

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

На правах рукописи



ЧУПИН Роман Викторович

УДК 628.147: (519.9 +518.5)

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАЗВИТИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ
ВОДООТВЕДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВАРИАТИВНОСТИ
ПЕРСПЕКТИВНОГО ОТВЕДЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД**

Специальность 05.23.04 - Водоснабжение, канализация, строительные системы
охраны водных ресурсов

**Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,

Примин Олег Григорьевич

Иркутск

2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ	14
1.1. Развитие централизованных систем водоотведения в России и в Прибайкалье	14
1.2. Развитие методологии проектирования и формирования систем водоотведения (СВО).....	18
1.3. Оценка существующих технологий и методов оптимизации СВО	21
1.4. Оценка уровня развития методов и моделей гидравлического расчета систем водоотведения.....	23
1.5. Развитие методологии проектирования систем водоотведения в зарубежных странах.....	25
1.6. Направление развития систем водоотведения и совершенствование методологии их проектирования	27
1.7. Классификация и оценка последовательности решения задач управления развитием систем водоотведения	29
1.8. Содержательная постановка комплексной оптимизации развивающихся и реконструируемых СВО	34
1.9. Задачи оптимизации схемы водоотведения и их роль в развитии города	35
ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ.....	43
2.1. Исследование и моделирование процесса поступления стоков в системы водоотведения.....	43
2.2. Получение и представление фактических характеристик водоотведения ...	47

2.3. Учет неравномерности поступления стоков и времени их транспортировки в задачах моделирования и оптимизации СВО	50
2.4. Учет неопределенности водопотребления и водоотведения в задачах обоснования перспективных схем развития систем водоотведения	51
2.5. Расчет и моделирование установившегося движения сточных вод	54
2.6. Работа самотечных коллекторов в напорном режиме.....	56
2.7. Расчет системы водоотведения в случае обратных уклонов.....	57
2.8. Формирование математической модели гидравлической цепи системы водоотведения.....	59
2.9. Моделирование и расчет ливневой канализации	72
2.10. Обнаружение и локализация аварийных ситуаций	77
2.11. Устройство разгрузочных и кольцующих коллекторов	81
2.12. Моделирование подтопления территории и движения стоков по улицам города	86
ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ.....	89
3.1. Развитие методологии оптимизации реконструируемых систем водоотведения.....	89
3.2. Графическая интерпретация реконструкции систем водоотведения	93
3.3. Новый метод оптимизации реконструируемых и развивающихся систем водоотведения.....	94
3.4. Модели и методы оптимизации развивающихся систем водоотведения ...	107
3.5. Обоснование схемы водоотведения центральной зоны о. Байкал.....	125
ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ.....	131
4.1. Методические основы повышения надежности развивающихся систем водоотведения.....	131

4.2. Повышения надежности реконструируемых систем водоотведения	137
4.3. Повышение надежности за счет кольцевых систем водоотведения.....	141
4.4. Оптимизация параметров и мест установки перекачивающих насосных станций и шибберных устройств для повышения управляемости системы водоотведения.....	143
ГЛАВА 5. КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ	147
5.1. Оптимизация СВО древовидной структуры	147
5.2. Схемно- структурная и схемно-параметрическая оптимизация СВО.....	159
5.3. Оптимизация СВО кольцевой структуры.....	168
ГЛАВА 6. ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ	175
6.1. Агрегирование и декомпозиция в задачах трассировки развивающихся систем водоотведения.....	175
6.2. Комплексная оптимизация магистральных, уличных и дворовых систем сбора и отведения сточных вод	179
6.3. Учет динамики развития систем водоотведения при обосновании их структуры и параметров	186
ГЛАВА 7. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ НА РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ .	201
7.1. Описание программного комплекса TRACE-VK	201
7.2. Г. Ангарск. Обоснование перспективной схемы водоотведения.....	209
7.3. Г. Байкальск. Оптимизация схемы водоотведения.....	220
7.4. Г. Шелехов. Оптимизация схемы водоотведения.....	224
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	228
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	231
ПРИЛОЖЕНИЯ 1	254

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Переход к рыночной экономике, реформирование ЖКХ в условиях значительного износа инженерных коммуникаций, отсутствие достаточных материальных ресурсов на их реновацию значительно обострили проблемы надежности и экологической безопасности систем водоотведения городов и населенных мест России. В этих условиях оптимальный путь – четкое понимание проблем с водоснабжением и водоотведением, совершенствование нормативной базы и механизмов финансирования, разработка оптимальных схем их развития и модернизации, с учетом факторов надежности и экологической безопасности.

Для реализации такой стратегии и определения долгосрочной перспективы развития систем водоснабжения и водоотведения городов и населенных мест России, утверждены ряд основополагающих законов и десятки постановлений. Декларируемая в этих документах государственная политика в сфере водоснабжения и водоотведения включает формирование перспективных схем и их реализацию через инвестиционные программы предприятий коммунального комплекса.

Перспективная схема разрабатывается на срок не менее 10 лет, а инвестиционная программа на срок не менее 3 лет, и эти документы могут ежегодно корректироваться. При этом инвестиционная программа является инструментом для определения объемов финансирования строительства и реконструкции систем водоотведения за счет формирования тарифа на подключения новых абонентов, привлечения государственных вложений и других источников финансирования. Специфика такого финансирования состоит в том, что инвестиции генерируются самим проектом (проектное финансирование).

Современные системы водоотведения (СВО) отличаются значительной аварийностью. Всю чаще наблюдается режимы выхода сточных вод на поверхность земли и попадание их в водоемы. Поэтому вопросы повышения надежности, экологической безопасности и режимной управляемости систем водоотведения при их развитии и реконструкции в условиях вариативности перспективного

отведения сточных вод, снижения водопотребления становятся актуальными и требуют их учета при обосновании параметров и моделей развития перспективных схем систем водоотведения, что является главной целью диссертации.

Степень разработанности исследования. Вопросам развития и реконструкции систем водоотведения посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов. Большой вклад в это направление внесли: С.В. Яковлев, В.С. Дикаревский, Н.Ф. Федоров, Н.У. Койда, О.Г. Примин, Е.И. Пупырев, М.И. Алексеев, Ю.А. Ермолин, В.М. Васильев, В.И. Щербаков, В.В. Найденко, В.С. Игнатчик, С.Ю. Ильина, В.А. Орлов, В.И. Калицун, Е.М. Гальперин, Ф.В. Кармазинов, И.А. Абрамович, Башару Таофик, М. Роман, Г. Донд, А.И. Грей и др. Многие работы этих авторов являются пионерными и посвящены исследованиям закономерностей движения сточной жидкости, решению отдельных задач расчета и обоснования параметров ливневой, бытовой и промышленной канализации. Однако большинство из них выполнены во второй половине прошлого столетия и ориентированы на ручной расчет и централизованную систему управления развитием систем водоотведения, не учитывают современные принципы формирования инвестиций, неопределенность перспективного водопотребления и водоотведения, сложившуюся тенденцию к значительному снижению водопотребления, требования создания электронных моделей при разработке вариантов их развития и реконструкции. Недостаточно проработаны вопросы оценки и повышения надежности, сейсмостойкости, режимной управляемости, динамики развития, отсутствуют методы оптимизации проектных решений с учетом требований к рациональному распределению выделяемых инвестиций в строительство новых и реконструкцию существующих систем водоотведения с учетом их жизненного цикла. Следует отметить, что все методы расчета систем водоснабжения и водоотведения, разработанные в прошлом столетии, предусматривали, что удельные объемы водопотребления и водоотведения являются неизменными и определяются только степенью благоустройства.

Однако в последние годы произошло значительное снижение общего и удельного объемов водопотребления в городах России, что привело к корректировке этих значений в СП 31.13330.2012 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» до 195-220 л/чел в сутки.

Очевидно, разработанные в прошлом столетии основы расчета систем водоснабжения и водоотведения не соответствуют требованиям времени. Таким образом, актуальна **научная проблема - совершенствование и разработка новых моделей и методов развития и реконструкции систем водоотведения в условиях снижения водопотребления в большинстве городов и населенных мест России**, решение которой имеет важное социально-экономическое и хозяйственное значение для страны. Сформулированная научная проблема логически вытекает из актуальности и степени научной разработанности темы и соответствует потребности на нормативном и законодательном уровне в новых методах и моделях развития и реконструкции систем водоотведения.

Объектом исследования являются системы водоотведения населенных мест и городов. **Предметом исследования** – модели и методы развития и реконструкции систем водоотведения в условиях вариативности перспективного отведения сточных вод

Целью исследований является разработка теоретических основ и *практическая реализация новых моделей и методов расчёта и проектирования* перспективных схем развития систем водоотведения крупных населенных пунктов, направленных на повышение экономичности, надежности и экологической безопасности отведения и очистки сточных вод.

Задачи исследования. Поставленная цель направлена на разработку теоретических и практических основ и методов оптимизации многоуровневых, развивающихся систем водоотведения и реализуется путем решения следующих взаимосвязанных задач:

1. Анализ существующей методологии проектирования систем водоотведения, обоснование необходимости её развития в условиях вариативности

перспективного отведения сточных вод и различных режимов их транспортирования.

2. Совершенствование методологии гидравлического расчета СВО для напорно-безнапорного движения сточных вод, возникающего в связи с превышением расчётных расходов на участках водоотводящих сетей разветвлённых и многоконтурных структур.

3. Совершенствование методов оптимизации проектных решений систем водоотведения для долгосрочных и краткосрочных периодов их реконструкции и развития, отличающихся от известных методов учетом:

- технико-экономических рисков от принимаемых решений;
- фактора надёжности работы СВО;
- вероятности возникновения аварийных ситуаций;
- жизненного цикла проектируемых сооружений системы водоотведения.

4. Оценка возможности и обоснование эффективности применения разгрузочных, кольцующих самотечных, а также напорных коллекторов и трубопроводов, обеспечивающих повышение пропускной способности СВО.

5. Получение математических зависимостей, позволяющих произвести оценку капитальных и эксплуатационных затрат при различных режимах работы разветвлённых и многоконтурных СВО.

6. Разработка программного комплекса, реализующего новые методологические подходы к расчётам водоотводящих сетей населённых пунктов с учётом перспектив их развития.

7. Определение расчётного технико-экономического эффекта от применения разработанных методик и программ при проектировании развивающихся и реконструируемых СВО населённых пунктов РФ.

В процессе исследований получены **новые научные результаты**, определяющие **научную новизну** диссертационной работы:

1. Разработаны новые методы и модели развития и реконструкции систем водоотведения, которые основываются на использовании информационных технологий и отличаются от существующих учетом проектного финансирования,

вариативностью перспективного водоотведения сточных вод, оценкой технико-экономических рисков от принимаемых решений, оптимальностью распределения инвестиций в строительство новых и реконструкцию существующих сетей и сооружений.

2. Предложен и реализован на практике новый подход к расчету потокораспределения в канализационных сетях, отличающийся учетом напорно-безнапорных режимов движения жидкости в трубопроводах и коллекторах.

3. Впервые в задачах оптимизации развития и реконструкции систем водоотведения предложены и исследованы методы повышения их режимной управляемости, надежности и сейсмостойкости на основе оценки технико-экономических и гидравлических параметров кольцевых напорных и безнапорных трубопроводов.

4. Разработана новая методика оптимизации параметров и функционирования многоуровневых систем водоотведения, отличающаяся тем, что в комплексе учитывает технико-экономические и гидравлические параметры всех уровней сбора и транспортировки сточных вод.

5. Получены новые математические зависимости: изменения капиталовложений и издержек эксплуатации от гидравлических параметров трубопроводов самотечной канализации; объемов сточных вод, выходящих на поверхность земли в результате аварийных ситуаций, от расхода сточной жидкости, транспортируемой по участкам самотечных коллекторов.

6. Впервые в задачах моделирования развития и реконструкции систем водоотведения для обоснования вариантов развития, анализа и оптимизации использована теория принятия решений и модели нечетких множеств и учтён фактор неопределенности информации о прогнозных величинах удельного водопотребления.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Теоретически обоснованы новые модели и методики реконструкции и развития систем водоотведения, отличающиеся учетом финансирования инвестиционных проектов, в условиях вариативности перспективного

водоотведения сточных вод, технико-экономических рисков и жизненного цикла системы, с учетом сейсмического районирования.

2. Разработанные и исследованные методы учитывают фактор финансирования инвестиционных проектов, вариативность перспективного водоотведения сточных вод, показатели надежности и сейсмостойкости как при строительстве новых, так и при реконструкции существующих СВО. Применение данных методов на каждом из этапов моделирования развития систем водоотведения позволяет в комплексе оптимизировать проектные решения и существенно повысить их обоснованность и технико-экономическую эффективность.

3. Предложенные подходы к оптимизации режимов работы систем водоотведения позволяют производить оценку не только эффективности и технической реализуемости принимаемых решений развития систем водоотведения, но и анализировать надежность и режимную управляемость существующих сетей и сооружений.

4. Разработанные модели и методы анализа и оптимизации новых и реконструируемых СВО реализованы в ПК TRACE-VK, который доказал свою вычислительную и экономическую эффективность при разработке программ развития СВО городов Иркутской области, что позволило минимизировать объемы инвестиций и оптимально распределить их по этапам развития, в том числе в строительство новых и реконструкцию существующих сетей и сооружений.

Положения, выносимые на защиту.

1. Модели и методы развития и реконструкции систем водоотведения, отличающиеся от существующих учетом системы проектного финансирования, вариативностью перспективного отведения сточных вод, оценкой технико-экономических рисков и учетом жизненного цикла системы, обеспечивающие возможность оценить надежность, управляемость и экологическую безопасность проектируемых и реконструируемых систем водоотведения.

2. Математические модели потокораспределения в разветвленных и кольцевых системах водоотведения, отличающиеся тем, что учитывается их работа

в напорно-безнапорном режимах движения сточных вод и варианты аварийного выхода их на поверхность земли.

3. Математические зависимости: изменения капиталовложений и издержек эксплуатации от гидравлических параметров трубопроводов самотечной канализации - объемов сточных вод, выходящих на поверхность земли в результате аварийных ситуаций, расхода сточной жидкости, транспортируемой по участкам самотечных коллекторов, которые обосновывают выбор метода и результаты оптимизации развития и реконструкции систем водоотведения.

4. Методы оптимизации многоуровневых развивающихся и реконструируемых систем водоотведения.

5. Алгоритм и структура программного комплекса TRACE-VK, который в сравнении с распространяемым в России и за рубежом SWMM5 (и ее модификации), позволяет рассчитывать кольцевые системы, оптимизировать структуру и параметры развивающихся и реконструируемых систем водоотведения с учетом обеспечения их надежности, сейсмостойкости и режимной управляемости.

Достоверность результатов диссертационной работы основывается на сборе и обработке с использованием современных вероятностно-статистических методов и вычислительной техники обширных эксплуатационных данных по функционированию трубопроводных систем, сбора и транспортировки сточных вод ряда городов Сибири и разработке на их основе математических моделей функционирования и управления развитием систем водоотведения, применением апробированных на практике научно-методического аппарата теории и практики надежности сложных инженерных систем массового обслуживания.

Численные эксперименты, широкое внедрение результатов работы, сопоставление расчетных и реальных замеров режимов работы систем водоотведения подтверждают достоверность полученных научных результатов.

Внедрение результатов. Результаты диссертационных исследований использованы при разработке перспективных схем развития систем водоотведения в составе программ комплексного развития инженерной инфраструктуры городов

Иркутск, Ангарск, Шелехов, Байкальск. При этом экономическая эффективность от применения разработанных методик составила 256.81 млн. руб. (в ценах 2019 г.) по сравнению с проектными решениями, полученными традиционными методами проектирования.

Программный комплекс TRACE-VK внедрен в Водоканалах указанных городов, а также в городах: Твери, Тбилиси (Грузия), Эрденэт и Улан-Батор (Монголия), где и используется при автоматизации и диспетчеризации, а также при разработке инвестиционных программ предприятий коммунального комплекса. Теоретические и практические положения диссертации применяются в учебном процессе по дисциплинам: Водоснабжение и водоотведение, «Автоматизация эксплуатации и проектирования городских инженерных систем».

Апробация работы. Основные положения диссертационных исследований обсуждались на 16 конференциях, школах и семинарах: На 9-й Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов «Безопасность-04» (23апреля 2004, Иркутск); На постоянно действующем научном семинаре: «Трубопроводные системы энергетики»: (2004., Минск, Белоруссия), (2010., Ай Петри, Крым, Украина), (2011., п. Кореиз, г. Ялта, АР Крым, Украина), (2012., Москва), (2014., Белокуриха, Алтайский край);(2017., г. Иркутск, Байкал, 2018., г. Иркутск, Байкал); На Международном научном конгрессе: «Энергосбережение и информационные технологии», 2013., г. Евпатория, АР Крым, Украина); На постоянной международной научно-практической конференции: «Ресурсосберегающие технологии в жилищно-коммунальном хозяйстве и строительстве», соответственно, III- 2009., IV- 2011., V – 2013., VI- 2015., Иркутск; На постоянной научно-практической конференции студентов и аспирантов ИрГТУ: « Вода и экология» в 2012., 2013.,2014 гг.; На международной научно-практической конференции «Инновационные системы отведения», Петрозаводск. 12-14 ноября 2014г. На международной научно-технической конференции в онлайн режиме «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» с 21.09-22.09.2017. ИРНИТУ - Южно-уральский Гос. Университет – Дальневосточный Федеральный университет; 2015, 2017 гг., «Яковлевские чтения», 2018 год.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 74 работах, в том числе в 2-х монографиях и в 34 статьях в журналах из перечня ВАК. Опубликовано 9 работ в БД Scopus.

Личное участие автора состоит: в постановке цели и задач диссертации, обобщении и верификации полученных результатов, формулировки основных научных положений, выносимых на защиту, их опубликовании и апробации, в разработке и практической реализации и обоснования моделей и методов расчёта и обоснования перспективных схем развития систем водоотведения, направленных на повышение экономичности, надежности и экологической безопасности отведения и очистки сточных вод; в получении, анализе и обобщении результатов теоретических и модельных исследований и их внедрение в практику проектирования.

Под руководством автора в этом направлении защищена кандидатская диссертация в 2016 г.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ

1.1. Развитие централизованных систем водоотведения в России и в Прибайкалье

Практически во всех городах и населенных пунктах имеются централизованные системы водоотведения, многие из которых представляют сложный, многоуровневый комплекс инженерных сооружений, в который входят:

- самотечные и напорные коллектора и трубопроводы;
- насосные станции с приемными и регулируемыми резервуарами;
- выпускные, смотровые, поворотные, сопрягающие и перепадные колодцы, быстротоки и перепады;
- локальные и централизованные канализационные очистные сооружения (КОС), системы сброса очищенных сточных вод в водоемы и пруды накопители, пруды испарения и выпаривания.

В настоящее время большинство из перечисленных сооружений и трубопроводов имеют износ 70% и выше и характеризуются:

- значительной аварийностью из-за образования засоров, провалов в сводах коллекторов, прогибов в трубопроводах и образования обратных уклонов, разгерметизации стыковых соединений и др.;
- скоростные режимы не отрегулированы, коллектора и трубопроводы загружены не равномерно, имеются случаи выхода сток на поверхность земли;
- при возникновении аварийных ситуаций за время их ликвидации, сточные воды выливаются на поверхность земли, что говорит об очень низкой надежности и экологической безопасности существующих систем водоотведения;
- отсутствуют средства автоматизации и управления перетоками, недостаточное количество шиберных устройств и перекачивающих насосных станций;

- практически отсутствует финансирования на восстановление изношенных сетей и сооружений и на интенсификацию их работы.

В качестве иллюстрации многоуровневых систем на рисунке 1.1 представлена схема системы водоотведения г. Иркутска. Протяженность сетей составляет 717 км, включая 34 канализационных насосных станций (КНС) и 2-ух канализационных очистных сооружений (КОС) правого и левого берега г. Иркутска.

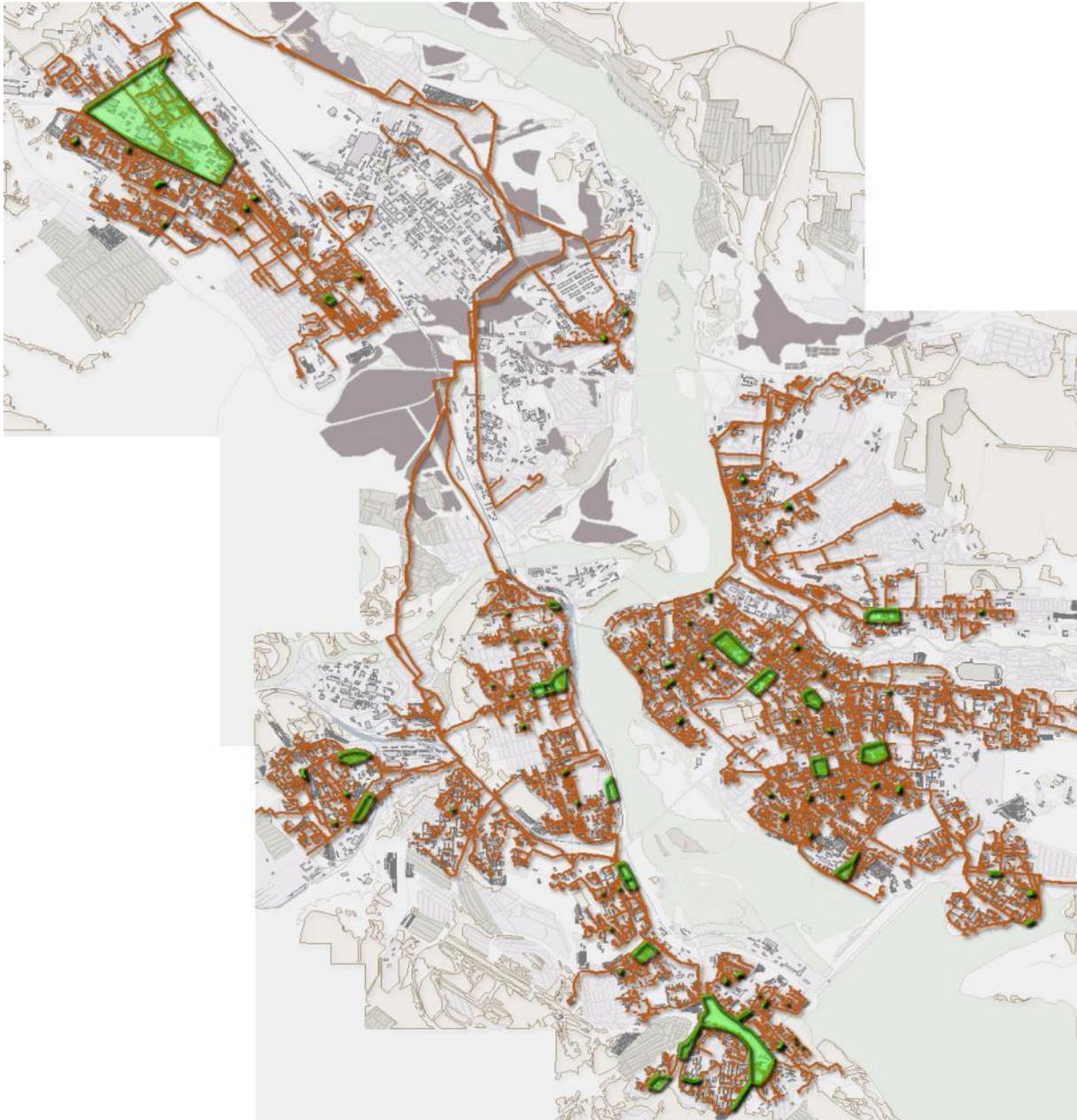


Рисунок 1.1 - СВО г. Иркутска

Имеются следующие проблемы эксплуатации систем водоотведения и очистки сточных вод:

- износ сетей и сооружений составляет 70%;
- напорные трубопроводы имеют износ 100%;
- КОС необходимо заменить на новые с новыми эффективными технологиями очистки стоков;
- многие железобетонные сооружения, коммуникации и оборудование разрушаются, физически и морально устарели;
- отсутствует доочистка от биогенных элементов азота и фосфора;
- стоки от частной коттеджной и дачной застройки сливаются в лес, так как нет специальных приемных станций.

Городская ливневая канализация представлена 56 разрозненных не связанных между собой фрагментов, общей протяженностью 86 км. Эти фрагменты представлены на рис. 1.2, 1.3.



Рисунок 1.2 - Схема ливневой канализации (правый берег)

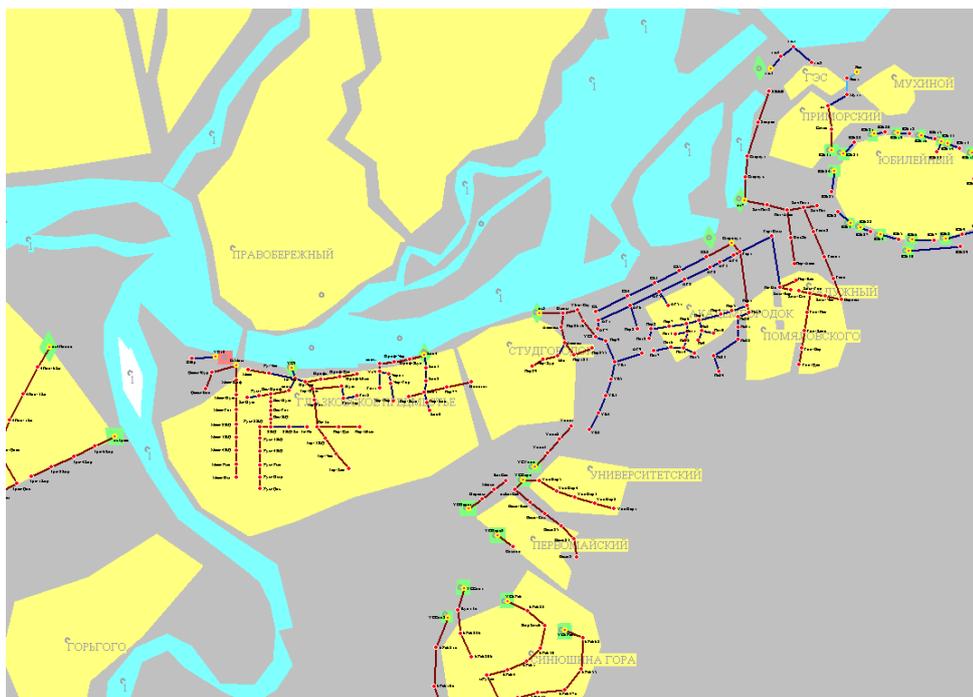


Рисунок 1.3 - Схема ливневой канализации (левый берег)

В городе более 400 тыс. транспортных единиц, от которых загрязнения в виде масел, тяжелых металлов попадают в р. Ангара. Виды и количество таких загрязнений представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Объемы загрязнений от г. Иркутска

Показатели загрязнений	Ливневые стоки		Талые воды		Инфильтрационные воды		Итого, т/год
	Удельный показатель, мг/л	Объемный показатель, т/год	Удельный показатель, мг/л	Объемный показатель, т/год	Удельный показатель, мг/л	Объемный показатель, т/год	
Взвешенные вещества	600	12420	1200	4800	50	900	18120
ХПК	120	2484	200	800	60	1080	4364
БПК₂	80	1656	150	600	40	720	2976
БПК₅	30	621	60	240	12	216	1077
Азот аммонийный(N)	10	207	20	80	7	126	413
Фосфаты (P)	0,8	16,56	1,8	7,2	0,5	9	32,76
Нефтепродукты	12	248	15	60	4	72	380
Алюминий	3	62,1	4	16	0,6	10,8	88,9
Марганец	0,5	10,35	0,55	2,2	0,7	12,6	25,15
Цинк	0,3	6,21	0,4	1,6	0,4	7,2	15,01
Никель	0,009	0,1863	0,012	0,048	0,006	0,108	0,342
Свинец	0,07	1,449	0,08	0,32	0,12	2,16	3,929
Хром общий	0,012	0,2484	0,015	0,06	0,01	0,18	0,488
Медь	0,04	0,828	0,05	0,2	0,02	0,36	1,388

Водоснабжение города осуществляется из поверхностного источника – Иркутского водохранилища, в которое поступают воды о. Байкала. Ниже по течению реки Ангары после Иркутска вода становится не пригодной для питьевых целей по следующим причинам:

- городские КОС перегружены и не обеспечивают должной очистки сточных вод;
- в городе отсутствует централизованная система ливневой канализации и нет соответствующих очистных сооружений;
- требуется комплексный подход к развитию и реконструкции систем водоотведения.

На рисунке 1.4 представлена перспективная схема ливневой канализации, в которой намечено 66 локальных очистных сооружений различной производительности.

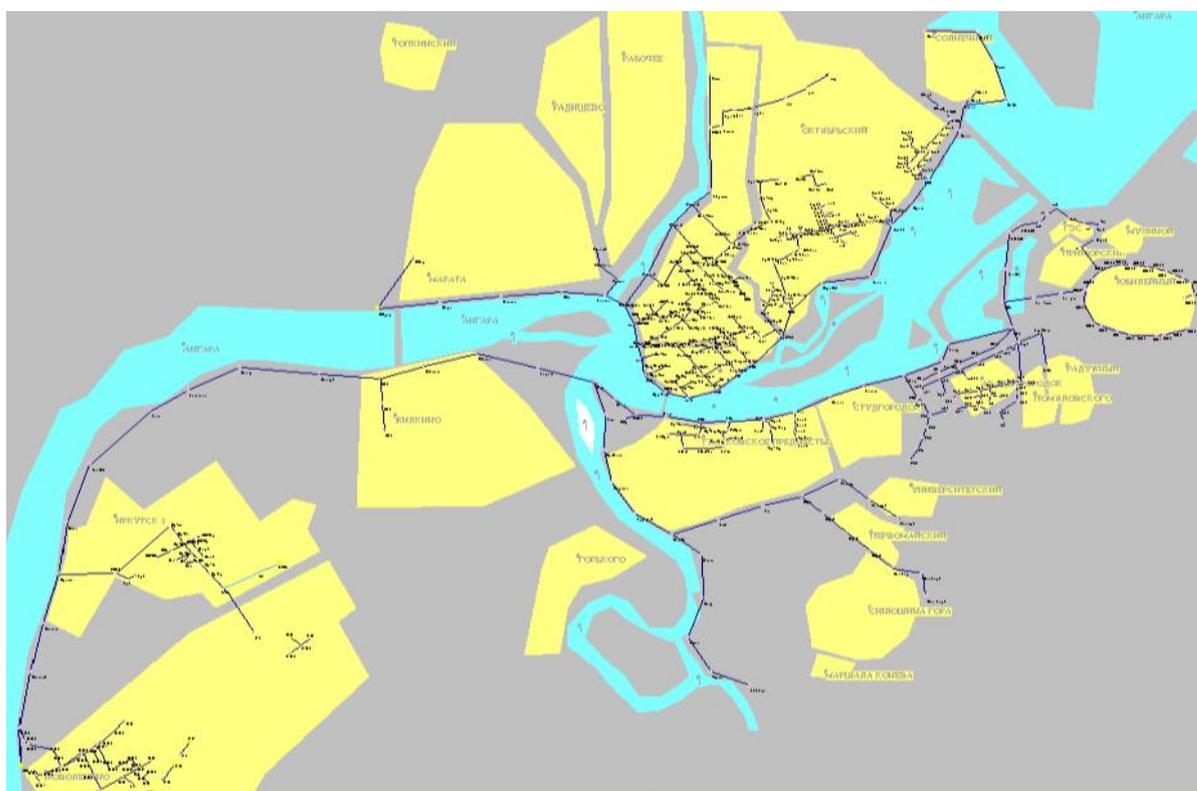


Рисунок 1.4 – Ливневая система водоотведения г. Иркутска

1.2. Развитие методологии проектирования и формирования систем водоотведения (СВО)

В работах [6, 8, 7, 10] проведен анализ и сделан вывод, что, основная методология проектирования систем водоотведения была сформирована в 50-60^е годы 20^{го} века и практически до 2000г не менялась. Все методические разработки ориентированы на ручной труд, хотя в стране уже давно взят курс на

автоматизацию и информатизацию проектирования и применение БИИ технологий. В своих работах [12, 14, 15, 13, 9, 22] авторы отмечают необходимость разработки новых подходов, особенно при оценке и повышении надежности, технико-экономической обоснованности принимаемых решений. Отечественные ученые и специалисты [26, 58, 64, 78, 87, 186, 195, 196, 197, 198] разработали такие подходы и методы. Однако все они базируются на методологии ручного счета и не учитывали безграничные возможности ЭВМ.

Огромное количество работ посвящено вопросам проектирования, моделирования и оптимизации систем водоотведения [12, 28, 34, 45, 57, 56, 66, 79, 91, 97, 117, 149]. При этом развитие городской территории осуществлялось бессистемно и точечно. Вместе с тем, основным документом для развития систем водоотведения был и остается генплан города и населенных мест, на основании которого формируется программа комплексного развития инженерной инфраструктуры. Согласно СП 32.13330.2012 [135,114] проектирование должно базироваться на многовариантных расчетах. Однако проектировщики об этом часто забывают и как правило рассматривают один два варианта, ссылаясь на отсутствие работоспособных методов расчета экономических показателей и дефицита времени. Следует отметить, что существующие подходы к проектированию систем водоотведения ориентированы на создание новых систем, хотя практически новые системы водоотведения уже давно не строятся. В основном требуется их реконструкция и развитие. Хотя авторы некоторых методических указаний [58, 93, 96, 104, 143] до сих пор считают, что при проектировании сетей канализации необходим только опыт проектировщиков и методы оптимизации здесь не нужны. Однако как отмечается в работах [12, 55, 64, 76, 72, 117, 128, 131] проектное решение не всегда соответствует требуемым нормативам надежности и управляемости. Для вновь вводимых объектов гражданского и промышленного строительства обязательным является получение разрешения на подключение к существующим сетям и сооружениям водоотведения, которые выдаются в Водоканалах. Последние, в свою очередь, должны провести расчеты и убедиться, что система водоотведения расходы от

новых абонентов пропустит, и нарушения в эксплуатационных режимов не произойдет. К сожалению, таких расчетов никто не делает из-за отсутствия методов и методик расчета потокораспределения в системах водоотведения.

Очевидным при оценки вариантов развития больших и сложных систем, к которым так же относятся и системы водоотведения, должны быть затраты жизненного цикла [12, 144, 146, 143, 197].

Общепринято, что системы водоотведения надо проектировать на установившийся равномерный режим транспортирования сточных вод и принимать при этом среднегодовые значения поступления сточных вод от абонентов в систему [130, 143]. Проведенные исследования подтверждают, что таких режимов за время эксплуатации системы водоотведения никогда не наблюдалось [114, 147, 155]. На режимы функционирования влияют множество факторов, которые необходимо учитывать. Как утверждается в работах [155,156], одним из таких факторов является местные сопротивления, которые влияют на всю гидравлику систем водоотведения. И их надо учитывать при обосновании параметров будущей системы водоотведения. В работах [100, 101, 141, 142, 145] проведены исследования и доказана необходимость учета при проектировании СВО неравномерности поступления сточных вод в систему и разработаны ряд методик и программ, позволяющих это делать [146, 156, 184].

Значительную сложность представляют вопросы реконструкции и расширения существующих СВО [118, 149], которые принято решать только за счет станций перекачки стоков в другие районы канализования, что приводит к увеличению эксплуатационных затрат и затрат электроэнергии [76].

В работах [86, 88, 92, 98, 184, 185] предложены различные подходы, которые позволяют решать отдельные а не комплексные задачи обоснования параметров проектируемых систем водоотведения.

На основании перечисленного требуется дальнейшее развитие и разработка новой технологии проектирования развивавшихся и реконструируемых систем водоотведения.

1.3. Оценка существующих технологий и методов оптимизации СВО

Городские инженерные сооружения, в том числе системы водоотведения, являются самыми динамичными системами. В большинстве крупных городов они увеличиваются по объемам транспортируемых стоков, по протяженности и мощности сооружений, по охвату территории. В небольших населенных пунктах в связи с миграционными процессами, закрытием производств происходит уменьшение мощностей инженерных систем и даже их консервация. В последние годы из-за мероприятий, проводимых в нашей стране по энерго-ресурсосбережению, наблюдается значительное уменьшение удельного водопотребления, что отражается на загруженности систем водоотведения. В одних городах и населенных пунктах надо переключать трубопроводы на большие диаметры, в других на меньшие, в третьих трубопроводы и сооружения надо консервировать и выводить из эксплуатации. В условиях существующей застройки города такие мероприятия нежелательны и очень затратные. При разработке перспективных схем развития систем водоотведения все эти факторы должны быть рассмотрены и выбран вариант с минимальными переключками и реконструкциями [32, 33, 159, 165].

Первые работы по применению методов оптимизации (методы Монте-Карло, Лагранжа, Беллмана и др.) выполнены : Н.Ф. Федоров, Н.У. Койда, В.В. Найденко, Е.И. Чечик, А. Куличевский, Г.К. Шацило и др. [136, 144, 146, 147, 156, 184].

Одними из первых отечественных работ были публикации Н.Ф. Федорова и Н.У. Койды [92] и Е.И. Чечика [156], в которых предложены программы на ЦВМ “Раздан-2” и “Минск-22” для определения минимальных уклонов труб и диаметров СВО. В работах И.А. Абрамовича [7, 10] предлагаются несколько методов и программ для оптимизации трасс СВО (метод Н.Н. Розенброка, метод систематического пересмотра решений, метод Монте-Карло и др.). Однако все они не нашли практического применения в силу сложности работы с этими программами.

В работах [184, 185, 7, 228] предлагается оптимизировать трассу и профиль системы водоотведения по схеме динамического программирования, используя при этом критерий приведенных расчетных затрат. Г. Донд [206] считает, что можно подобрать такое сочетание i и D , при котором стоимость строительства будет минимальной. В действительности, как утверждает автор работы [7], стоимость строительства имеет более сложную зависимость от уклона и от других параметров сети. Профессор Голик Н.И. в своей работе [57] предлагает комплексную модель оптимизации структуры и параметров самотечной системы водоотведения, используя при этом метод динамического программирования. Подобный подход предлагается и в работе Г. Донда [206]. В работах Курганова и М.И. Алексеева [96, 97] предлагается программа на ЭВМ, которая позволяет рассчитать основные параметры системы водоотведения. В работах [7, 211] авторы приходят к выводу о необходимости использования методов оптимизации и ЭВМ. Благоднаров А.И. и др. [30] разработали модели неустановившегося неравномерного движения жидкостей в трубопроводных системах. Однако авторы утверждают, что для решения системы дифференциальных уравнений нужны граничные условия, которые порой получить практически невозможно. Е.Г. Евдокимов [68], используя принципы создания адекватных моделей [3], рассмотрел задачи оптимизации СВО с позиции законов сохранения массы и энергии.

Н.С. Бахвалов [29] в своих исследованиях в части проектирования транспортных систем, основывается на теории графов и методов линейного программирования. Адаптация этого подхода к системам водоотведения потребует множества упрощений и ограничений. Тем не менее, этот подход очень перспективный.

Евдокимов А.Г. в своей работе [7] рассмотрел процесс проектирования инженерных систем, как непрерывный поиск наилучшего из множества возможных вариантов сети и сооружений. В работах М.И. Алексеева, В.С. Дикаревского, С.В. Яковлева, А.К. Кузина, В.С. Ленденева, Ю.М. Ласкова и др. [97, 98, 197, 196] исследованы экономические свойства систем водоотведения и предложены различные критерии оптимизации.

Обобщая проведенный анализ, можно сделать выводы, что существующие подходы и методы направлены на решение отдельных задач проектирования систем водоотведения. Применение их для реконструкции и развития СВО требует их дальнейшего развития и модернизация.

