой. Полярная клетка растущей гифы «апекс» под высоким давлением вдавливаются в субстрат. В таких микроразонах создаются условия для проникновения кислот внутрь бетона и для прикрепления и повышения численности бактерий, нет резких колебаний температуры, имеется повышенная влажность и достаточное количество питательных веществ. Концентрация микробной биомассы в таких зонах приводит к физическому воздействию на материал, вызывая отслаивание и осыпание. Разрушительный эффект грибов усиливается при увлажнении и высыхании, замерзании–оттаивании [50, 44].

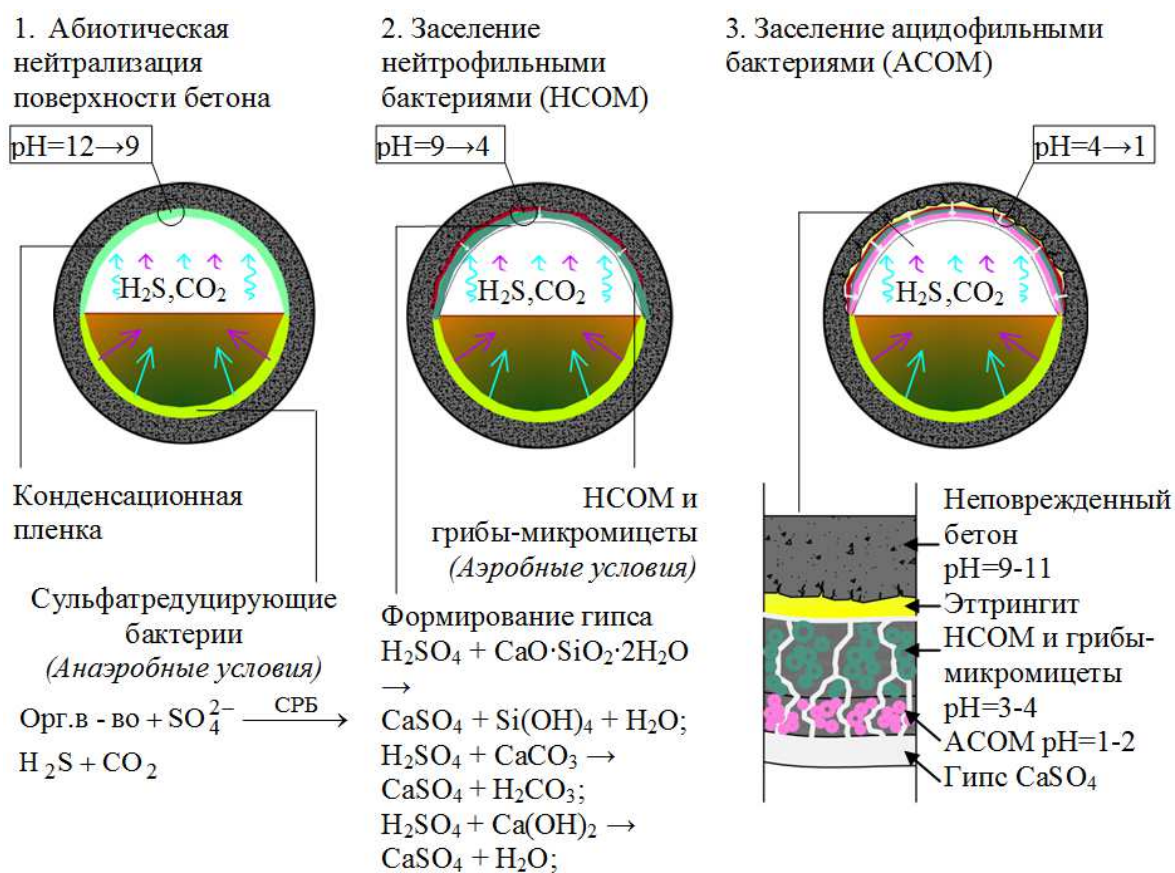


Рисунок 1.6 – Схема процесса микробиологической коррозии

Грибы и бактерии являются продуцентами значительного количества органических кислот (щавелевой, лимонной, уксусной, фумаровой, глюконовой, янтарной, молочной и др.), которые более эффективны, чем неорганические кислоты, в связывании таких катионов, как Ca, Al, Si, Fe, Mn, Mg, что приводит к большей коррозии материалов [82]. Результатом их совместной деятельности является накопление в бетоне серы и снижение pH бетона до 5,0 [108].

Исследования Т. Wells подтверждают, что разрушение бетона начинается в тот момент, когда pH поверхности бетона достигает значений 6 и ниже [149]. После снижения pH до 4 происходит подселение ацидофильных сероокисляющих бактерий. Процесс коррозии протекает еще более интенсивно, pH на поверхности бетона снижается до значения 1. В результате химических реакций происходит образование минерала этtringита, увеличение его объема, раскрытие трещин, активное разрушение бетона (рисунок 1.6, 1.7).

Разрушение металлов в канализационной системе

В процессе разрушения (коррозии) бетона происходит оголение арматурной сети. За счет железа в железобетонных конструкциях может активизироваться еще одна группа тионовых бактерий, мощных кислотообразователей — *Thiobacillus ferrooxidans*, окисляющая двухвалентное закисное железо до окисного и поедающая элементарную серу и тионаты с образованием серной кислоты и снижением pH до 2. В результате бетон желтеет, иногда приобретает оранжеватый цвет из-за образующегося сульфата железа [44].



Рисунок 1.7 – Измерение pH на бетонной поверхности и лестничном марше, выполненном из композитного материала, в шахте № 10 на ул. Верности (май 2011 г.) КС. В обоих случаях pH=1

При разрушении металлов имеют место несколько коррозионных процессов. Так, в случае соприкосновения металлической трубы с водой, содержащей кислород, поселяются железобактерии, которые образуют слизистые скопления с высокой механической прочностью. Бактерии откладывают на своей поверхности гидрат окиси железа и удерживают его на себе в потоке воды. Бактерии способны закрепиться в местах неровностей, в первую очередь, в местах сварочных швов или каверн. Зоны без каверн омываются свободно с хорошей вентиляцией, под каверной аэрация слабее. Развивающиеся слизиобразующие бактерии затрудняют аэрацию и создаются так называемые дифференцируемо-аэрируемые ячейки: более вентилируемый участок будет иметь более высокий потенциал и функционировать как катод, менее аэрируемый участок

под каверной — как анод. В анодной части железо будет разрушаться в результате электрохимической коррозии, отдавая электроны и превращаясь в закисное двухвалентное железо. Двух- и трехвалентное железо будет окисляться и давать гидроокиси, осаждающиеся в трубе. Слизиобразующие группы бактерий в анодной части способны создавать благоприятные условия для активизации анаэробных сульфат-редуцирующих бактерий.

В группу железобактерий включают одноклеточные (*Metallogenium*, *Gallionella*) и нитчатые, окружённые чехлом, прикрепляющиеся бактерии родов *Leptothrix*, *Sphaerotilus*. К железоразрушающим бактериям можно отнести и уже описанную выше *Thiobacillus ferrooxidans*. В результате электрохимической реакции на поверхности металла образуется закисное железо. *Th.ferrooxidans* окисляет его в кислой среде (серная кислота) для получения энергии, при этом происходит легкое подщелачивание среды, что вызывает гидролиз серноокислого окисного железа с образованием гидрата окиси железа и освобождением серной кислоты. Окисное железо является сильным окислителем, т. е. агрессивно по отношению к металлическим сооружениям. Окисное железо, принимая электроны с поверхности стали или железа, восстанавливается до закисного, которое, в свою очередь, снова окисляется до окисного *Th.ferrooxidans*. В благоприятных условиях процесс образования окисного железа может идти постоянно и наблюдается активное разрушение металла.

Таким образом, при разрушении металлов наиболее важным является содержание сероводорода и возможность закрепления бактерий на металле.

Разрушение композитных материалов в канализационной системе

В связи с быстрым разрушением металлических конструкций технологическое оснащение шахт целесообразно выполнять из композитных материалов (пултрузионного стеклопластика). При использовании конструкций из композитных материалов основное влияние на процессы их разрушения оказывает правильный выбор смолы, противодействующей проникновению внутрь конструкции кислоты и способной не разрушаться при взаимодействии с ней до определённой температуры. Волокна, формирующие конструкцию, могут иметь различные свойства по отношению к окружающей среде, где она установлена. При тонком защитном слое возможно его разрушение, проникновение кислоты к волокнам и при больших её концентрациях разрушение конструкции. Поэтому очень важно на стадии принятия решений знать условия работы композита [107]. Существующий опыт использования данных материалов КС Санкт-Петербурга показал их устойчивость к агрессивной среде (высокую коррозионную стойкость), хорошую работоспособность на длительный промежуток времени в условиях сильноокислой среды [89].

1.3 Движение газообразного вещества в канализационной сети. Особенности и негативные последствия. Выбросы агрессивных газов на дневную поверхность земли и их очистка

Задачей КС является транспортировка сточной жидкости от абонента к очистным сооружениям и далее на повторное использование или выпуск в водоем или дневную поверхность. Сточная жидкость собирается коллекторами от абонентов и транспортируется по сети, посредством перепадов подается в нижний бассейн канализования и далее. Подача сточной жидкости на очистку производится посредством насосов по напорным линиям в КГН очистных сооружений. В процессе движения сточной жидкости по сети происходит изменение скорости и направления движения жидкости, а также увеличение количества стоков за счет притоков. Как правило, сточная жидкость заполняет коллектор частично, неравномерно в течение времени в зависимости от количества поступающих стоков. Когда количество поступающих стоков превышает пропускную способность коллектора, он работает полным сечением (в анаэробном режиме), а излишние стоки аккумулируются в шахтном пространстве. Другими словами, заполнение коллектора (сети) варьируется в течение времени, а при определенных условиях возможно полное заполнение КС с изливом сточной жидкости на дневную поверхность земли.

При проектировании и строительстве канализационных коллекторов и сооружений на них руководствовались основной задачей КС – транспортировка (движения) жидкости без учета сопутствующих процессов. В процессе эксплуатации канализационных коллекторов проявилось совместное движение жидкости и газа по КС. С аналогичными проблемами на стадии эксплуатации КС в свое время столкнулись иностранные коллеги [135].

Две несмешивающиеся жидкости (сточная жидкость и газообразная среда) текут по канализационному коллектору в направлении оси X (рисунок 1.8). Сточная жидкость течет под влиянием гравитационных сил, а газообразная среда — под влиянием градиента давления и увлекающей способности жидкости (см. главу 2).

Газ, расположенный в подсводном и шахтном пространстве сети, насыщается агрессивными веществами, выделяющимися из сточной жидкости. За счет различных побуждающих сил газ, аналогично сточной жидкости, транспортируется по сети. В местах выхода сооружений КС на дневную поверхность газ, насыщенный агрессивными веществами, вырывается на поверхность и создает неблагоприятную экологическую обстановку для населения [14, 67, 100].

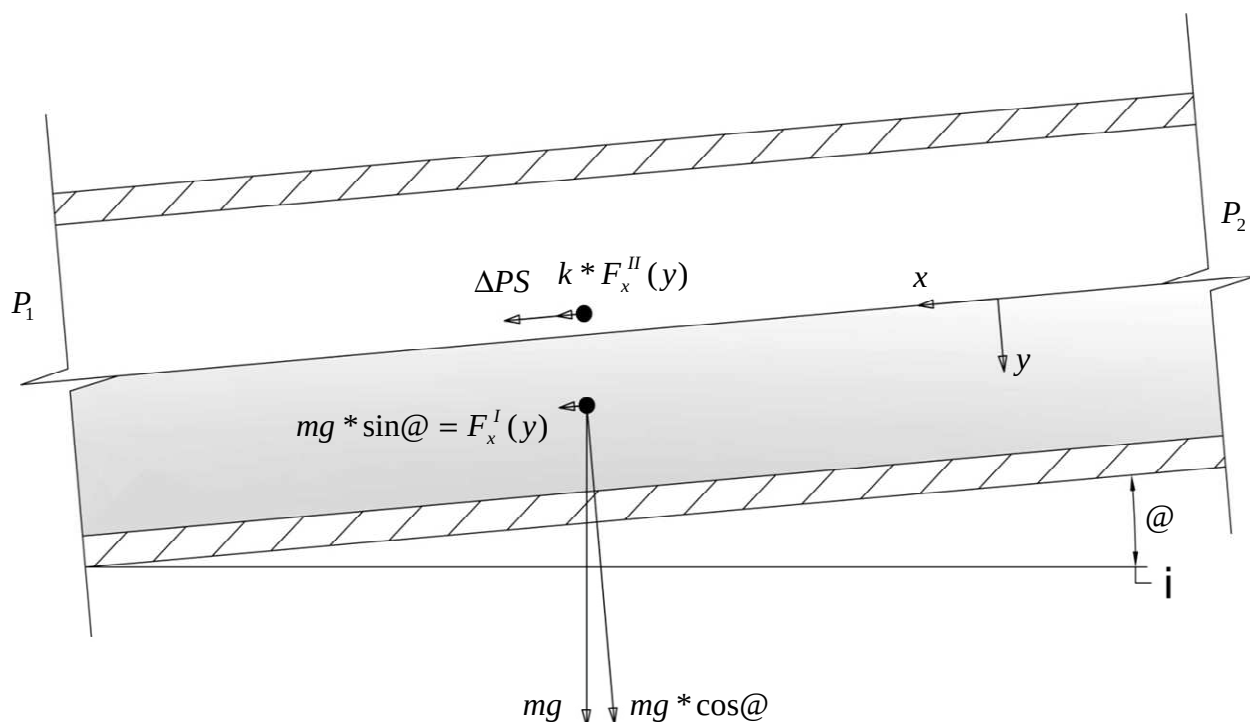


Рисунок 1.8 – Силы, действующие на поток сточной жидкости и поток газообразной среды

Как отмечалось ранее, выбросы агрессивного газа происходят в различных местах выхода КС на поверхность см. (рисунок 1.9). Выбросы происходят в определенных местах КС, что связано с конструктивными особенностями КС и гидравлическими режимами её эксплуатации. Выбросы различны по периодичности и мощности. Газы мигрируют через крышки люков, ливнеспуски, всевозможные продухи, бетонные крышки шахт [145]. Особенно мощные выбросы АГ фиксируются при заполнении КС сточной жидкостью (рисунок 1.9).

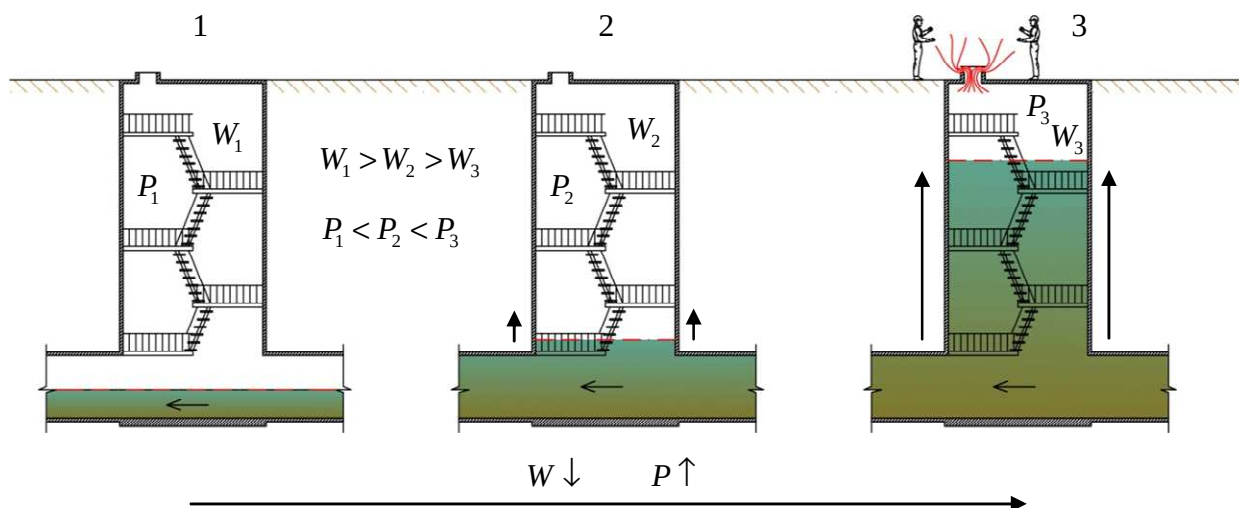


Рисунок 1.9 – Заполнение шахтного пространства сточной жидкостью: 1 – шахта не заполнена сточной жидкостью; 2 и 3 – шахта в процессе заполнения сточной жидкостью

Мощность выбросов такова, что поток вырывающихся газов срывает многотонные бетонные крышки шахт и вырывается наружу (рисунок 1.10) [14].



Рисунок 1.10 – Неорганизованный выброс газов под большим давлением (г. Санкт-Петербург)

Это связано с вытеснением газа из сети, а также с процессами естественной тяги. Естественная тяга подразумевает естественный газообмен — приток более холодного воздуха с дневной поверхности в портал, расположенный в начале аэродинамического участка, и выброс более теплого (нагретого в подсводном пространстве сети) воздуха, насыщенного агрессивными газами, в конце аэродинамического участка (через портал). По мере транспортировки сточной жидкости по коллектору происходит увеличение заполнения коллектора за счет притока сточной жидкости, что, естественно, приводит к уменьшению подсводного объема и естественного вытеснения агрессивного газа из ближайшей шахты сети. Сама функция сбора сточных вод подразумевает большое количество подключений по сети по всей длине коллектора, поэтому выбросы агрессивного газа в большей или меньшей степени происходят на всем протяжении КС, что подтверждается в работах зарубежных авторов [135, 140, 141].

В работе J. Wayne [141] пишет о проведенном эксперименте на коллекторе (протяженность 11 км, диаметр 2,1 м) в г. Колумбус штат Огайо. Для подтверждения процессов движения газа в подсводном пространстве сети и выхода его на поверхность он нагнетал газ СО в шахту, расположенную в начале коллектора, и фиксировал наличие и концентрацию газа СО в шахтах, расположенных ниже по сети. На рисунке 1.11 представлены типичные кривые отклика, полученные в 3 шахтах отбора проб. На всех трех местах отбора проб концентрация СО быстро увеличивается до максимальной величины и затем уменьшается с меньшей скоростью с некоторым «хвостом» кривой. При проведении эксперимента фиксировалась скорость, равная 32 м/мин (0,53 м/с) [141].

Система водоотведения Санкт-Петербурга на 70 % общесплавного типа канализования, т. е. собирает и транспортирует хозяйственно-бытовые, промышленные и дождевые стоки. Одним из требований, предъявляемых к общесплавной системе

канализования, является необходимость приема стоков в широком диапазоне расходов [57]. Это связано с неравномерностью поступления дождевых стоков, которые составляют до 60 % от максимального расхода сточных вод [110], что приводит к частым и резким (залповым) изменениям заполнения КС. Поэтому проблема выбросов АГ в Санкт-Петербурге стоит особенно остро [14, 67].

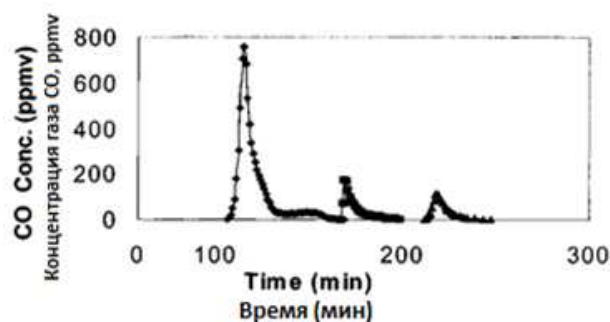


Рисунок 1.11 – Концентрации газа CO (в ppm), полученные в шахтах (в месте выхода шахты на дневную поверхность) ниже по течению сточной жидкости от места нагнетания газа CO

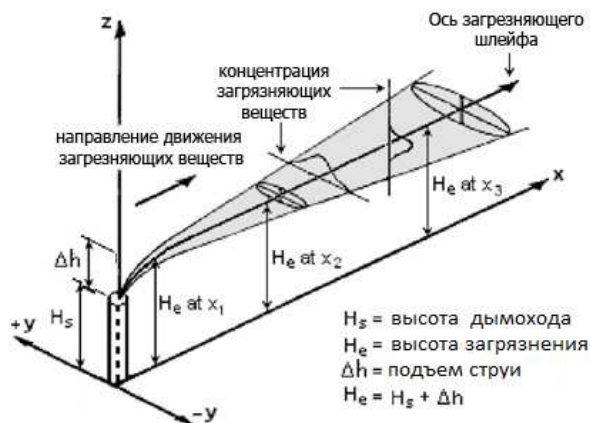


Рисунок 1.12 – Схема распространения агрессивного газа, высвободившегося из КС, по дневной поверхности земли под действием ветра

На сегодняшний день эксплуатирующие организации не имеют метода, позволяющего прогнозировать места и количество выбросов. Нет такого метода и на стадии проектирования. Места выбросов АГ определяются в процессе наблюдений за коллекторами, а также на основе жалоб населения [67]. Немаловажную роль в распространении газа по дневной поверхности играет роза ветров. В работе Ken Galardi [130] представлена схема распространения агрессивного газа по дневной поверхности земли (рисунок 1.12). Нередко выбросы происходят в людных общественных местах. Естественно следует перераспределить поток воздуха в соседнюю шахту, которая расположена в отдалении от людей [145] или, как минимум, произвести дезодорацию воздушных выбросов [49].

Газ, выделяющаяся из ТКГЗ, насыщен АГ (H_2S , CO_2 , CO , CH_4 , NH_3 , окислы азота NO и NO_2) с превышением ПДК в несколько раз, что представляет серьезную опасность для населения и ухудшает экологическую обстановку. По некоторым показателям превышение ПДК может достигать 30–35 раз [2]. При этом необходимо очищать, выделившийся из КС газ. Очистка может осуществляться тремя способами: биохимическим (посредством биофильтров), химическим (термическое окисление, каталитическое окисление, озонирование) и физическим (абсорбция, адсорбция, конденсации) [62,71, 114, 116].

Выбор конкретного способа или комбинации способов очистки зависит от ряда факторов, таких как условия размещения фильтров, включая эксплуатацию и техническое обслуживание, депрессия фильтров, характеристики и прочность пахучего воздуха [121]. Также в процессе очистки газа производят его ароматизацию [124]. В работах зарубежных авторов [127, 130 и др.] описаны различные конструкции фильтров очистки газов.

На рисунке 1.13 представлен фильтр, установленный на канализационном коллекторе в г. Остин, штат Техас США [135].

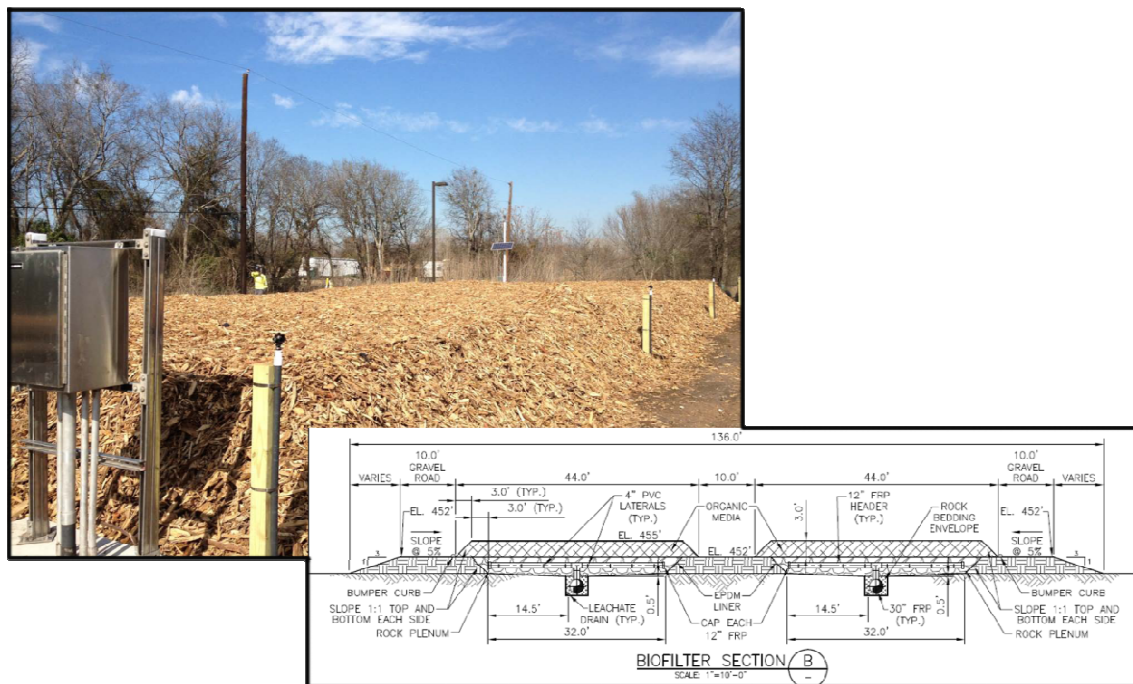


Рисунок 1.13 – Фильтр на канализационном коллекторе в г. Остин штат Техас США

В работе Ken Galardi [130] представлены различные фильтры, используемые для очистки загрязненного газа в КС и очистных сооружениях (рисунок 1.14). Подача газа в фильтр осуществляется воздуходувками. Для загрузки фильтров используются натуральные наполнители (почва, супеси, древесная щепа, шлам) и синтетические.

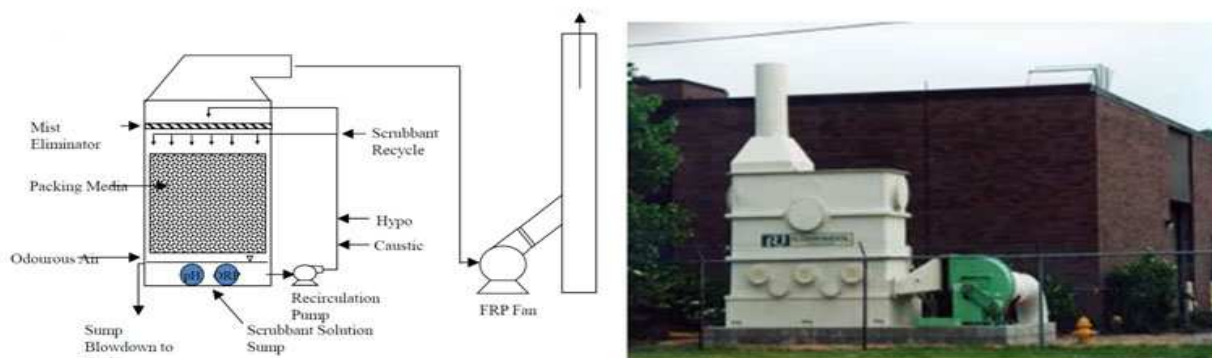


Рисунок 1.14– Фильтр очистки загрязненного воздуха на КС одного из европейских коллекторов

В России также начали устанавливать на КС сооружения очистки газов (рисунок 1.15, 1.16), но их установка носит единичный характер в людных местах с выбросами, выделяющими вещества с крайне неприятными запахами [49].

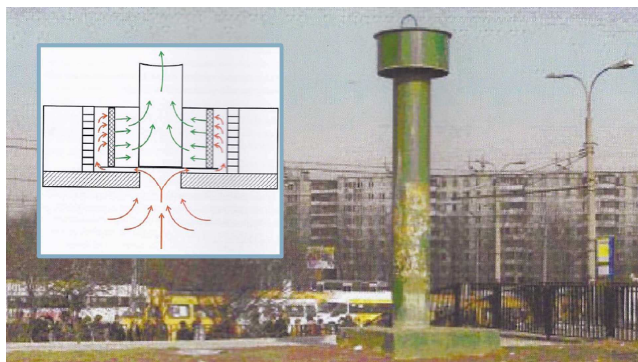


Рисунок 1.15 – Фильтр ФАВН-2,6 на камере Восточного канала КС в Москве, диаметр 600 мм, высота 5 м



Рисунок 1.16 – Установка ОПВС в шахте главного канализационного коллектора северной части в Санкт-Петербурге

Работа таких фильтров вызывает сомнение ввиду отсутствия поверочного аэродинамического расчета. Вероятной является ситуация, когда поток, насыщенный агрессивными газами, выходит по пути меньшего сопротивления через неплотности сети (рисунок 2.24).

1.4 Влияние сооружений, расположенных на канализационной сети, на скорость разрушения сооружений сети и их конструктивные особенности

Скорость коррозии зависит от концентрации АГ в подсводном и шахтном пространстве КС, которая, в свою очередь, зависит от скорости дегазации потока сточной жидкости. Дегазация зависит как от химического состава воды, температуры сточной жидкости и газообразной среды, значения pH, так и от гидравлических условий течения жидкости (скорости, направления, турбулентности потока, режима течения жидкости).

В работах различных авторов [5, 6, 28, 30, 46] подтверждается, что скорость разрушения КС зависит в том числе и от конструктивных особенностей КС. Такие сооружения, как «перепад», интенсифицируют процессы коррозии бетонных сооружений КС, тем самым оказывая крайне негативное воздействие на неё. Это связано с изменением фазового равновесия сточной жидкости (условий течения жидкости) за счет изменения скорости, направления, турбулентности потока, режима течения жидкости, оказываемого на стоки. Особенно сильно увеличивается скорость коррозии в КГН, то есть в местах перехода из напорного (анаэробного) режима в безнапорный (аэробный) режим течения жидкости. В результате изменения условий течения жидкости происходит изменение баланса концентраций веществ в сточной жидкости и

газообразной среде. В процессе уравнивания концентрации веществ происходит выделение (газообразование) сульфидсодержащих веществ.

Проведенные исследования на действующем канализационном коллекторе под руководством проф. В. М. Васильева ООО «ПИБ «Инженерные Экосистемы» в 2010 г. показали, что техническое состояние шахт, расположенных на одном канализационном коллекторе, различное. Наибольшие разрушения наблюдаются именно в местах расположения перепадов (рисунок 1.17) [88]. По мере удаления от перепада по течению сточной жидкости скорость разрушения сети снижается.



Рисунок 1.17 – Фотофиксация состояния шахты № 10, расположенной на дублере канализационного коллектора в районе пл. Мужества в Санкт-Петербурге

Также под руководством проф. В. М. Васильева были проведены дополнительные исследования. С использованием приборов ВМ-25 (газоанализатор по газам H_2S , CH_4 , O_2 , CO_2 с функцией самозаписи показаний концентрации газов в течение времени) и ТЛАД (прибор измерения показаний влажности и температуры в течение времени) были замерены концентрации газов (H_2S , CH_4 , O_2 , CO_2), температура и влажность в течение времени в шахтном пространстве сети. Результаты исследования показали, что наибольшая концентрация сероводорода в пределах от 25 до 140 мг/м^3 и выше наблюдалась в шахте № 10 (с перепадом) в Санкт-Петербурге (рисунок 1.18). Замеры концентрации АГ в других шахтах ниже по сети показали резкое снижение концентрации газов в шахтном пространстве по мере удаления от шахты № 10 (с перепадом) [47].

Негативное воздействие перепадов различно в зависимости от конструкции (типа) перепада. Так, наиболее неблагоприятными конструкциями перепада, с точки зрения

интенсификации процессов коррозии, являются многоступенчатые перепады, имеющие большое количество ступеней, несколько циклов изменения условий течения жидкости, а также большую (по площади) поверхность сопряжения сточных вод и газообразной среды.

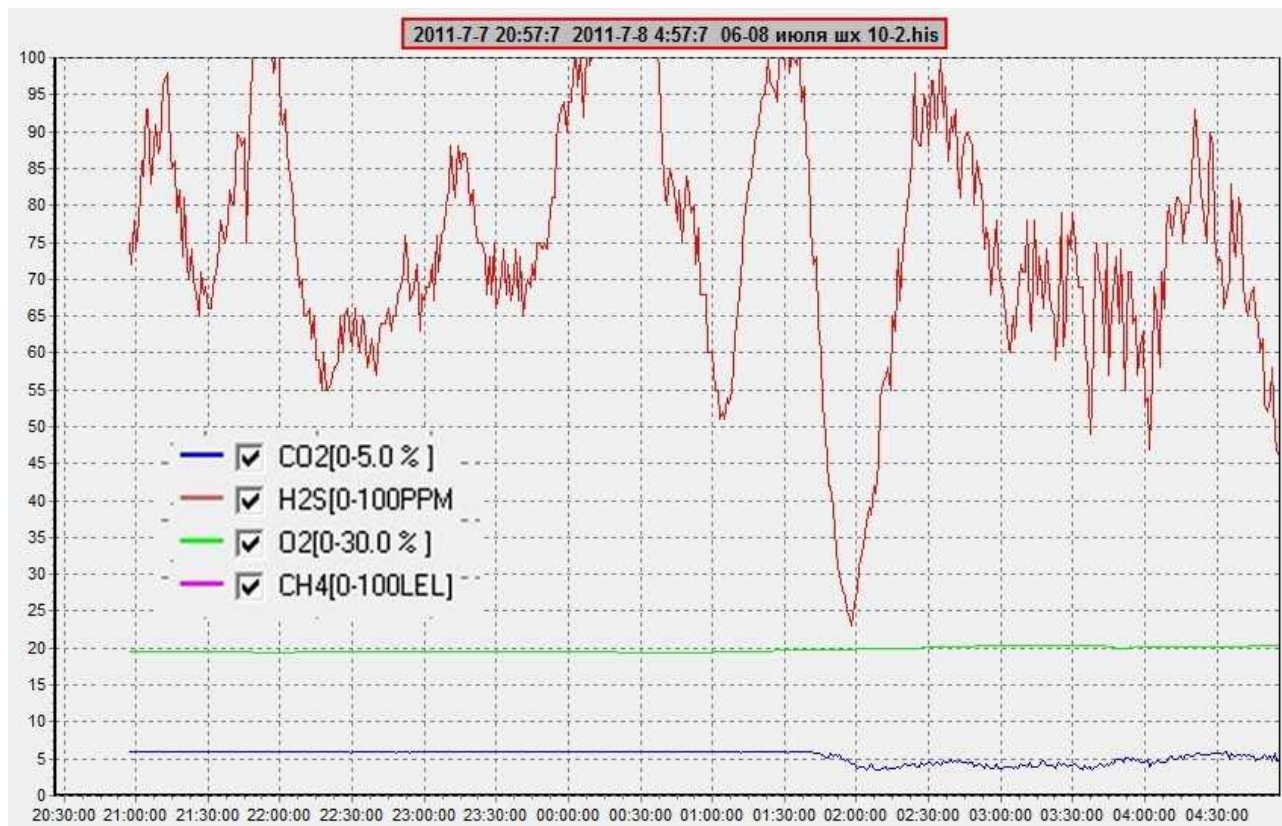


Рисунок 1.18 – График изменения концентрации газов O₂, H₂S, CO₂, CH₄ в шахте № 10 в период с 20:57 07 июля 2011 по 04:57 08 июля 2011 года

Реальным подтверждением данного факта является исследование, проведенное на Филевском канале (коллекторе) в Москве [24]. В течение времени на протяжении коллектора для порции расхода жидкости были замерены концентрации газов, интенсифицирующих процессы разрушения КС (CH₄, CO₂, H₂S, -SO₄, S₂). Исследования показали, что в местах расположения перепадов резко возрастает концентрация АГ.

В работе проф. В. М. Васильева [24, 90] указывается, что наиболее совершенной конструкцией с точки зрения предотвращения процессов коррозии является «трубчатый» перепад с «глухим» перекрытием в нижней части шахты (патент на изобретение № 2394965 приоритет от 29.12.08 г. Авторы Васильев В. М., Васильев Ф. В.), отделяющей коллектор и шахту. Идея предложения в том, чтобы оградить большую часть шахты от действия агрессивного газа (рисунок 1.19) [23]. Трубчатый перепад в процессе транспортировки сточной жидкости из верхнего бассейна канализования в нижний увлекает за собой газовоздушную среду за счет эжекции газа в трубчатый перепад. В работе [55] данный эффект использовался для вовлечения в движение воздуха извне и насыщения сточной жидкости кислородом. Результат эксперимента

показал, что скорость коррозии сточной жидкости ниже по течению стоков уменьшается с увеличением количества растворенного кислорода в сточной жидкости, а при концентрации более 1 мг/л коррозия практически прекращается.

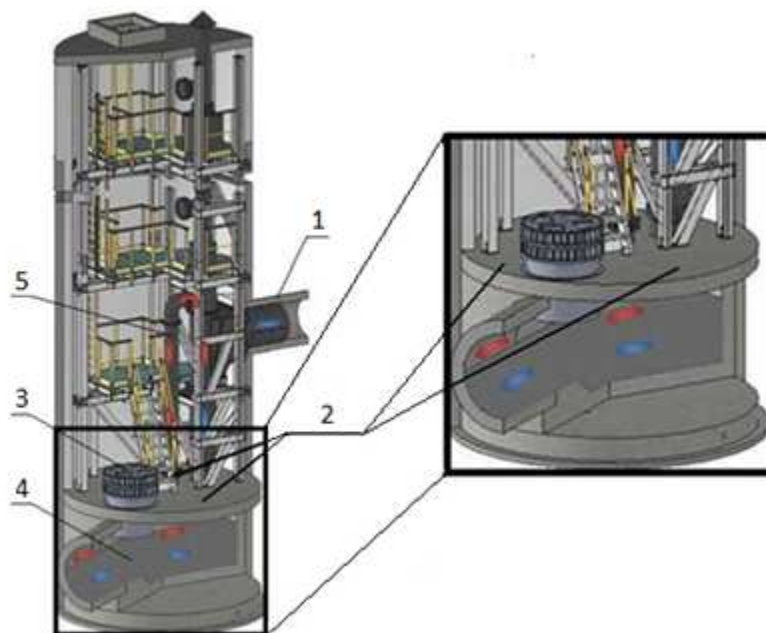


Рисунок 1.19 – Шахта с перепадом трубчатого типа с глухим перекрытием в нижней части шахты: 1 – приточный самотечный коллектор; 2 – глухое перекрытие; 3 — спускной клапан в глухом перекрытии; 4 — отводящий самотечный коллектор; 5 — газопровод для циркуляции газа, вовлекаемого перепадом в движение

В работе James Joуce [135] также отмечается увлекающая способность перепада, образование депрессии за счет перепада и поступление воздуха в сеть через шахту.

Исследование, проведенное в округе Кларк, Лас-Вегас, подтверждает, что наличие перепадов способствует значительному увеличению давления ниже по сети, то есть создает депрессию [145]. В работе James Joуce представлены некоторые конструктивные решения, направленные на снижение скорости разрушения КС (рисунок 1.20).

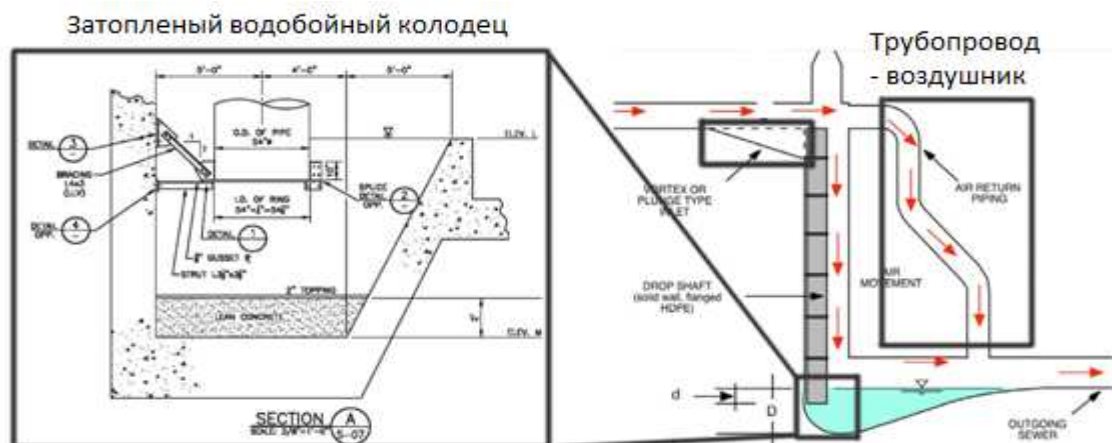


Рисунок 1.20 – Конструктивные решения, направленные на снижение скорости разрушения КС, количества выделяемого газа из сточной жидкости и перераспределение газа по сети

1.5 Влияние температуры, влажности и концентрации агрессивных газов в канализационных коллекторах и шахтах, на скорость разрушения сооружений сети

В работе T. Wells, R.E. Melchers [149] описан ряд экспериментов (исследований), проведенных на коллекторах в городах Мельбурн, Перт, Сидней (Австралия). В каждом из перечисленных городов в коллекторе были установлены образцы бетона по две пары образцов в каждом коллекторе (одна пара – старый бетон и вторая пара – вновь изготовленный. Экспериментальные образцы были установлены на 36 месяцев с периодическим исследованием через 3, 6, 9, 12, 24 и 36 месяцев. Образцы исследовались фотограмметрическим способом на определение глубины слоя коррозии ΔZ (рисунок 1.21). Глубина потерь от коррозии: $\Delta Z_c = Z_0 - Z_r$ и глубина слоя продукта коррозии: $\Delta Z_h = Z_0 - Z_b$.

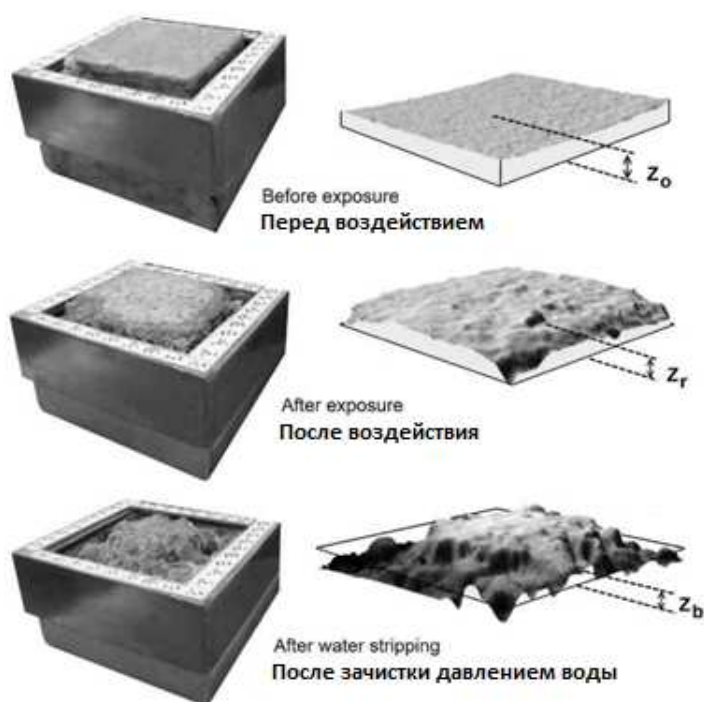


Рисунок 1.21 – Определение глубины слоя коррозии фотограмметрическим способом.

Одновременно производились замеры концентрации сероводорода, температуры и влажности в подсводном пространстве КС. Вместе с тем производились замеры показателя рН. На графиках приведены показания рН и скорости разрушения бетона (рисунок 1.22). Как видно на графиков, разрушение начинается в момент, когда рН достигает показания 6 и ниже. Также видно, что скорость разрушения постоянна во времени, но различна по значениям в зависимости от коллектора. Важным результатом описываемого эксперимента является то, что только H_2S не является единственной причиной высокой скорости коррозии бетона. Например, скорость коррозии бетона в точке Перт В ($C = 5.3\text{--}5.5$ мм/год) ниже, чем в Мельбурне В ($C = 6,1\text{--}6,5$ мм/год), несмотря на то, что имеющие концентрации H_2S примерно в 70 раз более высокие. Это показывает, что другие факторы, такие как температура и относительная влажность, также значительно влияют на скорость коррозии.

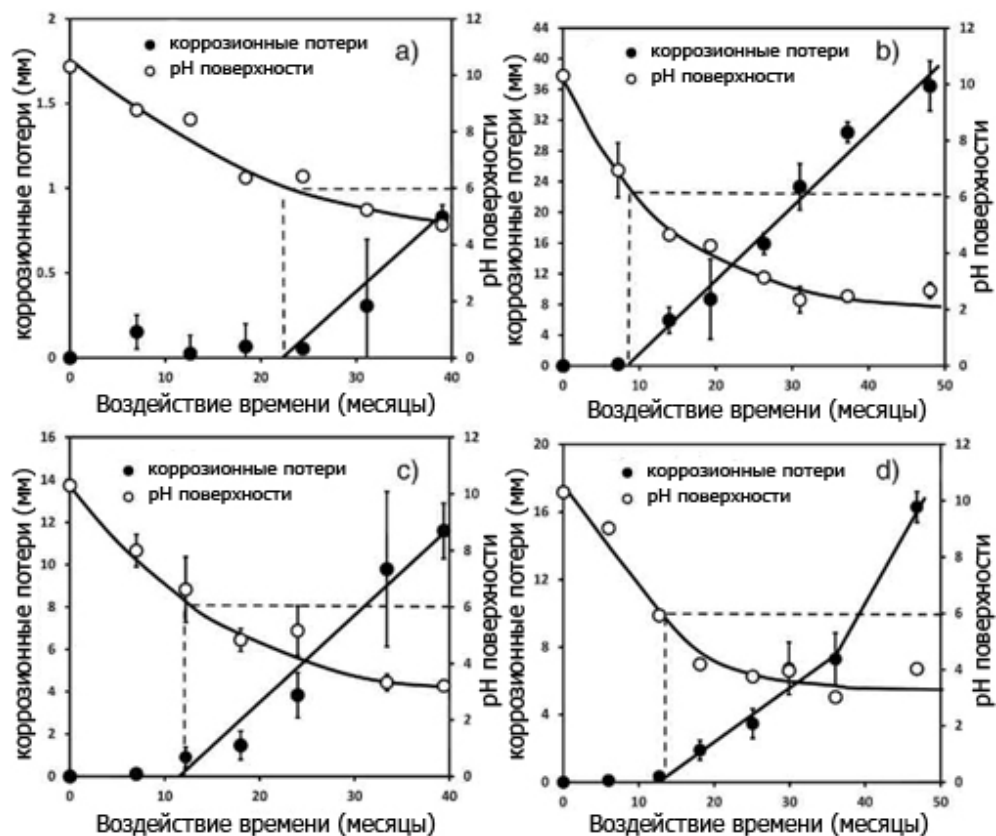


Рисунок 1.22 – Потери от коррозии и тенденция pH поверхности для новых образцов на отдельных участках: а — Мельбурн А; б — Перт А; в — Мельбурн В; г — Перт В

1.6 Существующие способы снижения концентрации агрессивных газов, скорости разрушения сооружений сети, предотвращения непроизвольного выброса газов из сети в атмосферу

В настоящее время существуют различные способы снижения скорости разрушения КС. На основе анализа можно разделить существующие способы на несколько групп:

- защита сооружений КС от АГ нанесением покрытий [109];
- использование материалов, устойчивых к биологически активной среде;
- Регулярное плановое восстановление защитного слоя бетона и технологическое оснащение шахты;
- эжекция воздуха трубчатым перепадом и насыщение сточных вод кислородом;
- борьба с процессами, являющимися причиной разрушения КС [137];
- обслуживание (промывка) сети.

Защита сооружений КС от АГ посредством нанесения покрытий существует продолжительное время. В работе Н. К. Розенталя рассмотрены различные защитные покрытия, составлена их классификация, определены недостатки и границы применимости [99].

Опыт использования различных материалов при существующих концентрациях АГ показал, что единственным покрытием, способным защитить канализационную сеть от разрушения, на сегодняшний день является полимерсиликатный состав «Конусит КК-10». Данный материал используется на сооружениях водоканала Санкт-Петербурга [21].

Также хорошую стойкость к сильноокислой среде показали композитные материалы, имеющие в своем составе пултрузионный стеклопластик. Такие материалы используются на объектах КС Санкт-Петербурга для технологического оснащения шахт.

Еще одной разновидностью защиты сооружений является метод «труба в трубе». Данный метод использовался для восстановления коллектора в г. Новосибирске. В существующий коллектор (после специальной подготовки) монтировали стеклопластиковые трубы фирмы «Hobas». Соединение между трубами производилось с помощью раструба. Образующиеся полости между коллектором и трубой (межтрубное пространство) заполняли цементно-песчаным раствором. Пропускная способность коллектора при этом осталась прежняя. Уменьшение сечения компенсировалось меньшей шероховатостью трубы. Достоинством метода является отсутствие эксплуатационных затрат, технологического оборудования и, как следствие, его обслуживания. Монтаж труб возможно производить на действующем коллекторе (заполнение коллектора до 0,4). Недостатком данного метода является то, что он не решает вопросы выброса агрессивного газа на дневную поверхность земли и не защищает технологическое оснащение шахт, а также требует значительных капитальных затрат.

Использование материалов, устойчивых к биологически активной среде, следует применять при оснащении шахт. К таким материалам относятся: полимерные, пластиковые, композитные (пултрузионный стеклопластик), полимербетоны, особо плотные бетоны с флюатированием поверхности конструкций и другие материалы.

Регулярное плановое восстановление защитного слоя бетона и технологическое оснащение шахты на сегодняшний день используется в России достаточно широко. Регулярные плановые ремонты шахт не являются стратегическим решением проблемы, а скорее наоборот, являются необходимостью ввиду отсутствия какого-либо плана. К достоинствам данного метода можно отнести то, что он позволяет не производить должного технического обслуживания ввиду малого срока эксплуатации сооружений между плановыми и внеплановыми ремонтами. Недостатком являются большие капитальные затраты на восстановление капитальных сооружений, а также то, что данный метод не решает вопросы выброса агрессивного газа на дневную поверхность земли и не защищает технологическое оснащение шахт.

В Германии затраты на восстановление повреждений канализационных систем на 1998 г. составили около 100 млрд долларов в год [136], в Бельгии эти затраты на 2002 г. составили около 5 млн. долларов в год, т. е. 10 % от общей стоимости сбора и обработки сточных вод [147].

Эжекция воздуха трубчатым перепадом и насыщение сточных вод кислородом [6, 24]. Данный способ требует дополнительной экспериментальной базы для более подробной проработки решения перед внедрением.

Преимущества данного способа защиты от коррозии в том, что при высокой эффективности отсутствует необходимость в подводе электричества и значительных эксплуатационных расходах. Недостатком является то, что реализация данного метода возможна только локально, в местах сооружения трубчатых перепадов, а также то, что реализация его возможна либо на стадии проектирования (строительства), либо с реконструкцией существующего перепада требующих значительных средств.

Борьба с процессами, являющимися причиной разрушения КС на различных стадиях протекания реакций, наиболее распространены в зарубежных странах.

