

На правах рукописи



Скибо Денис Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ВРЕМЕННОГО И СТРУКТУРНОГО
РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ**

Специальность

2.1.4. Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Научный руководитель: **Чупин Роман Викторович**, доктор технических наук, профессор кафедры городского строительства и хозяйства Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Официальные оппоненты: **Примин Олег Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федеральное государственное бюджетное учреждение Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук.

Шлычков Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора института инженерно-экологического строительства и механизации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»

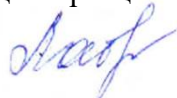
Защита диссертации состоится «25» апреля 2024 г. в 15:00 часов по местному времени на заседании диссертационного совета ИРНТУ.05.03, созданного в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (Приказ №557-О от 04.08.2023) по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, конференц-зал корпус К, Тел. 89086628066, e-mail: olgakot81@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», e-mail: info@istu.edu

Автореферат разослан “___” февраля 2024 года.

Учёный секретарь диссертационного совета,

К.т.н., доцент



Лавыгина Ольга Леонидовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Централизованные системы водоотведения (ЦСВ) относятся к важнейшим инженерными комплексам жизнеобеспечения городов и поселений. Работоспособность, надёжность и безопасность их функционирования во многом определяет здоровье и благополучие населения, а также сохранность и экологическую устойчивость селитебных территорий. В то же время надёжность и эффективность работы ЦСВ напрямую зависит от бесперебойности работы транспортирующих сооружений, включая самотечные и напорные трубопроводы, канализационные насосные станции. Однако современное ЦСВ большинства городов и поселений России нельзя признать отвечающим современным требованиям, так как они имеют низкую надёжность по причине высокого износа трубопроводов (более 60%), массового использования напорных трубопроводах из низкоуглеродистой стали без защиты от коррозии, нарушение технологии производства монтажных работ, невыполнения требуемых проектных гидравлических параметров скоростного режима и наполнения в трубопроводах и коллекторах и по ряду других причин. Как следствие, наблюдается значительная аварийность сетей и сооружений, приводящая к выходу неочищенных сточных вод на поверхность земли и к значительным экологическим ущербам.

Из нормативных источников следует, что на стадии проектирования систем канализации промышленных предприятий, а также поселений и городов, расположенных в районах повышенной сейсмической активности, необходимо предусматривать меры, исключающие подтопление территорий, загрязнение открытых и закрытых водоёмов сточными водами. Количество жителей в Российской Федерации, проживающих в сейсмических районах, составляет около 40 млн. чел. Поэтому разработка мер по предотвращению попадания неочищенных стоков в окружающую среду, а также оценка их экономической и экологической целесообразности является важной задачей при формировании ЦСВ. К этим мероприятием относятся различные методы резервирования: комплектация аварийно-регулирующими резервуарами (АРР) насосные станции и сети; использование свободной ёмкости самотечных коллекторов и смотровых колодцев; организация дублирующих трубопроводов и устройство перемычек между ними; введение дополнительных разгрузочных коллекторов как постоянного, так и периодического действия; рассматривать подход к организации кольцуемых структур из напорных и безнапорных участков.

Очевидно, требуется обосновать оптимальный выбор и эффективность применения каждого из перечисленных мероприятий и определять их общий синергетический эффект. Возникает научная задача исследования и повышения надёжности функционирования централизованных систем водоотведения с разработкой эффективных методов их

резервирования, совершенствование конструкции АРР, предотвращающих сброс неочищенных сточных вод на грунт и в водоёмы.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам повышения надёжности ЦСВ уделялось и уделяется большое внимание. Значимый вклад в это направление внесли такие известные учёные, как С.В. Яковлев, О.Г. Примин, В.А. Орлов, М.И. Алексеев, В. И. Калицун, В.С. Кедров, Ю.М. Ласков, П.В. Сафонов, М.Д. Пробирский, Е.С. Гальперин, Н.Н. Новицкий, Р.В., Чупин, Е.С. Гогина, В.С. Игнатчик, С.Ю. Игнатчик, Ю.А. Ермолин, Ф.В. Кармазинов, В.П. Саломеев, И.В. Николенко и др. Разработаны теоретические основы транспортирования сточных вод, исследована вероятностная природа возникновения и развития аварийных ситуаций, предложены методы резервирования трубопроводов и сооружений. Например, в работах профессора В. И. Калицуна в 80-90 годах прошлого столетия исследованы условия работы аварийно-регулирующего резервуара. В 1996 году силами МГП «Мосводоканал» и ГУП «МосводоканалНИИпроект» был реализован первый аварийно-регулирующий резервуар, причиной создания которого послужил рост водопотребления в г. Москве, а, следовательно, и увеличение объёмов загрязнённых вод. Для повышения пропускной способности требовалось создание новых сооружений: напорных водоводов, самотёчных коллекторов и пр. Создание АРР в тех условиях позволяло нивелировать суточные колебания притока сточных вод и снизить затраты на возведение новых сооружений. Строительство таких сооружений в черте сформированной городской застройки не всегда осуществимо по причине больших габаритных размеров, а также из-за последующих несоизмеримых затрат на восстановление, благоустройство и вынос близлежащих инженерных сетей. Каждая застроенная территория имеет свои специфические особенности (рельеф местности, плотность застройки, грунтовые условия и др.), которые могут оказывать существенное влияние на выбор мероприятия по предотвращению попадания неочищенных стоков на рельеф. Важно отметить, что в условиях современной тенденции, характеризующейся снижением водопотребления и, соответственно, уменьшением объёмов перекачки сточных вод насосными станциями, регулирующая роль АРР снизилась. Очевидно, с учётом этих факторов требуется определить границы и условия применения того или иного мероприятия, включая устройство АРР на самотечных коллекторах и при существующих и новых КНС.

Таким образом, возникает актуальность в проведении исследований, направленных на обоснование методов оптимального резервирования ЦСВ, как средства повышения экономической и экологической эффективности мероприятий, предотвращающих излив сточных вод на окружающую среду и совершенствование конструкции АРР, легко возводимой и встраиваемой в существующие КНС и сооружаемые на сети водоотведения. Решение этой научной и практической проблемы является важной общегосударственной и социальной задачей сохранения природы и благоприятных условий обитания человека.

Объект исследования. Системы: самотечные трубопроводы - канализационные насосные станции - напорные трубопроводы и аварийно-регулирующие резервуары.

Предмет исследования. Технико-экономическая и экологическая целесообразность устройства АРР и разработка методических основ применения временного и структурного резервирования для обеспечения и повышения надёжности и безопасности ЦСВ.

Научно-техническая гипотеза диссертации. Применение аварийно-регулирующих резервуаров в составе канализационных насосных станций и на сети водоотведения в сочетании с аккумулирующей способностью самотечных коллекторов и структурного резервирования напорных и безнапорных трубопроводов повышает их надёжность и экологическую безопасность и предотвращает сброс неочищенных стоков на поверхность земли и в водоёмы.

Цель и задачи исследования. Повышение надёжности систем водоотведения на основе методов временного и структурного резервирования. Для достижения этой цели рассматривались и решались следующие задачи:

- анализ нормативно-технической базы применения аварийно-регулирующих резервуаров в системах водоотведения на новых и застроенных территориях;
- исследование и обоснование эффективности различных вариантов резервирования и предотвращения попадания неочищенных стоков на поверхность земли;
- исследование надёжности ЦСВ за счёт использования аккумулирующей способности самотечной сети водоотведения, устройства дополнительных коллекторов и разгрузочных трубопроводов, сооружения аварийно-регулирующих резервуаров;
- разработка методики надёжностно-технологических расчётов аварийных объёмов сточных вод при выходе из строя канализационных насосных станций, напорных и безнапорных трубопроводов;
- разработка новой конструкции АРР и методики его применения для обеспечения устойчивой, безаварийной работы систем водоотведения при минимальных затратах в строительство и эксплуатацию, а также обеспечивающей возможность строительства в стеснённых и застроенных территориях;
- исследование использования новой конструкции аварийно-регулирующего резервуара на примере главной ГКНС №18а в городе Иркутск.

Научная новизна

1. Изложена и подтверждена научная концепция использования методов временного и структурного резервирования для обеспечения и повышения надёжности централизованных систем водоотведения;
2. Проведены технико-экономические расчёты и обоснована эффективность применения различных вариантов резервирования для обеспечения надёжности системы водоотведения и недопущение попадания неочищенных сточных вод на поверхность земли;

3. Предложена новая методика определения аварийных объёмов сточных вод при выходе из строя (аварии) канализационных насосных станций, напорных трубопроводов и безнапорных коллекторов;

4. Доказана перспективность использования аккумулирующей способности безнапорных сетей водоотведения для повышения надёжности ЦСВ и предложена методика их вычисления, учитывающая вероятностную природу объёмов транспортируемых сточных вод;

5. Изложена и подтверждена эффективность устройства АРР в сочетании с резервированием коллекторов, сформулированы условия их применения в зависимости от длины трубопроводов, объёмов транспортируемых сточных вод и производительности КНС;

6. Разработана методика оценки и повышения надёжности системы водоотведения на основе мероприятий временного и структурного резервирования;

7. Разработаны новые принципы минимизации строительных и эксплуатационных затрат при проектировании и возведении аварийно-регулирующего резервуара;

8. Исследованы особенности повышения надёжности ЦСВ в сейсмических районах строительства.