1.4. Оценка уровня развития методов и моделей гидравлического расчета систем водоотведения

Статистика отказов трубопроводов и коллекторов систем водоотведения [155], свидетельствует, что менее надежными являются сильно заглубленные трубы малых диаметров, причем материал труб особого влияния на безотказность работы трубопроводов не оказывает. В последние годы наблюдаются аномальные природные явления, проявляющиеся в виде дождей и снегопадов, значительно превышающих их расчетную интенсивность, что приводит к стихийным бедствиям в виде наводнений и затоплений. А.Ф. Порядин при анализе различных наводнений и тайфунов делает вывод, что самыми ненадежными сооружениями в системах водоотведения являются насосные станции перекачки стоков. Из-за отсутствия резервных источников энергоснабжения при внезапной остановке насосных станций стоки в больших объемах изливаются на поверхность земли и при этом часто происходят гидравлические удары [140]. К такому же выводу пришли гидротехники при анализе эффективности работы гидротехническим сооружением [139].

Оценивая важность систем водоотведения на современном этапе их развития и развития городов, многие специалисты обратили особое внимание на необходимость повышения надежности и безопасности хозяйственно-бытовой и ливневой канализации. В этом направлении следует отметить работы Игнатчика В.С. и Игнатчик С.Ю, в которых предлагается новая методика и критерии оценки надежности работы канализационных сетей и насосных станций. В работах [21, 73, 75, 77, 83, 84, 106, 115] рассмотрены системы водоотведения с позиции теории массового обслуживания и на основе «Марковских цепей» предложены алгоритмы оценки надежности и безопасности проектируемых и «стареющих» систем

водоотведения. Особого внимания заслуживают работы Гальперина Е.М. [54, 55, 51, 50, 46, 48], в которых дан анализ различным критериям оценки надежности систем водоотведения, предложены пути повышения надежности за счет устройства регулирующих емкостей и возможного перехода на кольцевые схемы водоотведения.

В работах [67, 119, 133, 153] обращено внимание на необходимость повышения маневренности и структурного резервирования эксплуатируемых систем водоотведения.

Как отмечалось в работах [45, 60, 72, 117, 194] бороться с заиливанием и засорениями трубопроводов и коллекторов надо на этапе их проектирования и обоснования скоростных режимов, а не при эксплуатации.

Ж.Л. Лагранж (1736-1813), А. Шези (1718-1798), Р. Маннинг (1816-1897), а так же отечественные ученые: Н.П. Петров, Б.А. Бахметьев, Н.Н. Павловский, С.В. Яковлев, Н.У. Койда, Н.Ф. Федоров, В.И. Калицун, Г.Г. Шигорин, В.С. Дикаревский, А.М. Курганов, М.И. Алексеев, Р.И. Аюкаев, И.А. Абрамович, Е.И. Чечик, Г.К. Шацилло, А. Куличевский, Н.Д. Доброхотова внесли огромный вклад в развитие теории движения жидкостей и газов, которая получила развитие в следующих работах [20, 26, 66, 65, 79, 85, 86, 87, 97, 120, 126, 127].

Большой вклад в развитие практической гидравлики СВО внесли зарубежные ученые П. Джеймсон, В.С. Хубер, С. Рональд, В. Малер, Р.Е. Дикинсон и др. [206, 209, 211, 213, 214, 215, 218, 220, 222].

Широкое распространение получило следующее уравнение, которое в конечно-разностном виде представлено ниже и применяется в ПВК SWMM:

$$Q_{i+\Delta t} = \frac{1}{1 + \frac{k\Delta t}{R^{4/3}} |V|} Q_i + 2\bar{V}(\Delta A / \Delta t)_i \Delta t + \bar{V}[(A_2 - A_1) / L] \Delta t - g \bar{A}[(H_2 - H_1) / L] \Delta t$$

Сейчас SWMM самый распространенный и применяемый во всех странах программный продукт, на основе которого проводятся различные исследования и

моделирования. Теоретические основы этого программного продукта нашли отражения в публикациях [216, 217]. На основе SWMM решаются задачи моделирования наводнений и распространения загрязнений в водных объектах.

В нашей стране SWMM распространяет НПО «Волга», под именем MOUSE и MAKE URBAN. В SWMM для расчета напорного движения сточных вод используется трубка в виде колбы «щель Прэсмана». Если уровень воды в колбе окажется выше уровня земли, считается, что стоки выйдут на поверхность земли. Такой подход позволяет определить места выхода стоков на поверхность земли, но не дает полную адекватную картину распределение потоков по другим коллекторам, тем более движение потоков в обратном направлении. Чтобы не утверждали, получаемые решения не адекватны реальным процессам движения жидкости в трубопроводах и коллекторах. В рамках уравнения Сен-Венана невозможно рассчитывать кольцевые сети. Для этого надо вводить дополнительные условия энергетического баланса и подбирать другие методы решения дифференциальных уравнений. Этими вопросами занимаются специалисты из Новосибирска А.А. Атавин, В.В. Тарасевич и др. в Институте Гидродинамики СО РАН, у нас в Институте систем энергетики СО РАН О.А. Балашов. В.И. Зоркальцев.

1.5. Развитие методологии проектирования систем водоотведения в зарубежных странах

Уровень развития методологии проектирования СВО во всех странах практически одинаковый. Применяются современные методы математического программирования и оптимизации, теория графов и ЭВМ.

Б. Балажди, П. Мариаппан и С. Сентхамилкумар, Б. Жозеф-Дюран, М. Н. Юнг, К. Мартинес-Окампо, С. Сагер и Г. Сембрано в своих работах [199,200] исследовали проблему наводнений и подтоплений городов и территории и предложили математические модели таких явлений. В работе К. А. Скехана [230] применены методы теории графов для мониторинга режимов движения стоков в

системах водоотведения. В работе [228] полученные результаты расчетов с помощью программного комплекса SewerGEMS оказались на значительно экономнее по сравнению с ручным расчетом. В работе Дж. М. Гиральдо [210], для решения задачи оптимального управления режимами движения сточных вод для перераспределения потоков и, во избежание выхода их на поверхность земли, предложен новый метод прямого поиска, очень эффективный в вычислительном отношении. В работе Л. Чабал и С. Станко [202], при определении объемов поверхностных сточных вод, которые могут транспортироваться по системе водоотведения, показана высокая эффективность программного комплекса решения этих задач с помощью данного программного комплекса MIKE URBAN.

Специалисты М. Маурисио-Иглесяс и др. сотрудники технического университета Дании (г. Люнбю) [223, 232] разработали новую методику и программный комплекс для оптимизации совместной работы насосных станций и трубопроводной сети системы водоотведения. На основе этого комплекса разработана система диспетчерского управления системами водоснабжения и водоотведения г. Копенгагена. Эта система способна к само регуляции и адаптации и показала высокую эффективность, особенно в период ливневых дождей.

В работе Н. Бурч, Р. Холте [201] для оптимизации параметров систем водоотведения (уклонов коллекторов, диаметров трубопроводов, напоров насосных станций) получили развития методы, основанные на схеме динамического программирования.

В работе Дж. Соуса, А. Рибейро [231] предложен на основе «блуждающих алгоритмов» новый подход решения задачи оптимизации трассы инженерных систем. В работах З. Возинович, А. Т. Санчез [233] и М.К. Мулеты и П.Ф. Боулоса [224] при развитии систем водоотведения, предложен генетический алгоритм порождения вариантов развития СВО.

В работе С.Р. Нагоше, Р.К. Рай, К.Н. Кадам [226] для оптимизации параметров водохозяйственных систем адаптирован метод динамического программирования, разработаны алгоритмы, реализован программный комплекс и показана его вычислительная эффективность. В работе [204] рассмотрены этапы

реализации перспективных схем водоснабжения и водоотведения на примере г. Косово.

Как показано в работе Жд. Холаса [212] в Чехии, как и в Сербии, сложилась методология формирования и реализации схемы развития систем канализации на основе государственных и муниципальных инвестиций.

Мунияп Н.С. и Шах Н.К. в своих работах [225, 229] предлагают новую методологию развития водохозяйственных систем на основе принципов энергосбережения и экономии воды. Работы [203, 205, 207, 208] посвящены автоматизации распределения потоков по трубопроводам и каналам, отходящим от основных сооружений.

Таким образом, практически во всех странах разрабатываются теоретические и практические подходы и методы моделирования напорных и безнапорных систем водоотведения.

1.6. Направление развития систем водоотведения и совершенствование методологии их проектирования

В сложившихся условиях состояния коммунальных систем единственный и оптимальный путь – четкое понимание проблем с водоснабжением и водоотведением в городах и поселениях России, совершенствование нормативной базы и механизмов финансирования, разработка оптимальных схем их развития и модернизации, с учетом фактора надежности и экологической безопасности.

Для реализации такой стратегии и определения долгосрочной перспективы развития систем водоснабжения и водоотведения городов и поселений России утверждены многие законы и постановления правительства РФ, в которых также сформулированы пути развития водной отрасли России. Развитие систем водоотведения предлагается осуществлять непрерывно и итеративно за счет разработки схем систем водоотведения и их финансового обеспечения и реализации через инвестиционные программы.

Как схема, так и инвестиционная программа могут ежегодно корректироваться. Инвестиционная программа является инструментом для

определения объемов финансирования строительства и реконструкции систем водоотведения за счет формирования тарифа на подключения новых абонентов, привлечения государственных вложений и др. источников финансирования. Специфика такого финансирования состоит в том, инвестиции генерируются самим проектом (проектное финансирование). Такое финансирование, как правило, является недостаточным и требуется его эффективное использование при строительстве новых и реконструкции существующих объектов водоотведения.

Появился термин индикативное планирование и управление (ФЗ 416). К индикаторам относятся (см. рис. 1.5):

- удельное водоотведение в расчете на одного жителя, л на чел/сут;
- утечки сточных вод в расчете на один километр коллектора в год;
- капиталовложение и энергопотребление на один м³ сточных вод;
- показатели надежности, экологической безопасности, сейсмостойкости, управляемости.

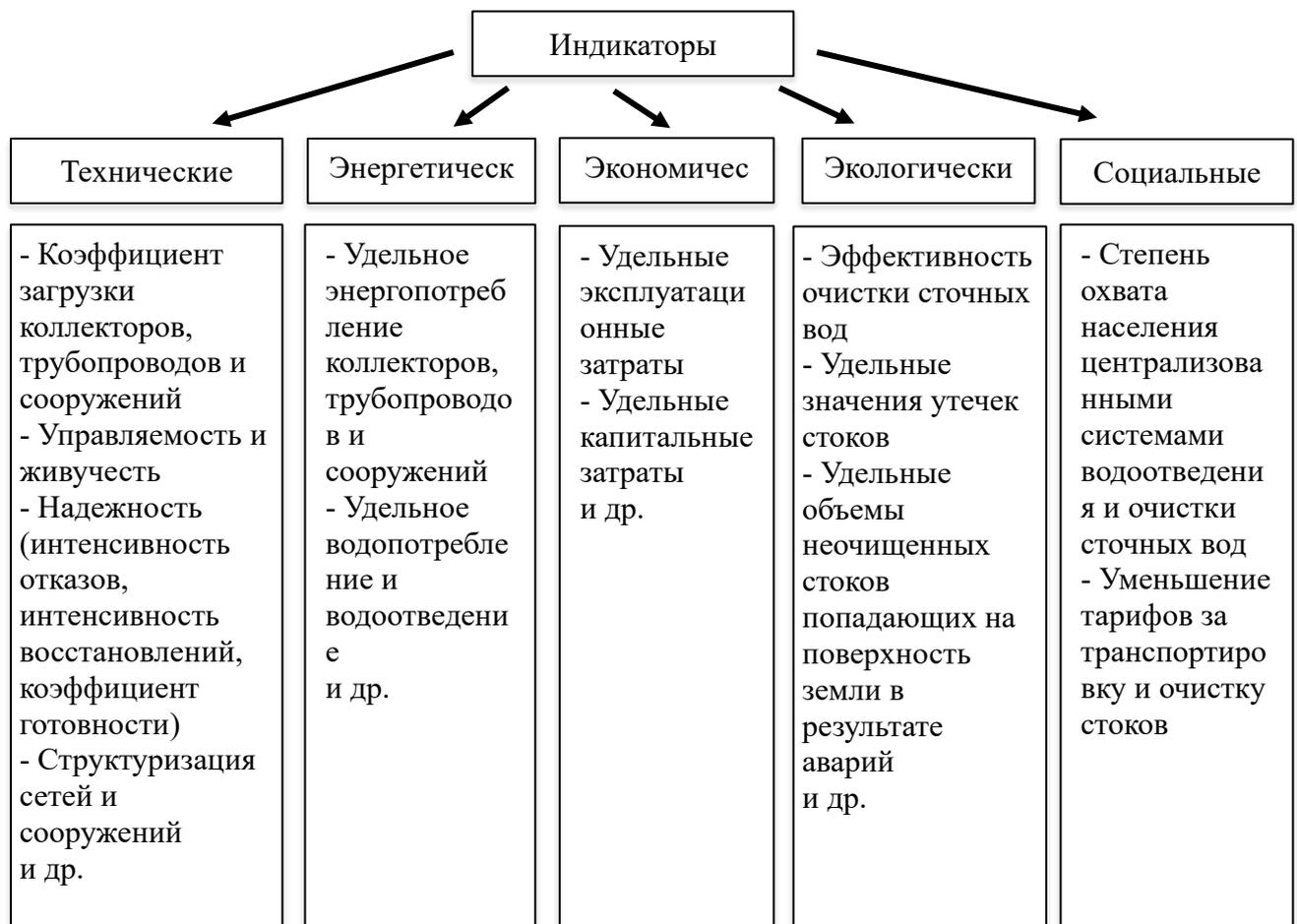


Рисунок 1.5 - Виды индикаторов в развитии систем водоотведения

В инвестиционных программах на период их действия формируется план достижимости индикаторов за счет различных мероприятий и проектов.

Современные системы водоотведения отличаются значительной аварийностью. Всю чаще наблюдается режимы выхода сточных вод на поверхность земли и попадание их в водоемы. Поэтому вопросы повышения надежности, экологической безопасности и режимной управляемости систем водоотведения при их развитии и реконструкции в условиях вариативности перспективного отведения сточных вод, снижения водопотребления становятся актуальными и требуют их учета при обосновании параметров и моделей развития перспективных схем систем водоотведения, что является главной целью диссертации.

1.7. Классификация и оценка последовательности решения задач управления развитием систем водоотведения

Главной задачей проектирования систем водоотведения является создание их модели, оформленной в виде технической документации, определяющей физические, технические и экономические параметры, а также технологию строительства [30, 104].

Процесс проектирования систем водоотведения с учетом их основных свойств и характеристик следует рассматривать в трех достаточно крупных аспектах:

- как непрерывный процесс формирования модели постоянно развивающихся систем водоотведения;
- как многоуровневый процесс обоснования структуры и параметров системы, который определяется многоэтапностью и стадийностью проектирования;
- как итеративный процесс решения и увязки определенной последовательности задач, а именно: синтеза, анализа и оценки вариантов.

Состав и характер проектных задач систем водоотведения определяются целями и содержанием конкретных этапов проектирования. В свою очередь каждый этап характеризуется подробностью проработок отдельных задач, степенью детализации проектируемой системы, агрегированием параметров и режимов ее функционирования. Наиболее сложными задачами являются схемно-структурные и схемно-параметрические, которые решаются в два этапа. В начале производится обоснование мощностей, количества и местоположения различных регулирующих, транспортирующих сооружений, иерархии сбора и отвода сточных вод; на втором – рассчитываются параметры каждого сооружения и определяются режимы их эксплуатации.

1. Первый этап.

Решаются следующие подзадачи:

1) выбор места расположения канализационных очистных сооружений, их количество и состав; разбивка городской территории на районы канализования и сбора поверхностных дождевых стоков;

2) обоснование отдельной, совмещенной и полу отдельной систем канализации; оценка возможности устройства сооружений централизованной и децентрализованной очистки и доочистки сточных вод;

3) построения многоуровневой системы сбора, отведения и очистки сточных вод;

4) обоснование сети магистральных канализационных коллекторов, исходя из возможных коридоров их трассировки и привязки к кадастровому делению территории;

5) необходимости устройства и местоположения регулирующих и противоаварийных емкостей, насосных перекачивающих станций, напорных трубопроводов, обоснование их параметров и объемов регулирования;

6) Оценка возможности доставлять сточные воды на КОС трубопроводным, водным, автомобильным, железнодорожным и др. видам транспорта.

Следует отметить, что в системе ливневой канализации максимальные расходы на порядок превышают минимальные их значения, причем на полную (расчетную) нагрузку коллектора работают всего лишь 5-10 дней в году. Для систем водоотведения с такой неравномерностью водоотведения необходимо предусматривать регулирующие емкости, пруды накопители суточного и многодневного регулирования. В связи с переходом коммунальных систем водоотведения к иерархическим структурам возникают задачи обоснования количества таких уровней, состава сооружений и параметров каждого из уровней. При этом область применения регулирующих резервуаров существенно расширяется. Во-первых, резервуары могут устраиваться в составе локальных и централизованных очистных сооружений и могут иметь место в районных, микрорайонных сетях и в их отдельных зонах. Перечисленные задачи должны решаться комплексно, одновременно с выбором трасс магистральных коллекторов, структуры магистральных, поселковых и микрорайонных сетей. В результате должны быть определены степень централизации очистки сточных вод, оптимальная трасса для трубопроводов и оптимальный маршрут для автомобильного транспорта, вся логистика сбора и транспортировки сточных вод водным транспортом.

2. Второй этап (Обоснование параметров системы водоотведения).

На этом этапе решаются следующие подзадачи:

- 1) Состав сооружений для локальных и централизованных КОС;
- 2) обоснование мест размещения и определение параметров регулирующих и аварийных резервуаров;
- 3) выбор из числа выпускаемых промышленностью сортамента трубопроводов оптимальных диаметров, материалов коллекторов и толщины их стенок;
- 4) параметры насосных и дроссельных подстанций, перепадов и быстотоков и режимы их эксплуатации;
- 5) определение состава сооружений, требующих капитального ремонта и реконструкции, технологии и методов реконструкции.

В горной местности перепады отметок земли могут достигать сотни и даже тысячи метров, что требует устройство каскадов специальных насосных станций, перепадов и быстотоков. При проектировании таких систем наиболее важными становятся задачи обоснования высоконапорных насосных станций, либо трубопроводов, позволяющих выдерживать значительные давления. Для ливневой канализации важным и определяющим фактором является время добега стоков до расчетного сечения. Чем меньше время добега, тем больше будут расчетные расходы в этом сечении и расчетные диаметры коллекторов и, следовательно, значительные капиталовложения в их устройства. Очевидно, при обосновании структуры сети ливневой канализации, выбора уклонов коллекторов, параметров перепадных колодцев необходимо стремиться к увеличению времени транспортировки стоков. Этого можно добиться за счет малых уклонов и устройства различного рода перепадов и гасителей скорости. В свою очередь, уменьшение уклонов приведет к увеличению диаметров коллекторов. Возникает комплексная задача оптимизации как времени добега стоков, так и уклонов коллекторов и состава сопрягающих сооружений.

Как уже отмечалось, перекладки трубопроводов в черте города нежелательны, хотя иногда и неизбежны. Поэтому эффективными могут быть варианты реконструкции бес канальным методом «труба в трубе».

Назначение этапов и очередей строительства, методов реконструкции и развития СВО должны решаться одновременно задачами анализа режимов их функционирования. Приходим к выводу, что и структурные и параметрические задачи необходимо решать в комплексе, либо в едином итеративном процессе.

После выбора структуры и параметров системы водоотведения требуется провести ее анализ на предмет гидравлической устойчивости, режимной управляемости, маневренности, сейсмической и экологической безопасности.

Для систем водоотведения задачи анализа режимов и принимаемых решений следующие:

- расчет установившихся равномерных и неравномерных режимов движения сточных вод на средние, максимальные и экстремальные нагрузки;

- моделирование напорных режимов движения стоков в безнапорных коллекторах;
- моделирование режимов переполнения сети;
- расчет систем поверхностного водосбора с учетом возможного выхода стоков на поверхность земли и движения их по улицам и территории;
- обнаружение мест появления утечек в системах водоотведения бытовых, промышленных и ливневых сточных вод.

задачи обеспечения надежности и сейсмостойкости работы отдельных элементов и систем водоотведения в целом:

- анализа и моделирование режимов отвода стоков в условиях каскадного развития аварий и выхода из строя группы участков и сооружений;
- оценка работоспособности систем водоотведения в аварийных состояниях и разработка соответствующих нормативных требований;
- решения задач повышения надежности при реконструкции и развитии систем водоотведения.

Известно, что в разветвленных СВО при отключении любого участка сети или при его засорении, выхода из строя насосного агрегата, стоки будут попадать на поверхность земли, нанося огромный экологический ущерб территории.

С целью обеспечения надежности функционирования систем водоотведения необходимо производить их резервирование в виде устройства разгрузочных коллекторов, или переходить к кольцевым структурам. Что касается проблемы нормирования показателей надежности, то она недостаточно проработана и на сегодняшний день отсутствуют действенные нормы, которые можно было бы применять в задачах оптимизации развивающихся систем водоотведения.

Все перечисленные задачи должны решаться в комплексе и быть взаимоувязанными.

1.8. Содержательная постановка комплексной оптимизации развивающихся и реконструируемых СВО

Закон «О водоснабжении и водоотведении» (ФЗ №416) определил государственную политику в сфере эксплуатации и проектирования систем водоснабжения и водоотведения. Согласно этому закону должны на всех муниципальных уровнях разрабатываться и ежегодно актуализироваться схемы водоснабжения и водоотведения. Эти схемы должны коррелировать с программами комплексного развития инженерной инфраструктуры городов, публично обсуждаться и отслеживаться в их реализации. Гарантирующая организация, которая согласно «концессионным соглашениям» эксплуатирует системы водоотведения, развивает и реализует схему водоотведения на основе инвестиционных программ. Инвестиционные программы формируются на основе производственных программ и муниципальных программ жилищного строительства. На основе производственных программ предприятий водопровода и канализации рассчитывается тариф на воду и водоотведения для населения, а на основе муниципальных программ жилищного строительства формируется тариф на подключение к вновь вводимых в строй объектов жилищного строительства. Что касается тарифов для населения и на подключение, то они регулируются законом и их рост строго регламентируется. Поэтому в инвестиционных программах рассчитываются экономически обоснованные тарифы (по факту) и доступные тарифы. Разница в тарифах для населения компенсируется муниципальными органами власти. Разница в тарифах на подключения компенсируется за счет различных федеральных и муниципальных программ, займов в банках и др. В инвестиционных программах так же формируется финансовый план реализации мероприятий, обозначенных в схеме развития СВО на период действия инвестиционной программы (не менее 3 лет). В случае каких либо изменений (финансовых или в задержки строительства объектов жилья) инвестиционная программа, до и сама схема могут корректироваться, но не реже 1 раз в год. По существу, финансирование возникает в ходе реализации проекта и называется

проектным финансированием, что ее существенно отличает от других схем финансирования. Именно такая схема управления эксплуатацией и развитием систем водоотведения сложилась в настоящее время. Следовательно, при разработке перспективной схемы водоотведения вышеперечисленные факторы должны учитываться и применяться соответствующие модели и методы. К таким факторам можно отнести:

- ограниченность финансирования на каждом этапе развития системы водоотведения;
- формирование очередностей строительства;
- оптимизация распределения ограниченных инвестиций в строительство новых и реконструкцию существующих объектов водоотведения;
- риски от принимаемых решений;
- неопределенность перспективного водоотведения и технико-экономических параметров будущей системы водоотведения.

В качестве критериев оптимизации должен быть критерий затрат жизненного цикла системы водоотведения.

1.9. Задачи оптимизации схемы водоотведения и их роль в развитии города

Сложившаяся последовательность решения задач развития территории города и городской инженерной инфраструктуры представлена на рисунке 1.6.



Рис. 1.6 - Этапы формирования схемы водоотведения

Предлагается следующая методология и последовательность решения задач по обоснованию параметров перспективных схем развития систем водоотведения, которая дополняет уже сложившуюся технологию проектирования и отражает законодательную базу о формировании схем водоснабжения и водоотведении и разработке инвестиционных программ предприятий коммунального комплекса:

Этап 1. Определяется временной горизонт и этапы управления развитием схемы водоотведения. При этом на основе перспективного развития городской территории осуществляется прогноз объемов отведения сточных вод по каждому этапу развития системы водоотведения, учитывая возможный диапазон изменения удельных нагрузок водоотведения. На этом этапе применяется теория нечётких множеств и формируется нечёткое представление не только об удельных значениях объемов сточных вод, но и по другим, в том числе стоимостным показателям строительства.

Этап 2. Определяются участки и сооружения, требующие замены и реконструкции. С учетом развития и застройки новых территорий, а также и внутри застроенных районов, исследуются и формируются коридоры для прокладки новых

сетей и для устройства новых сооружений (КОС, КНС, резервуаров). На этом этапе на основе моделей и методов потокораспределения производится оценка пропускную способность сети, ее надежность, управляемость и сейсмостойкость и намечаются пути повышения этих показателей. На основе возможных трасс и устройства сооружений формируется избыточная схема в виде расширенного графа, являющегося основой для оптимизации проектных решений.

Этап 3. Производится стоимостная оценка строительства каждого этапа и каждого варианта развития СВО и сопоставляется с инвестициями, которые можно получить на основе платы за подключение и иных средств.

Этап 4. Для каждого фиксированного значения удельных показателей водоотведения и фиксированных значений инвестиций применяется комплекс оптимизационных моделей и методов поиска оптимального решения на избыточных проектных схемах с учетом факторов надежности, управляемости и сейсмостойкости. В итоге формируется допустимое локально-оптимальное множество вариантов жизненного цикла системы водоотведения.

Этап 5. Обосновывается вариант развития системы водоотведения и осуществляется строительство его первой очереди. На этом этапе на основе полученного множества вариантов жизненного цикла системы формируется матрица рисков и выбирается для строительства первой очереди вариант с наименьшими технико-экономическими рисками. Для выбранного варианта и его первой очереди строительства уточняются параметры системы на основе дискретной моделей оптимизации по схеме динамического программирования.

Этап 6. По мере реализации первой очереди строительства оцениваются целевые и плановые показатели (индикаторы), уточняются стоимости нового оборудования и сооружений, определяются значения фактического удельного водоотведения и формируются интервалы их возможных значений в перспективе. Осуществляется переход к этапу 1.

Таким образом предлагается методология непрерывного управления развитием систем водоотведения с адаптацией к меняющимся условиям и неопределённости потребления воды и сброса сточных вод.

В настоящее время практически во всех городах РФ наблюдается значительное уменьшение удельного водопотребления. Например, для г. Иркутска за последние 17 лет оно уменьшилось с 300 до 198 л/чел в сут. Какое оно будет к концу реализации утвержденной схемы водоснабжения и водоотведения (к 2035г.). Можно только предполагать, что оно будет уменьшаться и достигнет предельного значения в 100 л/чел в сут, либо вернется к прежним значениям. На рисунке 1.7 показаны возможные интервалы и траектории изменения значений удельного водопотребления по этапам развития системы водоотведения. Для первой очереди строительства возможный диапазон удельных нагрузок составит (130-220 л/чел в сут), для второй- (110-250 л/чел в сут), для третьей- (100-300 л/чел в сут).

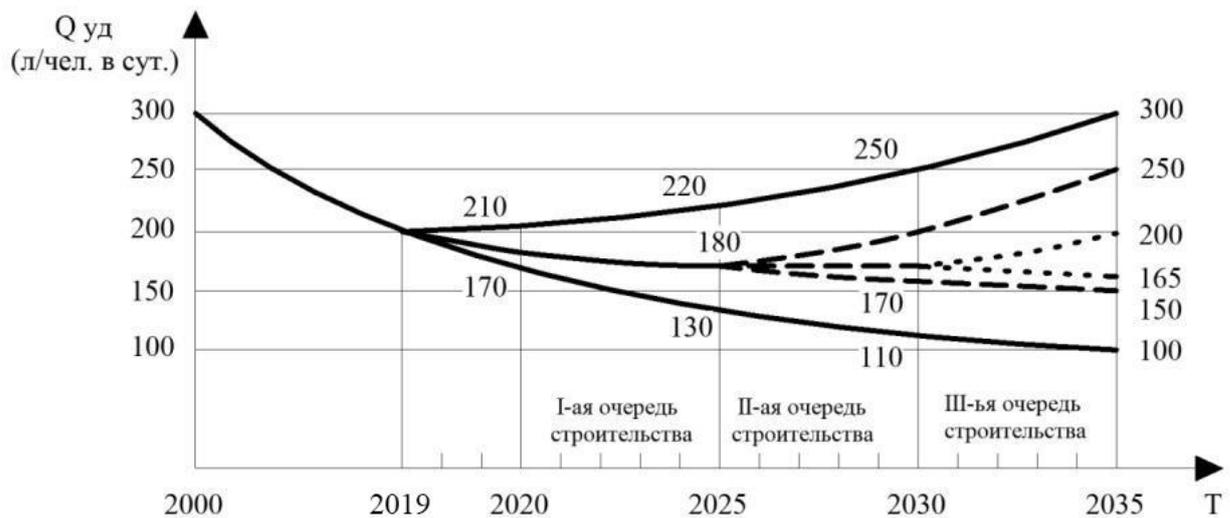


Рисунок 1.7 - Возможные интервалы изменения удельного водопотребления за период реализации схемы водоотведения

Используя теорию нечетких множеств для каждой очереди строительства интервалы возможных нагрузок разбиваются на n значений и следовательно формируются n вариантов развития.

Для каждого варианта производится обоснование параметров системы водоотведения сразу для всех (в данном случае трех) очередей строительства. При этом вариант, для которого расчетные инвестиции в строительство первой очереди превышают возможные средства, формируемые в инвестиционных программах, из рассмотрения исключается.

В качестве иллюстрации работы предлагаемой методики рассмотрим канализационный коллектор п. Листвянка - КОС Иркутска, протяженностью 72 км.

Максимально возможный расход сточных вод, который будет транспортироваться по этому коллектору, разбивается на четыре интервала. В итоге формируются четыре варианта развития, каждый из которых имеет свою производительность (см. таблицу 1.2) и свои риски.

Таблица 1.2 - Варианты развития системы водоотведения в три очереди

Вариант	ΣQ (л/с)	Q_I (л/с)	Q_{II} (л/с)	Q_{III} (л/с)	Приведенные затраты (млн. руб.)
1	286,4	75,2	95,5	115,7	55,095
2	421,42	92,56	136	192,86	81,512
3	556,5	110	176,5	270	106,037
4	691,5	127,3	217	347,2	128,331

Для этого, используя методологию принятия решения, строится «матрица рисков», которая имеет вид, представленный в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - «Матрица рисков»

ΣQ (л/с)	286,4	421,42	556,5	691,5	Σ млн. руб.
286,4	0	29,087	54,021	78,277	161,385
421,42	26,417	0	31,144	51,630	109,191
556,5	50,942	24,525	0	35,936	111,403
691,5	73,236	46,819	22,294	0	142,349
Min max	73,236	46,819	54,021	78,277	46,819

В этой матрице первый столбец представляет расчетные расходы, на которые рассчитывается и реализуется вариант развития системы водоотведения. Первая строка указывает на фактические расходы, которые могут оказаться после реализации выбранного варианта. На пересечении столбцов и строк указаны финансовые риски от несовпадения выбранного расхода с тем, который оказался после реализации проекта. При этом финансовый риск рассчитывается как дополнительные капиталовложения, которые потребуются до доведения системы на пропуск фактического расхода сточной жидкости. Очевидно, на диагонали матрицы рисков финансовые риски будут равны нулю (выбранный расход совпал с фактическим). Если фактическое значение расходов после реализации проекта будет меньше их выбранных значений, возникают излишние капиталовложения, которые так же можно рассматривать как риски. Например, выбран расход 286.4 л/с, на который запроектирована и построена система водоотведения, а после

реализации проекта расход оказался 421.42 л/с, что на 135.02 л/с больше чем заложен в проекте. Для доведения СВО до пропуска фактического расхода сточных вод потребуется дополнительная реконструкция с приведенной стоимостью 29.09 млн. руб. в год (см. таблице 1.3). Если расход окажется 691.5 л/с, то риск уже будет в 78.277 млн. руб. в год. Например, выбран расход 421.42 л/с, а после реализации проекта, он оказался 286.4 л/с. Для варианта с расходом 421.42 л/с затраты составляют 81.512 млн. руб. в год. Для расхода 286.4 л/с затраты равны 55.095 млн. руб. в год. Следовательно, величина риска вычисляется как $81.512 - 55.095 = 26.417$ млн. руб. В последнем столбце «матрицы» представлены максимальные риски по каждому варианту расчетных расходов. Последний элемент этого столбца это минимальный из максимальных рисков. Следовательно, предпочтительным с позиции суммарных минимальных рисков будет вариант с расходом 421.42 л/с. Если выделяемые для первой очереди строительства инвестиции известны, например 23 млн. руб., то четвертый вариант из рассмотрения исключается (см. таблицу 1.4). Если эти инвестиции составят 15 млн. руб. и меньше, то решается задача распределения этих инвестиций в развитие системы водоотведения. Итогом расчета будут величины расходов от абонентов, от которых можно отвести стоки за эти деньги. В нашем примере за 15 млн. руб. можно отвести стоки от абонентов в размере 213.6 л/с.

Таблица 1.4 - Капиталовложения по каждому из вариантов строительства

Вариант	Расход, л/с	Капиталовложение, Кв (млн. руб.)		
		I-ая очередь	II-ая очередь	III-ья очередь
1	286,4	17,850	12,008	12,983
2	421,42	20,002	13,203	14,860
3	556,5	22,584	14,317	16,057
4	691,5	23,939	15,192	17,200

Предположим, для строительства первой очереди выбран вариант 2, которому соответствует удельный расход в 160 л/чел в сут. На момент завершения строительства фактический удельный расход может оказаться другим, например

180 л/чел в сут. С учетом этого расхода все вышеперечисленные процедуры повторяются (см. рис. 1.5 штриховые линии) и т.д.

На основе проведенных численных экспериментов доказано, что для СВО, состоящих только из самотечных систем коллекторов, в условиях неопределенности перспективных нагрузок сточных вод необходимо принимать к строительству вариант с максимальными значениями удельного водопотребления. Для напорной канализации напротив можно принимать вариант с минимальными удельными значениями водоотведения.

С учетом перечисленных факторов и предлагаемой последовательности решения задач требуется разработка новых подходов, методов моделирования и оптимизации систем водоотведения. Именно эти вопросы являются предметом исследования, которые подробно рассмотрены в последующих главах.

Выводы по главе 1

1. Существующие СВО находятся в неудовлетворительном состоянии, их параметры не соответствуют расчетным значениям. Износ сетей составляет 60-70%. Требуется реконструкция сетей и сооружений. Практически все системы водоотведения имеют иерархическую структуру и в них можно выделить несколько уровней сбора и отвода сточных вод. Многие системы имеют разгрузочные коллектора и кольцевые структуры, шибберные устройства и насосные станции переброски стоков.

2. Многие научные работы являются пионерными и посвящены исследованиям закономерностей движения сточной жидкости, решению отдельных задач расчета и обоснования параметров ливневой, бытовой и промышленной канализации. Однако большинство из них выполнены во второй половине прошлого столетия и ориентированы на ручной расчет и централизованную систему управления развитием систем водоотведения, не учитывают современные принципы формирования инвестиций, неопределенность перспективного водопотребления и водоотведения. Недостаточно проработаны вопросы повышение надежности, сейсмостойкости, режимной управляемости, динамики развития, отсутствуют методы оптимизации проектных решений и

подходы к рациональному распределению выделяемых инвестиций в строительство новых и реконструкцию существующих систем водоотведения.

3. За рубежом сложились целые науки – «Гидроинформатика» и «акватроника». Однако большинство разработанных подходов и методов ориентированы на решение отдельных задач анализа и синтеза систем водоотведения и поэтому требуют совершенствования и развития.

4. С учетом проведенных исследований предлагается методология и последовательность решения задач по обоснованию параметров перспективных схем развития систем водоотведения, которая дополняет уже сложившуюся технологию проектирования СВО.

ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ

2.1. Исследование и моделирование процесса поступления стоков в системы водоотведения

Хорошо известно, что водоотведение в многоквартирных домах имеет вероятностный характер. Вместе с тем проектировщики пользуются жестко закрепленными в СП нормативами. Нормативы, в свою очередь, уже не менялись многие годы и были определены на основании обработанных статистических данных по потреблению воды и отведению сточных вод в зданиях постройки 60-тых годов прошлого столетия. Накопленный материал по графикам и коэффициентам неравномерности потребления воды в эксплуатационных и сбытовых предприятиях, в абонентских службах свидетельствует об отличии фактических значений удельного потребления воды от установленных в СП. Анализ существующих СВО, запроектированных согласно установленным в СП нормативам, показал, что параметры трубопроводов, насосных станций и КОС существенно завышены и не обеспечивают их эффективную работу. При этом не обеспечивается «гибкость» в управлении и возникают излишние затраты в строительство новых сооружений и эксплуатацию существующих.

Вероятностный характер водопотребления и поступления стоков в системе водоотведения исследовали такие известные ученые, как: Н.Н. Абрамов [1, 2, 3, 4, 5], Л.А. Шопенский [187, 188, 189, 190, 191, 192], М.М. Андрияшев [27], А.Д. Тевяшев [68, 69, 71], А. Г. Евдокимов [68, 70, 71], Г.П. Небольсин [113], Ю.А Ильин [85], Е.М. Гальперин [47, 49, 52, 53, 111], М.И. Алексеев [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25], О.Г. Примин [125, 126], С.Н. Карамбиров [89, 90], Ю.А. Ермолин [72, 73, 74, 75, 76, 77], А.С. Вербицкий [40, 41, 42], В.С. Макагонов [102, 103], Н.А. Украинец [139, 140], Ф. Ноймеге [116], О.В. Вантеева [36, 37], Самарин В.П. [132] и др., в чьих трудах изучены процессы потребления воды как случайные процессы и выведены определенные закономерности их появления. В работах А.Г.

Евдокимова предложены модели формирования графиков потребления воды в динамике. В трудах А.С. Вербицкого изучена природа возникновения отказов и влияние их на процесс водопотребления и водоотведения. До недавнего времени в многоквартирных домах практически отсутствовали водомеры и поквартирного учета расходования воды не велось. Только в настоящее время этот процесс успешно реализуется и уже накоплена большая статистика, которую требуется правильно обрабатывать и в дальнейшем использовать при решении задач развития и реконструкции систем водоотведения. Анализ статистического материала показывает, что характер и графики потребления воды изменились в суточном, недельном и годовом интервалах времени по причине того, что изменилась потребность населения в воде, хотя механизм формирования нагрузок потребления воды и механизм регулирования потребительского поведения, пока еще не раскрыты. Тем не менее, известно, что отборы воды потребителями между собой не зависят и не зависят от возможных значений друг друга, и образуют последовательность случайных величин [38, 39, 43, 94, 134].

Фундаментальные исследования были проведены в 60-ых годах прошлого столетия [187, 188, 189, 190, 191] и позволили выявить следующие закономерности.

На начальных участках, при малом количестве потребителей, случайный процесс дискретен, очень сложен, хаотичен. Его можно описать несколькими законами распределения [38, 39, 94]. Это в первую очередь биномиальный закон, закон Пуассона.