В работе Oriol Gutierrez [120] описывается методика дозирования щелочи (повышения значений $\text{pH} > 10,0$) в канализационную сеть в течение коротких периодов (часы) для управления образования сульфидов в канализации. Доза щелочи при этом составляет до 520 г/м^3 сточных вод.

В работе Lehua Zhang [126] описаны различные биологические и химические технологии, которые позволяют уменьшить количество выделяемого сероводорода из сточных вод. Интересным является предлагаемый контроль эмиссии сероводорода (рисунок 1.23) с помощью микробно-топливных элементов (преобразования сульфида в серу).

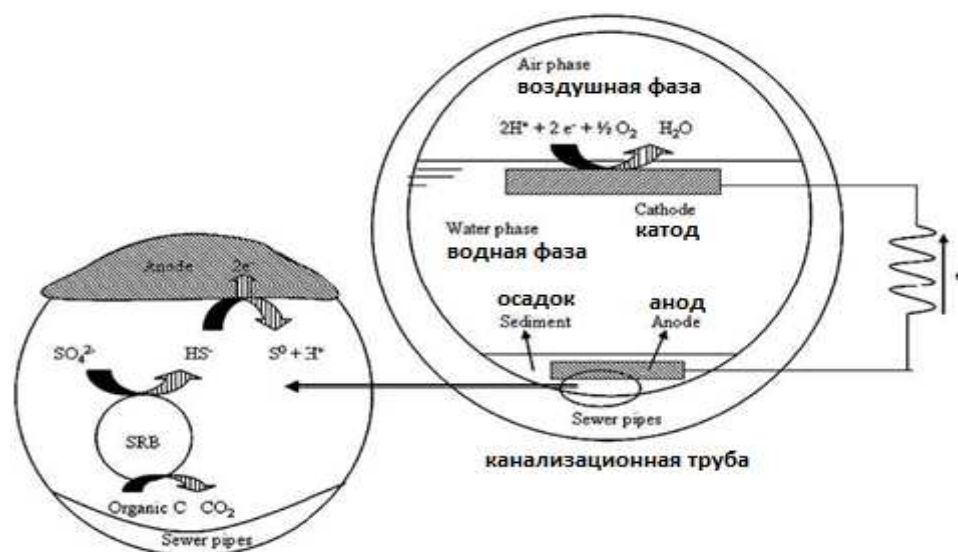


Рисунок 1.23 – Схема микробно-топливного процесса в канализационной системе преобразования сульфида в серу

В работе Xiaoyan Sun [133] описано исследование, проведенное в г. Сидней, Австралия. Результаты исследования показали, что наличие кратковременных высоких концентраций H_2S в подсводном пространстве сети оказывает тормозящее влияние на поглощение H_2S бетоном.

Также одним из способов борьбы является снижение температуры сточной жидкости путем плавления снежных масс в зимний период времени.

Как уже отмечалось, одним из способов защиты КС является газообмен как способ выноса агрессивных веществ из подсводного пространства КС [12, 24, 25, 54, 64, 67]. Газообмен может осуществляться как естественным, так и принудительным способом. При этом естественный способ требует установки вытяжных труб, где движение газа обусловлено естественной тягой за счет разности удельного веса на приточных и вытяжных шахтах и увлекающей способностью жидкости. При принудительном способе возможно использование как вентиляторов, так и энергии падающей жидкости перепадов, которая позволяет подавать в коллектор расход воздуха, в 2–4 раза превышающий расход жидкости [24]. Достоинством системы газообмена является решение сразу серии задач, таких как снижение скорости разрушения КС, прекращение несанкционированных выбросов АГ на дневную поверхность земли, снижение потенциальной опасности взрыва газа в подсводном и шахтном пространстве сети, улучшение условий обслуживания (осмотра) КС. Недостатком системы является то, что газообмен связан с удалением грязного воздуха (агрессивного газа) из КС на дневную поверхность земли, поэтому при организации газообмена необходимо осуществлять очистку загрязненного газа.

Отдельно следует отметить такие процессы, как загнивание осадка в лотковой части коллектора, на банкетах сооружений и других местах. Решением данной проблемы может служить регулярная промывка сети, а также поддержание скоростей сточной жидкости в диапазоне незаиливающих скоростей. Локальной причиной образования заиленных областей может быть конструктивная особенность данной части сети (порог, провал, резкое расширение тоннеля) [28, 46, 48].

1.7 Системы газообмена в различных подземных пространствах и тоннельных системах и методы их расчета

Газообмен, вентиляцию или просто движение воздуха по различным тоннельным системам можно встретить в горнодобывающей промышленности, системах метрополитена или в автотранспортном и железнодорожном тоннелестроении. Каждая из этих систем уникальна, имеет индивидуальные особенности, принципы действия, функциональное назначение и, что немаловажно, инвестирование.

Наиболее простая система вентиляции и метод расчета представлены в автотранспортном тоннелестроении (рисунок 1.24). Вентиляционные системы в автотранспортном и железнодорожном тоннелестроении предназначены для удаления газов, вырабатываемых транспортом, а также для подачи воздуха для работы транспорта и для создания условий безопасного и комфортного пребывания людей в тоннеле. Также одна из функций вентиляционной системы — дымоудаление во время пожара.

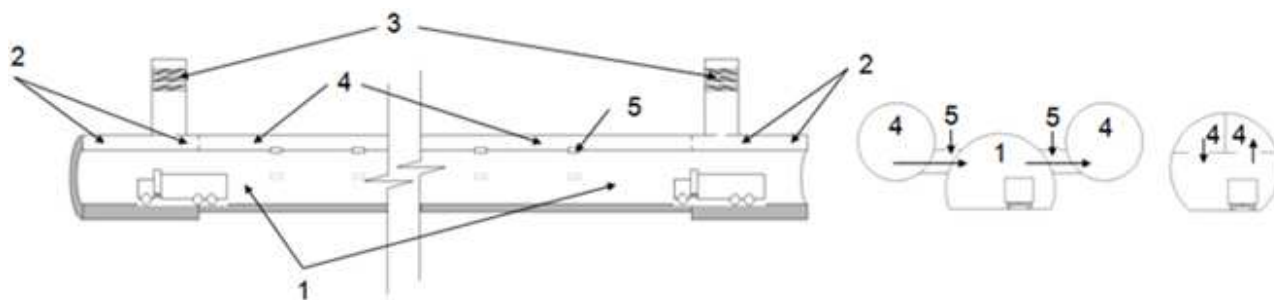


Рисунок 1.24 – Схема вентиляции автотоннеля: 1 — тоннель; 2 — портал; 3 — нагревательные элементы и всасывающие вентиляторы; 4 — воздуховоды; 5 — вентиляционные проемы

Транспортные тоннели, в отличие от КС глубокого заложения, как правило, имеют всего два портала, являются прямолинейными по своей траектории движения, а также имеют гораздо больший диаметр. Система газообмена транспортных тоннелей, в отличие от системы газообмена КС, обслуживает участок тоннеля большого диаметра, имеет большую мощность, расчетная схема газообмена имеет один закольцовывающий круг, рассчитывается из расчета пропускной способности тоннеля и его протяженности (рисунок 1.26), подача воздуха производится по отдельным вентиляционным каналам, прокладываемым параллельно основному тоннелю. Задача системы газообмена транспортных тоннелей — обеспечение условий для их безопасной эксплуатации в течение всего времени эксплуатации тоннеля (постоянно, круглосуточно). Тоннели длиной до 150 м могут проветриваться естественной вентиляцией, 150 м - 400 м — с естественным побуждением, > 400 м — механическая вентиляция [115].

Схема и способ вентиляции, а также режимы работы вентиляторов должны учитывать: продольный профиль тоннеля; поперечное сечение тоннеля; число полос движения; количество и тип проходящих автомобилей, создаваемый ими поршневой эффект; теплообменные процессы, происходящие внутри тоннеля; количество и состав вредных веществ, выделяемых автомобилями, а также дополнительные режимы вентиляции, работающие при авариях или пожарах. Метод расчета вентиляционной системы сводится к определению количества воздуха, необходимого для вентиляции тоннеля с учетом снижения концентрации вредных газов до требуемых ПДК [115].

Организация газообмена в тоннеле организуется за счет вентиляционных установок, установленных в порталах тоннеля. Заимствование опыта из данной отрасли возможно только в случае применения на КС вентиляционных установок [115].

Вентиляционная система метрополитенов — важнейшая система жизнеобеспечения. Может осуществляться как естественным, так и искусственным способом побуждения. Система газообмена предназначена для подачи воздуха с дневной поверхности земли в тоннели, вестибюли станции и другие помещения, в подземные пространства метрополитена. Вентиляция подземных пространств метрополитена производится за счет вентиляционных установок и поршневого движения воздуха в транспортных тоннелях метрополитена, за счет движения вагонного состава по тоннелю. Система тоннелей метрополитена, по сравнению с транспортными тоннелями, имеет более сложную систему тоннелей, и поэтому вопрос вентиляции подземных пространств в области метростроя рассмотрен и применен более обширно и глубоко. Размеры тоннелей сопоставимы с размерами тоннелей КС глубокого заложения. Заимствование отдельных методов расчета и применение их в аэродинамических расчетах КС возможно только при организации движения газообразной среды за счет вентиляционных установок. По характеру распределение воздуха делится на поперечное, полупоперечное и продольное. Вентиляция метрополитенов проектируется с учетом годового запаса [60].

Наиболее полно вопрос газообмена из всех рассмотренных систем газообмена рассмотрен в горнодобывающей промышленности. Системы газообмена достаточно разнообразны и имеют различные системы вентиляции тоннелей [45, 59].

Подземные системы тоннелей достаточно разнообразные как в горизонтальном, так и вертикальном направлении, имеют большое количество закольцовывающих тоннелей и тупиковых штолен.

Для определения распределения воздуха по каждому из направлений необходимо составление расчетной схемы сети рудника. Для расчета распределения воздуха необходимо точно знать аэродинамическое сопротивление шахтных стволов рудника «R», расчет аэродинамического сопротивления подробно описан в литературе [8, 33, 34, 43, 45, 52, 115]. Также описаны системы автоматизирования процессов управления вентиляционными установками [61, 112]. Газообмен в тоннелях горнодобывающей промышленности в основном производится при помощи вентиляционных установок и частично при помощи естественной тяги. Регулирование газообмена в горных выработках производят при помощи «положительного» и «отрицательного» регулирования локального перераспределения расходов. Их применение практически не влияет на общее аэродинамическое сопротивление рудника [56, 59].

Математическое описание процессов эжекции в условиях шахтной вентиляции дано в работах И. И. Медведева, А. Е. Красноштейна, Ю. К. Сатлана, Н. Н. Мохирева, Н. И. Аныщенко и др. В основе расчетов руднечной вентиляции заложено уравнение (1.4)

$$\Delta h = RQ^2, \quad (1.4)$$

где R — аэродинамическое сопротивление сети, $\text{кг} \cdot \text{с} / \text{м}^3$;

Δh — потери депрессии на сети, м;

Q — расход газа проходящего через сеть, $\text{м}^3 / \text{с}$.

Задачей системы газообмена в рудничных выработках является создание условий для безопасности и эффективности освоения минеральных, энергетических и пространственных ресурсов недр при разведке мест полезных ископаемых, строительстве и последующей эксплуатации подземных объектов различного типа и назначения. Требуемый состав воздушной смеси кислорода составляет не менее 20 % [105]. Существующие системы газообмена в подобных сооружениях достаточно энергоемкие, требуют больших капитальных и эксплуатационных затрат, поэтому мало приемлемы в КС. Расчет всех вентиляционных систем основан на трех законах Кирхгофа [59]:

Начиная с 1949 г. о необходимости газообмена в КС говорят и пишут в советской и теперь уже в российской литературе [11, 12, 14, 17, 25, 29, 53, 54, 64, 106 и др.]. За это время проделана серия работ и экспериментов, но в действительности газообмен на канализационных сетях РФ по настоящее время в полной мере не реализован. Вентилируются только канализационные стояки домов за счет естественной тяги через открытые горловины стояков, а также малозаглубленная канализационная сеть за счет неплотности сети и специального отверстия в люке колодца.

Различного рода работы и исследования по данной тематике проводились на кафедре гидравлики в ЛИСИ г. Санкт-Петербург (СПбГАСУ) Алексеевым М. И., Васильевым В. М., Гайфутдинов М. Т. и др. Были получены эмпирические зависимости движения газа в подсводном пространстве сети, составлены методы расчета и проведены эксперименты. Ниже представлены эмпирические зависимости для определения средней скорости газообразной среды, движущейся в подсводном пространстве сети, её составляющих и определения депрессии в сети (1.5–1.7) [17]

$$V_{B.UB} = \frac{\left(0,4 \frac{h}{D} + 0,82\right) V_{\text{ПОВ}}}{2,8 \cdot Fr_B^{-0,6} + 1}; \quad (1.5)$$

где $V_{B.UB}$ — скорость газа движущегося за счет увлекающей способности жидкости, м/с;

$V_{\text{ПОВ}}$ — скорость воды на поверхности, м/с;

Fr_B — число Фруда;

h/D — заполнение сети.

$$V_B = V_{B.ECT} + V_{B.УВ} \left(1 - \sqrt{\frac{V_{B.ECT}}{V_{ПОВ}}} \right); \quad (1.6)$$

где V_B — скорость газа движущегося за счет увлекающей способности жидкости и естественной тяги, м/с;

$V_{B.ECT}$ — скорость газа движущегося за счет естественной тяги, м/с.

$$\Delta P_e = \frac{0,55 \cdot \rho_B \cdot g \left(H_{BT} + H_{BK} \frac{i \cdot L + z_1 - z_2}{2} \right) (t_{кол}^o - t_{Н.В}^o)}{273 + \frac{(t_{кол}^o + t_{Н.В}^o)}{2}}. \quad (1.7)$$

где ΔP_E — депрессия, создаваемая естественной тягой, Па;

ρ_B — плотность воздуха кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

H_{BT} — высота вытяжной трубы, м;

H_{BK} — высота вытяжной шахты, м;

i — геометрический уклон, м/м;

L — длина участка сети, м;

$z_1 - z_2$ — разность отметок на поверхности приточной и вытяжной шахт, м;

$t_{кол}^o$ — Температура в коллекторе, °С;

$t_{Н.В}^o$ — Температура на поверхности, °С.

Данные уравнения позволяет определить расход газа, движущегося в КС, выполненной из железобетонных элементов, на одном аэродинамическом участке. Использование приведенных эмпирических зависимостей имеет ряд ограничений и достаточно малые границы применимости ввиду отсутствия ряда показателей. Существующие зависимости не учитывают такие параметры, как вязкость веществ (сточной жидкости и газа), что делает существующие зависимости ограниченно приемлемыми для расчета даже участка сети. Понятным является, то что при большом заполнении сети влияние увлекающей способности жидкости будет значительнее, чем при меньшем заполнении, данная закономерность не находит отражения в представленной зависимости (1.6), и имеет границы применимости.

На сегодняшний день канализационные коллекторы сооружаются не только из бетона, но также из других материалов (стеклопластик, полипропилен), которые имеют отличную от бетона шероховатость поверхности, что влияет на аэродинамическое сопротивление сети, а, следовательно, и на расход газа, движущегося по сети. Использование различных защитных

покрытий также влияет на аэродинамическое сопротивление сети. С учетом малой вязкости газа данные изменения являются существенными.

В зарубежных странах организации газообмена посвящено большое количество работ [129, 134, 135, 145, 150 и др.]. Существует опыт организации газообмена в КС.

В работе Foster A. «Air Flow in Sewers» [129] описывается процесс организации газообмена на канализационном коллекторе в г. Ванкувер, США — попутное и разнопутное движения сточной жидкости и газа. Движение газа организовано за счет депрессии, создаваемой вентиляторами, работающими на вытяжку (рисунок 1.25). Так же при организации газообмена учитывается естественная тяга, которая усиливается за счет сооружения специальной вентиляционной трубы.

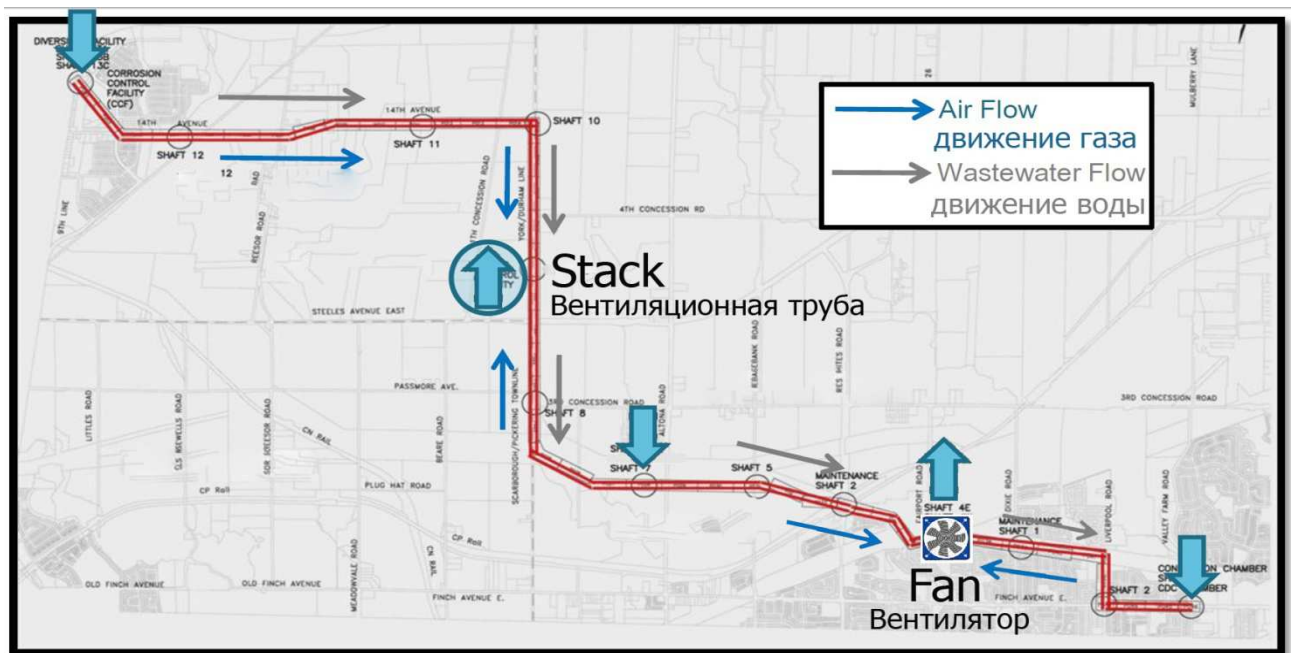


Рисунок 1.25– Организация газообмена в канализационном коллекторе г. Ванкувер, США за счет депрессии, создаваемой вентиляторами и вентиляционной трубой

Расчет скорости течения газа производится по следующей зависимости (1.8)

$$\frac{\Delta P}{X} = \alpha \frac{V^2}{2g}, \quad (1.8)$$

где ΔP — депрессия, создаваемая вентилятором, Па;

X — расстояние между порталами, м;

V — скорость движения газа в подсводном пространстве сети, м/с²;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

α — коэффициент аэродинамического сопротивления, кг/м³с².

Формула 1.8 представляет собой упрощенное выражение реальных процессов и не отражает ряда показателей, изменяющихся по длине и с течением времени, и может быть

применена при расчете одного локального участка. По данной зависимости можно определить приблизительную мощность вентиляционного оборудования. Учитывая, что накладные расходы эксплуатации сети достаточно велики, а ошибка в подборе оборудования высока, теоретический расчет используют как приблизительный расчет для определения мощности оборудования экспериментальной установки. Установка предназначена для определения мощности вентиляционного оборудования экспериментальным путем.

Так, в работе James Joys [134, 135] описан процесс организации газообмена в канализационном коллекторе в г. Остин, Техас, США, где мощность вентиляционного оборудования подбиралась опытным путем (рисунок 1.26).



Рисунок 1.26 – Организация газообмена в канализационном коллекторе г. Остин, штат Техас, США за счет депрессии, создаваемой вентиляторами. Справа — экспериментальная установка, слева — стационарная (рабочая) установка

Для подбора оборудования из-за отсутствия должного метода расчета газообмена проводят научную работу с привлечением различных специалистов. Так, в докладе Jay Witherspoon, Dirk Apgar, Matthew Ward, Dr. Wayne Parker и др. [150] описана работа, проведенная на КС округа Лос-Анжелес США, по замеру конкретных параметров (скорости, депрессии, сопротивления, температуры, влажности и т. д.) для последующего подбора оборудования с целью минимизации запахов и коррозии в сети (рисунок 1.27). Этот доклад был подготовлен организациями как отчет о работе под эгидой Water Environment Research Foundation (WERF).

Ввиду наличия неприятного запаха и неблагоприятной экологической обстановки при установке вытяжных вентиляторов, они расположены в местах с отсутствием постоянного пребывания людей (в удаленных местах).



Рисунок 1.27 – Фотоматериалы производства работ по замеру параметров КС округа Лос-Анжелес, США для последующего подбора вентиляционного оборудования

Так, в г. Феникс, штат Аризона, вытяжной вентилятор установлен на расстоянии 5 миль от города (на коллекторе на пути к очистным сооружениям) (рисунок 1.28) [145].



Рисунок 1.28 – Вентиляционная установка экспериментального назначения в г. Феникс, штат Аризона. Производится эмпирический подбор мощности оборудования

Для увеличения срока службы вентиляционного оборудования и стойкости к агрессивной среде их изготовление производят из нержавеющей стали определенных марок. При изготовлении оборудования для агрессивных сред используют материалы из

ПВХ и стекловолокна. Как описано в работе (Bowker RPG), нержавеющая сталь и ПВХ не будут затронуты при концентрации сероводорода до 100 ppm (141 мг/м³) в течение 2-летнего периода эксплуатации, а установка эффективных ловушек влаги предотвращает образование конденсата серной кислоты в воздуховодах и трубопроводах, способствуя избеганию точечной коррозии металлических частей [123].

1.8 Выводы по главе 1

Несмотря на очевидную важность организации газообмена в системах канализования, сбора и очистки газа от запахов и токсичных примесей, решения проблем коррозии, вопросы внедрения и развития данного направления за все 80 лет принципиально не решались. Увеличение фундаментальных знаний в этой области имеет важное значение для решения проблем эксплуатации КС.

Мировой опыт эксплуатации сети предшествующих лет ставит нас в определенные рамки реализации инженерной мысли — это малые капитальные и эксплуатационные затраты, отсутствие требований к квалификации обслуживающего персонала, к необходимости системного (регулярного) контроля, а также решение задач комплексно наиболее рациональным и экономически целесообразным способом.

Таким всеобъемлющим способом следует считать организацию газообмена за счет побуждающих к движению поверхностных и массовых сил, за счет естественных процессов, специальных конструктивных элементов, увлекающей способности перепадов трубчатого типа с эжектором, с использованием вентиляционных труб.

Подобные системы газообмена существуют на таких подземных пространствах, как горные выработки, системы метрополитена, тоннели автомобильного и железнодорожного сообщения.

Вентиляционные системы других подземных пространств отличаются большой энергоемкостью, высокой надежностью системы газообмена, движением воздуха, осуществляемого за счет вентиляционных установок, наличием систем управления и контроля, кратностью газообмена, определяемой из расчета комфортного и безопасного пребывания человека.

В отличие от других вентиляционных систем, к системе газообмена КС глубокого заложения предъявляются иные требования: организация движения газа за счет увлекающей способности жидкости и естественной тяги, устойчивость устанавливаемого оборудования к агрессивной среде, отсутствие энергопотребления,

малые капитальные и эксплуатационные затраты. Системы газообмена КС не требовательны к надежности и бесперебойности системы.

На сегодняшний день существуют методы расчета движения газа по КС, однако они не учитывают физические свойства газа, такие как плотность, динамическая вязкость и другие параметры, которые изменяются в зависимости от химического состава газовой фазы КС.

Недостаточно проработан вопрос в части кратности газообмена, что не позволяет оценить вентиляционную систему КС с точки зрения обеспечения требуемой кратности, а, следовательно, невозможно определить, оценить и обосновать требуемую мощность вентиляционной системы.

Известным является тот факт, что при вентиляции КС происходит конкуренция двух процессов: окисление сероводорода кислородом воздуха и вынос сероводорода из подсводного (подземного) пространства КС. Следовательно, при определенной кратности газообмена возможным является получение обратного эффекта, то есть увеличение скорости коррозии сети.

Существующие методы расчета не учитывают возможность перераспределения потока, а, следовательно, невозможно настроить системы газообмена под определенные параметры сети.

На сегодняшний день не существует методов, позволяющих на стадии проекта определить ожидаемую концентрацию АГ, требуемую кратность газообмена, скорость коррозии железобетонных сооружений сети.

Обследование канализационных сетей глубокого заложения свидетельствует о различной скорости разрушения КС, а в некоторых случаях коррозия отсутствует вовсе, что говорит об отсутствии необходимости вентилирования всей КС.

Все это привело к отсутствию организованного газообмена на канализационных системах нашей страны. Необходимо разработать метод расчета движения газа по сети и его перераспределения с учетом всех вышеперечисленных факторов.

ГЛАВА 2

СОВМЕСТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА В КАНАЛИЗАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

2.1 Совместное движение сточной жидкости и газообразного вещества в подсводном пространстве канализационного коллектора

Два несмешивающихся вещества (сточная жидкость и газообразная среда) текут по канализационному коллектору в направлении оси X (см. рисунок 1.8). Сточная жидкость течет под влиянием гравитационных сил, а газообразная среда — под влиянием градиента давления и увлекающей способности жидкости.

До настоящего времени канализационная сеть глубокого заложения рассчитывается на транспортировку сточной жидкости без учета движения газообразной среды в подсводном и шахтном пространстве (рисунок 2.1). Отсутствие газообмена способствует повышению концентрации АГ в подсводном пространстве, конденсации АГ на поверхности сооружений, коррозии бетона. Дезорганизованное движение газообразной среды в КС приводит к образованию воздушных пробок, срыву шахтных крышек, выбросу газообразной среды, насыщенной агрессивными газами, на дневную поверхность земли. Это вызывает появление неприятного запаха в разных частях города, открытых шахт, опасных для населения, и негативно влияет на экологию города.

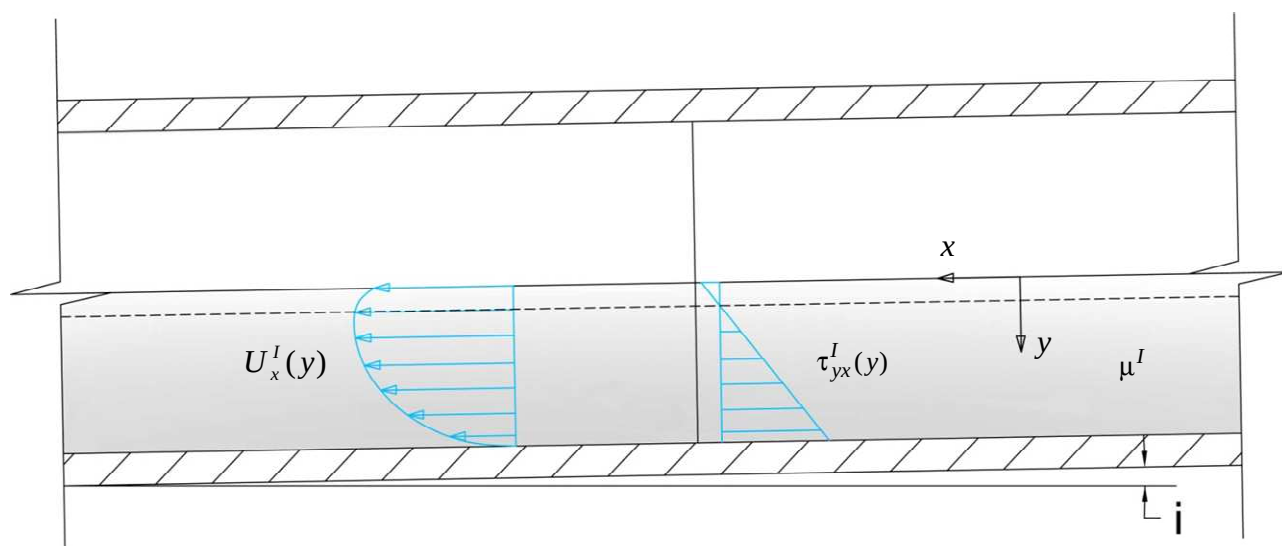


Рисунок 2.1 – Расчетная схема (эпюра распределения скоростей сточной жидкости и эпюра передачи количества движения)

В коллекторе всегда наблюдается 2-фазное, несмешиваемое движение веществ, находящихся в разных агрегатных состояниях (жидком и газообразном).

Движение сточной жидкости по коллекторам подробно рассмотрено в различных изданиях [58, 93, 117], является понятным физическим процессом и не требует дальнейшего разъяснения.

Как уже было отмечено, движение газообразной среды в коллекторе происходит за счет (рисунок 2.2):

- увлекающей способности жидкости (эпюра распределения скоростей газообразной среды 1). Сточная жидкость передает количество движения газообразной среде, тем самым вовлекая её в движение вдоль коллектора по направлению течения жидкости. Данная сила является поверхностной силой. Более подробно данный вопрос рассмотрен в разделе 2.2;

- разности удельного веса газа между порталами участка коллектора (эпюра распределения скоростей газообразной среды 2). За счет разности удельного веса газа между порталами участка коллектора часть потенциальной энергии давления переходит в кинетическую энергию потока газообразной среды, тем самым вовлекая её в движение вдоль коллектора. Естественная тяга. Направление движения зависит от направления градиента давления. На рисунке 2.2 эпюра распределения скоростей газообразной среды 3 показывает направление движения потока газообразной среды за счет увлекающей способности жидкости и естественной тяги (попутное движение). Данная сила является массовой силой. Её расчет подробно рассмотрен в разделе 2.3.

При попутном направлении потоков газообразной среды, побужденных к движению за счет поверхностной и массовой сил соответственно, распределение скоростей потока газообразной среды будет выглядеть согласно эпюре 3.

Поверхностная сила оказывает воздействие на газообразную среду в момент движения сточной жидкости по коллектору. Другими словами, движение газообразной среды за счет увлекающей способности жидкости постоянно во времени и направлении, изменяемо в малом диапазоне расходов (при $h/D = 0,2-0,8$), увлекает в движение часть газообразной среды коллектора, зависит от скорости сточной жидкости на поверхности потока, гидравлического уклона, заполнения коллектора.

Массовая сила оказывает свое действие на газообразную среду в случае разности удельного веса газа между порталами участка коллектора. При этом движение газообразной среды носит непостоянный характер как в направлении действия, так и в величине воздействия на газообразную среду, изменяемо в большом диапазоне

расходов, увлекает в движение всю газообразную среду коллектора и зависит от конструктивных особенностей участка коллектора и сети в целом, температуры дневной поверхности и других факторов.

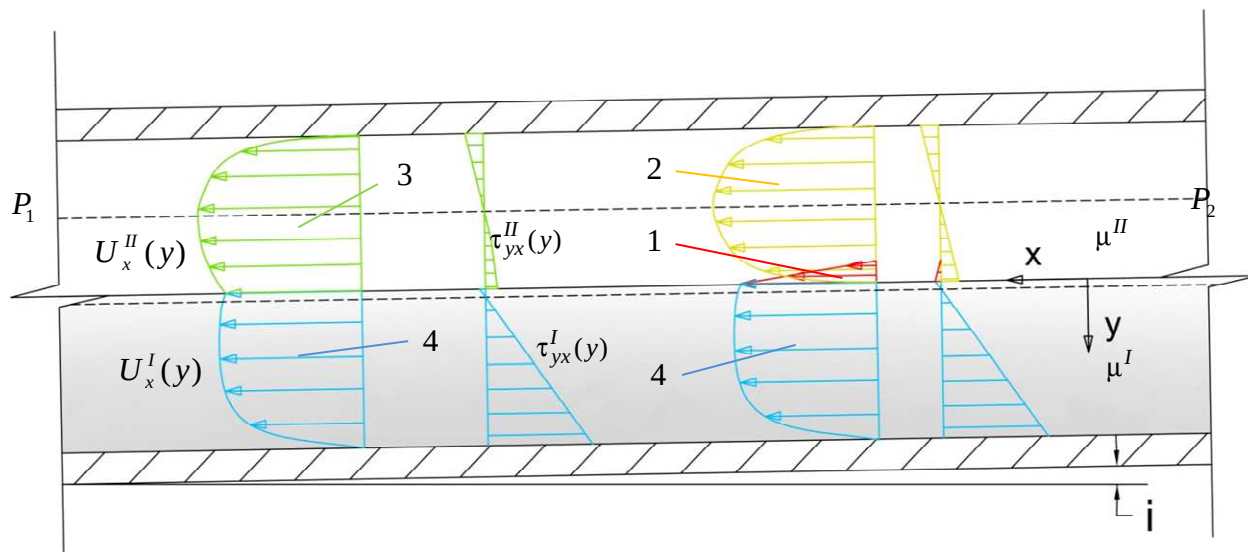


Рисунок 2.2 – Расчетная схема 2-фазного движения сточной жидкости и газообразной среды: 1 — эпюра распределения скоростей газообразной среды, движущейся под действием увлекающей способности жидкости; 2 — эпюра распределения скоростей газообразной среды, движущейся под действием разности удельного веса газа между 2 порталами участка коллектора; 3 — эпюра распределения скоростей газообразной среды, движущейся под действием увлекающей способности жидкости и разности удельного веса газа между порталами участка коллектора; 4 — эпюра распределения скоростей сточной жидкости, движущейся под действием гравитационной силы

При совместном действии поверхностных и массовых сил на газообразную среду силы оказывают положительное воздействие друг на друга при попутном направлении действия сил и отрицательное — при разнопутном действии сил. Как правило, соотношения количества потока газообразной среды, движущегося по коллектору за счет поверхностной силы, и потока, движущегося по коллектору за счет массовой силы, распределяются в диапазоне от 1:1 до 1:20. Поэтому, ввиду незначительности поверхностных сил, а также их полной зависимости от гидравлики потока сточной жидкости и её количества, их можно рассматривать в качестве имеющих место в организации движения потока газообразной среды, но не влияющих на характер потока и его регулирование.

Массовые силы носят иной характер, могут достигать больших значений, возможно регулирование как их количества, так и направления действия, они не зависят от потока сточной жидкости, а следовательно, более просты в регулировании, имеют более сложную «природу» и поэтому являются объектом более объемного изучения.

2.2 Расчет количества газообразной среды, движущейся в самотечных канализационных коллекторах под действием увлекающей способности жидкости

Из всех вышеперечисленных способов побуждения движения воздуха увлекающая способность жидкости есть всегда, поэтому движение воздуха в ТКГЗ существует всегда. Это связано не только с увлекающей способностью жидкости, но и с регулярными колебаниями уровня жидкости в ТКГЗ, увеличивающими и уменьшающими объем подсводного пространства, тем самым вовлекаящими газ в движение или наоборот выталкивающими его на дневную поверхность.

Рассматривая вопрос увлечения газовой среды потоком жидкости в самотечных канализационных коллекторах, авторы в своих работах [24, 37] писали, что режим распределения скорости по сечению трубы может быть описан уравнением Навье-Стокса для установившегося движения следующего вида [68]

$$\frac{dP}{dX} = \mu_B \frac{d^2 U}{dy^2} \quad (2.1)$$

где $\frac{dP}{dx}$ — изменение давления воздуха по оси движения, кг/м³;

μ_B — коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с;

y — расстояние от поверхности жидкости до рассматриваемой точки, м;

U — скорость вещества в рассматриваемой точке, м/с.

При интегрировании уравнения (2.1) были приняты граничные условия: при $y=0$ $U=V_{в.пов}$ (осевая скорость течения жидкости на поверхности); при $y=h_b$ $U=0$ (скорость на своде трубы). В результате расчета получим эпюру распределения скоростей параболического вида (рисунок 2.3).

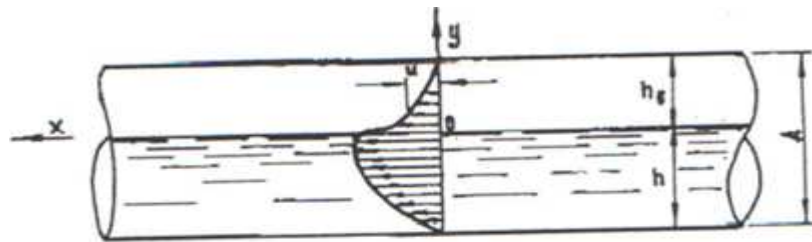


Рисунок 2.3 – Эпюра распределения скорости в газообразной среде и водном потоке по формуле 2.2

В соответствии с полученными результатами была рассчитана эмпирическая формула для определения средней скорости движения газообразной среды, увлекаемой потоком сточной жидкости (1.6) [17]

В предлагаемом уравнении Навье-Стокса (2.1) в левой части уравнения $\frac{dP}{dx}$ обозначает изменение давления газовой среды по оси движения. Остается непонятным, почему в уравнении, описывающем количество воздуха, увлекаемого потоком жидкости, присутствует дифференциал изменения давления. Также не обосновывается принятие граничных условий интегрирования.

Процесс увлечения газовой среды потоком сточной жидкости можно математически описать при помощи закона вязкости Ньютона, который описывает процесс передачи количества движения от движущейся пластины к жидкости (2.2) [7]

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{Y} \quad (2.2)$$

где F — сила, приложенная к увлекаемому потоку, $1 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$;

A — поверхность соприкосновения двух несмешивающихся потоков, м^2 ;

μ — динамическая вязкость увлекаемого потока, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

V — скорость увлекаемого потока на расстоянии Y от поверхности раздела двух фаз, $\text{м}/\text{с}$;

Y — расстояние между поверхностью раздела двух фаз и увлекаемым потоком, м .

Движущаяся сточная жидкость в направлении оси X со скоростью V передает газообразной среде некоторое количество движения, в результате чего в газообразной среде устанавливается стационарный профиль скорости (рисунок 2.4).

Из (2.2) видно, что скорость течения слоя уменьшается пропорционально увеличению расстояния Y . Коэффициент пропорциональности μ называется коэффициентом динамической вязкости или просто динамической вязкостью вещества.

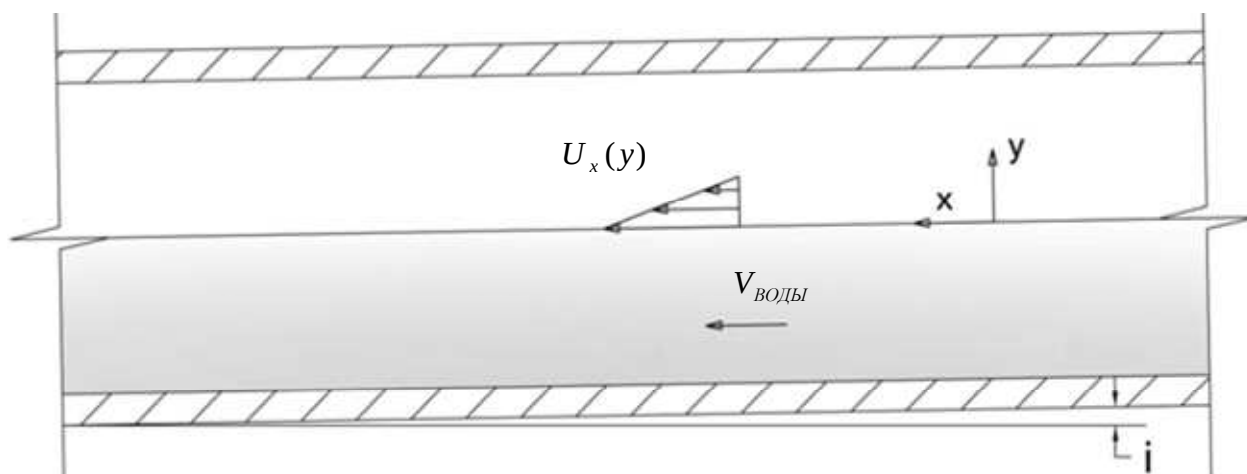


Рисунок 2.4 – Формирование стационарного профиля скорости газообразной среды, увлекаемого движущейся сточной жидкостью

Для дальнейшего изложения полезно переписать уравнение (2.2) в более полном виде. Касательное напряжение, прилагаемое в направлении X к поверхности слоя жидкости, расположенного на расстоянии y от поверхности жидкости, обозначим через τ_{xy} , а компонент вектора скорости жидкости по координате X — через U_x . Тогда в приведенных обозначениях уравнение можно переписать следующим образом

$$\frac{F}{A} = \tau_{xy} \quad (2.3)$$

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{dU_x}{dy} \quad (2.4)$$

где τ_{xy} — касательное напряжение, Па;

μ — динамическая вязкость потока газа, Па·с.

Интегрируя последнее уравнение, получим

$$U_x = \left(-\frac{\tau_{xy}}{\mu} \right) \cdot y + C \quad (2.5)$$

Для определения константы интегрирования воспользуемся следующим граничным условием. Перенос количества движения происходит без скачка на границе раздела двух фаз:

при $y=0$ $U_x = V_{\text{В.ПОВ}}$

Перепишем уравнение (2.5)

$$U_x = \left(-\frac{\tau_{xy}}{\mu} \right) \cdot y + V_{\text{В.ПОВ.}} \quad (2.6)$$

Для определения распределения скорости потока газообразной среды, увлекаемой потоком движущейся жидкости, необходимо знать распределение количества движения, передаваемого от движущейся сточной жидкости газообразной среде (рисунок 2.5)

$$\frac{F}{A} = \tau_{xy}^{\text{II}} = \rho g h_i \quad (2.7)$$

где τ_{xy}^{II} — касательное напряжение между потоком сточной жидкости и газом, Па;

ρ — плотность увлекаемого потока, кг/м³;

h_i — потери по длине, м;

g — ускорение свободного падения м/с².

Уравнение (2.7) примет следующий вид

$$\frac{F}{A} = \tau_{xy} = \rho g h_i \quad (2.8)$$

Уравнение (2.6) применительно к рисунок 2.5 следует переписать в виде [74]

$$U_x^{\text{II}} = V_{\text{В.ПОВ}} - \frac{\rho \cdot g \cdot h_i}{\mu} \cdot y \quad (2.9)$$

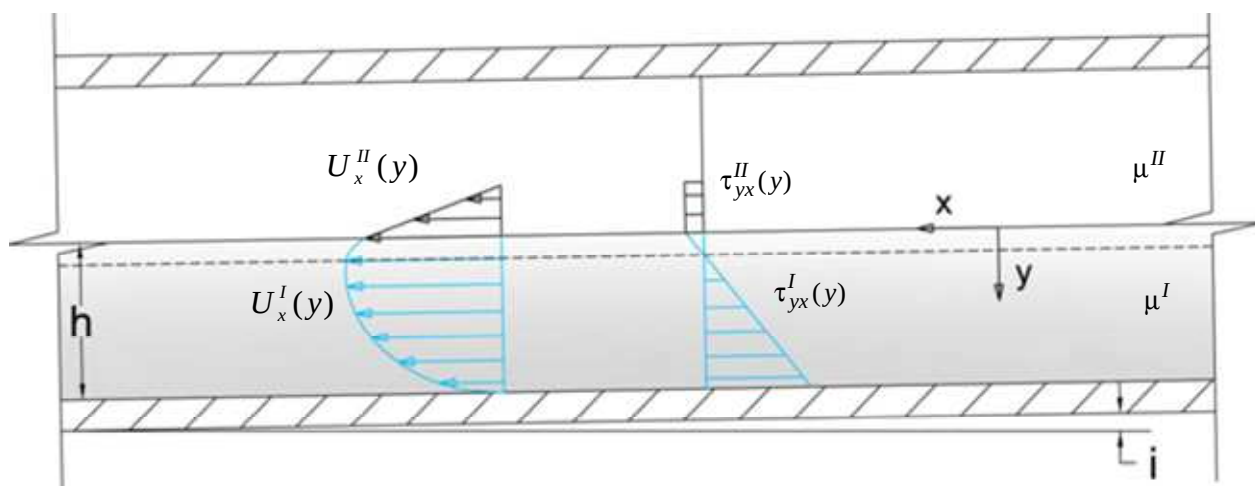


Рисунок 2.5 – Эпюры распределения скорости и передачи количества движения в газообразной среде и водном потоке согласно закону вязкости Ньютона

Уравнение (2.9) описывает распределение скорости течения газообразной среды по оси y , движущейся по самотечному коллектору вдоль оси X под действием только увлекающей способности жидкости,

где U_x^{II} — скорость газообразной среды в рассматриваемой точке, м/с;

$V_{\text{В.ПОВ}}$ — скорость сточной жидкости на поверхности, м/с.

При этом количество газообразной среды, увлекаемое потоком жидкости, для самотечного канализационного коллектора, не имеющего на своем пути местных сопротивлений, будет равно

$$Q_{\Gamma} = \frac{V_{\text{В.ПОВ}}^2 \cdot d \cdot \mu^{\text{II}}}{2\rho g h_i}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (2.10)$$

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

При написании формулы было принято одно допущение: скорость сточной жидкости на поверхности потока одинаковая по ширине коллектора.

Данная теоретическая формула учитывает все факторы, влияющие на количество увлекаемой газообразной среды потоком жидкости, такие как степень заполнения коллектора, поверхностная скорость течения жидкости, площадь соприкосновения двух фаз, плотность и динамическая вязкость газообразной среды.

Проверка размерности

$$Q_{\Gamma} = \frac{1 \frac{м^2}{с^2} \cdot 1м \cdot 1Па \cdot с}{1Па} = 1 \frac{м^3}{с} \quad (2.11)$$

Уравнение (2.10) позволяет определять количество газообразной среды, движущейся в подсводном пространстве канализационного коллектора под действием увлекающей способности сточной жидкости. Уравнение (2.9) является составляющей для других более полных формул, учитывающих массовые силы (2.26) – (2.29). Уравнение (2.9), в том числе, в составе уравнений (2.26) – (2.29) показало хорошую сходимость результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными. Результаты расчета представлены в разделах 3.1 и 3.3.

2.3 Расчет количества газообразной среды, движущейся в самотечных канализационных коллекторах под действием естественной тяга

Движение газообразной среды в подсводном пространстве канализационного коллектора возможно за счет естественной тяги, которая возникает при разности удельного веса газа между двумя концами участка канализационного коллектора [59, 81] (рисунок 2.6)

$$|P_O - P_L| = \Delta P, \quad (2.12)$$

где P_O и P_L — давление на концах расчетного участка, Па.

Для решения данной задачи рассмотрим течение газообразной среды в направлении X в тонкой щели длиной L, наполовину заполненной жидкостью, которая находится в состоянии равновесия (рисунок 2.6).

Примем следующие упрощения:

- изменением температуры и плотности газа по длине коллектора пренебрегаем;
- система статична, то есть не зависит от времени;
- $U = \text{const}$ не зависит от времени и координаты x.

Баланс количества движения, записанный для тонкого слоя, приводит к следующему дифференциальному уравнению [7]

$$\frac{d\tau_{yx}}{dx} = \frac{P_O - P_L}{L}, \quad (2.13)$$

где L — длина расчетного участка канализационного коллектора, м.

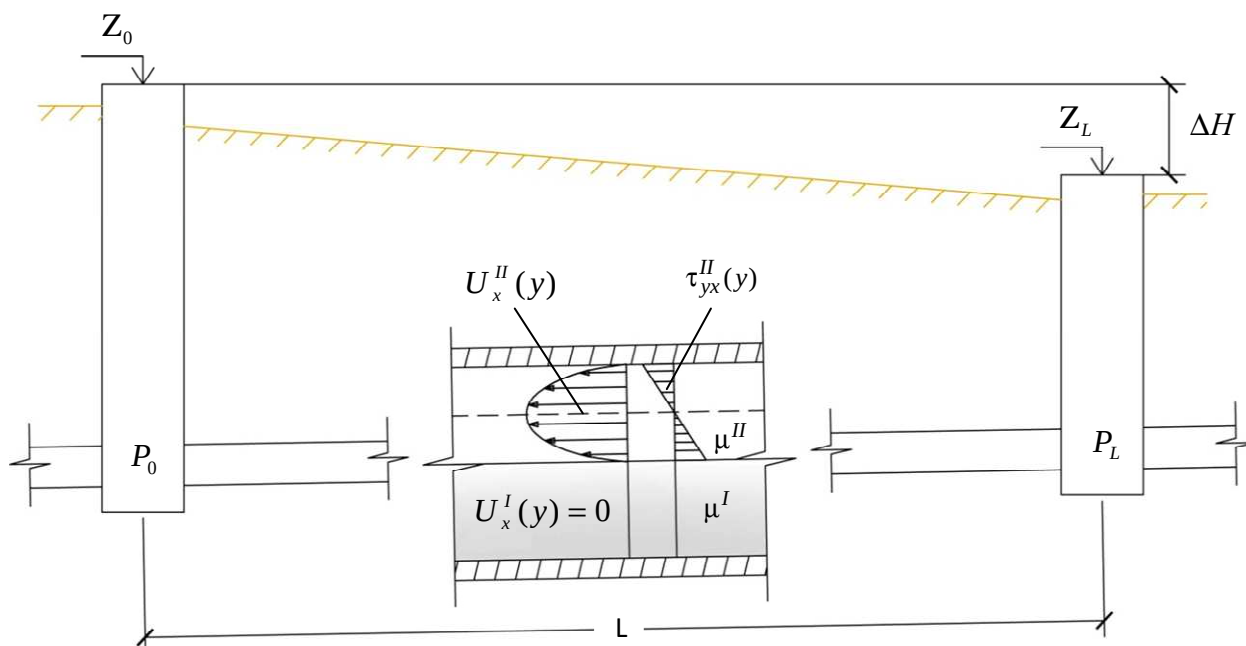


Рисунок 2.6 – Эпюры распределения скоростей газообразной среды по оси коллектора, движущейся только под действием естественной тяги

Количество газовой среды, движущееся в подсводном пространстве канализационного коллектора под действием естественной тяги, можно определить, решив дифференциальное уравнение [65, 73]

$$Q_{B.} = \int_0^{180^\circ} \int_0^{R \sin \alpha} \left(\frac{(P_2 - P_1) R \cdot \sin \alpha \cdot y}{2\mu L} - \frac{(P_2 - P_1) y^2}{2\mu L} \right) d\alpha dy, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.14)$$

где R — радиус канализационного коллектора, м.

Уравнение (2.14) справедливо при $h/D=0,5$. Расчетная схема на рисунке 2.7.