Теоретическая значимость работы:

1. Моделирование функционирования самотечных трубопроводов и АРР позволяет:

- оценить транспортирующую способность системы водоотведения с учётом аккумулирующей ёмкости;

- обосновать мероприятия по минимизации выхода сточных вод на поверхность земли;

- рассчитать объёмы АРР и определить направления их модернизации.

2. Доказана эффективность использования временного и структурного резервирования сети и сооружений системы водоотведения как средства обеспечения их надёжности и экологической безопасности.

3. Раскрыты противоречия в части уменьшения затрат на устройство и эксплуатацию АРР и расширения диапазона их применения при КНС и на участках сети.

4. Проведена модернизация и совершенствование существующих математических моделей оценки надёжности вариантов резервирования систем водоотведения.

Значение полученных результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1. Представлены методические рекомендации использования АРР и аккумулирующей способности сети, а также резервирование сети водоотведения, которые могут быть адаптированы к системам водоотведения крупных городов и использованы при их развитии и реконструкции.

2. Разработана методика оценки и повышения надёжности системы водоотведения, которая применена на главной ГКНС №18а в городе Иркутск.

3. Разработана и внедрена новая конструкция АРР, которая сооружается как закрытым способом без разработки котлованов, так и открытым с использованием минимальных площадей застройки и территории двойного назначения.

Методология и методы исследования

Для достижения поставленных целей и проверки адекватности математических методов и моделей использовались методология численного и компьютерного моделирования, методы оптимизации проектных решений, проводились численные эксперименты с использованием аппарата теории планирования экспериментов и математической статистики, применялись классические методы гидравлики и теории гидравлических цепей, теории надёжности.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие результаты исследования:

1. Моделирование функционирования системы самотечных трубопроводов и аккумулирующих ёмкостей при локализации и ликвидации аварийных ситуаций.

2. Обоснование диапазонов эффективности применения различных вариантов временного и структурного резервирования для повышения надёжности и качества функционирования централизованных системы водоотведения.

3. Методика расчёта аварийных объёмов сточных вод при выходе из строя канализационных насосных станциях, напорных трубопроводов и безнапорных коллекторов.

4. Методика оценки и повышения надёжности системы водоотведения на основе мероприятий временного и структурного резервирования.

5. Новая конструкция аварийно-регулирующего резервуара.

6. Новые принципы минимизации строительных и эксплуатационных затрат применения аварийно-регулирующего резервуара при расчёте жизненного цикла.

Степень достоверности полученных результатов. Подтверждается адекватностью построенных на основе базовых законов сохранения энергии, математических моделей реально работающих системам водоотведения. Проводимые исследования основаны на достоверности стоимостных показателей, приведённых в актуализированных нормативах укрупнённых цен, разработанные методики расчётов и полученных зависимостей подтверждается результатами внедрения в реальную практику.

Апробация результатов работы. Итоги исследований были представлены на следующих конференциях:

– Всероссийская научно-практическая конференция "Качество городской среды: строительство, архитектура и дизайн". Иркутск, 20-22 декабря 2017 г.

– Всероссийской научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве». Иркутск, ИРНИТУ, 2018, 07 ноября 2018 г.

– XIV Международная научно-технической конференция. Яковлевские чтения. НИ МГСУ. Москва 14-15 марта 2019 г.

– XV Международная научно-техническая конференция. Актуальные вопросы архитектуры и строительства. Новосибирск НГАСУ «Сибстрин». 19 – 21 апреля 2022 г.

Кроме того, результаты исследования рассмотрены на техническом совете в МУП «Водоканал». Иркутск 29 декабря 2021 г. (Протокол № 40 от 29.12.2021)

Личный вклад автора состоит в формировании цели и постановке задач диссертационного исследования; непосредственном участии в получении и обработке исходных данных и научных экспериментах; разработке методических основ оценки и повышения надёжности систем водоотведения и в разработке новой конструкции аварийно-регулирующего резервуара, а также в обосновании эффективности его применения при КНС и в сети водоотведения, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов, в части пункта 21. «Методы анализа, расчёта и оптимизации показателей устойчивости, надёжности и безопасности работы систем водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов».

Публикации

Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 20 работах, из них 4 статьи в сборниках Scopus, 4 статьи из перечня ВАК, 3 патента на полезную модель, 2 патента на изобретение.

Структура и объём диссертации

Диссертация включает введение, четыре главы, общие выводы, список литературы из 121 наименований и 1 приложения (патенты на изобретение, справки о внедрении). Объём диссертационной работы 179 страниц машинописного текста (включая приложения).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении достаточно полно отражены актуальность диссертационного исследования, степень разработанности существующей проблемы в современных условиях, определены объект и предмет исследования, представлена формулировка научной гипотезы, поставлены цель и задачи исследования, определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведена оценка состояния существующих систем водоотведения, выполнен анализ нормативно-технической документации по их проектированию и эксплуатации. Исследованы существующие методы повышения надёжности

функционирования СВО, рассмотрен опыт применения первого АРР, построенного в 1996 году на территории г. Москвы и подземных резервуаров для сбора воды в паводковый период в пригороде г. Токио (Япония) и др. Обоснована потребность систем водоотведения городских поселений РФ в разработке новых конструкций АРР, предотвращающих затопление территории сточными водами и попадания их в открытые водоёмы.

Во второй главе исследуется эффективность использования аккумулирующей способности самотечных коллекторов и устройства АРР при канализационных насосных станциях и в сети водоотведения. Предлагается методика оценки требуемых объёмов аккумулирования сточных вод на время ликвидации аварийной ситуации в сети и на КНС, оценивается вместимость аварийных стоков в свободной ёмкости самотечных коллекторов. Выводится условие эффективности применения аварийно-регулирующих резервуаров, резервирование самотечных и напорных трубопроводов как средства повышения надёжности водоотведения.

Для выбора оптимального решения по зарегулированию аварийного объёма стоков и его практической реализации в качестве расчётной модели принята функционирующая главная канализационная насосная станция (ГКНС-18а), расположенная в северной части Ленинского района г. Иркутска. ГКНС-18а перекачивает стоки в количестве 17 тыс. м³/сут., от бассейна водоотведения, с численностью населения в 100 тыс. жителей, на левобережные очистные сооружения р. Ангара. Насосная станция оборудована 2-мя стальными напорными трубопроводами, диаметром 1000 мм, срок службы которых закончился и требуется их перекладка на новые, например, на полиэтиленовые. В работе предложена и дана надёжностно-технологическая оценка вариантов с оснащением КНС аварийно-регулирующим резервуаром и одним напорным трубопроводом, либо, как и было - два напорных трубопровода. Приведена оценка стоимости жизненного цикла каждого из них (СЖЦ ГОСТ Р 58785-2019). В основе оценки СЖЦ были положены укрупнённые стоимостные показатели, изложенные в НЦС-81-02-14-2023 и НЦС-81-02-19-2023. Годовые эксплуатационные расходы $Ci_{\text{экс}}$ (тыс. руб./год), вычислены на основе «Рекомендаций по нормированию труда работников водопроводно-канализационного хозяйства», от 15.06.2020 №316/пр. а также с учётом приказа № 154/пр. от 23 марта 2020 г. Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации.

Жизненный цикл для сооружений АРР и КНС принимается равным 100 лет, а для полиэтиленовых трубопроводов – 50 лет. При расчёте капитальных затрат на возведение АРР (закрытым способом), на основе НЦС-81-02-19-2023 (таблицы 19-04-005-01 и 02) была получена следующая зависимость (тыс. руб.): $K_{\text{арр}} = 12912 + 150,94 \cdot V$, (1)

где: V – расчётный объём АРР в м³.