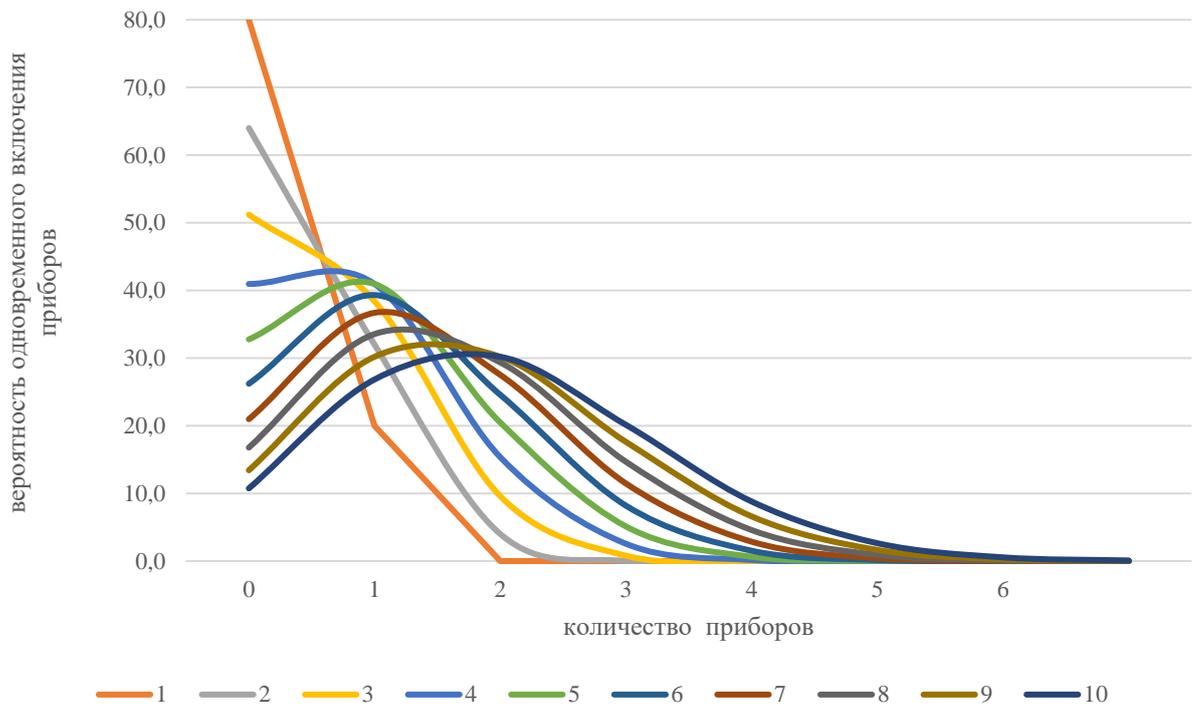


Рисунок 2.1 - Плотность распределения вероятности включения приборов, %

$$f(x) = \frac{e^{-\mu} (\mu)^x}{x!}; \mu = n \cdot p; \sigma = \sqrt{n \cdot p} = \sqrt{\mu}. \quad (2.1)$$

На рисунке 2.1 различным цветом обозначено количество одновременно включенных потребителей. Известно, что водоразборная арматура никогда не работает синхронно, поэтому расход в доме будет всегда меньше сумме расходов каждого сантехнического прибора.

При увеличении числа потребителей график отбора воды превращается в непрерывный процесс, при этом закон Пуассона трансформируется уже в нормальный закон распределения в соответствии с рисунком 2.2:

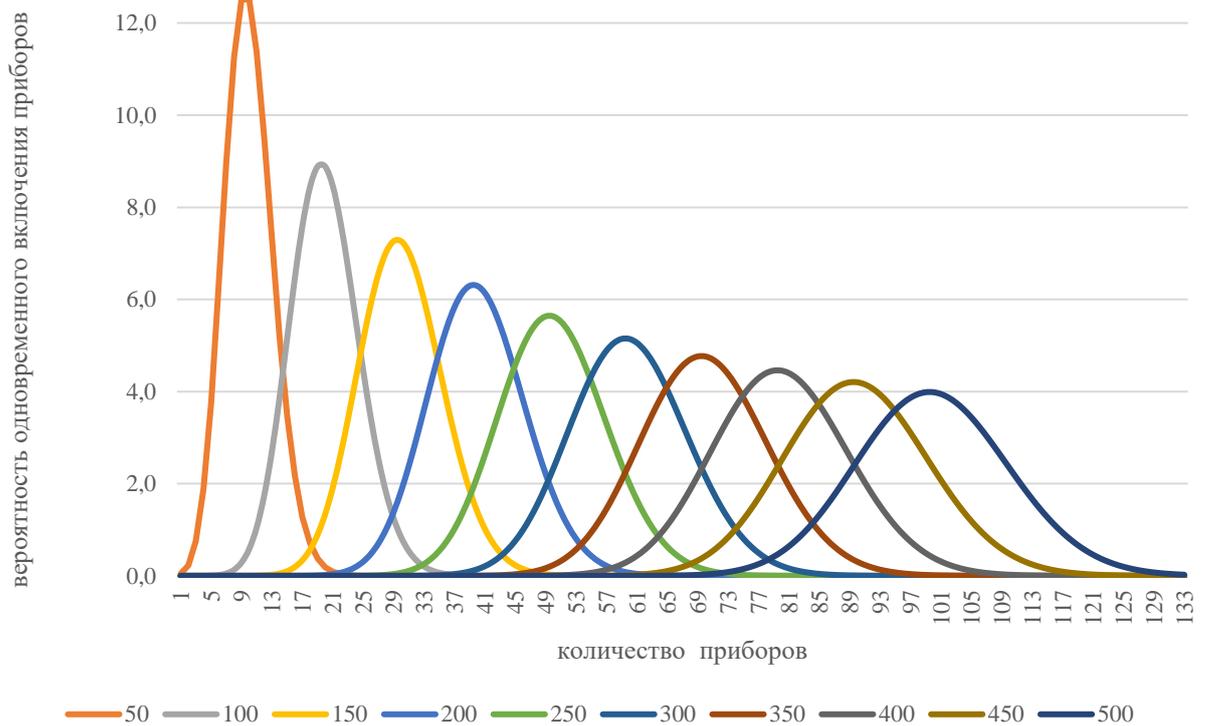


Рисунок 2.2 - Плотность распределения вероятности включения приборов, %

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}; \mu = n \cdot p; \sigma = \sqrt{npq} . \quad (2.2)$$

Наиболее вероятный график потребления по часам суток имеет пологий вид. Рассмотрим модели вероятностного водопотребления для эксплуатируемых и проектируемых систем водоснабжения и водоотведения.

Каждое из событий, в данном случае отборы воды за единицу времени, имеет величину (размер), который можно распределить по интервалам отборов. Соответственно, по количеству попаданий в каждый из интервалов можно представить вероятностную модель.

Согласно теории случайных событий [38, 39, 187], по каждому часу t и по шкале Q , вероятности отборов воды будут следующими:

$$p_{it} = P \cdot n_{it} / N_t = n_{it} / N_t,$$

где P – общая вероятность, равная 1; n_{it} – количество попаданий в определенный интервал; N_t – общее количество попаданий.

Таким образом, отборы воды по соответствующим интервалам могут появиться с долей вероятности $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$. Суммарная вероятность распределения объемов водопотребления по каждому часу равна $P = 1, \sum p_i = 1$

Ряд распределения случайной величины можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \\ p_1, p_2, p_3, \dots, p_n \end{cases}.$$

При этом величина математического ожидания по каждому часу t (среднее значение) будет равным:

$$M_t(x) = \sum x_{it} p_{it}$$

Дисперсия, как мера разброса случайных величин:

$$D_t(x) = \sum (x_{it} - M_t(x))^2 p_{it}$$

Среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_t(x) = (D_t(x))^{0.5}$$

2.2. Получение и представление фактических характеристик водоотведения

В существующей практике проектирования СВО нагрузки у абонентов принимаются в виде фиксированных средних, максимальных или минимальных значений. Эти значения прописаны в Согласно СП 32.13330.2012. Однако их следует определять по результатам моделирования на ЭВМ или на основе графиков фактического водоотведения. На основе информации, которую предоставил МУП «Водоканал» г. Иркутска для района с населением 10 тыс. чел, на основе статистических методов [108,129] построена гистограмма, представленная на рисунке 2.3.

			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
153	150	156														0										
147	144	150															0							0		
141	138	144										0	0	0			0	0					0			
135	132	138										0	0	0	0	0	1	0	1			0	0			
129	126	132										0	1	1	1	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	
123	120	126										1	2	3	2	1	1	1	2	1	0	1	1	1		
117	114	120							0	0	1	3	2	3	4	2	2	4	4	4	4	2	2	3	2	
111	108	114			0				1	2	2	2	3	2	3	5	7	6	6	6	4	4	3	2	0	
105	102	108				0			3	5	4	3	7	8	7	9	9	8	9	11	10	5	4	4	1	
99	96	102					0	9	9	7	10	14	10	13	8	7	6	8	14	19	12	9	8	3	0	
93	90	96	0			0	3	6	15	14	14	13	13	9	11	10	11	20	26	21	18	13	18	11	0	
87	84	90		0	0	1	7	5	24	33	16	10	10	13	14	19	28	23	22	29	28	24	25	24	2	
81	78	84	0	1	0	0	2	6	12	19	30	31	20	18	17	28	27	21	18	14	11	25	29	26	38	10
75	72	78	7	5	4	3	5	6	18	17	8	16	24	22	21	14	13	12	6	1	1	4	12	12	19	31
69	66	72	7	5	9	10	9	10	22	6	2	1	4	9	10	6	2	0	0	0		0	1	2	4	37
63	60	66	28	9	24	18	16	22	14	2				0	0	0									0	17
57	54	60	39	28	22	39	40	32	9	0	0		0	0												2
51	48	54	18	32	22	18	22	13	1			0							0	0	0	0	0			
45	42	48	1	16	14	8	5	1							0	0	0	0								
39	36	42		2	5	4	1																			
33	30	36		0	0	0		0																		
27	24	30			0	0																				

Рисунок 2.3 - Гистограмма отборов воды по группе домов с населением 9688 чел.

Наиболее вероятный график на рисунке 2.3 показан жирными цифрами (математическое ожидание). Результаты вычисления этих характеристик представлены в табл. 2.1. Изменение удельного водопотребления за три года представлено на рисунке 2.4.

Таблица 2.1 - Математическое ожидание (M), дисперсия (D), и среднеквадратичное отклонение (σ)

ч	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
M	59,6	55,2	56,4	57,3	58,8	64,5	76,4	85,7	86,9	87,8	88,7	88,1	88,0	88,7	90,0	91,3	93,3	94,6	93,6	90,4	88,5	87,9	83,0	71,4
D	48	76	83	74	77	137	190	116	73	138	203	223	222	203	188	187	171	115	92	105	128	111	52	40
σ	6,9	8,7	9,1	8,6	8,8	11,7	13,8	10,8	8,5	11,7	14,3	14,9	14,9	14,2	13,7	13,7	13,1	10,7	9,6	10,2	11,3	10,5	7,2	6,3

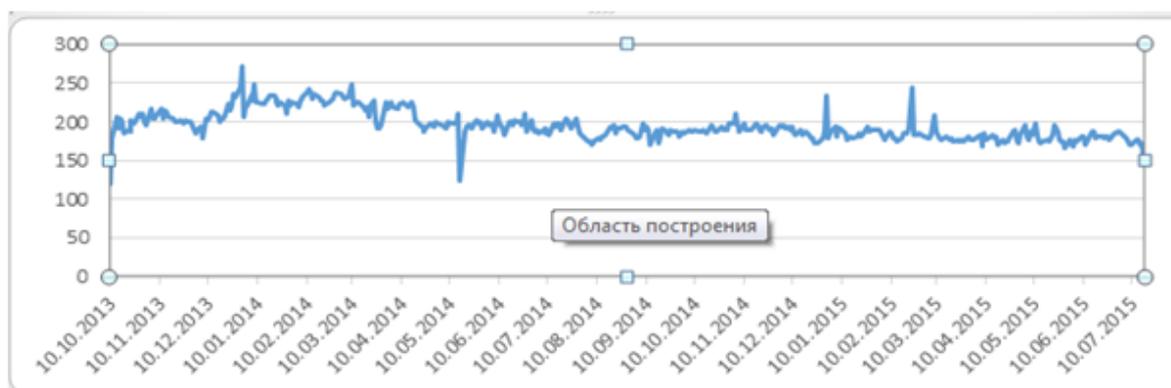


Рисунок 2.4 – Изменение удельного водопотребления в рабочие дни, л/сут на 1

Согласно СП 31.13330.2012 коэффициенты максимальной и минимальной часовой неравномерности равны:

$$\left. \begin{aligned} K_{\text{ч.макс}} &= \alpha_{\text{макс}} \beta_{\text{макс}}; \\ K_{\text{ч.мин}} &= \alpha_{\text{мин}} \beta_{\text{мин}} \end{aligned} \right\},$$

В расчете принято: $\alpha_{\text{макс}} = 1,2$; $\alpha_{\text{мин}} = 0,6$. В таблице 2.2 представлены фактические и рекомендуемые СП значения коэффициентов неравномерности.

Таблица 2.2 – Сравнение коэффициентов неравномерности

Коэфф ициент	Число жителей, тыс. чел.																
	до 0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	0,75	1	1,5	2,5	4	6	10	20	50	100	300	1000 и более
$\beta_{\text{макс}}$ СП	4,50	4,00	3,50	3,00	2,50	2,20	2,00	1,80	1,60	1,50	1,40	1,30	1,20	1,15	1,10	1,05	1,00
$\beta_{\text{мин}}$ СП	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,10	0,10	0,10	0,20	0,25	0,40	0,50	0,60	0,70	0,85	1,00
$K_{\text{макс}}$ СП	5,40	4,80	4,20	3,60	3,00	2,64	2,40	2,16	1,92	1,80	1,68	1,56	1,44	1,38	1,32	1,26	1,20
$K_{\text{мин}}$ СП	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	0,12	0,15	0,24	0,30	0,36	0,42	0,51	0,60
$K_{\text{макс}}$ Метод	2,44	2,21	2,07	1,91	1,74	1,64	1,58	1,51	1,44	1,38	1,35	1,31	1,27	1,24	1,23	1,21	1,20
$K_{\text{мин}}$ Метод	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,17	0,25	0,34	0,40	0,44	0,48	0,52	0,56	0,58	0,60	0,61

Как видно из таблицы, фактические коэффициенты неравномерности значительно отличаются от предлагаемых в СП.

Таким образом, при проектировании СВО необходимо исследовать, систематизировать фактические нагрузки и прогнозировать их на расчетный срок проектирования.

2.3. Учет неравномерности поступления стоков и времени их транспортировки в задачах моделирования и оптимизации СВО

Известно, что в безнапорных гидравлических системах изменение значения расхода транспортируемой жидкости в каком-либо из сечений происходит со скоростью движения жидкости, т.е. имеет место быть некоторое время до бегания, а для системы коллекторов – время запаздывание. Для протяженных систем водоотведения (как для промышленных, хозяйственно-бытовых, так и для ливневых) необходимо учитывать время до бегания, так как оно будет оказывать существенное влияние на выбор параметров сечения трубопровода. Процесс поступления сточных вод в систему водоотведения является сложным, неравномерным и стохастическим. Еще более сложным является процесс перемещения этих сточных вод в наклонном коллекторе. В идеализированной форме каждая частица обгоняет другую, трансформируя при этом друг друга. В реальности процесс трансформации таких частиц более сложный, чем изложенный выше подход. В теории мелкой воды [122, 152] наряду с решением уравнения Сен-Венана используется метод частиц. Этот метод содержит способы перестройки частиц при их движении по наклонной поверхности [31].

В СП 31.13330.2012 для учета неравномерности предлагается использовать общий коэффициент неравномерности ($K_{\text{общ}}$), хотя, как показано в работе [11], этот коэффициент лишь приближённо учитывает неравномерность движения стоков по коллекторам и трубопроводам, а его применение для расчета ливневой и общесплавной канализации приводит к ошибочным решениям. В связи с этим теоретические основы формирования режимов движения стоков в зависимости от

стахастики поступления стоков в систему водоотведения, изложенные в предыдущем параграфе, справедливы будут только для коротких коллекторов, для которых время движения стоков не значительно и им можно пренебречь. В процессе эксплуатации может на одном и том же участке наблюдаться режим маленьких скоростей и будут накапливаться отложения, в другие часы или дни может наблюдаться режим больших скоростей и эти отложения будут размываться или перемещаться по вдоль трубопровода.

Практически тот режим, на который рассчитывается система водоотведения никогда в реальной жизни не наблюдается [28].

2.4. Учет неопределенности водопотребления и водоотведения в задачах обоснования перспективных схем развития систем водоотведения

Следует констатировать, что численность проживающих людей в городах и населенных территориях с учетом миграционных процессов меняется по-разному [91]. В одних городах она увеличивается, в других уменьшается. Но практически во всех городах нашей страны удельное водопотребление уменьшается, и как долго будет происходить это процесс, никто не может ответить. Возникает некоторая неопределенность, которую описать вероятностными моделями весьма сложно, но можно воспользоваться моделями нечетких множеств и функции принадлежности [140] и интервальной математики [66]. Нечеткость выражается интервалом от 0 до 1.

Удельные нормы водопотребления, которые рекомендует СП 31.13330.2012 в диапазоне 220÷280 л/чел в сут. можно представить следующим образом:

$$\mu_a(x): X \rightarrow [0,1] ,$$

и графически отобразить в виде линейно треугольной, трапецеидальной и прямоугольной форм (см. рисунок 2.5 а,б,в).

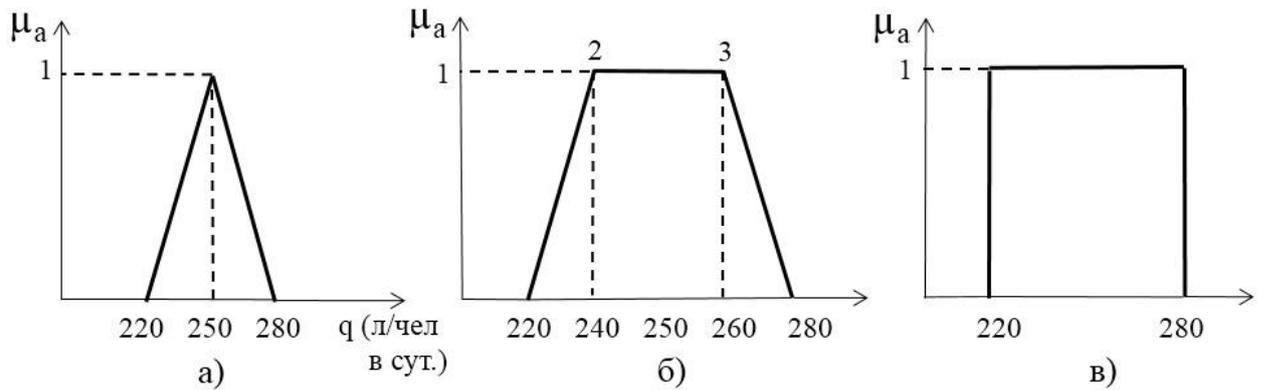


Рисунок 2.5 - Нечеткое представление удельного водопотребления в их границах 220-280 л/чел в сут

Функции принадлежности для рисунков 2.5, а, б, в можно записать:

$$\begin{aligned}
 q^a &= \{220| 0; 250| 1; 280| 0\}; \\
 q^b &= \{220| 0; 240| 1; 260| 1; 280| 0\}; \\
 q^c &= \{219,9| 0; 220| 1; 280| 1; 280,19| 0\},
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

q^a , q^b , q^c - нечеткое представление для прогнозных значений удельного водопотребления треугольной, трапецеидальной и прямоугольной формами. Согласно представленным записям расходы воды до величины 220 л/чел в сутки включительно имеют степень принадлежности 0, как и расходы больше 280 л/чел в сутки. Каждую форму представления нечеткого множества следует применять в различных интервалах времени. Например, руководствуясь нормами СП, принимаем в расчетах значения удельных расходов потребления воды в размере 220-280 л/чел в сутки. Пусть достигнутое на момент принятия решения удельное водопотребление составило 250 л/чел в сутки. Можно считать, что в ближайшее время значительных отклонений не произойдет и поэтому на первых этапах развития системы можно применять треугольную форму (рисунок 2.5,а). Если есть уверенность, что в перспективе диапазон доверия уменьшится, например, до значений 240-260 л/чел в сутки, то функцию принадлежности можно рассматривать в виде трапеции (рисунок 2.5,б). Если нет уверенности, то в виде прямоугольника (см. рис. 2.5,в). Срок реализации схемы водоотведения составляет 15 лет, а каждая из инвестиционных программ по 5 лет. Тогда в первой пятилетки можно взять треугольную форму распределения нагрузок, для второй – трапецеидальную, для

третьей – прямоугольную. Если есть уверенность, что водопотребление будет уменьшаться, то для 1,2,3 пятилеток можно брать треугольные формы распределения, такие, как представлены на рис.2.6.

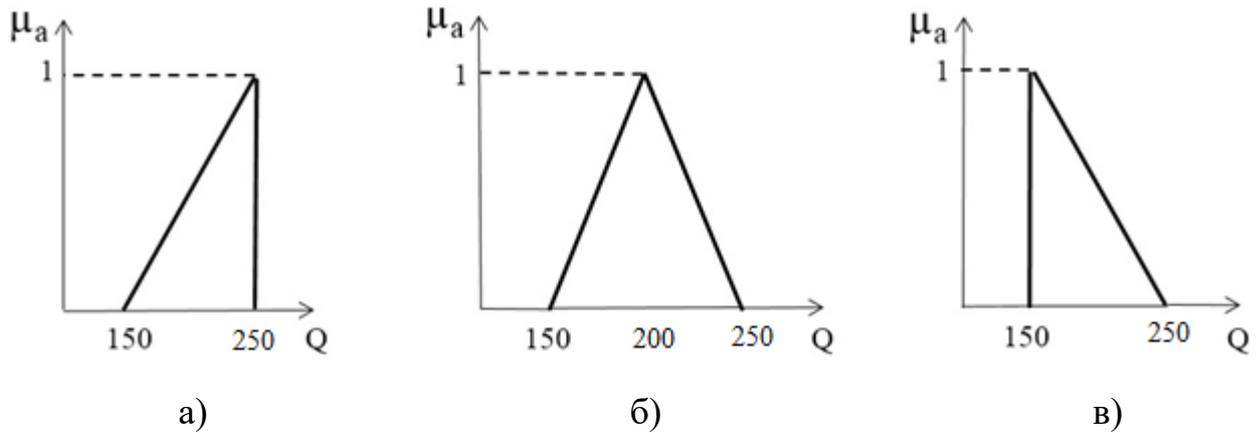


Рисунок 2.6 - Нечеткое представление удельного водопотребления в условиях его уменьшения

Функция принадлежности трактуется как дополнительный фактор «доверяю, или не доверяю». Учесть этот фактор предлагается путем умножения значения функции принадлежности на стоимость варианта развития. Такая процедура при оптимизации будет утяжелять или облегчать выбор решения. Фактор «доверяю, или не доверяю» предлагается определять по формуле:

$$k_y = 1 + (1 - \mu_a(x)) \quad (2.4)$$

Для выбора предпочтительного варианта строительства системы водоотведения требуется оценить все возможные риски. Риски будут возникать от того, что выбрали одно значение удельного водопотребления, а оно может оказаться больше или меньше этого значения. Риски не сложно выразить в виде инвестиций, которые потребуются до доведения параметров системы до значений фактического расхода.

2.5. Расчет и моделирование установившегося движения сточных вод

Установившегося режима движения жидкостей практически не существует. Но этот режим в практике проектирования принимается как основной и рассматривается как квазистационарный. Такой подход вполне оправдан, так как для решения дифференциальных уравнений неустановившегося движения сточных вод требуется много дополнительной информации, которой просто нет на этапе проектирования. Об этом уже говорилось в первой главе.

Рассмотрим случай установившегося равномерного движение сточных вод в коллекторе круглого сечения. В этом случае основной расчетной формулой является формула Анри Дарси [157]:

$$h_i = \lambda \frac{V_i}{2} \cdot \frac{l_i}{d_i} \cdot \rho \quad (2.5)$$

где $\lambda = f(K_s/d, Re)$, где K_s – эквивалентная шероховатость, d – диаметр трубопровода, Re – критерий Рейнольдса.

Для расчета потерь применяется формула А. Дарси, которая принимает вид:

$$h_i = (\lambda/(4 \cdot R)) \cdot (V_i^2/(2g)) \cdot l_i \quad (2.6)$$

Для самотечных систем водоотведения применяется формула Антонио Шези:

$$h_i = V_i / (c^2 \cdot R) \quad (2.7)$$

где

$$c = R^y / n \quad ; \quad y \approx 1,5 \cdot \sqrt{n} \quad (2.8)$$

здесь $R = \omega/x$ – гидравлический радиус.

При этом скорость V_n , должна быть больше следующей [193]:

$$V_n = 1,57 \cdot \sqrt[n_0]{R_e} \quad , \quad n_0 = 3,5 + 0,5Re. \quad (2.9)$$

В 1769 г А. Шези опубликовал следующее уравнение, которое сейчас является основным при расчете безнапорных трубопроводных систем [193]:

$$q = \omega \cdot v = \omega \cdot c \cdot \sqrt{R \cdot i}, \quad (2.10)$$

где: i – гидравлический уклон; q - расход жидкости, протекающей в единицу времени, в m^3/c ; ω – площадь живого сечения. Из уравнения (12) следует:

$$v = c \cdot \sqrt{R \cdot i}, \quad (2.11)$$

Коэффициент C определяется по формуле ирландского инженера Роберта Маннинга:

$$c = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}, \quad (2.12)$$

где: n – коэффициент шероховатости; R – гидравлический радиус;

$$c^6 = \frac{1}{n^6} \cdot R = \frac{R}{n^6}. \quad (2.13)$$

Вычисление наполнения в самотечных коллекторах:

$$\begin{cases} (Q_i/q_n + 0,22) \cdot \frac{d_i}{1,34} = h_{oi}, \text{ для } 0,25 \leq h_{oi}/d_i \leq 0,9; \\ \left(\frac{Q_i \cdot d_i^2}{2 \cdot q_n} \right)^{0,5} = h_o, 0 \leq h_{oi}/d_i < 0,25; \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} V_i = 1,27 \cdot \left(\frac{h_i}{d_i} \right)^{0,5} \cdot V_n, \text{ для } 0 \leq h_{oi}/d_i \leq 0,6; \\ V_i = V_n, \text{ для } 0,6 < h_{oi}/d_i \leq 1. \end{cases} \quad (2.15)$$

$$q/q_n = 1,34 \cdot h/d - 0,22, \text{ или } q/q_n = 1,34 \cdot k - 0,22, \text{ или } k = \frac{q/q_n + 0,22}{1,34}, \text{ или}$$

$$h = k \cdot d, \text{ и } \alpha = 2 \arccos(1 - 2k). \quad (2.16)$$

Гидравлический радиус:

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{d(\alpha - \sin \alpha)}{4\alpha} \quad (2.17)$$

Скорость движения жидкости:

$$v = c \cdot \sqrt{R \cdot i} = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}}.$$

2.6. Работа самотечных коллекторов в напорном режиме

Если фактический расход на самотечном участке сети будет больше расчетного значения, то даже на одном участке могут возникать различные режимы движения сточных вод, как напорные, так и безнапорные, и напорно-безнапорные (см. рисунки 2.7-2.10).

Более подробно эти режимы и условия их возникновения рассмотрены в работах [158, 161, 168, 170]. При этом потери напора вычисляются по формуле Дарси:

$$h_i = \lambda \frac{V^2}{d \cdot 2g} \cdot l_i = \lambda \frac{0,08 \cdot q^2}{d^5} \cdot l_i = S_{mp} \cdot q^2$$

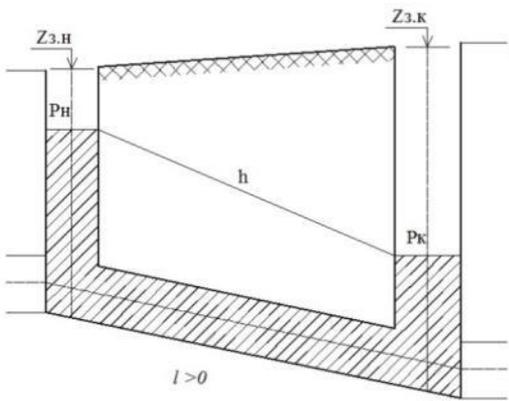


Рисунок 2.7 – Напорный режим без выхода стоков на поверхность земли

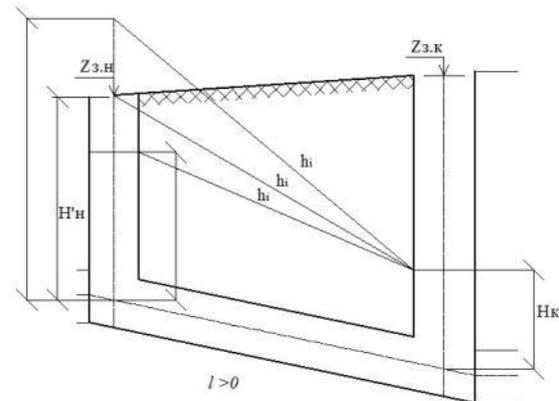


Рисунок 2.8 – Напорный режим с выходом стоков на поверхность земли

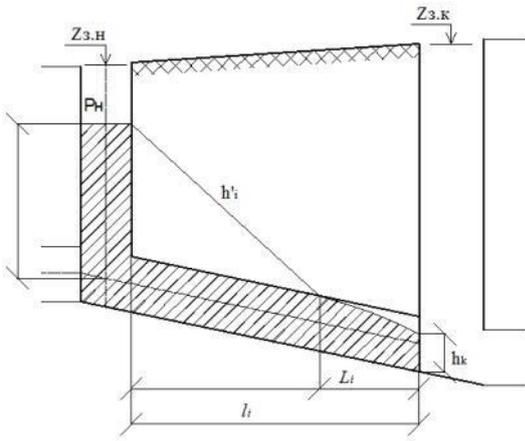


Рисунок 2.9 – Напорно- безнапорный режим

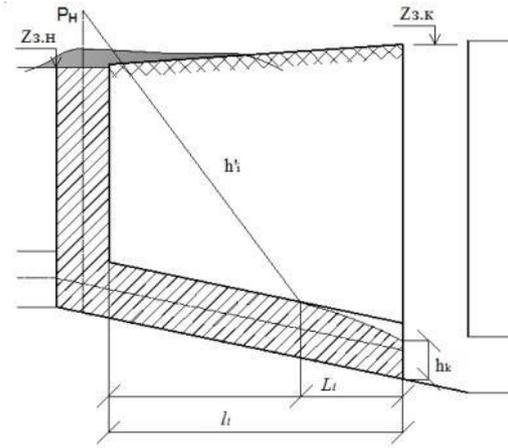


Рисунок 2.10 – Случай выхода стоков в начале участка сети

2.7. Расчет системы водоотведения в случае обратных уклонов

Из гидравлики известно, что при обратном уклоне $i < 0$ в самотечном канале, или трубопроводе будет всегда наблюдаться неравномерное установившееся движение сточной жидкости. Такое движения будет иметь место в конце расчетного участка перед перепадами, быстотоками, водобойными колодцами, шиберными устройствами и других сопрягающих сооружений. Неустановившееся равномерное движение будет характеризоваться различными формами кривых спада и подпора в зависимости от критической глубины:

$$h_{\text{кр}} = 1,023 \cdot d \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{h_0}{d} \right) / g \cdot \frac{q}{d^{2,5}}} \right)^{0,511} \quad (2.18)$$

при $i > 0$:

$$\frac{i \cdot L}{D} = \frac{h_2}{D} - \frac{h_1}{D} - \frac{h_0}{6D} \cdot \ln \frac{1 + \frac{h_2}{h_0} + \left(\frac{h_2}{h_0} \right)^2}{1 + \frac{h_1}{h_0} + \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{h_1}{h_0} \right)^2}{\left(1 - \frac{h_2}{h_0} \right)^2}$$

$$-\frac{h_0}{\sqrt{3}D} \left(\operatorname{arctg} \frac{2\frac{h_2}{h_0}+1}{\sqrt{3}} - \operatorname{arctg} \frac{2\frac{h_1}{h_0}+1}{\sqrt{3}} \right) + \frac{\left(\frac{h_{кр}}{D}\right)^4}{3\left(\frac{h_0}{D}\right)^3} \cdot \ln \left| \frac{\left(\frac{h_2}{D}\right)^3 \cdot 1 - \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^3}{\left(\frac{h_0}{D}\right)^3 \cdot 1 - \left(\frac{h_2}{h_0}\right)^3} \right|$$

при $i=0$:

$$2,3 \cdot \frac{Q^2 \cdot L}{K_a \cdot D} = \left(\frac{h_1}{D}\right)^4 - \left(\frac{h_2}{D}\right)^4 + 4\left(\frac{h_{кр}}{D}\right)^4 \cdot \ln \frac{\frac{h_2}{D}}{\frac{h_1}{D}}, \quad (2.19)$$

при $i < 0$:

$$\begin{aligned} \frac{|i| \cdot L}{D} = & \frac{h_1}{D} - \frac{h_2}{D} + \frac{h_0}{6D} \cdot \ln \frac{\left(1 + \frac{h_2}{h_0}\right)^2 \cdot 1 - \frac{h_1}{h_0} + \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^2}{\left(1 + \frac{h_1}{h_0}\right)^2 \cdot 1 - \frac{h_2}{h_0} + \left(\frac{h_2}{h_0}\right)^2} + \\ & + \frac{h_0}{\sqrt{3}D} \left(\operatorname{arctg} \frac{2\frac{h_2}{h_0}-1}{\sqrt{3}} - \operatorname{arctg} \frac{2\frac{h_1}{h_0}+1}{\sqrt{3}} \right) + \frac{\left(\frac{h_{кр}}{D}\right)^4}{3\left(\frac{h_0}{D}\right)^3} \cdot \ln \frac{\left(\frac{h_2}{D}\right)^3 \cdot 1 + \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^3}{\left(\frac{h_1}{D}\right)^3 \cdot 1 + \left(\frac{h_2}{h_0}\right)^3} \end{aligned} \quad (2.20)$$

На основе (2.18), (2.20) можно рассчитать кривые сопряжения.

Этапы расчета:

1. С учетом объемов, поступающих сточных вод в систему водоотведения, рассчитываются по каждому участку расчетной схемы средние секундные и максимальные расходы транспортируемой сточной жидкости.

2. Вычисляется расход стоков при полном заполнении коллектора:

$$e_{ij} = q_n = \frac{0,314}{N} \cdot d^{2,667} \cdot I^{0,5}, \quad (2.21)$$

3. При $x_{ij} \leq \bar{v}_{ij}$, - самотечный режим. В этом случае определяются величины наполнения в трубопроводах, скорости движения стоков.

4. При $x_{ij} \geq \bar{v}_{ij}$, установится напорный режим. Все многообразие установившихся напорных, безнапорных, напорно-безнапорных режимов может иметь место в протяженном коллекторе (смотри рисунок 2.11). В этом случае, начиная с узла сброса сточных вод в направлении против потока, рассчитывается и строится линия свободной поверхности стоков.

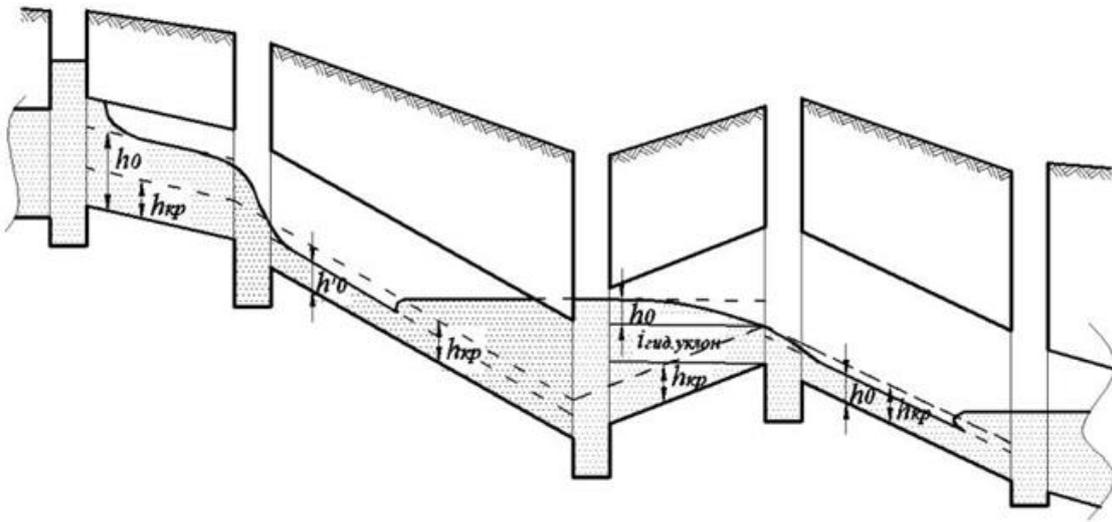
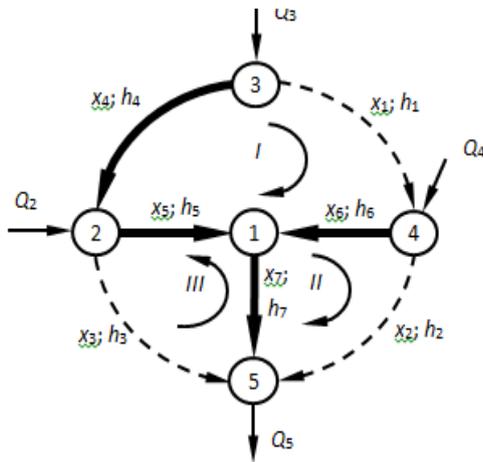


Рисунок 2.11 – Кривые сопряжения

2.8. Формирование математической модели гидравлической цепи системы водоотведения

Рассмотрим пример, представленный на рисунке 2.12, Для которого матрица смежности участков сети и узлов будет следующей:



$j \setminus i$	1	2	3	4	5	6	7
1					-1	-1	+1
2			+1	-1	+1		
3	+1			+1			
4	-1	+1				+1	
5		-1	-1				-1

Рисунок 2.12 – Кольцевая (или избыточная) схема сети водоотведения

Применение матрицы A позволит записать уравнение материальных балансов по всем узлам расчетной схемы следующим образом:

$$A * x = Q, \quad (2.22)$$

При этом $x = (x_1, \dots, x_n)^T$; $Q = (Q_1, \dots, Q_m)^T$, где вектор расходов по участкам сети и узловых нагрузок по узлам сети (отборов, притоков).

Распишем это уравнение для схемы, представленной на рисунке 2.14.

$$\begin{array}{c}
 A \\
 \begin{array}{c|cccccc|}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 \hline
 1 & & & & & -1 & -1 & 1 \\
 2 & & & 1 & -1 & 1 & & \\
 3 & 1 & & & 1 & & & \\
 4 & -1 & 1 & & & & 1 & \\
 5 & & -1 & -1 & & & & -1 \\
 \hline
 & x_1 \\
 & x_2 \\
 & x_3 \\
 & x_4 \\
 & x_5 \\
 & x_6 \\
 & x_7
 \end{array}
 \end{array}
 \cdot
 \begin{array}{c}
 x \\
 Q
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 0 \\
 +Q_2 \\
 +Q_3 \\
 +Q_4 \\
 -Q_5
 \end{array}, \text{ или}$$

$$\begin{cases}
 -x_5 - x_6 + x_7 = 0; \\
 x_3 - x_4 + x_5 = Q_2; \\
 x_1 + x_4 = Q_3; \\
 -x_1 + x_2 + x_6 = Q_4; \\
 -x_2 - x_3 - x_7 = Q_5.
 \end{cases}$$

Связь между пьезометрическими уровнями в узлах (P) и их перепадами (Y) по участкам сети в теории гидравлических сетей принято записывать в следующей матричной форме:

$$A^T \cdot P = Y \quad (2.23)$$

где T – знак транспортирования; P – вектор пьезометрических уровней в узлах схемы.