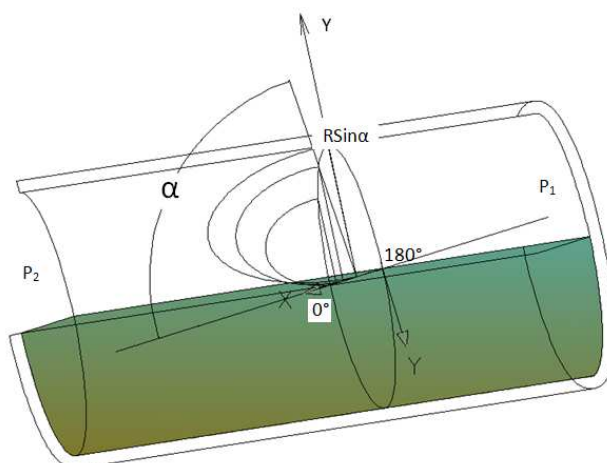


Рисунок 2.7 – Расчетная схема движения газа в коллекторе под действием естественной тяги

Анализируя полученное дифференциальное уравнение, можно сделать вывод, что количество газообразной среды, движущейся в подсводном пространстве канализационного коллектора, не зависит от шероховатости стенок канализационного

коллектора. Это объясняется тем, что скорость крайнего слоя газообразной среды, расположенного непосредственно у стенки безнапорного, самотечного, канализационного коллектора, равна нулю. Стенки безнапорного, самотечного, канализационного коллектора влияют на количество газообразной среды, движущейся в подсводном пространстве, стесняя и деформируя эпюру скоростей потока газообразной среды (рисунок 2.6- 2.8).

Движение газовой среды в подсводном пространстве канализационного коллектора только под действием естественной тяги возможно лишь в том случае, если скорость сточной жидкости будет равна нулю [81] (рисунок 2.6, 2.8). Это возможно только при отключении канализационного коллектора (вывода его из работы), поэтому подробное рассмотрение данной ситуации (когда коллектор не эксплуатируется) не имеет смысла.

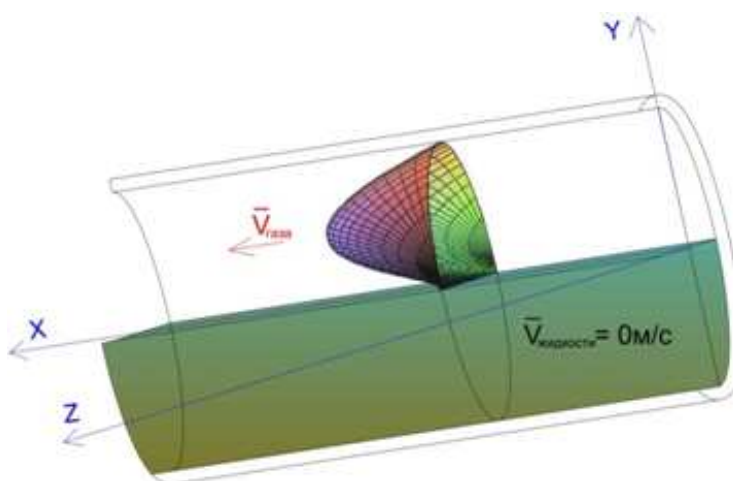


Рисунок 2.8 – Эпюра распределения скоростей газа в коллекторе, движущейся под действием естественной тяги. Расчет произведен по (2.27) в программе MAPL 14

Учитывая, что уравнение (2.14) можно использовать для расчета количества газа только при скорости жидкости на поверхности потока равной нулю, то можно сделать вывод, что уравнение имеет только теоретический интерес для дальнейшего исследования.

2.4 Расчет количества газообразной среды, движущейся в самотечных канализационных коллекторах под действием увлекающей способности жидкости и естественной тяги

Рассмотрим совместное движение двух несмешивающихся веществ — жидкости и газообразного вещества в тонкой щели длиной L и шириной dz (рисунок 2.9), где газообразная среда движется под влиянием градиента давления и увлекающей способности жидкости. При этом щель частично заполнена водой и частично газообразной средой. Требуется найти уравнение, описывающее распределение скорости газа по коллектору и количества движения.

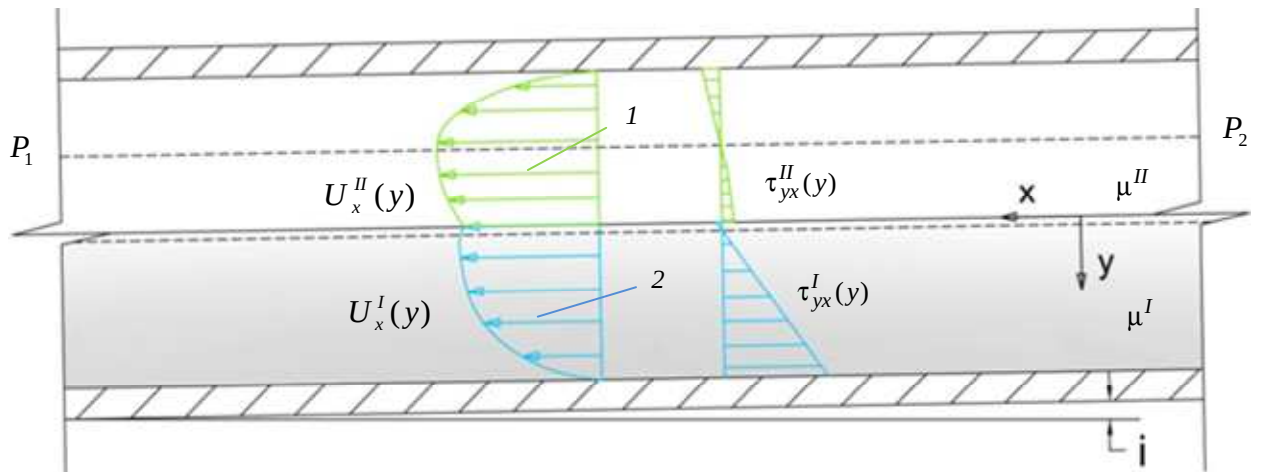


Рисунок 2.9 – Движение двух несмешивающихся веществ жидкости и газообразной среды в тонкой щели: 1 — эпюра распределения скоростей газообразной среды, движущейся под действием увлекающей способности жидкости и разности удельного веса газа между двумя порталами участка коллектора; 2 — эпюра распределения скоростей сточной жидкости, движущейся под действием гравитационной силы

Запишем основное уравнение Навье-Стокса динамики вязкого газа [68] (2.15)

$$\begin{aligned} \rho \frac{dU}{dt} &= \rho F_x - \frac{\partial P}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \cdot \text{div} \mathbf{v}); \\ \rho \frac{dV}{dt} &= \rho F_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\mu \cdot \text{div} \mathbf{v}); \\ \rho \frac{dW}{dt} &= \rho F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\mu \cdot \text{div} \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Так как движение газа установившееся, происходит вдоль оси X, составляющими уравнения (2.15) Y и Z мы пренебрегаем [104].

Далее запишем уравнение (2.15) применительно к нашей задаче:

$$\rho \frac{dU}{dt} = 0, \text{ скорость } U = \text{const и не зависит от времени};$$

$$\rho F_x = 0, \text{ по оси } X \text{ на газ массовые силы уравновешены};$$

$$2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) = 0, U = \text{const и не зависит от } X;$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial U}{\partial y} \right], \text{ потому что } \frac{\partial V}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] = 0, \text{ скорость } U \text{ не зависит от } Z \text{ и скорость } W \text{ не зависит от } X;$$

$$\frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \cdot \text{div} \mathbf{v}) = 0, \text{ при малых скоростях движения газа этот параметр равен нулю [68].}$$

Уравнение (2.15) примет вид

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial y} \right). \quad (2.16)$$

Ввиду малой разности давления в начале и конце расчетного участка (выше) [7] справедливо следующее уравнение

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{P_2 - P_1}{L}, \quad (2.17)$$

где L — длина расчетного участка коллектора, м;

$P_2 - P_1$ — разность давления на концах участка коллектора, Па.

Учитывая уменьшение давления по ходу движения газа (2.16) примет вид

$$\frac{P_2 - P_1}{L} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial y} \right). \quad (2.18)$$

Интегрирование этого уравнения для области течения газа дает

$$-\mu \frac{\partial U}{\partial y} = \left(\frac{P_2 - P_1}{L} \right) y + C_1. \quad (2.19)$$

Интегрирование уравнения (2.19) приводит к соотношению

$$U = -\frac{(P_2 - P_1)}{2\mu L} y^2 - \frac{C_1}{\mu} y + C_2. \quad (2.20)$$

В результате появились две константы интегрирования, которые могут быть определены на основании следующих двух дополнительных граничных условий

при $y = 0$ и при $y = b$,

где b — высота подсводного пространства коллектора.

Для определения одного из них воспользуемся одним из граничных условий — перенос количества движения происходит без скачка на поверхности раздела двух фаз

при $y = 0$ $U = V_{\text{в.пов.}}$.

Скорость потока вблизи стенки коллектора равна нулю

при $y = b$, $U = 0$.

Из этих граничных условий следует

$$C_1 = \frac{V_{\text{в.пов.}} \mu}{b} - \frac{(P_2 - P_1) b}{2L}; \quad (2.21)$$

$$C_2 = V_{\text{в.пов.}}. \quad (2.22)$$

Подставляем полученные константы интегрирования в (2.20)

$$U = \frac{(P_2 - P_1)b}{2\mu L} y - \frac{(P_2 - P_1)}{2\mu L} y^2 - \frac{V_{B.ПОВ.}}{b} y + V_{B.ПОВ.} \quad (2.23)$$

Учитывая природу изменения скорости за счет увлекающей способности жидкости, описанной уравнением (2.9), уравнение (2.23) примет следующий вид

$$U = \frac{(P_2 - P_1)b}{2\mu L} y - \frac{(P_2 - P_1)}{2\mu L} y^2 - \frac{\rho \cdot g \cdot i}{\mu} y + V_{B.ПОВ} \quad (2.24)$$

Если проинтегрировать данное уравнение по dy , получим плоскую эпюру скоростей в подсводном пространстве коллектора (рисунок 2.9, 2.10). При интегрировании уравнения необходимо учитывать границы действия по dy .

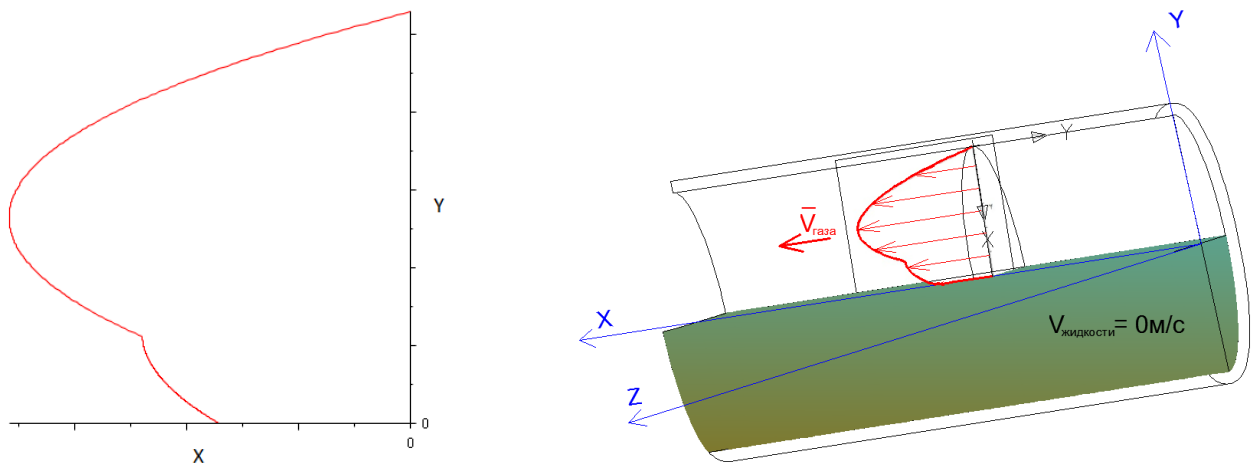


Рисунок 2.10 – Эпюра распределения скоростей газообразной среды в плоскости xu , движущейся под действием увлекающей способности жидкости и естественной тяги. Расчет произведен по (2.26) в программе MAPL 14

Данное уравнение позволяет определять скорость газа в любой точке плоскости считая, от уреза воды до подсводной части коллектора (на всей высоте b) (рисунок 2.10). Для того чтобы определить скорость газа в любой точке подсводного пространства коллектора, заменим высоту подсводного пространства через радиус (рисунок 2.11)

$$b = \sqrt{R^2 - z^2}$$

Заменив « b » в уравнении (2.24), мы получим

$$U = \frac{(P_2 - P_1)\sqrt{R^2 - z^2}}{2\mu L} y - \frac{(P_2 - P_1)}{2\mu L} y^2 - \frac{\rho \cdot g \cdot i}{\mu} y + V_{B.ПОВ} \quad (2.25)$$

Теперь может быть рассчитано значение количества газообразной среды, движущееся в подсводном пространстве канализационного коллектора под действием увлекающей способности жидкости и естественной тяги. Уравнение (2.26) для $0,0 < h/D < 0,5$ и уравнение (2.27) для $0,5 < h/D < 1$ [72]

$$Q = \int_0^{\sqrt{R^2-z^2}-(h-R)} \int_{-r}^r \left(\frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h - R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} \right) dydz + \int_0^{\frac{V_{\text{воды}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r \left(V_{\text{Б.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} \right) dydz +$$

$$+ 2 \cdot \int_0^{2\sqrt{R^2-z^2}} \int_r^R \left(\frac{(P_2 - P_1) \cdot 2 \cdot \sqrt{R^2 - z^2}}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} \right) dydz \quad (2.26)$$

$$Q = \int_0^{\sqrt{R^2-z^2}-(h-R)} \int_{-r}^r \frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h - R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dydz + \int_0^{\frac{V_{\text{воды}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r V_{\text{Б.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} dydz \quad (2.27)$$

где r — половина ширины потока сточной жидкости (рисунок 2.11), м.

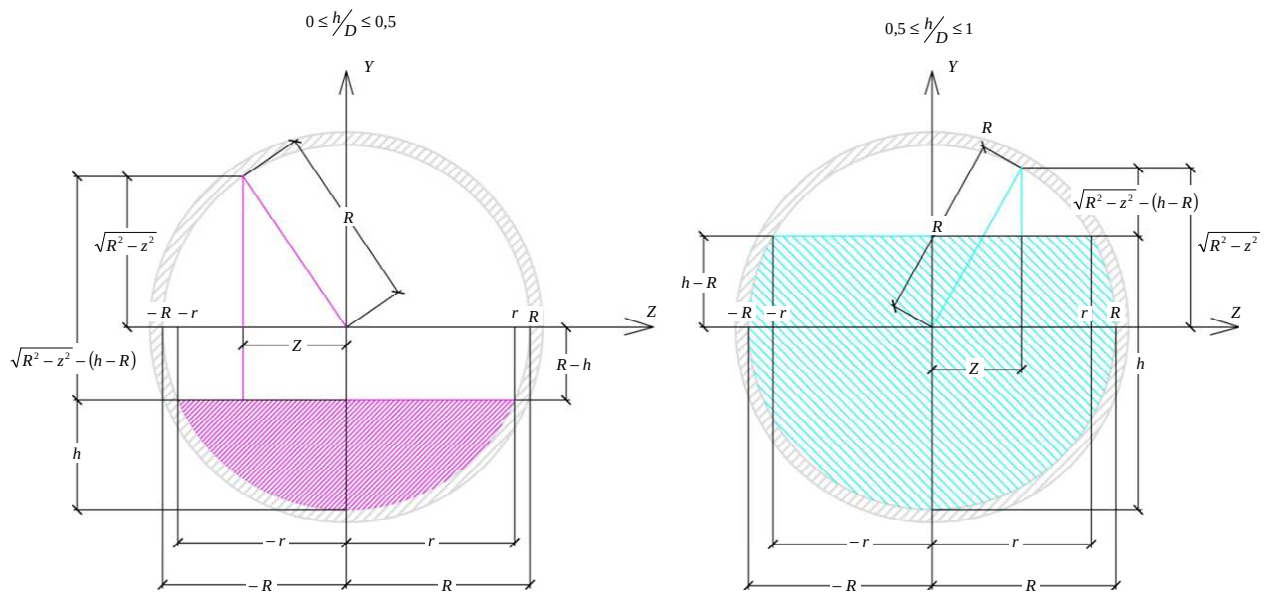


Рисунок 2.11 – Расчетная схема канализационного коллектора в осях yz

Дифференциальные уравнения (2.26) и (2.27) позволяют производить расчет количества газообразной среды, движущейся в подсводном пространстве канализационного коллектора под действием увлекающей способности жидкости и естественной тяги при попутном направлении течения потока сточной жидкости и действия естественной тяги (рисунок 2.12), в противном случае уравнения примут следующий вид. Уравнение (2.28) для $0,0 < h/D < 0,5$ и уравнение (2.29) для $0,5 < h/D < 1$ [74]

$$Q = \int_0^{\frac{V_{\text{воды}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r V_{\text{Б.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} dydz - \int_0^{\sqrt{R^2-z^2}-(h-R)} \int_{-r}^r \frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h - R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dydz -$$

$$- 2 \cdot \int_0^{2\sqrt{R^2-z^2}} \int_r^R \frac{(P_2 - P_1) \cdot 2 \cdot \sqrt{R^2 - z^2}}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dydz \quad (2.28)$$

$$Q = \int_0^{\frac{V_{\text{водн}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r V_{\text{Б.ПОР}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} dy dz - \int_0^{\sqrt{R^2 - z^2} - (h-R)} \int_{-r}^r \frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h-R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dy dz \quad (2.29)$$

Если значение Q , рассчитанное по (2.28) и (2.29) будет со знаком «минус», то значит газ будет двигаться против движения потока сточной жидкости.

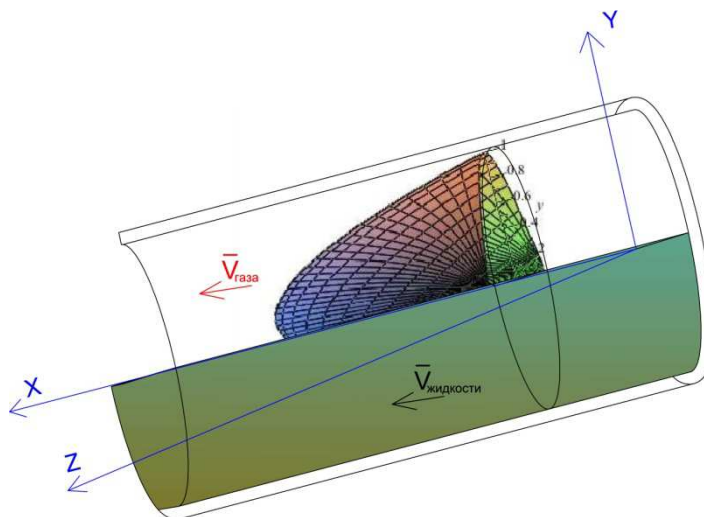


Рисунок 2.12 – Эпюра распределения скоростей газообразной среды в коллекторе, движущейся под действием увлекающей способности жидкости и естественной тяги. Расчет произведен по (2.26) в программе MAPL 14

2.5 Теоретическое исследование, расчет количества депрессии в КС глубокого заложения

Одной из сил, побуждающих в движение газообразную среду, находящуюся в подсводном пространстве канализационного коллектора, является разность давления ΔP на концах расчетного участка канализационного коллектора — естественная тяга [81].

Более тяжелый, холодный наружный воздух с температурой $t_{\text{нв}}^{\circ}$ и плотностью $\rho_{\text{нв}}$ поступает в приточную шахту. Далее двигаясь по шахте, увеличивает свою температуру до $t_{\text{кол}}^{\circ}$ или близкой к ней и уменьшает плотность до $\rho_{\text{кол}}$, то есть становится более легким. Затем воздух движется по коллектору, где сохраняет свою температуру, равную $t_{\text{кол}}^{\circ}$ и попадает в вытяжную шахту. В процессе движения по вытяжной шахте, воздух охлаждается, и становится более тяжелым. У выхода из вытяжной шахты температура воздуха достигает температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}^{\circ}$ и соответствующей плотности $\rho_{\text{нв}}$ (Рис. 2.13).

Естественная тяга (движение воздуха) между приточным и вытяжным киосками возможна только при условии, если удельный вес воздуха на выходе будет меньше, чем удельный вес воздуха на входе (рисунок 2.13).

Другими словами, естественная тяга может возникать только при условии

$$t_{HB.}^o \neq t_{КОЛ.}^o \quad (2.30)$$

$$\rho_{HB.} \neq \rho_{КОЛ.} , \quad (2.31)$$

где [101] $t_{HB.}^o$ — температура воздуха на дневной поверхности, К;

$t_{КОЛ.}^o$ — температура газообразной среды в подсводном пространстве канализационного коллектора, К;

$\rho_{HB.}$ — плотность воздуха на дневной поверхности, кг/м³;

$\rho_{КОЛ.}$ — плотность газообразной среды в подсводном пространстве канализационного коллектора, кг/м³.

То есть она возникает практически всегда.

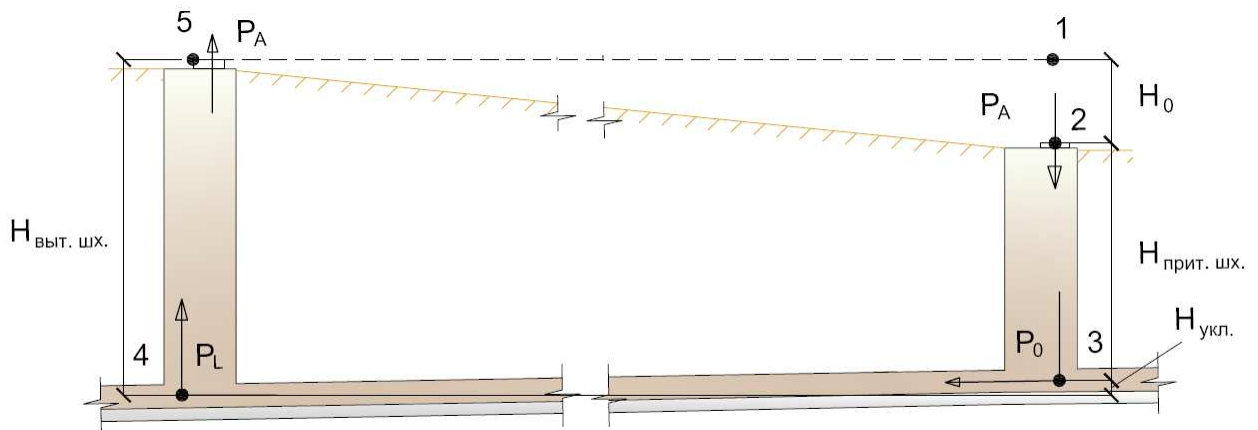


Рисунок 2.13 – Расчетная схема

Как было сказано ранее, естественная тяга возникает ввиду разности давления на концах расчетного участка (P_1 и P_2). Давление на концах участка можно определить, воспользовавшись основным уравнением гидростатики

$$P = \rho gh \quad [120] \quad (2.32)$$

Соответственно, разность давления на расчетном участке можно записать в следующем виде [63]

$$\Delta P = P_1 - P_2 = g(\rho_1 h_1 - \rho_2 h_2) \quad (2.33)$$

где h_1 и h_2 — высота шахты 1 и 2 соответственно, м.

Разность произведений, заключенную в скобках, можно изобразить графически (рисунок 2.14).

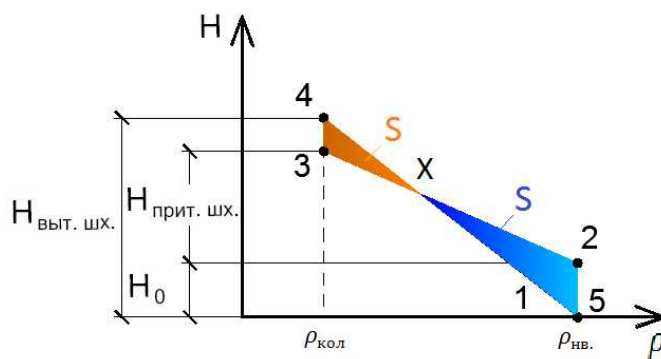


Рисунок 2.14 – Графическое представление изменения плотности газообразной среды при движении по участку канализационного коллектора

Газообразная среда поступает в приточную шахту в точке «2» (рис. 2.13) с плотностью газообразной среды $\rho_{\text{нв.}}^1$. Далее, в процессе движения газообразной среды по приточной шахте, происходит увеличение температуры газообразной среды до температуры подсводной части коллектора, а, следовательно, уменьшение плотности газообразной среды. Увеличение температуры идет по линейному закону, согласно закону теплопроводности [7]

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{Y} \quad (2.34)$$

где q — приток тепла на единицу площади, Вт/м²;

λ — коэффициент теплопроводности слоя, Вт/(м·К);

ΔT — разность температур между наружным воздухом и газообразной средой расположенной в подсводном пространстве канализационного коллектора, К;

Y — высота приточной шахты, м.

В зависимости от индивидуальных особенностей шахты, а также от разности температур наружного воздуха и подсводной газообразной среды выравнивание температур происходит выше или ниже вдоль ствола шахты. Другими словами, увеличение температуры до температуры подсводного пространства коллектора происходит именно в приточной шахте. Данное утверждение основано на результатах натурных экспериментов, проведенных на кафедре гидравлики в СПбГАСУ под руководством д.т.н., проф. В. М. Васильева в 1980–1990 гг. Температура воздуха в подсводной части канализационного коллектора на всем его протяжении остается постоянной (участок от точки «3» до точки

¹ Рассуждения имеют смысл при выполнении условия $t_{\text{н.в.}}^{\circ} < t_{\text{кол}}^{\circ}$ (температура воздуха на дневной поверхности ниже температуры газообразной среды, расположенной в подсводном пространстве канализационного коллектора, рассматриваемого участка).

«4») (рисунок 2.14). Далее газообразная среда поднимается по вытяжной шахте и в процессе движения остывает до температуры наружного воздуха.

Малый (рыжий) треугольник (4-X-3) (рисунок 2.14) оказывает отрицательное воздействие на количество естественной тяги, то есть противодействует движению воздуха. Большой (синий) треугольник (2-5-1-X) способствует движению газообразной среды в подсводном пространстве коллектора. Разность площадей этих треугольников равна разности произведений плотности и высоты на концах расчетного участка

$$\Delta S = S_{\text{синий}} - S_{\text{рыжий}} = (\rho_1 h_1 - \rho_2 h_2) \quad (2.35)$$

где h_1 и h_2 – высота шахты 1 и 2 соответственно, м;

ρ_1 и ρ_2 – плотность газа в шахтах 1 и 2 соответственно, кг/м³.

Тогда естественную тягу можно определить по формуле

$$\Delta P = g \cdot \Delta S \quad (2.36)$$

Если площадь рыжего треугольника (4-X-3) будет увеличиваться, то естественная тяга будет уменьшаться до тех пор, пока площадь треугольников не станет равной друг другу. В тот момент, когда площадь рыжего треугольника (4-X-3) станет больше площади синего треугольника (2-5-1-X), произойдет опрокидывание тяги, другими словами, движение газообразной среды будет идти в противоположном направлении.

Более понятная зависимость представлена на графике (H-t) (рисунок 2.15).

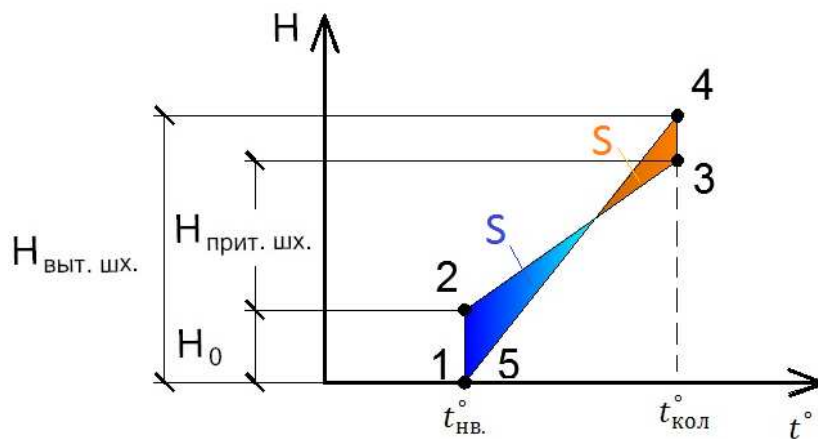


Рисунок 2.15 – Графическое изображение разности давления в шахтах на концах участка

Определение площадей треугольников представляет некоторую сложность в связи с большим количеством факторов, влияющих на естественную тягу, а следовательно, и на количество переменных в определении площади треугольников и естественной тяги.

Вопрос определения разности давления ΔP на концах участка изучали на кафедре Гидравлики СПбГАСУ под руководством проф. д.т.н., В. М. Васильева, а также А. Ф.

Воропаев, М. Т. Гайфутдинов. В процессе исследования рассматривались и сравнивались различные методы определения разности давления. Наиболее полно были рассмотрены гидростатический и термодинамический методы [35, 36, 37, 64].

В. М. Васильев и М. Г. Гайфутдинов предлагают зависимость для определения естественной тяги в КС между приточными и вытяжными шахтами [24, 37] (1.7).

Данное уравнение позволяет производить расчет разности давления между двумя концами расчетного участка. Поэтому по данной формуле для определения количества естественной тяги на каждом участке всей КС необходимо решить систему уравнений с количеством уравнений и неизвестных, равных количеству шахт, установленных на КС (рисунок 2.16).

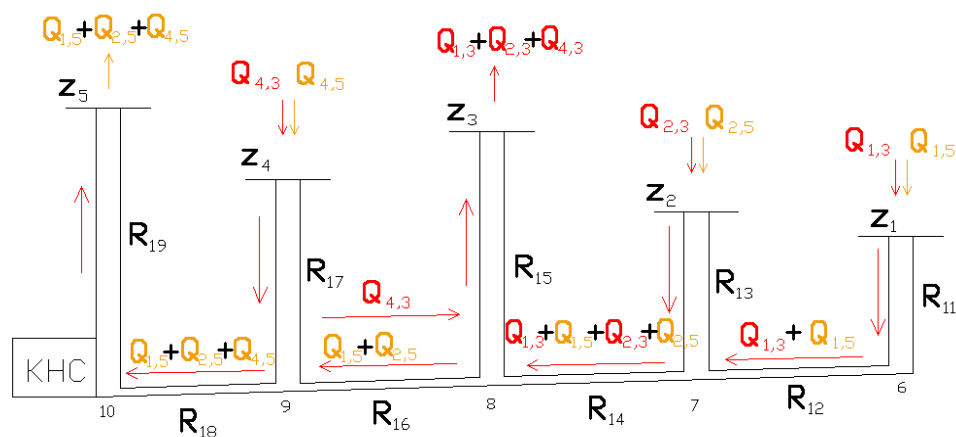


Рисунок 2.16 – Расчетная схема для определения количества газа, движущегося по КС

В существующих расчетах по определению давления на канализационных сооружениях глубокого заложения применяется аналитический метод Лагранжа [63], в основе которого лежит векторное поле скоростей, описывающих движения жидкости², и который ввиду своей сложности не нашел широкого применения в механике жидкости.

Поэтому формула (1.8) для расчета всей КС на практике не применяется ввиду необходимости проведения большого количества математических расчетов.

Более простым способом определения давления в любой точке КС является аналитический метод Эйлера [63], в основе которого лежит потенциальное поле скоростей, описывающее значение скорости потока в статичных точках пространства [117]. Поэтому для расчета аэродинамических параметров КС необходимо производить расчет значения абсолютного давления в каждой канализационной шахте индивидуально.

² Ввиду малых скоростей движения газообразной среды, малого изменения давления по длине движение такой газообразной среды описывается законами движения жидкости.

Для примера рассмотрим участок между двумя шахтами (см. рисунок 2.13). Расчет абсолютного давления производится отдельно для каждой шахты. Зная параметры шахты и исходные данные, можно построить график и произвести расчет значения абсолютного давления в требуемой точке шахты, а в случае необходимости произвести расчет разности давления между любыми смежными шахтами.

На схемах дано наглядное представление описанных процессов (рисунок 2.17). Как видно на схеме, после наложения графиков левой и правой шахты мы получаем рисунок, аналогичный представленному ранее (см. рисунок 2.14).

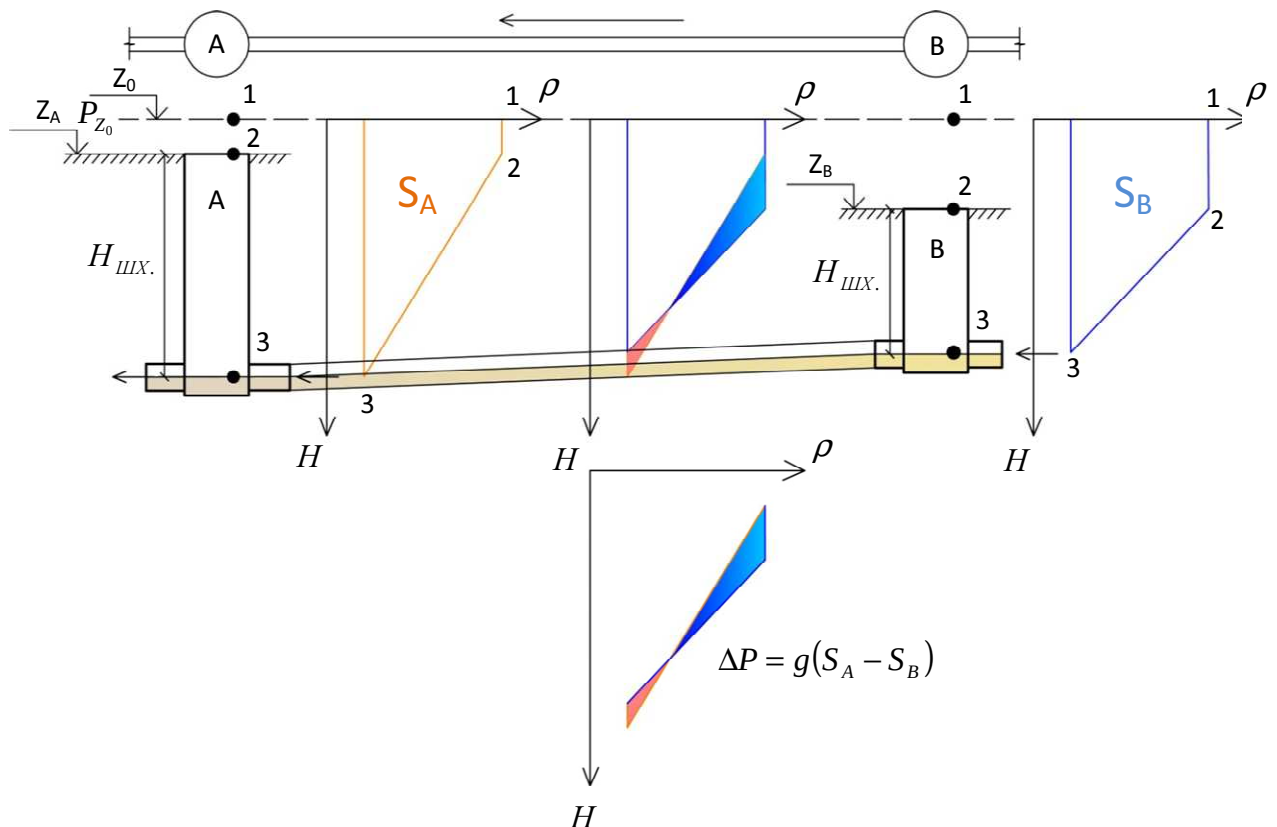


Рисунок 2.17 – Графическое изображение определения разности давления на концах участка

Значение абсолютного давления в стволе шахты зависит от множества параметров: температуры наружного воздуха и коллектора, интенсивности теплопередачи от стенок шахт, конвекции газообразной среды, геометрических параметров шахт и т. д. (рисунок 2.18) [1, 7]. Поэтому вопрос об изменении плотности газообразной среды в процессе движения по шахте необходимо рассмотреть более подробно.

Обозначим радиус шахты через R . Будем считать, что в области $z < 0$, температура воздуха постоянна (обозначим её $T_{н.в.}$), а в области $z > 0$ на внутренней стенке шахты поддерживается постоянное значение теплового потока (обозначим его через q_1), которое определяется по закону охлаждения Ньютона [37] (2.37)

$$q_1 = \alpha(T_{\text{ГАЗА}} - T_{\text{СТЕНЫ}}), \quad (2.37)$$

где q_1 — приток тепла на единицу площади от внутренней стены шахты, Вт/м²;

α — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

$T_{\text{газа}}$ — температура газообразной среды движущейся по коллектору, К;

$T_{\text{стены}}$ — температура внутренней стены шахты, К.

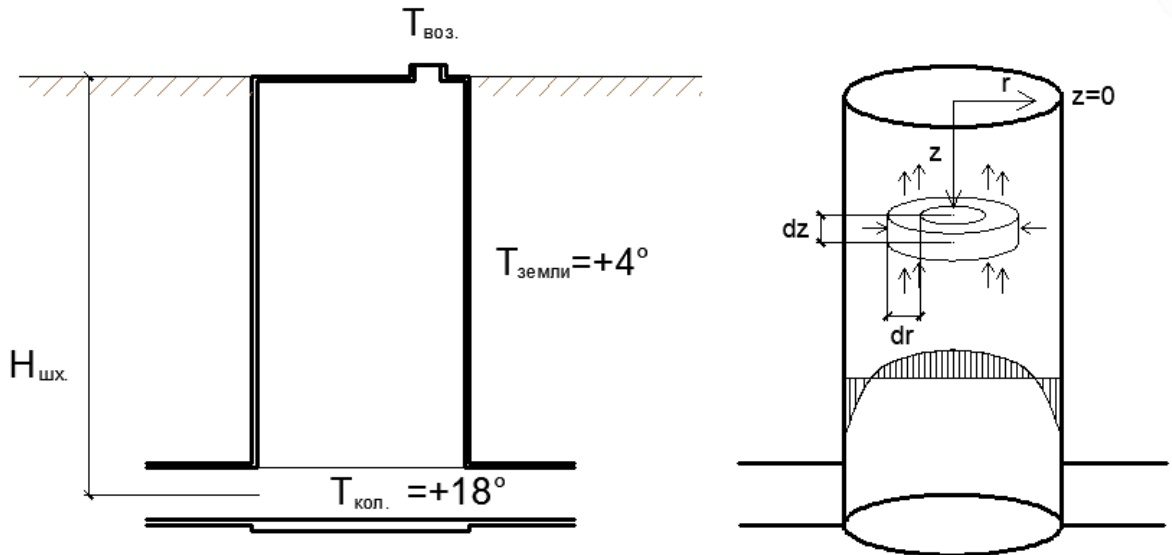


Рисунок 2.18 – Графическое изображение распределения скорости газообразной среды в шахте

Для того чтобы найти распределение температуры по столбу канализационной шахты, необходимо записать баланс тепловой энергии для элементарного объема, имеющего форму кольца, поскольку в рассматриваемой системе температура зависит от двух координат (r и z).

Суммарный баланс энергии будет включать:

Поступление энергии за счет теплопроводности через цилиндрическую поверхность радиуса r

$$q_r|_r 2\pi r \Delta z$$

Отвод энергии за счет теплопроводности через цилиндрическую поверхность радиуса $r + \Delta r$

$$q_r|_{r+\Delta r} 2\pi(r + \Delta r)$$

Поступление энергии за счет теплопроводности через плоскую кольцевую поверхность с координатой z

$$q_z|_z 2\pi r \Delta r$$

Отвод энергии за счет теплопроводности через плоскую кольцевую поверхность с координатой $z + \Delta z$

$$q_z|_{z+\Delta z} 2\pi r \Delta r$$

Поступление энергии вместе с потоком газообразной среды через поверхность с координатой z

$$\rho C_p V_z (T - T_o)|_z 2\pi r$$

Отвод энергии вместе с потоком газообразной среды через поверхность с координатой $z + \Delta z$

$$\rho C_p V_z (T - T_o)|_{z+\Delta z}$$

Приравняем потоки энергии, направленные внутрь выделенного кольцевого элемента объема, потокам энергии, направленным наружу. Полученные преобразования представляют собой уравнение баланса

$$(rq_r|_{r+\Delta r} - rq_r|_r)2\pi\Delta z + (q_z|_{z+\Delta z} - q_z|_z)2\pi\Delta r + \rho C_p V_z (T|_{z+\Delta z} - T|_z)2\pi\Delta r = 0 \quad (2.38)$$

Разделим это уравнение на $2\pi\Delta r\Delta z$

$$\frac{rq_r|_{r+\Delta r} - rq_r|_r}{\Delta r} + \frac{q_z|_{z+\Delta z} - q_z|_z}{\Delta z} + \rho C_p V_z \frac{(T|_{z+\Delta z} - T|_z)}{\Delta z} = 0 \quad (2.39)$$

Так как Δr и $\Delta z \rightarrow 0$, уравнение получит следующий вид

$$\rho C_p V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rq_r) - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (2.40)$$

Используя закон теплопроводности Фурье [120, 70], выразим тепловые потоки q_r и q_z через радиальный и осевые градиенты температуры

$$q_r = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} ; \quad (2.41)$$

$$q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} . \quad (2.42)$$

В результате получим следующие дифференциальное уравнение в частных производных

$$\rho C_p V_{z \max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] . \quad (2.43)$$

Вклад от теплопроводности в направлении z , описываемый членом $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, мал по сравнению с вкладом, пропорциональным $\frac{\partial T}{\partial z}$, поэтому значением члена $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ пренебрегаем. Тогда выражение примет вид

$$\rho C_p V_{z \max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) . \quad (2.44)$$

Для решения данного уравнения, определяющего температуру внутри шахты, зададим следующие граничные условия

$$T < \infty \text{ при } r = 0 ; \quad (2.45)$$

$$q_1 = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \text{ при } r = R ; \quad (2.46)$$

$$T = T_o \text{ при } z = 0 ; \quad (2.47)$$

$$-2\pi R z q_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho C_p (T - T_o) V_z r dr dV . \quad (2.48)$$

Введем безразмерные параметры

$$\theta = \frac{T - T_o}{q_1 \frac{R}{\lambda}} ; \quad (2.49)$$

$$\varepsilon = \frac{r}{R} ; \quad (2.50)$$

$$\zeta = \frac{z \lambda}{\rho C_p V_{z \max} R^2} . \quad (2.51)$$

В новых переменных уравнение для распределения температуры будет

$$(1 - \varepsilon^2) \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\varepsilon \frac{\partial \theta}{\partial \varepsilon} \right) \quad (2.53)$$

Граничные условия в этом случае будут иметь следующий вид

$$\theta < \infty \text{ при } \varepsilon = 0 ; \quad (2.54)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial \varepsilon} = 1 \text{ при } \varepsilon = 0 ; \quad (2.55)$$

$$\theta = 0 \text{ при } \zeta = 0 ; \quad (2.56)$$

$$-\zeta = \int_0^1 \theta(\varepsilon \zeta) (1 - \varepsilon^2) \varepsilon d\varepsilon . \quad (2.57)$$

Зная распределение температуры, можно вычислить среднее значение температурного поля шахты

$$T_{\text{СР.ОБЪЕМА}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^L V_z(r) T(r) r dr dV}{\int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^L V_z(r) r dr dV} . \quad (2.58)$$

Среднее значение температурного поля шахты позволит получить значение веса газообразной среды, а следовательно, разность давления между шахтами КС глубокого заложения. Частным случаем изменения давления являются регулярные колебания уровня сточной жидкости (заполнение коллектора). В данном случае это явление не рассматривается, но имеет регулярный характер в КС за счет неравномерного притока сточной жидкости. Особенно часто оно проявляется в общесплавных системах канализования, где коэффициент неравномерности притока наиболее большой.

2.6 Принудительное движение газообразной среды по канализационной сети при помощи побуждающих систем и сооружений

Вентиляционные установки

Один из вариантов организации газообмена в КС глубокого заложения — использование вентиляционных станций, устанавливаемых в шахте в начале или в конце аэродинамического участка (рисунок 2.19). На сегодняшний день вентиляторы широко применяются в вентиляционных системах различного назначения, в том числе и в вентиляционных системах подземных сетей и сооружений, подобных сооружениям КС, таких как рудники, транспортные тоннели, сооружения метрополитена, а также в канализационных системах зарубежных стран. Описание таких вентиляционных систем есть в различных источниках [8, 31, 33, 34, 41, 52, 54, 56, 59, 60, 70, 105, 115, 119, 129, 134, 135, 150 и др.]. Также существуют различные системы автоматического управления вентиляционными установками [45, 56, 61, 112]. Вентиляционные станции создают разность давления на порталах участка коллектора, что приводит к изменению депрессии на аэродинамическом участке сети и, как следствие, к изменению количества, а может, и направления движения газообразной среды, движущейся по сети.

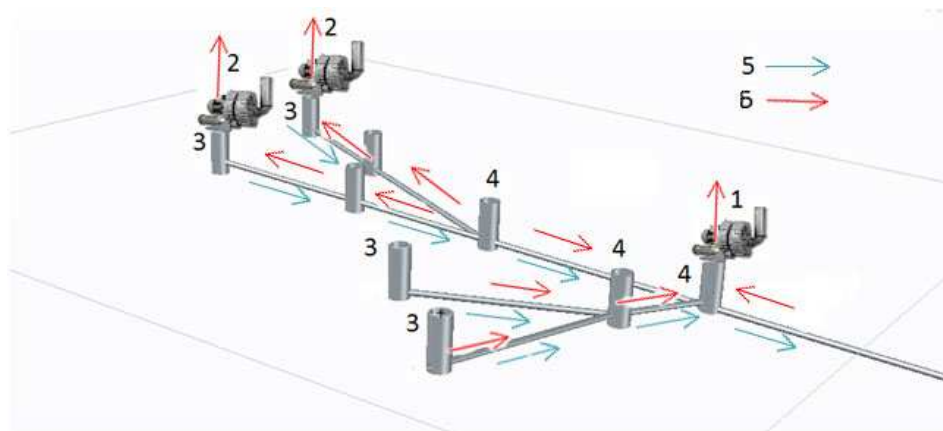


Рисунок 2.19 – Схема КС с организацией газообмена при помощи вентиляционных установок: 1 — вентиляционная станция, установленная в конце аэродинамического участка; 2 — вентиляционная станция, установленная в конце аэродинамического участка в начале коллектора; 3 — начало коллектора; 4 — шахты с подключениями по пути; 5 — направление движения сточной жидкости; 6 — направление движения газов

В подобных сооружениях вентиляционные станции устанавливают на нагнетание воздуха в начале аэродинамического участка, на вытяжку газов — в конце аэродинамического участка. Также вентиляционные установки устанавливают непосредственно в сети (в тоннеле) для перераспределения потока.

Мощность и места установки вентиляторов определяются на основании расчета.

В КС установка вентиляционных станций целесообразна только на вытяжку в конце аэродинамического участка. Установка вентиляторов в начале аэродинамического участка требует герметичности КС на всем протяжении аэродинамического участка, что является невозможным. В противном случае получаем неорганизованные выбросы через неплотности сети, что является недопустимым. Установка вентиляторов по сети также невозможна по ряду вышеописанных проблем, а также в связи с регулярным затоплением КС сточной жидкостью и с воздействием сточной жидкости и АГ.

Учитывая, что вентиляторы, установленные в конце аэродинамического участка, работают на вытяжку и подвержены действию агрессивной среды, следует устанавливать вентиляционные установки, выполненные в защитном исполнении (из материалов, не подверженных коррозии). Установку вентиляционных станций следует производить после фильтра (см. рисунок 1.32). Схема вентиляционной станции, установленной на шахте канализационного коллектора, представлена на рисунке 2.20.

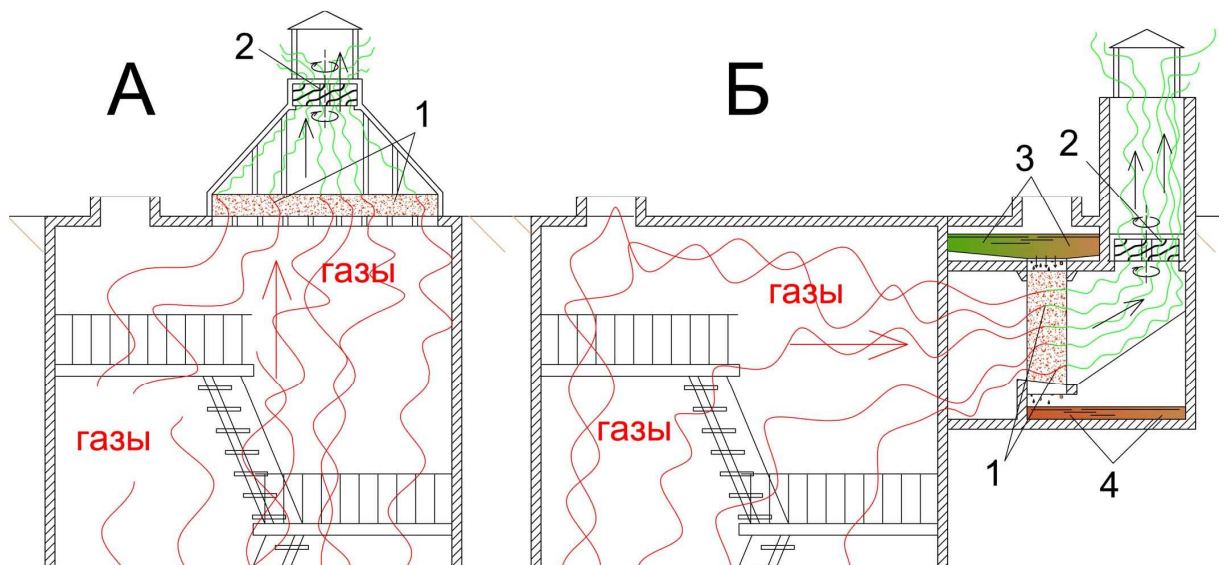


Рисунок 2.20 – Схема шахты с вентиляционной станцией: А — фильтр вертикального исполнения с вентиляционной станцией на конце; Б — фильтр горизонтального исполнения с вентиляционной станцией и системой подачи сорбента на фильтр; 1 — фильтр; 2 — вентиляционная станция; 3 — сорбент; 4 — использованный сорбент

Депрессию, создаваемую вентиляционной установкой, следует просуммировать с депрессией, создаваемой естественной тягой (требуемой обеспеченности), и депрессией, создаваемой увлекающей способностью жидкости (2.59)

$$P_{\text{ОБЩ.}} = P_{\text{ВЕНТ.}} \pm P_{\text{ЕСТ.}} \pm P_{\text{УВЛ.}} \quad (2.59)$$

Организация газообмена при счет вентиляционных станций имеет ряд преимуществ:

- позволяет регулировать количество и направление движения газообразной среды;
- обеспечивает стабильную работу в течение всего года и не зависит от геодезических, гидравлических и климатических условий;
- создает возможность организации газообмена в любой КС.