Для оценки годовых эксплуатационных затрат и единовременных капиталовложений в напорные трубопроводы из полиэтилена предложены следующие формулы:

$$\text{Одна нитка } K_{\text{тр}} = (16032,9 \cdot x^{0,515} - 11140,2 \cdot x^{0,257} + 10012) \cdot L \quad (2)$$

$$\text{Две нитки } K_{\text{тр}} = (13435,21 \cdot x^{0,515} - 11140,2 \cdot x^{0,257} + 12839) \cdot L \quad (3)$$

Для безнапорной канализации:

$$\text{Одна нитка } K_{\text{тр}} = (35492 \cdot x^{0,924} - 16575 \cdot x^{0,462} + 10012) \cdot L \quad (4)$$

$$\text{Две нитки } K_{\text{тр}} = (59483 \cdot x^{0,924} - 15916 \cdot x^{0,462} + 12839) \cdot L, \quad (5)$$

где: x – расход сточной жидкости, м³/с, L – длина трубопровода в км,

Расходы на электроэнергию (тыс. руб. в год) на КНС отнесены к напорным трубопроводам и представлены следующим образом:

$$C_{\text{элк}} = 108 \cdot z_{\text{элк}} \cdot (39,46 \cdot L \cdot x^{1,547} \cdot z^{-0,683} \cdot T^{-0,358} + p_i \cdot x_i), \quad (6)$$

где: z – стоимость 1 кВт час электроэнергии, T – время жизненного цикла, в год,

p – остаточный напор в камере гашения напорных трубопроводов, м. в. ст.

$$\text{Эксплуатационные затраты, тыс. руб. в год: } \mathcal{E}_{zi} = 0,116 \cdot K_{\text{тр}} + C_{\text{эл}} + 19,28 \cdot L_i^{0,77} \cdot \text{ЗП}_{\text{ср}} \quad (7)$$

где: $\text{ЗП}_{\text{ср}}$ – средняя заработная плата по предприятию, тыс. руб. в мес.

В работе установлено, что если проводить сопоставление вариантов устройства КНС, АРР и одного напорного трубопровода с вариантом из КНС и двумя напорными трубопроводами по критерию приведённых затрат, то будет выгодным вариант с двумя напорными трубопроводами, а если сравнения производить по критерию стоимости за жизненный цикл, то уже за счёт меньших эксплуатационных затрат выгодным становится вариант с устройством АРР.

Проведённые в работе исследования показали, что при определённой длине напорных трубопроводов от КНС может быть выгодным вариант устройства при насосной станции АРР и одного напорного трубопровода. Результаты этих исследований графически представлены на рисунке 1, а для существующей ГКНС-18а с расходом 17 тыс. м³/сут, и при расходе 50 тыс. м³/сут. (рис. 1, б).

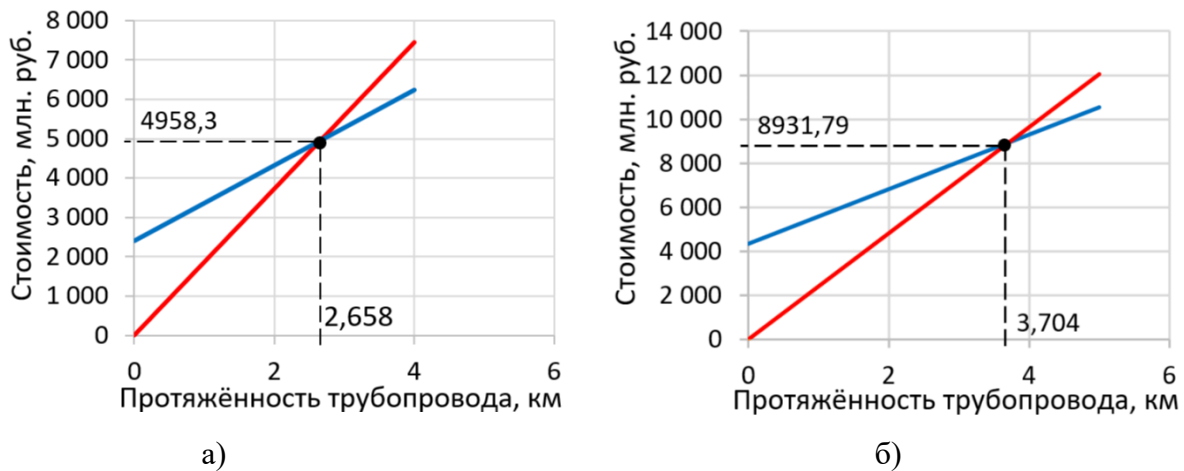


Рис. 1 – Зависимости стоимости за жизненный цикл системы от протяжённости напорного трубопровода (красный цветом – СЖЦ при устройстве двух напорных трубопровода от КНС, голубым – СЖЦ с учётом устройства АРР закрытым способом при КНС и одного напорного трубопровода)

Из построенных графиков можно сделать вывод, что при расходе станции 17 тыс. м³/сут. и протяженности напорной линии до 2658,0 м целесообразно оснащать насосные станции напорными трубопроводами в количестве 2-х штук, однако в случаях большей длины, эффективнее будет укомплектовать КНС одним напорным трубопроводом и АРР, тоже при расходе 50 тыс. м³/сут., но уже при длине трубопровода 3704,0 м.

На основе проведённых численных экспериментов, в работе определены функции эффективного использования АРР, в зависимости от протяжённости трубопроводов и расхода КНС. Полученные функции достаточно хорошо аппроксимируются представленной ниже формулой: $L_{\text{тр}} \geq 0,281 \cdot x_{\text{КНС}}^{0,234}$, (8)

где $L_{\text{тр}}$ – протяжённость напорного трубопровода, в км; $x_{\text{КНС}}$ – расход КНС, в м³/сут.

В случае открытого способа устройства АРР эти графики будут иметь вид, представленный на рис. 2, а и 2, б.

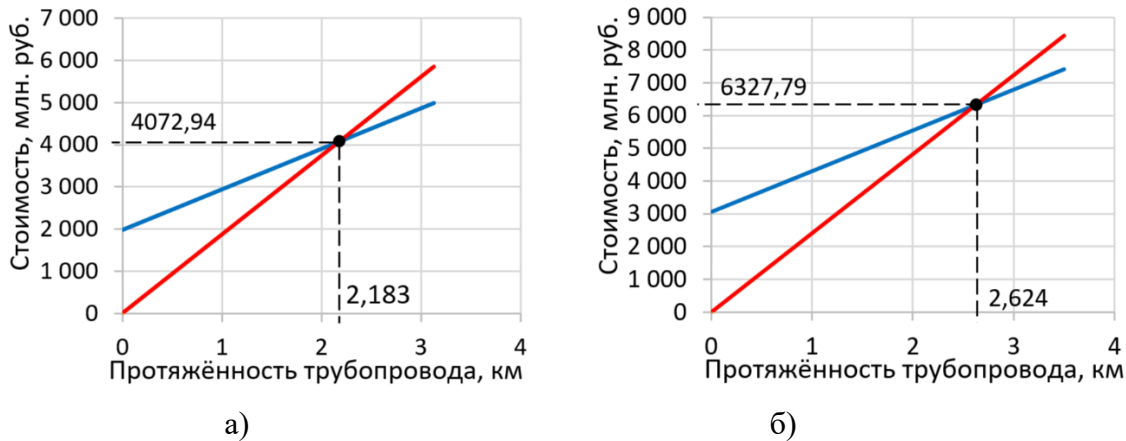


Рис. 2 – Зависимости стоимости за жизненный цикл системы от протяжённости напорного трубопровода (красный цветом – СЖЦ при устройстве двух напорных трубопроводов от КНС, голубым – СЖЦ с учётом устройства АРР при КНС и одного напорного трубопровода)

В этом случае границы применения АРР можно определить на основании следующего условия: $L_{\text{тр}} \geq 0,72 \cdot x_{\text{КНС}}^{0,12}$. (9)

Практическое применение условий (8), (9) выглядит следующим образом. В тех случаях, когда для проектируемой или действующей КНС вышеуказанные неравенства выполняются, то целесообразно с экономической точки зрения сооружать АРР с одним напорным трубопроводом. Если же условия (8), (9) не выполнимы, то следует КНС оснащать двумя напорными трубопроводами.

В системе водоотведения г. Иркутска действуют 33 КНС, 13 из которых соответствуют условию (8) и 25 условию (9). В таблице 1 представлены результаты оценки повышения надёжности системы водоотведения м-на Ново-Ленино г. Иркутска на основе временного и структурного резервирования, где первый вариант – оценка существующей схемы водоотведения, второй – устройство параллельных безнапорных коллекторов, третий –

устройство АРР в каждом узле расчётной агрегированной схемы, четвёртый – комбинированный вариант из параллельной прокладки коллекторов и устройства АРР, определённый согласно (8), (9). Эквивалентная интенсивность отказов ($\lambda_{\text{экв}}$) и количество сточных вод, которое в результате аварийных ситуаций без очистки попадает на поверхность земли ($\Delta Q_{\text{сбр}}$), вычисляются согласно (10) - (13).