Для схемы, представленной на рисунке 2.12:

	A^T						P		Y		
	1	2	3	4	5						
1			+1	-1		·	=	Y_1	{	$P_1 - P_4 = Y_1$	
2				+1	-1			P_1		Y_2	$P_4 - P_5 = Y_2$
3		+1			-1			P_2		Y_3	$P_2 - P_5 = Y_3$
4		-1						P_3		Y_4	$P_3 - P_2 = Y_4$
5	-1	+1						P_4		Y_5	$P_2 - P_1 = Y_5$
6	-1			+1				P_5		Y_6	$P_4 - P_1 = Y_6$
7	+1			-1						Y_7	$P_1 - P_5 = Y_7$

Полученная система уравнений не доопределена относительно значений пьезометрических давлений в узлах. Зададимся давлением в источнике (насосной станции). Для сети, представленной на рисунке 2.14, в качестве заданного примем пьезометрический напор в узле 3:

$$I \begin{cases} Y_1 + Y_6 - Y_5 - Y_4 = 0 \\ Y_2 - Y_7 - Y_6 = 0 \\ Y_3 - Y_5 - Y_7 = 0, \end{cases} \quad (2.24)$$

$$II \begin{cases} P_1 = P_{3^*} - Y_4 - Y_5 \\ P_2 = P_{3^*} - Y_4 \\ P_4 = P_{3^*} - Y_4 - Y_5 + Y_6 \\ P_5 = P_{3^*} - Y_4 - Y_5 + Y_7. \end{cases} \quad (2.25)$$

$$BY = 0, \quad (2.26)$$

Уравнения (2.55) представим в векторно-матричной форме в виде:

где B – матрица контуров ($B = |b_{ri}|_n^c$, c – количество контуров), которая фиксирует совпадения выбранной базисной системы контуров и ветвей схемы,

Для системы водоотведения, в соответствии с рисунком 2.12, формула (2.57) имеет следующий вид:

$$\begin{array}{c}
 B \\
 \begin{array}{c|ccccccc}
 r \setminus i & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 \hline
 1 & 1 & & & -1 & -1 & 1 & \\
 2 & & 1 & & & & -1 & -1 \\
 3 & & & 1 & & -1 & & -1
 \end{array}
 \end{array}
 \cdot
 \begin{array}{c}
 Y \\
 \begin{array}{c}
 Y_1 \\
 Y_2 \\
 Y_3 \\
 Y_4 \\
 Y_5 \\
 Y_6 \\
 Y_7
 \end{array}
 \end{array}
 = 0.$$

Уравнения (2.25) представим в виде:

$$P = e \cdot P_{j^*} - R_g \cdot Y,$$

Выбранное (базисное) дерево показано на рисунке 2.14 жирными линиями и оно однозначно определяет структуру и ориентацию ветвей в матрицы B . Для примера в соответствии с рисунком 2.14 данное выражение имеет следующий вид:

$$\begin{array}{c}
 P_1 \\
 P_2 \\
 P_3 \\
 P_4
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 1 \\
 1 \\
 1 \\
 1
 \end{array}
 \cdot P_{3^*} -
 \begin{array}{c|cccc}
 j \setminus i & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 \hline
 1 & 1 & 1 & & \\
 2 & 1 & & & \\
 4 & 1 & 1 & -1 & \\
 5 & 1 & 1 & & +1
 \end{array}
 \cdot
 \begin{array}{c}
 Y_4 \\
 Y_5 \\
 Y_6 \\
 Y_7
 \end{array}$$

Очевидно, что для систем водоотведения разветвленной (древовидной) структуры первая группа будет отсутствовать.

Если умножить правую и левую части уравнения (2.54) на вектор участковых расходов (x), то можно получить следующую систему уравнений:

$$(P_{3^*} - P_4) \cdot x_1 = Y_1 \cdot x_1;$$

$$(P_4 - P_5) \cdot x_2 = Y_2 \cdot x_2;$$

$$(P_2 - P_5) \cdot x_3 = Y_3 \cdot x_3;$$

$$(P_{3^*} - P_2) \cdot x_4 = Y_4 \cdot x_4;$$

$$(P_2 - P_1) \cdot x_5 = Y_5 \cdot x_5;$$

$$(P_4 - P_5) \cdot x_6 = Y_6 \cdot x_6;$$

$$(P_1 - P_5) \cdot x_7 = Y_7 \cdot x_7.$$

Раскрывая скобки, просуммируем перечисленные уравнения:

$$P_{3^*} \cdot (x_1 + x_4) + P_4 \cdot (-x_1 + x_2 + x_6) + P_5 \cdot (-x_2 - x_3 - x) + P_2 \cdot (x_3 - x_4 - x_5) + P_1 \cdot (x_5 - x_6 - x_7) = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot x.$$

Нетрудно заметить, что $x_1 + x_4 = Q_3$; $-x_1 + x_2 + x_6 = Q_4$ и т. д.

В итоге получаем следующее выражение:

$$\sum_{j=1}^m P_j \cdot Q_j = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot x_i.,$$

Которое можно трактовать как закон сохранения энергии для гидравлических сетей.

Введем понятия пассивные, активные и фиктивные ветви гидравлической цепи и под ними будем понимать следующее:

- пассивные моделируют работу реальных напорных и безнапорных трубопроводных участки сети,
- активные моделируют насосные и дроссельные подстанции, перепадные сооружения, быстротоки,

- фиктивные моделируют поступления стоков, работу регулирующих сооружений, совместную работу насосных станций (источников) на общую сеть, выход стоков на поверхность земли, модельные участки транспортной сети.

Возникновение напорного режим на одном участке может изменить режим движения сточных вод на других участках сети.

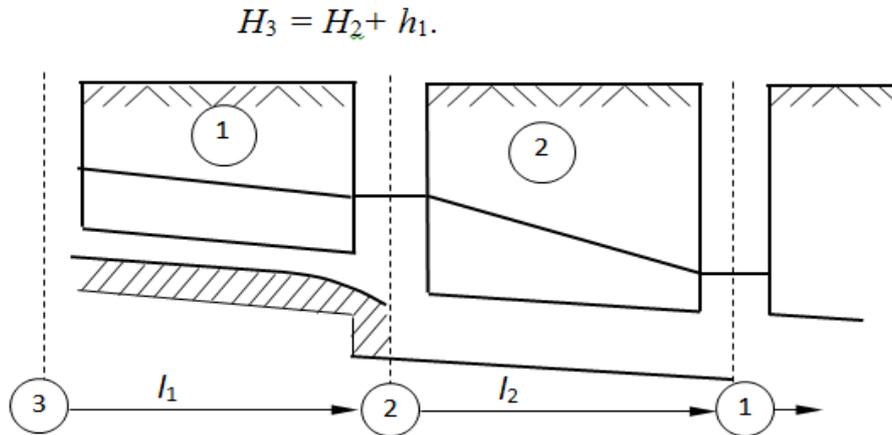


Рисунок 2.13 – Распространение напорного режима против движения сточных вод

Величину этого расхода (Δq) можно определить из следующего уравнения:

$$z_4 - H_1 = \sum_{i=1}^3 h_i = S_1^{mp} (q_1 - \Delta q)^2 + S_2^{mp} (q_2 - \Delta q)^2 + S_3^{mp} (q_3 - \Delta q)^2, \quad (2.27)$$

В уравнении (2.27) неизвестными величинами являются H_1 и Δq и вычисляются следующим образом. В начале принимается $H_{1,i}^{(k)} = H_1^{(k)}$, затем из формулы (2.27) определяется значение Δq_i , и снова вычисляется $H_{1,i+1}^{(k)}$ по формуле (2.27), затем определяется Δq_{i+1} и так далее, до выполнения условия $|\Delta q_i - \Delta q_{i+1}| \leq \xi$.

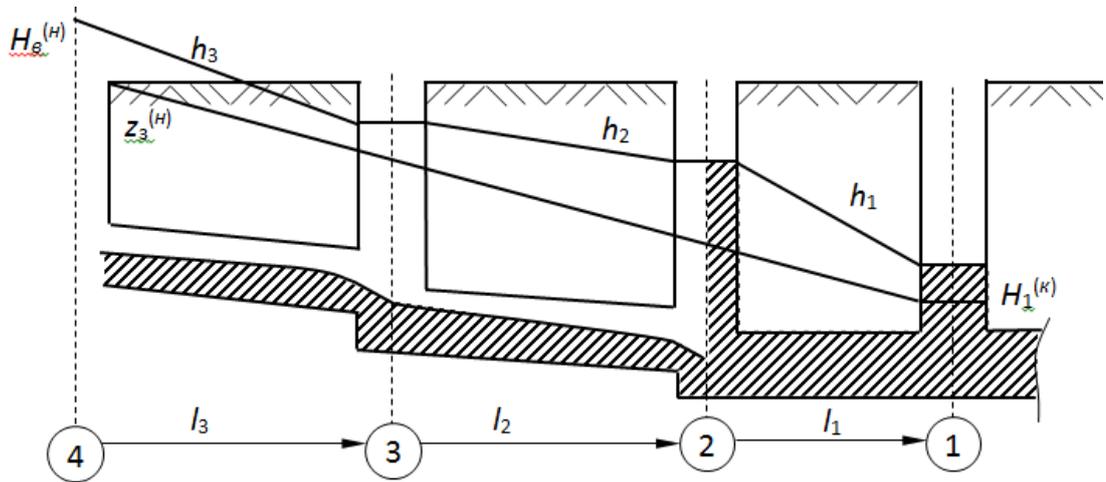


Рисунок 2.14 – Формирование подпора по участкам сети

Можно применить поэтапную процедуру определения Δq и в итоге вычислить пропускную способность системы водоотведения. Такой подход и алгоритм «движения по потоку» и «против потока» представлен на рисунке 2.15. Для сложных систем водоотведения с КНС и резервуарами такой подход не работает.

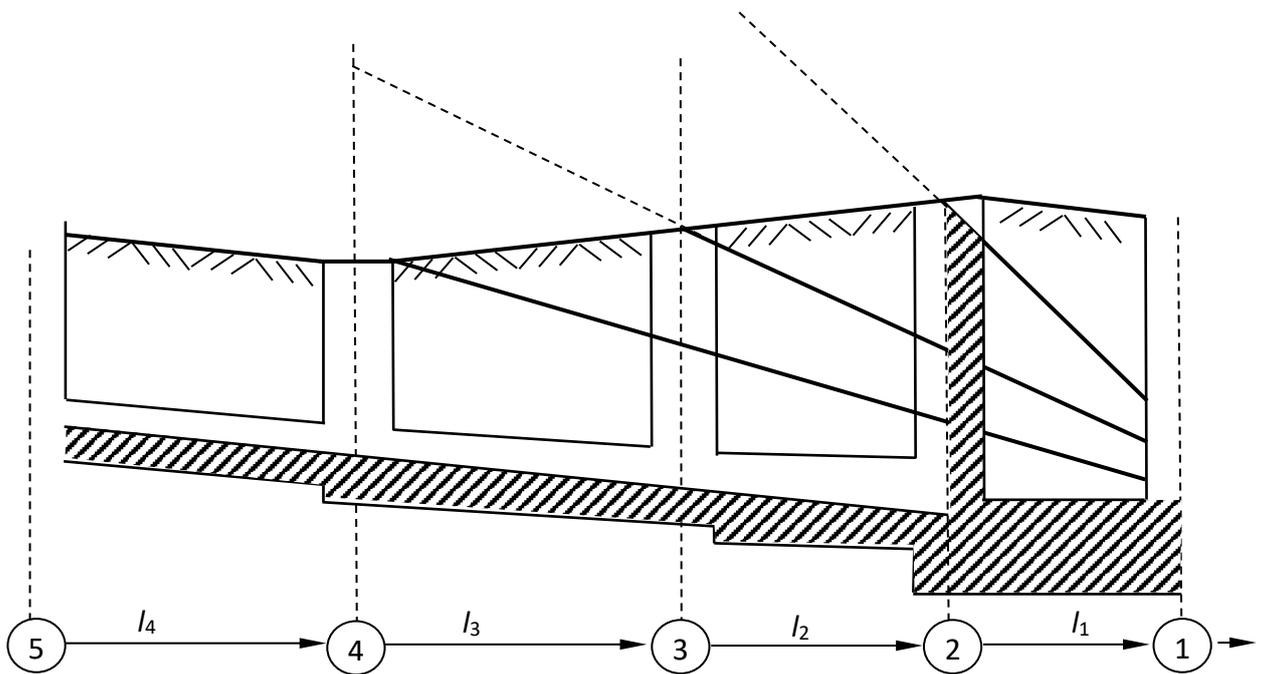


Рисунок 2.15 – Иллюстрация к определению максимальной пропускной способности самотечной СВО

Не сложно убедиться, что уравнение (2,58) включает условия материального и энергетического баланса. Следовательно, системы водоотведения можно моделировать замкнутыми гидравлическими цепями и для этого использовать

методы теории гидравлических цепей [107]. Опыт моделирования подобных гидравлических систем имеется и представлен в работах [137, 157, 158, 160].

Действующий напор каждой фиктивной ветви будет равен:

$$h_i = H_j, \quad i \in I_3.$$

Где H_j - геодезические отметки узла входа потоков сточной жидкости в систему водоотведения.

Если стоки поступают с поверхности земли, переполняя колодец, то:

$$h_i = z_j, \quad i \in I_3.$$

Если в колодце устанавливается подпор на уровне H_j^* , то $h_i = H_j^*$. Например, для исследуемого варианта, гидравлическая цепь представлена на рисунке 2.16, б.

Пассивные ветви обозначены сплошными, а фиктивные – штриховыми линиями.

Для схемы (рис.2.16) справедливы уравнения:

$$A \cdot q = 0 \tag{2.28}$$

$$A^T P = y; \quad y_i = h_i - H_i \tag{2.29}$$

Здесь уравнения представлены в векторно-матричной форме.

Рассмотрим данную систему уравнений применительно к исследуемому примеру в соответствии с рисунком 2.16.

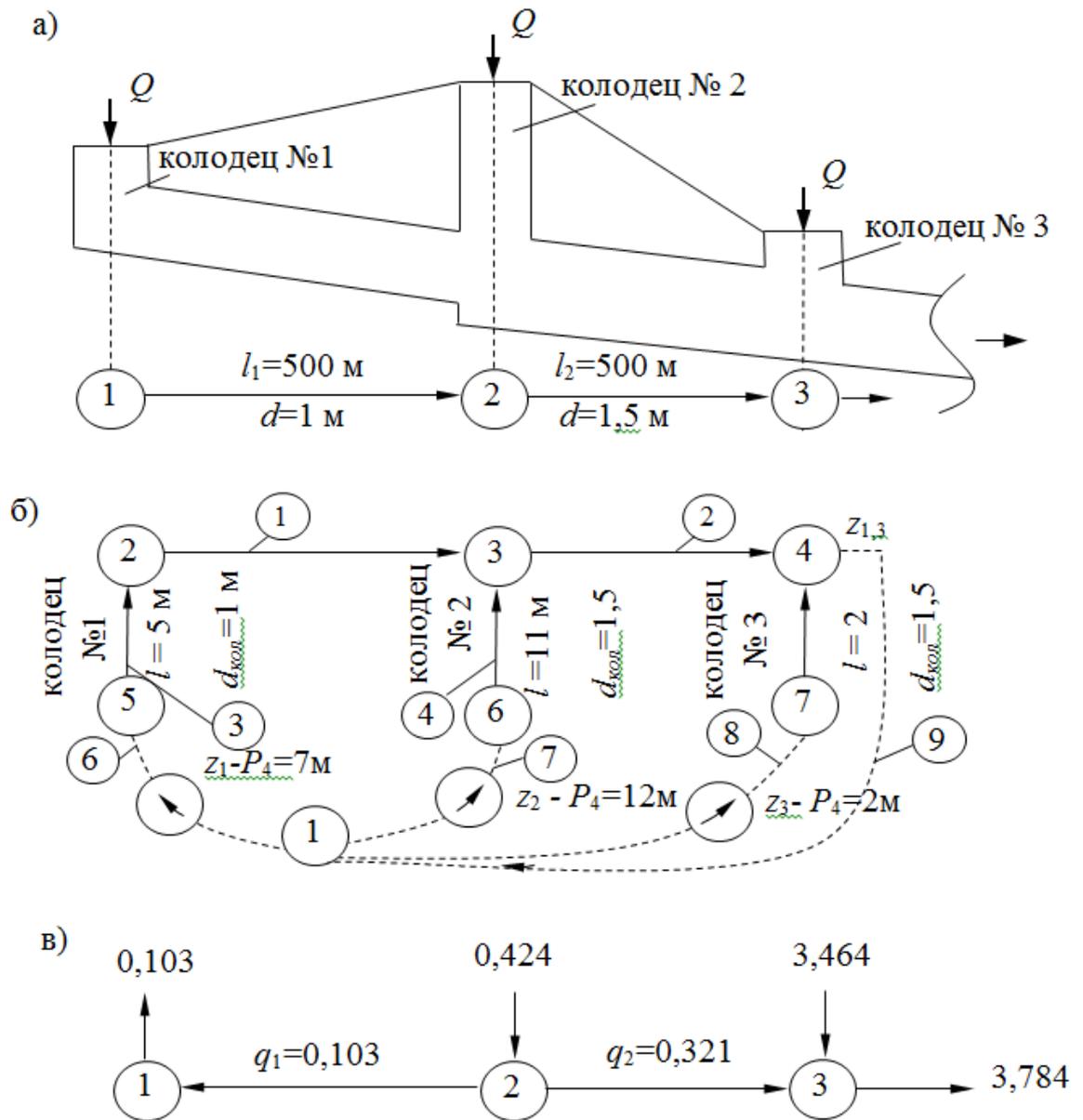


Рисунок 2.16 – Иллюстрация к расчету СВО с учетом выхода стоков на поверхность земли

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} i \\ \diagdown \end{array} \\
 A = \begin{array}{c|cccccccc|c}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & q_1 \\
 \hline
 1 & & & & & & 1 & 1 & 1 & -1 & q_2 \\
 \hline
 2 & 1 & & -1 & & & & & & & q_3 \\
 \hline
 3 & -1 & 1 & & -1 & & & & & & q_4 \\
 \hline
 4 & & -1 & & & -1 & & & & 1 & q_5 \\
 \hline
 5 & & & 1 & & & -1 & & & & q_6 \\
 \hline
 6 & & & & 1 & & & -1 & & & q_7 \\
 \hline
 7 & & & & & 1 & & & -1 & & q_8 \\
 \hline
 & & & & & & & & & & q_9
 \end{array}
 \cdot \begin{array}{c} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \\ q_8 \\ q_9 \end{array} = \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array};
 \end{array}$$

ИЛИ

$$\begin{cases}
 q_6 + q_7 + q_8 - q_9 = 0; \\
 q_1 - q_3 = 0; \\
 -q_1 + q_2 - q_4 = 0; \\
 -q_2 - q_5 + q_9 = 0; \\
 q_3 - q_6 = 0; \\
 q_4 - q_7 = 0; \\
 q_5 - q_8 = 0;
 \end{cases} \quad (2.61)$$

Вторая группа уравнений (2.61) с учетом транспонированной матрицы A запишется:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} j \\ \diagdown \end{array} \\
 A^T \begin{array}{c|cccccc|c}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 \hline
 1 & & 1 & -1 & & & & \\
 \hline
 2 & & & 1 & -1 & & & \\
 \hline
 3 & & -1 & & & 1 & & \\
 \hline
 4 & & & -1 & & & 1 & \\
 \hline
 5 & & & & -1 & & & 1 \\
 \hline
 6 & 1 & & & & -1 & & \\
 \hline
 7 & 1 & & & & & -1 & \\
 \hline
 8 & 1 & & & & & & -1 \\
 \hline
 9 & -1 & & & 1 & & &
 \end{array}
 \cdot \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \end{array} = \begin{array}{c} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \end{array}; \quad \begin{cases}
 P_2 - P_3 = h_1; \\
 P_3 - P_4 = h_2; \\
 -P_2 + P_5 = h_3; \\
 -P_3 + P_6 = h_4; \\
 -P_4 + P_7 = h_5; \\
 P_1 - P_5 = h_6 = 7; \\
 P_1 - P_6 = h_7 + 12; \\
 P_1 - P_7 = h_8 = 2; \\
 -P_1 - P_4 = h_9 = 0;
 \end{cases}
 \end{array}$$

(2.31)

адаптировать методы теории гидравлических цепей по примеру с водопроводными сетями [137,158].

С учетом вышеизложенного предлагается следующая методика моделирования СВО.

1. Определяются пассивные, активные и фиктивные участки сети, которые замыкаются на общий узел с атмосферным давлением и строится замкнутая циклическая схема.

2. Для циклической схемы рассчитываются расходы сточной жидкости по каждой ветви (решается задача потокораспределения (2.32) - (2.33)),

3. Анализируются величины расходов и направления их движения на активных, пассивных и фиктивных ветвях расчетной схемы.

7. Фиктивные ветви, на которых расход оказался больше расчетных величин поступления сточных вод в систему водоотведения, удаляются из расчетной схемы, а расходы поступления сточных вод в систему водоотведения переходят в разряд фиксированных.

8. Для трансформированной таким образом схемы рассчитываются расходы сточной жидкости по каждой ветви (решается задача (2.32) - (2.33)).

Рассмотрим исследуемый пример. В соответствии с рисунком 2.18,а сбросы в колодцах следующие: колодец 1 – 4,0 м³/с; колодец 2 – 0,4 м³/с; колодец 3 – 4,0 м³/с. В результате работы методики 1-8 получены следующие результаты, представленные на рис.2.18, в.

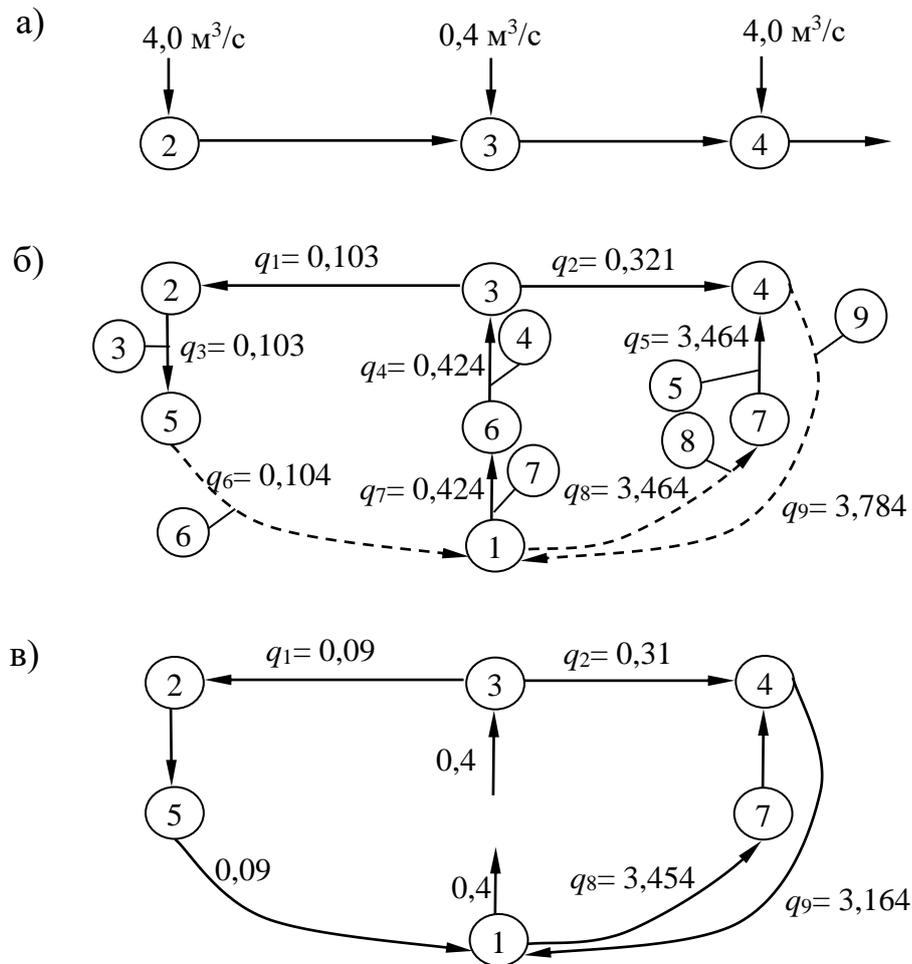


Рисунок 2.18 - Моделирования распределения потоков в СВО

В итоге, разработан и предлагается новый подход для расчета режимов работы СВО.

Часто наблюдается переполнение приемных резервуаров КНС за счет работы самотечного коллектора в напорном режиме. Такие ситуации можно моделировать, используя вышеизложенную методику. На рисунке 2.19,а и в показаны этапы формирования циклической схемы.

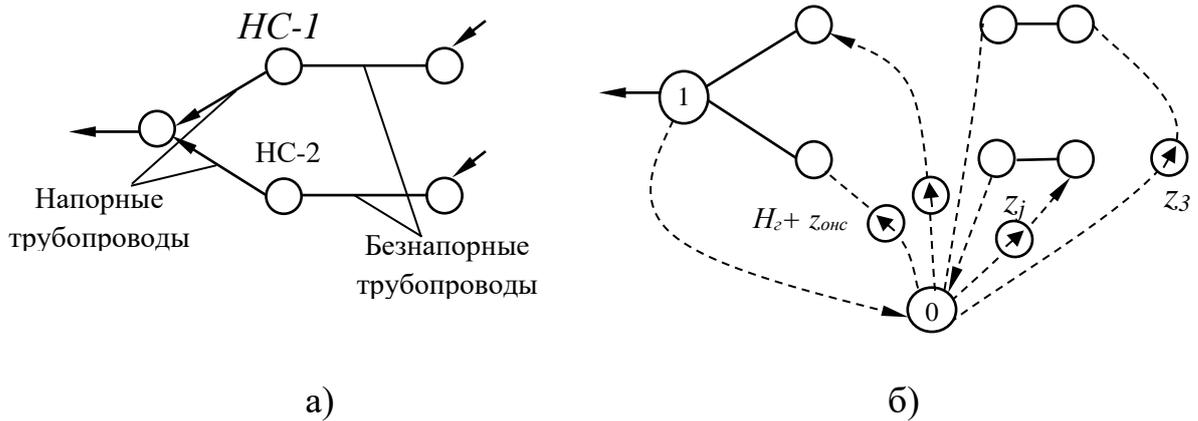


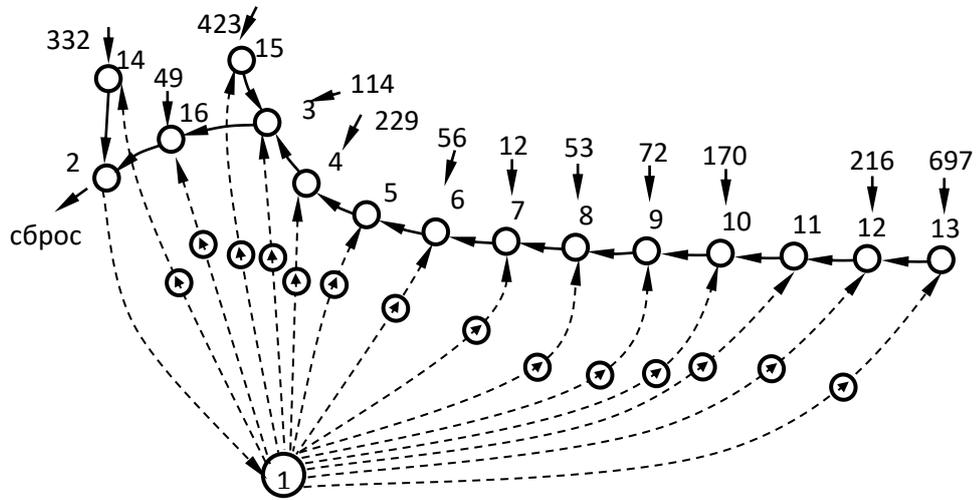
Рисунок 2.19 - Моделирование работы КНС

Организацию совместной работы системы напорных и безнапорных коллекторов, насосных агрегатов, приемных и регулирующих резервуаров можно моделировать на основе предлагаемой в работе методологии их моделирования. В основе лежит принцип материального и энергетического баланса объемов поступающих и уходящих сточных вод в определенном временном интервале.

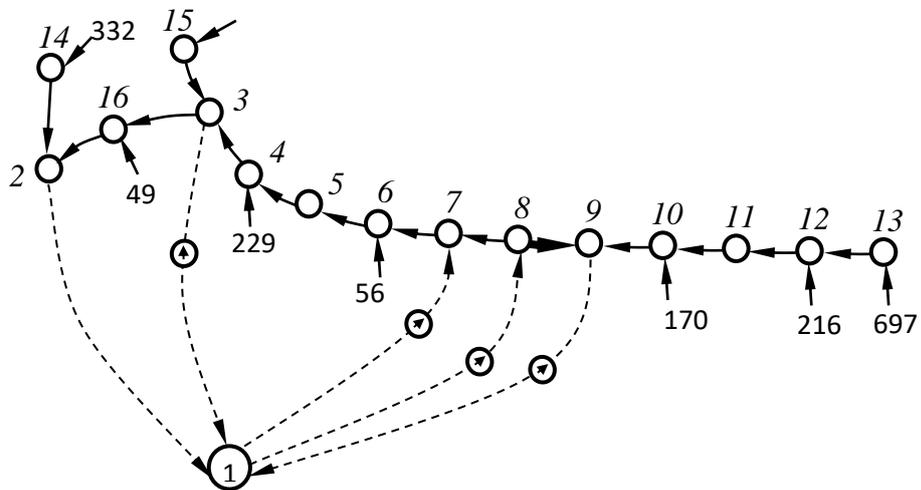
2.9. Моделирование и расчет ливневой канализации

Система ливневой канализации (ЛК) рассчитывается на основе СП 31.13330.2012 и методических указаний ВНИИ ВОДГЕО по методу предельных интенсивностей. В настоящих диссертационных исследованиях показано, что принятие работы коллекторов полным сечением при пропуске расходов для расчетной интенсивности дождя приводит к подпору сети и выходу стоков на поверхность земли. В качестве иллюстрации произведем расчет ливневой канализации м-на Юбилейный города Иркутска, которая была запроектирована по методике, изложенной в СП 31.13330.2012. Эта ливневая канализация и ее циклическая схема представлены на рисунке 2.20, а. После проведения трех итераций расчёта оказалось, что из колодцев 2,3,9 стоки будут выходить на поверхность земли, а на участке 8-9 стоки будут перемещаться в обратном направлении (см. рисунок 2.20, д).

Считаем, что существующую технология расчета ЛК необходимо дополнит гидравлическими расчетами по вышеизложенной методике.



a)



б)

Рисунок 2.20 - Гидравлический расчет ливневой канализации м-на Юбилейный

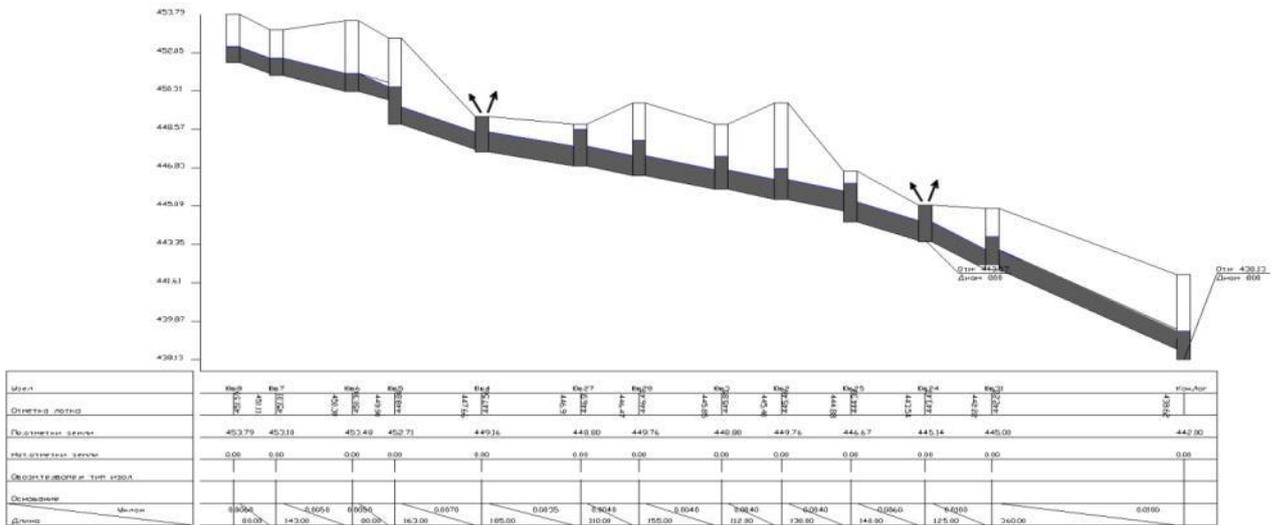
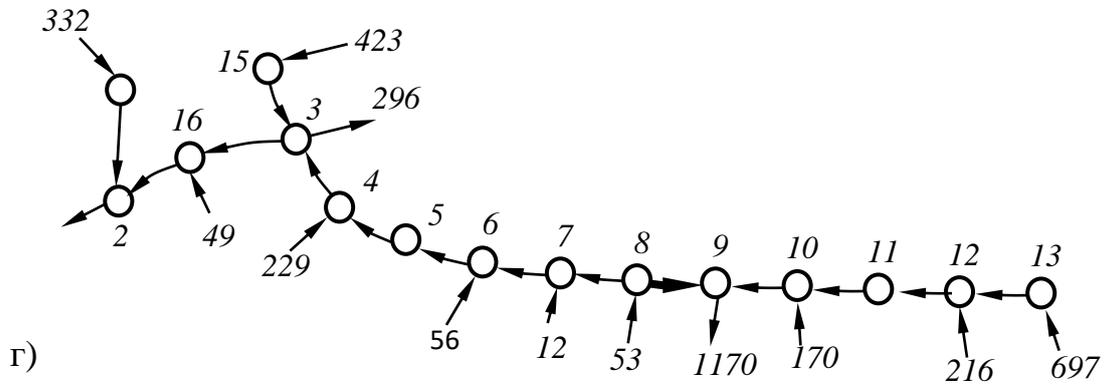
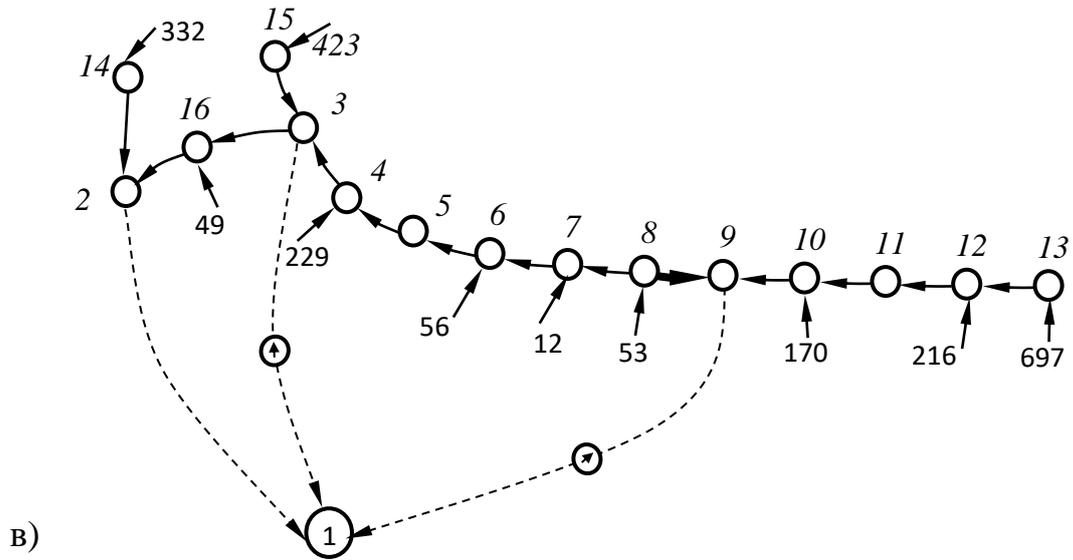


Рисунок 2.20 - Гидравлический расчет ливневой канализации м-на Юбилейный.

Окончание

Наиболее опасными участками для ливневой канализации являются территории с пониженным рельефом местности, так как в этих местах чаще всего наблюдается выход стоков на поверхность земли. В этих местах рекомендуется устанавливать специальные устройства, блокирующие выход стоков на поверхность земли [162, 167, 171, 177, 179, 183]. Одно из таких устройств представлено на рисунке 2.21.