Использование вентиляционных установок имеет недостатки:

- потребность в значительных энергоресурсах;
- большие капитальные и эксплуатационные затраты.

На сегодняшний день использование вентиляционных станций для организации газообмена в канализационных сетях возможно при экономическом обосновании.

Использование вентиляционной(-ых) станции(-й) на участке КС экономически целесообразно при удовлетворении следующего условия

$$\sum M_k > \sum M_{\Sigma} \cdot C, \quad (2.60)$$

где M_k — затраты на капитальный ремонт КС, требуемые для восстановления сооружений, разрушенных в результате воздействия биологически активной среды, руб.;

M_{Σ} — затраты на эксплуатацию вентиляционного оборудования, руб./год.;

C — срок эксплуатации канализационной среды под воздействием биологически активной среды, год.

Срок эксплуатации КС в зависимости от концентрации сероводорода в подводящем и шахтном пространстве данного участка сети или по pH поверхности сооружений КС можно определить по таблице 2.1 [46].

Таблица 2.1 Сопоставление агрессивности растворов серной кислоты и сероводородной газовой среды к бетону

Сернокислотная коррозия				Сероводо- родная коррозия	Степень агрессивно- сти
Концентра- ция H ₂ SO ₄	pH раствора	Скорость коррозии бетона		Концентра- ция H ₂ S, мг/м ³ (газо- вая фаза)	
		мм/год	см. за 50 лет		
1Н*	0,16	40,0	200	500	Сильная
0,1Н	1	10,0	50	135	
0,01Н	2	2,5	12,5	35	
0,001Н	3	0,6	3,0	8	Средняя
0,0001Н	4	0,3	1,5	4	
0,00001Н	5	0,08	0,4	2	Слабая
0.00001Н	6	0,05	0,25	1	

Трубчатые перепады

Организация газообмена в КС глубокого заложения также возможна при помощи трубчатых перепадов. В районе входной воронки трубчатого перепада в процессе транспортирования сточной жидкости из верхнего бассейна канализования в нижний образуется вакуум, в результате чего происходит подсос воздуха (или любой другой газообразной среды), имеющегося над входной воронкой трубчатого перепада (рисунок 2.21) [24]. Другими словами, трубчатые перепады способны создавать дополнительную депрессию, которую следует использовать для организации газообмена [6, 90].

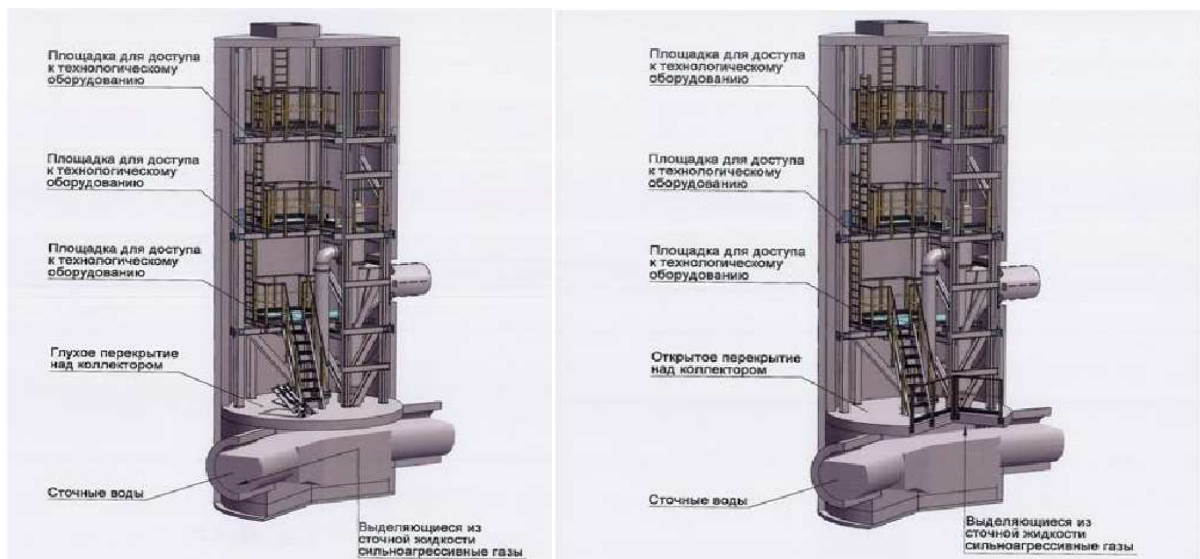


Рисунок 2.21 – Трубчатый перепад: слева — шахта, выполненная с открытым перекрытием над коллектором; справа — шахта, выполненная с глухим перекрытием над коллектором

Расчет количества захватываемой (увлекаемой) газообразной среды представлен в работе В. М. Васильева и может составлять до 4 объемов падающей жидкости [24].

На сегодняшний день трубчатые перепады практически не используются для вовлечения в движение газообразной среды по КС. При включении в схему трубчатого перепада нужно предусмотреть мероприятия по организованному удалению и последующей очистке газа, вовлеченного в движение в шахте перепада или в следующей шахте, расположенной ниже по течению сточной жидкости. Схема КС (см. рисунок 2.19) при использовании трубчатого перепада приведена на рисунке 2.22.

На рисунке 2.22 представлена схема газообмена в КС с одной вентиляционной установкой, имеющей протяженный аэродинамический участок. Устройство протяженных аэродинамических участков, как правило, нецелесообразно, так как влечет дополнительные потери депрессии по пути транспортировки газа.

При наличии на сети трубчатых перепадов их можно использовать как нагнетатели газа в нижележащую сеть. Трубчатый перепад будет создавать дополнительную депрессию. Использование трубчатых перепадов для нагнетания воздуха позволяет уменьшить общее число вентиляционных установок.

Преимуществом использования трубчатых перепадов является отсутствие эксплуатационных затрат на их функционирование.

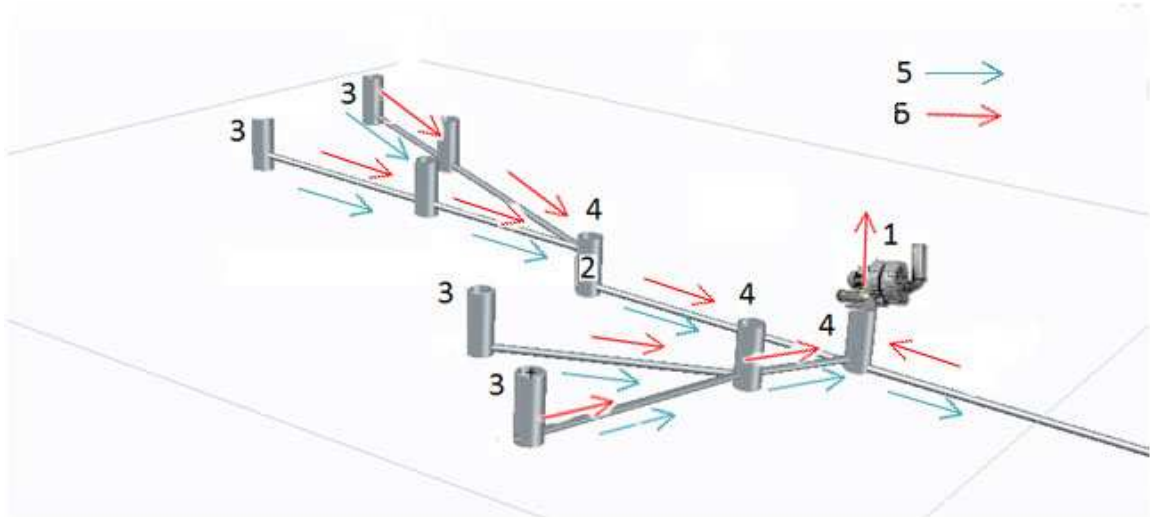


Рисунок 2.22 – Схема КС с организацией газообмена при помощи вентиляционной установки и трубчатого перепада: 1 — вентиляционная станция, установленная в конце аэродинамического участка; 2 — трубчатый перепад, установленный на сети и включенный в аэродинамическую схему движения газа; 3 — начало коллектора; 4 — шахты с подключениями по пути; 5 — направление движения сточной жидкости; 6 — направление движения газов

Недостатком трубчатых перепадов следует считать:

- необходимость мероприятий по удалению вовлеченного газа;
- расположение перепадов диктуется геодезическими условиями проходки, не может быть перенесено и зависит от требований газообмена.

Вентиляционные трубы

Увеличение газообмена возможно за счет увеличения естественной тяги (депрессии) путем установки вентиляционных труб в конце аэродинамического участка (рисунок 2.23). Такие трубы должны быть хорошо утеплены или быть установлены в утепленном или (лучше) отапливаемом здании для поддержания высокой температуры внутри трубы. Такие сооружения существуют за рубежом и описаны в различных работах [129].

Количество создаваемой депрессии за счет вентиляционной трубы зависит от высоты трубы. Ширина трубы влияет на сопротивление, создаваемое трубой.

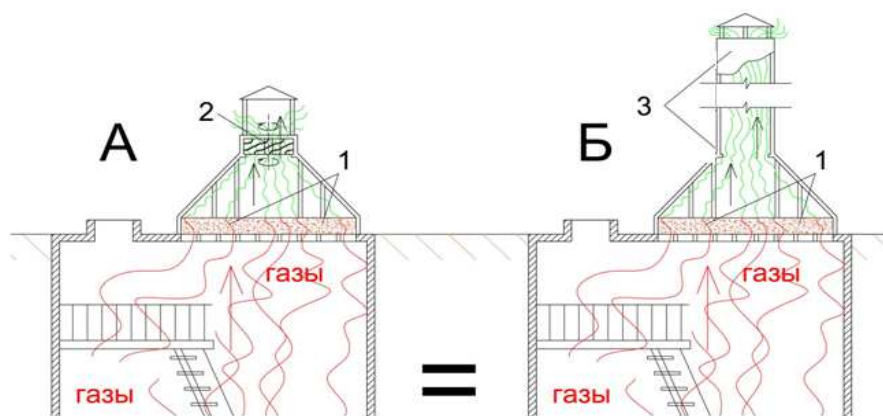


Рисунок 2.23 – Схема шахты с вентиляционной станцией или вентиляционной трубой: А — шахта с вентиляционной установкой; Б — шахта с вентиляционной трубой; 1 — фильтр; 2 — вентиляционная установка; 3 — вентиляционная труба

Высота трубы определяется в зависимости от количества требуемой депрессии. Внутренний радиус вентиляционной трубы следует принимать в диапазоне $0,5 \div 1$ аэродинамического радиуса подсводной части коллектора. Депрессию, создаваемую вентиляционной трубой, можно определить по формуле (2.61) [24]

$$P_{тр.} = (\rho_{н.в.} - \rho_{тр.в.}) \cdot g \cdot H_{тр.}, \quad (2.61)$$

где $P_{тр.}$ — депрессия создаваемая трубой, Па

$\rho_{н.в.}$ — плотность воздуха на дневной поверхности (наружный воздух), кг/м³

$\rho_{тр.в.}$ — плотность воздуха в трубе, кг/м³

$H_{тр.}$ — высота трубы, м

Пример.

Вентиляционная труба высотой 12 м. В условиях весеннего и осеннего периода года температура колеблется в диапазоне $0-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, что создаст дополнительную депрессию в 7,3 Па. В условиях зимнего периода года температура колеблется в диапазоне $(-25\text{ }^{\circ}\text{C}) - (-15\text{ }^{\circ}\text{C})$, что создаст дополнительную депрессию в 17,8 Па.

Достоинством данного сооружения следует считать:

- малые капитальные затраты;
- отсутствие эксплуатационных затрат на энергообеспечение ввиду его отсутствия;
- возможность установки в различных местах в зависимости от требований газообмена.

К недостаткам сооружений можно отнести:

- малую эффективность в осенний и весенний период времени и нулевую эффективность в летний период времени;
- необходимость санитарно-защитной зоны;
- необходимость средств очистки газов;
- эксплуатационные затраты на обслуживание оборудования очистки газов.

Возможна прокладка вентиляционных труб по фасаду здания или в теле здания. Как правило, такое решение затрагивает интересы различных собственников и эксплуатационных служб. При этом необходимо согласование проектных решений с санитарными и эпидемиологическими службами города, что делает их реализацию затруднительной. На сегодняшний день такие решения в нашей стране отсутствуют, за исключением Москвы.

Применение дымоходов, а тем более вентиляционных установок должно производиться с учетом создания скоростей потока газа над поверхностью сточной жидкости не превышающих допустимую скорость ($V_{\text{ГАЗА}} < V_{\text{В.ДОП.}}$) исключающую образования волн на поверхности сточной жидкости. Допустимую скорость газа над поверхностью сточной жидкости можно определить по формуле рекомендованной М. Г. Гайфутдиновым [37]

$$V_{\text{В.ДОП.}} = \sqrt{\frac{6,3 \cdot 10^3 \cdot D^2 \cdot \left(\frac{h}{D}\right) \cdot (1 - Fr)}{(a_0 \cdot \varepsilon_{\text{ж}} + v_0 \cdot \lambda) \cdot L}} \quad (2.62)$$

2.7 Определение типовых мест выделения агрессивных газов из сточной жидкости в подсводное, шахтное пространство канализационной сети, определение типовых мест и причин образования выбросов газа из канализационной сети в атмосферу

Выбросы АГ происходят при определенных условиях, когда давление в шахтном пространстве сети больше, чем на поверхности, и достаточно для преодоления выходящим газом щелевых неплотностей в крышке, а иногда и подъема люков [75].

Согласно уравнению Менделеева-Клапейрона [111] (2.63), давление может увеличиваться вследствие [75]: увеличения температуры в шахтном пространстве; уменьшения объема шахтного пространства в связи с заполнением сети из-за увеличения притока; воздействия потока движущейся сточной жидкости и естественной тяги, образующейся за счет разности температур на поверхности и в шахте;

образование воздушной пробки в шахтном пространстве при превышении поступающих газов в шахту над их удалением

$$\frac{P \cdot V}{T} = \vartheta \cdot R, \quad (2.63)$$

где P — давление, Па;

V — объем, м³;

T — абсолютная температура, К;

ϑ — количество вещества, моль;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Увеличение давления в шахтном пространстве сети вследствие увеличения температуры в шахте

Согласно данным температура шахтного пространства колеблется от 12 до 40 °С [22, 96, 103]. В соответствии с уравнением Менделеева-Клапейрона, изменение температуры приведет к изменению давления в шахте

$$\Delta P = \frac{T_2}{T_1}; \quad (2.64)$$

где ΔP — изменение давления в шахте вследствие изменения температуры, Па;

T_1 — минимальная абсолютная температура, К;

T_2 — максимальная абсолютная температура, К.

Подставив значения температуры, получим

$$\Delta P = \frac{273 + 40}{273 + 12} = 1,098. \quad (2.65)$$

Другими словами, давление в шахте увеличится на 10 %.

При условии, что в начальный момент времени в шахте давление составляло 1 Ат (10,33 м вод. ст., 760 мм рт. ст.), избыточное давление в абсолютно герметичной шахте составит 0,1 Ат или 1,03 м вод. ст., или 76 мм рт. ст., или 10 000 Па.

Этого давления достаточно, чтобы поднять железобетонную плиту массой 1 т/м² (при плотности 2,5 т/м² толщина плиты составит 0,4 м).

Применив формулу Менделеева-Клапейрона аналогичным образом для объема (при условии негерметичности шахты и «прямого сообщения» с дневной поверхностью), можно получить, что объем также изменится на 10 %.

Для шахты глубиной 20 м и диаметром 6 м (объем 500 м³) при максимальном изменении температуры из шахты выделится 50 м³ газа через неплотности стыков элементов сооружений сети.

С учетом отсутствия герметичности КС данный объем газов выделится рассредоточено из всех неплотностей сети.

Процесс изменения температуры с максимальной амплитудой возможен в летний период в самые жаркие дни. При минимальном периоде изменения температуры 6 часов (в период с 06 до 12 часов) выделение газа из такой шахты составит 2,3 л/с, что является ничтожным. Распределить объемы газов на очистку при этом не представляется возможным ввиду растянутости изменения объема во времени, а учитывая незначительный расход и нецелесообразно.

Поскольку колебания температуры незначительно влияют на изменение количества высвобождаемого газа из подсводного и шахтного пространства сети, а температура в подземном пространстве практически постоянна, то принимать в расчет изменение температуры нецелесообразно.

Увеличение давления в шахтном пространстве из-за уменьшения объема шахтного пространства

Уменьшение объема шахтного пространства происходит при возрастании притока сточной жидкости, связанного либо с суточной неравномерностью водоотведения населением и предприятиями, либо с поступлением дождевых вод. Заполнение коллектора, связанное с суточной неравномерностью притока сточной жидкости, колеблется в пределах 0,2 диаметра коллектора, что является несущественным, поэтому данный фактор также учитывать нецелесообразно.

Заполнение коллектора в связи с большим притоком дождевых вод является значительным, так как может быть затоплена вся канализационная сеть под люки колодцев, причем в достаточно короткий промежуток времени (1–2 часа). Заполнение шахты сопровождается уменьшением объема W шахтного пространства и увеличением давления (в случае её герметичности) (см. рисунок 1.9).

Определить избыточное давление в шахте, создаваемое за счет уменьшения объема шахтного пространства, можно по уравнению (2.63). При заполнении КС и сооружений на ней в шахтах будет создаваться значительное избыточное давление, способное поднять многотонную крышку. Изображение бетонной крышки шахты грузового проема, поднятой избыточным давлением в сети, представлено на рисунке 1.10. Особенно большие давления наблюдаются в транзитных шахтах, не имеющих дополнительных подключений или прямого сообщения с атмосферой.

В шахтах, не имеющих сообщения с атмосферой, целесообразно устанавливать фильтры очистки газа от вредных, токсичных и агрессивных соединений. Такие фильтры могут обладать значительным сопротивлением (от 1000 до 5000 Па).

В шахте, имеющей подключение или иное сообщение с атмосферой, следует устанавливать фильтры очистки газа, сопротивление которых следует обосновывать аэродинамическим расчетом.

Сопротивление фильтра не должно превышать депрессию, создаваемую увлекающей способностью потока сточной жидкости на притоке в шахту, иначе часть газов будет двигаться противотоком ($Q_{1,3}$ рисунок 2.24) и выходить на дневную поверхность в ближайшем колодце. Расход газа через фильтр будет снижаться с увеличением его сопротивления и возрастать при увеличении сопротивления сети. Увеличивая сопротивление на подводящей линии герметизацией ближайших колодцев, установкой в них фильтров и увеличивая протяженность аэродинамического участка до ближайшего открытого колодца, можно изменить перераспределения потока газов (рисунок 2.24).

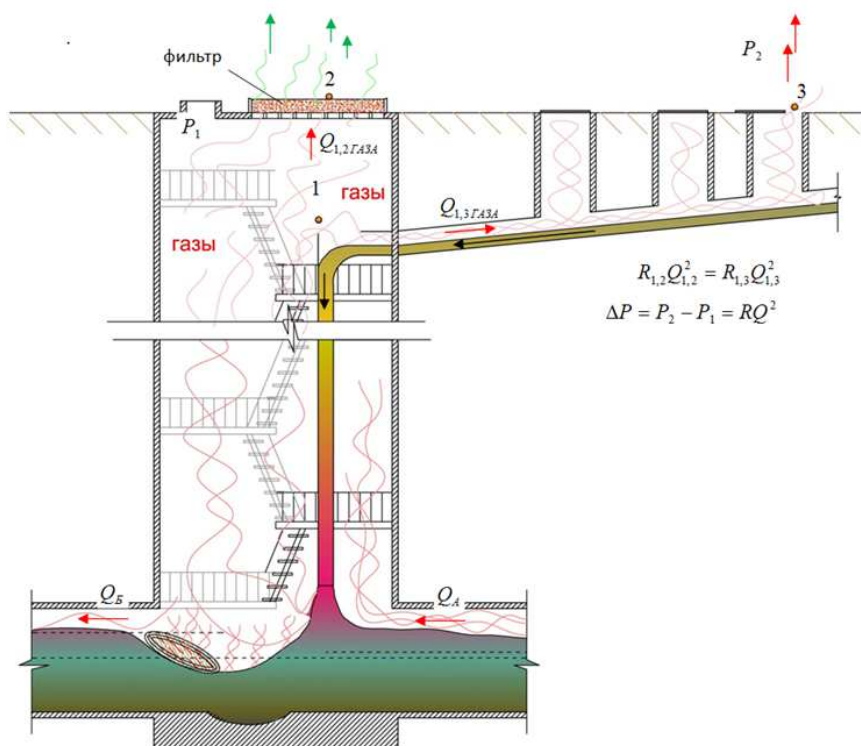


Рисунок 2.24 – Движение газа через фильтр (поток газа на участке 1–2) и обводную линию приточного коллектора (поток газа на участке 1–3)

Для решения данной задачи воспользуемся формулой (1.5) и преобразуем её согласно ситуации, изображенной на рисунке 2.24

$$\Delta P = P_2 - P_1 = Q_{1,2}^2 \cdot R_{1,2} = Q_{1,3}^2 \cdot R_{1,3} \quad (2.66)$$

Формула (2.66) показывает, что чем меньше сопротивление фильтра, тем больший расход газа пройдет через него, и позволяет рассчитать соотношение потока газов, движущихся по разным участкам сети.

Подключение к шахте притока посредством самотечного коллектора не позволяют полностью избежать сопряжения шахтного пространства и дневной поверхности земли по воздуху и исключить выбросы неочищенного газа на дневную поверхность.

Образование воздушной пробки в шахтном пространстве при превышении поступающих газов в шахту над их удалением

Если количество газов, поступающих в шахту, больше количества газов, удаляемых из шахты, на данном участке сети будет происходить повышение давления (рисунок 2.25). Данное явление носит название воздушная пробка.

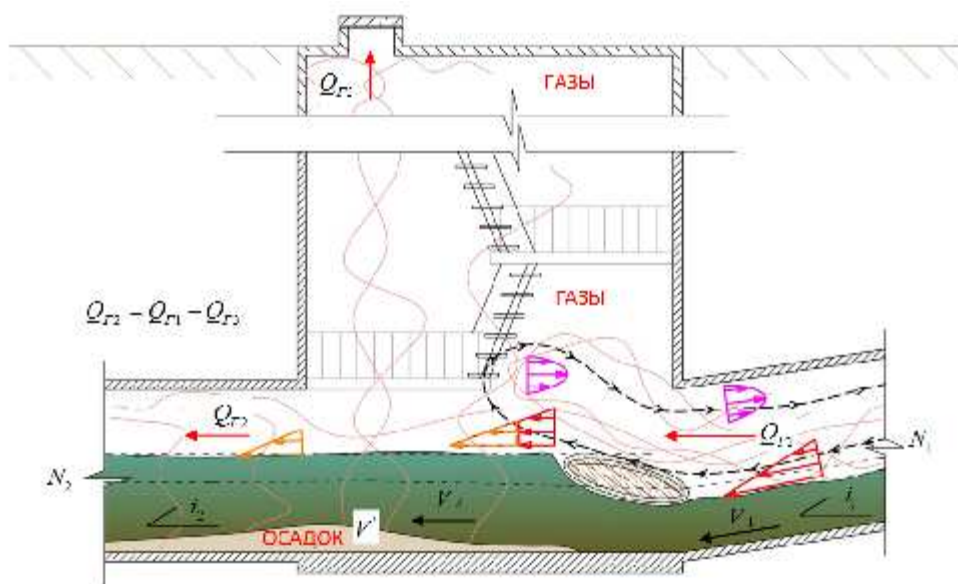


Рисунок 2.25 – Воздушная пробка. Часть потока газа возвращается обратно из-за уменьшения поверхностной силы потока сточной жидкости

Определить избыточное давление, создаваемое в шахте за счет кинетической энергии потока, можно по следующей формуле 2.67 [120]

$$P_{\text{изб}} = 0,5 \cdot \rho \cdot V_{\text{в.ср}}^2, \quad (2.67)$$

где $P_{\text{изб}}$ — депрессия, создаваемая потоком, Па;

$V_{\text{в.ср}}$ — средняя скорость газа по сечению подсводного пространства коллектора, м/с;

ρ — плотность газообразного вещества, кг/м³.

Определение мест выбросов газа

Как уже говорилось ранее, выбросы происходят вследствие образования избыточного давления в КС.

Проанализировав формулу расчета скорости движения газа в подводящей части канализационного коллектора за счет увлекающей способности жидкости (2.9), становится понятным, в каких случаях следует ожидать выбросы газов на дневную поверхность земли

$$U_x^H = V_{B.ПОВ} - \frac{\rho \cdot g \cdot h_i}{\mu^H} y, \quad \frac{м}{с}. \quad (2.9)$$

Изменение количества поступающего в шахту и отводящегося газа зависит от следующих параметров: скорости потока сточной жидкости; заполнения коллектора (высота потока газа h); гидравлического уклона коллекторов; образования застойных зон (выпадение осадка); температуры.

Изменение представленных параметров и, соответственно, дислокация мест выбросов АГ на дневную поверхность земли зависят от ряда факторов. Их можно разделить на несколько групп: конструктивные, гидравлические, геодезические, режимные, случайные, климатические.

К конструктивным факторам относятся особенности коллектора: подключения по пути, уменьшение уклона, заужение диаметра коллектора, сдвиг коллектора по вертикали, перекрытие части коллектора (например, шибером) и другие, а также конструктивные особенности самой шахты (запирание газообразной среды в стволе шахты).

К гидравлическим факторам относится изменение увлекающей способности жидкости (проявляется на перепадах различных конструкций, а также в конечных шахтах коллектора или приемных камерах канализационных насосных станций (КНС).

К геодезическим факторам относятся расположение шахты, в которой происходит выброс, а также высота верха шахты относительно сети.

К режимным факторам относятся эксплуатация некоторых канализационных насосных станций. Из-за большой производительности насосного оборудования в технологии их эксплуатации заложено регулярное перекрытие подводящего коллектора, что приводит к подтоплению или полному затоплению подводящего коллектора и КС глубокого заложения в целом, что также приводит к выбросам газообразной среды на дневную поверхность земли.

К случайным факторам относятся человеческий фактор или ошибки обслуживающего персонала. Во время переключения части или всего стока на дублирующий коллектор возможно неполное открытие шиберной задвижки, что приводит к заужению рабочего сечения и, как следствие, увеличению давления в

подсводном пространстве коллектора при определенных расходах сточной жидкости. Неполное перекрытие люков также приводит к изменению аэродинамики КС. На время ремонтных и других работ перекрытие верхней части шахты частичное или полное. Также к случайным факторам можно отнести отступления от проектных решений при строительстве коллектора, которые впоследствии перейдут в разряд конструктивных.

К климатическим факторам относятся выпадение больших осадков за короткий промежуток времени, что особенно характерно для общесплавной системы канализования, процессы загнивания осадка на площадках и банкетах шахт, так как выпадение осадка на технологическом оснащении шахт происходит в период большого заполнения КС, то есть при поступлении в коллектор больших расходов сточных (ливневых) вод.

Места выбросов газообразной среды можно разделить на постоянные, периодические и случайные.

К постоянным местам выбросов АГ относятся места, где выбросы АГ происходят регулярно или несколько раз в сутки из-за конструктивных и гидравлических факторов.

К периодическим местам выбросов АГ относятся места, где выбросы АГ происходят систематически, но не постоянно и нерегулярно. Как правило, такие выбросы связаны с геодезическими, режимными и климатическими факторами.

К случайным местам выбросов АГ относятся места, где выбросы АГ происходят крайне редко (имеют единичные случаи). Такие выбросы связаны со случайными и климатическими факторами.

В отличие от случайных мест выбросов постоянные и систематические выбросы происходят в определенных шахтах. На сегодняшний день из-за наличия климатических факторов (колебания уровня сточной жидкости в коллекторе) полное прекращение выбросов на дневную поверхность не представляется возможным. Возможно уменьшить количество выбросов по объему, периодичности и количеству, объединить несколько точек выбросов в одну, изменить места их дислокации (расположения). Это возможно за счет уменьшения факторов, влияющих на появление выбросов, перераспределение газов в другие места (допустим, в резервную нитку-дублер) путем устройства различных трубопроводов-воздушников (см. рисунок 1.21). Также возможна изоляция отдельных сооружений от воздействия агрессивной среды (см. рисунок 1.20).

Уменьшение количества выбросов в шахтах КС возможно за счет [76]:

- устранения конструктивных факторов (внедрения конструктивных решений для перераспределения газообразной среды, устранения воздушных пробок, установки фильтров очистки в тех местах, где выбросы предотвратить невозможно, отступления от проектных решений, возникающих при строительстве КС глубокого заложения и др.);

- уменьшения количества гидравлических факторов, правильной организации движения сточной жидкости на перепадах, в местах вовлечения в движение газов с дневной поверхности и подводящего коллектора (см. рисунок 1.20);

- устранения режимных факторов (изменения регламента эксплуатации сооружений на КС);

- повышения требований к квалификации обслуживающего персонала.

На рисунке 2.26–2.33 представлены шахты с различными конструктивными элементами, вызывающими увеличение избыточного давления в шахте и, как следствие, выбросы агрессивного токсичного газа на дневную поверхность земли.

Дополнительный приток (Q_{B3}) сточных вод увеличивает заполнение и приводит к подтоплению подводящего коллектора на Δh до высоты h_1 , что вызывает образование воздушной пробки, увеличению давления (P) на участке подводящего коллектора, подверженного воздействию увлекающей силы потока сточной жидкости, с последующим выбросом излишних газов на дневную поверхность земли в шахте, расположенной выше по сети.

Транспортировка стоков из верхнего бассейна канализования в нижний осуществляется по перепаду. Организация процесса гашения энергии за счет транзитного потока сточной жидкости приводит к образованию турбулентного потока с высотой потока меньше $h_{кр}$, что предопределяет образование бурного движения потока с гидравлическим прыжком, интенсифицирует процессы газообразования. Трубчатый перепад создает дополнительную динамическую нагрузку на лоток коллектора и шахту, а также вовлекает в движение газы с подводящего коллектора ($Q_{Г4}$), что приводит к увеличению давления в шахте и выбросу газов на дневную поверхность ($Q_{Г6}$). На стадии проектирования, реализации, подготовки исходных данных об объемах поступающих стоков следует учитывать данный факт и предусматривать мероприятия, направленные на ликвидацию негативных процессов, таких как выделение сероводорода из сточной жидкости, разрушения лотка коллектора, уменьшение подсводного пространства коллектора и др. (рисунок 2.26).

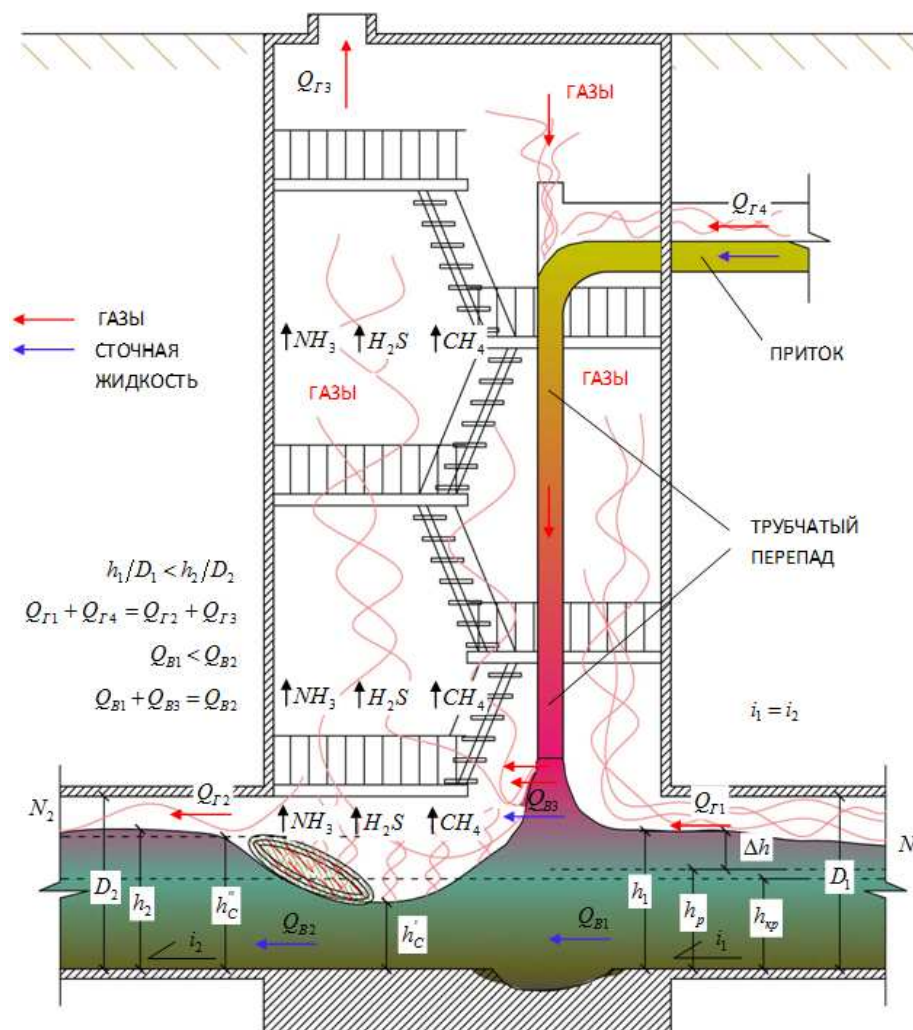


Рисунок 2.26 – Приток через перепад с гашением энергии за счет соударения потоков жидкости коллектора и перепада

Уменьшение уклона ($i_1 > i_2$) коллектора снижает скорость транспортирования жидкости ($V_1 > V_2$) и увеличивает заполнение коллектора ($\frac{h_1}{D_1} < \frac{h_2}{D_2}$), что создает застойные зоны, как по газу, так и по жидкости, где скорость потока сточных вод V' меньше значения незаиливающих скоростей $V' < V_{\text{незаи.}}$, и приводит к выпадению осадка. Осадок загнивает, выделяет агрессивные газы и продукты гниения. Такие конструктивные особенности сети связаны с необходимостью сопряжения 2 шахт без организации дополнительных перепадных устройств. Создаваемый сильно турбулентный поток и гидравлический прыжок приводят к активному выделению сероводорода (рисунок 2.27).

Уменьшение диаметра отводящего коллектора ($D_2 < D_1$) снижает его пропускную способность, что приводит к увеличению заполнения коллектора ($\frac{h_1}{D_1} < \frac{h_2}{D_2}$),

образованию воздушной пробки, увеличению давления в шахтном пространстве сети. Уменьшение сечения посводного пространства коллектора также возможно в связи с наростами на щельге коллектора или неполным открытием щитового затвора (рисунок 2.28).

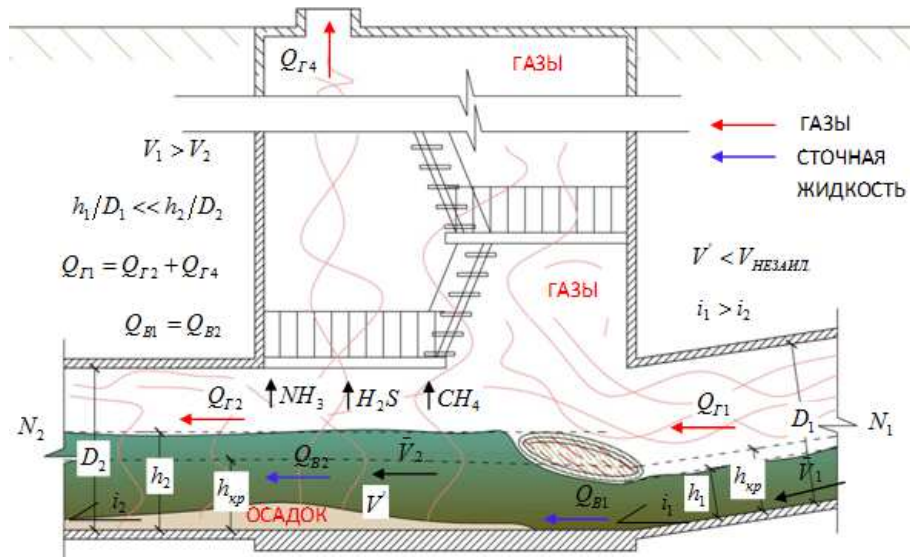


Рисунок 2.27 – Шахта с уменьшением геометрического уклона коллектора (быстроток)

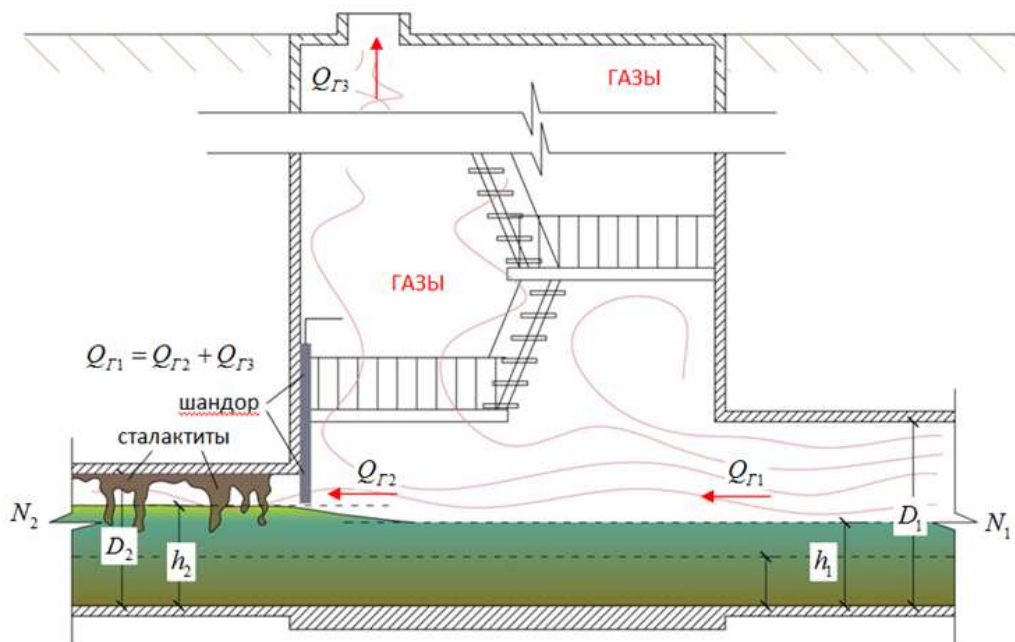


Рисунок 2.28 – Шахта с деформированным (зауженным) коллектором или местным сопротивлением на сети

Отводящий коллектор с геометрическим контруклоном ($i_1 < i_2$) приводит к подтоплению канализационного коллектора ($\frac{h_1}{D_1} < \frac{h_2}{D_2}$), снижению скорости сточной

жидкости ($V_1 > V_2$), образованию застойных зон (где скорость потока сточной жидкости V' меньше значения незаиливающих скоростей ($V' < V_{\text{НЕЗАИЛ.}}$) (рисунок 2.29).

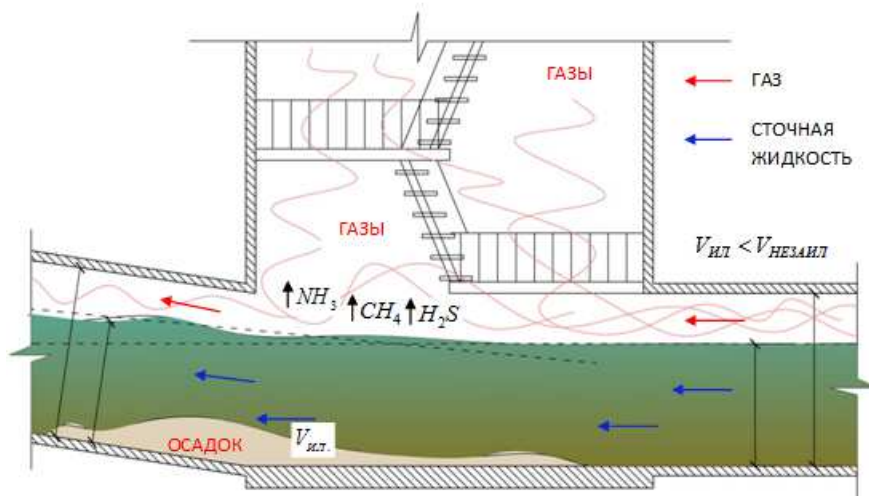


Рисунок 2.29 – Шахта с контруклоном на отводящем коллекторе

Высока вероятность полного затопления коллектора, перехода работы коллектора в режим «дюкер», что приведет к прекращению транспортировки газа на данном участке сети, образованию воздушной пробки и выбросам газов на дневную поверхность из шахты, расположенной выше по сети (рисунок 2.30).

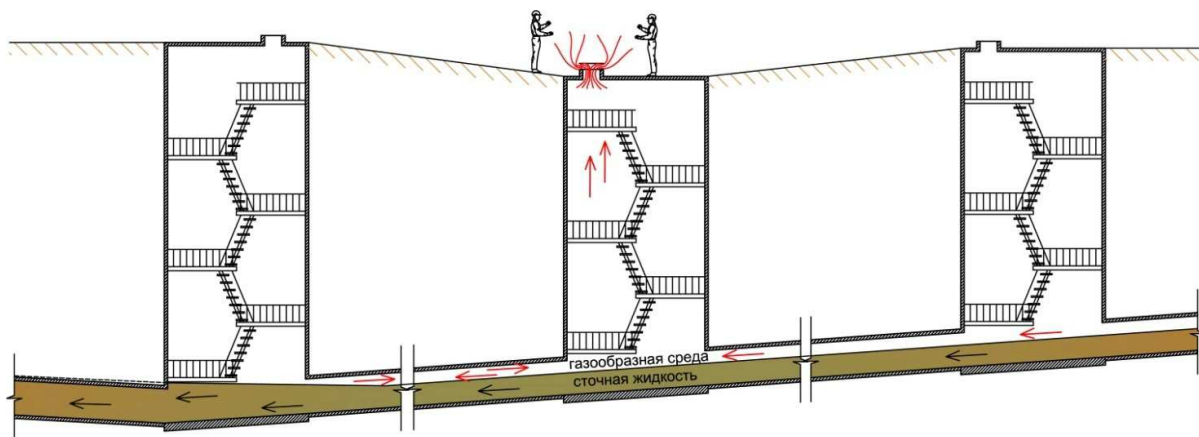


Рисунок 2.30 – Работа коллектора в режиме «дюкер» приводит к выбросам газов из шахты, расположенной выше по сети, образованию застойных зон, выпадению осадка, его загниванию и выделению продуктов гниения в подсводное пространство сети

В приемной камере КНС отводящий коллектор отсутствует, имеются застойные зоны, как по газу, так и по жидкости, где скорость потока сточной жидкости V' меньше значения незаиливающих скоростей $V' < V_{\text{НЕЗАИЛ.}}$, поэтому вопрос удаления газа здесь стоит особенно остро (рисунок 2.31).

Определение мест образования агрессивных газов

Выбросы газов на дневную поверхность земли как физический процесс не является опасными или недопустимыми. Как известно, опасными являются сами газы, которые насыщены агрессивными, токсичными веществами. Поэтому представляют интерес места образования АГ и насыщения ими газовой среды КС.

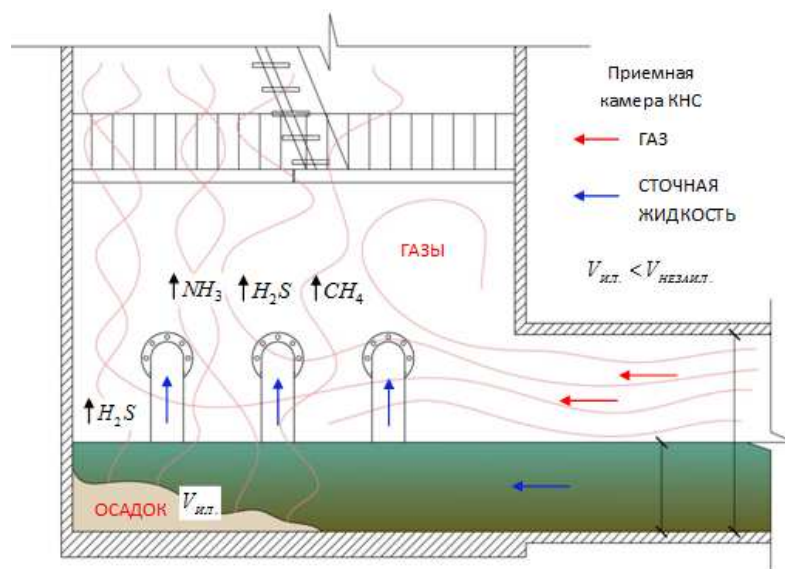


Рисунок 2.31 – Приемная камера КНС

Как известно, наиболее вероятными местами образования АГ являются [77]:

- участки КС, расположенные после сети с анаэробными условиями движения сточной жидкости (после напорных трубопроводов) [88];
- участки КС с увеличением турбулентности потока (сооружения перепадов различных конструкций, узлы подключений) [150, 129, 13, 20];
- участки с заиленными лотками канализационных коллекторов, шахты с обильными осадками на банкетках, площадках, лестницах и перилах [111, 129];
- места подключений с высокой температурой, большим содержанием сульфидов и сульфатов, а также низким рН воды [135, 134].

На рисунке 2.32–2.35 представлены шахты с различными конструктивными элементами, вызывающими образование агрессивных, токсичных газов и их выделение в газовой среде КС.

Участки КС, расположенные после сети с анаэробными условиями движения сточной жидкости (после напорных трубопроводов) Напорные трубопроводы, расположенные выше по сети, интенсифицируют процессы газообразования и

оказывают крайне негативное воздействие на самотечную сеть, расположенную ниже по течению сточной жидкости (по сети).

При транспортировке сточной жидкости по напорным трубопроводам, когда концентрация свободного кислорода достигает 0,1 мг/л и менее, процессы разложения (распада) органических соединений в сточной жидкости начинают протекать с использованием других соединений, содержащих кислород (нитраты, сульфаты, уголекислоты), что приводит к образованию органических кислот, спиртов и других соединений, находящихся в растворенном состоянии. Также образуются газообразные соединения: уголекислый газ, метан, сероводород [134].

Смена режима течения потока сточной жидкости с анаэробного на аэробный в КГН сопровождается процессами восстановления фазового равновесия, которые выражаются в выделении агрессивных, токсичных газов в газоздушную среду подсводного, шахтного пространства сети (рисунок 2.32). Количество выделившихся АГ зависит от их концентрации в конце напорного участка сети. Другими словами, величина негативного воздействия зависит от протяженности напорного трубопровода (времени пребывания сточной жидкости в анаэробных условиях) и химического состава сточной жидкости.

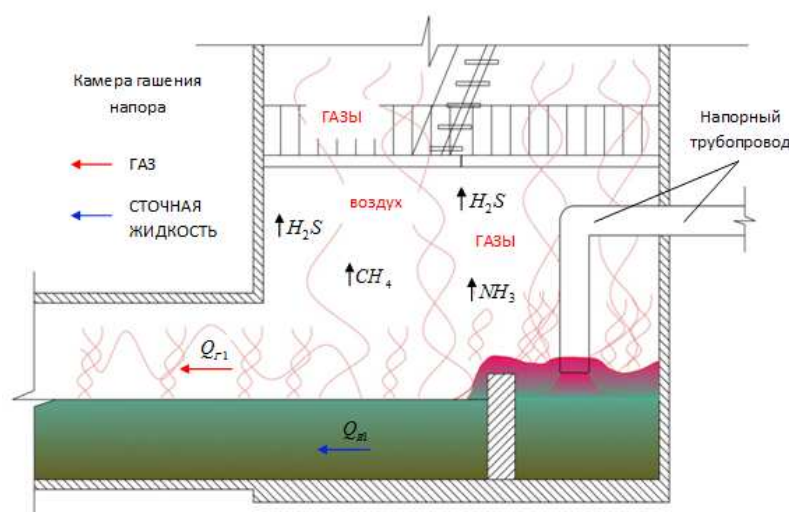


Рисунок 2.32 – Шахта с КГН. Смена режима течения потока сточной жидкости с анаэробного режима в аэробный

Немаловажным фактором является конструкция КГН. В зависимости от конструкции камеры и гидравлического режима её работы изменяются турбулентность потока, время и величина (по площади) сопряжения потока сточной жидкости с газоздушной средой подсводного пространства камеры и сети, что, в свою очередь,

оказывает влияние на количество и скорость выделения сероводорода и других газов из сточной жидкости в газовоздушную среду камеры и сети [108].

Участки КС с увеличением турбулентности потока (сооружения перепадов различных конструкций, узлы подключений). Увеличение турбулентности потока изменяет гидравлические условия транспортировки сточной жидкости, нарушает равновесие течения двухфазного потока вода–газ. Процессы восстановления фазового равновесия (по сероводороду и другим агрессивным газам) приводят к выделению АГ из сточной жидкости в подсводное пространство КС. Большое увеличение турбулентности потока следует ожидать при больших изменениях скорости и направления движения сточной жидкости, как правило, это происходит в местах сооружения притоков, особенно если эти притоки выполнены посредством перепада (см. рисунок 2.26, 2.33).