Таблица 1

Сравнение вариантов резервирования безнапорной системы водоотведения

N	Самотечная сеть с суммарным расходом 17000 м ³ /сут.	$\lambda_{\text{экв}}$	$\Delta Q_{\text{сбр}}$, м ³ /год	Плата за загрязнение за 100 лет, млн. руб.	СЖЦ за 100 лет, млн. руб.	СЖЦ + плата за загрязнение за 100 лет, млн. руб.
1	В традиционном исполнении	0,258	1095	10950,0	13744,41	24694,4
2	С параллельными разгрузочными коллекторами	0,0147	62,5	625,0	22664,2	23289,2
3	С устройством АРР	0,0181	77,0	770,0	24995,8	25765,8
4	Оптимизированное соотношение АРР и разгрузочных коллекторов	0,0161	68,5	685,0	22365,8	23050,8

Проведённые расчёты и результаты, представленные в таблице 1, показали, что с позиции надёжности оптимальным является вариант 2, поскольку за год на поверхность земли будет попадать наименьшее количество неочищенных сточных вод 62,5 м³/год, но по затратам за жизненный цикл будет выгодным четвёртый вариант, хотя он менее надёжный.

Приведённая методика может быть использована для других городов, имеющих отличия по тарифам на электроэнергию, глубине залегания трубопроводов, и для них могут быть построены аналогичные (8), (9) зависимости.

Самотечные трубопроводы канализации проектируются с учётом максимального расхода при наполнении не более 0,7, поэтому в трубопроводе всегда будет свободная ёмкость. Если произошла закупорка и отключение участка на период устранения аварии, то до момента выхода стоков на поверхность земли из канализационных люков будет происходить заполнение свободного пространства коллекторов и колодцев, расположенных выше по течению сочной жидкости. Характерно, что излив будет происходить из люков

колодцев, имеющих наиболее низкие горизонтальные отметки. Именно эти отметки люков, а также отметки выпусков от абонентов будут определять аккумулирующий потенциал.

Определение расчётной ёмкости. Для её оценки в работе предложено использовать гистограммы фактических расходов, фиксируемых по КНС и для безнапорных участков сети, вероятные графики транспортирования стоков.

В отношении абонентов в правилах холодного водоснабжения и водоотведения (Постановление правительства РФ №354 от 06.05.2011) установлены нормы отключения потребителей на 4 часа и не более 8 часов в течении одного месяца. Таким образом, за один год допускается отключение на 96 часов из 8760 часов (вероятность обеспечения составляет 0,99).

Принимая расчётное время ликвидации аварии, например, 4 часа, необходимо определить время возникновения этого события, при котором будет необходима максимальная ёмкость для аккумулирования. Определение этого времени выглядит следующим образом: если возникновение аварии происходит в 0 часов, то необходимая ёмкость будет равна суммарному количеству часовых расходов, поступающих в приёмное отделение КНС в период с 0 до 4 часов. Принимая во внимание значения начала аварийной ситуации от 1, 2, ..., 24 часа, можно определить для любого случая требуемую аккумулирующую ёмкость и в качестве расчётной следует принимать максимальную.

Методика определения расчётной ёмкости основана на проведении гидравлических расчётов самотечных трубопроводов рассматриваемого бассейна водоотведения и определения для каждого участка значений наполнения. Следующим этапом, по профилю канализационной сети вычисляется их аккумулирующая способность. Если полученные значение будут больше, чем требуемая ёмкость для 4-х часового перерыва, то следует считать, что участок самотечных трубопроводов располагает необходимым аккумулирующим потенциалом и на время ликвидации аварийной ситуации обеспечит зарегулирование аварийных стоков без ущерба для экологии. Если по результатам расчётов ёмкости будет недостаточно, то необходимы дополнительные мероприятия по резервированию системы водоотведения. В качестве технических мероприятий предлагается установить в смотровых колодцах блокирующие крышки колодцев устройства (типа обратных клапанов), что переведёт самотечную систему в напорный режим и позволит увеличить её аккумулирующую способность. В работе исследована эффективность таких клапанов.

На рисунке 3 для ГКНС-18а г. Иркутска представлена схема водоотведения мкр. Ново-Ленино, где красными штрихами выделены зоны подпора сети в случае закрытия шибера на КНС 18а. При этом алгоритм расчёта аккумулирующей ёмкости сети будет следующим: определяется смотровой колодец с наименьшей геодезической отметкой

(например, КК-1) и относительно этой отметки проводится горизонталь до точек возможного подпора.

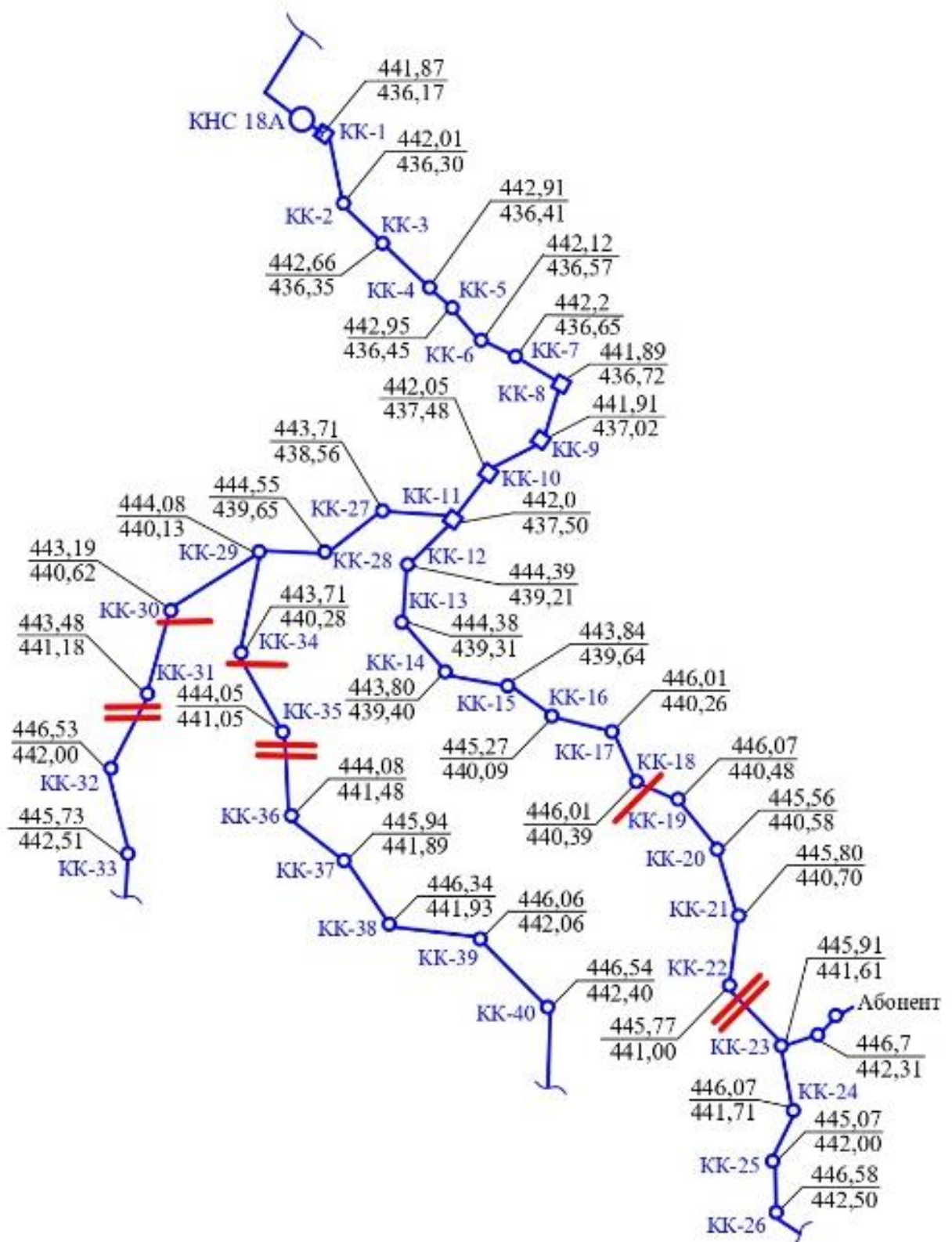


Рис. 3 – Схема самотечных трубопроводов системы водоотведения, с указанием отметок поверхности люка колодца и лотка трубопровода

На рисунке 4 а, б показана такая горизонталь, на основании которой и вычисляется объем заполненных коллекторов и колодцев.