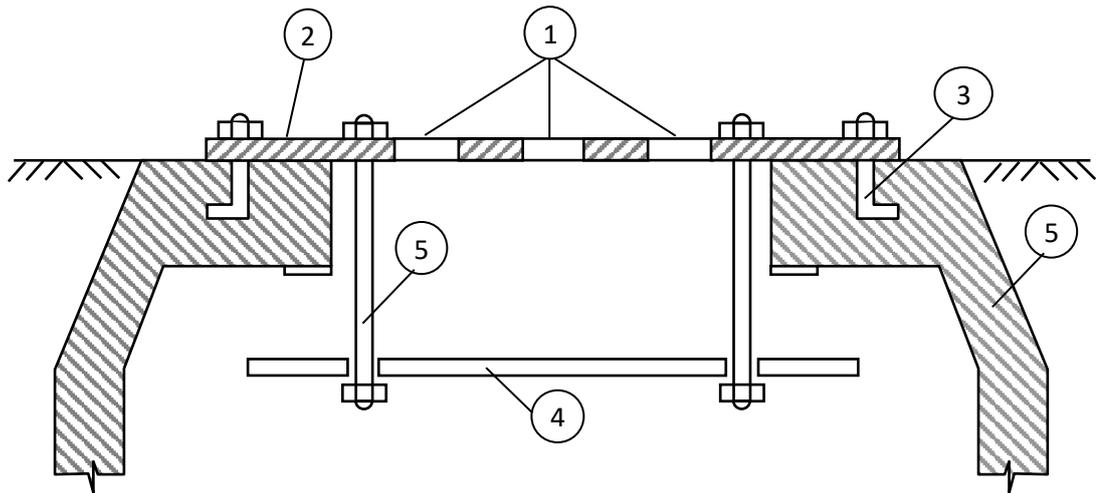
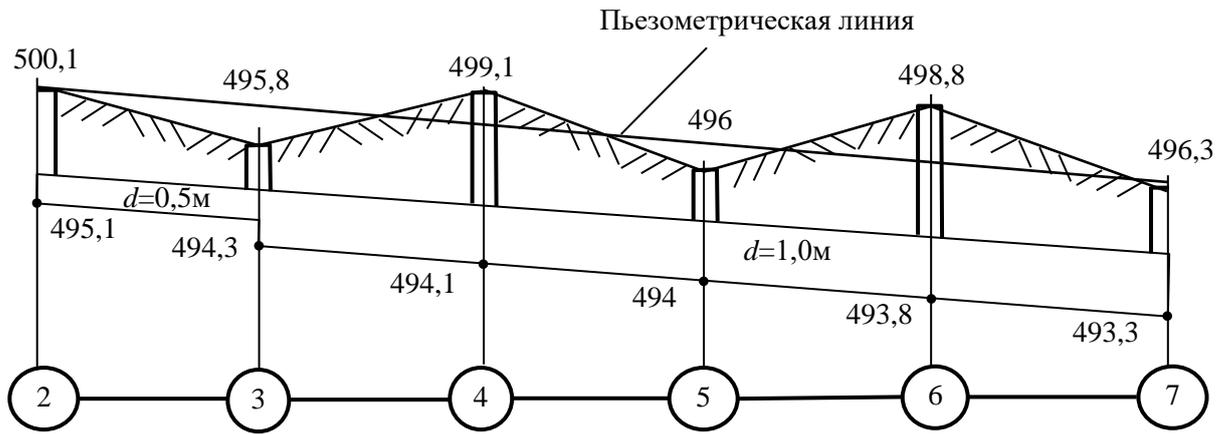
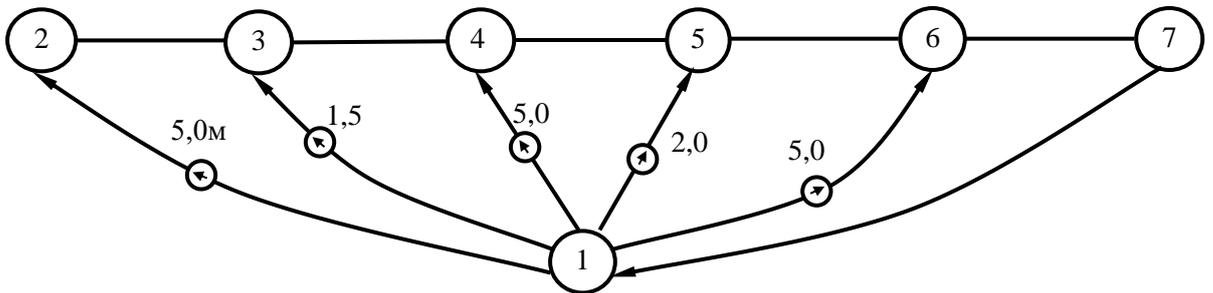


Рисунок 2.21 - Устройство для герметизации водоприемного колодца: – дождеприемные решетки; 2 – крышка люка; 3 – анкера; 4 – подвижный запорный диск; 5 – направляющие для подвижного диска

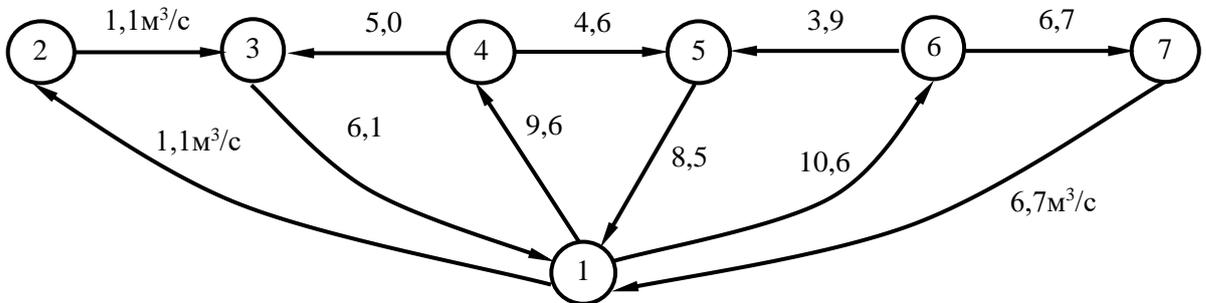
Принцип действия данного устройства такой же, как и обратного клапана. Возникает вопрос ставить такие устройства в каждом колодце в пониженной местности, или в каких-то отдельных колодцах, эту проблему можно решить с помощью предлагаемой в работе методике [179]. Для этого надо провести серию расчетов по вышеизложенной методике и определить режим движения ливневых сточных вод такой, как представлен на рисунке 2.22, а. В этом случае, система водоотведения пропустит расчетный расход только в напорном режиме, причем в колодцах 3 и 5 напор будет больше, чем отметки земли. На рисунке 2.22, в представлены результаты расчета, согласно которым потоки на фиктивных ветвях 1-3 и 1-5 перевернулись. Для нашего примера эта величины 1,5 и 6,7 м³/с. Устанавливаем в этих узлах блокирующие устройства.



а)



б)



в)

Рисунок 2.22 - Определение максимальной производительности системы водоотведения поверхностных стоков

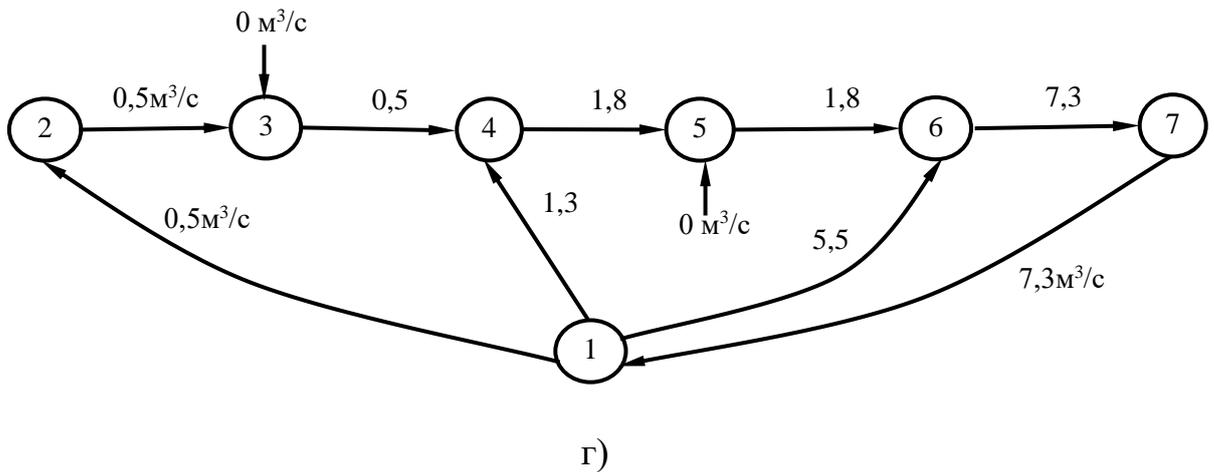


Рисунок 2.22 – Определение максимальной производительности системы водоотведения поверхностных стоков. Окончание

Если не устраивать обратные клапана, то произойдет подтопление территории и уровень воды будет соответствовать пьезометрической линии в соответствии с рисунком 2.22, а. Глубина сточных вод над колодцем 3 составит 3,5 м, а над колодцем 5 – 3 м.

2.10. Обнаружение и локализация аварийных ситуаций

Скорости в самотечных коллекторах должны быть больше, чем заиливающие и меньше чем размывающие. Часто эти условия нарушаются. Отдельные коллектора изнашиваются, в других происходит накопления осадка. Осадок уменьшает живое сечение и приводит к напорному режиму. В изношенной части сети образуются свищи и утечки сточных вод в грунт. Обнаружить такие участки невозможно без дополнительных обследований. Необходима система контроля режимов работы системы водоотведения, которая должна состоять из двух подсистем: фиксации параметров текущего режима (фактические напоры, наполнение, расходы на каждом участке сети); расчет параметров режима (расчетные напоры, наполнение, расходы на каждом участке сети). Если на каких-то участках фактические параметры отличаются от расчетных, то констатируется авария, или засорение. Далее, работает подсистема распознавания и

идентификации режима, которая выявляет где, когда и на сколько засорился трубопровод. Засорение или аварию можно так же заранее смоделировать и после ее появления извлечь из базы знания «домашнюю заготовку».

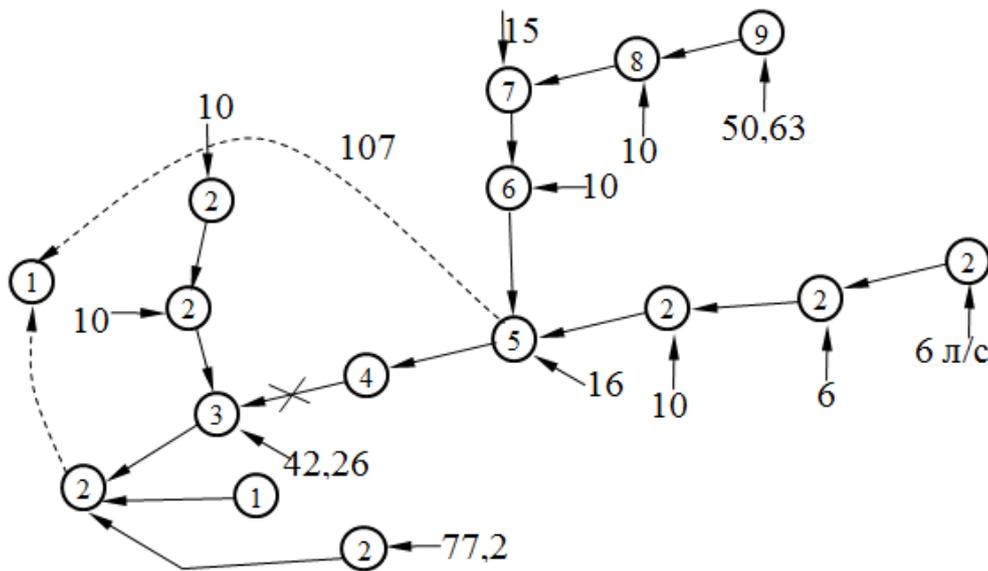
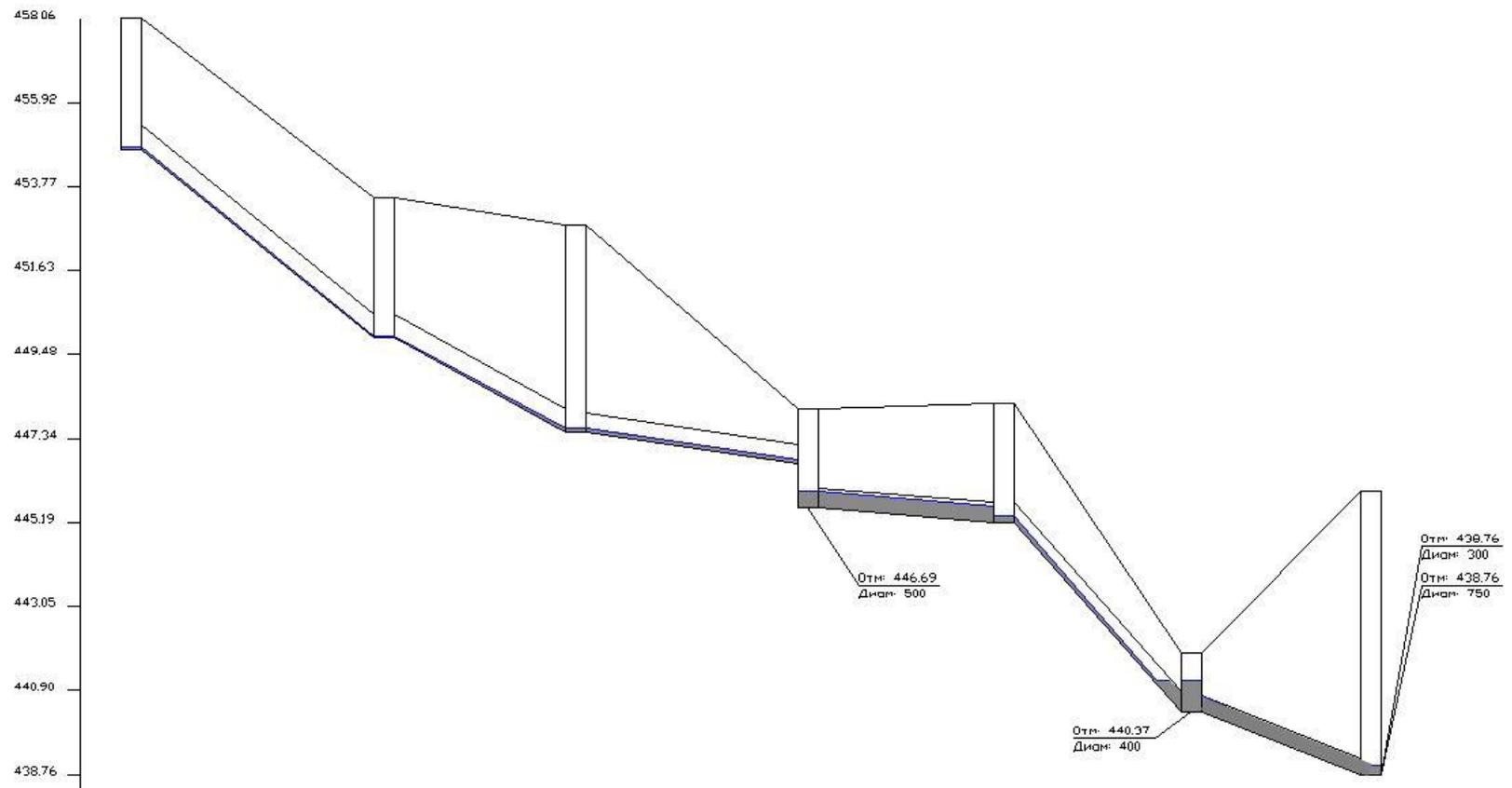


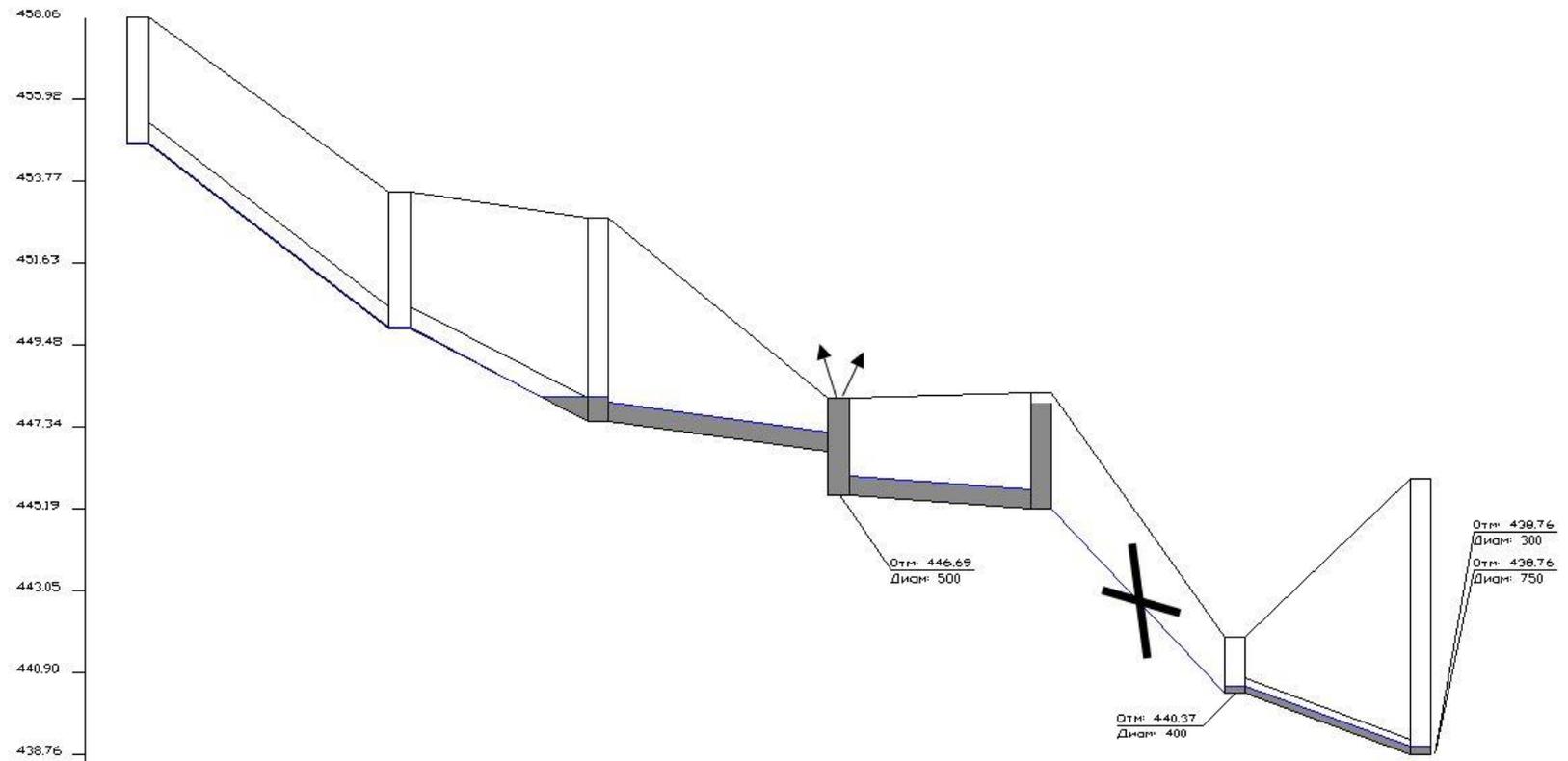
Рисунок 2.23 – Расчетная схема системы водоотведения

Смоделируем засор на участке 4-3 (см. рис. 2.23, 2.24) и исключим его из расчетной схемы, Построим циклическую схему и проведём гидравлические расчеты. После всех расчетов потоки распределятся так, как это указано на рисунке 2.27 и при этом в узле 5 стоки будут выходить на поверхность земли. Например, в ходе эксплуатации системы выход стоков в колодце 5 укажет на то, что участке 4-1 засорился полностью. Таким образом, можно заранее рассчитать всевозможные такие ситуации и этот процесс можно автоматизировать и в определенных точках поставить уровнемеры.



Узел	1	2	3	4	5	6	7	8
Отметка лотка	445.72	449.90	447.49	446.69	445.77	445.80	440.37	438.76
Пр.отметки земли	458.06	453.48	452.80	448.11	448.24	441.85	446.00	
Нат.отметки земли	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Обозначения и тип изол.	D < 0.00	D < 0.00	D 500.00	D 500.00	D 500.00	D 500.00	D 300.00	
Основание								
Уклон		0.0156	0.0103	0.0028	0.0015	0.0210	0.0073	
Длина	310.00	235.00	285.00	240.00	230.00	220.00		

Рисунок 2.24 – Движение сточных вод в безаварийном режиме.



Узел	1	2	3	4	5	6	7
Отметка лотка	457.57	449.90	447.49	446.69	445.20	440.37	438.76
Пр.отметки земли	458.06	453.48	452.80	448.11	448.24	441.85	446.00
Нат.отметки земли	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Обозн.тр.эвопр.и тип.изол.	Д 300.00	Д 300.00	Д 500.00	Д 500.00	Д 500	Д 400.00	
Основание		Уклон					
Длина	310.00	0.0156	235.00	0.0103	285.00	0.0028	240.00
						0.0015	230.00
							0.0210
							220.00
							0.0073

Рисунок 2.25 – Движение сточных вод в аварийном режиме

2.11. Устройство разгрузочных и кольцующих коллекторов

Как показал проведенный анализ существующих систем водоотведения, они уже не имеют структуру в виде дерева. Появилось много кольцующих участков сети, насосных станций, перекачивающих сточные воды в другие районы канализования (смотри рисунок 2.26).

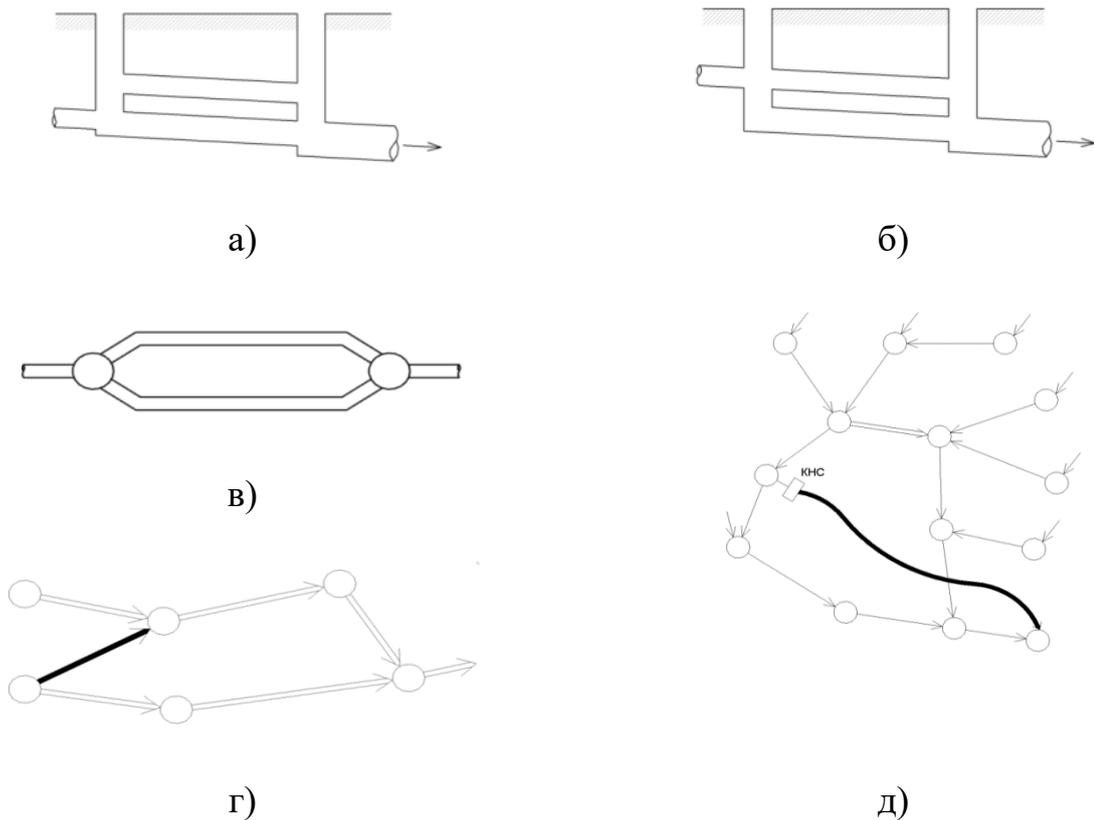


Рисунок 2.26 - Разгрузочные коллектора: а), б) - вертикальная прокладка кольцующего коллектора; в) - горизонтальная прокладка дополнительного коллектора; г), д) - переброска стоков из одного бассейна водоотведения в другой

Для перераспределения потока сточной жидкости между коллекторами и бассейнами канализования применяют «шиберные устройства». Устройства, которые уменьшают или увеличивают живое сечение того или иного коллектора, и тем самым увеличивается, или уменьшается объем поступления сточных вод. Работу шиберных устройств и гидравлику разделения потоков требуется исследовать.

Например, проведенный анализ схемы водоотведения г. Иркутска показал, что имеются кольца, которые замыкают магистральные, районные сети водоотведения и имеются кольца внутри кварталов, а также параллельные прокладки и разгрузочные коллектора. В работах [107, 138] подробно изложена методика расчета кольцевых каналов, а ее основы обсуждаются ниже. Пусть имеется канализационный колодец, к которому подходит один самотечный коллектор и три самотечных коллектора уходят (см. рис.2.27). Требуется определить, как входящий в колодец расход Q будет растекаться по трем коллекторам, расположенных на разных уровнях.

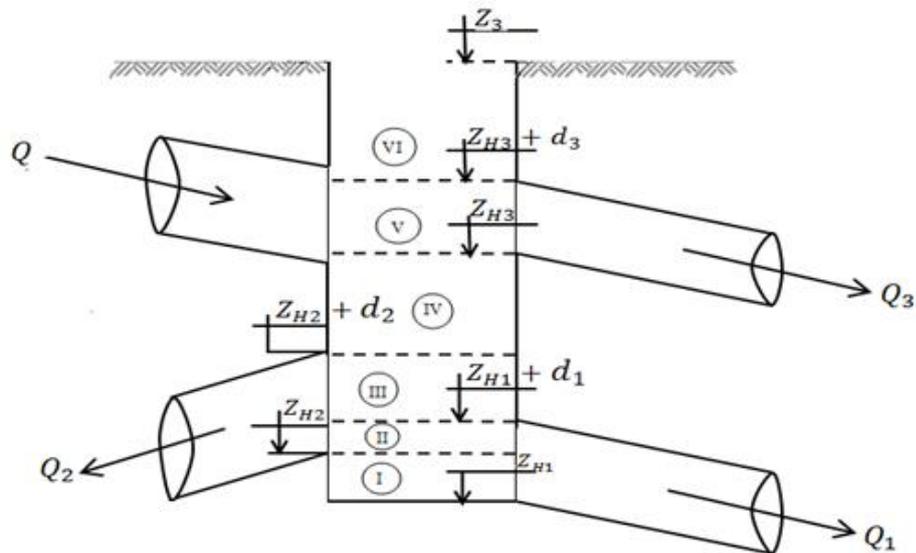
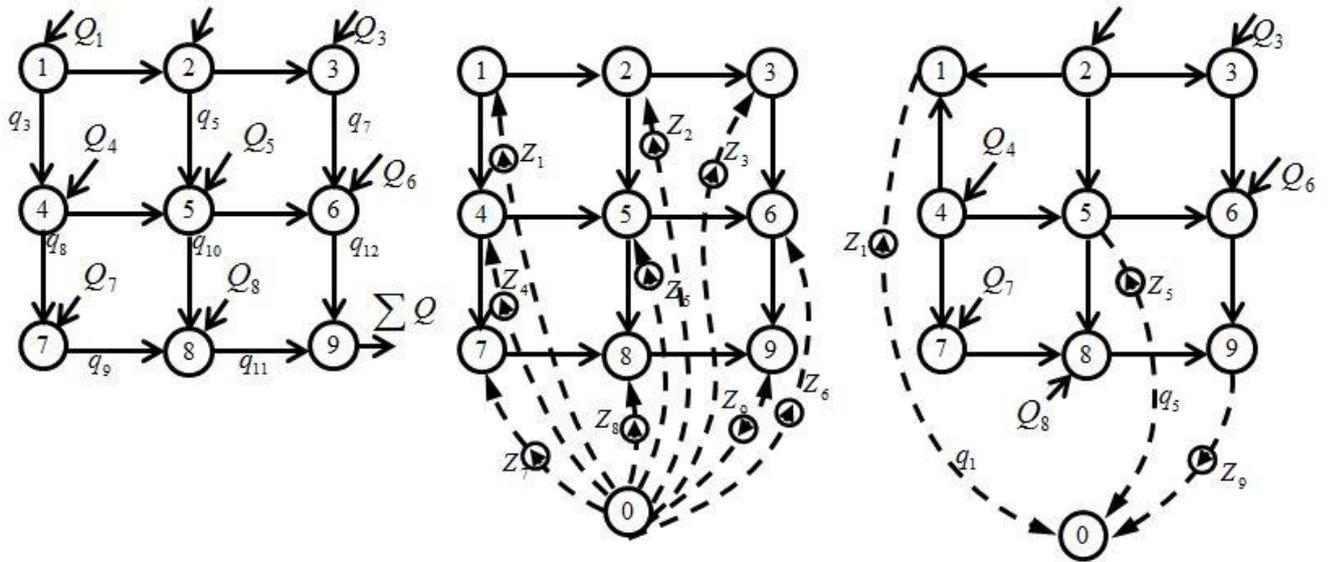


Рисунок 2.27 – Моделирование распределения сточных вод по трем самотечным коллекторам

В работе на основании методов теории гидравлических цепей, гидравлических зависимостей, изложенных в первом параграфе диссертации получены соответствующие формулы расчета, на основании которых можно определить расходы стоков и в кольцевых [169, 178, 182]. На рисунке 2.28 представлена исходная, циклическая схемы и результаты расчета, согласно которым стоки будут изливаться из колодцев 1 и 5.



Рисунке 2.28 – Моделирование потокораспределения в кольцевых СВО

Таким образом, расчет разветвленных и кольцевых систем водоотведения имеют общую гидравлическую и математическую основу. Последовательность выполнения вычислений иллюстрируется на рисунке 2.29.

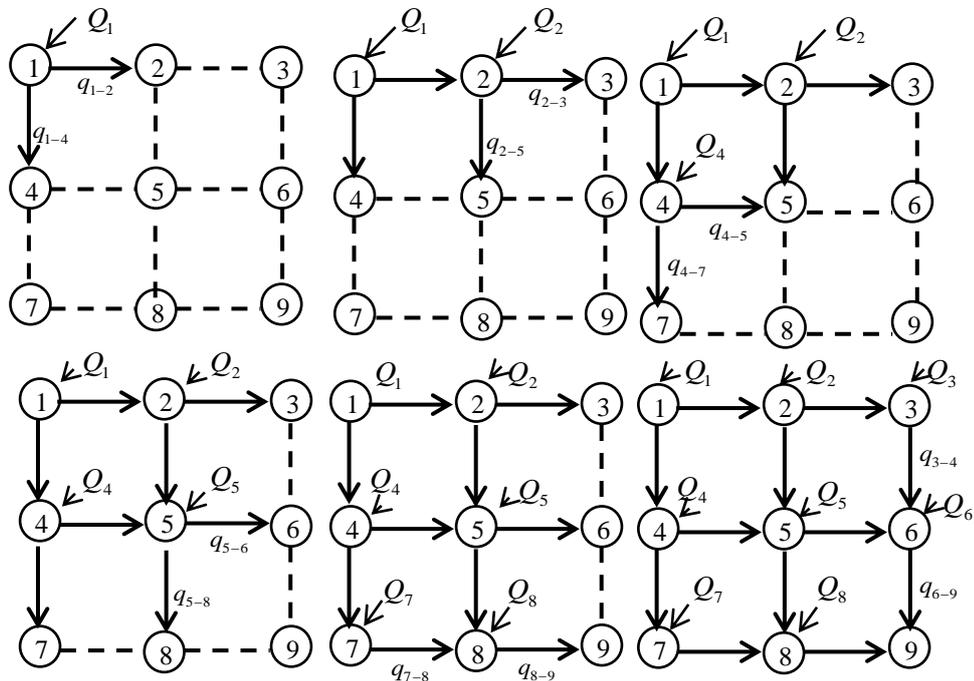


Рисунок 2.29 – Алгоритм распределение потоков в кольцевых сетях

Обратный ход. Организуется от самых удаленных абонентов (см. рис.2.30).

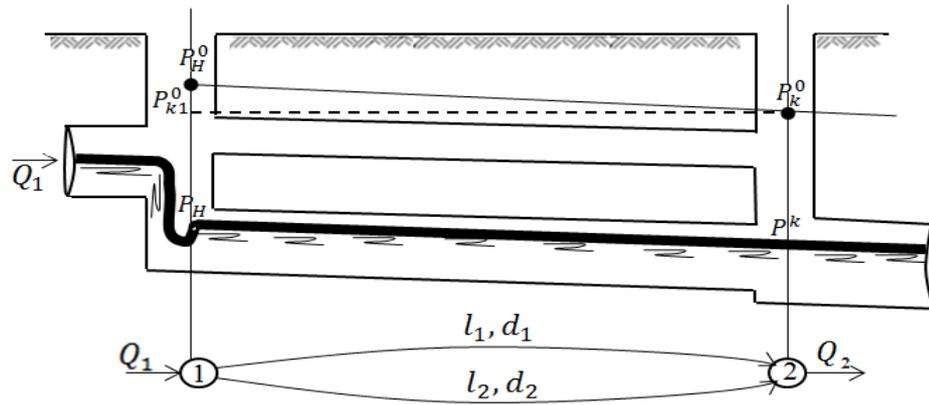


Рисунок 2.30 - Обратный ход вычисления

Для их корректировки организуется вычислительный процесс в узле 1 в интервале давлений P_k^0, \dots, P_H^0 :

$$Q_1^{(k)} = \sqrt{\frac{P_1^{(k-1)} - P_k^0}{\beta_1}}; \quad Q_2^{(k)} = \sqrt{\frac{P_2^{(k-1)} - P_k^0}{\beta_2}}; \quad (2.34)$$

$$P^{(k)} = P_k^0, \dots, P_H^0; \quad |Q_1^{(k)} + Q_2^{(k)} - Q| \leq \varepsilon.$$

В качестве примера, рассмотрим кольцевую систему водоотведения, состоящую уже из шести коллекторов (см. рисунок 2.31). На рисунке 2.31, а, представлены результаты первой итерации вычислений. Для данных расчетов пьезометрические уровни, построенные по маршрутам: 1-2-3-5-6; 1-2-4-5-6, представлены на рисунке 2.31, б и рисунке 2.31, в, из которых видно, что в узле 2 возник небаланс пьезометрических давлений, который итеративным способом выравнивается в точности так, как это делается в методе узловых давлений [107].

На рисунке 2.31, г, д, е, представлены результаты промежуточной итерации такого вычислительного процесса и окончательный результат.

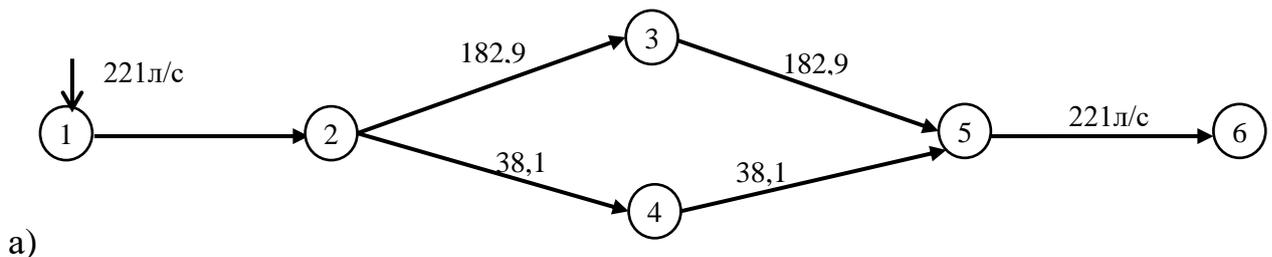
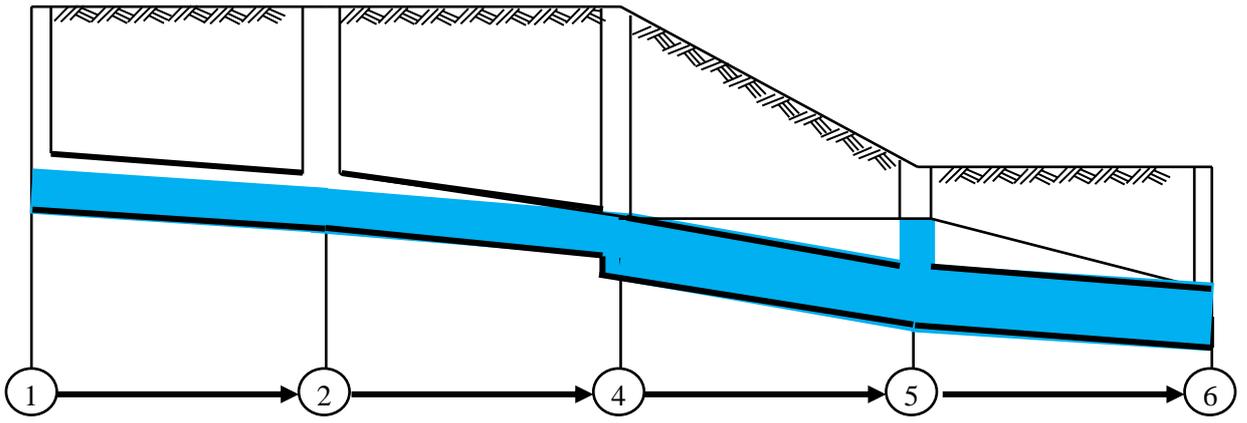
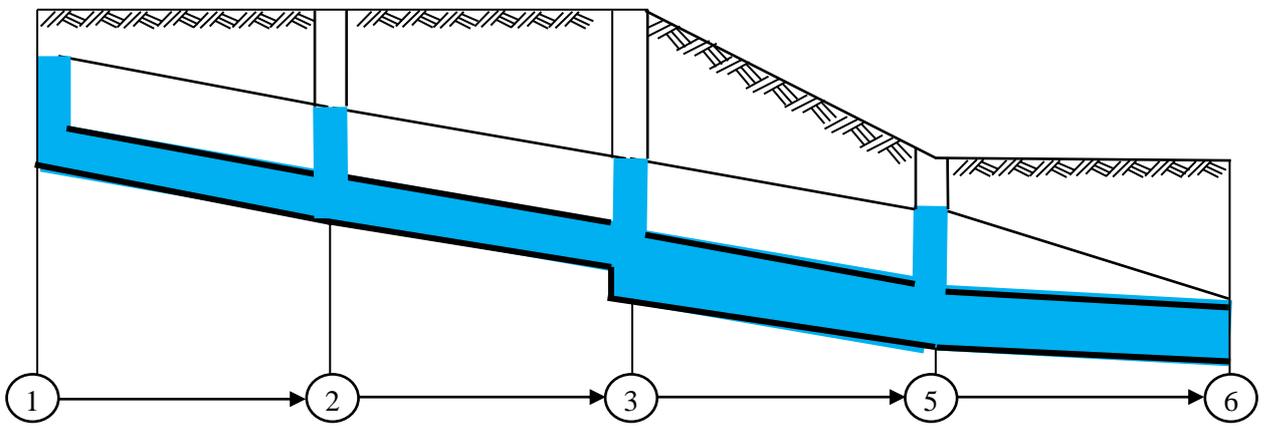


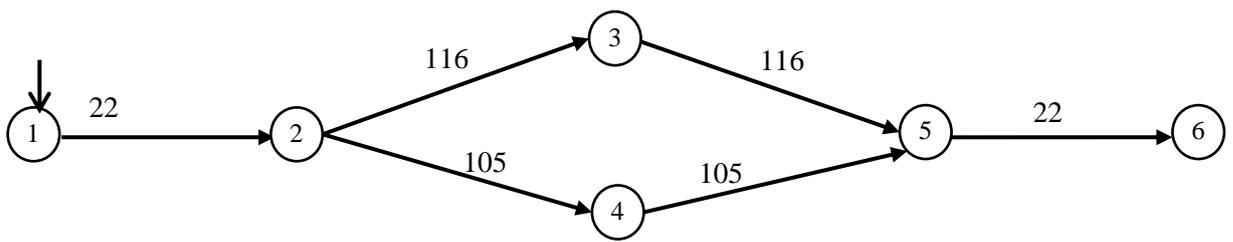
Рисунок 2.31 – Расчет кольцевых СВО. Линия свободных напоров



б)

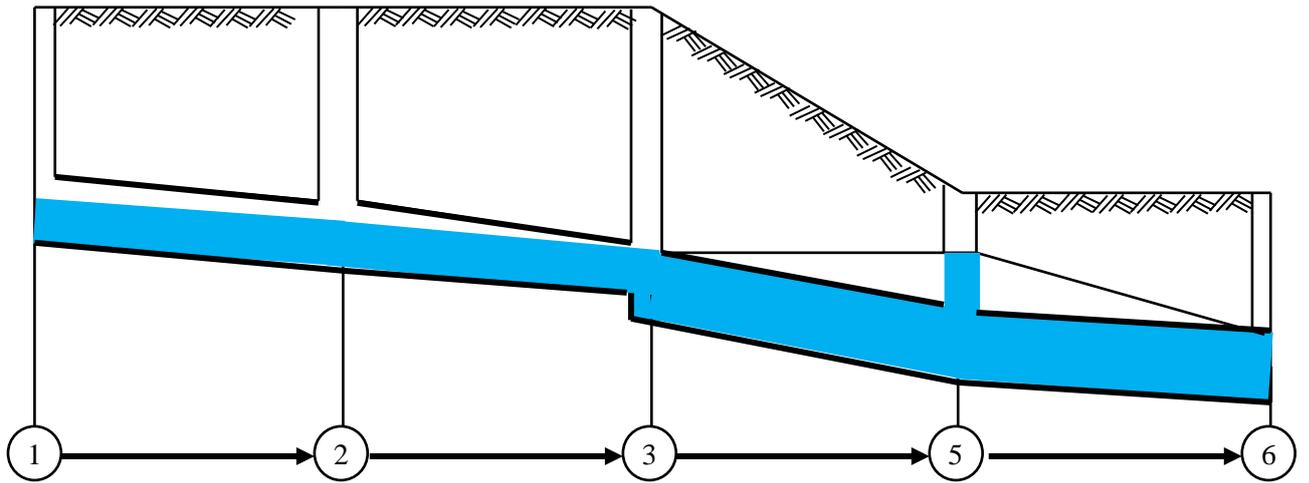


в)

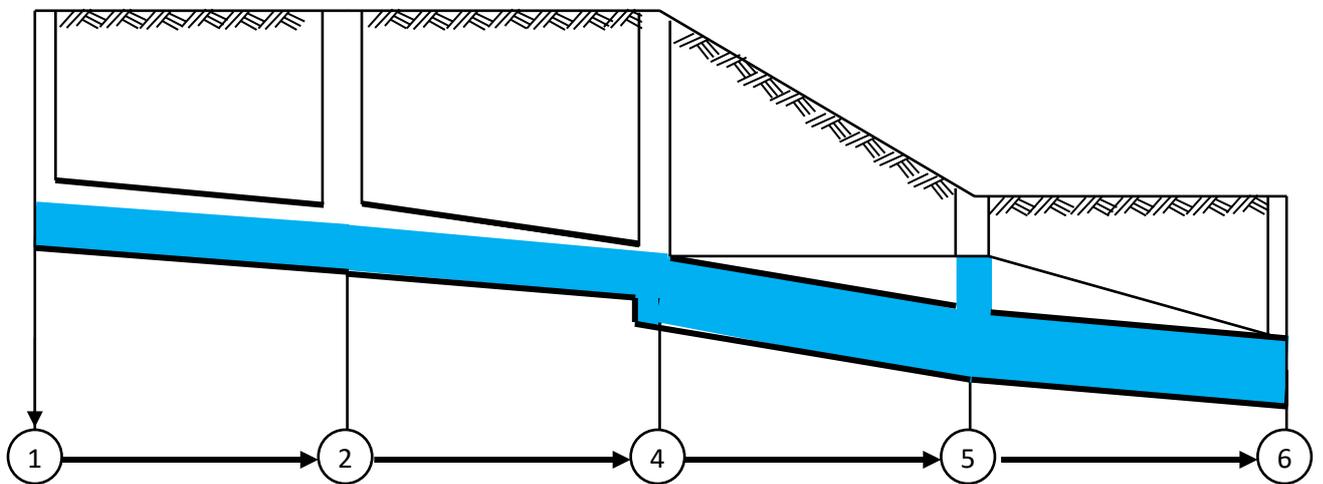


г)

Рисунок 2.31 - Расчет кольцевых СВО. Продолжение



д)



е)

Рисунок 2.31 – Расчет кольцевых СВО. Окончание

Таким образом, предлагается новая методика расчета и моделирования систем водоотведения кольцевой структуры.