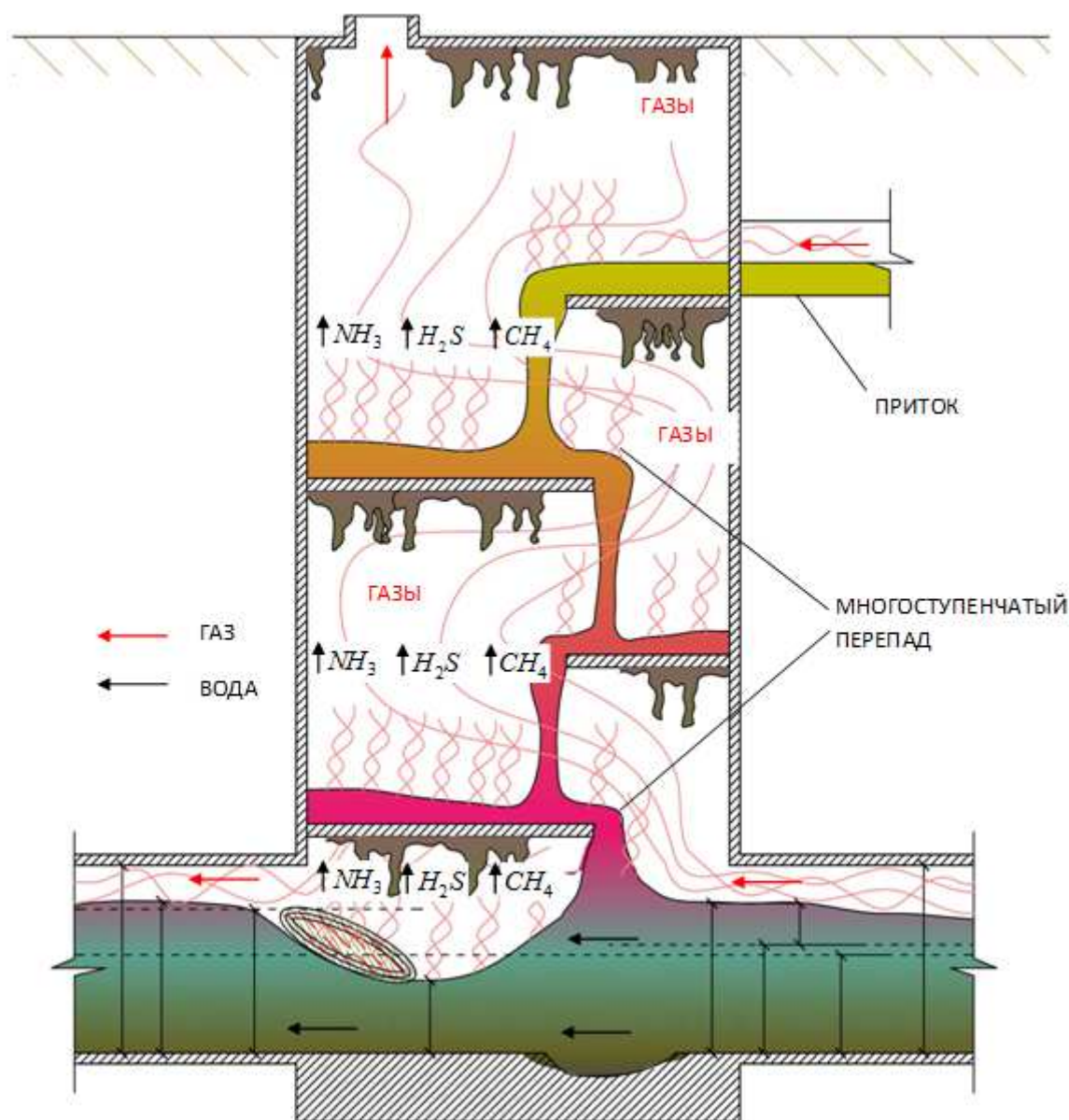


Рисунок 2.33 – Шахта с перепадом конструкции многоступенчатого вида

Многоступенчатые перепады создают хорошую турбулентность потока сточной жидкости, большое по площади сопряжение потока с газом, тем самым интенсифицируют процессы выделения газов из сточной жидкости в сеть (рисунок 2.33) [24, 108].

Участки сети с заиленными лотками канализационных коллекторов и шахты с обильными осадками на банкетках, площадках, лестницах и перилах

В заиленных лотках КС и на банкетках сооружений преобладают факультативно и облигативно анаэробные процессы, где белки и аминокислоты подвергаются гниению, сопровождающемуся выделением токсичных запахов (сероводорода, аммиака, меркаптана и др.) [44]. Зоны выпадения осадка образуются в местах со скоростью сточной жидкости ниже «незаиливающих» скоростей, а также в местах снижения турбулентности потока. На рисунке 2.27, 2.29–2.31, 2.34, 2.35 представлены некоторые случаи образования осадка.

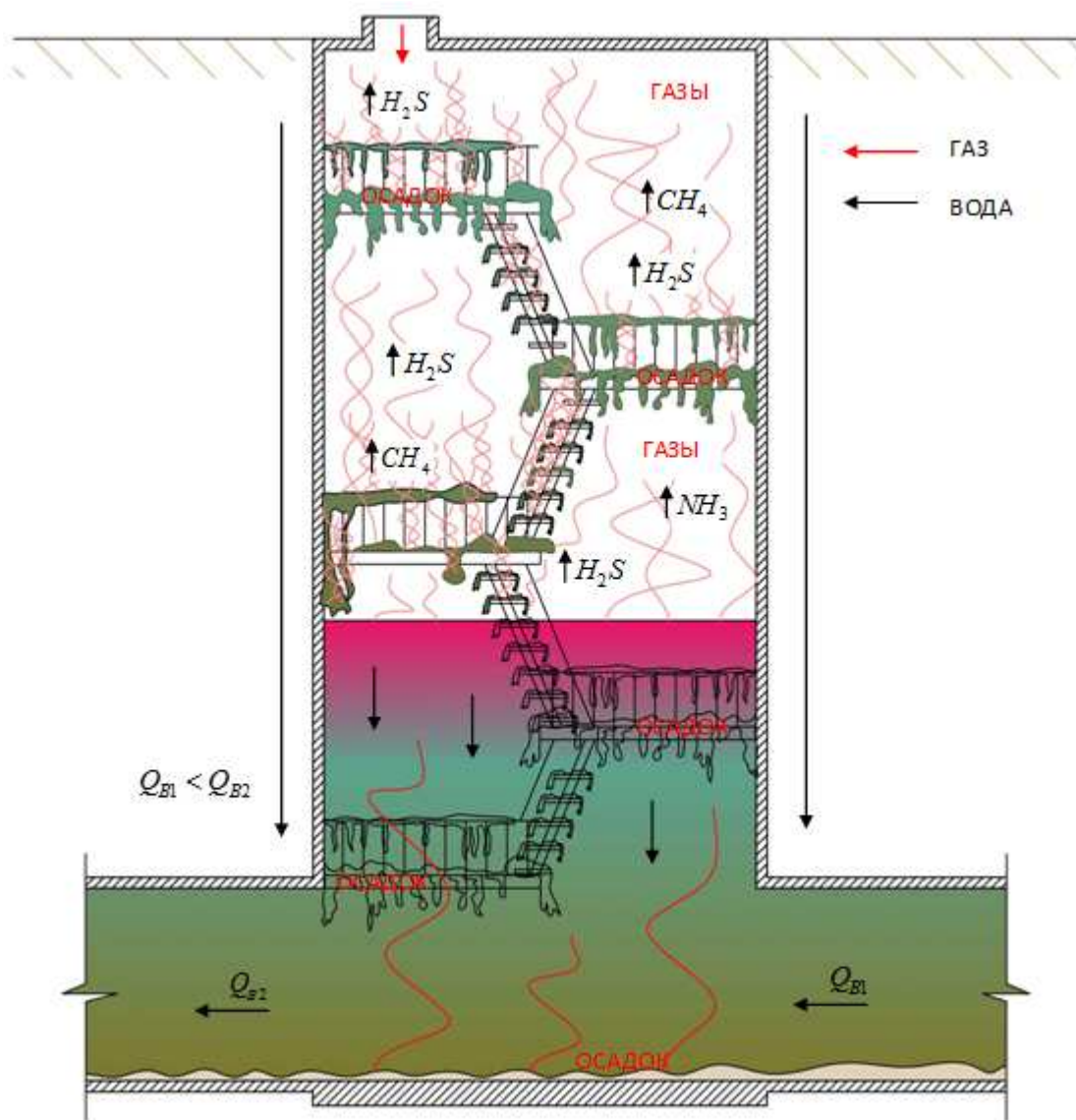


Рисунок 2.34 – Заполнение сети. Шахта с осадком на перекрытиях и банкетках. Затопление шахтного пространства приводит к отложению осадка на банкетках, перекрытиях, лестницах.

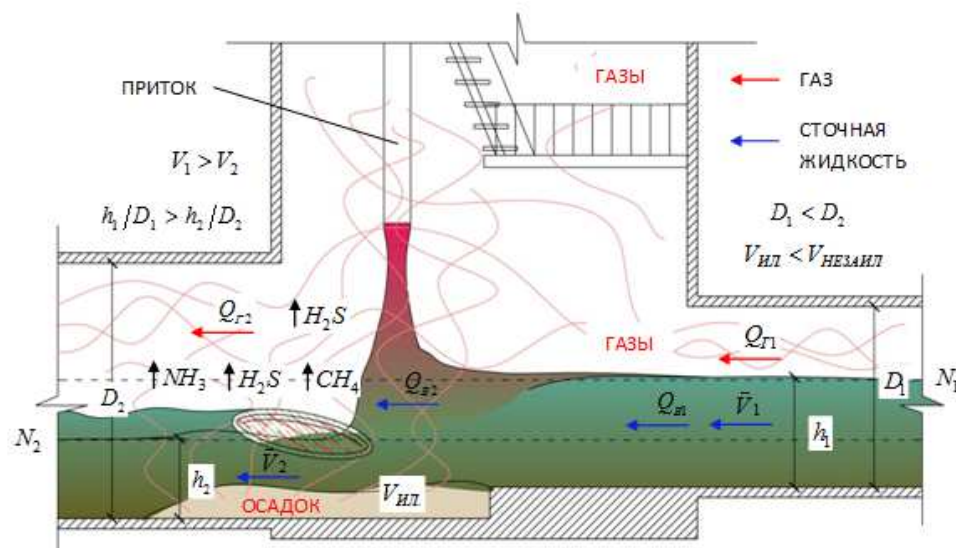


Рисунок 2.35 – Увеличение диаметра отводящего коллектора в шахте на сети при малых расходах на притоке способствует снижению заполнения коллектора и скорости движения жидкости.

Места подключений с высокой температурой, большим содержанием сульфидов и сульфатов, а также низким рН воды

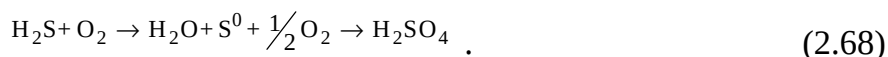
Экспериментальные данные, описанные в работах Xiaoyan Sun, Guangming Jiang, Philip L. Bond, Jurg Keller, Дмитриевой Е. Ю. и др. подтверждают, что другие факторы, такие как температура, также оказывают значительное влияние на скорость коррозии бетона. Большое содержание сульфидов и сульфатов в сточной жидкости способствует процессам образования сероводорода. Низкое содержание рН создает благоприятные условия для жизнедеятельности бактерий и грибов, интенсифицирующих процессы коррозии бетона.

2.8 Расчет требуемой кратности газообмена в подсводном и шахтном пространстве канализационной сети

Как отмечалось ранее, для увеличения срока службы эксплуатации канализационного коллектора требуется организация газообмена подсводного и шахтного пространства сети. Выше представлены уравнения, позволяющие рассчитать возможное количество газообмена за счет действия различных сил, однако нигде не упоминается о требуемой кратности газообмена того или иного участка канализационного коллектора.

При вентиляции КС происходит конкуренция 2 процессов [46]:

- скорости удаления сероводорода из подсводного пространства сети;
- скорости окисления сероводорода кислородом воздуха (при участии микроорганизмов), определяемой по формуле 2.68



Соответственно, при малой кратности газообмена скорость удаления сероводорода будет менее значительна, нежели окисление сероводорода кислородом воздуха, что будет способствовать обратному эффекту — увеличению скорости коррозии бетона и разрушению КС.

Понятным является тот факт, что требуемая кратность газообмена напрямую зависит от скорости дегазации сточных вод. Скорость выделения зависит от разности концентраций АГ в сточной жидкости и газообразной среде, от турбулентности потока, а так же от площади соприкосновения двух сред.

Образование газов в сточной жидкости зависит от её химического состава, а именно от концентрации сульфатов (SO_4^{2-}) и ХПК, физико-химических параметров (температуры, величины pH), и происходит при анаэробных условиях:

- в местах, где создались анаэробные условия: в заиленных лотках коллекторов, в отложениях на банкетах шахт;
- в напорных трубопроводах (при этом выделение газов происходит в местах перехода из анаэробного режима движения в аэробный, т. е. в КГН и ниже по сети от неё).

Как показывают наблюдения, наиболее большим разрушениям в КС подвергаются именно КГН и канализационная сеть ниже по течению трубопровода. Поэтому расчет кратности газообмена следует вести именно по этим сооружениям, или в случае отсутствия на участке сети КГН любому другому месту КС, имеющему наибольшую турбулентность потока.

Кратность газообмена следует определять из расчета минимально допустимой концентрации сероводорода в газовой воздушном пространстве КС на основе баланса движения сероводорода (2.69):



Количество сероводорода, поступающего в газовой воздушное пространство шахты за счет выделения из сточной жидкости, равно количеству удаленного сероводорода из шахтного пространства за счет газообмена с внешней средой.

Максимально допустимая концентрация сероводорода составляет 5 мг/м³. Реальная концентрация сероводорода в подсводном и шахтном пространстве сети может

быть определена опытным путем или рассчитана по эмпирической зависимости (2.70), предложенной Г. Я. Дрозд [46]

$$H_2S_{ГАЗ} = 7 \cdot T^{0,034} [H_2S]^{0,33T^{0,357}}, \quad (2.70)$$

где $H_2S_{ГАЗ}$ — концентрация сероводорода в подсводном и шахтном пространстве сети, мг/м³;

T — температура в подсводном и шахтном пространстве сети, К;

$[H_2S]$ — концентрация сероводорода в воде, мг/л.

$$[H_2S] = 0,0142 \cdot T^{1,744} \cdot t^{2,878 \cdot T^{(-0,464)}} \left(\frac{SO_4^{2-}}{ХПК} \right)^{-0,72}, \quad (2.71)$$

где T — температура в воде, К;

t — время пребывания в анаэробных условиях, час;

SO_4^{2-} — концентрация сульфатов в воде, мг/л;

ХПК — химическое потребление кислорода, мгО₂/л.

Зная концентрацию сероводорода на расчетном участке КС, можно рассчитать требуемую кратность газообмена по следующей зависимости

$$K_{ГАЗА} = \frac{C_{H_2S_{ГАЗ}}}{t_{ГАЗ} \cdot C_{H_2S_{ПДК}}}, \quad (2.72)$$

где $K_{ГАЗА}$ — требуемая кратность газообмена, час⁻¹;

$C_{H_2S_{ГАЗ}}$ — концентрация сероводорода в период отсутствия газообмена, мг/м³;

$C_{H_2S_{ПДК}}$ — ПДК сероводорода на расчетном участке КС, мг/м³;

$t_{ГАЗ}$ — время насыщения внутриканализационного пространства сероводородом до максимальных концентраций, час.

Время насыщения внутриканализационного пространства сероводородом до максимальных концентраций необходимо принять равным 1 час, что следует из анализа графиков изменения концентрации сероводорода в шахтном пространстве сети.

Используя зависимость (2.72), мы принимаем допущение о линейности закона изменения концентрации сероводорода в подсводном и шахтном пространстве сети, что в действительности можно наблюдать на графиках изменения концентрации сероводорода (рисунок 1.19, 3.1–3.2).

В случае отсутствия возможности измерения или расчета насыщенной концентрации H_2S , возможно произвести расчет по следующей зависимости (2.73)

$$K_{\text{ГАЗА}} = \frac{V_{\text{C}_{\text{H}_2\text{S}_{\text{ГАЗ}}}}}{C_{\text{H}_2\text{S}_{\text{ПДК}}}}, \quad (2.73)$$

где $V_{\text{C}_{\text{H}_2\text{S}_{\text{ГАЗ}}}}$ — скорость насыщения газа, расположенного в подсводном и шахтном пространстве сероводородом, мг/м³час.

$$V_{\text{C}_{\text{H}_2\text{S}_{\text{ГАЗ}}}} = \frac{C_{\text{H}_2\text{S}_{\text{ГАЗ}}}}{t_{\text{ГАЗ}}} \quad (2.74)$$

Скорость насыщения газа, расположенного в подсводном и шахтном пространстве сероводородом, можно принять равным $120 \frac{\text{мг} \cdot \text{час}}{\text{м}^3}$ (рисунок 3.3), что следует из анализа графиков изменения концентрации сероводорода в шахтном пространстве сети [78].

Требуемый расход воздуха из расчета кратности газообмена и объема вентилируемого пространства можно определить по следующей зависимости (2.75)

$$Q_{\text{ГАЗА}} = \frac{W_{\text{УЧ}} \cdot K_{\text{ГАЗА}}}{3600}, \quad (2.75)$$

где $Q_{\text{ГАЗА}}$ — требуемый расход воздуха на вентилируемом участке, м³/с;

$W_{\text{УЧ}}$ — объем вентилируемого участка, подверженного насыщению H_2S , м³.

$$W_{\text{УЧ}} = W_{\text{ШАХТЫ}} + W_{\text{КОЛ}}, \quad (2.76)$$

где $W_{\text{ШАХТЫ}}$ — объем шахты, подверженный насыщению сероводородом (как правило, это весь объем шахты), м³;

$W_{\text{КОЛ}}$ — объем коллектора, подверженный насыщению сероводородом, м³.

Длину канализационного коллектора, подверженного насыщению сероводородом, можно определить по зависимости Г. Я. Дрозд (2.77) [46]

$$\bar{U} = \exp \left[\frac{k \cdot D \cdot l}{V \cdot d_r} \right], \quad (2.77)$$

$$\bar{l} = \frac{0,7 \cdot V \cdot d_r}{k \cdot D}, \quad (2.78)$$

где $\bar{U}$ — относительная средняя концентрация выделившегося газа по длине канала, мг/м³;

$\bar{l}$ — относительная длина коллектора, м;

d_r — гидравлический диаметр воздушной части коллектора, м;

V — скорость газа в подсводном пространстве, м/с;

k — коэффициент, зависящий от вида препятствий в коллекторе, вызывающих интенсификацию выделения газа.

Для коллектора с концентрацией сероводорода в начале участка, равной 60 мг/м^3 , она составляет 600 м. [46].

Если на вентилируемом участке сети предполагается поддержание концентрации H_2S не более 5 мг/м^3 , то распространение H_2S по канализационному коллектору на значительные расстояния происходить не будет. Поэтому для расчета объема КС, подверженного насыщению H_2S , следует вместо объема шахты, подверженного насыщению H_2S , применить повышающий коэффициент 1,5, который будет учитывать возможное распространение H_2S по коллектору и создавать некоторый запас в расчетах. В таком случае формула (2.75) примет следующий вид [78]:

$$Q_{\text{ГАЗА}} = \frac{1,5 \cdot W_{\text{ШАХТЫ}} \cdot K_{\text{ГАЗА}}}{3600} . \quad (2.79)$$

Используя вышеприведенные зависимости, можно рассчитать требуемую кратность газообмена, требуемый расход воздуха для поддержания ПДК H_2S в сети.

При этом концентрация сероводорода в воздухе, выходящем из аэродинамического участка КС на дневную поверхность или фильтры очистки, будет составлять расчетную предельно допустимую концентрацию.

Также можно решить обратную задачу. Имея определенный расход воздуха на участке сети, можно определить концентрацию сероводорода на данном участке сети, что будет являться исходными данными для расчета и подбора фильтров очистки.

Имея определенную концентрации сероводорода в сети, можно определить скорость разрушения бетонного слоя сооружений на сети по следующей зависимости (2.80) [46]

$$V_{\text{К.Б}} = 0,073 \cdot H_2S_{\text{ГАЗА}} + 0,136 , \quad (2.80)$$

где $V_{\text{К.Б}}$ — скорость коррозии бетона, мм/год.

Зная скорость коррозии бетона и толщину защитного слоя бетона, можно рассчитать расчетный период эксплуатации сети (T) и сооружений на ней по следующей зависимости (2.81)

$$T = \frac{h_{\text{З.Б}}}{V_{\text{К.Б}}} , \text{ год} , \quad (2.81)$$

где $h_{\text{З.Б}}$ — толщина защитного слоя бетона, мм;

T — расчетный период эксплуатации сети, год.

2.9 Выводы по главе 2

В канализационных коллекторах протекают процессы транспортировки двух несмешивающихся фаз (сточной жидкости и газообразной среды). До настоящего времени канализационная сеть глубокого заложения рассчитывается на транспортировку сточной жидкости без учета движения газа по сети

Дезорганизованное движение газа по сети способствует малой кратности газообмена земля–коллектор, образованию застойных зон, из-за чего в подсводном и шахтном пространстве сети происходят процессы насыщения газозоудушного пространства различными токсичными газами. Впоследствии происходит выпадение конденсата сероводорода на стенки сооружений КС и преобразование его различными бактериями до серной кислоты. Результатом данных процессов является разрушение сооружений КС. Также негативным фактором дезорганизованного движения газа по КС являются несанкционированные выбросы агрессивных, токсичных газов в атмосферу.

Наиболее рациональным способом решения вышеописанных проблем при эксплуатации КС является увеличение кратности газообмена в КС за счет газообмена.

Несмотря на очевидную важность организации газообмена в системах канализования, сбора и очистки газа от запахов и токсичных примесей, решения проблем коррозии, прогресса в сторону изучения интересующих процессов и развития данного направления за все 80 лет принципиально не происходило. Увеличение фундаментальных знаний в этой области имеет решающее значение для продвижения комплексных решений по улучшению эксплуатации КС.

Теоретическое исследование процессов движения газа по КС проведено в данной главе. Результатом исследования являются полученные уравнения, математически описывающие процесс движения газа по самотечному канализационному коллектору, в зависимости от различных параметров эксплуатации КС;

Рассмотрены шахты с конструктивными и другими факторами и элементами, способствующими образованию избыточного давления в теле шахты, и последующим выбросом газов в атмосферу. Описаны конструктивные элементы (сооружения на сети), способствующие образованию депрессии, и их расчет. Представленные расчеты позволяют прогнозировать дислокацию мест выбросов АГ в атмосферу, их депрессионную нагрузку, мощность и периодичность, рассчитывать предельное местное сопротивление фильтра с учетом возможных обводных прорывов по газу.

ГЛАВА 3

ПРОГРАММЫ И МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1 Сравнение экспериментальных данных количества газа, движущегося по КС и теоретических результатов расчета

Для использования полученных зависимостей (2.26)–(2.27) необходимо провести сравнение результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными.

Экспериментальные данные количества газа, движущегося по КС, были получены в 1982 г. на действующем канализационном коллекторе Санкт-Петербурга группой специалистов под руководством проф. д.т.н. В. М. Васильева [24].

Сравнение эмпирических данных и результатов расчета, полученных по зависимостям (2.26)–(2.27) (расчет произведен в MAPL 14), представлено в приложении В.

Сравнение экспериментальных данных, полученными на каф. Гидравлики СПбГАСУ под руководством проф. д.т.н. В. М. Васильева с результатами произведенных расчетов дают относительную погрешность в 70 % случаев менее 9%. Зависимости (2.26)–(2.27) можно применять для расчета количества газа, движущегося по канализационному коллектору под действием увлекающей способности жидкости и естественной тяги.

3.2 Получение экспериментальных данных о величине и скорости выделения агрессивных газов CO_2 , H_2S , O_2 , CH_4 в подсводном, шахтном пространстве сети

Для определения требуемой кратности газообмена в КС необходимо знать параметр скорости выделения сероводорода из сточной жидкости и насыщения им газообразного вещества, расположенного в подсводном и шахтном пространстве сети в момент дисбаланса содержания сероводорода в 2 несмешивающихся фазах, движущихся по канализационному коллектору.

Цель эксперимента: определить максимальную скорость изменения концентрации газов H_2S в подсводном и шахтном пространстве сети, температуру внутри шахты, содержание кислорода и других газов.

Задачей эксперимента было получение графиков наиболее значительных изменений концентрации АГ (CO_2 , H_2S , O_2 , CH_4) в подсводном и шахтном пространстве КС.

Скорость изменения концентрации сероводорода в газообразном веществе, расположенном в подсводном и шахтном пространстве сети, определялась автором

экспериментальным путем в составе серии экспериментов, проводимых ООО «ПИБ «Инженерные Экосистемы» под руководством проф. В. М. Васильева [88, 47].

Метод проведения эксперимента: в эксперименте применялся метод замера концентраций газов во времени в действующих ТКГЗ.

Период проведения эксперимента: май-сентябрь 2011 г. определен с учетом требования высокой температуры дневной поверхности, так как с повышением температуры процессы газовой выделений идут наиболее активно.

Объект эксперимента: «Дублер канализационного коллектора в районе площади Мужества», выбран с учетом скорости коррозии, разрушения КС, так как скорость разрушения сети является прямым доказательством наличия высоких концентраций в подпольном и шахтном пространстве сети (рисунок 3.1).

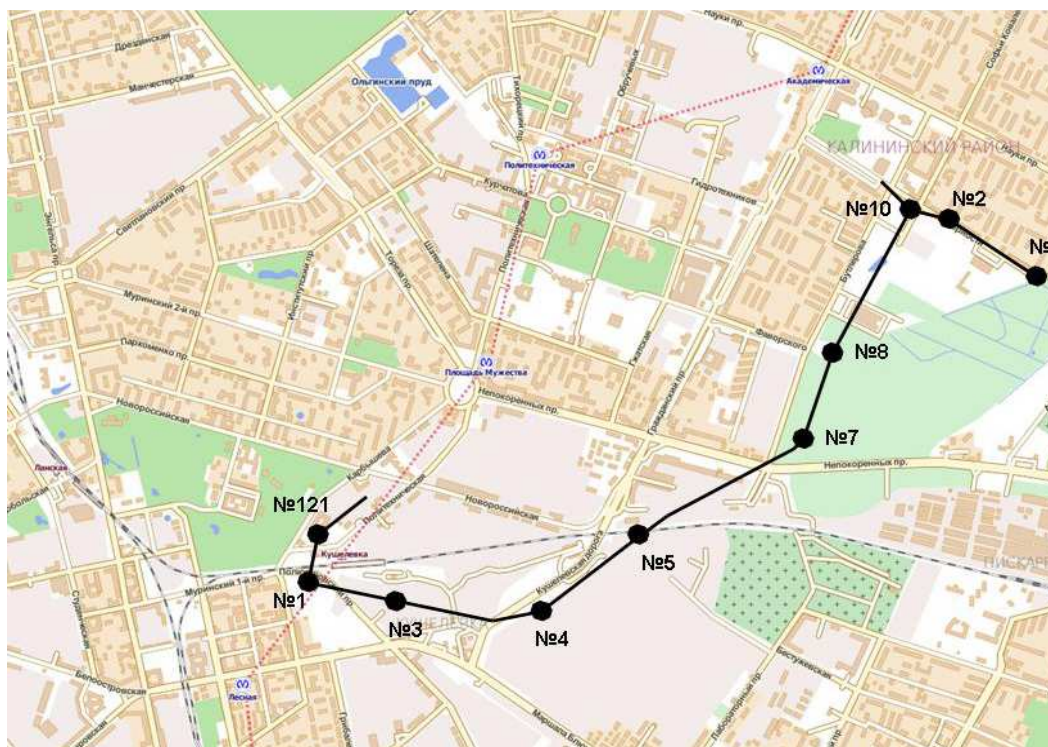


Рисунок 3.1 – План трассы тоннельного коллектора

«Дублер канализационного коллектора в районе площади Мужества»

«Дублер канализационного коллектора в районе площади Мужества» в Санкт-Петербурге был введен в эксплуатацию в 2007 году, но уже к 2011 г. характеризовался как аварийный из-за высокого процента разрушения в виде коррозии бетона и технологического оснащения шахты. Канализационный коллектор транспортирует хозяйственно-бытовые, производственные и дождевые сточные воды, в том числе и часть, поступающую от КНС «Пискаревская» по напорным водоводам длиной 7,5 км. Протяженность коллектора составляет 4,34 км, внутренний диаметр — 2000–2400 мм;

на коллекторе устроено 7 шахт глубиной 10–20 м различного функционального назначения. Коллектор проложен методом щитовой проходки, его внутренняя часть защищена полиэтиленовой отделкой. На объекте исследования были выбраны несколько шахт: 10, 8, 4, 1, так как данные шахты или имели особые конструктивные элементы в виде перепада, щитового затвора, поворота коллектора (поворотная шахта), или, наоборот, представляли собой классический вариант шахты (смотровая шахта).

Используемое оборудование: газоанализатор ВМ-25 (приложение Г), модуль накопитель ТЛАД MSP 430 (приложение Д).

ВМ-25 предназначен для одновременного измерения концентраций 5 газов непрерывно в течение 40–120 часов. Полученные значения автоматически записываются прибором и могут быть представлены в виде графиков концентрации с привязкой ко времени. Прибор абсолютно герметичен, предназначен для установки в агрессивных средах и местах возможного подтопления.

Выбор места установки прибора определяется: возможностью его размещения и последующего извлечения, условиями возможного затопления шахты, особенностями движения воздушных масс в пределах шахты.

По каждому измеряемому газу у прибора установлен свой предел измерений, при этом концентрация каждого газа измеряется в своих единицах. Углекислый газ CO_2 измеряется в процентах от объема воздуха. Предел измерения — 6,0 % (предел отображения на графиках — 5,0 %). Сероводород H_2S измеряется в PPM. 1 PPM (H_2S) = 1,42 мг/м³. Предел отображения — 100 PPM (142 мг/м³). Прибор фиксирует в памяти значения и выше предела измерения (120 PPM). Кислород O_2 измеряется в процентах от объема воздуха. Предел измерения — 30,0 %. Метан CH_4 измеряется в PPM. 1 PPM (CH_4) = 0,67 мг/м³. Предел измерения — 100 PPM (67 мг/м³).

Прибор представляет результаты измеренных данных в виде графика (см. рисунок 3.2, 3.3). На рисунках по оси абсцисс откладывается время измерения, а по оси ординат — значение концентрации в процентах (full scale) от предела измерения.

ТЛАД MPS 430 — предназначен для непрерывного (в течение 160 часов) фиксирования значения температуры и влажности среды, в которой он размещен. Прибор абсолютно герметичен, предназначен для установки его в агрессивных средах и местах возможного подтопления.

Безопасность проведения эксперимента. Все работы в шахтах и коллекторе, спуски и перемещения по тоннелю осуществлялись в полном соответствии с правилами по охране труда [92], под контролем Службы эксплуатации канализационных тоннелей ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». Перед началом работ бригада по обслуживанию тоннельных коллекторов глубокого заложения производит проветривание участка КС путем открытия людских лазов в ближайших шахтах проветриваемого участка. После проветривания шахты (снижения концентраций АГ ниже ПДК) и замера концентраций газов в стволе шахты производится спуск бригады рабочих и оборудования в количестве не менее двух человек, который страхуется сверху (с дневной поверхности) страховочной веревкой. Каждый работник оснащен специальным костюмом и инвентарем (шлем, фонарь, перчатки, страховочный пояс и т. д.), а так же проинструктирован по технике безопасности. Предельно допустимые концентрации. Данные о предельно-допустимых концентрациях в воздухе рабочей зоны приведены в действующих нормативных документах [39].

В процессе эксперимента было получено большое количество данных. Наиболее интересные результаты были получены в шахте № 10 с трубчатым перепадом и напорным коллектором выше по сети, в связи с чем в июле 2011 г. было проведено повторное исследование шахты. Влажность внутри шахты 72 %. Температура 27 °С.

Результаты эксперимента в виде графиков приведены на рисунках 3.2 и 3.3.

Скорость изменения концентрации сероводорода зависит от температуры в КС и на дневной поверхности и варьируется в интервале от 0 до 90 ppm (рисунок 3.3).

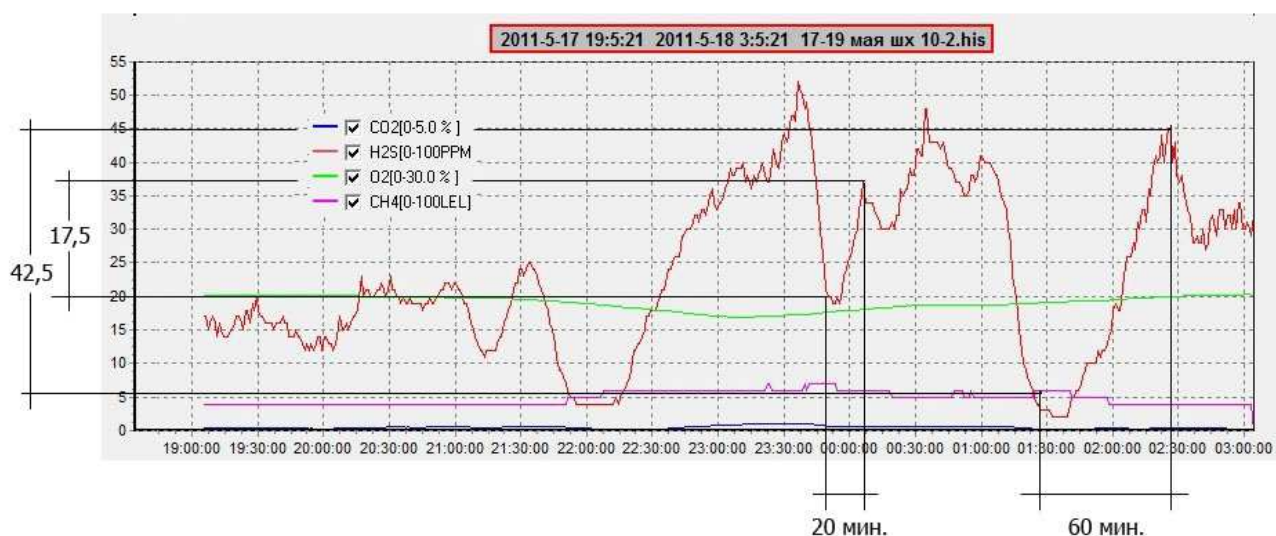


Рисунок 3.2 – График изменения концентрации газов (O_2 , H_2S , CO_2 , CH_4) в шахте № 10 в период с 19:05 17 мая 2011 г. по 03:05 18 мая 2011 г. Температура наружного воздуха 11,1 °С

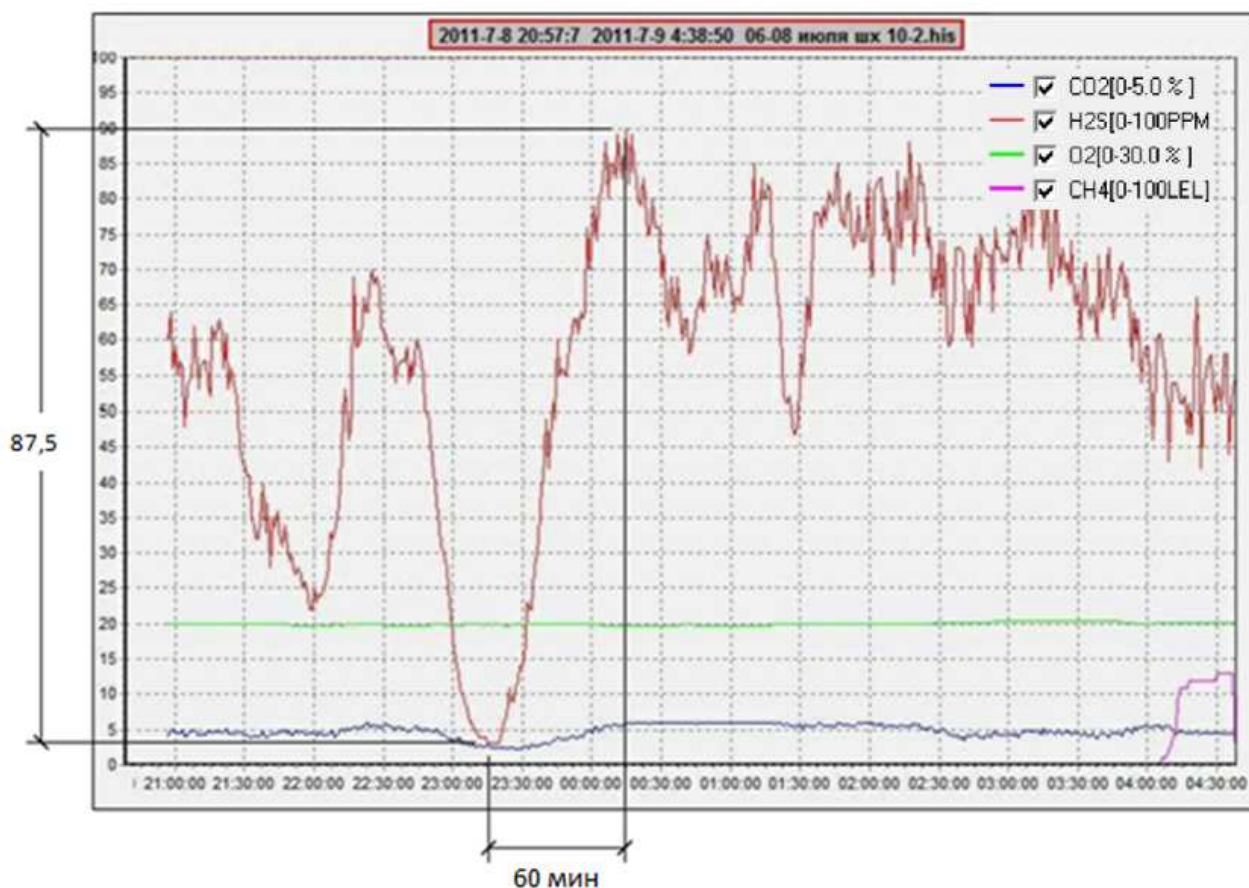


Рисунок 3.3 – График изменения концентрации газов (O_2 , H_2S , CO_2 , CH_4) в шахте № 10 в период с 20:57 08.07. 2011 г. по 04:38 09.07.2011 г. Температура наружного воздуха 25,1 °С.

Полученные результаты показывают скорость увеличения концентрации сероводорода в подсводном и шахтном пространстве сети, позволяют произвести расчет требуемой кратности газообмена в КС, гарантирующей поддержание концентрации сероводорода в подсводном и шахтном пространстве сети в допустимых пределах. Максимальная скорость изменения H_2S составила 90 ppm/час. Температура в сети составила 27 °С. Процентное содержание кислорода практически идентично содержанию кислорода в воздухе, а следовательно, вентилирование сети не приведет к увеличению содержания кислорода в КС и увеличению скорости коррозии сооружений сети.

3.3 Получение экспериментальных данных о величине и направлении движения газа в подсводном пространстве сети под действием поверхностной силы (увлекающей способности) потока сточной жидкости

Для подтверждения запертости (закрытия) газов подсводной части коллектора и их кругового движения (в виде местных завихрений) по коллектору были выполнены эксперименты на участке коллектора, подверженном сильным разрушениям из-за высокой концентрации агрессивных, токсичных газов.

Цель эксперимента: подтвердить теоретические расчеты движения газа по сети под действием поверхностной силы потока сточной жидкости, сравнить их с полученными экспериментальными данными.

Задача эксперимента: подтвердить наличие обратного потока газов (в случае наличия перекрытия коллектора в подсводной его части ниже по сети), получить данные о величине и направлении движения газа в подсводном пространстве сети под действием поверхностной силы (увлекающей способности) потока сточной жидкости; на основе полученных экспериментальных данных построить эпюру распределения скоростей в подсводной части канализационного коллектора, сопоставить экспериментальные данные и расчетные, полученные по новым зависимостям.

Период проведения эксперимента: сентябрь 2011 г.

Объект эксперимента: шахта № 8 коллектора «Дублер канализационного коллектора в районе площади Мужества». Схема коллектора приведена на рисунке 3.1.

Выбор места проведения натурных экспериментов определялся наличием в коллекторе конструктивных элементов в виде перекрытия коллектора в подсводной его части, которое создает преграду для движения газа ниже по сети.

Используемое оборудование: термоанемометр Testo 425 (приложение Е), сетка с невесомыми нитями на каждой ячейке 200х200 мм с шелковыми нитями на каждой ячейке (приложение Ж).

Два человека (слесари АВР) натягивают сетку с шелковыми нитями перпендикулярно потоку в месте начала самотечного коллектора, отводящего сточную жидкость из шахты № 8 в направлении шахты № 4 (рисунок 3.4). Закрепленные на сетке эластичные невесомые нити покажут направление движения потока газообразной среды.

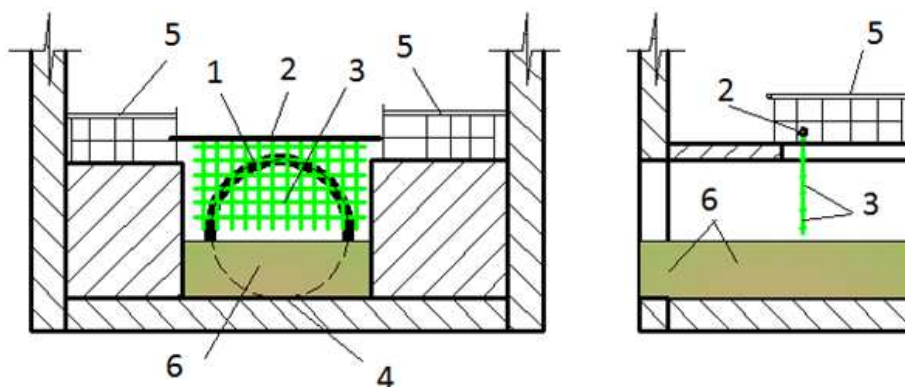


Рисунок 3.4 – 1 — самотечный, канализационный, тоннельный коллектор; 2 — опора для закрепления сетки; 3 — сетка для определения направления движения газообразной среды; 4 — лоток коллектора; 5 — ограждение; 6 — сточная жидкость

Третий человек производит измерение скорости потока газообразной среды при помощи прибора термоанемометр Testo 425 и словесно передает полученные измерения четвертому человеку (рисунок 3.5).

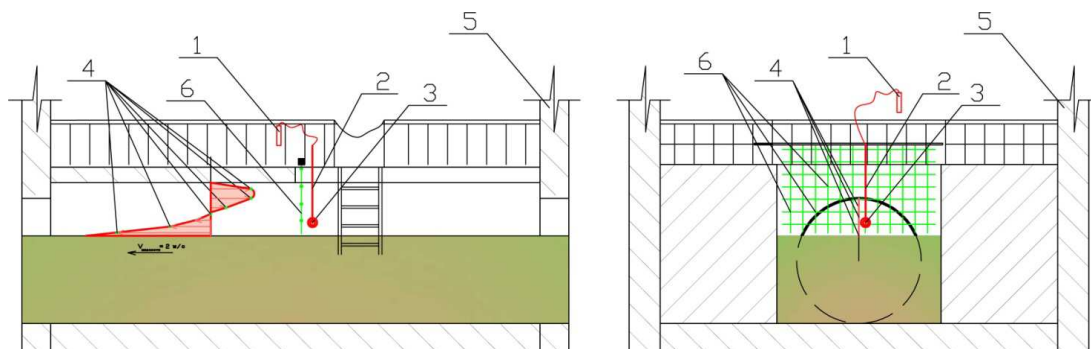


Рисунок 3.5 – Эпюра распределения скорости потока газа в подсводном пространстве коллектора: 1 — прибор Testo 425; 2 — телескопическая ручка; 3 — датчик измерения скорости движения потока; 4 — места измерений скорости потока; 5 — шахта; 6 — сетка для определения направления движения газообразной среды

Четвертый человек производит запись всех полученных измерений в блокнот, а именно направление движения воздуха знаками «+» и «-», показывающими, соответственно, попутное или разнопутное направление движение сточной жидкости и газообразной среды, а также их количественное значение.

Измерения прибором термоанемометром Testo 425 производятся в каждой ячейке сетки 200х200 мм.

Фотоматериалы производства работ и экспериментов приведены в приложении Ж.

Результаты эксперимента

Экспериментальные данные, снятые с центра (оси) потока сточной жидкости, представлены ниже:

- $V_{ГАЗА_В_(\bullet)1} = 0,65 \frac{м^3}{с}$ на расстоянии 100 мм от шельги коллектора;
- $V_{ГАЗА_В_(\bullet)2} = 0,65 \frac{м^3}{с}$ на расстоянии 250 мм от шельги коллектора;
- $V_{ГАЗА_В_(\bullet)3} = 0,25 \frac{м^3}{с}$ на расстоянии 400 мм от шельги коллектора;
- $V_{ГАЗА_В_(\bullet)4} = 0,00 \frac{м^3}{с}$ на расстоянии 500 мм от шельги коллектора;
- $V_{ГАЗА_В_(\bullet)5} = -0,65 \frac{м^3}{с}$ на расстоянии 700 мм от шельги коллектора;
- $V_{ГАЗА_В_(\bullet)6} = -1,50 \frac{м^3}{с}$ на расстоянии 800 мм от шельги коллектора;
- $V_{ПОВ} = 2,0$ м/с скорость на поверхности потока сточной жидкости.

Заполнение коллектора во время замера скорости и направления потока газообразной среды составляло $h/D=0,7$.

На основании полученных экспериментальных данных была построена эпюра распределения потока газообразной среды (рисунок 3.5).

Графическое сравнение расчетных и экспериментальных данных представлено на рисунке 3.6. Эпюра, выделенная синим цветом, — теоретическая эпюра распределения скоростей, рассчитанная по формуле (2.9). Эпюра, выделенная красным цветом, — эмпирическая эпюра распределения скоростей, представляет графическое изображение потока газа, движущегося в попутном (прямом) направлении под действием увлекающей способности сточной жидкости и в обратном направлении из-за наличия препятствия ниже по сети (рисунок 3.6).

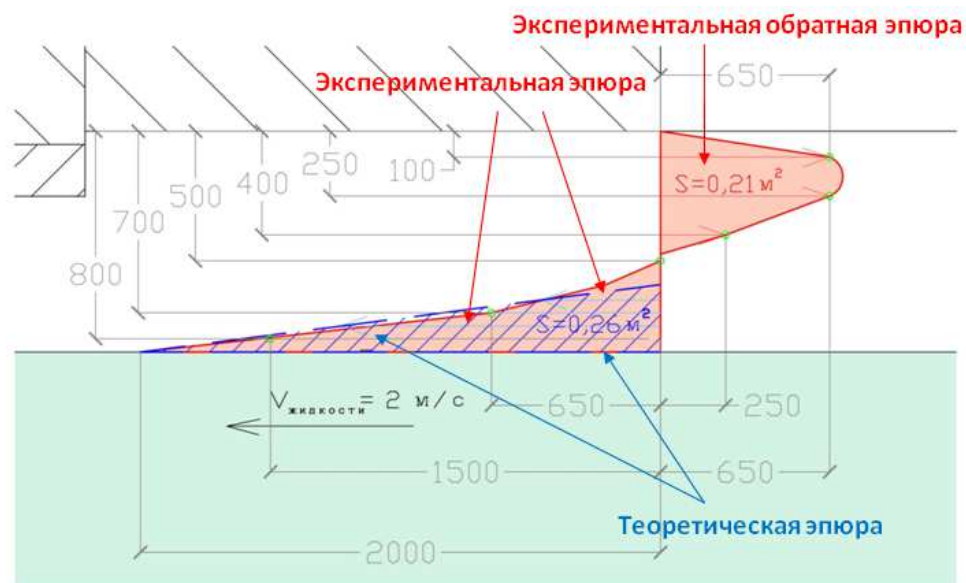


Рисунок 3.6 – Графическое сравнение расчетных и экспериментальных значений скоростей потока газа в подсводном пространстве сети под действием увлекающей способности жидкости

На основании полученных данных по формулам (2.10) и (2.27) был произведен расчет количества газообразной среды, движущейся под действием поверхностной силы потока сточной жидкости.

Эксперимент подтвердил наличие возвратного течения, расход которого составляет при заполнении коллектора $h/D = 0.7$ ($Q=0,48 \text{ м}^3$ в секунду), что является сопоставимым с расчетами, выполненными по теоретическим зависимостям (2.10) и (2.27).

Для предотвращения процессов противоточного движения газообразной среды в подсводном пространстве канализационного коллектора и насыщения подсводного и шахтного пространства агрессивными токсичными веществами необходимо в шахте 1

(рисунок 3.1) устройство вентиляционного воздуховода (рисунок 3.7), производящего удаление избыточных газов из шахты 1 и подсводного пространства приточного коллектора. Шахта 1 расположена на значительном удалении от жилой застройки и мест пребывания человека, поэтому на данном участке вопрос очистки газов не стоит особенно остро.

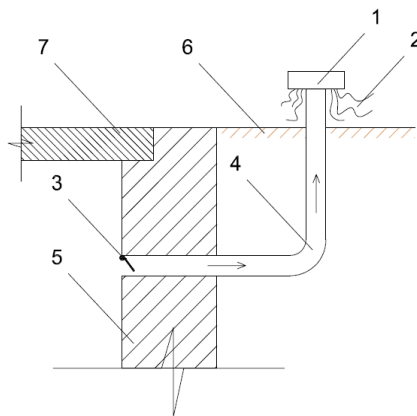


Рисунок 3.7 – Конструкция установки «спускного клапана»: 1 — дефлектор с фильтром; 2 — газообразная среда; 3 — обратный клапан; 4 — воздуховод; 5 — стенка шахты; 6 — дневная поверхность; 7 — плита покрытия шахты

Установка, представленная на рисунке 3.7, позволит: предотвратить обратное течение газообразной среды в подсводном пространстве коллектора; увеличить интенсивность проветривания шахты; уменьшить концентрацию АГ в КС; уменьшить скорость бетонной коррозии; увеличить период эксплуатации сети; предотвратить срыв крышек с верхних перекрытий шахт.

Полученные экспериментальные данные подтверждают теоретические результаты расчета. Зависимость (2.9) можно применять для построения эпюр движения газа и определения скорости потока в точке в подсводном пространстве канализационного коллектора движущегося за счет увлекающей способности жидкости. Зависимость (2.10) можно применять для расчета количества газа, движущегося по канализационному коллектору под действием увлекающей способности жидкости.

3.4 Предотвращение коррозии конструкционных материалов в канализационной сети за счет организации газообмена, подтверждение возможность организации газообмена за счет использования конструкции «трубчатый перепад с глухим перекрытием в нижней части шахты, эжектором и стояком воздушником»

В разделе 2.7 представлены выводы о необходимости на участках КС, подверженных сильному воздействию АГ, применять различные конструктивные элементы,

направленные на снижение агрессивности среды либо ее изоляцию. Одним из таких элементов следует считать трубчатый перепад с глухим перекрытием в нижней части шахты, эжектором и стояком воздушником (патент на изобретение № 2394965 приоритет от 29.12.08 г. Авторы В. М. Васильев, Ф. В. Васильев [90]). Однако эффективность данного конструктивного элемента на сегодняшний день до конца не подтверждена.

В качестве примера, подтверждающего вышеописанные процессы, рассмотрим участок тоннельного канализационного коллектора Васильевского острова Санкт-Петербурга, транспортирующего сточные воды от Шкиперского протока до Василеостровской насосной станции [23] (рисунок 3.8).