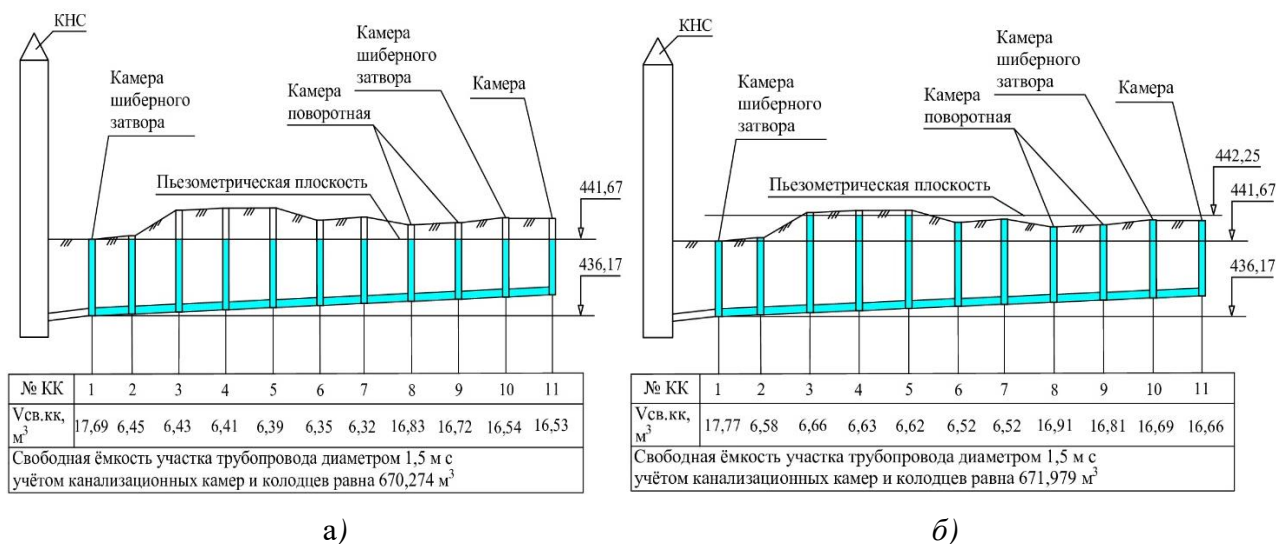


Рис. 4 а, б – Продольный профиль системы водоотведения с указанием отметок поверхности люка колодца и лотка трубопровода

Для данного случая этот объем составил 1384,8 м³. Однако при устранении аварийной ситуации на ГКНС-18а необходимо аккумулировать объем сточной воды в количестве 4250,0 м³. При этом аккумулирующего потенциала существующей канализационной сети в 1384,8 м³ хватит всего на 2 часа времени ликвидации аварии.

Эксплуатирующее предприятие может руководствоваться этими данными и организовывать восстановительные работы (если это возможно), но не превышающие 2-х часов.

Однако, если в первом колодце и далее по высоте в последующих (до колодцев – абонентов) смонтировать блокирующие устройства (например, в колодцах 1-11), то они «заблокируют» выходы сточной жидкости на рельеф и тем самым в значительной степени увеличат аккумулирующую способность сети (в данном случае до величины 1795,54 м³ (рис. 3 в), которая уже обеспечит время ликвидации аварии почти 3 часа. Очевидно, и этой аккумулирующей ёмкости недостаточно будет для ликвидации аварийной ситуации на ГКНС-18а. Требуется устройство АРР, но уже на объем 2464,0 м³.

Следует отметить, что на любом участке канализационной сети может произойти засорение и его закупорка. В этом случае предлагается определить свободную ёмкость сети, расположенную выше по течению сточных вод, и решить обратную задачу, сколько времени будет необходимо на ликвидацию аварии на этом участке.

Следует обратить внимание на то, что засорение трубопровода по различным причинам может произойти на любом участке канализационной сети и вызвать его закупорку. В таких случаях рекомендуется вычислять свободную ёмкость канализационной сети выше по течению сточных вод и решить обратную задачу, сколько времени потребуется на устранение аварии на этом участке. То есть определять рабочий регламент для аварийных служб. Данные расчёты можно выполнить для каждого участка самотечной сети.

В третьей главе рассмотрены варианты резервирования системы водоотведения и предложена методика оценки повышения надёжности за счёт комплексных мероприятий временного и структурного резервирования.

Альтернативным к устройству АРР (временное резервирование) является способ структурного резервирования с организацией параллельной прокладки разгрузочных коллекторов (рис. 5 а и 5 б), кольцующих сетей и трубопроводов для транспортировки стоков в другие районы водоотведения (рис. 5 в, г).

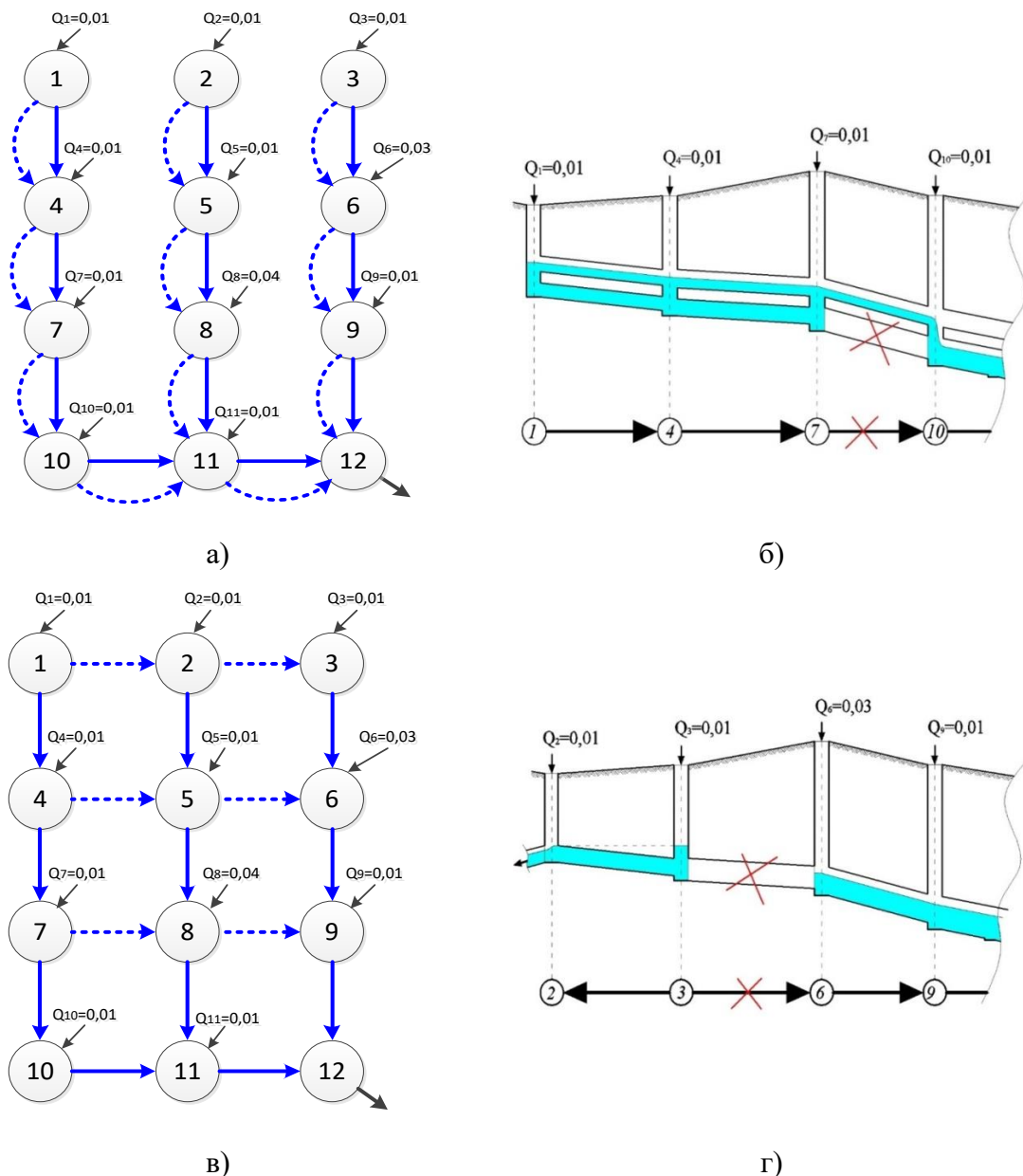


Рис. 5 – Схемы резервирования системы водоотведения: Q_i – величины стоков, поступающих от абонентов в систему водоотведения, в $\text{м}^3/\text{с}$

Например, при аварии на коллекторе 7-10 (рис. 5 б) произойдёт повышение уровня стоков, и они будут перемещаться по верхним коллекторам. Для кольцевых структур, например, при аварии на коллекторе 3 – 6 (рис. 5 г), так же произойдёт повышение уровня

сточных вод, и они будут транспортироваться по коллектору 2 – 3 в противоположном направлении.