2.12. Моделирование подтопления территории и движения стоков по улицам города

В результате дождей с интенсивностью, превышающей расчетные ее значения, происходит не только выход сточных вод на поверхность земли, но и

затопление территории и населенных мест и даже городов [123]. Хотя для моделирования таких явлений имеется множество компьютерных программ и комплексов, наводнение и затопление городов можно смоделировать и с помощью развиваемой в работе методологии гидравлических расчетов напорно-безнапорных режимов движения сточных вод. При этом зная расход сточных вод, моделируя выход сточных вод на поверхность земли, можно определить глубину затопления по всей территории населенного пункта.

На рисунке 2.32, б представлен фрагмент схемы водоотведения, для которой циклическая схема показана на рисунке 2.32, а.

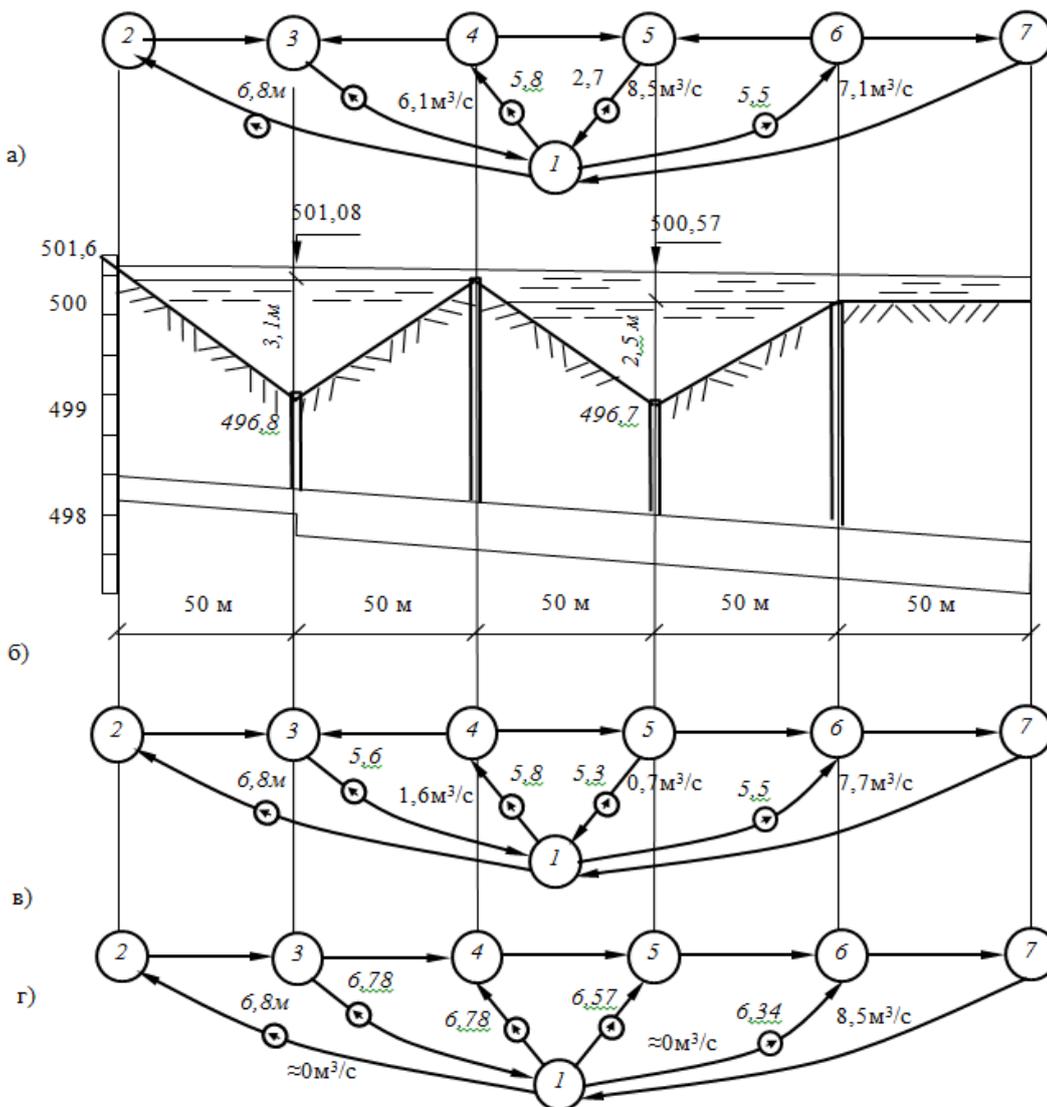


Рисунок 2.32 – Расчет глубины затопления

В итоге итеративного расчета, последовательно изменяя действующие напоры на фиктивных ветвях, приближая их к отметкам земли, получим картину уровней затопления, такую, которая представлена на рис. 2.32,б

Выводы по главе 2.

Предложена вероятностная модель расчета поступления стоков в систему водоотведения. Исследовано влияние неравномерности поступления стоков в систему водоотведения на трансформацию потока сточной жидкости в коллекторах. Изучены и обобщены гидравлические закономерности движения стоков в системах водоотведения в условиях их установившегося равномерного и неравномерного движения, перехода в напорный и безнапорный режимы.

Предложены математические модели потокораспределения стоков в системах водоотведения. Исследованы закономерности появления напорно-безнапорного движения стоков, предложена на основе построения циклических схем методика моделирования таких режимов с оценкой образования противотоков и выхода стоков на поверхность земли.

Для увеличения пропускной способности ливневой канализации предлагается в пониженных по рельефу местности колодцах утраивать специальные устройства для их герметизации, что позволяет работать системе водоотведения в напорном режиме.

Проведены исследования применения предлагаемой методики расчета напорно-безнапорного движения стоков в задачах обнаружения и локализации засоров, в задачах анализа и оптимизации режимов канализационных насосных станций.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ

3.1. Развитие методологии оптимизации реконструируемых систем водоотведения

Процесс проектирования и создание модели будущей системы водоотведения неразрывно связан с формированием и сопоставлением различных ее вариантов. При этом технологические параметры учитываются через капиталовложения и эксплуатационные расходы. Надежность, сейсмостойкость и экологическая безопасность и другие условия учитываются через технические и стоимостные параметры.

Распространенным критерием оценки вариантов является [44, 92, 163, 172, 180]:

$$Z = (E + f_c) \cdot K + c_3 \mathcal{E}_r \quad (3.1)$$

где Z – приведенные к году затраты; K – единовременные капиталовложения в систему водоотведения; E – коэффициент эффективности капиталовложений, который ранее был нормативным и фиксированным, а сейчас он отождествляется с банковскими процентами; f_c – нормативный процент отчислений на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание сети; c_3 – стоимость 1 кВт. Час, в руб.; \mathcal{E}_r – суммарное потребление электроэнергии за 1 год.

Вместе с тем, критерий оптимизации в виде приведенных расчетных затрат (3.1), не учитывает всего многообразия затрат, возникающих в ходе эксплуатации (например экономии за счет автоматизации, энерго- и ресурсосбережения и др.) и в основном направлен на минимизацию единовременных капиталовложения. Как показали проведенные исследования эксплуатационные затраты за срок службы системы водоотведения превышают единовременные капиталовложения в 10-20 и более раз. Поэтому при обосновании крупных проектов все чаще прибегают при сопоставлении вариантов к затратам за весь жизненный период действия проекта. Эти затраты принято определять по формуле [192, 180]:

$$C = \sum_{i=1}^n \left(C_i^{TP} + \frac{T}{(1+r)^T} \cdot C_{ЭКCi}^{TP} \right) + \sum_{i=1}^n \left(C_i^{HC} + \frac{T}{(1+r)^T} \cdot (C_{ЭКCi}^{HC} + C_{ЭЛKi}) \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{Di}}{(1+r)^T} \right) \quad (3.2)$$

Где n - количество участков расчетной схемы. Следует отметить, что в методическом отношении не составляет сложностей в использовании того или иного критерия при оптимизации параметров систем водоотведения.

В работе на основании укрупненных стоимостных показателей для трубопроводных систем получена стоимостная функция вида, в тыс. руб.:

$$C_i^{TP} = (a \cdot \Gamma^\alpha \cdot d_i + b \cdot \Gamma^\beta) \cdot L_i \quad (3.3)$$

где: Γ – глубина заложения трубопровода, в м; d_i – диаметр трубопровода, в м; a, b, α, β – коэффициенты, которые зависят от материала труб, от состояния грунтов и способов строительства и представлены в табл.3.1, L_i – длина участка i , в км.

Годовые эксплуатационные затраты трубопровода на основе нормативов можно представить в виде функции, тыс. руб. в год:

$$C_{ЭКCi}^{TP} = a \cdot L_i^\alpha + b \cdot L_i \cdot d_i^\beta \quad (3.4)$$

$$C_{ЭЛKi} = z_3 \cdot \frac{n_3 \cdot H \cdot q_i}{367,2 \cdot \eta} \quad , \text{ или } C_{ЭЛKi} = 108 \cdot z_3 \cdot H \cdot q_i \quad (3.5)$$

Результаты обработки стоимостных значений приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Значения коэффициентов a , b , α и β в формулах аппроксимации (3.7) – (3.14)

Материал	Полиэтиленовые трубы				Чугунные трубы			
	Разработка сухого грунта с погрузкой в отвал	Разработка мокрого грунта с погрузкой в отвал	Разработка сухого грунта	Разработка мокрого грунта с погрузкой в отвале	Разработка сухого грунта с погрузкой в отвал	Разработка мокрого грунта с погрузкой в отвал	Разработка сухого грунта с погрузкой в отвале	Разработка мокрого грунта с погрузкой в отвале
Вид работы	1	2	3	4	5	6	7	8
a	6731,9	7482,9	4655,8	7911,1	10878	10907	11104	10784
α	0,4383	0,3571	0,6744	0,3494	0,008	0,0381	0,0119	0,0682
b	24,843	252,99	31,376	89,192	248,3	339,15	38,502	149,59
β	2,5404	1,9536	2,3612	2,5325	1,7151	1,7498	2,7742	2,1787
Материал	Асбестоцементные трубы				Керамические трубы			
	Разработка сухого грунта с погрузкой в автотранспорте	Разработка мокрого грунта с погрузкой в автотранспорте	Разработка сухого грунта с погрузкой в отвале	Разработка мокрого грунта с погрузкой в отвале	Разработка сухого грунта с погрузкой в автотранспорте	Разработка мокрого грунта с погрузкой в автотранспорте	Разработка сухого грунта с погрузкой в отвале	Разработка мокрого грунта с погрузкой в отвале
Вид работы	9	10	11	12	13	14	15	16
a	6005,9	5704,8	5793	5578,8	4166,9	3962,2	3498,6	3426,7
α	0,0614	0,1641	0,1119	0,207	0,0007	0,583	0,0318	0,2285
b	251,3	358,01	63,105	153,36	480,58	444,26	220,42	357,45
β	1,6828	1,6766	2,3871	2,112	1,3788	1,3651	1,7456	1,6505
КНС, в ценах 1 кв. 2015г (для полиэтиленовых труб при устройстве круглых пластиковых канализационных колодцев "РОСПАЙП")						Бестраншейная прокладка (для полиэтиленовых труб)		
Стоимость материала в	состояния грунтов и		способы строительства		для новых прокладок			
	для сухого грунта	для мокрого грунта	открытым способом	опускным способом				
	17	18	19	20	21	22	23	24
a	72,824	30,428	33,069	97,122	116,544	33335	24971	27840
α	-0,011	0,0763	0,0657	0	0	1,0139	1,0139	1,0139
b	12500	-5,844	-3,0235	854,655	1025,5640	132,68	-403,07	1573
β	0,4948	0,3556	0,4324	0,3276	0,3276	1,8881	1,8881	1,8881
Годовые эксплуатационные затраты трубопровода								
	Полиэтиленовые трубы		Чугунные трубы		Асбестоцементные трубы		Керамические трубы	
a	213,02		213,02		213,02		213,02	
α	0,84		0,84		0,84		0,84	
b	6,18·10 ⁻³		1,25·10 ⁻³		4,21·10 ⁻³		1,4·10 ⁻³	
β	1,8368		0,9298		1,8599		2,105	

Значения, приведенные в таблице 3.1 можно представить в виде приведенных расчетных затрат от расхода сточной жидкости (см. рис.3.1).

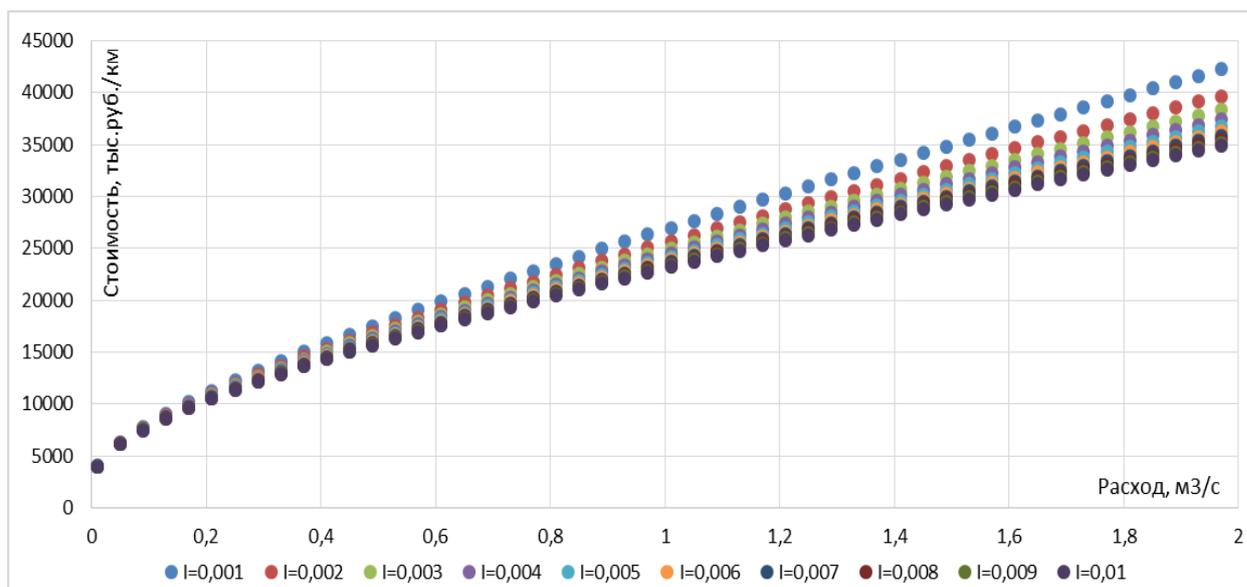


Рисунок 3.1 – Зависимости расчетных затрат от объемов транспортируемой сточной жидкости.

Зная тариф на перевозку сточной жидкости автомобильным транспортом не сложно получить зависимость расчетных затрат от объема перевозимых стоков, тыс. руб. в год:

$$C_i = 86,4 \cdot \frac{x_i}{V_e} \left[\left[(C_m + C_c) \cdot \frac{I}{8} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot L}{45} \right) \right] \cdot E + 365 \cdot L_i \cdot C_{AT} \right],$$

Где: X_i – объем транспортируемых сточных вод, в м³/с; V_e – объём цистерны автомашины, в м³; C_m , C_c – стоимость автоцистерны и гаража, руб.; C_{at} – тариф на перевозку стоков, м³ на 1 км, руб.

Приведенные расчетные затраты по устройству канализационных очистных сооружений на рыб хозяйственные нормы сброса сточных вод в водоемы, тыс. руб. в год:

$$C_i = 2080826.0 * X_i + 325.13.$$

Например, на рисунке 3.2 для условий Байкальского региона графически представлены эти зависимости, и они близки к линейным. Согласно рисунку 3.2, до объема 0.002 м³/с (173 м³/сут) экономически выгодно стоки транспортировать автомобильным транспортом, более - трубопроводным. Линейность затрат в КОС

обусловлена производством их в виде отдельных блоков соответствующей производительности. С другой стороны линейность затрат указывает на то, оптимальными будут варианты с устройством КОС у каждого абонента или населенного пункта.

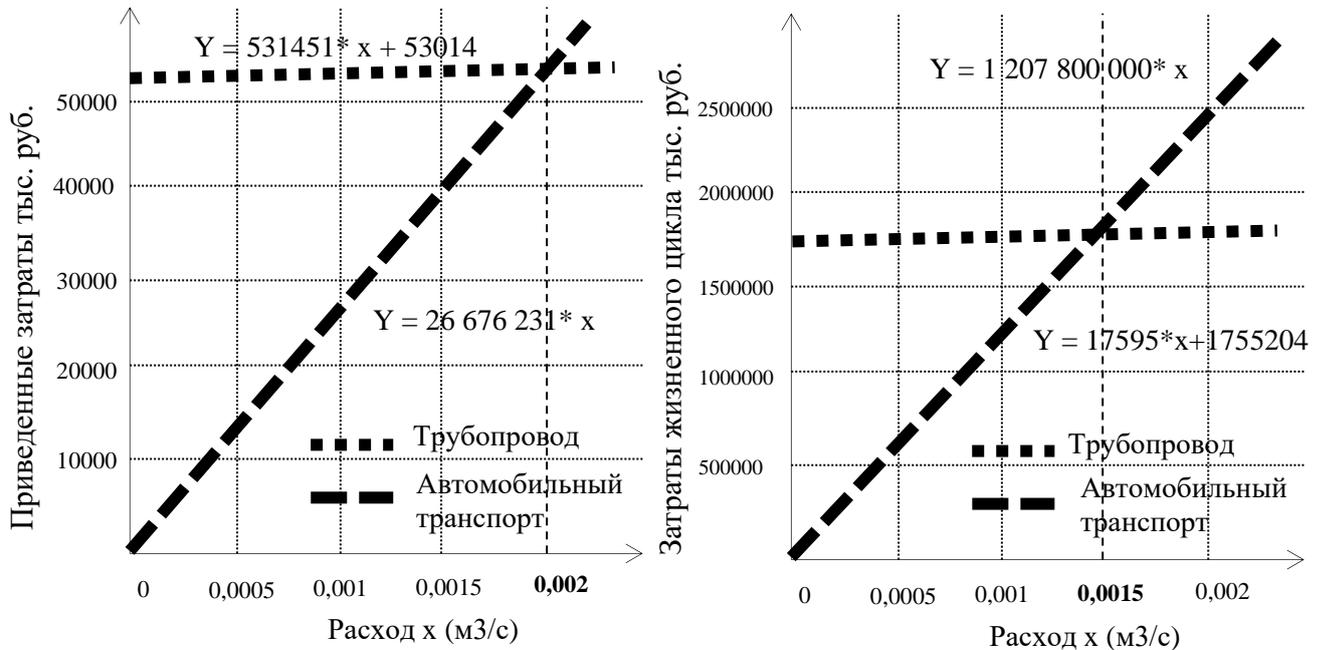


Рисунок 3.2 – Определение оптимального вида транспортировки сточных вод

3.2. Графическая интерпретация реконструкции систем водоотведения

Поскольку функция затрат (как приведенных, так и затрат жизненного цикла) имеет выпуклый вверх характер относительно расхода сточной жидкости и близка к линейной, то для сети водоотведения, состоящей из двух участков, можно в трехмерном пространстве представить функционал задачи и ее решение (см. рис. 3.3). Как видно из рисунка решением задачи будет дерево и это утверждение справедливо лишь для новых сетей и сооружений. При наличии существующих участков сети функция затрат будет иметь сложный вид (см. рис.3.4) и уже иметь три экстремума в точках С1, С2, а. один из которых (точка а) будет соответствовать кольцевому решению.

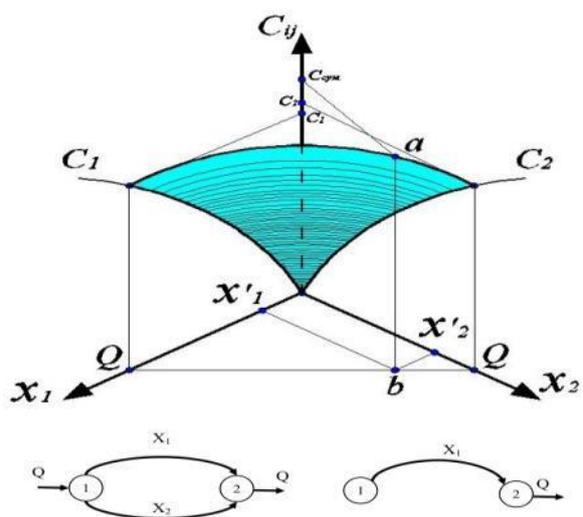


Рисунок 3.3 – Для новой сети

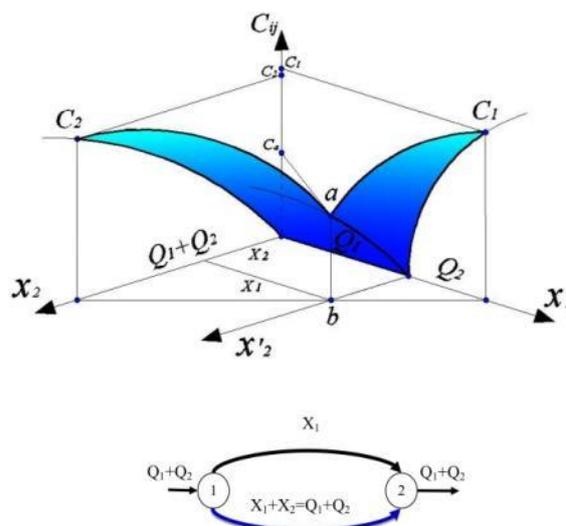


Рисунок 3.4 – для существующей и реконструируемой сети

Таким образом, если рассматривается новая СВО, то с экономической точки зрения без учета факторов надежности и управляемости следует принимать вариант сети разветвленной структуры, а при реконструкции и развитии существующих сетей могут быть и иные решения (кольцевые сети). Основываясь на эти принципы, формируются методы оптимизации СВО.

3.3. Новый метод оптимизации реконструируемых и развивающихся систем водоотведения

Согласно СП 32.13330.2012 (п. 6.1.1), СВО как правило проектируются разветвленной структуры наибольшим наполнением коллекторов (h/d). При этом принимается $K/d < I < 0.15$, K - поправочный коэффициент, принимает значение в зависимости от размера диаметра коллектора, например $K=1$ при $d < 300$ мм, $K=3$ при $d > 1000$ мм. Согласно СП 31.13330.2012 минимальные скорости движения сточных вод зависят от диаметра коллектора и имеют диапазон: 0.7 – 1.5 м/с. Максимальные скорости для бытовой и дождевой канализации принимается не более чем – 8 и 10 м/с соответственно. h/d принимается в диапазоне: 0.3 – 0.8.

Общепринято, на начальном этапе развития систем водоотведения скорости движения стоков принимать минимально допустимыми, а с развитием сетей и

подключением новых абонентов – будет расти наполнение и соответственно скорость.

На рисунке 3.5,а каждая очередь обозначена своим цветом (черным – первая, красным – вторая, и т.д.), при этом количество отводимых стоков от каждого района составляет $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$. Этапы ввода в строй системы водоотведения проиллюстрированы на рисунках 3.5,б-г. Первый вариант развития - вариант постоянных реконструкций будет очень затратным, но при минимальных инвестициях - вариант инвестиционных программ – он может иметь место, особенно при учете новых технологий бестраншейной прокладки трубопроводов [118, 119].

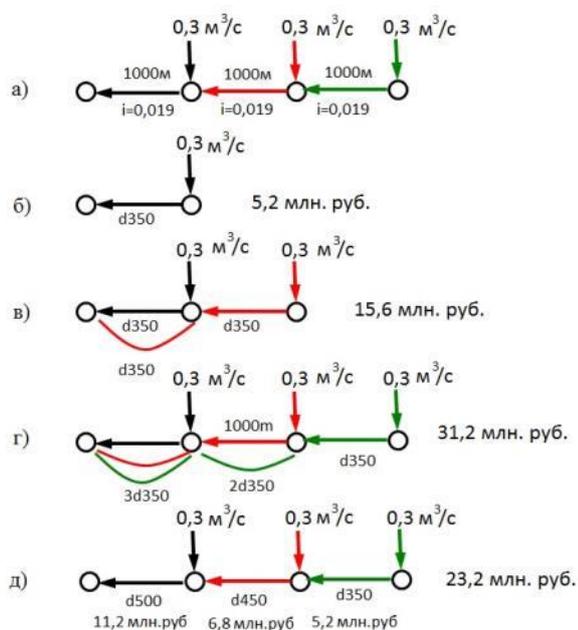


Рисунок 3.5 - Вариант постоянных реконструкций б)-г) и развитие системы на полную нагрузку д)

Хорошо известно, что внутренние покрытия из полимерных материалов увеличивают пропускную способность на 15-20% и это надо учитывать при реконструкции и развитии СВО. Однако, если трубопровод перегружен, то очевидно его надо менять на новый большего диаметра, либо устраивать разгрузочный трубопровод или сооружать резервуар накопитель.

Во многих европейских городах в условиях развития застроенных территорий законодательно запрещена технология устройства трубопроводов открытым способом, более того, применяются система коллекторов глубокого заложения.

В условиях математического моделирования и применения методов оптимизации для выбора параметров и структур сложных трубопроводных систем хорошо зарекомендовал себя подход, основанный на предварительном построении избыточных проектных схем. Избыточная проектная схема - это избыточный граф возможных вариантов структур и параметров проектируемой системы водоотведения. Он может представлять полный граф или суперпозицию двух, трех вариантов схем [173].

На рисунке 3.6 дана иллюстрация формирования избыточной схемы. Рисунки 3.6,а,б – возможные варианты схемы водоотведения, а рис. 3.6,в их наложение. Согласно теории графов для избыточной схемы (рис. 3.6,в) вариантов трассировки будет 8 (см рисунки 3.6,г-л).

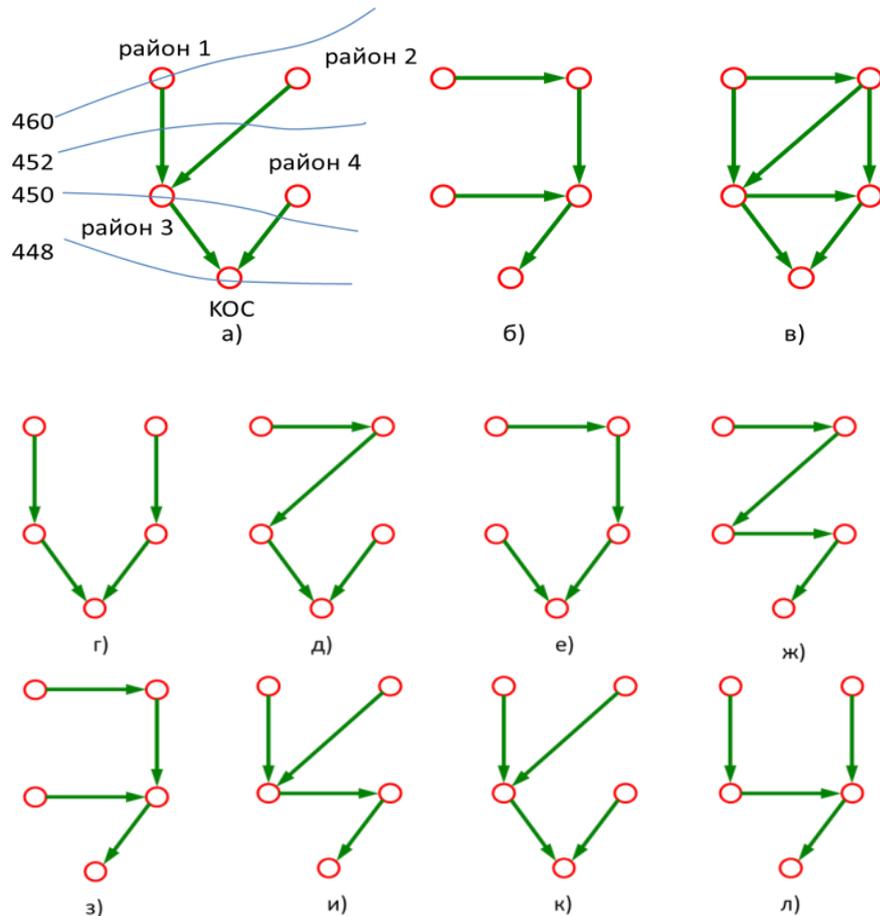


Рисунок 3.6 - Формирование избыточной схемы и варианты прокладки коллекторов системы водоотведения

Количество вариантов древовидной структуры можно определить из формулы 2^k , где k – количество контуров в плоском строго ориентированном графе [80,154], к которым и относятся большинство систем водоотведения. Для кольцевых структур СВО количество таких вариантов будет астрономическим [175]. Очевидное требование к моделям и методам заключается в поиске оптимального из возможных вариантов сети в намеченной избыточной схеме.

В диссертации предлагается такой метод, который основан на предварительном построении избыточной схемы, трансформации ее в транспортную сеть и решении на ней задачи поиска максимального потока минимальной стоимости. Транспортная схема имеет одну вершину входа потоков (S) и одну вершину выхода потоков (t). Вершина входа потоков соединяется со всеми узлами абонентами фиктивными ветвями. Максимальная пропускная

способность таких ветвей равна расчетному значению объемов сточных вод, поступающих в систему водоотведения от абонентов. Вершина выхода потоков соединяется со всеми узлами - возможными канализационными сооружениями и узлами сброса очищенных сточных вод в водоемы. Для существующих самотечных коллекторов верхнее и нижнее ограничения на пропускные способности назначаются соответственно из условия не заиливающих скоростей и работы самотечных коллекторов в напорном режиме. Для напорных существующих трубопроводов верхнее ограничение на поток формируется из соображения экономически наиболее выгодных скоростей транспортировки сточной жидкости.

Математическая постановка этой задачи имеет вид [148]:

$$\sum C_i \cdot x_i \rightarrow \min, \text{ при } \text{при } v_i \leq x_i \leq \bar{v}_i, \quad (3.16)$$

где C_i - стоимость единицы потока, x_i - искомый поток на ветви избыточной или дефицитной. Так как (3.1) не является линейной функцией, она согласно рисункам (3.7), (3.8) заменяется кусочно-линейной.

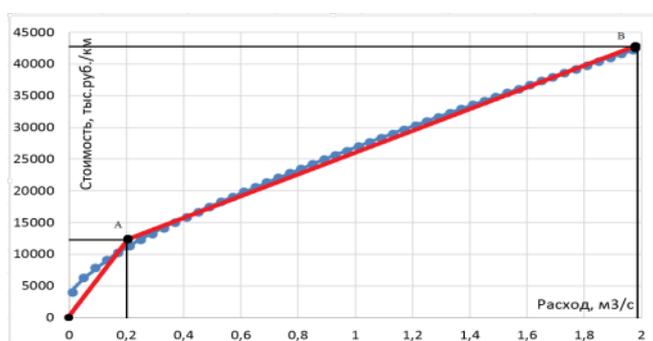


Рисунок 3.7 – Представление функции (3.1) в виде двух линейных

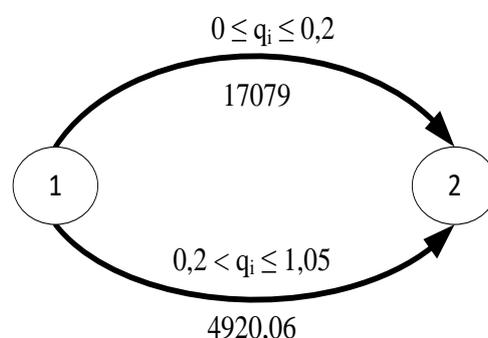


Рисунок 3.8 – представление двух линейных функций в виде графа с дугами

$$\text{для участка ОА: } a_1 = \frac{C_1}{q_1} = \frac{3415,8}{0,2} = 17079 \text{ тыс. руб. на м}^3/\text{с.}$$

$$\text{для участка АВ: } a_2 = \frac{C_2 - C_1}{q_2 - q_1} = \frac{7597,85 - 3415,8}{0,85} = 4920,06 \text{ тыс. руб. на м}^3/\text{с.}$$

В работах автора обработаны укрупненные нормативные данные и прайс-листы по стоимости строительства различных объектов водоотведения [164, 170, 173, 173] и получены удельные их значения.

Нижние ограничения вычисляются следующим образом:

Для хозяйственно бытовой канализации:

$$\underline{e}_{ij} = V_{\min} \cdot \omega = 0,6 \cdot d^2 \cdot (0,2613 \cdot \ln(d) + 1,156). \quad (3.17)$$

Для ливневой канализации:

$$\underline{e}_{ij} = V_{\min} \cdot \omega = 0,471 \cdot d^2. \quad (3.18)$$

Пусть задана транспортная сеть в виде одного кратчайшего маршрута, представленного на рисунке 3.9, а, б.

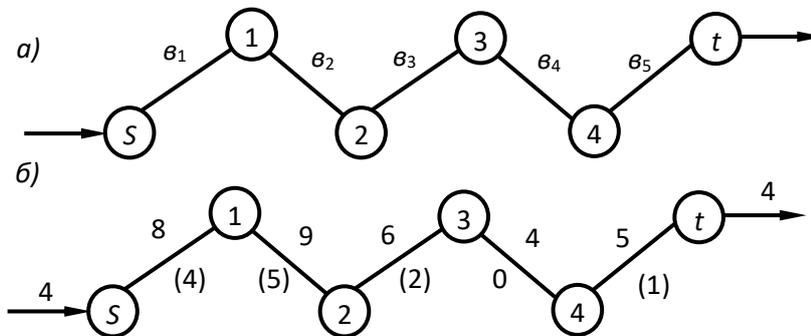


Рисунок 3.9 - Вычисление максимального потока, где над участками представлены максимальные пропускные способности, под участком – стоимости единицы потока

Максимальный поток для этого маршрута будет равен:

$$\bar{x}^{(t)} = \min\{e_{ij}\} = 4,$$

и равен пропускной способности участка 3–4. Считается, что данный участок не пропустит ни одной единицы потока.

$$x_{ij}^V = e_{ij} - \bar{x}^{(t)}.$$

Если имеются значения двухсторонних ограничений $\underline{e}_{ij} \leq x_{ij} \leq \bar{e}_{ij}$, то вначале определяется максимальный поток, затем минимальный и сравниваются между собой.

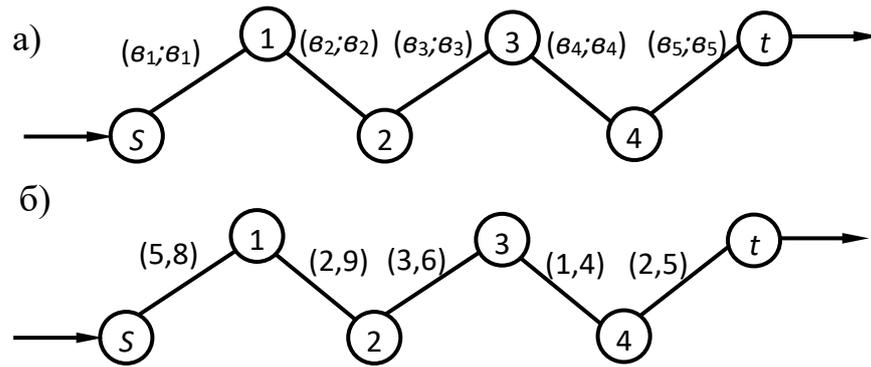


Рисунок 3.10 - Иллюстрация к определению максимального потока с двух сторонними ограничениями на него

На рисунке 3.11, а, б показан случай, когда минимальный поток будет больше максимального:

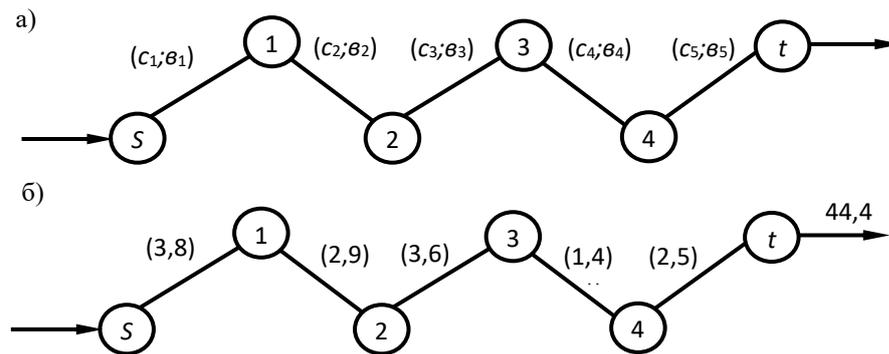


Рисунок 3.11 – Иллюстрация к вычислению максимального потока минимальной стоимости

$$\bar{x}^{(t)} = \{\theta_i\} = 4.$$

$$\sum C_i \bar{x}^{(t)} = 4 \cdot 3 + 4 \cdot 2 + 4 \cdot 3 + 4 \cdot 1 + 4 \cdot 2 = 44 \text{ единицы.}$$

На рисунке 3.12 представлена избыточная схема, для которой функция затрат будет соответствовать (3.16) и будет иметь аппроксимацию в виде двух линейных функций:

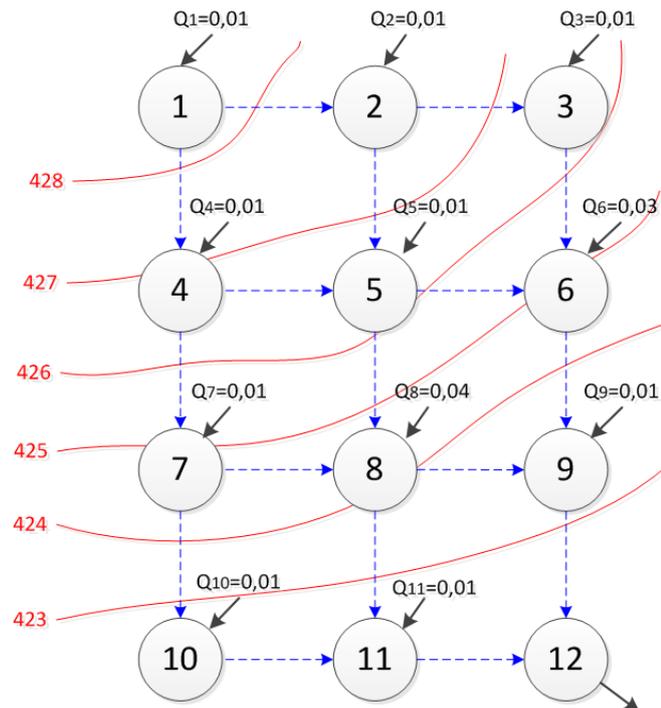


Рисунок 3.12 – Расчетная избыточная схема вновь создаваемой СВО

для участка ОА: $a_1 = \frac{C_1}{q_1} = \frac{3415,8}{0,2} = 17079$ тыс. руб. на м³/с.