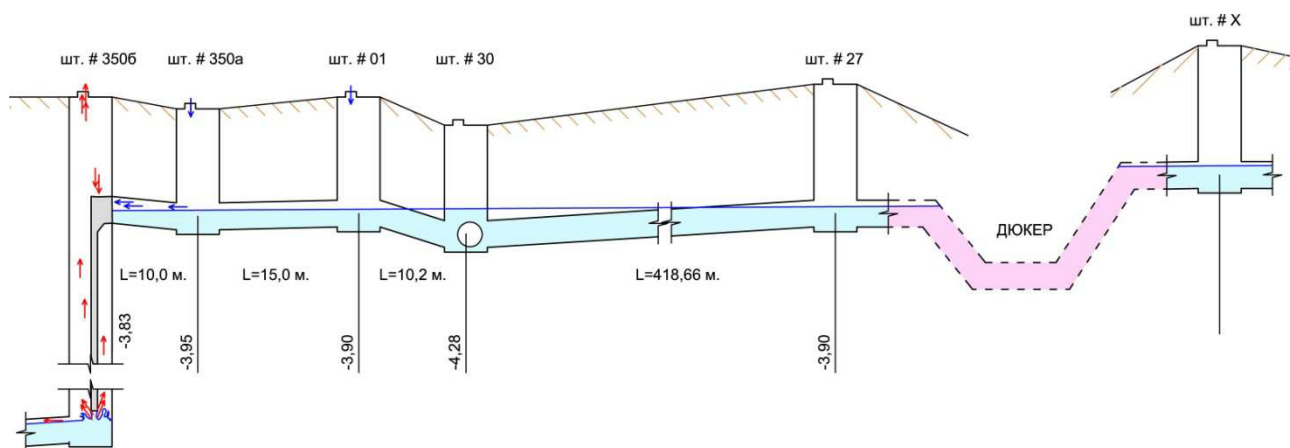


Рисунок 3.8 – Приточный коллектор шахты 350Б

Согласно схеме КС (рисунок 3.8) подача сточных вод от выше расположенного канализационного коллектора до приемной камеры канализационной насосной станции осуществляется с использованием трубчатого перепада, расположенного в шахте 350Б.

Канализационная шахта 350Б построена в 1980 г., наружный диаметр шахты составляет 6,0 м. В шахте устроен трубчатый перепад диаметром 1,0 м с высотой падения жидкости 18,3 м. В нижней части шахты устроен водобойный колодец (прямоугольный в плане) (рисунок 3.9).

Шахта 350Б была подвержена активному разрушению, причина разрушений — большая концентрация АГ (более 10 мг/м^3). Высокая концентрация АГ стала следствием конструктивных особенностей приточного коллектора, гидравлических режимов движения жидкости и наличия перепада в самой шахте (рисунок 3.9).

В 2002 г. ООО «ПИБ «Инженерные Экосистемы» по просьбе ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» провело обследование шахты 350Б и канализационного коллектора, расположенного выше по сети [23]. В процессе обследования было отмечено, что глубина разрушения железобетонной конструкции увеличивалась по мере спуска на

более низкие отметки шахты. Наиболее значимые по площади разрушения отмечались в потолочной части перекрытий вплоть до арматуры (рисунок 3.11), в области входной воронки и проемов. Движение газовой смеси высокой влажности по сечению шахты в направлении водобойный колодец — входная воронка со скоростью 0,3 м/с было достаточным для переноса выделившихся из водобойного колодца газов и мелкодисперсных частиц (аэрозолей).

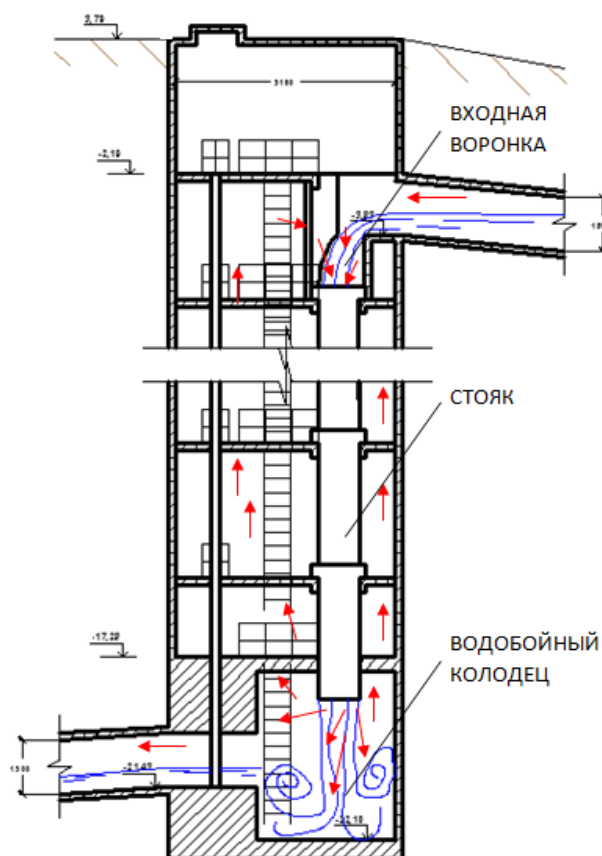


Рисунок 3.9 – Конструкция шахты 350Б до реконструкции. Схема движения жидкости и газа в шахте

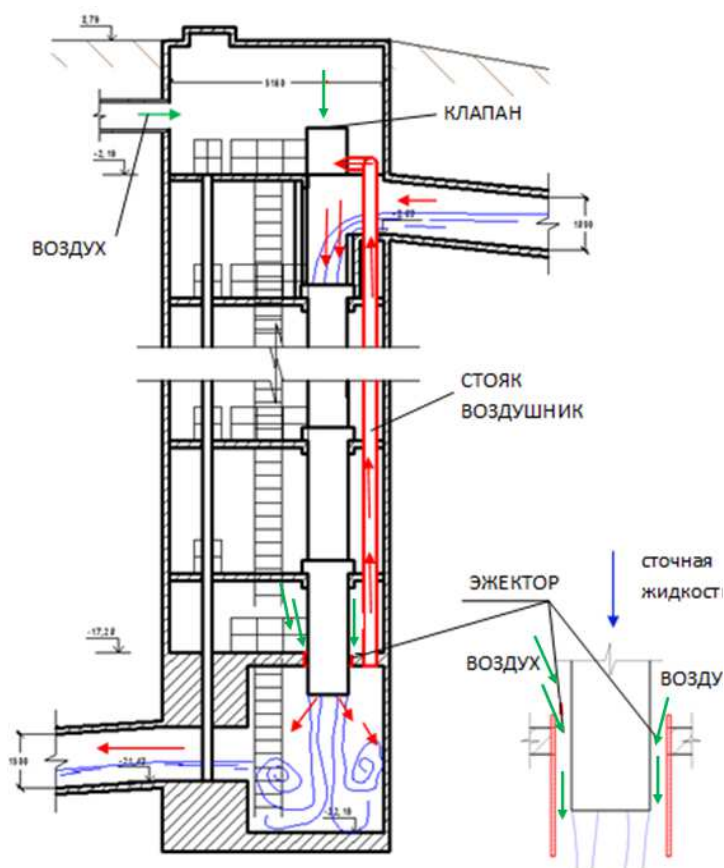


Рисунок 3.10 – Конструкция шахты 350Б после реконструкции. Схема движения жидкости и газа в шахте



Рисунок 3.11 – Разрушение потолочной части перекрытия площадки шахты 350Б 2002г.

Обследование сети и сооружений на ней показало, что на канализационном коллекторе выше по сети, от шахты 27 до шахты 350Б имеются участки с контруклоном по направлению движения сточной жидкости (рисунок 3.8). Данная конструктивная особенность — отступление от проектных решений — является недопустимой. Отрицательный уклон создает застойные зоны, где скорость сточной жидкости ниже значений незаиливающих скоростей. На участках КС со скоростью потока сточной жидкости ниже значений незаиливающих скоростей в лотковой части коллектора выпадает осадок, который впоследствии загнивает и создает условия для протекания анаэробных процессов.

Участок КС с контруклоном имеет гораздо меньший диапазон расходов сточной жидкости, при котором сеть работает полным сечением. Работа канализационного коллектора также приводит к образованию анаэробных процессов.

Анаэробные процессы приводят к образованию растворенного сероводорода, который выделяется в подсводное газовоздушное пространство сети. Наличие дюкера в начале участка сети усугубляет данные процессы. Особенно активно процессы выделения сероводорода проходят при большой турбулентности потока сточной жидкости, как правило, такая турбулентность создается на канализационных перепадах.

Наличие перепада ниже по сети интенсифицирует процессы газовыделения в шахте 350Б. В процессе транспортировки сточной жидкости из верхнего бассейна канализования в нижний в трубчатом перепаде шахты 350Б, а также в водобойном колодце шахты создаются условия для активного выделения растворенного сероводорода, что приводит к разрушению конструкции шахты, особенно в ее нижней части.

На основе рекомендаций ООО «ПИБ «Инженерные Экосистемы» была произведена реконструкция шахты. Основные изменения в технологической схеме работы перепада: устройство эжектора на трубчатом перепаде, киоска для впуска воздуха, перекрытия над водобойным колодцем с клапаном, стояка-воздушника, что соответствует конструкции перепада, представленного в патенте [90]. Данные изменения позволили организовать вентиляцию шахты 350Б и отделить зону образования агрессивной газовоздушной смеси (рисунок 3.10).

Все технологическое оборудование шахты, включающее площадки обслуживания, лестничные ограждения, крепления стояка, сам стояк и входную воронку были выполнены из композитных материалов.

Цель эксперимента: подтвердить эффективность устройства трубчатого перепада с глухим перекрытием в нижней части шахты, эжектором и обратным стояком подачи газа из водобойного колодца в верхнюю часть перепада. Зафиксировать снижение концентрации АГ и снижение скорости коррозии бетона в шахте 350Б.

Задача эксперимента: провести визуальное обследование шахты, измерить концентрацию АГ, скорость и направление движения газа через эжектор и воздушный трубопровод обратной подачи газа, толщину корродируемого слоя бетона; определить скорость коррозии в мм/год.

Методы, используемые в эксперименте: метод проведения экспериментов по замеру концентраций газов во времени в действующих ТКГЗ; по замеру скорости и определению направления движения газа на действующем ТКГЗ; метод сравнения теоретических данных с экспериментальными данными; метод натурного эксперимента влияния эжектора трубчатого перепада на концентрацию агрессивных токсичных газов и скорость коррозии в шахте КС.

Период проведения эксперимента: октябрь–ноябрь 2016 г.

Объект эксперимента: шахта 350Б, расположенная на канализационном коллекторе Васильевского острова . Санкт-Петербурга.

Используемое оборудование: газоанализатор ВМ-25 (приложение Г), термоанометр Testo 425 (приложение Е).

Безопасность проведения эксперимента: Все работы в шахтах и коллекторе, спуски и перемещения по тоннелю осуществлялись в полном соответствии с правилами по охране труда [92], под контролем Службы эксплуатации канализационных тоннелей ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

На действующей шахте 350Б, расположенной на канализационном коллекторе Васильевского острова, было проведено визуальное обследование состояния шахты. Обследование показало отсутствие разрушения бетонных конструкций, технологического оборудования и шахты в целом (рисунок 3.12). Шахта находится в хорошем работоспособном состоянии без видимых следов коррозии и разрушения.

Проведенный замер концентрации АГ в теле шахты в период с 12:03 31.10.16 г. по 22:59 01.11.16 г. показал, что концентрация таких газов, как метана, кислорода, углекислого газа не превышает ПДК. А сероводород в 92 % не превышает ПДК, которая для бетона составляет 5 мг/м^3 (рисунок 3.13).



Рисунок 3.12 – Состояние шахты 350Б в октябре 2016 г.



Рисунок 3.13 – Концентрация углекислого газа, метана, кислорода и сероводорода в шахте 350Б в октябре 2016 г.

Проведенный замер скорости потока газа на всасывании в эжектор показал значение скорости потока газа варьируемом 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 сходится с результатами по замеру 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.

3.5 Подтверждение снижения концентрации агрессивных газов за счет вентиляции сети даже при малой кратности газообмена, организованной за счет естественной тяги

Газообмен является наиболее эффективным, рациональным, экономически целесообразным всеобъемлющим способом решения ряда проблем эксплуатации КС, в том числе снижения концентрации АГ в подсводном и шахтном пространстве сети. Как отмечено ранее, во время вентиляции КС происходит конкуренция двух процессов.

С учетом данного фактора возникают вопросы:

- насколько эффективна вентиляция шахт естественным путем;
- какова кратность газообмена при естественной вентиляции;
- насколько вероятен обратный отрицательный эффект, при котором окисление сероводорода кислородом воздуха (при участии микроорганизмов) будет идти эффективнее удаления газообразного сероводорода из подсводного пространства.

Цель эксперимента: подтвердить эффективность газообмена между атмосферой и КС даже при малых значениях естественной тяги.

Задача эксперимента: провентилировать шахту естественным путем, измерить концентрацию АГ в динамике, определить кратность газообмена при организации вентиляции шахты естественным путем без организации дополнительных мероприятий.

Метод проведения эксперимента: в эксперименте применялся метод замера концентраций газов во времени в действующих шахте, метод замера скорости и направления потока газа, проходящего через людской лаз.

Период проведения эксперимента: октябрь–ноябрь 2016 г.

Объект эксперимента: шахта 350Б, расположенная на канализационном коллекторе Васильевского острова Санкт-Петербурга.

Используемое оборудование: газоанализатор ВМ-25 (приложение Г), термоанометр Testo 425 (приложение Е).

Безопасность проведения эксперимента: все работы в шахтах и коллекторе, спуски и перемещения по тоннелю осуществлялись в полном соответствии с правилами по охране труда [92], под контролем службы эксплуатации канализационных тоннелей.

Программа проведения эксперимента.

В шахте 350Б после проведения подготовительных работ, проветривания и замера концентрации АГ под руководством автора 31.10.2016г. в 12:00 был установлен прибор

ВМ-25, который производил измерения концентрации АГ в течение времени и фиксировал результаты в памяти прибора.

В 12:20 все покинули шахту и закрыли людской лаз, привели шахту в обычное рабочее состояние. Через 1 час 30 мин в 13:50 людской лаз был повторно открыт для проветривания шахты естественным путем. В процессе проветривания производился замер скорости и направления движения газа через людской лаз шахты 350Б. В 14:20 людской лаз был закрыт, шахта приведена в обычное рабочее состояние. Прибор ВМ-25 остался в шахте для продолжения мониторинга концентрации АГ. Прибор был изъят из шахты 03.11.2016 г. для снятия показаний и завершения эксперимента.

График измерений приведен на рисунке 3.14.



Рисунок 3.14 – 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), 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.

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 газообмен в час. Запах составил 3-4 балла.

На рисунке 3.15 представлены фотографии с места проведения эксперимента.



Рисунок 3.15 – Замер скорости и направления движения газа через людской лаз шахты при вентиляции шахты естественным путем

3.6 Выводы по главе 3

Полученные уравнения (2.26, 2.27) можно применять для расчета количества газа, движущегося по канализационному коллектору под действием увлекающей способности жидкости и естественной тяги.

Максимальная скорость изменения концентрации H_2S в шахте составила 90 ppm/час. Процентное содержание кислорода практически идентично содержанию кислорода в воздухе, а следовательно, вентиляция сети не приведет к увеличению скорости коррозии сооружений сети.

Уравнение (2.9) можно применять для построения эпюр движения газа и определения скорости потока в точке в подводном пространстве канализационного коллектора движущегося за счет увлекающей способности жидкости. Уравнение (2.10) можно применять для расчета количества газа, движущегося по канализационному коллектору под действием увлекающей способности жидкости.

Результатом реконструкции шахты 350Б стало: снижение концентрации АГ, прекращение коррозии конструкций шахты, увеличение срока службы сооружений сети. Сооружение «трубчатый перепад с глухим перекрытием в нижней части шахты, эжектором и стояком воздушником» позволило организовать газоотмен и предотвратить коррозию в шахте.

Естественная вентиляция шахты приводит к снижению концентрации АГ до показаний, близких к нулю (см. H_2S) даже при малой кратности газообмена в сети, является эффективным способом борьбы с высокой концентрацией АГ в теле шахты. При естественной вентиляции шахты достигается 6-кратный газообмен.

ГЛАВА 4

РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ ГАЗА ПО КАНАЛИЗАЦИОННОЙ СЕТИ

4.1 Метод расчета количества и направления движения газа по канализационной сети и сооружениям на ней

Одним из способов увеличения срока службы канализационных коллекторов, снижения скорости разрушения сети является организация газообмена.

В советской и современной зарубежной литературе пишут, что процесс газообмена в КС не поддается расчету ввиду сложности и многообразия процессов, их зависимости от множества параметров, различных по своим значениям, природе протекания и изменяемости в течение времени [150] (рисунок 4.1).

Однако, развитие электронного вычисления, создание различных программ расчета, а также расчетных комплексов газообмена в смежных отраслях промышленности (горнодобывающая промышленность, метрополитен, дорожное тоннелестроение) [34, 45, 59, 60, 115] позволяет производить расчет газообмена КС.

Как отмечалось ранее, движение газа по сети подчиняется трем законам Кирхгофа.

1. Закон сохранения массы. Расходы газа Q_i в ветвях должны удовлетворять условию неразрывности

$$\sum_i^n Q_i = 0 \quad (4.1)$$

Другими словами, количество газа, поступившего в аэродинамический участок или узел, равно количеству газа, вышедшему из него.

2. Закон сохранения энергии. Алгебраическая сумма депрессий P_i ветвей любого замкнутого контура равна «0»

$$\sum_{i=1}^m P_i = 0 \quad (4.2)$$

3. Принцип минимума мощности. Расход газа ветвей с сопротивлением R_K должен соответствовать минимуму затрат энергии на её перемещение:

$$\sum_{k=1}^V R_k \cdot Q_K^2 = \min \quad (4.3)$$

$$\sum |R_k \cdot Q_K^2| \rightarrow \min \quad (4.4)$$

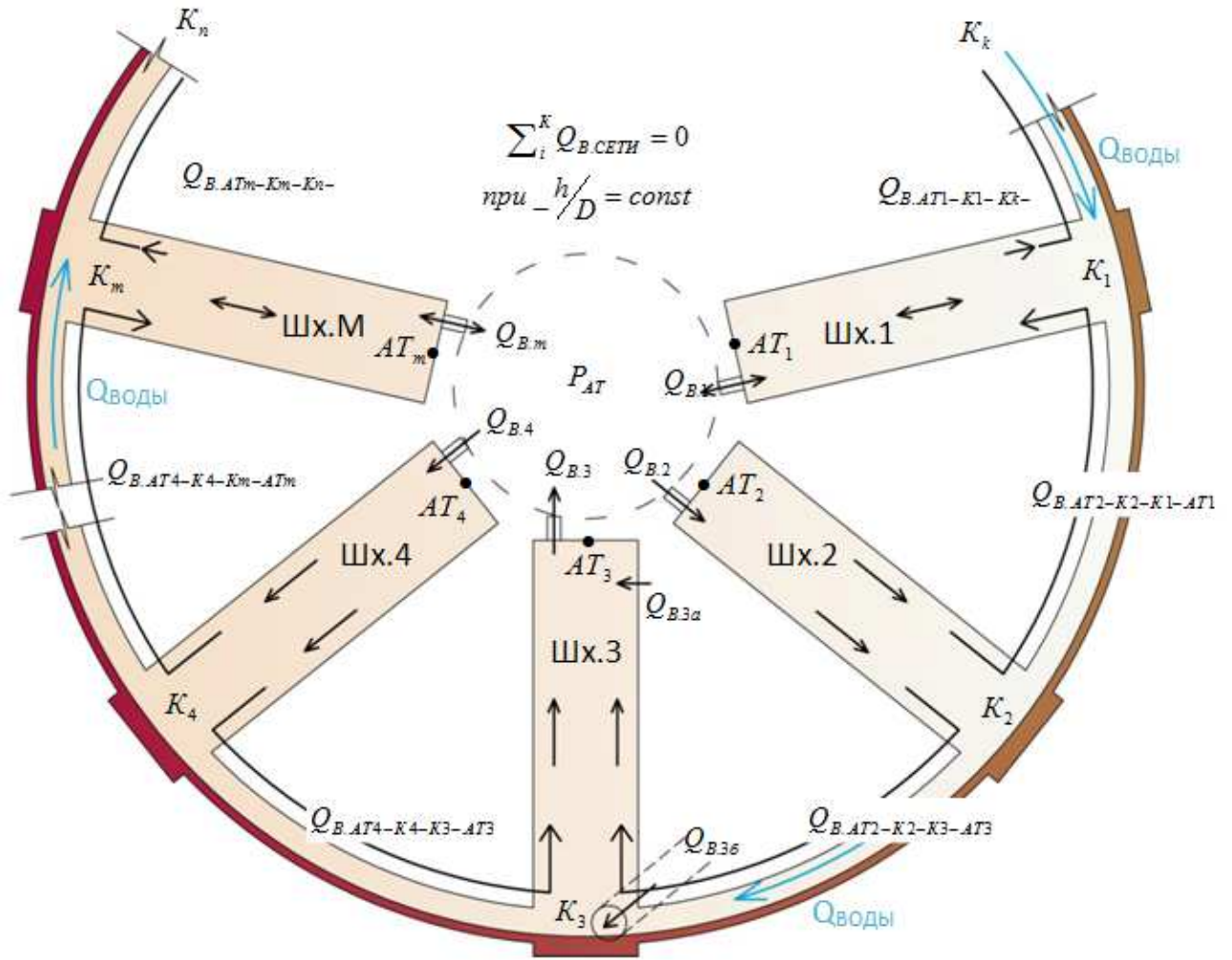


Рисунок 4.1 – Схема сопряжения шахт КС между собой

На рисунке 4.1 видно, что канализационная сеть имеет n шт. аэродинамических участков, имеющих прямое сопряжение между собой. Другими словами, каждый из n шт. аэродинамических участков оказывает воздействие на смежный портал сети. Движение газа в шахтах 1 и М возможно в обоих направлениях в зависимости от разности количества поступающих и удаляемых газов в смежные порталы сети. В таком случае закон сохранения массы, применительно к рисунку 1, можно записать в следующем виде (движение газа из шахты в атмосферу принято со знаком «+», отток газа из атмосферы в шахту со знаком «-») [79]

$$\begin{aligned}
 Q_{B,1} &= Q_{B,AT2-K2-K1-AT1} - Q_{B,AT1-K1-K2-} \\
 Q_{B,2} &= -Q_{B,AT2-K2-K1-AT1} - Q_{B,AT2-K2-K3-AT3} \\
 Q_{B,3} &= Q_{B,3a} + Q_{B,3b} + Q_{B,AT2-K2-K3-AT3} + Q_{B,AT4-K4-K3-AT3} \\
 &\dots \\
 Q_{B,m} &= Q_{B,AT4-K4-Km-ATm} - Q_{B,ATm-Km-Kn-}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

$$Q_{B.1} + Q_{B.2} + Q_{B.3} + Q_{B.4} + \dots + Q_{B.m} + Q_{B.n} + \dots + Q_{B.k} = 0$$

Справедливо также утверждение, что каждый из n шт. аэродинамических участков оказывает воздействие на все порталы и аэродинамические участки сети (рисунок 4.2).

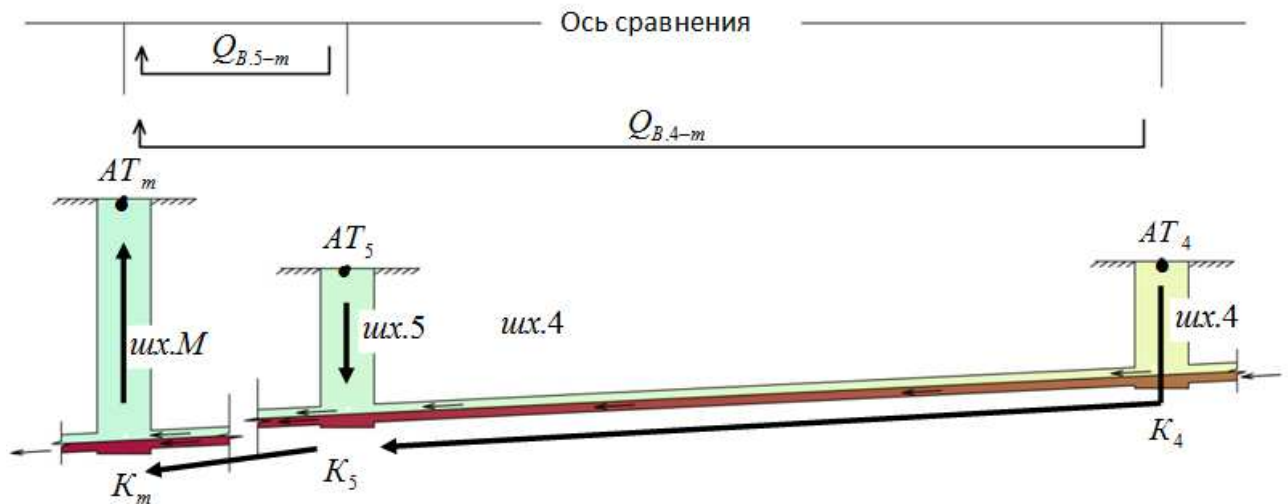


Рисунок 4.2 – Влияние шахты М (аэродинамический участок K5-Km-ATm) на шахту 4 и шахту 5

Однако, если рассмотреть ситуацию более подробно получается, что влияние одного аэродинамического участка на другие аэродинамические участки и порталы, не имеющие смежного сопряжения с расчетным участком, ничтожно мало из-за большого аэродинамического сопротивления по длине и может не учитываться при расчете сети.

Сравнение аэродинамического сопротивления на участках AT5-K5 и AT4-K4-K5

$$R_{2-K_2} \cdot Q_{2-K_2}^2 = R_{3-K_3-K_2} \cdot Q_{3-K_3-K_2}^2 \quad (4.6)$$

Из рисунка 4.2 видно, что $R_{AT5-K5} \ll R_{AT4-K4-K5}$

Следовательно, $Q_{B.AT5-K5} \gg Q_{B.AT4-K4-K5}$

Как уже отмечалось ранее, газ движется по сети за счет увлекающей способности жидкости, естественной тяги (разности давления в порталах одного аэродинамического участка), изменения объема подсводного и шахтного пространства сети (изменения заполнения сети сточной жидкостью).

Определение количества газа, движущегося за счет увлекающей способности жидкости по КС, не представляет сложностей и может быть произведено по (2.10).

Определение количества газа, движущегося за счет естественной тяги и увлекающей способности жидкости по КС также, не представляет сложностей и может

Как видно на рисунке 4.3, давление в портале определяется из расчета веса столба газа, действующего на портал на уровне сопряжения портала и аэродинамического участка. Расчет относительного давления в портале КС можно произвести по зависимости (4.7)

$$P_{\text{ОТН.ПОРТАЛА}} = g \cdot h_{\text{АТ}} \cdot \rho_{\text{АТ}} + g \cdot h_{\text{ПОРТАЛА}} \cdot \rho_{\text{ПОРТАЛ}} \quad (4.7)$$

Разность давления сопряженных порталов покажет направление действия силы естественной тяги и ее количество.

После определения давления в порталах, количества и направления движения газа в подсводном пространстве сети необходимо произвести расчет узла (рисунок 4.4) [79].

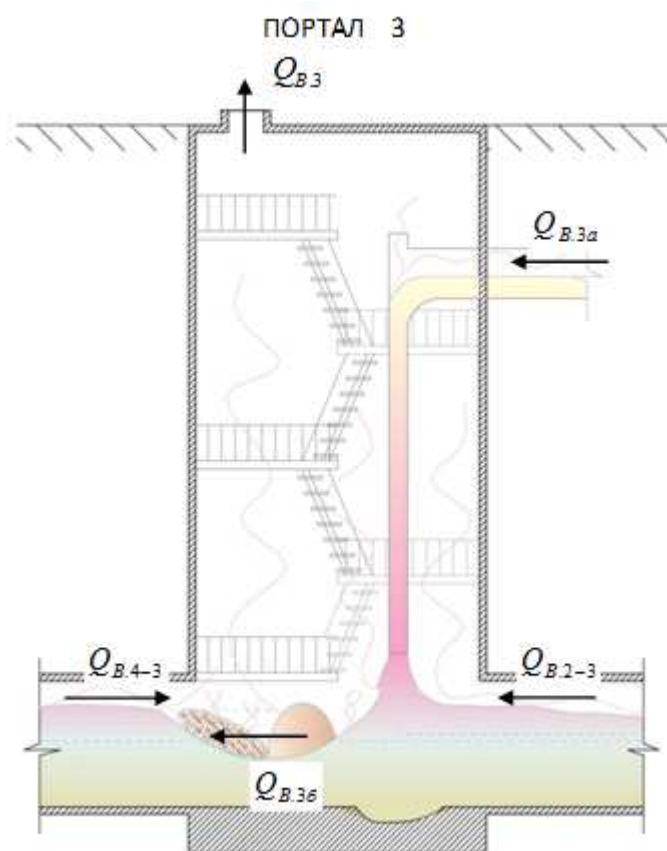


Рисунок 4.4 – Схема движения газа внутри узла № 3

Расчет узла основан на 1-м законе Кирхгофа — закон сохранения массы.

Формула расчета применительно к рисунку 4.3 будет выглядеть следующим образом

$$Q_{B.3} = Q_{B.2-3} + Q_{B.3б} + Q_{B.4-3} + Q_{B.3a} \quad (4.8)$$

Результаты расчета узла покажут нам направление движения и количество газа из или в шахту. Результаты аэродинамического расчета КС представлены на рисунке 4.5.

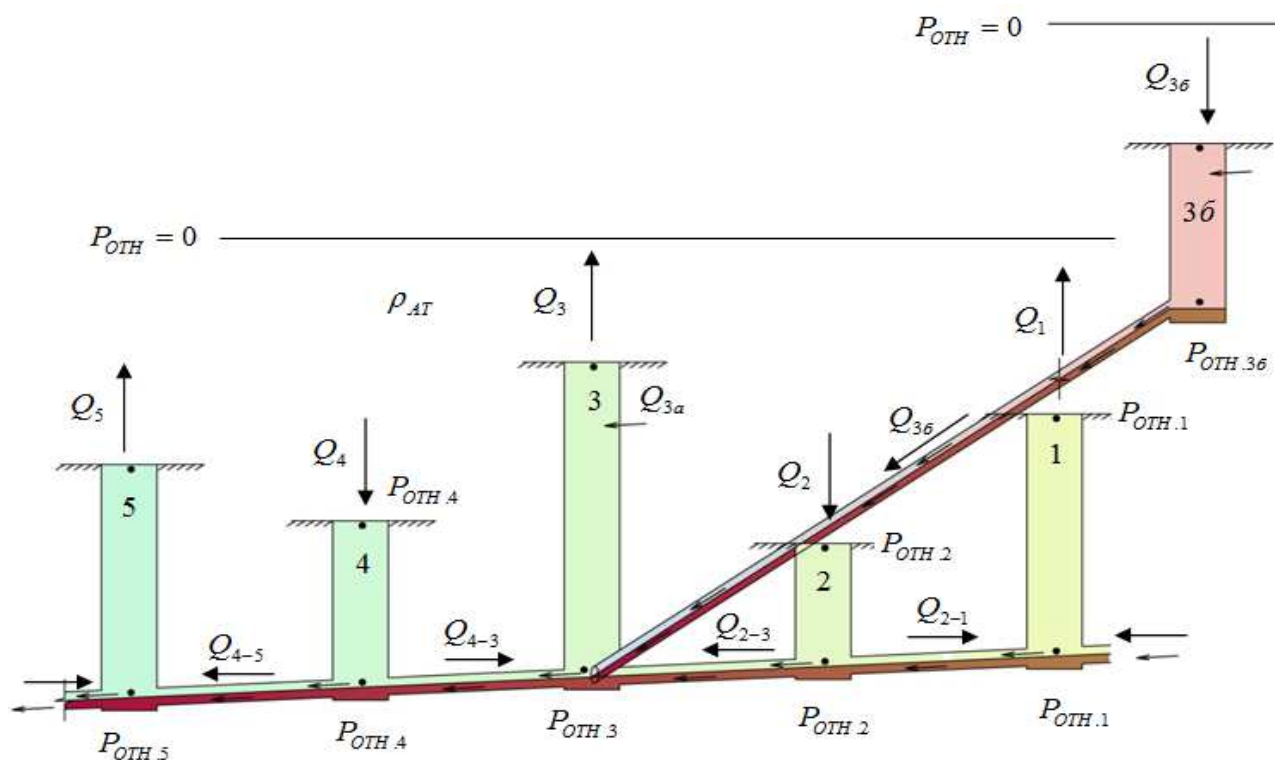


Рисунок 4.5 – Результаты аэродинамического расчета КС

На рисунке 4.5 видно направление движения газа, его количество, места и объемы выхода газа на дневную поверхность земли [79].

Расчетная схема рисунок 4.5 показывает аэродинамику сети при определенных значениях температуры дневной поверхности, заполнения сети и расхода сточной жидкости по сети, которые непрерывно меняются в течение времени. Если изменение заполнения сети и расхода сточной жидкости влияет только количественным образом, то есть только на количество газа, движущего в подсводном пространстве сети, то изменение дневной поверхности сети может полностью «перевернуть» аэродинамику сети, то есть не только количественно, но и качественно (изменить направление движение газа) поменять всю схему движения газа по сети.

Дальнейшая проработка аэродинамики движения газа по сети может включать в расчет дополнительные условия в части герметизации шахты и перераспределения потока газа, изменения температуры дневной поверхности, колебания заполнения сети и другие условия эксплуатации сети. Это позволит на стадии проекта качественно и количественно оценить эксплуатацию КС в части движения газа по сети, места его выхода на поверхность, точки образования больших избыточных давлений и другие параметры сети.

4.2 Метод перераспределения потока, изменения направления движения газа по канализационной сети, его количества и обеспеченность

Результатом аэродинамического расчета являются данные о количестве и направлении движения газа по КС, местах выбросов газа на дневную поверхность и его количестве, а также другие данные, характеризующие аэродинамику движения газа в подводном пространстве сети в целом.

Как уже отмечалось, в зависимости от температуры дневной поверхности сети движение газа по сети может меняться как по количеству, так и направлению, другими словами, возможны различные схемы движения газа по сети.

В случае необходимости увеличения кратности газообмена на участке сети или перераспределение потока газа, возможно изменение схемы движения газа и его количества за счет увеличения депрессии в отдельных шахтах сети путем: установки вентиляционных труб; устройства вентиляционных установок на вытяжку; включения в схему или вывод из аэродинамической схемы сети одной или нескольких шахт КС.

Вентиляционные трубы предназначены для увеличения естественной тяги и устанавливаются на портале, работающем на выброс газа на дневную поверхность земли (рисунок 4.6). Диаметр таких труб принимается условно 600-800 мм. Основным параметром вентиляционной трубы является её высота. При расчете относительного давления в портале формула (4.1) примет следующий вид [79]:

$$P_{\text{ОТН.ПОРТАЛА}} = g \cdot (h_{\text{АТ}} - h_{\text{ТР}}) \cdot \rho_{\text{АТ}} + g \cdot (h_{\text{ПОРТАЛА}} + h_{\text{ТР}}) \cdot \rho_{\text{ПОРТАЛ}} \cdot \quad (4.9)$$

Вентиляционные установки могут устанавливаться на вытяжку аналогично вентиляционным трубам на портале, работающем на выброс газа на дневную поверхность земли. При расчете относительного давления в портале формула (4.1) примет следующий вид [79]:

$$P_{\text{ОТН.ПОРТАЛА}} = g \cdot h_{\text{АТ}} \cdot \rho_{\text{АТ}} + g \cdot h_{\text{ПОРТАЛА}} \cdot \rho_{\text{ПОРТАЛА}} - P_{\text{ВЕНТ}} \cdot \quad (4.10)$$

Исключение из аэродинамической схемы одного из порталов путем герметизации шахты позволяет исключить ее действие на аэродинамику сети, увеличить протяженность аэродинамического участка путем объединения двух участков и уменьшения количества газа, движущегося по участку. Возможно также изменение направления движения газа на одном из объединяемых аэродинамических участков (рисунок 4.6).

Включение шахты в аэродинамическую схему сети позволяет: уменьшить протяженность аэродинамического участка сети, увеличить количество газа движущегося

в подсводном пространстве сети на разделяемом аэродинамическом участке, изменить направление движения газа на части разделяемого аэродинамического участка.

Направление движения газа в шахте 2 определяется на стадии расчета. 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 сети (рисунок 4.6) [79].

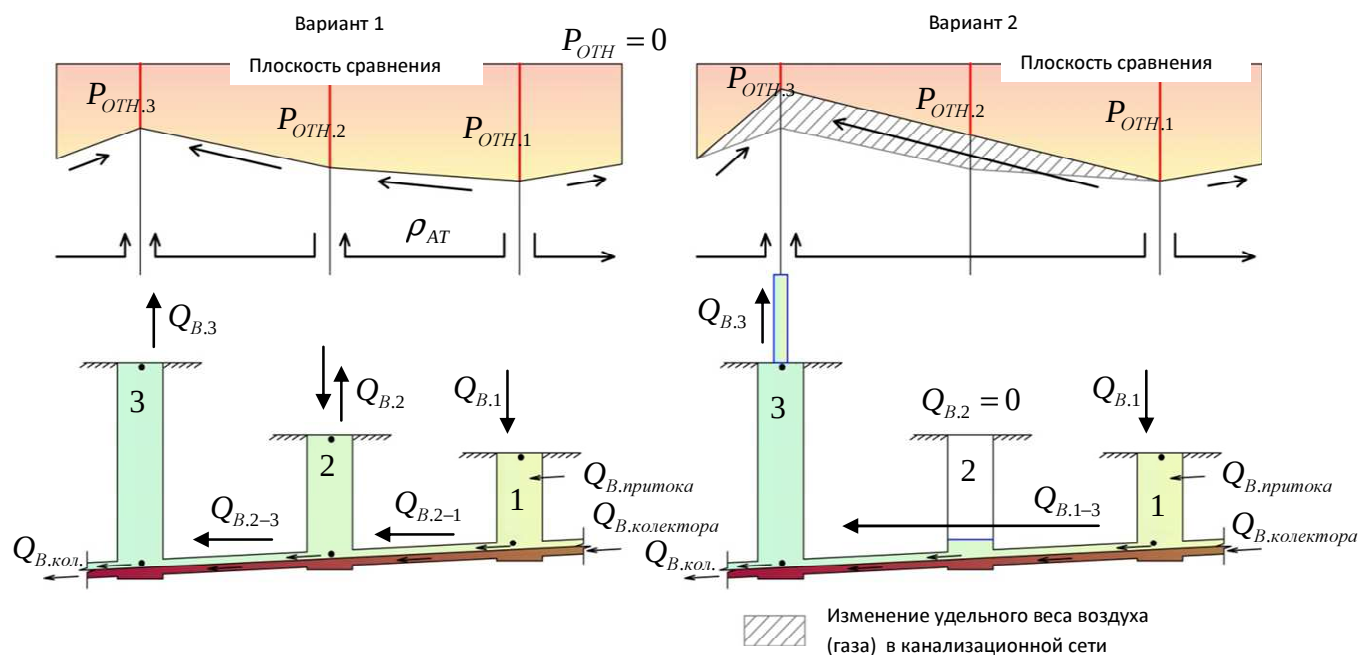


Рисунок 4.6 – Вариант изменения схемы движения газа по сети.

Как уже отмечалось ранее, аэродинамика сети зависит от температуры дневной поверхности земли. Учитывая относительно большой диапазон изменения температуры в течение года вероятно ситуация, когда не будет обеспечиваться требуемая кратность газообмена (как правило, в летний период года), а возможно и полное «опрокидывание» тяги.

Отношение периода года с требуемой кратностью газообмена к полному периоду года называется обеспеченностью требуемого газообмена.

Учитывая, что период развития колоний наиболее опасных бактерий 4 месяца, обеспеченность требуемой кратности газообмена не должна быть ниже 0,7. Учитывая, что параметр обеспеченности требуемой кратности газообмена учитывает общий период времени в течении года, обеспечивающий требуемую кратность газообмена, при определенном обосновании возможно снижение данного параметра (в случае разделения периода не обеспечивающего требуемую кратность газообмена на несколько периодов, не превышающих 2-4 месяца).

В процессе разработки метода перераспределения потоков в КС в период отсутствия требуемой кратности газообмена можно включать в систему вентиляционные установки для поддержания требуемой кратности газообмена с целью поддержания допустимой концентрации сероводорода и других газов, предотвращения создания условий, интенсифицирующих процессы образования неприятного запаха и последующего выброса его на дневную поверхность земли. Также возможно использование вентиляционных установок на определенный период времени направленный на сокращение или временное прерывание периода отсутствия требуемой кратности газообмена, предотвращающей поэтапного развития наиболее опасных колоний сульфатредуцирующих бактерий, способствующих процессам разрушения КС [27, 119].

4.3 Метод перераспределения потока с учетом установок по очистке газов

В местах выхода газов из КС на дневную поверхность необходимо применять установки очистки газов от химически агрессивных соединений (фильтры).

При включении фильтров в аэродинамическую схему движения газа по КС необходимо учитывать это в расчетах.

Фильтры, установленные на аэродинамическом участке, создают дополнительное сопротивление, что приводит к снижению депрессии на участке сети и снижению количества газа, движущегося по коллектору в единицу времени.

Сопротивление фильтра зависит от количества газа, пропускаемого через фильтр в единицу времени и подчиняется закону (1.5).

Расчет количества газа, проходящего по аэродинамическому участку в единицу времени, с учетом действия фильтра можно произвести по следующей зависимости [79]:

$$(P_O - P_L) = R_{yч} \cdot Q_{yч,ф}^2 + R_{ф} \cdot Q_{yч,ф}^2, \quad (4.11)$$

где $R_{yч}$ — аэродинамическое сопротивление участка, $м^5/с^2$;

$R_{ф}$ — аэродинамическое сопротивление фильтра, $м^5/с^2$;

$Q_{yч,ф}$ — расход газа, проходящего по аэродинамическому участку с установленным на нем фильтром в единицу времени, $м^3/с$.

Расчет количества газа, проходящего по аэродинамическому участку в единицу времени с учетом действия фильтра целесообразно представить следующим образом

$$Q_{yч,ф} = \sqrt{\frac{(P_O - P_L)}{(R_{yч} + R_{ф})}}. \quad (4.12)$$

Давление на концах аэродинамического участка следует определять по зависимостям (4.1), (4.9), (4.10).

R_{ϕ} является паспортным значением фильтра и предоставляется заводом-изготовителем фильтра или определяется опытным путем.

$R_{уч}$ следует определять по следующей формуле

$$(P_O - P_L) = R_{уч} \cdot Q_{уч}^2, \quad (4.13)$$

где $Q_{уч}$ — расход газа, проходящего по аэродинамическому участку без учета установленного фильтра в единицу времени, м³/с.

Для удобства расчета (4.13) следует переписать следующим образом:

$$R_{уч} = \frac{(P_O - P_L)}{Q_{уч}^2}, \quad (4.14)$$

где $Q_{уч}$ определяется по зависимостям, представленным ранее (2.26-2.29).

Алгоритм аэродинамического расчета КС представлен в приложении И.

Пример расчета по алгоритму представлен в приложении К.

4.4 Экономические аспекты при выборе метода организации газообмена

С точки зрения экономической составляющей для реализации вышеописанных мероприятий требуется большее количество капитальных и эксплуатационных затрат, в результате увеличивается срок эксплуатации сети и сооружений на ней.

Экономический эффект можно рассчитать по следующей зависимости

$$\Delta D = \frac{\sum K_2 + \sum \mathcal{E}_2}{T_2} - \frac{\sum K_1 + \sum \mathcal{E}_1}{T_1}, \text{ р./год}, \quad (4.15)$$

где $\sum K_1$ — сумма капитальных затрат в случае эксплуатации сети без организации газообмена, р.;

$\sum K_2$ — сумма капитальных затрат в случае эксплуатации сети с организацией газообмена, р.;

$\sum \mathcal{E}_1$ — сумма эксплуатационных затрат за весь период в случае эксплуатации сети без организации газообмена, р.;

$\sum \mathcal{E}_2$ — сумма эксплуатационных затрат за весь период в случае эксплуатации сети с организацией газообмена, р.;

T_1 — расчетный период эксплуатации сети без организации газообмена, год. (2.81);

T_2 — расчетный период эксплуатации сети с организацией газообмена, год. (2.81);

ΔD — экономия, р./год.

С учетом капитальности сооружений окупаемость затрат принимается 10–15 лет и может быть рассчитана по следующей зависимости [80]

$$T_{10-15} = \frac{((\sum K_2 + \sum \mathcal{E}_2) - (\sum K_1 + \sum \mathcal{E}_1))}{\Delta D}, \text{ год}, \quad (4.16)$$

где T_{10-15} — срок окупаемости объекта, год.

В зависимости от объема капитальных затрат в некоторых случаях, экономически целесообразно не производить дополнительные затраты на организацию газообмена, а выполнять регулярное восстановление защитного слоя бетона.

Метод регулярного восстановления защитного слоя бетона не решает вопрос негативного воздействия агрессивной среды на жизнь и здоровье обслуживающего персонала и населения в целом, поэтому применение должно иметь обоснование.

Оценить рациональность применения метода можно по следующему неравенству

$$\frac{\sum K_0}{T_K} \cdot E < \frac{((\sum K_2 + \sum \mathcal{E}_2) - (\sum K_1 + \sum \mathcal{E}_1))}{T_{15}}, \quad (4.17)$$

где $\sum K_0$ — сумма капитальных затрат на восстановление защитного слоя бетона, р.;

T_K — межкапитальный период, год (2.81);

T_{15} — период эксплуатации сети исходя из развития экономики (рекомендуется 15 лет), год;

E — экологический коэффициент, учитывающий негативное воздействие от выбросов АГ.

Срок межкапитального периода (T_K) зависит от скорости разрушения КС ($V_{КБ}$) (2.80). Скорость разрушения зависит от кратности газообмена ($K_{ГАЗ}$), которая влияет на эксплуатационные затраты ($\sum \mathcal{E}$).

Определить экономически целесообразную кратность газообмена, скорость бетонной коррозии и экономические затраты можно по следующей зависимости

$$\sum M_{ГОД} \xrightarrow{\frac{\sum K_{\mathcal{E}} + \sum \mathcal{E}}{T_{\mathcal{E}}}} \min, \quad (4.18)$$

где $\sum M_{ГОД}$ — сумма затрат в год, р./год.

Экономическое сравнение различных вариантов эксплуатации участка сети можно графически представить в следующем виде (рисунок 4.7) (см. приложение К) [80].

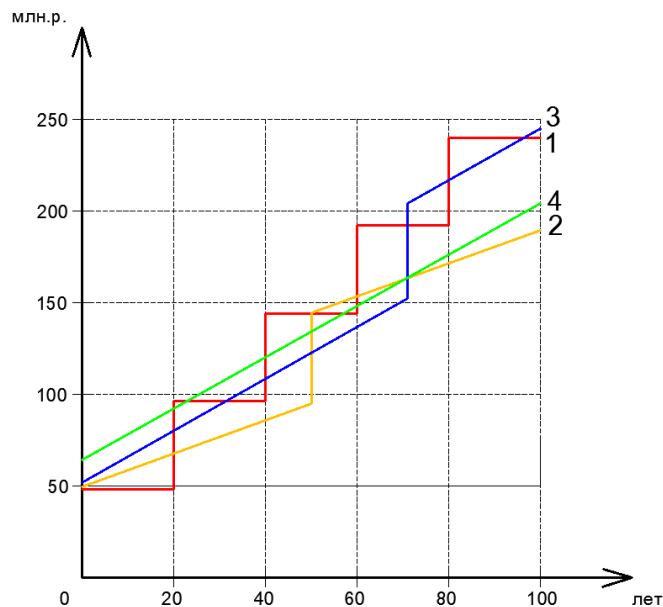


Рисунок 4.7 – Сравнение затрат на строительство и эксплуатацию участка КС, с учетом затрат на возмещение экологического ущерба

где 1 – Эксплуатация сети без вентиляции;

2 – Эксплуатация сети с вентиляцией естественным путем;

3 – Эксплуатация сети с вентиляцией с использованием вентиляционной трубы;

4 – Эксплуатация сети с вентиляцией с фильтром и вентиляционной установкой на вытяжной шахте.

4.5 Выводы по главе 4

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.

Представленное экономическое сравнение учитывает основные технико-экономические параметры эксплуатации системы газообмена на сети, позволяет «грубо» оценить различные варианты газообмена на сети, произвести их сравнение.

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 ТЕРМИНОВ

Агрессивные газы (агрессивная среда): вещества, содержащие в своем составе значительное количество молекул различных кислот, и находящиеся в газообразном агрегатном состоянии.

Биологически активная среда: эксплуатационная внутритрубная среда, состоящая из сточной жидкости, микроорганизмов различных физиологических групп, воздушной среды и содержащая газы биогенного происхождения – CO_2 , CH_4 , H_2S , NH_3 и др. [46].

Вентиляционная труба (дымоход): вентиляционная труба, устанавливаемая на вытяжке из портала (шахты) для увеличения естественной тяги на участке сети.

Воздушная пробка: образование кольцевого потока (виде завихрений) газообразной среды в подсводном пространстве коллектора в границах одного участка.

Граница раздела фаз: плоскость соприкосновения двух веществ, находящихся в разных агрегатных состояниях (газообразной среды и сточной жидкости).

Дневная поверхность земли: наземное пространство.

Канализационная сеть (КС): комплекс сооружений, включающий коллекторы, шахты, колодцы, приемные камеры, резервуары, канализационные насосные станции и другие сооружения, участвующие в транспортировке сточной жидкости от потребителя до городских очистных сооружений (гос).

Канализационная сеть глубокого заложения (КСГЗ): комплекс сооружений, включающий коллекторы диаметром 1,2 м и более и сооружения на них (шахты, камеры, приемные камеры, резервуары, штольни).

Коллектор: канализационный, тоннельный, самотечный коллектор глубокого заложения, выполненный с помощью проходческих щитов, горным способом, открытым способом.

Кольцевое движение: движение газообразной среды в границах одного горизонтального участка.

Коррозия (газовая, газово-биогенная, биологическая): коррозия под действием биологически активной среды [46].

Перепад: сооружение в шахте, обеспечивающее транспортирование сточной жидкости из верхнего бассейна канализования в нижний бассейн.

Подсводное пространство коллектора: пространство в коллекторе, не заполненное сточной жидкостью и ограниченное сводом коллектора и зеркалом сточной жидкости (границей раздела фаз).

Портал: шахта, где расположены начало или конец аэродинамического участка коллектора.

«Прямое сообщение» шахты с дневной поверхностью: шахта, имеющая сопряжение (сообщение) с дневной поверхностью по воздуху, позволяющему производить обмен газами без значительных местных потерь и потерь по длине (шахта имеет открытый проем).

Сопряженные порталы: порталы, соединенные одним аэродинамическим участком.

Сточная жидкость: жидкость, содержащая различные примеси, транспортируемая по канализационному коллектору.