С позиции стоимости за жизненный цикл системы несложно обосновать какой из видов резервирования будет экономически выгодным: устройство АРР либо параллельная прокладка самотечных коллекторов по схеме рис. 5 б, г. Для этого также можно воспользоваться условиями (8), (9). Если эти условия будут выполняться, то устраиваются АРР, если не выполняются, то прокладываются параллельные или разгрузочные коллектора. На рисунке 6 представлена аккумулирующая способность сети водоотведения мкр. Ново-Ленино.

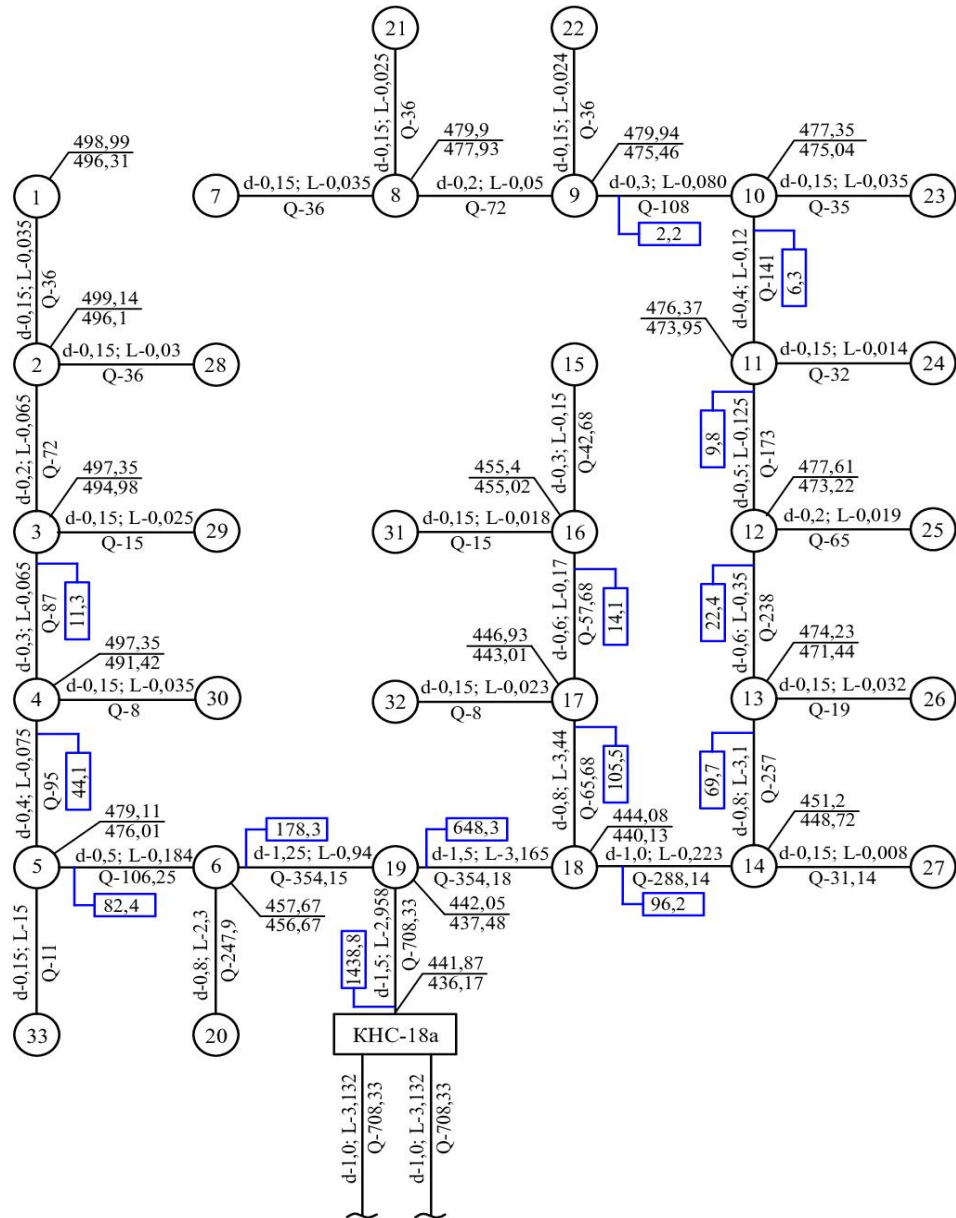


Рис. 6 – Расчётная схема аккумулирующей способности сети водоотведения мкр. Ново-Ленино

Рисунок 7 отображает оптимальный по критерию стоимости жизненного цикла вариант резервирования сети водоотведения мкр. Ново-Ленино, для которого требуется устройство пяти АРР, четырёх безнапорных коллекторов в одну нитку, одного напорного трубопровода от КНС18а и 25 безнапорных трубопровода в две нитки.

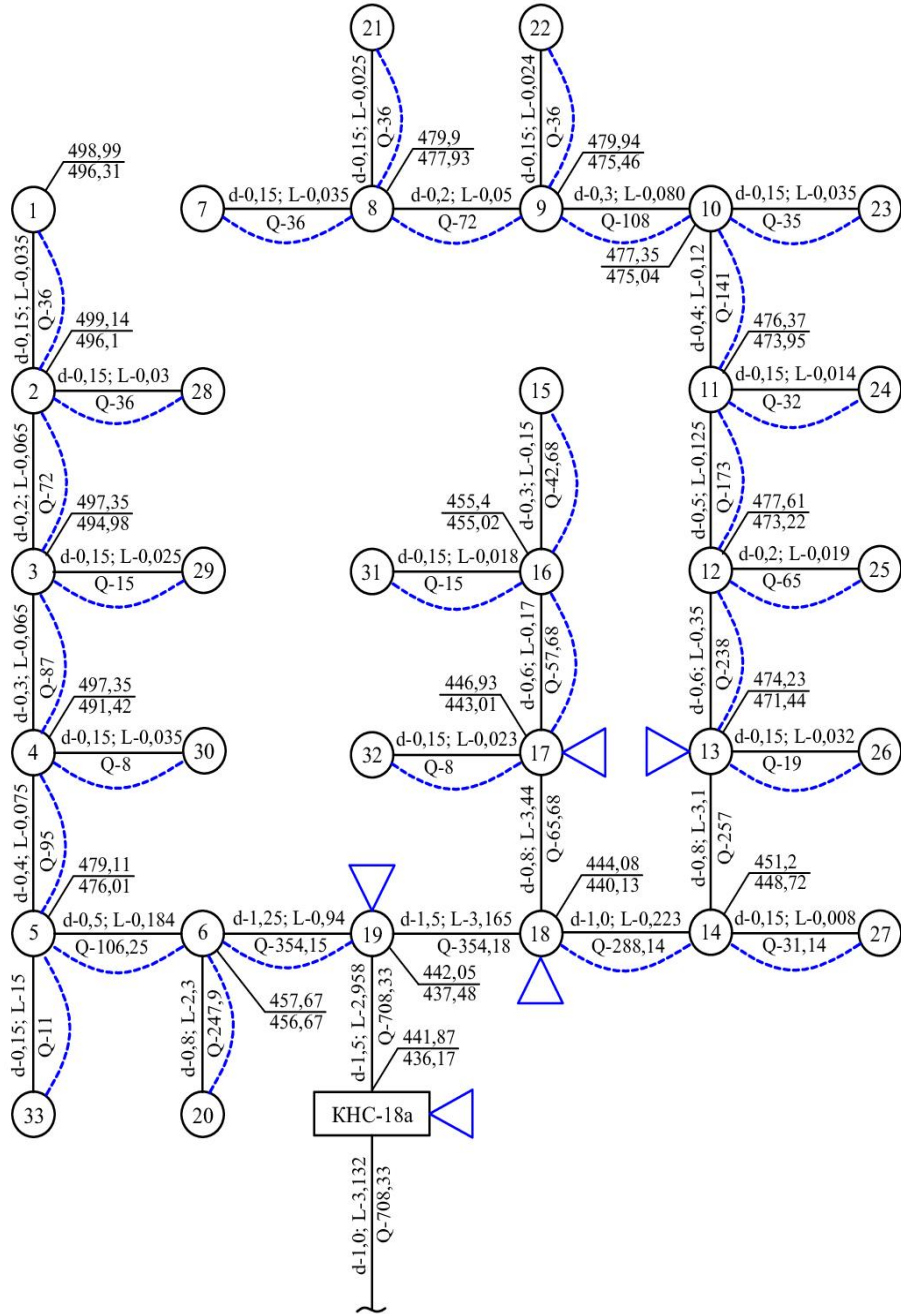


Рис. 7 – Обоснование схемы резервирования сети водоотведения м-района Ново-Ленино