для участка АВ: $a_2 = \frac{C_2 - C_1}{q_2 - q_1} = \frac{7597,85 - 3415,8}{0,85} = 4920,06$ тыс. руб. на м³/с.

В таблице 3.2. представлены значения стоимостей единицы потока для каждой ветви избыточной схемы (рисунок 3.11).

Таблица 3.2 - Вычисление стоимости единицы потоков

№ участка	Участок	Длина участка, в м	Удельная стоимость потока в тыс. руб./м на $1\text{м}^3/\text{с}$ (для $q_i \leq 0,2\text{м}^3/\text{с}$)	Удельная стоимость потока в тыс. руб./м на $1\text{м}^3/\text{с}$ (для $q_i \geq 0,2\text{м}^3/\text{с}$)	Стоимость единицы потока в тыс. руб. на $1\text{м}^3/\text{с}$ (для $q_i \leq 0,2\text{м}^3/\text{с}$)	Стоимость единицы потока в тыс. руб. на $1\text{м}^3/\text{с}$ (для $q_i \geq 0,2\text{м}^3/\text{с}$)
1	1-2	300	17 079,00	4 920,60	5 123,70	1 476,18
2	2-3	300	17 079,00	4 920,60	5 123,70	1 476,18
3	1-4	250	17 079,00	4 920,60	4 269,75	1 230,15
4	2-5	300	17 079,00	4 920,60	5 123,70	1 476,18
5	3-6	270	17 079,00	4 920,60	4 611,33	1 328,56
6	4-5	300	17 079,00	4 920,60	5 123,70	1 476,18
7	5-6	250	17 079,00	4 920,60	4 269,75	1 230,15
8	4-7	300	17 079,00	4 920,60	5 123,70	1 476,18
9	5-8	310	17 079,00	4 920,60	5 294,49	1 525,39
10	6-9	280	17 079,00	4 920,60	4 782,12	1 377,77
11	7-8	250	17 079,00	4 920,60	4 269,75	1 230,15
12	8-9	300	17 079,00	4 920,60	5 123,70	1 476,18
13	7-10	400	17 079,00	4 920,60	6 831,60	1 968,24
14	8-11	320	17 079,00	4 920,60	5 465,28	1 574,59
15	9-12	310	17 079,00	4 920,60	5 294,49	1 525,39
16	10-11	320	17 079,00	4 920,60	5 465,28	1 574,59
17	11-12	280	17 079,00	4 920,60	4 782,12	1 377,77

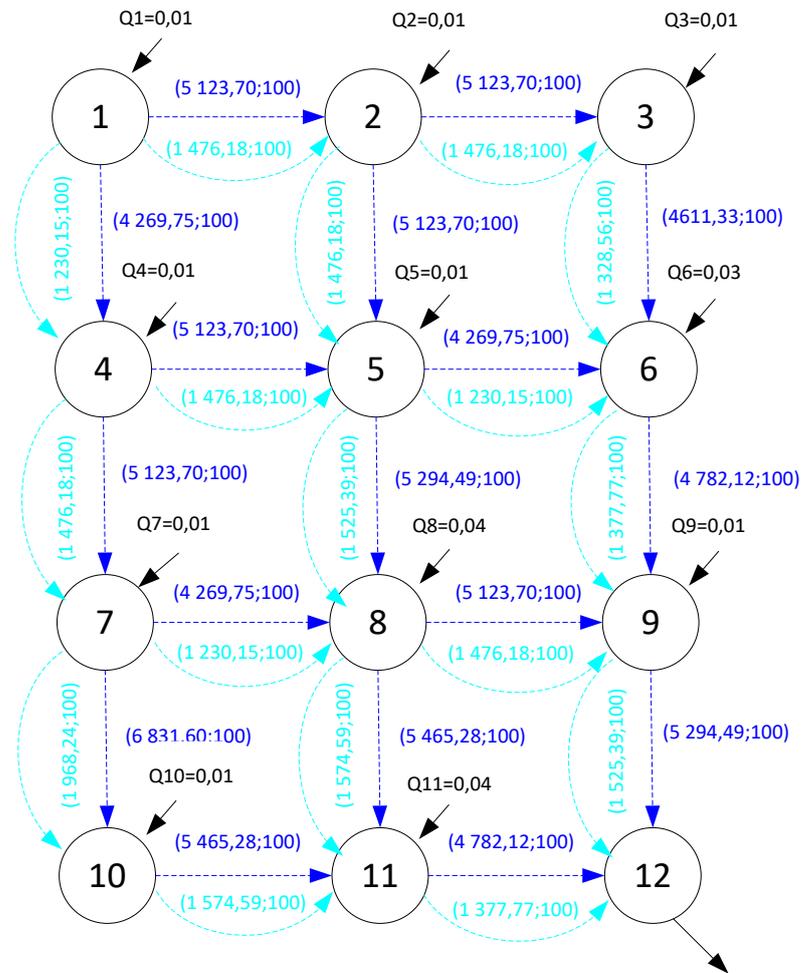


Рисунок 3.13 - Избыточная схема СВО

Такая транспортная сеть представлена на рисунке 3.14.

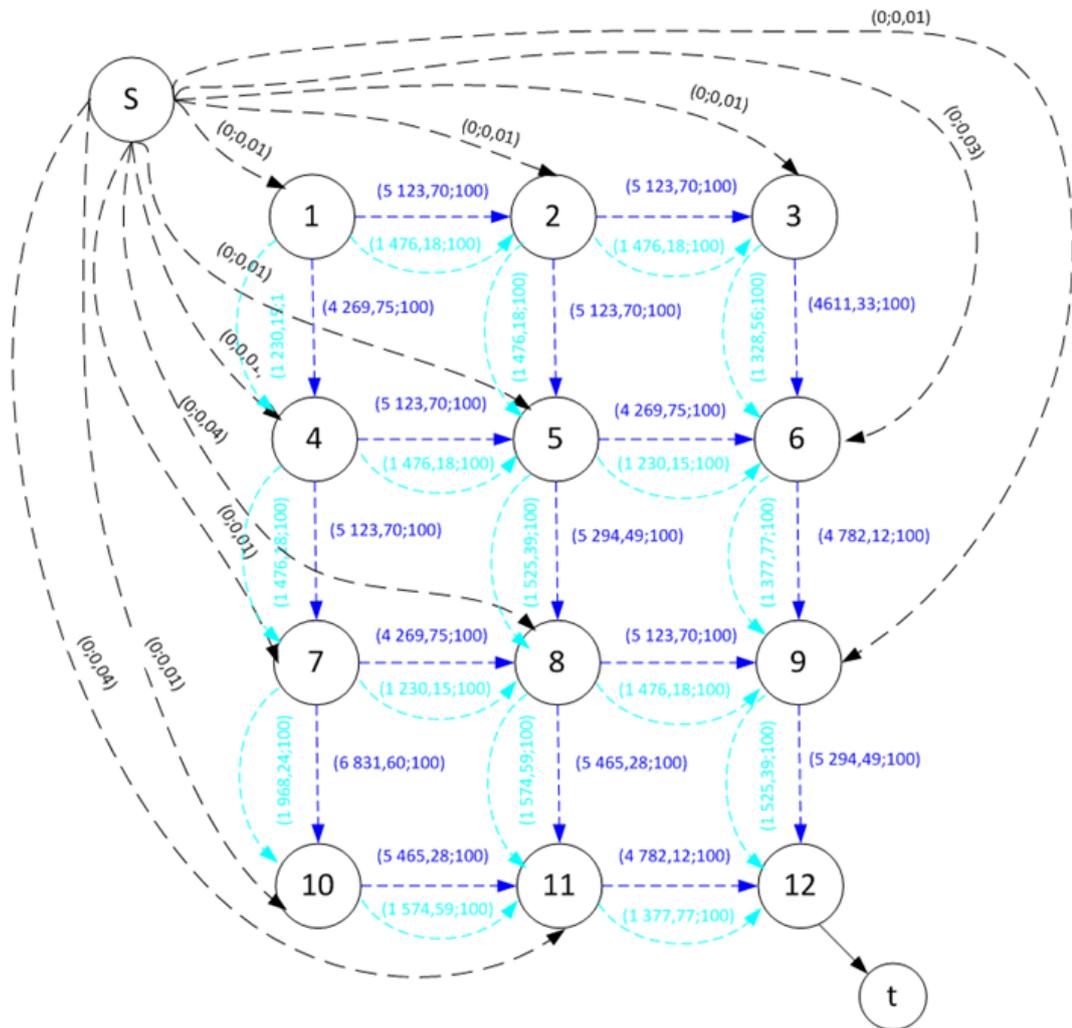


Рисунок 3.14 – Схема всевозможных вариантов развития СВО

Для автоматизации вычислительного процесса в работе реализован метод «ветвления», который позволяет сформировать все маршруты идущие из узла входа потоков в узел выхода. Иллюстрация работы этого метода, применительно к исследуемому примеру, представлена на рис 3.15.

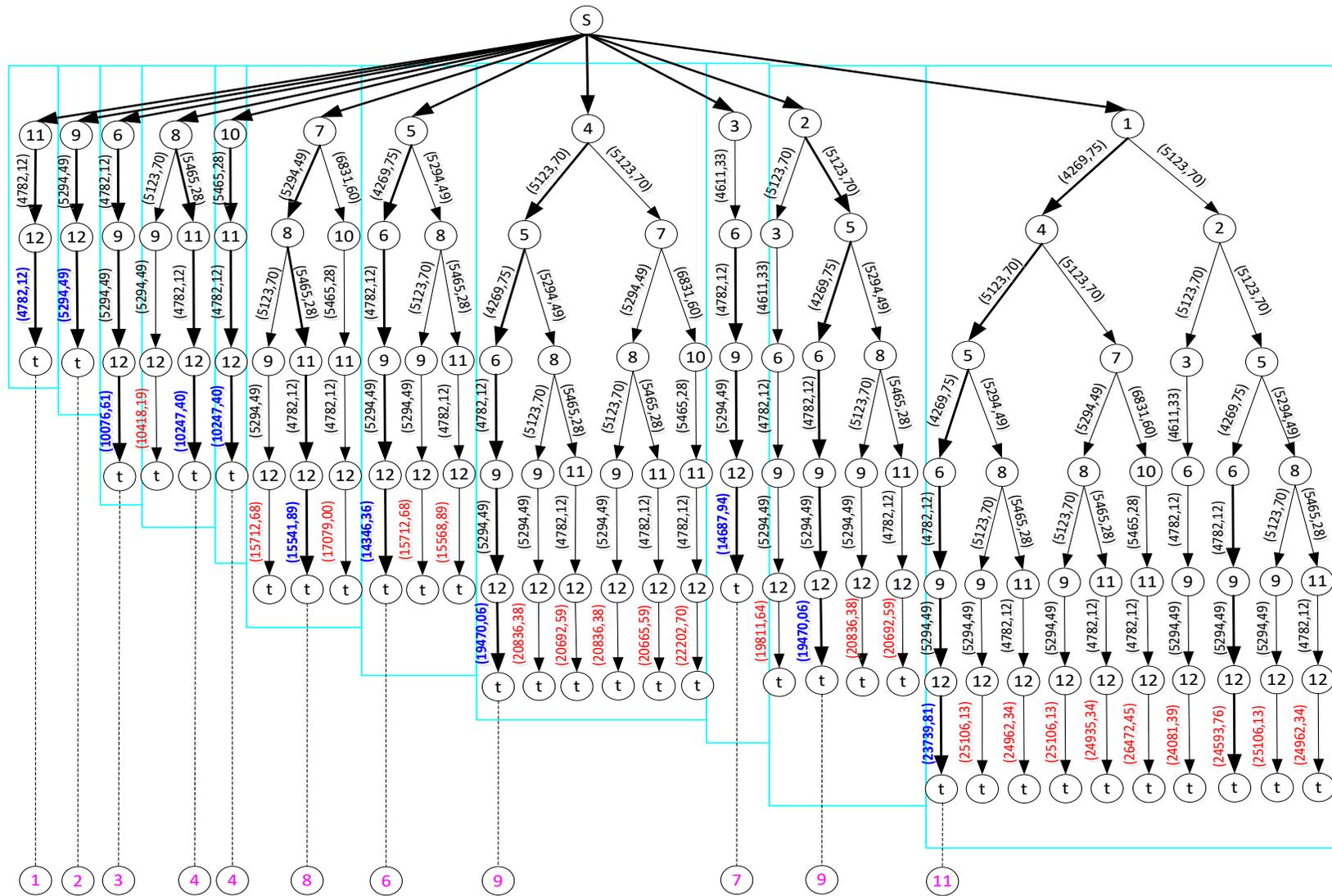


Рисунок 3.15 – Схема алгоритма ветвления всех путей

Стоимость строительства:

$$C = \sum C_{ij} \cdot q_{ij} \text{ или}$$

$$C = 2\,131,46 \text{ тыс.руб.}$$

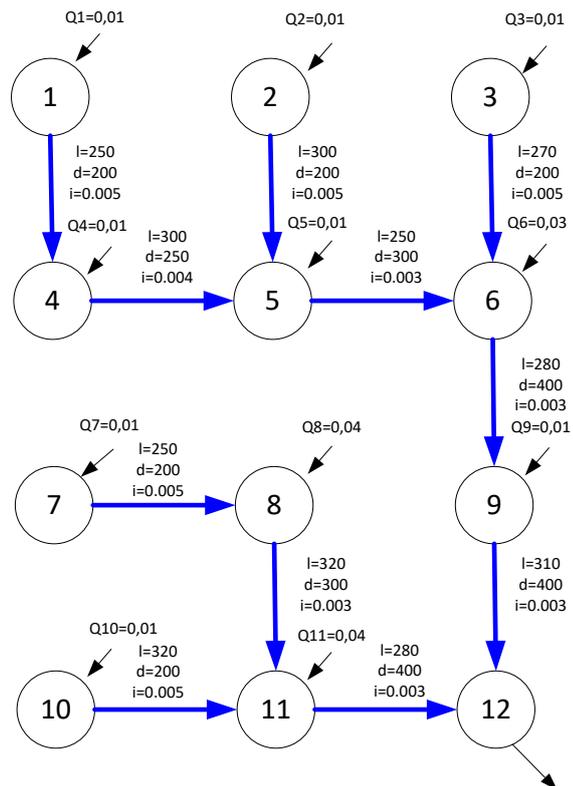


Рисунок 3.16 – Результаты оптимизации

Результаты оптимизации сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 - Параметры трубопроводов новых сети водоотведения

Участок	Длина L, м	Стоимость единицы потока, C_{ij} тыс. руб.	Расход на участке, m^3/c	Стоимость строительства, C, тыс. руб.	Диаметр трубы, d, м		Уклон, i
1-4	250	4 269,75	0,01	42,70	0,17	0,20	0,005
2-5	300	5 123,70	0,01	51,24	0,17	0,20	0,005
3-6	270	4 611,33	0,01	46,11	0,17	0,20	0,005
4-5	300	5 123,70	0,02	102,47	0,22	0,25	0,004
5-6	250	4 269,75	0,04	170,79	0,29	0,30	0,003
6-9	280	4 782,12	0,08	382,57	0,37	0,40	0,003
7-8	250	4 269,75	0,01	42,70	0,17	0,20	0,005
8-11	320	5 465,28	0,05	273,26	0,31	0,30	0,003
9-12	310	5 294,49	0,09	476,50	0,39	0,40	0,003
10-11	320	5 465,28	0,01	54,65	0,17	0,20	0,005
11-12	280	4 782,12	0,10	478,21	0,40	0,40	0,003
			$\Sigma=$	2 121,21			

3.4. Модели и методы оптимизации развивающихся систем водоотведения

Изложенный в предыдущем параграфе метод позволяет выбирать оптимальные решения при проектировании новых и реконструкции существующих систем водоотведения, включая решения по равномерной загрузки коллекторов и перераспределения потоков сточной жидкости. Ниже на тестовом примере (см. рис. 3.17) подробно рассмотрены эти задачи.

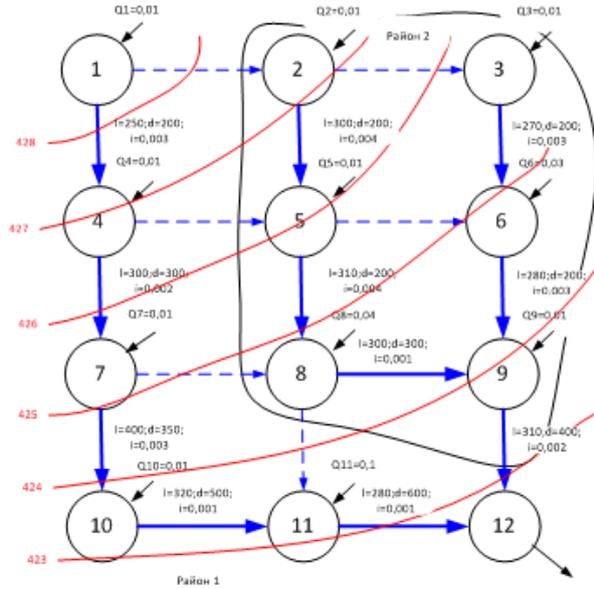


Рисунок 3.17 – Реконструируемая СВО

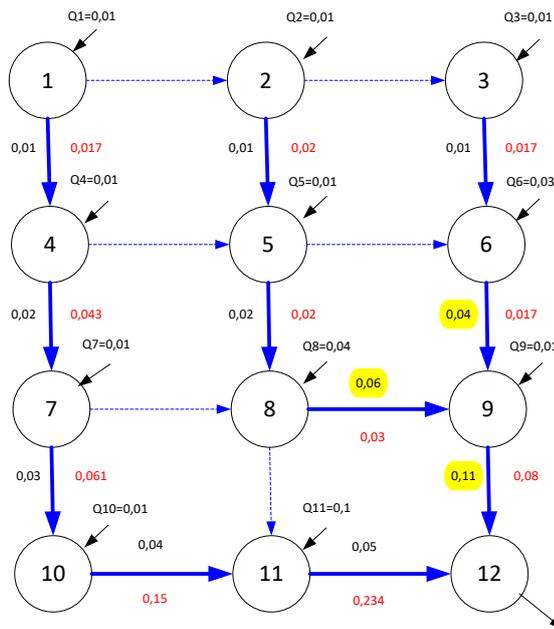


Рисунок 3.18 – Расчетная схема СВО

Анализ результатов расчета показал, что участки 8-9; 6-9; 9-12 перегружены и требуют реконструкции. Для района 1-10 все участки недогружены и тоже требуют реконструкции. Требуется загрузка одних коллекторов и разгрузка других. Следует отметить, что при оптимизации единицы стоимости потока для существующих коллекторов можно принять равными единичным значениям

эксплуатационных затрат, а для новых участков их надо вычислять для каждого диаметра трубопровода (см. табл.3.4):

- участок 2-3, $l=330\text{м}$

$$C_{2,3} = C_i \cdot l_{2-3} = 17079 \cdot 330 / 1000 = 5636,07 \text{ тыс. руб на } 1\text{м}^3/\text{с}.$$

- Для участка 1-2. $l=250\text{м}$

$$C_{1,2} = C_i \cdot l_{1-2} = 17079 \cdot 250 / 1000 = 4269,75 \text{ тыс. руб на } 1\text{м}^3/\text{с}.$$

- Для участка 5-6. $l=670\text{м}$

$$C_{5,6} = C_i \cdot l_{5-6} = 17079 \cdot 670 / 1000 = 11442,93 \text{ тыс. руб на } 1\text{м}^3/\text{с}.$$

- Для участка 4-5. $l=500\text{м}$

$$C_{4,5} = C_i \cdot l_{4-5} = 17079 \cdot 500 / 1000 = 8539,5 \text{ тыс. руб на } 1\text{м}^3/\text{с}.$$

- Для участка 7-8. $l=330\text{м}$

$$C_{7,8} = C_i \cdot l_{7-8} = 17079 \cdot 330 / 1000 = 5636,07 \text{ тыс. руб на } 1\text{м}^3/\text{с}.$$

- Для участка 8-11: $l=500\text{м}$

$$C_{8,11} = a_4 \cdot l_{8-11} = 17079 \cdot 500 / 1000 = 8539,5 \text{ тыс. руб на } 1\text{м}^3/\text{с}.$$

Таблица 3.4 - Стоимость единицы потока для новых участков сети водоотведения

№ абонента	Q, расход от абонента в м ³ /с	№. Начального участка	№. Конечного участка	Длина участка, м	Стоимость единицы потока, С _{ij} тыс. руб. на м ³
1	0,01	1	2	250	4269,75
2	0,01	1	4	250	4269,75
3	0,01	2	3	330	5636,07
4	0,01	2	5	300	5123,70
5	0,01	3	6	270	4611,33
6	0,03	4	5	500	8539,50
7	0,01	4	7	300	5123,70
8	0,04	5	6	670	11442,93
9	0,01	5	8	310	5294,49
10	0,01	6	9	280	4782,12
11	0,01	7	8	330	5636,07
12	Узел сбр.	7	10	400	6831,60
		8	9	300	5123,70
		8	11	500	8539,50
		9	12	310	5294,49
		10	11	320	5465,28
		11	12	280	4782,12

С учетом выше изложенного, построена избыточная схема системы водоотведения, включая существующие и новые возможные разгрузочные коллектора (см. рис.3.19).

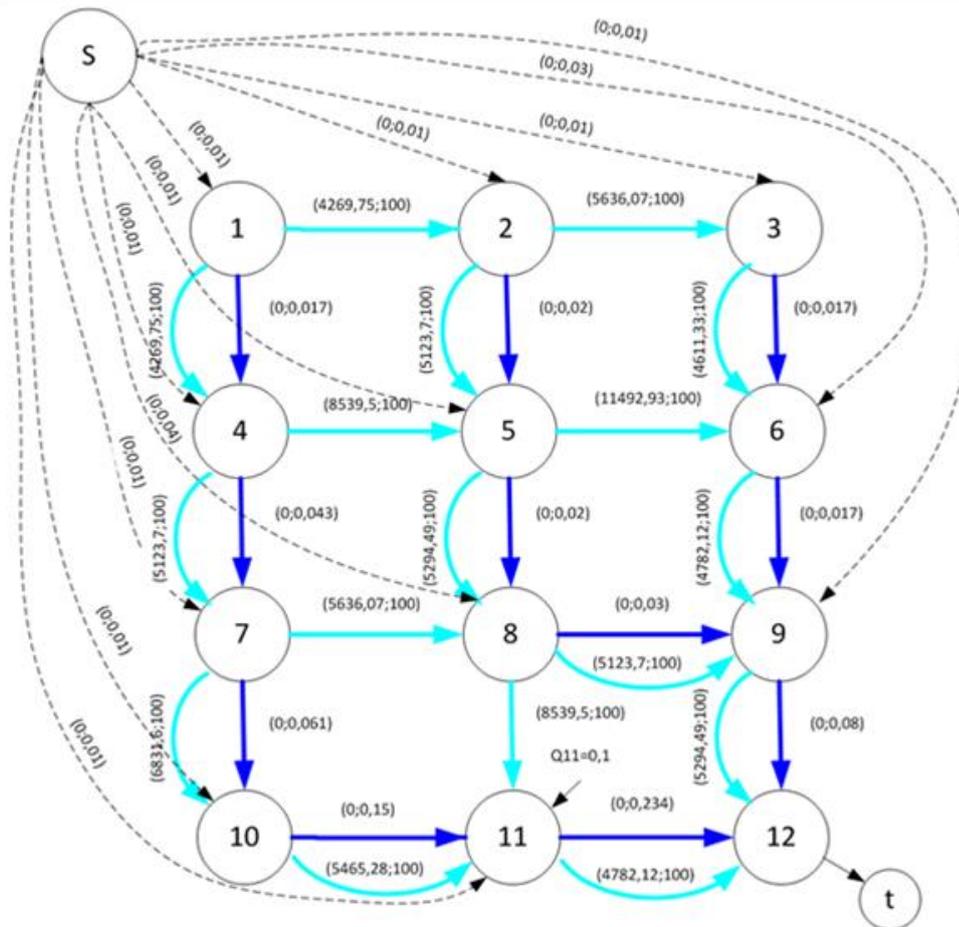
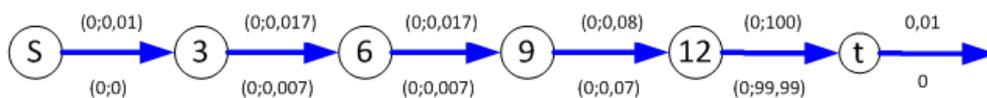


Рисунок 3.20 - Транспортная сеть реконструируемой системы водоотведения

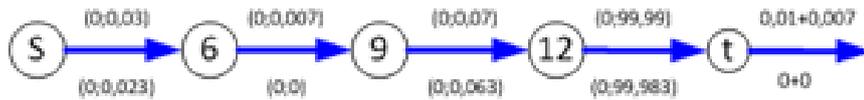
Первый этап. Определяется маршрут с минимальными суммарными значениями удельных стоимостных показателей.

1.



Под участками в скобках указаны стоимости потоков и резервы пропускной способности. Поток на участке S-3 достиг своего максимального значения (из схемы удаляется).

2.



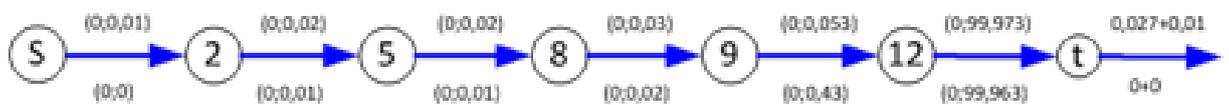
Удаляем участок 6-9.

3.



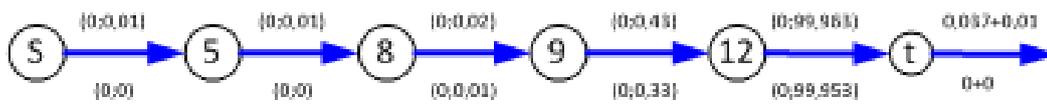
Удаляем участок S-9.

4.



Удаляем участок S-2.

5.



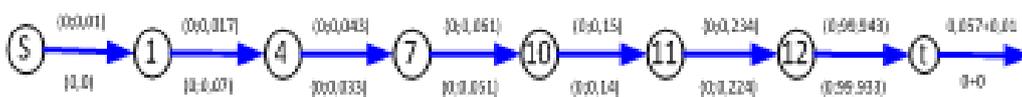
Удаляем участки S-5 и 5-8.

6.



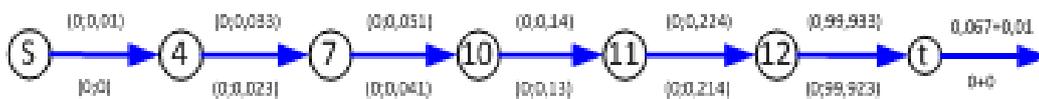
Удаляем участок 8-9.

7.



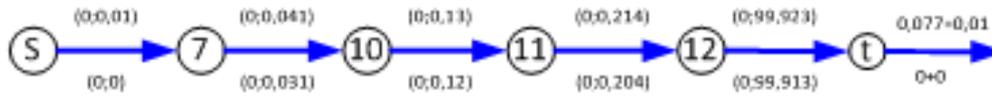
Удаляем участок S-1.

8.



Удаляем участок S-4.

9.



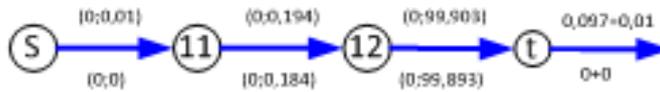
Удаляем участок S-7.

10.



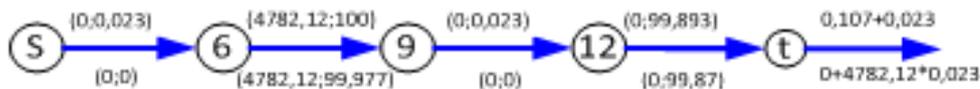
Удаляем участок S-10.

11.



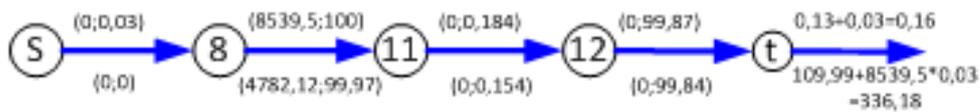
Удаляем участок S-11.

12.



Удаляем участки S-6 и 9-12.

13.



Удаляем участок S-8.

Граф развалился, расчет закончился. Следовательно, расчет считается законченным. Результаты расчета представлены на рисунке 3.21.

Диаметр и уклон трубопровода определяется по формуле:

$$d_i = 6,655 \cdot N^{0,411} \cdot q_i^{0,411}$$

$$I_i = \frac{1}{1000 \cdot d_i}$$

Строятся два участка:

- первый участок: параллельный существующему коллектору 6-9.

$$d_{6-9} = 6,655 \cdot N^{0,411} \cdot q_{6-9}^{0,411} \text{ или } d_{6-9} = 0,25 \text{ м}$$

6-9.

$$d_{6-9} = 6,655 \cdot N^{0,411} \cdot q_{6-9}^{0,411} \text{ или } d_{6-9} = 0,25 \text{ м}$$

$$I_{6-9} = \frac{1}{1000 \cdot d_{6-9}} = 0,005$$

- второй участок: новый участок 8-11.

$$d_{8-11} = 6,655 \cdot N^{0,411} \cdot q_{8-11}^{0,411} \text{ или } d_{6-9} = 0,25 \text{ м}$$

$$I_{6-9} = \frac{1}{1000 \cdot d_{6-9}} = 0,004$$

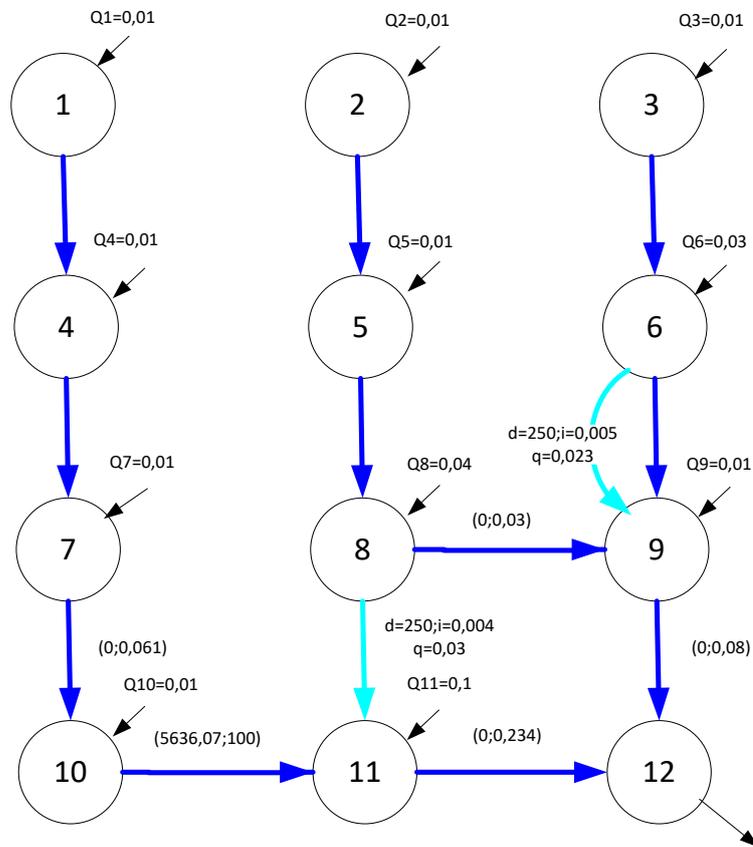


Рисунок 3.21 – Наилучшее решение

Вариант схемы реконструкции системы водоотведения, представленной на рисунок 3.21, предполагает перекладку или расширение существующих коллекторов. Для этого в транспортную схему вводятся параллельные существующим участкам сети фиктивные ветви (см. рисунок 3.22).

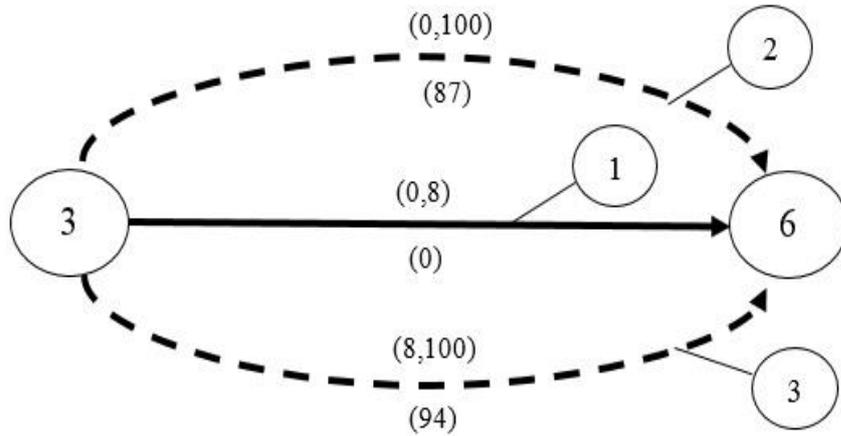


Рисунок 3.22 – Моделирование способов реконструкции (3 - параллельная прокладка, 2 - перекладка на больший диаметр, 1- существующий коллектор)

Задача 1. Развитие и реконструкция самотечного коллектора

В практике эксплуатации и развития систем водоотведения часто встречаются случаи, что одни участки коллектора работают в напорном режиме, другие со скоростями, меньше заиливающих скоростей. Требуется оптимальным образом где-то уменьшить диаметры трубопроводов, а где-то увеличить. Рассмотрим пример, представленный на рис. 3.23.

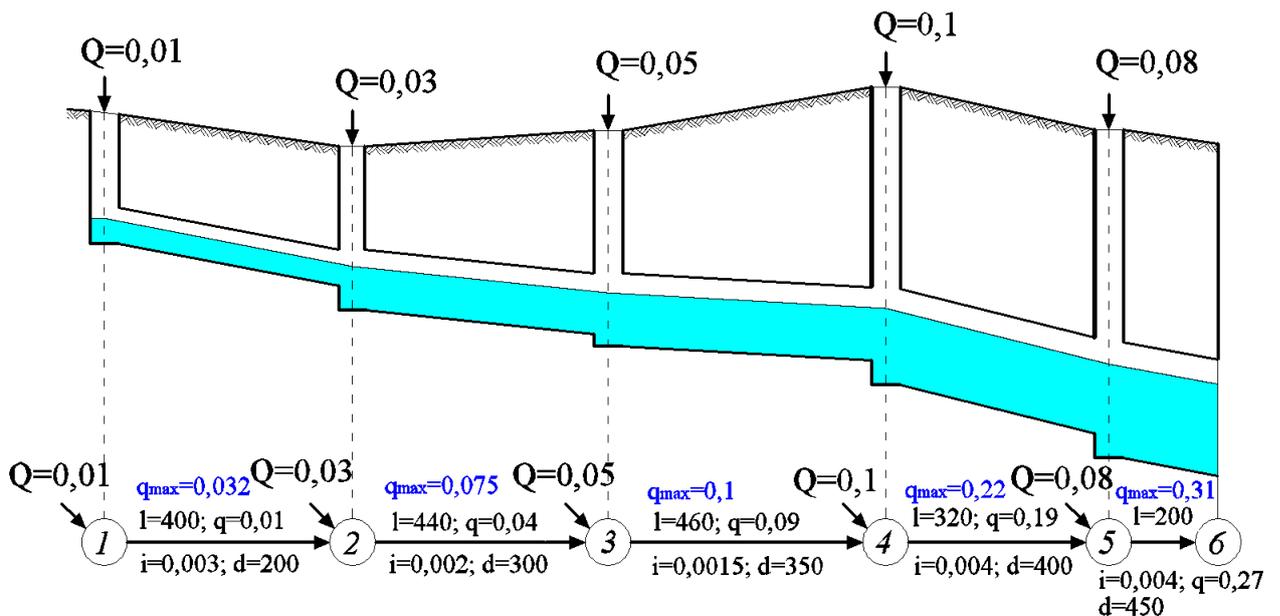


Рисунок 3.23 – Самотечный коллектор и его оптимальные гидравлические параметры

В случае появления нового абонента необходимо расчеты согласно методики, изложенной в [162] и проверить, будет ли переполняться существующая сеть коллекторов. В соответствии с рис 3.24 на участках 4-5, 5-6 будет режим напорным. Для примера, представленного на рисунке 3.24, для участков 4-5, 5-6 $q \geq q_{\max}$. Для существующих сетей q_{\max} и будет соответствовать максимальной пропускной способности участков в транспортной сети.