Стояк-воздушник: в шахте трубопровод обратной подачи газа из водобойного колодца в верхнюю часть трубчатого перепада.

Участок: коллектор, ограниченный шахтами и не имеющий на своем пути другой шахты, притока сточных вод, ответвления.

Участок аэродинамический: коллектор, ограниченный порталами и не имеющий на своем пути другого портала, притока газообразной среды, ответвления.

Участок сопряженный: участок, подводящий или отводящий сточные воды от портала (узла).

Узел: соединение двух и более аэродинамических участков.

Шахта: подземное вертикальное сооружение цилиндрического типа круглого (в плане) сечения, полое, диаметром от 4 до 12 м и более, соединяющее дневную поверхность земли и коллектор.

Шахтное пространство: пространство, ограниченное стенками (стволом) шахты, верхним перекрытием и зеркалом сточной жидкости³.

³ Объем шахтного пространства нестационарен. Изменяется пропорционально изменению уровня сточной жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Наука. Глав. ред. физ.- мат. лит., 1969. – 824 с.
2. Абрамович, И. А. Вероятность превышения ПДК газов в коллекторах / И. А. Абрамович, Э. А. Ситническая: тез. докл. Всесоюз. науч.- техн. конф. – Харьков, 1982. - Ч.1. – С. [12-18].
3. Абрамович, И. А. О газовой среде в коллекторах городской канализации / И. А. Абрамович, Э. А. Ситническая // Городское хозяйство Украины. - 1978. - № 2. - С. 15 - 16.
4. Абрамович, И. А. Ситническая Э. А. Газовая среда и коррозия коллекторов городской канализации / И. А. Абрамович, Э. А. Ситническая: обзор. информация : 1(5). - М., 1980.
5. Алексеев, М. И. Сооружения на сетях различных систем канализации с коллекторами глубокого заложения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.04 / М. И. Алексеев. - Ленинградский ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт. - Л., 1983. – 397 с.: ил.
6. Алексеев, М. И. Эксплуатационные характеристики трубчатых перепадов на тоннельных коллекторах глубокого заложения / М. И. Алексеев, В. М. Васильев // Совершенствование эксплуатации сетей водоснабжения: тез. докл. Всесоюз. науч-техн. семинара. - Л., 1987. – С. [12-18].
7. Берд, Р. Явление переноса / Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайтфут. - М.: Химия, 1974. – 688 с.
8. Бизенков, В. Н. Стационарные машины. Расчет вентиляторных установок шахт / В. Н. Бизенков. – Кемерово: Тип. ГУ КузГТУ, 2005. – 67 с.
9. В Воронеже на детской площадке произошел прорыв коллектора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://tv-gubernia.ru/novosti/v_voronezhe_na_detskoj_plowadke_proizoshel_proryv_kollektora/ (дата обращения: 16.02.2016).
10. В Запорожье обрушился магистральный канализационный коллектор — произошли гигантские разрушения [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://iz.com.ua/zaporoje/74755-v-zaporozhe-obrushilsya-magistralnyy-kanalizacionnyy-kollektor-proizoshli-gigantskie-razrusheniya-fotovideo.html> (дата обращения: 17.02.2016).

11. Вагшуль, Г. В. О вентиляции канализационных сетей / Г. В. Вагшуль // Сб. тр. Моск. ин-т инж. Коммун. строительства. - М.: Наркомхоз РСФСР. - 1949. - Вып. 1. – С. [12-18].
12. Васильев, В. М. Вентиляция глубоководных коллекторов / В. М. Васильев, Гай // тез. докл. XXXII науч. конф. / В. М. Васильев, Гай / Казанский инженерно-строительный институт. - Казань, 1981. – С. [12-18].
13. 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. - Вып. 1. - С. 3-7.
14. Васильев, В. М. Газы в канализационной сети их вред и пути ликвидации / В. М. Васильев, А. В. Малков // Техника и технологии мира. – 2016. - №3-4 (81-82). - С. 48-53.
15. Васильев, В. М. Диагностирование / В. М. Васильев - СПб, 2010. 164 с.
16. Васильев, В. М. К вопросу о надежности канализационных коллекторов глубокого заложения / В. М. Васильев // Подземное пространство мира, 1993. - № 5-6. - С. 32-33.
17. Васильев, В. М. К расчету естественной тяги канализационных коллекторов / В. М. Васильев // Подземное пространство мира. - 1994. – Вып. 1. - 131 с.
18. Васильев, В. М. Компания «Инженерные Экосистемы» разработала новую схему канализования Уфы / В. М. Васильев // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. - 2009. - №9(21). - 58с.
19. Васильев, В. М. Массообменные кислородные процессы на трубчатых перепадах при вентиляции канализационного коллектора и их влияние на коррозию бетона / В. М. Васильев // Подземное пространство мира. - 1994. - Вып. 1. – 35 с.
20. Васильев, В. М. Массообменные кислородные процессы на трубчатых перепадах при вентиляции канализационного коллектора и их влияние на коррозию бетона / В. М. Васильев, О. М. Ильина // Новые технологии и материалы в подземном строительстве: альманах научно-технической информации. - 1995. - Вып. 1. - С. 8 -12.
21. Васильев, В. М. Методы антикоррозионной защиты тоннельных коллекторов и сооружений на них / В. М. Васильев, М. Н. Клементьев, Ю. В. Столбихин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. - № 1. - С. 58-66.

22. Васильев, В. М. О температуре воздуха в канализационном коллекторе глубокого заложения, новые открытия для водоотведения и очистки сточных вод / В. М. Васильев, Гай, В. Д. Лишбергов // межвуз. темат. сб. тр. / Ленинградский ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт. - Л., 1982. – С. [12-18].

23. Васильев, В. М. Обследование при капитальном ремонте шахты №350Б тоннельного канализационного коллектора по Наличной улице и Наличному переулку от Шкиперского протока до ВОНС и выдача рекомендаций по ее защите от разрушений: научно-технический отчет / В. М. Васильев, Ф. В. Васильев / ООО «ПИБ «Инженерные Экосистемы». – СПб., 2002. - 91с.

24. Васильев, В. М. Повышение эффективности работы канализационных коллекторов и сооружений на них при совместном движении сточных вод и газов: дисс. ... д.-ра техн. наук: 05.23.04 / В. М. Васильев; науч. рук. Н. Н. Лапшев; Федеральное агентство по образованию, С.- Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 1996. – 350 с.

25. Васильев, В. М. Почему необходимо вентилировать канализационные коллектора / В. М. Васильев // Подземное пространство мира, 1993. - № 5-6. - С. [12-18].

26. Васильев, В. М. Разработка новой схемы водоотведения г. Уфы / В. М. Васильев, А. В. Малков // Вода и экология проблемы и решения. - 2009. -№3. - С. 31-34.

27. Васильев, В. М. Разрушение канализационных тоннелей и сооружений на них вследствие микробиологической коррозии / В. М. Васильев, Г. А. Панкова, Ю. В. Столбихин // Водоснабжение и санитарная техника. - 2013 - №9. - С. 55 – 61.

28. Васильев, В. М. Современное представление о микробиологической биодеструкции бетона и металлов при эксплуатации канализационных коллекторов / В. М. Васильев, Е. Ю. Дмитриева // Инженерно-экологические системы: матер. Междунар. науч.-практ. конф. 10-12 октября 2012 г. - С.- Петерб. гос. архитектур. – строит. ун-т. – СПб., 2012. – С. 24-26.

29. Васильев, В. М. Способ организации газообмена на канализационной сети: информационно - технический листок № 90-112 / В. М. Васильев, А. М. Новикова; ЛДНТП. - Л., 1990. - 35 с.

30. Васильев, В. М. Газовыделение в перепадных устройствах и участках коллектора при движении по ним сточной жидкости / В. М. Васильев // Подземное пространство мира. - 1994. - Вып. 1. – 35 с.

31. Вассерман, А. Д. Проектные обоснования параметров вентиляции рудников и подземных сооружений / А. Д. Вассерман; отв. ред. В. Я. Ярцев. – Л.: Наука, 1988. – 152 с.

32. Великий Новгород остался без воды из-за прорыва канализации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bfm.ru/news/273805> (дата обращения: 16.02.2016).

33. Вентиляция горных выработок и подземных сооружений; неделя горняка, 23-27 января 2006 г // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. - №7.

34. Вентиляция шахт, рудников и подземных сооружений / Ю. В. Шувалов [и др.]. – СПб.: Санкт-Петербургский горный ин-т им. Г. В. Плеханова (технический ун-т), 2007. - 159 с.

35. Воропаев, А. Ф. Тепловая депрессия шахтной вентиляции / А. Ф. Воропаев. – М.: Л.: АН СССР, 1950. – 352 с.

36. Воропаев, А. Ф. Управление тепловым режимом в глубоких шахтах / А. Ф. Воропаев - М.: Госгортехиздат, 1961. - 248с.

37. Гайфутдинов, М. Г. Взаимное движение сточных вод и газов в канализационных коллекторах и мероприятия по предотвращению газовой коррозии: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / М. Г. Гайфутдинов; науч. рук. Н. Н. Лапшев; Мин-во высшего и среднего специального образования РСФСР; Ленинградский Ордена трудового Красного знамени инженерно-строительный институт.– Л., 1985. - 23 с.

38. Гебхард, К. Проблема коррозии в коллекторах города Гамбург: докл. на междунар. выст. «Защита от коррозии 83» / К. Гебхард. - 1983. – [84] с.

39. ГН 2.2.5.2100-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Доп. №2 к ГН 2.2.5.2100-03: гигиенические нормативы [Электронный ресурс]. – Введ. 2006-11-01. – Режим доступа: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/48/48155/(дата обращения: 13.05.2016).

40. Голубовская, Э. К. Биологические основы очистки воды / Э. К. Голубовская . - М.: Высшая школа, 1978. - 268 с.

41. Горное дело в Арктике: труды 8-го междунар. симп. «Горное дело в Арктике», Апатиты (Мурм. обл), Россия, 20-23 июня 2005 г./ под ред. Н. Н. Мельникова, С. П. Решетняка. – СПб.: Типография «Иван Федоров», 2005. – 304 с.
42. Горчаков, Г. И. Строительные материалы / Г. И. Горчаков, Ю. М. Баженов. - М.: Стройиздат, 1986. - 686 с.
43. Дистель, Рейнгард. Теория графов / Рейнгард Дистель; [пер. с англ. О. В. Бородина]. - Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2002. - 333 с.
44. Дмитриева, Е. Ю. Микроорганизмы-биодеструкторы подземных канализационных сооружений / Е. Ю. Дмитриева // Вода и экология. Проблемы и решения. – 2013. - №1.– С. 20-44.
45. Драницан, Е. С. Расчет вентиляционных систем шахт на ЭВМ / Е. С. Драницан. - 1984. - 45 с.
46. Дрозд, Г. Я. Коррозионное разрушение, прогнозирование степени агрессивности эксплуатационной среды и обеспечение надежности канализационных коллекторов на стадии проектирования / Г. Я. Дрозд // Вода и экология. Проблемы и решения. – 2013. - №1.– С. 40-56.
47. Дублер канализационного коллектора в районе площади Мужества: научно-технический отчет / ООО «ПИ «Инженерные Экосистемы»: рук. В. М. Васильев; отв. исполн. Ф. В. Васильев [и др.]. – СПб., 2011. - 188 с.
48. Евилевич, А. З. Ошибки в эксплуатации водопроводов и канализации / А. З. Евилевич. - Л.: Стройиздат, 1972. – 120 с.
49. Жмаков, Г. Н. Водоотводящие сети и сооружения / Г. Н. Жмаков // Техника и технологии мира. – 2015. - № 6(74). – 48 с.
50. Заварзин, Г. А. Литотрофные микроорганизмы / Г. А. Заварзин. – М.: Наука, 1972. – 323 с.
51. Иванов, Ф. М. О сроках службы железобетонных коллекторов / Ф. М. Иванов, Г. Я. Дрозд // Бетон и Железобетон. - 1992. - №2. - С. 25-26.
52. Ивановский, И. Г. Вентиляция шахт / И. Г. Ивановский, В. Н. Макишин. – Владивосток: ДВГТУ, 2007. – 241 с.
53. Исследование методов вентиляции и ее необходимости при проектировании глобозаложенных коллекторов: отчет: тема №ГР 79058065 / Ленинградский ордена

Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт. – Л., 1979. – [54] л.

54. Исследование методов вентиляции и её необходимости при проектировании глубокозаложенных коллекторов [№ Гр 378 1076]: отчет о НИР / отв. исполн. В. М. Васильев / Ленинградский ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт. - Л., 1979. – [54] л.

55. Исследование сероводородной и сульфатной коррозии бетона в подземных монолитных сооружениях, разработка предложения для внесения дополнения в графу СНиП II-28-73: отчет о НИР / науч. рук. Т. Г. Читашвили; акад. наук СССР / Ин - т горной механики им. Г. А. Пулукидзе. - Тбилиси, 1984. – 55 л.

56. Казаков, Б. П. Особенности развития и пути совершенствования систем вентиляции калийных рудников / Б. П. Казаков // Материалы науч. сессии Горного ин-та УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. 19-23 апр. 2004 г. – Пермь: Горный ин-т УрО РАН, 2004. – С. 218-222.

57. Канализация / А. И. Жуков [и др.]; под ред. проф. А. И. Жукова - М.: Стройиздат, 1969. – 590 с.

58. Канализация / С. В. Яковлев [и др.]. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1975. – 632 с.

59. Клебанов, Ф. С. Воздух в шахте: трактат о проветривании угольных шахт / Ф. С. Клебанов; [Рос. акад. естеств. наук, Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, Рос. угольная компания]. – М.: Изд. дом. «Имидж», 1995. – 574 с.

60. Красюк, А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов / А. М. Красюк; отв. ред. Н. А. Попов; Российская акад. наук, Институт горного дела. Сибирское отделение. - Новосибирск: Наука, 2006. - 163 с.

61. Круглов, Ю. В. Проблемы автоматизации расчетов вентиляционных сетей горнодобывающих предприятий / Ю. В. Круглов // Матер. науч. сессии Горного ин-та УРОРАН по рез. НИР в 2003 г. (19-23 апреля 2004 г.) / Уральское отделение Российской академии наук Горного института «Стратегия и Процессы освоения георесурсов», - Пермь, 2004. - 218 с.

62. Ксенофонтов, Б. С. Методы очистки газоздушных выбросов и производственных вод предприятий приборостроительной промышленности / Б. С. Ксенофонтов; под ред. В. И. Кулешова. - М.: МИПК Минприбора СССР, 1982. – 39 с.

63. Лапшев, Н. Н. Гидравлика / Н. Н. Лапшев. – М.: Академия, 2007. – 268 с.
64. Лапшев, Н. Н. О естественной вентиляции на канализационных коллекторах глубокого заложения / Н. Н. Лапшев, В. М. Васильев, М. Т. Гайфундинов // Совершенствование методов расчета и систем теплоснабжения и вентиляции: межвуз. темат. сб. тр. / Ленинградский ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт. – Л., 1982. – С. 112.
65. Ларичкин, В. В. Аэродинамика цилиндрических тел и некоторые инженерные задачи экологии / В. В. Ларичкин. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 303 с.
66. Линевич, С. Н. Очистка природных и сточных сероводородных вод / С. Н. Линевич. – Новочеркасск, 1979. – 51 с.
67. Лобановский, А. Зловонный Петербург стыдливо «задушили» [Электронный ресурс] / А. Лобановский. – Режим доступа: <http://ok-inform.ru/stroitelstvo/zhkhh/53466-zlovonnyj-peterburg-stydlivo-zadushili.html> (дата обращения: 29.01.2016)
68. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – 7-е изд. испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
69. Лукиных, А. А. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Павловского / А. А. Лукиных, Н. А., Лукиных. – М.: Стройиздат, 1974. – 156 с.
70. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
71. Майоров, В. А. Запахи и их устранение в промышленных газовоздушных смесях / В. А. Майоров. – Пенза: Изд-во ПГАСА, 2002. – 131 с.
72. 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) / А. В. Малков // Вестник гражданских инженеров. - 2016. - №5 (58). - С. 115-119.
73. 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.
74. 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

75. 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

76. Малков А. В. Определение мест выброса АГ из КС на поверхность и условия их образования / В. М. Васильев [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. - 2016. - №10. - С. 59-66.

77. Малков А. В. Места образования агрессивных газов в канализационной сети / В. М. Васильев [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. - 2017. - №1. - С. 66-74.

78. Малков А. В. Расчет требуемой кратности газообмена в подсводном пространстве канализационной сети / А. В. Малков // Вестник гражданских инженеров. - 2017. - №2 (61). - С. [140-144].

79. 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.

80. 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.

81. Медведев, Б. И. Естественная тяга глубоких шахт / Б. И. Медведев, А. М. Гущин, В. Л. Лобов. – М.: Недра, 1985. – 77 с.

82. Микробная коррозия и ее возбудители / Е. И. Андреюк [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1980. – 287 с.

83. На Калиновой из-за прорыва под землю ушла часть двора многоквартирной [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dnepr.comments.ua/news/2013/03/11/121011.html> (дата обращения: 16.02.2016)

84. Нагибина, Т. С. Влияние канальных газов на разрушение Люберецкого кирпичного канала. Очистка сточных вод / Т. С. Нагибина; под ред. проф. С. Н. Строганова. - М.: ОНТИ, 1934. - С. [12-18]

85. Обухов, Е. С. Аварии канализационных коллекторов и борьба с ними / Е. С. Обухов. - М.; Л.: Госстройиздат, 1939. -116 с.

86. Общая концепция построения процесса диагностики и мониторинга технического состояния тоннельных канализационных коллекторов и сооружений на них: отчет о НИР / отв. исполн. В. М. Васильев, Б. М. Кулемин. – СПб., 2010. - 185 л.

87. Орлов В. А. Методы и аппаратура диагностики водопроводных и водоотводящих сетей/ И. С. Дежина, В. А. Орлов // Промышленное и гражданское строительство. -2014г. -№2. –С.77-79.

88. Отчет о результатах обследования дублера канализационного коллектора в районе площади мужества / В. М. Васильев [и др.]; ООО «ПИБ «Инженерные Экосистемы». - СПб., 2010.

89. Панкова, Г. А. Опыт эксплуатации канализационных тоннелей Санкт-Петербурга / Г. А. Панкова, М. Н. Клементьев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015 - №3. - С. 55 – 61.

90. Пат. №2394965 Российская Федерация/ В. М. Васильев, Ф. В. Васильев. - №2394965; заявл. 29.12.2008;

91. По факту обрушения канализационного коллектора в Рязани возбуждено уголовное дело [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vmpsu.sledcom.ru/news/item/611633/> (дата обращения: 16.02.2016).

92. ПОТ Р М-025-2002. Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации водопроводно-канализационного хозяйства [Электронный ресурс]. – Введ. 2003-01-01. – Режим доступа : http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/42/42323/(дата обращения: 13.05.2016).

93. Прозоров, И. В. Гидравлика, водоснабжение и канализация городов / И. В. Прозоров, Г. И. Николадзе, А. В. Минаев. –М.: Высш. шк., 1975. – 422 с.

94. Прорыв канализации в Киеве: яма на дороге глубиной 7 метров [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://news.liga.net/photo/capital/715528-proryv_kanalizatsii_v_kieve_yama_na_doroge_glubinoi_7_metrov.htm#1 (дата обращения: 16.02.2016).

95. Рабочий погиб при обвале канализационного коллектора в Азове [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.baltinfo.ru/2013/01/05/Rabochii-pogib-pri-obvale-kanalizatsionnogo-kollektora-v-Azove-328196> (дата обращения: 17.02.2016).

96. Разработка нового технологического оборудования в системах очистки сточных вод и оборудования для диагностики в системах транспортировки сточных вод ООО «ПИБ «Инженерные Экосистемы»: отчет по выполнению опытно-конструкторской работы / В. М. Васильев [и др.]. - СПб, 2011. - 191 с.

97. Разработка регламента работы Продолжения главного коллектора канализации северной части Санкт-Петербурга по варианту с безнапорным самотечным коллектором и узлом регулирования стока (УРС-422) «ДЮКЕР»: научно-технический отчет по работе / науч. рук. В. М. Васильев / ООО «ПИБ «Инженерные экосистемы». – СПб., 2007. - 163л.

98. Распоряжения от 26 августа 2005 г. № 60 «О внесении изменений в приказ Комитета по управлению городским хозяйством Администрации Санкт-Петербурга от 25.11.1996 N201»: Правительство Санкт-Петербурга; Комитет по энергетике и инженерному обеспечению: введ. с 26.05.2005. – СПб., 2005. – [6 с.]

99. Розенталь, Н. К. Коррозия и защита бетонных и железобетонных конструкций сооружений очистки сточных вод / Н. К. Розенталь // Бетон и железобетон. Оборудование, материалы, технология. - 2011. - № 1. - С. 96-103.

100. Рублевская О. Н. Мероприятия по предотвращению распространения неприятных запахов на объектах ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» / О. Н. Рублевская // Водоснабжение и санитарная техника – 2013. - №10. – С. 46 – 55.

101. Рудничная вентиляция: справочник / под ред. К. З. Ушакова. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 439 с.

102. Рухнули под землю [Электронный ресурс] // Российская газета. -[2012]. - Режим доступа: <http://rg.ru/2012/01/10/briansk.html> (дата обращения: 17.02.2016).

103. Свод правил по проектированию и строительству. Канализация. Наружные сети и сооружения: СП 32. 13330. 2012 ; Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85: введ. с 01.01.2013. – М., 2012. – 85 с.

104. Секриеру, Г. В. Одномерные нестационарные течения реального газа при малых возмущениях параметров / Г. В. Секриеру, И. Н. Печерская; АН МССР, Ин-т математики с ВЦ. - Препр. – Кишинев: б. и., 1986. - 35 с.

105. Справочник по рудничной вентиляции / под. ред. проф. Ксенофоновой. – М.: Госгортехиздат, [1962]. – 691 с.

106. Старцев, И. С. Съёмное приспособление для вентиляции канализационных шахт: информационно - технический листок № 1142-87 / И. С. Старцев, В. М. Васильев; ЛДНТП. – Л., 1988.

107. Степанова, Г. М. Неметаллическая композитная арматура / В. Ф. Степанова, Г. М. Красовская, С. В. Шахов // Сб. докл. Междунар. научн. техн. конф. «Новые материалы для повышения долговечности строительных конструкций». - СПб.: РИФ «Роза мира», 2007. С. 384 -388.

108. Столбихин, Ю. В. Разработка методов предотвращения коррозии канализационных коллекторов и сооружений на основе совершенствования камер гашения напора: дис. ...канд техн. наук: 05.23.04: защищена 18.04.2016 / Ю. В. Столбихин; науч. рук. В. М. Васильев; М-во образования и науки РФ, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «С.- Петерб. гос. архитектур. –строит. ун-т». – СПб., 2016. - 227 с.

109. Строительные нормы и правила. Защита строительных конструкций от коррозии: СНиП 2.03.11-85 / Утв. Гос. ком. СССР по делам стр-ва: введ. с 1986.01.01. – М.: Госстрой СССР, 1985. - 55 с.

110. Строительные нормы и правила. Канализация. Наружные сети и сооружения: СНиП 2.04.03-85 / Утв. Гос. ком. СССР по делам стр-ва. – Взамен СНиП II-32-74: введ. с 01.01.1986. – М.: Госстрой СССР, 1986. – 72 с.

111. Стромберг, А. Г. Физическая химия / А. Г. Стромберг, Д. П. Семченко; под ред. А. Г. Стромберга. - изд. 7-е, стер. — М.: Высш. шк., 2009. — 527 с.

112. Сулейманов, М. Г. Приборы контроля параметров вентиляции / М. Г. Сулейманов, В. С. Сураев, В. С. Устюжанин. - Магнитогорск, 2000. – 78 с.

113. Техническая эксплуатация системы канализационных тоннелей / В. М. Васильев [и др.] В. М. / С.- Петерб. гос. архитектур. –строит. ун-т . – СПб., 2002. – 59 с.

114. Установка сорбционно-плазмо-каталитической очистки газов [Электронный ресурс]: [официальный сайт ООО «Воздухоочистка»]. - Режим доступа: http://www.air-cleaning.ru/c_stopkr.php (дата обращения: 17.02.2016).

115. Фомичев, В. И. Вентиляция тоннелей и подземных сооружений / В. И. Фомичев. - Л.: Стройиздат: Ленигр. отд-ние, 1991. - 199 с.

116. Челноков, А. А. Очистка газовоздушных выбросов орошаемыми волокнистыми фильтрами / А. А. Челноков, Н. А. Мазур. – Минск: БелНИИНТИ, 1989. - 43 с.
117. Чугаев, Р. Р. Гидравлика / Р. Р. Чугаев. - 4-е изд. перераб. и доп. - Л.: Стройиздат, 1982. – 672 с.
118. Чупин Р.В. Оптимизация вариантов развития систем водоотведения / Р. В. Чупин, Н. М. Фан. - Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. -2016. -№3 (18). -С.101-113.
119. A Collaborative Investigation of Microbial Corrosion of Concrete Sewer Pipe in Australia [Электронный ресурс] / Т. Wells [et al.] – Режим доступа : https://score.org.au/knowledge-base/publications/theme-1-corrosion/10Wells_ozw12Final00280.pdf. (дата обращения: 13.05.2016).
120. Assessment of pH shock as a method for controlling sulfide and methane formation in pressure main sewer systems / Oriol, Gutierrez [et al.] // Water research . - 2014. – №48. - Pp. 569-578.
121. Biological air filters / R. A. Binot // Conception and design. Federation. - 1997. – P. 1. - Pp. 93-101.
122. Boon, F. G. Formation of sulfide in rising main sewers and its prewention dy oxyden/ F.G. Boon, A.R Lister // Progress in Water Technology. – [1975]. - №7(2). - Pp. 289-300.
123. Bowker, P. Biological odour control by diffusion into activated sludge basin / P. Bowker // Water Sci Technol. - 1999-2000. - February. – [Pp. 5-30.]
124. Brauer, H. Biological purification of waste gases / H. Brauer // Int. Rev Chem. Eng. – 1986. - №26. – Pp. 95- 387.
125. Bader, C. D. Continuons Monitoring System wards off potential disaster in New York City Sewer Systems/ C. D. Bader // Water and Sewage Works. - 1978. - Janiary. - Pp. 30 - 35.
126. Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems / Lehua, Zhang [et al.] // Water research. - 2008. - № 42. - Pp. 1– 12.
127. Developments in odour control and waste gas / Joanna E. Burgess [et al.] // Biotechnology Advances. – 2001. - № 19.- Pp. 35-63.

128. Experimental Evaluation of the Stoichiometry of Sulfide-Related Concrete Sewer Corrosion / A. Nielsen [et al.] // J. Environ. Eng. - 2014. – Sci. 140.
129. Foster, A. Air flow in sewers approach to design sewers for both air and water / A. Foster, Jr. McMasters // OWEA 2012 - Collection Systems Specialty Conference. - Columbus, Ohio, USA. – 2012. - May, 10.
130. Galardi, K. Odor Control Technology Overview: present [Электронный ресурс] / Ken Galardi. – Режим доступа: Ken.Galardi@ch2m.com. (дата обращения: 13.05.2016).
131. Gerars, M. N. Areview of dangerous gazez in sanitari sewers / M. N. Gerars // Pyblic Works. - 1982. – [Vol. 113]. - № 10. - Pp. 34 - 36.
132. Gregor, A. Field investigation of sewer corrosion / A. Gregor // Corrosion of concreete sewer. - 1959. – 1 p. [38].
133. Impact of fluctuations in gaseous H₂S concentrations on sulfide uptake by sewer concrete: the effect of high / X. Sun [et al.] // Water Research 2015. - № 81. – Pp. 84-91.
134. James, P. Ventilation, Odor and Corrosion Control for Large Diameter Collection Systems / P. James, J. James. - / - 2012. - St 6. - Pp. 1-32.
135. Joyce, James. Implementing Vapor Phase Odor Control on Large Diameter Interceptor Systems / J. Joyce, Ch. Hunniford, A. Plummer // Biosolids and Odor and Corrosion, Conference & Expo. - 2013. – Pp. 1-31.
136. Kaempfer, W. Polymer modified mortar with high resistance to acid to corrosion by biogenic sulfuric acid / W. Kaempfer, M. Berndt // Proceedings of the IXth ICPIC Congress. - Bologna, Italy. – 1998. - Pp. 681–687.
137. Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks: a review/ P. KyooHong [et all.] // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2014. - [Vol. 95]. - Pp. 251-261.
138. Municipal gravity sewers: An unrecognised source of nitrous oxide, / D. Michael [et al.] // Science of the Total Environment. – 2014. - № 468-469. – Pp. 211–218.
139. Matthews, D. E. Hyndrogen Peroxide Control odor, corrosion in collection systems / D. E. Matthews // Water ans sewage works. - 1977. - June. - Pp. 16 - 17.
140. Odor Control for Large Diameter Deep Sewer Tunnels—The City of Columbus, Ohio. In Odors and VOC Emissions 2000 / H. Sorenson [et al.] // Proceedings of the Water Environment Federations Specialty Conference. - Cincinnati. – 2000. – April, 16–19. – Pp. [112-147].

141. Parker, W. J. A Tracer Study of Headspace Ventilation in a Collector Sewer / W. J. Parker, H. Ryan // Journal of the Air & Waste Management Association. - 2011. – Dec. - Pp. 581-592.
142. Pomeroy R. D. The forecasting of sulfide Buids - up rates in sewers / R. D. Pomeroy, J. D. Parkhurst // Progr. wat. -1977. - Tech. 9.
143. Pomeroy, R. D. Progress report on sulfide control reseach / R.D. Pomeroy, E.D. Bowlus // Sewage works.- 1946.- № 4.- Pp. 596 - 640.
144. Price, A. C. Sewage treatment plants control osor pollution proslems / A. C. Price // Water and Sewage Works. - 1978. - № 10. - Pp. 85 - 89.
145. Sewer ventilation //Minimization of Odors and Corrosion in Collection Systems. - 2005. – Chapter 6. -- Pp. 6-10.
146. Vasiljev, V. Microbiological Corrosion of Underground Sewage Facilities of Saint-Petersburg / V. Vasiljev, N. Lapsev, J. Stolbichin // World Applied Sciences Journal. - (Problems of Architecture and Construction). – 2013. - №23. – Pp.184-190.
147. Vincke, E. Biogenic sulfuric acid corrosion of concrete: microbial interaction, simulation and prevention: ph. d. Thesis, Faculty of Bio-engineering Science, University Ghent: 2002 / E. Vincke. - Ghent, Belgium. - 2002. - Pp. 7–9.
148. Wells, P. A. A Collaborative Investigation of Microbial Corrosion of Concrete Sewer Pipe in Australia / P. A.Wells, R. E Melchers // Oz Water 2012: Conference; May 2012. - Sydney, 2012 . – Pp. [12-18].
149. Wells, T. Modelling concrete deterioration in sewers using theory and field observations / T. Wells, R. E. Melchers // Cement and Concrete Research. - 2015. - № 77. – Pp. 82–96.
150. Witherspoon, Jay. Collection System Ventilation Research Report / J. Witherspoon, D. Apgar, M. Ward. - 2009. – 123 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Извещения о фиксации превышения
установленных нормативов водоотведения по качеству сточных вод

ОТ:

НОМЕР ТЕЛЕФОНА:

11 ЯНВ. 2013 09:32 СТР1



Государственное унитарное предприятие
«ВОДОКАНАЛ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА»
Филиал
«Водоотведение Санкт-Петербурга»
остров Белый, д.1, Санкт-Петербург, 198184
Телефон (812) 713-90-06, факс (812) 713-98-92
E-mail: vdo@vodokanal.spb.ru
ОКПО 89094407 ОГРН 1027809256254
ИНН/КПП 7830000426/780543001

Руководителю
ОАО "НЕВСКИЙ ЗАВОД"
192029, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ,
ОБУХОВСКОЙ ОБОРОНЫ ПР., Д. 51
факс: 490-78-69, 490-78-68

№ 101-17-2/13 от 10/01/2013

ИЗВЕЩЕНИЕ № 4928

Настоящим извещаем, что по результатам анализа проб сточных вод ЗАВОД (Акт отбора проб от 26.12.2012) по адресу 192029, ОБУХОВСКОЙ ОБОРОНЫ ПР., Д. 51, лит. АЭ, БВ, АБ, У, АЗ, АМ, АЦ, ЛО, Э, АП, АШ, Щ, Я, Ш, О, В, К, П, Т, д.38, лит. И, К, В, АБ, Е, Ж, АЕ, Д зафиксировано превышение установленных нормативов водоотведения по качеству сточных вод, что представлено в нижеприведенной таблице:

Наименование контролируемого показателя	Результаты определения показателей состава и свойств сточных вод *, мг/дм ³	ФК(ФП)** мг/дм ³	ДК (НП) мг/дм ³	Кратность превышения	Характеристика сброса сточных вод
Выпуск Э (БОЛЬШОЙ СМОЛЕНСКИЙ ПР. 4)					
Алюминий	8.3	8.214	0.5	16.43	сверхнорм.
Величина pH	7.6	7.6	6.5-9	-	-
Железо общее	190	189.88	1.1	172.62	ЗАЛП
Марганец	3.8	3.794	0.1	37.94	сверхнорм.
Медь	0.51	0.51	0.04	12.75	сверхнорм.
Нефтепродукты	7.0	7	0.7	10	сверхнорм.
Цинк	1.5	1.496	0.1	14.96	сверхнорм.

ДК (НП) - норматив допустимой концентрации загрязняющего вещества или нормативный показатель общих свойств сточных вод.
ФК (ФП) - фактическая концентрация загрязняющего вещества или фактический показатель общих свойств сточных вод.
сверхнорм. - сверхнормативный сброс загрязняющих веществ.

ЗАЛП - залповый сброс загрязняющих веществ.

ПРИМЕЧАНИЕ:

* - выполнены ЗАО "Центр исследования и контроля воды" (195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 9), аккредитованным на техническую компетентность и независимость и зарегистрированным в Государственном реестре под № РОСС RU.0001.515505

** - с учетом поправки по содержанию алюминия - 0.086 мг/дм³, Железа - 0.12 мг/дм³, марганца - 0.0061 мг/дм³, цинка - 0.0036 мг/дм³ в питьевой воде в точках на распределительной сети.

Исправки принимаются по усредненным данным ГУП "Водоканал Санкт-Петербурга" за ноябрь месяц по результатам ежесекундных измерений в точках на распределительной сети города, согласованных с главным государственным санитарным врачом по Санкт-Петербургу.

В связи с тем, за превышение нормативов водоотведения по качеству сточных вод Вашей организации будет начислена плата в соответствии с "Порядком взимания платы за прием (сброс) сточных вод и загрязняющих веществ в системы коммунальной канализации Санкт-Петербурга", утвержденным постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 19.10.2004 N 1677, по условиям договора:

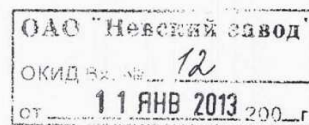
- за **ЗАЛПОВЫЙ** сброс загрязняющих веществ с учетом объемов фактически сброшенных сточных вод с 01.12.2012 по 31.12.2012;

- за **сверхнормативный** сброс загрязняющих веществ с учетом объемов фактически сброшенных сточных вод за период с 01.12.2012 до следующего отбора проб, но не более трех календарных месяцев.

В связи с зафиксированным залповым сбросом Вашей организации необходимо выяснить причины сверхнормативного и залпового сброса, принять меры по его прекращению и представить информацию о принятых мерах в Службу нормирования водоотведения.

Руководитель Службы нормирования водоотведения

Т.А. Синькевич



А.А. Гранов
Дир. работы
Водоканал



Государственное унитарное предприятие
 «ВОДОКАНАЛ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА»

филиал

«Водоотведение Санкт-Петербурга»

остров Белый, д.1, Санкт-Петербург, 198184
 Телефон (812) 713-90-06, факс (812) 713-98-92
 E-mail: vdo@vodokanal.spb.ru

ОКПО 89094407 ОГРН 1027809256254
 ИНН/КПП 7830000426/780543001

Руководителю
 ОАО "НЕВСКИЙ ЗАВОД"
 192029, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ,
 ОБУХОВСКОЙ ОБОРОНЫ ПР., 51
 факс: 490-78-69, 490-78-68

№ 101-44-5/12 от 20/01/2012

ИЗВЕЩЕНИЕ № 5993

Настоящим извещаем, что по результатам анализа проб сточных вод ЗАВОД (Акт отбора проб от 27.12.2011) по адресу 192029, ОБУХОВСКОЙ ОБОРОНЫ ПР., 51, лит.АЭ, БВ; АБ, У, АЗ, АМ, АЦ, ЛО, Э, АП, АШ, Щ, Я, Ш, О, В, К, П, Т, д.38, лит. И, К, В, АБ, Е, Ж, АЕ, Д зафиксировано превышение установленных нормативов водоотведения по качеству сточных вод, что представлено в нижеприведенной таблице:

Наименование контролируемого показателя	Результаты определения показателей состава и свойств сточных вод *, мг/дм ³	ФК(ФП)** мг/дм ³	ДК (НП) мг/дм ³	Кратность превышения	Характеристика сброса сточных вод
Выпуск 3 (БОЛЬШОЙ СМОЛЕНСКИЙ ПР. 4)					
Алюминий	0.63	0.565	0.5	1.13	сверхнорм.
Величина pH	10.1	10.1	6.5-9	1.12	сверхнорм.
Взвешенные вещества	41	41	300	-	-
Железо общее	2.6	2.48	1.1	2.25	сверхнорм.
Марганец	0.15	0.147	0.1	1.47	сверхнорм.
Медь	0.033	0.033	0.04	-	-
Нефтепродукты	0.58	0.58	0.7	-	-
СПАВ (анионные)	0.27	0.27	1.4	-	-
СПАВ (неионогенные)	< 0.1	0	0.8	-	-
Фосфор фосфатов	0.18	0.18	2	-	-
Выпуск 4 (БОЛЬШОЙ СМОЛЕНСКИЙ ПР. 5)					
Алюминий	0.11	0.045	0.5	-	-
Величина pH	7.6	7.6	6.5-9	-	-
Взвешенные вещества	< 5	0	300	-	-
Железо общее	0.58	0.46	1.1	-	-
Марганец	0.075	0.0715	0.1	-	-
Медь	0.0042	0.0042	0.04	-	-
Нефтепродукты	0.24	0.24	0.7	-	-
СПАВ (анионные)	0.066	0.066	1.4	-	-
СПАВ (неионогенные)	0.17	0.17	0.8	-	-
Фосфор фосфатов	< 0.1	0	2	-	-

ДК (НП) - норматив допустимой концентрации загрязняющего вещества или нормативный показатель общих свойств сточных вод в составе утвержденного ГУП "Водоканал Санкт-Петербурга" допустимого сброса (ДС) загрязняющих веществ.
 ФК (ФП) - фактическая концентрация загрязняющего вещества или фактический показатель общих свойств сточных вод.
 сверхнорм. - сверхнормативный сброс загрязняющих веществ.

ПРИМЕЧАНИЕ:

* - выполнены ЗАО "Центр исследования и контроля воды" (195009, г.Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 9), аккредитованным на техническую компетентность и независимость и зарегистрированным в Государственном реестре под № РОСС RU.0001.515505
 ** - с учетом поправки по содержанию алюминия - 0.065 мг/дм³, Железа - 0.12 мг/дм³, марганца - 0.0035 мг/дм³ в питьевой воде в точках на распределительной сети.

ОАО "Невский завод"
 ОКВД Вх. № 256
 от 28 02 2012

ОТ :

ФАКС NO. :

АВГ. 28 2013 15:28 СТР1



ПРАВИТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
Государственное унитарное предприятие
«ВОДОКАНАЛ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА»
(ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»)
Кавалергардская ул., д.42, Санкт-Петербург, 191015
Телефон (812) 300-09-09, факс (812) 2/4-13-61
E-mail: office@vodokanal.spb.ru
http://www.vodokanal.spb.ru
ОКПО 03323809 ОГРН 1027809256254
ИНН/КПП 78/30000426/783450001

Руководителю
ОАО «НЕВСКИЙ ЗАВОД»
192029, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ,
ОБУХОВСКОЙ ОБОРОНЫ ПР., 51
факс: 490-78-69, 490-78-68

№ 42-26-339/13 от 27/08/2013

ИЗВЕЩЕНИЕ № 2327

Настоящим извещаем, что по результатам анализа проб сточных вод ДОМ КУЛЬТУРЫ «НЕВСКИЙ» (Акт отбора проб от 12.08.2013) по адресу 192019, ОБУХОВСКОЙ ОБОРОНЫ ПР., 32 зафиксировано превышение установленных нормативов водоотведения по качеству сточных вод, что представлено в нижеприведенной таблице:

Наименование контролируемого показателя	Результаты определения показателей состава и свойств сточных вод %, мг/дм ³	ФК(ФП)** мг/дм ³	ЛК (ПП) мг/дм ³	Кратность превышения	Характеристика сброса сточных вод
Выпуск 1 (ОБУХОВСКОЙ ОБОРОНЫ ПР. 250)					
Азот аммонийный	2.2	2.2	18	-	-
Алюминий	1.3	1.218	0.5	2.44	сверхнорм.
Величина pH	7.4	7.4	6.5-9	-	-
Взвешенные вещества	190	190	300	-	-
Железо общее	20	19.84	1.1	18.04	сверхнорм.
Миргаз	1.3	1.294	0.1	12.94	сверхнорм.
Медь	0.043	0.043	0.04	1.08	сверхнорм.
Нефтепродукты	0.54	0.54	0.7	-	-
СПАВ (анионные)	0.19	0.19	1.4	-	-
Фенолы	0.0077	0.0077	0.08	-	-
Фосфор фосфатов	≤ 0.1	0	2	-	-
Цинк	0.34	0.335	0.1	3.35	сверхнорм.

ДК (ПП) - нормативы допустимой концентрации загрязняющего вещества или нормативный показатель общих свойств сточных вод;
ФК (ФП) - фактический показатель концентрации загрязняющего вещества или фактический показатель общих свойств сточных вод;
сверхнорм. - сверхнормативный сброс загрязняющих веществ.

ПРИМЕЧАНИЕ:

* - выполнены ЗАО «Центр исследования и контроля воды» (195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 9), аккредитованным на техническую компетентность и независимость и зарегистрированным в Государственном реестре под № РОСС RU.0001.515505

** - с учетом поправки по содержанию алюминия - 0.082 мг/дм³, Железа - 0.16 мг/дм³, марганца - 0.0063 мг/дм³, цинка - 0.0054 мг/дм³ в лигандной воде в точках на распределительной сети.

Поправки принимаются по усредненным данным ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» за июль месяц по результатам ежедневных измерений в точках на распределительной сети города, согласованных с главным государственным санитарным врачом по Санкт-Петербургу.

В связи с чем, за превышение нормативов водоотведения по качеству сточных вод Вашей организации будет начислена плата в соответствии с «Порядком взимания платы за прием (сброс) сточных вод и загрязняющих веществ в системы коммунальной канализации Санкт-Петербурга», утвержденным постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 19.10.2004 N 1677, по условиям договора, с учетом объемов фактически сброшенных сточных вод за период с 01.08.2013 до следующего отбора проб, но не более трех календарных месяцев.

Вашей организации необходимо выяснить причины сверхнормативного сброса и принять меры по его прекращению.

Начальник Управления контроля сточных вод и расчетов платы

С.Д. Силкина

Л.И. Соколова
438-44-86

ОАО «НЗЛ»
Вх. № 1127 14-00704 Л
от 28 АВГ 2013 г.

28-АВГ-2013 15:13 From:

ID:

Page: 001 R=96%

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Технический отчет о работе участка канализационного коллектора

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Района ТК

М.Н.Клементьев

2010г.

Технический отчет о работе участка за ФЕВРАЛЬ месяц 2010 г.

Наименование шахт и б/скважин	Марки- ровка	Поверхностный осмотр	D присое- динения и его напол- нение	Внутренний осмотр							Соответствие конструкции с исполнит. чертежами	Произведен- ные работы
				Замечания к осмотру	Заполнение в тоннеле	Наличие коррозии		Осадок				
						бетон	металл	на полках	в тоннеле			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
ТКК р-на Ржевска-Пороховые												
при глубине до 15,0 м												
ш.246	есть	Замечаний нет	D=900 мм, h=30 см	Ограждения разрушены, коррозия штукатурки 100%	60 см	нач. стадия коррозии	100%	3-5 см	10-15 см	соответствует	Технический осмотр	
ш.245а	есть	ниже уровня земли на 1,5 м	нет	Наклонная лестница скоррозирована на 15%	1/3	норма	до 15%	10 см	Нет	соответствует	Технический осмотр	
ш.245в	есть	Замечаний нет	нет	нет	1/3	норма	до 15%	7-10 см	Нет	соответствует	Технический осмотр	
ш.235	нет	верх из ПК h=1 м	D=700 мм, h=20 см	нач. стадия коррозии штукат-ки	60 см	норма	10-15%	10-15 см	10 см	соответствует	Технический осмотр	
б/с 234/1(1)	нет	Замечаний нет	D=400 мм, h=3 см	верх из ПК h=1 м; лестница не доходит до верха на 1 м	нет	норма	15-20%	Нет	Нет	соответствует	Технический осмотр	
б/с 234/1(2)	нет	на подтопе	нет		нет	норма	до 40%	Нет	Нет	соответствует	Технический осмотр	
ш.234	нет	Комплект смещен	D=700 мм, h=20 см	верх лестницы не закреплён	1/4	норма	20%	15-20см	10 см	соответствует	Технический осмотр	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
б/с 233/1	есть	Комплект нестандартный	D=500 мм, h=5 см	нет	нет	норма	5-10%	Нет	Нет	соответствует	Технический осмотр
ш.233	есть	ниже уровня земли на 1,5 м	нет	нет	60 см	норма	10%	7 см	10-15 см	соответствует	Технический осмотр
ш.232	есть	Замечаний нет	D=400 мм, h=3-5 см	нач. стадия коррозии шпунт-ки	60 см	норма	10-15%	15-20 см	10-15 см	соответствует	Технический осмотр
ТКК по Товарищескому пр.											
ш.242а	есть	Крышка нестандартная	D=1200 мм, h=20 см	Коррозия шпунт-ки	40 см	норма	10-15%	7-10 см	10 см	соответствует	Технический осмотр
ш.241бис	есть	Замечаний нет	D=600 мм, h=3 см	лестница не доходит до верха на 0,7 м	40 см	норма	5-10%	Нет	10 см	соответствует	Технический осмотр
ш.241	есть	Выше уровня земли на 0,7 м	нет	Скобы h=1м	40 см	норма	10-15%	10 см	10 см	соответствует	Технический осмотр
ТКК р-на Ржевка-Пороховые											
ш.12	есть	Выше уровня земли на 0,5 м	D=600 мм, h=3 см	На нижнем полке нет ограждения	1,2м	норма	нерж.	5-7 см	до 15 см	соответствует	Технический осмотр
ш.13	есть	Выше уровня земли на 0,5 м	нет	нет	1,2м	норма	нерж.	5-7 см	до 15 см	соответствует	Технический осмотр
при глубине до 30,0 м											
ш.231	нет	Замечаний нет	нет	нет	нет	норма	5-10%	10-15 см	Нет	соответствует	Технический осмотр

Технический осмотр шахт и буровых скважин
при глубине до 15,0 м - 13 шт.
при глубине до 25,0 м - 2 шт.
при глубине до 30,0 м - 1 шт.
Итого 16 шт.

Техническое обслуживание шахт и буровых скважин
при глубине до 15,0 м - 3 шт.

Итого 3 шт.

Старший мастер
И.И. Вишенский

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Района

М.Н. Клементьев

2010г.

Технический отчет о работе участка за МАЙ месяц 2010 г.

Наименование шахт и б/скважин	Марки- ровка	Поверхностный осмотр	D присоеди- нения и его напол- нение	Внутренний осмотр							Соответствие конструкции с исполнит. чертежами	Произведен- ные работы
				Замечания к осмотру	Заполнение в тоннеле	Наличие коррозии		Осадок				
						бетон	металл	на полках	в тоннеле			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
ТКК по наб. адм. Лазарева												
при глубине до 15,0 м												
кам.4	нет	Замечаний нет	D=800 мм, h=5 см	Лестница не доходит до верха 70 см	10 см	норма	15-20%	10 см	Нет	соответствует	Технический осмотр	
кам.3	есть	Нижне уровня земли на 10 см	D=800 мм, h=5 см	Верх из скоб 1 м; лаз из колец 0,8 м	10 см	норма	15-20%	10 см	Нет	соответствует	Технический осмотр	
кам.2	есть	Замечаний нет	нет	Верх из скоб 2 м;	10 см	норма	15-20%	10 см	Нет	соответствует	Технический осмотр	
кам.1	есть	Замечаний нет	D=1200 мм, h=5 см	Верх лестницы из скоб 1,5 м	10 см	норма	15-20%	Нет	Нет	соответствует	Технический осмотр	
ТКК Петроградской стороны (низовой уч-к)												
при глубине более 30,0 м												
ш.481а	есть	Крышка людского лаза стаканы d=100мм, коррозия рымов	D=1500 мм, h=8-10 см	Верх лестницы из скоб 2 м; коррозия стен 70%, начиная с третьего полка со стороны шибера - 100%	нет	норма	20-25%	5-7 см	нет	соответствует	Технический осмотр	
ш.480	есть	Отверстия в стаканах людского лаза скоррозированы насквозь	D=1200 мм, h=7-8 см	Нижние балки перекрытия со стороны лифтового проема коррозии 80 см	нет	норма	20-25%	5-7 см	Нет	соответствует	Технический осмотр	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ш.479	есть	Замечаний нет	нет	нет	20 см	норма	15%	нет	Нет	соответствует	Технический осмотр
ш.479а	есть	Замечаний нет	D=1200 мм, h=5 см	Верх лестницы из скоб h=2м, на нижнем полке отслоение штукатурки	20 см	норма	10-15%	нет	Нет	соответствует	Технический осмотр
ш.478	есть	Замечаний нет	D=1200 мм, h=5 см	Верх лестницы из скоб h=1м	20 см	норма	10-15%	нет	нет	соответствует	Технический осмотр
ш.477	есть	Людской лаз плотно в размере	D=1200 мм, h=7-10 см	Нет доступа к приемной воронке, отсутствует смотровая площадка	20 см	норма	10-15%	5-7 см	нет	соответствует	Технический осмотр
ш.4536	есть	Людской лаз 2 рыма	D=1000 мм, h=3 см	Верх лестницы из скоб h=0,5м	20 см	норма	15-20%	5-10 см	нет	соответствует	Технический осмотр
ш.453	есть	Шахта выше асфальта h=10-12 см	нет	нет	1/4	норма	10%	3-5 см	Нет	соответствует	Технический осмотр

Технический осмотр шахт и буровых скважин
при глубине до 15,0 м - 4 шт.
при глубине более 30,0 м - 8 шт.