Для оценки надежности вариантов резервирования систем водоотведения в работе используется количественный показатель и методика эквивалентирования, предложенная профессорами М.И. Алексеевым и Ю.А. Ермолиным. При этом показатель надёжности - относительное количество сточных вод, которое без очистки может попадать на поверхность земли за год, вычисляется следующим образом:

$$\varphi = \frac{\Delta Q_{\text{сбр}}}{Q}, \text{ где } Q = (\sum_{j=1}^m Q_j \cdot t), \Delta Q_{\text{сбр}} = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{\lambda_{\text{ЭКВ}} + \mu} \cdot \sum_{j=1}^m Q_j \cdot t, \quad (10)$$

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot q_1 + (\lambda_2 + \lambda_3) \cdot q_2}{q_1 + q_2}, \quad (11)$$

$$\lambda_{\text{Эпр}} = -\ln((1 + \lambda_1 \cdot t) \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t}) / t, \quad (12)$$

$$\lambda_{\text{ЭApp}} = -\ln((1 - (1 - e^{-\lambda_1 \cdot t})(1 - e^{-\lambda_{\text{app}} \cdot t})) / t, \quad (13)$$

где уравнения (10) – критерии оценки надёжности, (11) – формула вычисления эквивалентной интенсивности отказов Y – образных элементов системы водоотведения, (12) – вычисление эквивалентной интенсивности отказов для параллельных участков холодного резервирования, (13) – вычисление эквивалентной интенсивности отказов для временного резервирования участка сети за счёт устройства АРР, $\Delta Q_{\text{сбр}}$ – объем неочищенных стоков (м^3), поступающих на поверхность земли и в водоёмы за время t (например, за год); Q – прогнозируемый годовой объем сточной жидкости (м^3), поступающий в канализационную сеть за то же самое время; q_j – расчётный расход стоков (м^3), /с), отводимых от абонента j , ($j=1, \dots, m$); m – количество абонентов; λ_1 – интенсивность отказов участков сети: $\lambda_{\text{экв}}$, – эквивалентная интенсивность отказов общего участка, заменяющего всю сеть водоотведения, (1/год); $\lambda_{\text{эпр}}$ – интенсивность отказов двух параллельных участков системы водоотведения, при их холодном резервировании; $\mu = \mu_i^{\text{уч}} = \frac{8760}{T_i^p}$ – интенсивность восстановлений обобщённого участка сети (канала); T^p – среднее время восстановления аварийного участка сети, час.

Проведённые исследования по статистике аварий в системах водоотведения гг. Иркутск, Ангарск, Шелехов Иркутской области показали (диссертация Мороз М. В.: «Совершенствование структуры и параметров районных систем водоотведения при их развитии и реконструкции»), что интенсивность отказов (количество отказов на 1 км длины трубопровода в год) определяется по формуле: $\lambda = 3 \cdot S^{\frac{3}{2}} \cdot D^{-\frac{2}{3}} / (1 + \frac{a}{30})$, (14)

где: λ – интенсивность отказов (количество отказов на 1 км протяжённости трубопровода в год), S – средняя сейсмическая балльность региона (принимаются по шкале MSK-64), D – диаметр трубопровода, мм. a – угол наклона направления сейсмического воздействия по отношению к ориентации трубопроводного участка сети в градусах.

Используя методику эквивалентирования, сеть водоотведения формируется в виде графа, включающего Y – образные элементы. На рисунке 5 а для системы водоотведения мкр. Ново-Ленино такая схема представлена. Согласно методике эквивалентирования, начиная с висячих вершин в направлении к корню дерева, каждый Y -образный элемент замещается одной дугой с эквивалентной интенсивностью отказов, вычисляемой согласно (11). Для схемы рис. 5, а $\lambda_{\text{экв}} = 0,2577$, $T^p = 6$ час, $\mu = 1460$, $Q = 6205000 \text{ м}^3/\text{год}$,

$\Delta Q_{\text{сбр}} = 1095,23 \text{ м}^3/\text{год}$. Используя формулы вычисления (12), (13) и (14) и, применяя алгоритм эквивалентирования для схемы системы водоотведения, представленной на рис. 5 а, б получены следующие результаты: $\lambda_{\text{экв}} = 0,0161$, $\Delta Q_{\text{сбр}} = 68,427 \text{ м}^3/\text{год}$. За счет временного резервирования с помощью АРР и холодного резервирования самотечных коллекторов надёжность системы водоотведения мкр. Ново-Ленино увеличилась в 17 раз. При этом СЖЦ составит 22365,8 млн. руб.

В четвертой главе приводятся результаты исследований по разработке новых конструктивных и технологических схем аварийно-регулирующего резервуара. Излагаются особенности и функциональные возможности новых конструкций АРР.

Отличительной особенностью предлагаемой конструкции является горизонтальное расположение цилиндрических ёмкостей, окружность которых вписывается в горизонтальные отметки рабочего уровня стоков в безнапорном коллекторе и в приёмном резервуаре КНС, что позволяет наполнять АРР на 100 %, и сооружать его закрытым способом.

На рисунке 8 представлено технологическое решение новой конструкции АРР, позволяющее реализовывать функцию наполнения и опорожнения резервуара без дополнительного насосного оборудования.

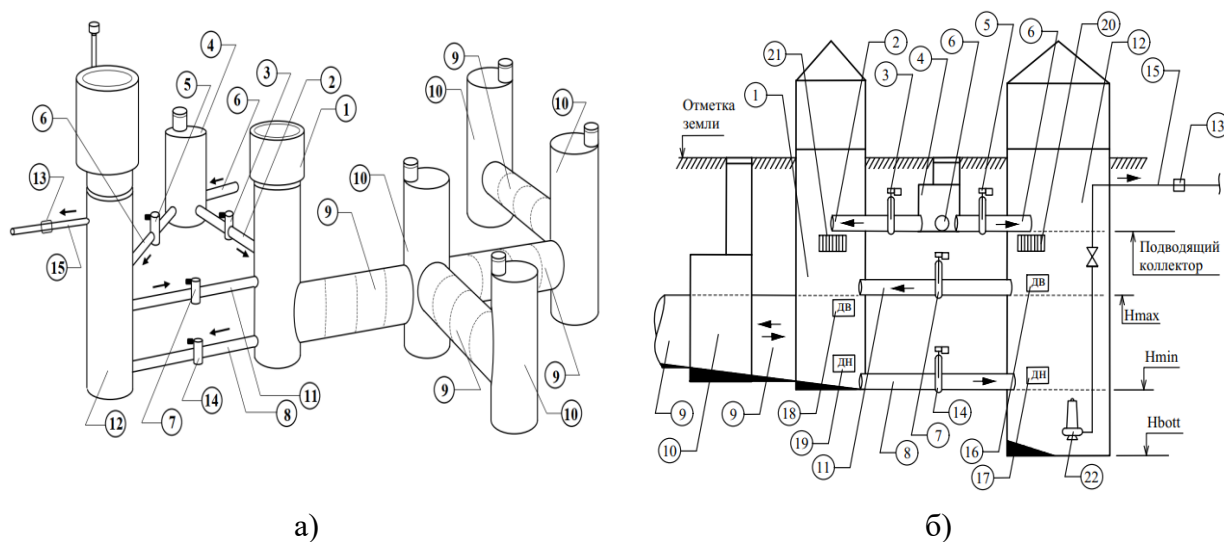


Рис. 8 – Аварийно-регулирующий резервуар: а) общий вид, б) высотная схема, где: 1 – приёмная камера АРР; 2 – обводной самотечный трубопровод; 3 – запорная арматура обводного самотечного трубопровода; 4 – камера переключения потока; 5 – запорная арматура подводящего самотечного коллектора; 6 – подводящий самотечный коллектор; 7 – запорная арматура перепускного самотечного трубопровода; 8 – сбросной самотечный трубопровод; 9 – горизонтальный накопитель (ГН); 10 – смотровая камера; 11 – перепускной самотечный трубопровод; 12 – канализационная насосная станция; 13 – расходомер; 14 – запорная арматура сбросного самотечного трубопровода; 15 – напорный трубопровод; 16 – датчик максимального уровня в приёмном резервуаре КНС; 17 – датчик минимального уровня в приёмном резервуаре КНС; 18 – датчик максимального уровня в приёмной камере АРР; 19 – датчик минимального уровня в приёмной камере АРР; 20 – решётки КНС; 21 – решётки приёмной камеры; 22 – насосы.

В работе представлены теоретические и практические основы организации строительства и эксплуатации новой конструкции АРР. Разработан метод эффективной балластировки горизонтальных накопителей, позволяющий устраивать их бестраншейным способом и эксплуатировать в неблагоприятных гидрологических условиях с обводнением грунта. Предложена новая методика расчёта балластной камеры.

Результаты диссертационных исследований рассмотрены на Техническом совете в МУП «Водоканал» Иркутск 29 декабря 2021 г. и принято решения включить их в схему развития систем водоснабжения и водоотведения г. Иркутска на период 2025-2035 гг., а также включить их в инвестиционную программу МУП «Водоканал» г. Иркутск.

Заключение

Проведённый анализ технического состояния ЦСВ подтвердил необходимость в разработке и обосновании мероприятий, предотвращающих попадание канализационных стоков на поверхность земли за счёт использования методов оптимального резервирования, в том числе аккумулирующей способности самотечных сетей, параллельной прокладки дополнительных коллекторов, организации кольцующих и разгрузочных трубопроводов и устройства аварийно-регулирующих резервуаров.

1. Проведены технико-экономические расчёты, на основании которых получены диапазоны эффективности применения различных вариантов резервирования и предотвращения разлива неочищенных стоков на поверхность земли.

2. Получены зависимости эффективности применения АРР, структурного резервирования напорными и безнапорными трубопроводами при КНС и на любом участке сети водоотведения.

3. Разработана методика расчёта аварийных объёмов сточных вод при выходе из строя канализационных насосных станциях, напорных трубопроводов и безнапорных коллекторов.

4. Разработана методика определения аккумулирующей способности безнапорных коллекторов системы водоотведения и обосновано допустимое время на восстановление аварийных участков сети.

5. С целью минимизации количества сточных вод, которые при аварии попадают без очистки на поверхность земли за временной интервал (год), разработана методика оценки и повышения надёжности системы водоотведения.

6. На основе новых систем гидросмыва осадка с применением диспергирующих аппаратов и системы балластирования разработана новая конструкция аварийно-регулирующего резервуара.

7. Показана экономическая эффективность строительства и эксплуатации новой конструкции АРР, которая по стоимости жизненного цикла на 40% меньше существующих конструкций, а надёжность ЦСВ при этом увеличивается в разы.

8. Результаты исследований внедрены в проект реконструкции ГКНС №18 в МУП «Водоканал» города Иркутска в Ленинском административном округе.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

1. Требуется системный подход в организации получения и обработки фактических данных по интенсивностям отказов и восстановительных мероприятиях на самотечных коллекторах и напорных трубопроводах системы водоотведения г. Иркутска, в том числе и АРР.

2. Совершенствование рабочих параметров разработанной конструкции АРР.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в ВАК:

1. Skibo D.V., Sudnikov V.G. Study of the effectiveness of internal and exterior water disposal systems of microdistrict "berezoviy" of the city of Irkutsk // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2017. – Т. 7. № 3 (22). – С. 71-76.

2. Скибо Д.В., Толстой М.Ю. Механическая очистка сточных вод на канализационных насосных станциях как способ снижения антропогенного воздействия на окружающую среду // *Строительство и техногенная безопасность*. – 2018. – № 10 (62). – С. 117-125.

3. Скибо Д.В., Толстой М.Ю. Исследование проблем в работе канализационной насосной станции микрорайона "Берёзовый" города Иркутска и методы их решения // *Строительство и техногенная безопасность*. – 2018. – № 12 (64). – С. 123-132.

4. Бобер А.А., Чупин Р.В., Скибо Д. В., Дударев В.И. Повышение надежности работы системы водоотведения за счет аккумулирующей способности самотечных коллекторов // *Известия вузов: Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. – 2023. – Т. 7. № 3. – Ст.213-226.

Публикации в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе Scopus:

5. Skibo D., Sudnikovich V., Tolstoy M. Technical innovations as a means of increasing the efficiency of technological equipment in modern production conditions // *MATEC Web of Conferences*, 2018, 212, 01014

6. Skibo D.V., Tolstoy M.Y., Chizhik K.I. Automated damping tank of sewage pumping stations. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 687(4), 044030.

7. Timofeeva S.S., Skibo D.V. Working conditions of housing and communal services system and innovative technology to minimize occupational hazards for plumbers of emergency repair services. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety - 6. Analysis, Assessment and Technologies of Natural and Man-Made Disasters Reduction*. 2019. 687(6), 066005.

8. Skibo D.V., Kunitsyn A.G. Device to perform primary damper tank wastewater treatment at sewage pumping stations. static calculation. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 880(1), 012054.

9. Skibo D.V., Kunitsyn A.G., Chupin V.R. Analysis of the wastewater treatment device for the damper tank of sewage pumping stations. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 751(1), 012124.

Статьи в других научных изданиях:

10. Скибо Д. В., Чупин В. Р., Огнёв И. А. Повышение экологической безопасности систем водоотведения на основе аварийно-регулирующего резервуара // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2022. – №7. – С. 43-51. Журнал является рецензируемым научным изданием, входящим в международные реферативные базы данных и системы цитирования (GeoRef, Chemical Abstracts Service, Speleological Abstracts)

11. Чупин В. Р., Скибо Д. В. Обоснование эффективности устройства аварийно-регулирующих резервуаров при канализационных насосных станциях // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2023. – № 6. – С.48-55. Журнал является рецензируемым научным изданием, входящим в международные реферативные базы данных и системы цитирования (GeoRef, Chemical Abstracts Service, Speleological Abstracts)

12. Скибо Д.В., Пельменёва Н.Д. Методы теледиагностики как способ повышения надёжности водоотводящих сетей // *Молодёжный вестник ИрГТУ*. 2016. – № 4. – С. 33.

13. Скибо Д.В., Толстой М.Ю. Инновационные решения в реализации процесса грубой очистки сточных вод на канализационных насосных станциях // В сборнике: *Качество*

городской среды: строительство, архитектура и дизайн. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2017. – С. 310-313.

14. Толстой М.Ю., Туник А.А., Леонтьев А.В., Попов В.С., Попова Е.М., Тангатов Т.П., Скибо Д.В. Оценка технологического процесса очистки сточных вод с анализами проб на разных стадиях очистки кос левого берега г. Иркутска. // В сборнике: Ресурсосберегающие технологии в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2018. – С. 128-133.

15. Скибо Д.В., Толстой М.Ю., Чижик К.И. Автоматизированный демпферный резервуар канализационных насосных станций. // В сборнике: Яковлевские чтения. Сборник докладов XIV Международной научно-технической конференции, посвящённой памяти академика РАН С.В. Яковлева и 90-летию со дня создания факультета "ВиВ". 2019. – С. 163-176.

Патенты и свидетельства:

16. Патент на полезную модель № 173247 МПК E03F 9/00 (2006.01). Устройство для опоры и контроля направления движения рукава высокого давления канализационных каналопромывочных машин: № 2017102152: заявл. 23.01.2017: опубл. 17.08.2017 / Скибо Д.В., Толстой М.Ю.; заявитель ФГБОУ ВО "ИРНИТУ". – 8 с.: ил. – Текст: непосредственный.

17. Патент на полезную модель № 179790 МПК E03F 5/14 (2006.01). Устройство для осуществления грубой очистки сточных вод от крупнодисперсных примесей на канализационных насосных станциях: № 2017137894: заявл. 30.10.2017: опубл. 24.05.2018 / Скибо Д.В., Судникович В.Г., Толстой М.Ю., Куртин А.В.; заявитель ФГБОУ ВО "ИРНИТУ". – 10 с: ил. – Текст: непосредственный.

18. Патент на полезную модель № 186682 МПК E03F 5/10 (2006.01). Автоматизированный демпферный резервуар канализационных насосных станций: № 2018139821: заявл. 13.11.2018: опубл. 29.01.2019 / Скибо Д.В., Толстой М.Ю.; заявитель ФГБОУ ВО "ИРНИТУ". – 18 с.: ил. – Текст: непосредственный.

19. Патент на изобретение № 2707342 МПК C02F 1/00 (2006.01), E03F 5/14 (2006.01), B01D 29/96 (2006.01). Способ очистки сточных вод от грубодисперсных примесей: № 2018130642: заявл. 24.08.2018: опубл. 26.11.2019 / Скибо Д.В., Толстой М.Ю., Василевич Э.Э., Куртин А.В.; заявитель ФГБОУ ВО "ИРНИТУ". – 7 с. – Текст: непосредственный.

20. Патент на изобретение № 2735960 МПК E03F 5/00 (2006.01). Комплекс для приёма сточных вод с автоматизированным устройством гидросмыва: № 2020117473: заявл. 27.05.2020: опубл. 11.11.2020 / Скибо Д.В.; заявитель Скибо Д.В. – 51 с.: ил. – Текст: непосредственный.

Подписано в печать 14.02.2024. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Зак. 162. Поз. плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