Итого

12 шт.

Старший мастер



И.И.Вишенский

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица К.1 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Дкол.=1400мм, i=0,001 мм/м, L=500м.											
Экспериментальные данные В. М. Васильева									Результаты расчета по формулам (2.4.12)–(2.4.13)		
Период проведения эксперимента	Температура, °С		Естественная тяга, Па	Заполнения канализационного коллектора	Скорость, м/с						
	наружного воздуха	сточной жидкости			течения сточной жидкости	течения газа под действием потока сточной жидкости	течения газа под действием естественной тяги	течения газа под действием естественной тяги и потока сточной жидкости	течения газа под действием потока сточной жидкости	течения газа под действием естественной тяги	течения газа под действием естественной тяги и потока сточной жидкости
	t_{HB}^0	$t_{Ж}^0$	ΔPe	h / D	$V_{Ж.ПОВ.}$	$V_{Б.УБ.}$	$V_{Б.ЕСТ.}$	$V_{Б.}$	$V_{Б.УБ.}$	$V_{Б.ЕСТ.}$	$V_{Б.}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13
апрель 1982 г.	-0,4	15,6	6,88	0,40	1,75	0,26	0,40	0,66	0,27	0,45	0,73
	5,9	15,9	4,32	0,37	1,72	0,24	0,24	0,48	0,25	0,32	0,59
	-0,8	14,9	6,96	0,68	1,88	0,45	0,16	0,61	0,44	0,14	0,57
	2,9	15,4	5,00	0,50	1,82	0,33	0,22	0,55	0,34	0,20	0,55
	7,8	16,6	3,74	0,42	1,78	0,28	0,20	0,48	0,29	0,22	0,52
	6,0	16,2	3,75	0,34	1,70	0,23	0,30	0,53	0,24	0,32	0,57
	8,7	16,5	2,15	0,55	1,84	0,36	0,16	0,52	0,37	0,12	0,48
октябрь 1982 г.	4,1	14,6	5,68	0,26	1,40	0,14	0,57	0,71	0,14	0,66	0,82
	2,5	15,1	5,55	0,74	1,90	0,52	0,04	0,56	0,47	0,06	0,51
	4,7	15,3	3,58	0,65	1,85	0,42	0,10	0,52	0,42	0,18	0,50
	0,4	14,4	5,40	0,44	1,75	0,28	0,26	0,53	0,27	0,32	0,59
	4,6	16,0	8,00	0,66	1,88	0,44	0,20	0,64	0,44	0,18	0,61
	7,0	16,8	4,07	0,37	1,74	0,24	0,28	0,52	0,24	0,33	0,58

$V_{Б.УБ.}$ - столбцы 7 и 11.

$V_{Б.ЕСТ.}$ - столбцы 8 и 12.

$V_{Б.}$ - столбцы 9 и 13.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Паспорт прибора ВМ 25

4. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПРИЕМКЕ

Детектор мультитригазовый ВМ 25, заводской номер 18040KH-001 соответствует документации «Industrial Scientific OGDHAM SAS» и признан годным для эксплуатации.

Дата выпуска 2011г.

Изделие подвергнуто первичной поверке и признано годным к применению в качестве газоанализатора индивидуального пользования.

Поверитель 

М.П.

Дата 14.03.2011



5. ГАРАНТИЙНОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

Предприятие-изготовитель гарантирует соответствие выпускаемых детекторов мультитригазовых ВМ 25 всем требованиям технических условий на них. При соблюдении потребителем условий эксплуатации, транспортирования и хранения гарантийного срока эксплуатации - 12 месяцев, с момента выдачи мультитригазового анализатора со склада поставщика. Ремонт ВМ 25 производится на предприятии-изготовителе.

ДАННЫЕ О ПОВЕРКЕ

Дата поверки	Выполн. поверки ("Годен" или "Не годен")	Подпись поверителя, заверенная клеймом	Примечание
 073275415	<u>17.03.2014</u>	 <u>18040KH-001</u>	

ДЕТЕКТОР МУЛЬТИТРИГАЗОВЫЙ
ВМ 25

П А С П О Р Т

2011 г.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Детектор	мультиточтовый	BM 25, даче	BM 25, выпуск
дата выпуска	Industrial Scientific OILDM SAS		
	наименование		
	10010KN-001		
	защитный кожух		

1.2. BM 25 предназначен для непрерывного измерения концентрации взрывчатых и токсичных газов, а также концентрации кислорода, в подземных выработках шахт и рудников, в том числе открытых по газу и пыли, а также во взрывоопасных зонах помещений класса В-1 и наружных установках класса В-1г, где возможно образование взрывоопасных смесей газов и паров с воздухом, относящихся к категории ПС и группе взрывоопасности Т4 включительно.

1.3. BM 25 имеет четыре измерительных канала:

- канал измерения сероводорода (H_2S);
- канал измерения углекислого газа (CO_2);
- канал измерения кислорода (O_2);
- канал измерения аммиака (NH_3);
- канал измерения горючих газов - метана (CH_4).

1.4. BM 25 обеспечивает:

- вывод на шифротно-цифровой дисплей по каждому каналу символического и текущего значения его концентрации;
- автоматическую или ручную установку нуля; - самодиагностику после включения и аварийную световую и звуковую сигнализацию при обнаружении неисправных элементов мультиточкового датчика;
- световую и звуковую сигнализацию включенного состояния газонадзорщика;
- аварийную световую и звуковую сигнализацию при превышении установленных пороговых значений мгновенного содержания газа;
- аварийную световую и звуковую сигнализацию при разряде аккумуляторной батареи.

1.5. BM 25 предназначен для работы при следующих условиях эксплуатации:

- температура окружающей среды - от -20 до +50 °C;
- относительная влажность воздуха - от 10 до 95 % без конденсации влаги;
- атмосферное давление - от 90 до 110 кПа;
- изменение пространственного положения относительно вертикального - до 90°.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1. Основные параметры и размеры.

- 2.1.1. Габаритные размеры газонадзорщика - 180 x 467 x 195 мм.
- 2.1.2. Масса газонадзорщика в комплекте с источником питания - не более 7,5 кг.
- 2.1.3. Номинальное напряжение питания - 9 В постоянного тока.

2.2. Характеристики.

- 2.2.1. Диапазоны измерений и пределы допускаемой основной погрешности газонадзорщика приведены в табл. 1.
- 2.2.2. Предел допускаемой вариации показаний для каждого измерительного канала равен 0,5 предела допускаемой основной погрешности.

Таблица 1

Определенный компонент	Диапазон измерений	Пределы допускаемых пределов основной погрешности, %	
		применяемой	относительной
H_2S	0 - 20 ppm 20 - 100 ppm	± 20	-
O_2	0 - 5 % об.д. 5 - 30 % об.д.	± 5	± 20
CO_2	0 - 1 % об.д. 1 - 5 % об.д.	± 20	± 5
CH_4	0 - 2,2 % об.д. 2,2 - 4,4 % об.д.	± 10	± 10
Горючие газы	0-50 % НКПР 50-100 % НКПР	± 10	-
NH_3	0 - 20 ppm 20 - 100 ppm	± 25	± 25

2.2.3. Время прогрева и выхода на рабочий режим не превышает 60 с.

2.2.4. Предел допускаемого времени установления показаний $T_{0,9}$ - не более:

- по каналу CH_4 - 20 с; - по каналу O_2 - 10 с; - по каналу NH_3 - 180 с;
- по каналу H_2S - 120 с; - по каналу CO_2 - 120 с.

2.2.5. Время непрерывной работы в автономном режиме - не менее 120 ч.

2.2.6. Время работы без применения ручной корректировки показаний - не менее 5 суток при времени работы не более 10 часов в сутки.

2.2.7. Средний срок службы чувствительных элементов:

48 месяцев (для CH_4); 48 месяцев (для H_2S); 60 месяцев (для CO_2); 24 месяца (для O_2); 26 месяцев (для NH_3).

2.2.8. Полный орашский срок службы BM 25 - не менее 6 лет.

Критерием предельного состояния по сроку службы является такое состояние, когда стоимость ремонта превышает 70 % стоимости мультиточкового датчика.

2.3. BM 25 сертифицирован Государственным стандартом России, зарегистрирован в Государственном реестре средств измерения и допущен к применению в Российской Федерации.

2.4. BM 25 подлежит периодической поверке не реже 1 раза в год.

3. КОМПЛЕКТ ПОСТАВКИ

- BM 25
- Зарядное устройство
- Инструкция по эксплуатации
- Паспорт
- 1 шт.
- 1 шт.
- 1 экз.
- 1 экз.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Паспорт прибора ТЛАД MSP 430

ООО "ТЛАД"

Модуль - накопитель ТЛАД MSP 430

ПАСПОРТ (Э)

ТЛЗ.010.200.100.00 ПС

04.2011г.

Оглавление

стр.

1. ВВЕДЕНИЕ	3
2. НАЗНАЧЕНИЕ	3
3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	3
4. КОМПЛЕКТНОСТЬ	3
5. УСТРОЙСТВО И РАБОТА ИЗДЕЛИЯ	4
6. УКАЗАНИЕ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ	5
7. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ	5
8. ПОРЯДОК РАБОТЫ	6
9. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ	6
10. ВОЗМОЖНЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ И МЕТОДЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ	6
11. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ	6
12. ГАРАНТИЙНЫЕ ОБЯЗАТЕЛЬСТВА	7
13. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПРИЕМКЕ	7
14. СВЕДЕНИЯ О РЕКЛАМАЦИЯХ	7

1

2

Настоящий паспорт предназначен для ознакомления с устройством модуля Накопителя (далее в тексте – модуль), правилами эксплуатации, транспортирования и хранения с целью поддержания его в рабочем состоянии в течение срока эксплуатации.

2.1. Модуль предназначен для считывания данных с датчиков, с заданным интервалом времени, предварительной обработки и отображения данных, долговременного хранения и передачи результатов на пост Оператора.

2.2. Модуль предназначен для встраивания в состав автоматизированных технических средств контроля, сигнализации, управления и защиты, объединенных в сеть интерфейсами RS-485.

3.1. Время готовности модуля с момента подачи питания с учетом времени на автоматический контроль исправности не более 10 сек.

3.2. Технические параметры

Параметр	Значение
Количество аналоговых входов	2
Однополярных	1
Количество входов для временных интервалов	4-х раз
Интерфейс индикатора (совместим с HD44780)	7-36В
Напряжение питания (постоянный ток)	20 мА
Ток потребления, не более	200 мА
В режиме ожидания	100 мСек
В активном режиме (300 мсек)	9600 Бод
Время ожидания отклика на команду, не более	1200 м
Скорость обмена с датчиками	30 м
Скорость обмена с постом Оператора	
Длина линии связи с датчиками	
с постом оператора (уточняется при испытаниях)	

3.3. Линия связи 2-х проводная экранированная витая пара

3.4. Модуль обеспечивает связь с модулями датчиков по интерфейсу RS-485 в протоколе ASCII

3.5. Режим работы – непрерывный, длительный

3.6. Модуль предназначен для эксплуатации в диапазоне температур от 0 °С до +50°С при относительной влажности не более 80%, атмосферном давлении от 630 до 800 мм рт. ст. без агрессивных паров и газов.

3.7. Габаритные размеры (длина х ширина х высота) 116 х 84 х 22 мм

3.8. Масса, не более 80 гр.

3.9. Срок службы, не менее 5 лет

Модуль - Накопитель Шахта ТЛАД MSP 430 - 1 шт.

Паспорт - 1 шт.

3

5.1. Расположение разъемов

Разъемы X1, X2 предназначены для установки модуля MSP430-169LCD

X4 (аналоговый вход 0)

Контакт	Наименование
1	+3.3 В VCC
2	+ Аналоговый вход
3	AGND («0» аналоговый)

X5 (аналоговый вход 1)

Контакт	Наименование
1	+3.3 В VCC
2	+ Аналоговый вход
3	AGND («0» аналоговый)

X7 (RS485_Sens_3) (связь с датчиками)

Контакт	Наименование
1	RS+
2	RS-
3	GND («0» питания)

X3 (POWER_INP_2) (вход напряжения питания)

Контакт	Наименование
1	Power Inp (7В – 36В)
2	GND

X6 (POWER_OUT_2) (выход напряжения питания для датчиков)

Контакт	Наименование
1	Power Out (7В – 36В)
2	GND

5.2. Принцип работы.

При подаче питания, модуль проверяет подключение SDCard и если карта присутствует считывает заголовок (номер шахты, время включения, количество записей и выставленные коэффициенты и пороги), в противном случае, заголовок заполняется данными по умолчанию для данной шахты. Затем иницируется индикатор выводится текущее время и начинается цикл считывания данных с датчиков. Контрастность регулируется в диалоговом режиме.

Результаты считывания с датчиков усредняются, проверяются на допустимость, пороги и формируется структура для записи на карту. Если карта отсутствует, структура обновляется при каждом цикле считывания. В структуре хранится информация о номере записи, времени измерения и обработанные данные считывания с датчиков.

Изменение коэффициентов, порогов, даты, время и другой технологической информации, осуществляется в диалоговый режим, который позволяет в удобной форме изменять выбранные параметры. В режиме диалога все циклы обмена прекращаются.

Отслеживание время не останавливается.

4

5.2.1. Обмен данными с АБУ.

Данные, записанные на карту памяти, могут быть считаны с помощью поставляемого (опционально) программного обеспечения. Передача данных производится при отключенных датчиках из режима Диалога.

5.2.2. Считывание данных с датчиков

Индикатор считывания данных с датчиков, является модуль накопителя. Протокол обмена ASCII ADAM-подобный, запрос-ответ. Время ожидания ответа на запрос не более 100 мсек. Цикл опроса устанавливается в модуле (600 секунд по умолчанию). Полученные данные, фильтруются, усредняются и при необходимости, формируются ошибки или выхода за пороговые значения, которые фиксируются в блоке данных модуля.

5.3. На плате расположены элементы электрической схемы и разъемы

В состав модуля входят:

- Модуль микроконтроллера MSP430-169LCD,
- Микросхемы интерфейсов для связи с датчиками ADM3485AR или аналогичные,
- Микросхема подключения питания датчиков PD1352

6. УКАЗАНИЕ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

6.1. По способу защиты человека от поражения электрическим током, модуль к III классу по ГОСТ 12.2.007.0.

6.2. К работе с модулем допускаются лица, изучившие настоящий паспорт, а также прошедшие инструктаж по технике безопасности

7. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

7.1. При монтаже модуля следует соблюдать требования:

- «Правил устройств электроустановок» (ПУЭ)
- «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТБ)
- «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» (ПЭЭП)
- Требованиям настоящего паспорта
- Требованиям эксплуатационной документации на изделие, в составе которых используется модуль

7.2. Перед установкой модуль должен быть осмотрен. Особое внимание необходимо обратить на:

- Отсутствие повреждений платы модуля
- Отсутствие сколов на плате модуля
- Отсутствие нарушений лакокрасочного покрытия
- Отсутствие повреждений разъемов модуля

7.3. Модуль устанавливается вне взрывоопасных зон в местах, обеспечивающих защиту от воздействия прямых солнечных лучей, кислотных, щелочных и других агрессивных примесей, токопроводящей пыли и механических повреждений.

7.4. Монтаж модуля проводить в следующей последовательности:

- Определить место установки,
- Установить модуль в соответствии с документацией на модуль и устройство, в котором он используется
- Подключить проводники в соответствии со схемой подключения (проводники должны подключаться без натяжения)

5

7.5. Подключение модуля к внешним устройствам и разъемам, осуществляется с помощью ленточного кабеля в соответствии с рисунком по пункту 5.1 настоящего документа

8. ПОДАЧА НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ

8.1. Подать напряжение питание.

8.2. При подаче питания модуль проводит самодиагностику. Наличие напряжения питания индицирует светодиод (если установлен).

9. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

9.1. Прием модуля в эксплуатацию после монтажа (установки) и выполнения мероприятий по технике безопасности должны производиться в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» (ПЭЭП) и настоящим паспортом.

9.2. При эксплуатации модуля необходимо поддерживать его работоспособность в соответствии с требованиями настоящего паспорта и проводить его техническое обслуживание в объеме проведения профилактических работ.

Рекомендуется один раз в три месяца проводить профилактические работы в следующем объеме:

- Визуальный осмотр – проверить крепление модуля, кабелей и соединителей, состояние маркировки, отсутствие механических повреждений
- Удаление загрязнений, пыли и влаги: скопление пыли удалите продувкой сухим воздухом и мягкой тканью, влагу – сухой мягкой тканью

Проверка крепления проводников к контактам соединителей и удаление загрязнений, пыли и влаги проводится при необходимости на отключенном модуле.

9.3. Организацию и контроль над проведением работ по техническому обслуживанию модуля осуществляет инженерно-технический персонал, обслуживающий технические средства эксплуатирующей организации.

9.4. При проведении технического обслуживания соблюдайте меры безопасности, указанные в разделе 6 настоящего документа.

10. ВОЗМОЖНЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

10.1. В случае неисправности модуля в первую очередь отключите его от источника питания.

10.2. Краткий перечень возможных неисправностей и способы их устранения приведены в таблице

Наименование неисправности, внешние проявления и дополнительные признаки	Вероятная причина	Способ устранения
Отсутствие обмена по интерфейсу RS485	Отсутствие напряжения питания	Проверить исправность линий источника питания
	Обрыв линии интерфейса связи RS-485	Проверить исправность линий связи интерфейса RS-485

10.3. При возникновении прочих более сложных неисправностей их устранение может проводиться только на предприятии-изготовителе подготовленными специалистами.

6

11. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

11.1. Модули следует транспортировать любым видом транспорта в крытых транспортных средствах (в железнодорожных вагонах, закрытых автомашинах, герметизированных отапливаемых отсеках самолетов, трюмах и т.д.) на любые расстояния при температуре окружающего воздуха от -20°C до +50°C и относительной влажности до 98% при температуре 35°C.

11.2. Условия хранения должны соответствовать требованиям группы I(II) по ГОСТ 15150 в закрытых отапливаемых помещениях при температуре от 0°C до 40°C.

11.3. В помещении для хранения не должно быть токопроводящей пыли, паров кислот и щелочей, а также газов, вызывающих коррозию и разрушающих изоляцию.

12. ГАРАНТИЙНЫЕ ОБЯЗАТЕЛЬСТВА

12.1. Предприятие-изготовитель гарантирует соответствие модуля требованиям настоящего паспорта при соблюдении потребителем условий и правил хранения, транспортирования, монтажа и эксплуатации.

12.2. Гарантийный срок эксплуатации – 12 месяцев со дня ввода модуля в эксплуатацию.

12.3. Гарантийный срок хранения – 6 месяцев со дня изготовления.

12.4. Модуль, у которого во время гарантийного срока, (при условии соблюдения правил эксплуатации и монтажа) будет выявлено несоответствие требованиям настоящего паспорта, безвозмездно заменяется или ремонтируется предприятием-изготовителем.

13. ПРИЕМКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Модуль - Накопителя Шахта ТЛАД MSP 430 заводской номер ТЛ-2011-04.

Соответствует требованиям технической документации и признан годным к эксплуатации.

Дата изготовления 15.09.2011 г.

Примечание В.М. Курочкин

М.П.

Рекламации потребители предъявляются и удовлетворяются в следующем порядке:

При получении модуля от транспортной организации получателя следует визуальным осмотром проверить целостность транспортной упаковки и комплектность.

В случае обнаружения повреждений транспортной тары, модуля или комплектности, составляется акт в присутствии грузополучателя.

При отказе модуля в период гарантийного срока потребителем должен быть составлен технический акт, в котором указывается:

- Заводской номер;
- Дата начала эксплуатации;
- Условия хранения;

7

- Количество часов работы до момента отказа;
- Дата возникновения отказа;
- Характер отказа;
- Предполагаемая причина отказа;
- Меры, принятые после возникновения отказа.

Акт высылается предприятию-изготовителю для устранения выявленных дефектов.

8

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Паспорт прибора TESTO 425

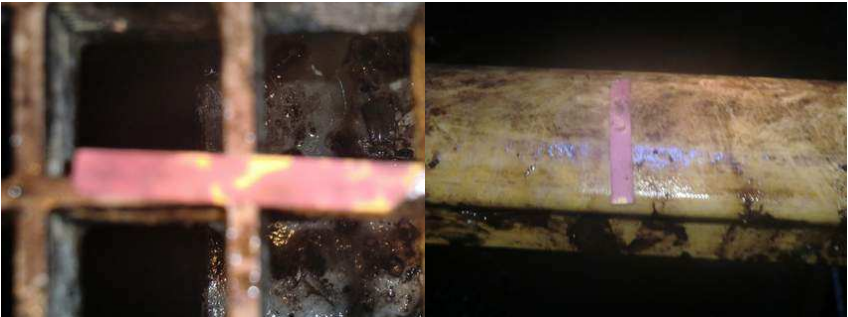
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Технические данные	
Температура хранения	-40 ... +85 °C
Рабочая температура	-20 ... +50 °C
Тип батарейки	9 В батарейка, 6F22
Срок службы батарейки	20 часов
Вес	285 г.
Габариты	182 x 64 x 40 мм
	ABS
Тип зонда NTC	
Диапазон измерений	-20 ... +70 °C
Погрешность	±0.5 °C (0 ... +60 °C)
	±0.7 °C (в ост. диапазоне)
Разрешение	0.1 °C
Тип зонда Термо	
Диапазон измерений	0 ... +20 м/с
Погрешность	±(0.03 м/с +5% от изм. знач.)
Разрешение	0.01 м/с

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Фотоматериалы производства работ и экспериментов в период с мая по сентябрь 2011г.

№	Фотографии	Описание
<i>Получение экспериментальных данных о скорости изменения концентрации газов CO_2, H_2S, O_2, CH_4 в подсводном и шахтном пространстве сети.</i> <i>Май-Сентябрь 2011г.</i>		
1		Спуск в одну из шахт для предварительного осмотра. Поиск шахты для проведения эксперимента
2		Проверка работоспособности прибора VM 25. Ввод параметров.

3		Проверка работоспособности прибора ТЛАД MPS 430.
4		К спуску готовы.
5		Измерения pH на стенках шахты и технологическом оснащении шахты: перекрытия, марши, перила. Сравнение результата с таблицей «pH». На все образцах зафиксировано pH=1.

		
6		Начало работы. Снятие первых показаний. Прибор «ВМ 25» работает.
7		Прибор «ВМ 25» и «ТЛАД MPS 430» в шахте №10 по ул. Верности.

8		Прибор «ВМ 25» и «ТЛАД MPS 430» в шахте №10 по ул. Верности.
<i>Получение экспериментальных данных о скорости и направлении движения газа движущегося под действием поверхностной силы (увлекающей способности) потока сточной жидкости. Подтверждения наличия обратного потока на обследуемом участке сели.</i> <i>Сентябрь 2011г.</i>		
9		Подготовка к эксперименту. Изготовление сетки для снятия данных о направлении потока газа в канализационном коллекторе.

10		Сетка для снятия данных о направлении потока газа в канализационном коллекторе готова к работе.
11		Измерение избыточного давления в шахте №8.

12		Измерение скорости потока газа в подсводном пространстве коллектора прибором Testo 425.
13		Измерение скорости потока газа в подсводном пространстве коллектора прибором Testo 425.

14		Визуальное подтверждение наличия обратного потока газа в коллекторе.
15		Визуальное подтверждение наличия обратного потока газа в коллекторе.
16		Эксперимент завершен.

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Алгоритм аэродинамического расчета канализационной сети

1. Сбор исходных данных: температура дневной поверхности, схема сети, гидравлическая таблица сети (заложение, заполнение, диаметры, отметки коллекторов, шахт, расходы сточной жидкости и т. д.).

2. Расчет относительного давления в порталах КС по (4.7)

$$P_{\text{ОТН.ПОРТАЛА}} = g \cdot h_{AT} \cdot \rho_{AT} + g \cdot h_{\text{ПОРТАЛА}} \cdot \rho_{\text{ПОРТАЛА}}$$

3. Расчет количества газа и направления его движения по сети по (2.26)–(2.29)

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

$$+ 2 \cdot \int_0^{2\sqrt{R^2 - z^2} - R} \int_r^R \left(\frac{(P_2 - P_1) \cdot 2 \cdot \sqrt{R^2 - z^2}}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} \right) dydz \quad (2.26)$$

$$Q = \int_0^{\sqrt{R^2 - z^2} - (h-R)} \int_{-r}^r \frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h-R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dydz + \int_0^{\frac{V_{\text{воды}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r V_{\text{В.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} dydz \quad (2.27)$$

$$Q = \int_0^{\frac{V_{\text{воды}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r V_{\text{В.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} dydz - \int_0^{\sqrt{R^2 - z^2} - (h-R)} \int_{-r}^r \frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h-R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dydz -$$

$$- 2 \cdot \int_0^{2\sqrt{R^2 - z^2} - R} \int_r^R \frac{(P_2 - P_1) \cdot 2 \cdot \sqrt{R^2 - z^2}}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dydz \quad (2.28)$$

$$Q = \int_0^{\frac{V_{\text{воды}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r V_{\text{В.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} dydz - \int_0^{\sqrt{R^2 - z^2} - (h-R)} \int_{-r}^r \frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h-R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} dydz \quad (2.29)$$

4. Расчет аэродинамических узлов по (4.1):

$$\sum_i^n Q_i = 0. \quad (4.1)$$

5. Сбор полученных данных в таблицы и схемы. Определение мест выбросов газа на дневную поверхность земли.

6. Анализ полученных данных (расходы, места выбросов и т. д.). Расчет кратности газообмена на расчетном участке по следующей формуле:

$$K_{\text{ГАЗА}} = \frac{3600 \cdot Q_{\text{ГАЗА}}}{1,5 \cdot W_{\text{КОЛ}}} \quad (2.79)$$

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

$$C_{\text{H}_2\text{S}_{\text{ФОН}}} = \frac{C_{\text{H}_2\text{S}_{\text{ГАЗ}}}}{t_{\text{ГАЗ}} \cdot K_{\text{ГАЗА}}} \quad (2.72)$$

где $C_{\text{H}_2\text{S}_{\text{ГАЗ}}}$ — фоновая концентрация сероводорода в период отсутствия газообмена (насыщенная концентрация по H_2S), мг/м^3 ;

$C_{\text{H}_2\text{S}_{\text{ФОН}}}$ — фоновая концентрация сероводорода на расчетном участке канализационном сети при данной кратности газообмена;

$t_{\text{ГАЗ}}$ — время насыщения шахтного пространства сероводородом до максимальных концентраций, час.

8. Имея фоновую концентрацию сероводорода в сети, можно определить скорость разрушения бетонного слоя сооружений на сети по зависимости (2.80) [46].

$$V_{\text{К.Б}} = 0,073 \cdot C_{\text{H}_2\text{S}_{\text{ФОН}}} + 0,136 \quad (2.80)$$

где $V_{\text{К.Б}}$ — скорость коррозии бетона, мм/год .

9. Зная скорость коррозии бетона и толщину защитного слоя бетона, можно рассчитать расчетный период эксплуатации сети (T) и сооружений на ней по зависимости (2.81):

$$T = \frac{h_{\text{З.Б}}}{V_{\text{К.Б}}}, \text{ год} \quad (2.81)$$

где $h_{\text{З.Б}}$ — толщина защитного слоя бетона, мм ;

T — расчетный период эксплуатации сети, год.

10. В случае необходимости увеличения кратности газообмена на участке сети или перераспределения потока газа возможно изменение схемы движения газа и его количества за счет увеличения депрессии в отдельных шахтах сети. Перерасчет выполняется с учетом дополнительных условий сети, дислокации мест выбросов и дополнительных сооружений и оборудования (труба, вентилятор, фильтр) по (4.6), (4.3.9)–(4.3.14) для выхода работы сети на требуемую кратность газообмена с требуемой обеспеченностью в течение года.

11. Сбор полученных данных в таблицы и схемы.

12. Разработка регламента работы сети в части движения газа, перераспределения газоздушного потока, регулирования работы вентиляционных установок, контроля и обслуживания фильтров и т. д.).

Пример расчета по данному алгоритму представлен в приложении К.

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Расчет газообмена на проектируемом участке канализационного коллектора город УФА

Город УФА, столица республики Башкортостан, расположен на пересечении магистралей соединяющих Восток, с европейской частью России и центр России с южными странами СНГ, что дает приток инвестиций, прирост численности населения и дополнительный потенциал для динамичного развития городского округа.

В 2009 г. ООО «ПИБ «Инженерные Экосистемы», в качестве альтернативного варианта, разработало перспективную схему канализования города Уфы. [18, 26] с использованием канализационных коллекторов глубокого заложения. Использование данной схемы канализования позволяло вывести из эксплуатации КНС мелкого заложения и отвести сточные воды города по самотечному коллектору непосредственно на очистные сооружения.

Главный канализационный коллектор города имеет протяженность 17,6 км. Заглубление коллектора достигает 70 м. Диаметр коллектора составляет 1500-2000 мм. Профиль коллектора представлен на рисунке К.1.

Рельеф местности г. Уфы достаточно холмистый, что создает большую разницу отметок дневной поверхности (до 100 м.). В процессе канализования территории города, такая разница привела к созданию большого числа отдельных бассейнов канализования с КНС и напорными трубопроводами. При разработке перспективной схемы канализования удалось исключить часть КНС из работы и перевести их в резерв. На главном канализационном коллекторе осталось шесть подключений от КНС. Подключение от напорных трубопроводов к коллектору осуществлялось с применением КГН, и трубчатых перепадов.

При анализе канализационного коллектора, были определены наиболее уязвимые участки сети с точки зрения воздействия АГ, а именно КГН и перепады. К таким участкам относятся шахты: 101, 106, 112, 116, 126 [3].

Одним из вариантов защиты канализационного коллектора от воздействия газов, выделяющихся в КГН, является организация газообмена на участке тоннеля, где возможны наиболее агрессивные условия.

В качестве расчетного участка рассмотрим шахту 112 и сопряженные с ней шахты 110 и 113 (рисунок К.1). В шахте имеется приток по напорному трубопроводу от КНС и КГН.

Движение газа может идти по двум направлениям противоположно потоку сточной жидкости (из шахты 112 в шахту 110) или попутно с потоком сточной жидкости (из шахты 112 в шахту 113).

Для организации газообмена участка КС необходимо произвести аэродинамический расчет этого участка, рассчитать кратность газообмена, фоновую концентрацию сероводорода в тоннеле, скорость коррозии бетонных конструкций сети, определить срок эксплуатации вентилируемого участка, оценить технико-экономический эффект при использовании различных способов организации газообмена.

При расчете кратности газообмена за вентилируемый объем принимается участок КС подверженный действию АГ. Как правило, это шахта, где расположен очаг образования сероводорода (КГН и т. д.) и участок коллектора по пути движения газа. Объем участка коллектора принимается 0,5 объема шахты подверженной воздействию АГ.

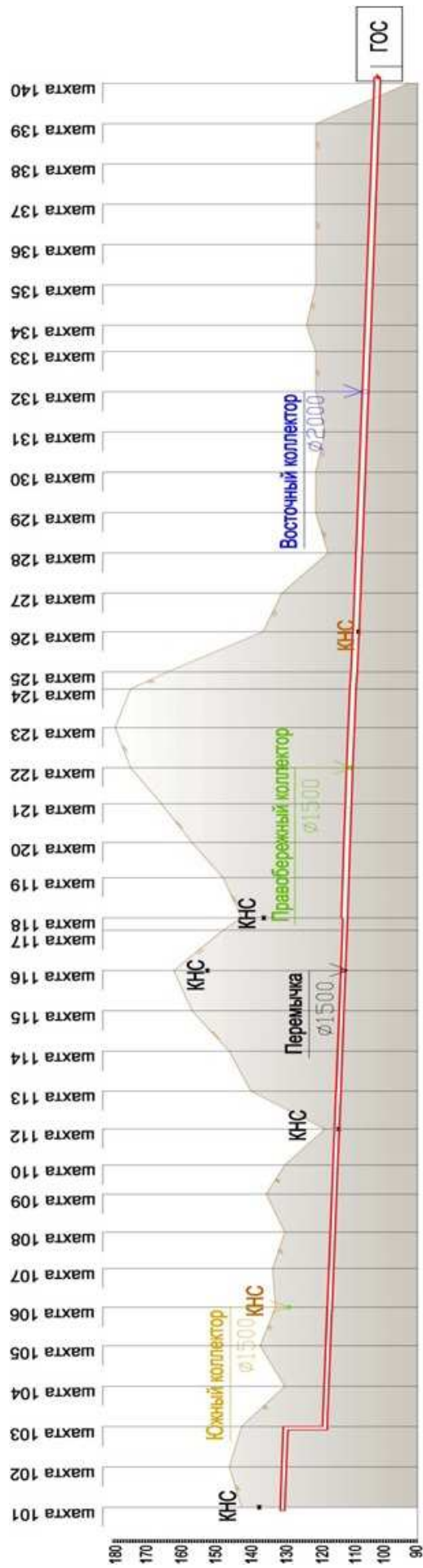


Рисунок. К. 1. Профиль перспективного главного канализационного коллектора г. Уфы.

С точки зрения побуждающих сил движение газа по второму варианту попутно с потоком сточной жидкости является более рациональным, а учитывая, что отметка верха шахты 113 (отм.142 м.) выше, чем у шахты 110 (отм.133 м.), и единственно правильным (рисунок К.2).

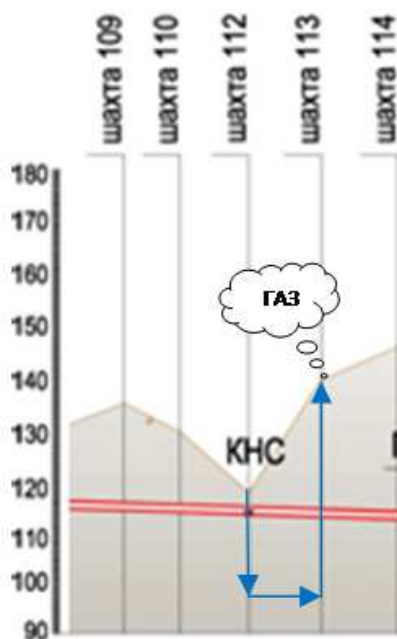


Рисунок К.2. Схема организации газообмена.
Шх.112 - Шх.113.

Шахта 112

$$Z_{0-112} = 114 \text{ м. (отм. дна шахты);}$$

$$Z_{h-112} = 120 \text{ м. (отм. крышки шахты);}$$

$$t_{ГАЗА-112} = 14 \text{ град. } ^\circ\text{C};$$

$$\rho_{нпу\ t=14} = 1,23 \text{ кг/м}^3;$$

$$D_{112} = 6 \text{ м.}$$

Исходные данные для расчета:

Общие данные:

$$t_{ВОЗДУХА} = 4 \text{ град. } ^\circ\text{C};$$

$$\rho_{нпу\ t=4} = 1,28 \text{ кг/м}^3;$$

$$D_{КОЛ} = 1500 \text{ мм.};$$

$$h / D = 0,5;$$

$$L_{112-113} = 470 \text{ м.};$$

$$V_{В.ПОВ.} = 1,19 \text{ м/с [4];}$$

$$i = 0,001;$$

$$V_{C_{H_2S\ ГАЗ}} = 120 \frac{\text{мг} \cdot \text{час}}{\text{м}^3} [69].$$

Шахта 113

$$Z_{0-113} = 113,5 \text{ м. (отм. дна шахты);}$$

$$Z_{h-113} = 140,5 \text{ м. (отм. крышки шахты);}$$

$$t_{ГАЗА-113} = 14 \text{ град. } ^\circ\text{C};$$

$$\rho_{нпу\ t=14} = 1,23 \text{ кг/м}^3.$$

Расчетная схема представлена на рисунке К.3.

ШХ. 112

ШХ. 113

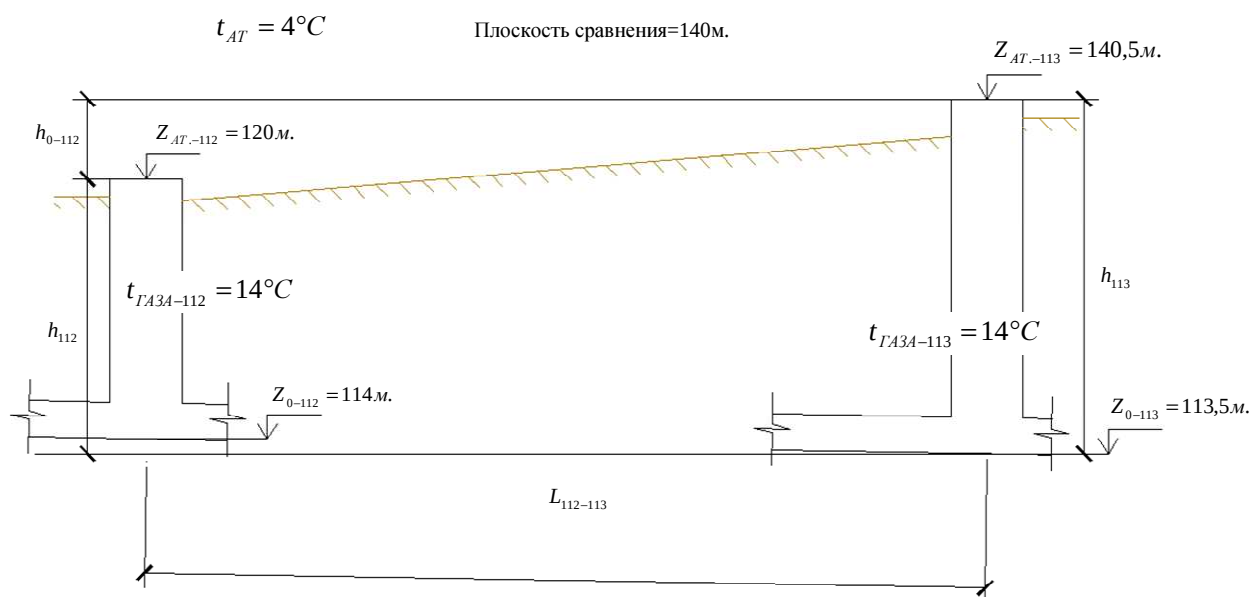


Рисунок К.3. Расчетная схема.

1. Произведем расчет естественной тяги по (4.1) для каждой шахты. В качестве плоскости сравнения для упрощения расчета примем $z=140,5$ м

$$P_{\text{ОТНПОРТАЛА}} = g \cdot h_{\text{АТ}} \cdot \rho_{\text{АТ}} + g \cdot h_{\text{ПОРТАЛА}} \cdot \rho_{\text{ПОРТАЛА}} ; \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ОТНПОРТАЛА112}} &= g \cdot h_{0-112} \cdot \rho_{t=4} + g \cdot h_{112} \cdot \rho_{\text{ГАЗА112}} = \\ &= 9,81 \cdot 20,5 \cdot 1,28 + 9,81 \cdot 6,5 \cdot 1,23 = 335 \text{ Па;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ОТНПОРТАЛА113}} &= g \cdot h_{113} \cdot \rho_{\text{ГАЗА112}} = \\ &= 9,81 \cdot 27 \cdot 1,23 = 325 \text{ Па;} \end{aligned}$$

$$\Delta P = P_{\text{ОТНПОРТАЛА112}} - P_{\text{ОТНПОРТАЛА113}} = 335 - 325 = 10 \text{ Па.}$$

Депрессию, создаваемую естественной тягой, можно также определить по зависимости (1.7)

$$\Delta P_e = \frac{0,55 \cdot \rho_{\text{В.}} \cdot g \cdot \left(H_{\text{ВТ.}} + H_{\text{ВК.}} \cdot \frac{i \cdot L + z_1 - z_2}{2} \right) (t_{\text{КОЛ}}^o - t_{\text{Н.В.}}^o)}{273 + \frac{(t_{\text{КОЛ}}^o + t_{\text{Н.В.}}^o)}{2}} ; \quad (1.7)$$

$$\Delta P_E = 8 \text{ Па.}$$

2. Определим расход газа, движущегося по направлению шахта 112 – шахта 113 (2.26)

$$Q = \int_0^{\sqrt{R^2-z^2}-(h-R)} \int_{-r}^r \left(\frac{(P_2 - P_1) \cdot (\sqrt{R^2 - z^2} - (h - R))}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} \right) dydz + \int_0^{\frac{V_{\text{воды}} \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot i}} \int_{-r}^r \left(V_{\text{в.ПОВ.}} - \frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot y}{\mu} \right) dydz +$$

$$+ 2 \cdot \int_0^{2 \cdot \sqrt{R^2-z^2}} \int_r^R \left(\frac{(P_2 - P_1) \cdot 2 \cdot \sqrt{R^2 - z^2}}{2\mu \cdot L} - \frac{(P_2 - P_1) \cdot y^2}{2\mu \cdot L} \right) dydz \quad (2.26)$$

Воспользовавшись программным пакетом «Maple 14» (либо любой другой программой), произведем расчет

$$Q_{112-113} = 0,51 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Однако, расход газа за счет увлекающей способности жидкости учитывать не следует так как данный расход пойдет ниже по сети. В таком случае формула (2.26) примет следующий вид

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

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

Расход газа движущегося за счет естественной тяги составит

$$Q_{112-113E} = 0,32 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

3. Определим кратность газообмена (2.79)

$$Q_{\text{ГАЗА}} = \frac{1,5 \cdot W_{\text{ШАХТЫ}} \cdot K_{\text{ГАЗА}}}{3600}. \quad (2.79)$$

За $W_{\text{ШАХТЫ}}$ принимаем объем шахты 112 так как именно там расположен очаг газообразования (КГН с перепадом)

$$K_{112-113} = \frac{Q_{112-113} \cdot 3600}{1,5 \cdot W_{\text{ШАХТЫ}}};$$

$$K_{112-113} = \frac{0,32 \cdot 3600}{1,5 \cdot 16956} = 4,5 \text{ в час.}$$

4. Определим концентрацию сероводорода при данной кратности газообмена по (2.73).

$$K_{112-113} = \frac{V_{C_{H_2S_{ГАЗ}}}}{C_{H_2S_{ПДК}}}; \quad (2.73)$$

$$C_{H_2S-112} = \frac{V_{C_{H_2S_{ГАЗ}}}}{K_{112-113}};$$

$$C_{H_2S-112} = \frac{120}{4,53} = 26,5 \text{ мг/м}^3.$$

5. При организации естественной вентиляции на участке коллектора шахта 112- шахта 113 концентрация по сероводороду составит $C_{H_2S-112} = 26,5 \text{ мг/м}^3$, что является выше предельно допустимой концентрации ($C_{пдк} = 5 \text{ мг/м}^3$):

$$C_{H_2S-112} > C_{H_2S_{пдк}}.$$

6. Определим скорость разрушения бетонного слоя сооружений на сети по зависимости (2.80):

$$V_{К.Б.} = 0,073 H_2S_{ГАЗА} + 0,136; \quad (2.80)$$

$$V_{К.Б.} = 0,073 \cdot 26,5 + 0,136 = 2 \text{ мм/год}.$$

7. Определим расчетный период эксплуатации участка коллектора шахта 112- шахта 113 (Т) и сооружений на ней по зависимости (2.81):

$$T = \frac{h_{з.б.}}{V_{К.Б.}}, \text{ год} \quad (2.81)$$

$$T = \frac{100}{2} = 50 \text{ лет}.$$

При толщине защитного слоя бетона $h_{з.б.} = 100 \text{ мм}$. расчетный период эксплуатации участка коллектора шахта 112 - шахта 113 составит 50 лет.

8. Для увеличения эксплуатационного периода, установим вентиляционную трубу на вытяжку. Высота трубы 10м. В таком случае увеличится естественная тяга, кратность газообмена. Концентрация сероводорода снизится.

Произведем повторный расчет. С вновь введенными данными мы получим, что расчетный период эксплуатации сети составит:

$$T = \frac{100}{1,4} = 71 \text{ год}.$$

9. В местах выхода газов из КС на дневную поверхность необходимо применять установки очистки газов от химически агрессивных соединений (фильтры).

Фильтры, установленные на аэродинамическом участке, создают дополнительное сопротивление, что приводит к снижению депрессии на участке сети и снижению количества газа, движущегося по коллектору в единицу времени.

Сопротивление фильтра зависит от количества газа, пропускаемого через фильтр в единицу времени и подчиняется закону (1.4):

$$\Delta h = RQ^2, \quad (1.4)$$

где

Аэродинамическое сопротивление фильтра является паспортным значение. $R_{\text{фильтра}}$ примем $16 \text{ м}^5/\text{с}^2$.

Тогда сопротивление фильтра на данной сети при $Q=0,32 \text{ м}^3/\text{с}$ составит 20 Па.

Сопротивление фильтра больше депрессии создаваемой за счет естественной тяги.

При данных условиях фильтр будет являться непреодолимой преградой для движущегося газа. Газообмен будет отсутствовать. Необходимо устройство вентиляционной установки.

10. Для определения мощности вентиляционной установки необходимо знать аэродинамическое сопротивление сети $R_{\text{сети}}$, $R_{\text{фильтра}}$, $Q_{\text{требуемое}}$.

$R_{\text{сети}}$ можно определить по ф. 1.4 и оно составит $8 \text{ м}^5/\text{с}^2$.

$R_{\text{фильтра}}$ примем $16 \text{ м}^5/\text{с}^2$.

$Q_{\text{требуемое}}$ определим из расчета обеспечения периода эксплуатации сети в 100 лет, тогда $Q_{\text{требуемое}}=0,73 \text{ м}^3/\text{с}$.

Требуемая депрессия вентиляционной установки составит:

$$P_{\text{вент.}}=160 \text{ Па. } (Q_{\text{требуемое}}=0,73 \text{ м}^3/\text{с.})$$

11. Экономический эффект от внедрения различных вентиляционных схем можно рассчитать по следующей зависимости (5.1):

$$\Delta D = \frac{\sum K_2 + \sum \Xi_2}{T_2} - \frac{\sum K_1 + \sum \Xi_1}{T_1}, \text{ р./год}, \quad (4.15)$$

12. Для наглядного сравнения различных вариантов эксплуатации участка сети целесообразно собрать все данные в таблицу (таблица К.1) [79].

Таблица К.1

№	вид затрат	наименование статьи расходов	1 вариант, млн. р.	2 вариант, млн. р.	3 вариант, млн. р.	4 вариант, млн. р.
1		строительство шахты №112	48	48	48	48
2	капитальные	организация естественной вентиляции		1,44	1,44	1,44
3	эксплуатационные, в год			0,48	0,48	0,48
4	капитальные	установка вентиляционной трубы			2,40	
5	эксплуатационные, в год				0,72	
6	капитальные	установка вентиляционного оборудования с фильтром очистки				14,40
7	эксплуатационные, в год					0,92
8		создаваемая кратность газообмена	0	4,50	7,00	11,00
9		скорость коррозии бетона, мм/год	5,00	2,00	1,40	1,00
10		концентрация АГ на выходе из шахты	120,0	26,5	17,3	ниже ПДК
11	фактический период эксплуатации, год		20	50	71	100
12	ИТОГО за нормативный период эксплуатации (100 лет), млн. р.		240,00	146,88	193,014	203,84
13	экологический ущерб от выбросов за нормативный период эксплуатации (100 лет), млн. р.		0,00	42,60	21,30	0,00
14	Итого, млн. р.		240,00	189,48	214,31	203,84
15	Результат экономического сравнения по формуле 10. Экономия, р. в год.		0,00	0,50	0,26	0,36

13. Экономическое сравнение различных вариантов эксплуатации участка сети можно графически представить в следующем виде (рисунок К.4) [79].

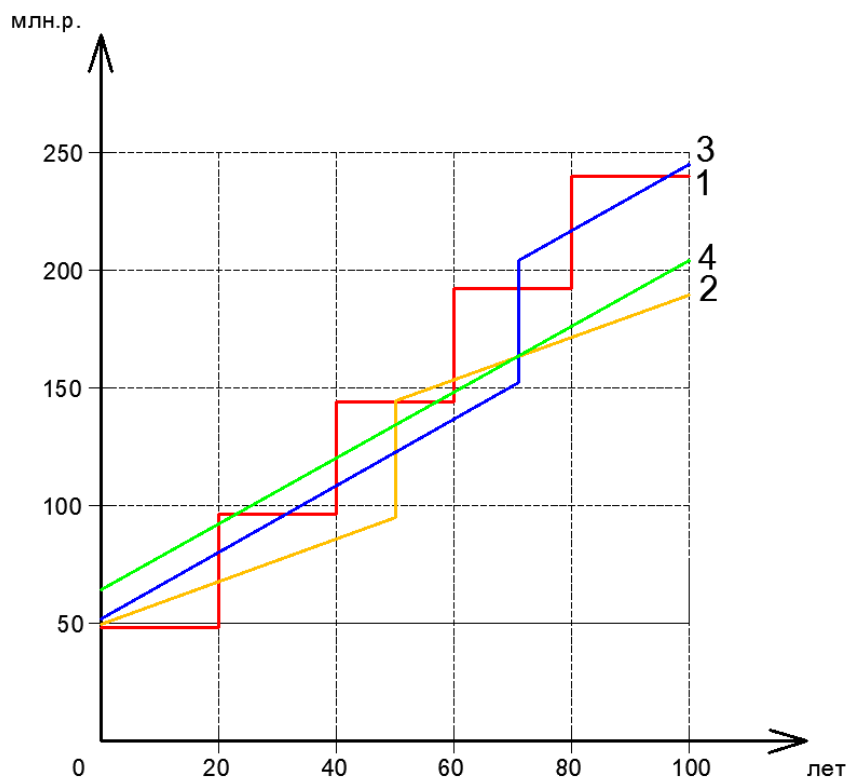


Рисунок К.4. Сравнение затрат на строительство и эксплуатацию участка КС, с учетом затрат на возмещение экологического ущерба

где 1 – Эксплуатация сети без вентиляции.

2 – Эксплуатация сети с вентиляцией естественным путем.

3 – Эксплуатация сети с вентиляцией с использованием вентиляционной трубы.

4 – Эксплуатация сети с вентиляцией с фильтром и вентиляционной установкой на вытяжной шахте.

Представленное экономическое сравнение учитывает основные технико-экономические параметры эксплуатации вентиляционной системы на сети, позволяет «грубо» оценить различные варианты вентиляции сети, а так же произвести их сравнение и рассчитать экономический эффект.

Представленный выше пример расчета организации газообмена на участке КС позволяет рассчитать основные параметры вентиляции сети, такие как концентрация сероводорода (и др. газов), скорость коррозии сети, межкапитальный период эксплуатации. Произвести технико-экономическое сравнение этих вариантов, определить наиболее экономически целесообразный вариант вентиляции сети и получить экономический эффект.