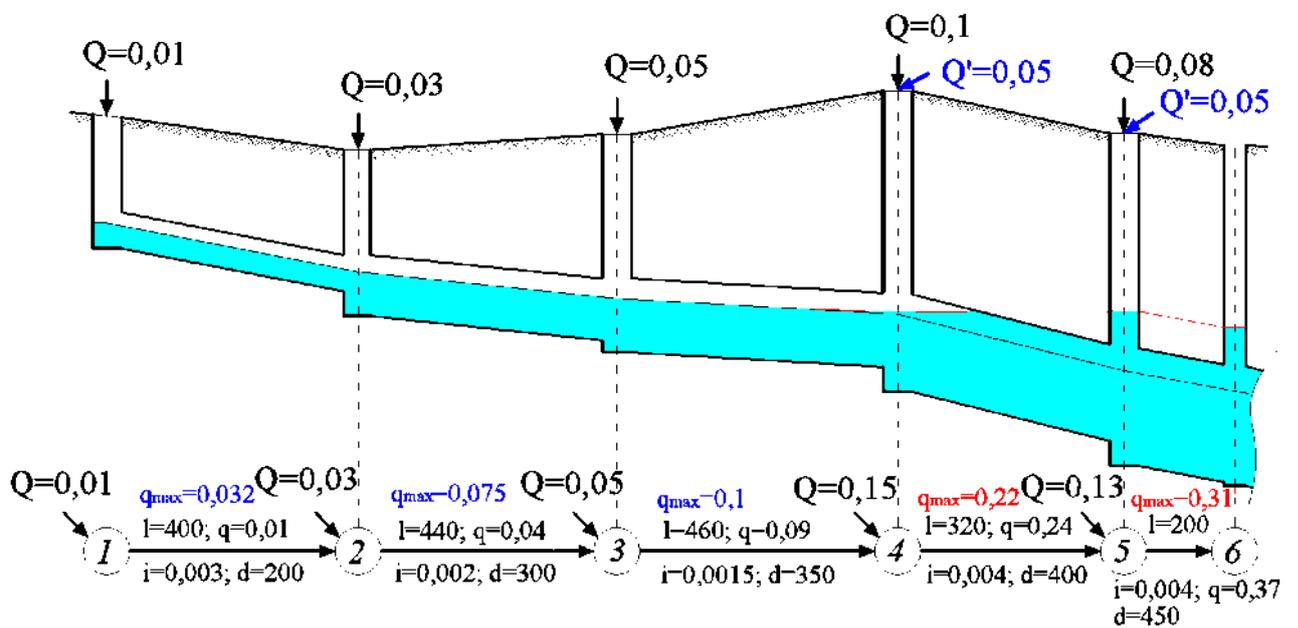


Рисунок 3.24 – увеличение пропускной способности коллектора

Требуется привести параметры коллектора к работе его в самотечном режиме. Для этого формируется избыточная схема, представленная на рис 3.25:

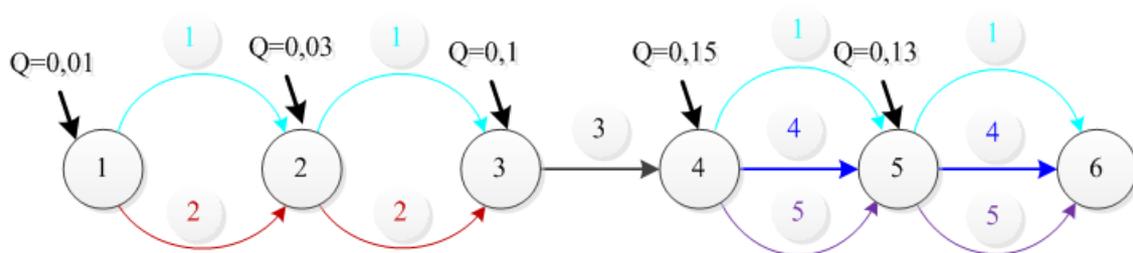


Рисунок 3.25 - Избыточная схема реконструируемой системы водоотведения

Получены следующие формулы расчета стоимости единицы потока:

Коллектор из полиэтиленовых труб

$$C = 3565,98 \cdot \frac{q^{0,4266}}{i^{0,2133}} \quad (3.19)$$

Затраты на протаскивания нового трубопровода в старом

$$C = 815,79 \cdot \frac{q^{0,7452}}{i^{0,3726}} \quad (3.20)$$

бес канальное увеличение диаметра трубы:

$$C = 1009 \cdot \frac{q^{0,7492}}{i^{0,3746}} \quad (3.21)$$

С учетом (3.19)-(3.21), стоимости единицы потоков будут следующими (см. табл.3.5).

Таблица 3.5 - Определение стоимости единицы потока

№ участка	Участок	Длина, / в м	Уклон, i	C, тыс. руб./ км	Максимальный поток, м ³ /с. q _{max}	Удельная стоимость тыс. руб./ км. на м ³
1	1-2	400	0,003	17079,00	0,032	6962,04
2	2-3	440	0,002	17079,00	0,075	7498,11
3	3-4	460	0,0015	17079,00	0,10	7903,33
4	4-5	320	0,004	17079,00	0,22	5504,18
5	5-6	200	0,004	17079,00	0,31	3302,51

На рисунке 3.26 представлена схема всевозможных вариантов реконструкции

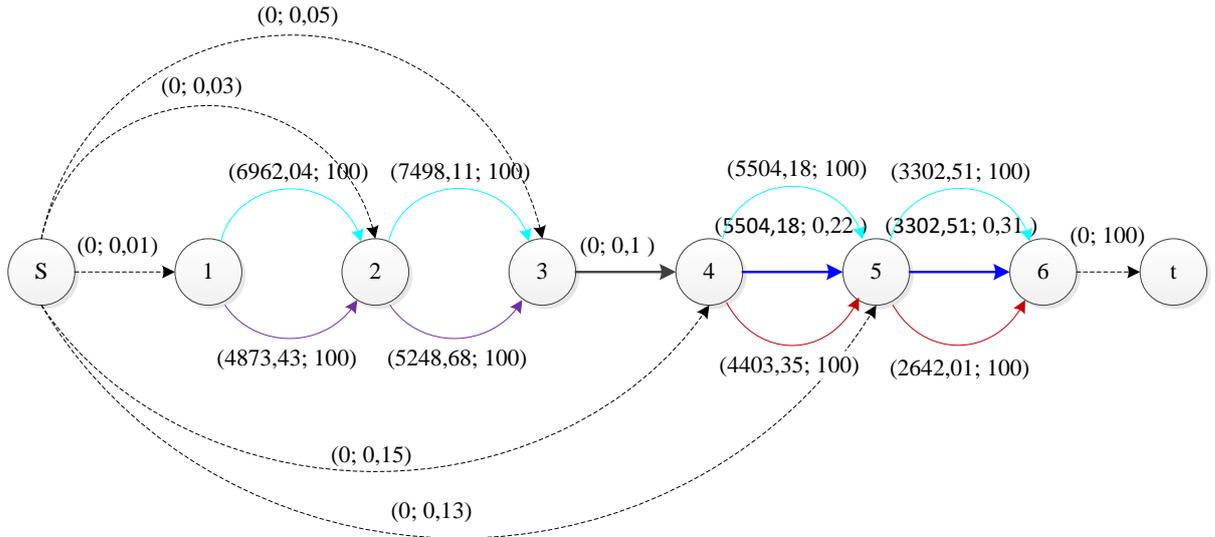
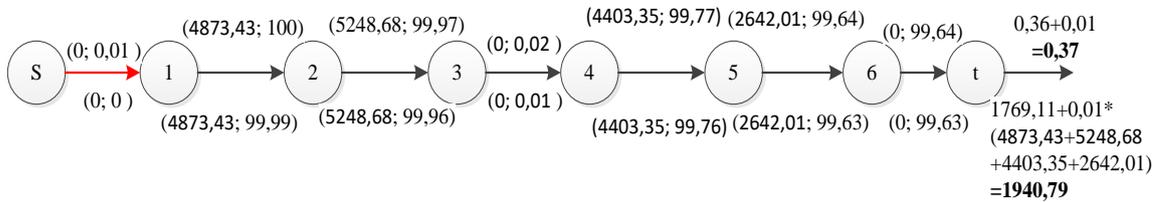


Рисунок 3.26 - Схема всевозможных вариантов реконструкции

Последовательность вычислений.

Удаляем участок S-2.



И т.д.

Расчет считается законченным. Результаты расчета представлены на рисунке 3.27, согласно которому на первых двух участках прокладывается труба в трубе меньшего диаметра,

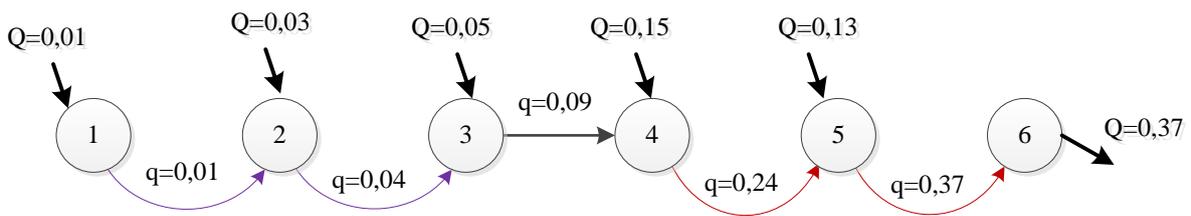


Рисунок 3.27 – Результаты расчета

а двух последних расширяется существующие участки (см. рис. 3.28).

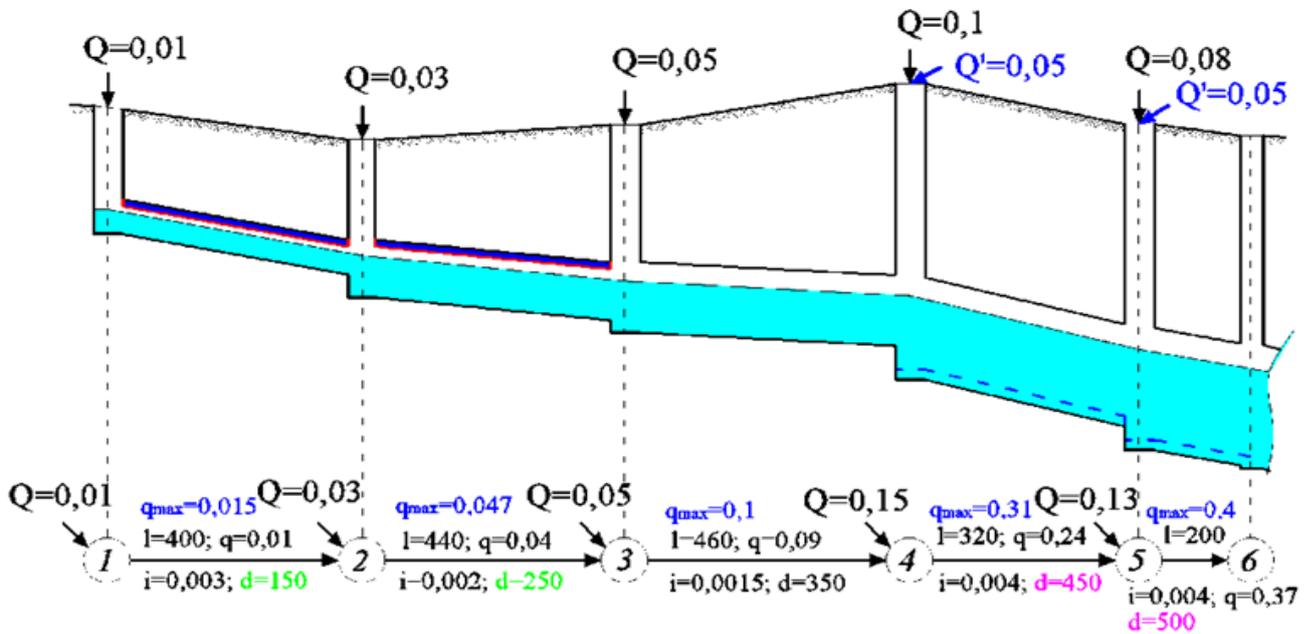


Рисунок 3.28 – Уровень наполнения коллектора после его реконструкции

Задача 2. Строительство новой и реконструкция существующей СВО. Имеется два существующих района (1 и 2), которые между собой не связаны (см. рис 3.29) и строится третий новый район, состоящий из 12-ти абонентов.

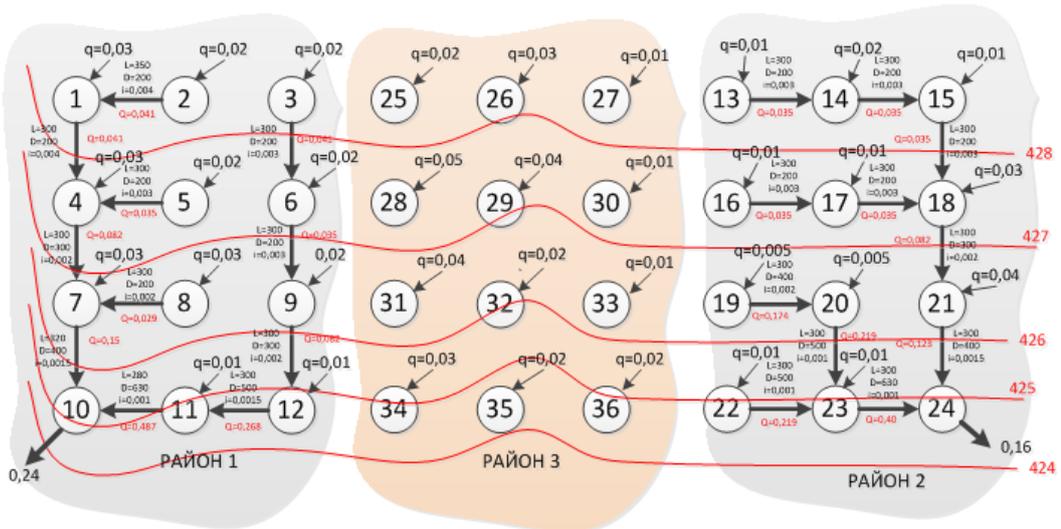


Рисунок 3.29 – Схема двух существующих и одной новой проектируемой СВО

На рис. 3.30 представлена избыточная схема, которая составлена исходя из возможных вариантов сброса сточных вод в существующую канализацию двух районов. Вариант реконструкции принят – параллельная прокладка нового трубопровода (это голубые штриховые участки на рис. 3.30).

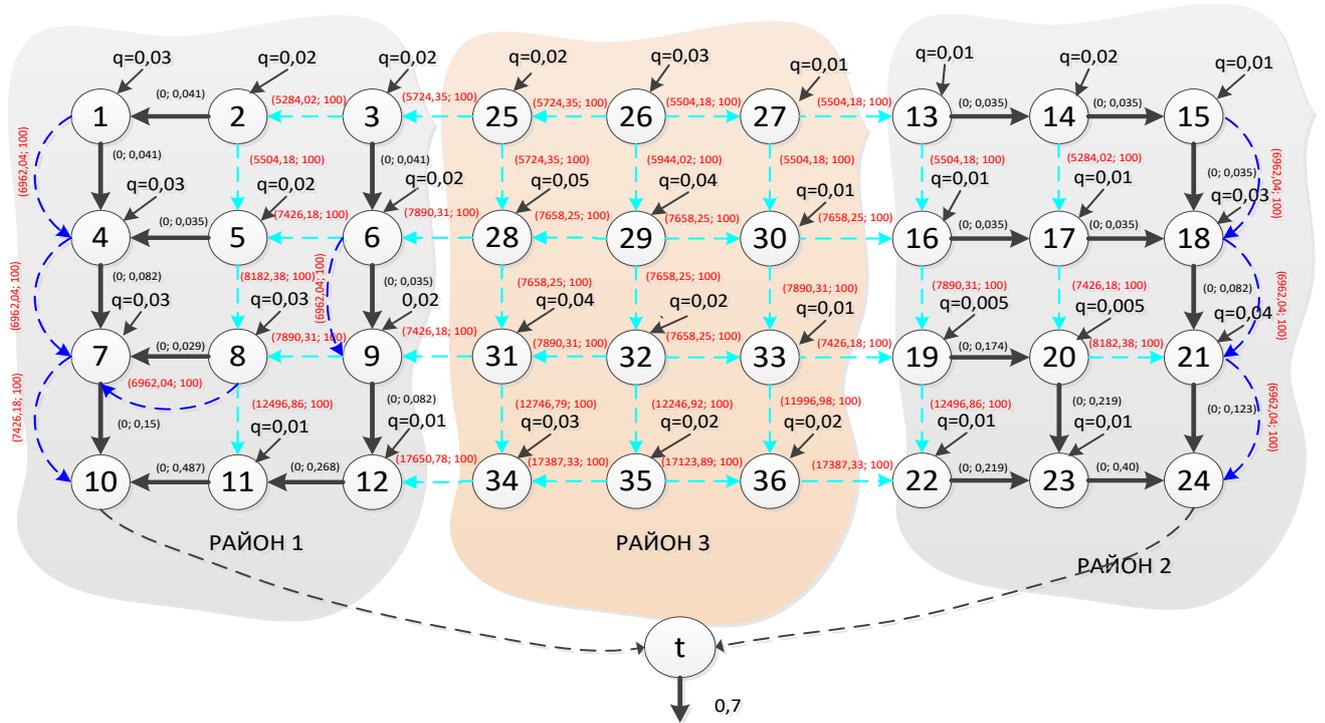


Рисунок 3.30 – Варианты реконструкции СВО

С учетом реконструируемых участков сети построена транспортная сеть (см. рис.3.31).

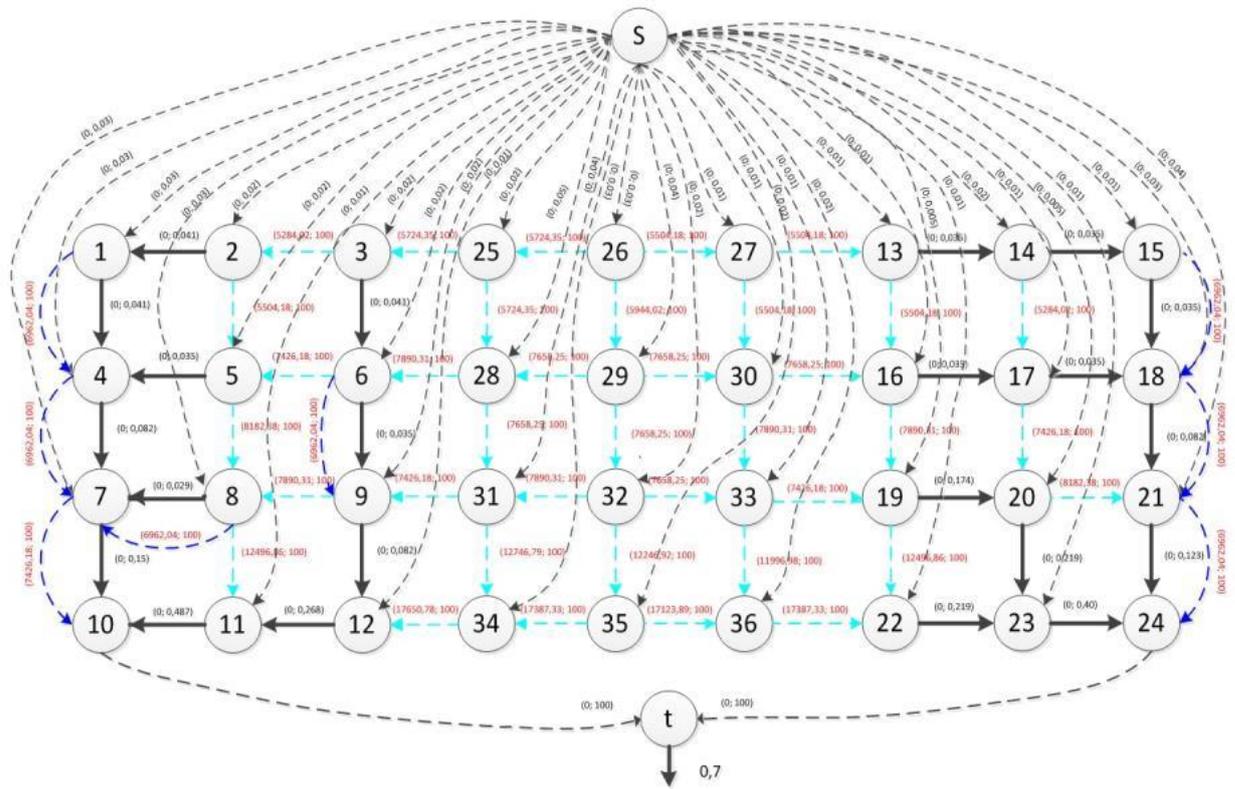


Рисунок 3.31 – Расширенная расчетная схема

В результате расчета было рассмотрено 51 маршрут и граф распался на два несвязанных подграфа.

Результаты расчета представлены на рис. 3.32 и в табл. 3.6. В соответствии с таблицей 3.6. стоимость строительства составила 7,44 млн. руб. и требуется реконструкция пяти существующих коллекторов и строительство 21 нового трубопровода.

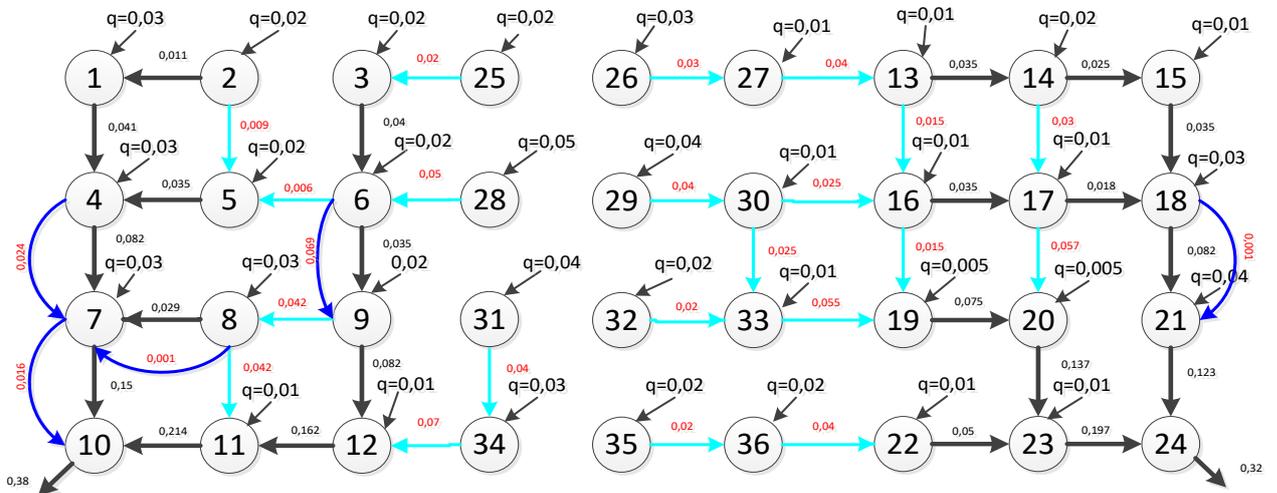


Рисунок 3.32 – Результаты оптимизации

Таблица 3.6 - Параметры реконструируемых участков сети

№ пп	Участок	Длина, l (м)		Уклон, i		Диаметр, мм		Расход, м ³ /с	Стоимость потока, тыс. руб.
Новые трубопроводы									
1	25-3	260		0,004		200		0,02	114,49
2	26-27	250		0,004		200		0,03	165,13
3	27-13	260		0,004		200		0,04	228,97
4	14-17	240		0,004		200		0,03	158,52
5	13-16	250		0,004		200		0,015	82,56
6	2-5	250		0,004		200		0,009	49,54
7	28-6	340		0,003		200		0,05	394,52
8	6-5	320		0,003		200		0,006	44,56
9	29-30	330		0,003		300		0,004	30,63
10	30-16	330		0,003		300		0,025	191,46
11	17-20	320		0,003		300		0,057	423,29
12	16-19	340		0,003		300		0,015	118,35
13	30-33	340		0,003		300		0,025	197,26
14	9-8	340		0,003		400		0,042	331,39
15	32-33	330		0,003		400		0,02	153,17
16	33-19	320		0,003		400		0,055	408,44
17	31-34	510		0,002		400		0,04	509,87
18	8-11	500		0,002		400		0,042	524,87
19	34-12	670		0,0015		500		0,07	1235,55
20	35-36	650		0,0015		500		0,02	342,48
21	36-22	660		0,0015		500		0,04	695,49
Параллельная прокладка нового коллектора									
22	4-7	300	300	0,003	0,003	300	300	0,024	167,09
23	8-7	300	300	0,003	0,003	200	200	0,001	6,96
24	7-10	320	320	0,003	0,003	400	400	0,016	118,82
25	6-9	300	300	0,003	0,003	200	200	0,069	480,38
26	18-21	300	300	0,003	0,003	300	300	0,001	6,96

Для рассмотрения возможного варианта переброски сточных вод в напорном исполнении в транспортную сеть добавляются две дуги, направленные в противоположном направлении (см. рис. 3.33 и рис. 3.34).

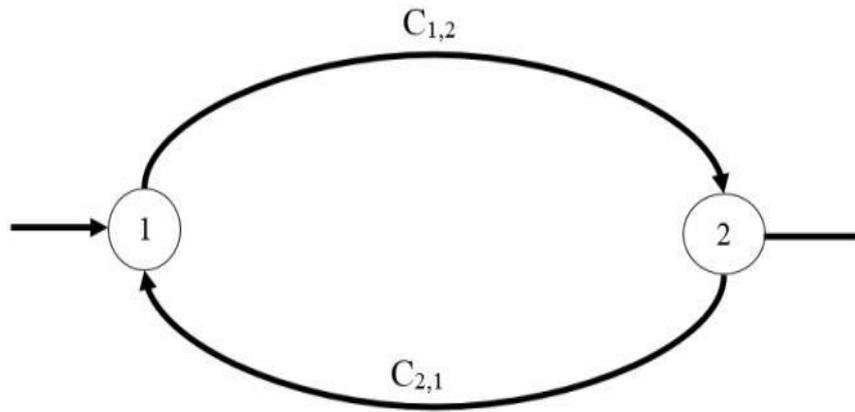


Рисунок 3.33 – Подграф, моделирующий выбор насосной станции.

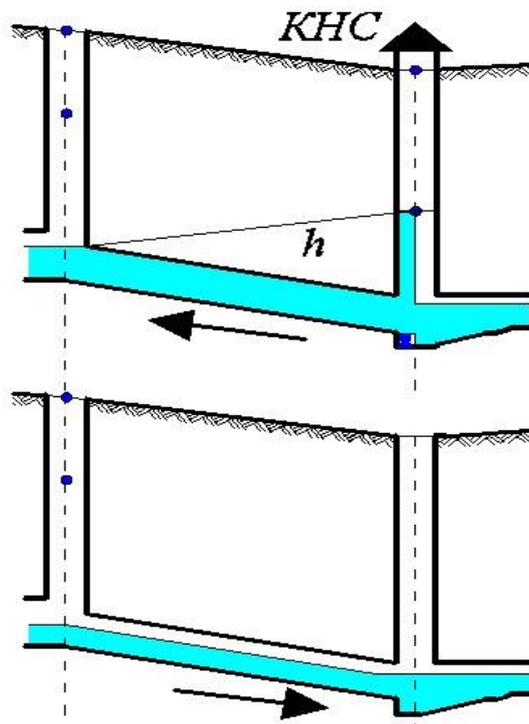


Рисунок 3.34 – Вариант выбора насосной станции.

3.5. Обоснование схемы водоотведения центральной зоны о. Байкал

Центральная экологическая зона оз. Байкал Иркутской области – это прежде всего остров Ольхон, побережье Малого моря и береговая зона 30 -50 км. Проживает на этой территории население чуть более 50 тыс. человек. Канализационные очистные сооружения имеются в южной зоне оз. Байкал и их всего 6. Что касается остальных населенных пунктов, то они используют надворные туалеты, а турбазы, которые растут как грибы, имеют выгребные ямы без дна. Это железобетонные кольца, как правило, их 2,3, закопанные в землю, из которых стоки дренируют в грунт и попадает в о. Байкал. Следует отметить, что в 2017 г в качестве эксперимента, были установлены четыре локальных станции глубокой биохимической очистки фирмы «Alta Bio 5», производительностью 1м³/сут (на 5 чел) по 1 млн. руб. каждая. Хотя фирма – производитель в своих прайсах оценивает такие установки по 100 тыс. руб.

Применение и эффективность разработанных подходов и методов проиллюстрируем на примере обоснования схемы водоотведения центральной зоны о. Байкал. Согласно СП 32.13330.2012 и методических указаний по проектированию систем водоотведения намечается не менее 2, 3 альтернативных вариантов схем водоотведения и путем технико- экономического сравнения выбирается лучший из них. Для острова Ольхон и «Малого моря» о. Байкал намечены и обоснованы следующие пять вариантов:

1. Все поселки и турбазы оборудуются индивидуальными очистными сооружениями глубокой очистки стоков с последующим их испарением в соответствующих прудах-испарителях (рис.3.35).
2. Сточные воды забираются из выгребных ям и доставляются автоцистернами на КОС о. Ольхон, в районе МРС и в районе п. Сарма (см. рисунок 3.36).
3. Организуется трубопроводная система доставки стоков на КОС, она может быть как напорной, безнапорной, так и напорно-безнапорной (см. рис. 3.36).

4. На очистные сооружения стоки доставляются специализированными баржами, т.е. водным транспортом (см. рисунок 3.37).
5. Стоки собираются и вывозятся в другой водораздел (см. рисунок 3.38).



Рисунок 3.35 - Вариант локальных очистных сооружений



Рисунок 3.36 - Вариант централизации очистки стоков



Рисунок 3.37 - Вариант водного транспорта сточных вод



Рисунок 3.38 - Централизованные системы водоотведения с одной КОС

В таблице 3.7 представлены стоимостные показатели этих вариантов. Лучшим является вариант 3.

Вместе с тем, если наложить эти 5 вариантов, то получится граф, который представлен на рисунке 3.39.

Таблица 3.7 - Сравнение вариантов устройства системы водоотведения

№ варианта	Единовременные капиталовложения, млн. руб.	Годовые эксплуатационные затраты, млн. руб.	Приведенные затраты, млн. руб. руб.
1	7012.0	35.00	1202.0
2	8903.0	140.0	1620.0
3	1350.0	32.00	257.0
4	1560.0	134.0	394.0
5	8611.0	300.0	1730.0
6	872.00	36.00	182.0

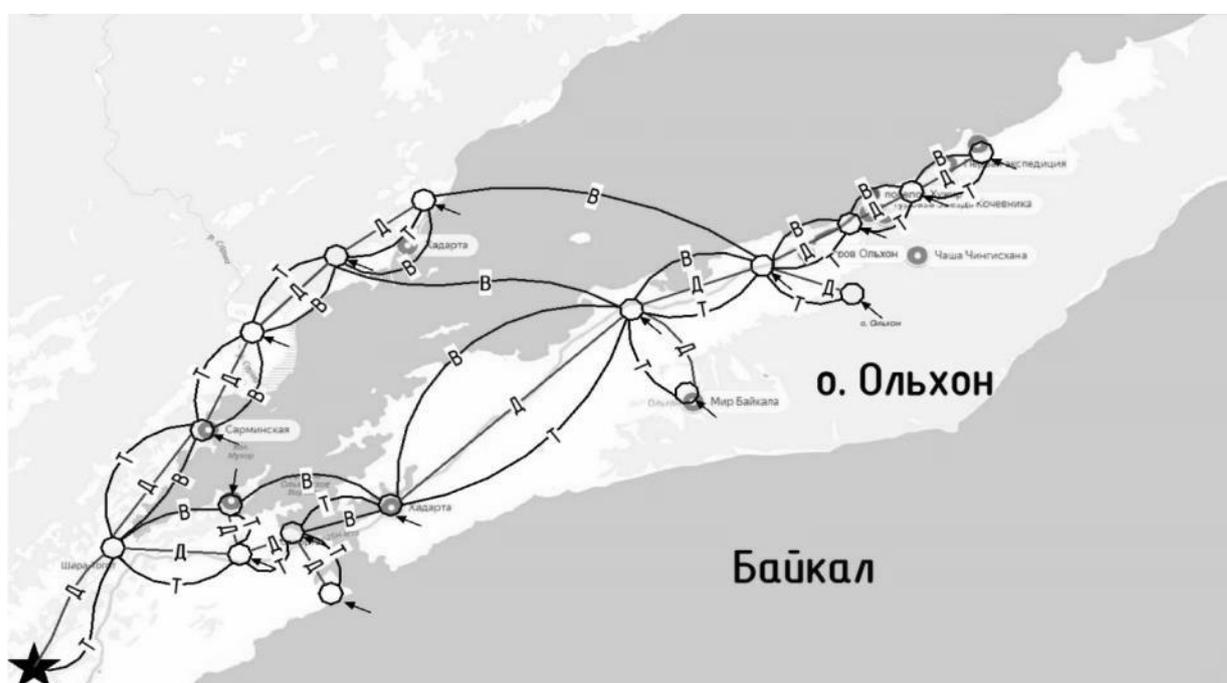


Рисунок 3.39 – Граф возможных вариантов проектных решений водоотведения на ос. Ольхон (в - водный транспорт, д – автомобильный, т – трубопроводный)

На основе избыточной схемы можно построить транспортную сеть, имеющую узел входа потоков – поступление стоков от абонентов в систему водоотведения, и узел выхода потоков – сброса стоков в оз. Байкал или в резервуары выпаривания (см. рисунок 3.40). В результате оптимизации выбран вариант, представленный на рисунке 3.41 и в таблице 3.7 под номером 6. Этот вариант соответствует централизованной системе трубопроводного транспорта

сточных вод на очистные сооружения с дальнейшим выпариванием очищенных вод в соответствующих прудах.

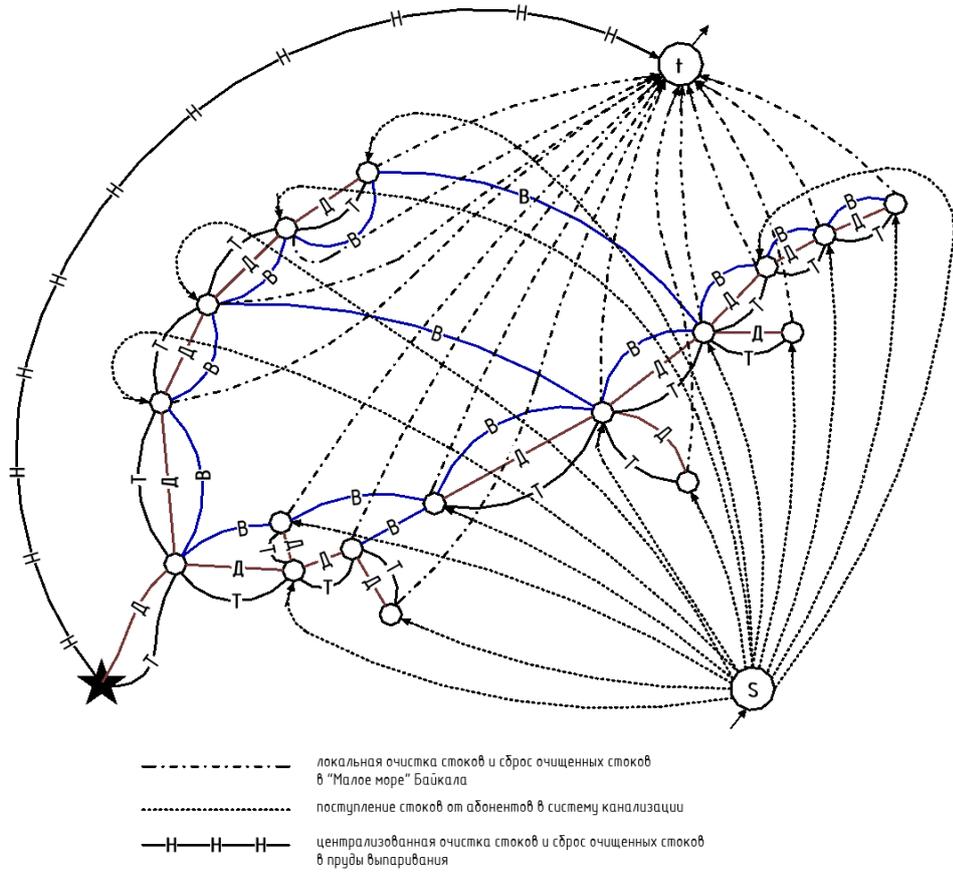


Рисунок 3.40 - Транспортная схема канализации о. Ольхон и Малого моря Байкала

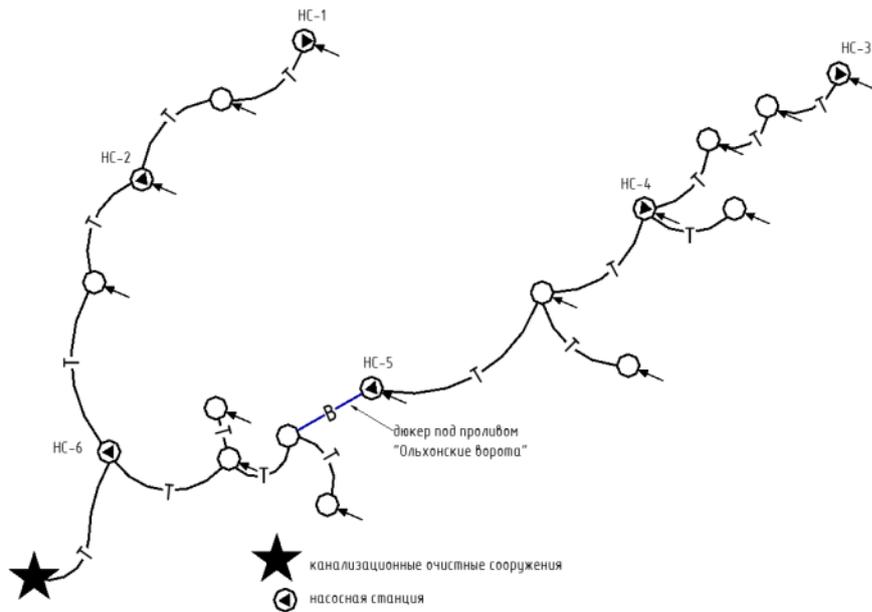


Рисунок 3.41 - Оптимальная схема канализации о. Ольхон и Малого моря Байкала

Оптимальный вариант по единовременным капиталовложениям меньше на 478 млн. руб. чем вариант, выбранный традиционным способом и на 75 млн. руб. эффективнее по приведенным затратам. Объясняется это тем, что метод анализирует всевозможные (сотни тысяч вариантов схем водоотведения), чего даже опытный проектировщик не в состоянии выполнить.

Выводы

1. Для оптимизации развивающихся систем водоотведения и выбора проектных вариантов предложены критерии затрат жизненного цикла и дисконтированные приведенные затраты, учитывающие разновременность их вложения.
2. Расчетные затраты (затраты жизненного цикла и дисконтированные приведенные затраты), используя гидравлические и стоимостные данные, преобразованы в виде функции от объемов транспортируемых сточных вод.
3. Исследованы эти функции расчетных затрат и показана оптимальность древовидных решений структуры систем водоотведения, предложен метод, который позволяет определить такие структуры.
4. На примере обоснования схемы водоотведения центральной зоны о. Байкал показана возможность на основе предлагаемой методики решать комплексные задачи с использованием различных видов транспорта сточной жидкости и различных технологий ее очистки.

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ

4.1. Методические основы повышения надежности развивающихся систем водоотведения

Уже отмечалось, надежность СВО недостаточная и при выходе из строя любого участка стоки будут изливаться на поверхность земли. При плановой прочистки любого участка сети также стоки будут изливаться на поверхность земли. По оценки надежности систем водоотведения уже разработаны ряд методических указаний, которые изложенные в работах [23,81,82,48,61,62,63,95,112]. Например, в работе [23] предложено надежность функционирования систем водоотведения оценивать следующими соотношениями: $\varphi = \frac{\Delta Q_{сбр}}{Q}$, где

$$\varphi = \frac{\Delta Q_{сбр}}{Q}, \text{ где } Q = \left(\sum_{j=1}^m Q_j \cdot t \right), \quad \Delta Q_{сбр} = \frac{\lambda_{экс}}{\lambda_{экс} + \mu} \cdot \sum_{j=1}^m Q_j \cdot t, \quad (4.1)$$

$\Delta Q_{сбр}$ - объем стоков, поступающих на территорию и в водоемы без очистки за год, м³/год; Q - прогнозируемый объем отведения стоков на очистные сооружения за год эксплуатации, м³/год; Q_j - расчетный расход стока (м³/с), отводимого от абонента j , $j=1, \dots, m$; m - количество абонентов; t - систем водоотведения за год, в сек; $\lambda_{экс}$ - эквивалентная интенсивность отказов системы водоотведения, 1/год; μ - интенсивность восстановления

В работе [82] предложена методика количественной оценки надежности функционирования систем водоотведения, (м³/год):

$$\Delta Q_{сбр} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \gamma_i \cdot t \quad (4.2)$$

И предложены формулы для ориентировочного вычисления значений интенсивности отказов λ , [1/км год]:

- для асбестоцементных	$\lambda_i = 0,048 \cdot d_i^{-0,8}$;	
- для чугунных	$\lambda_i = 0,056 \cdot d_i^{-0,9}$;	(4.3)
- для керамических	$\lambda_i = 0,04 \cdot d_i^{-0,8}$;	
- для железобетонных	$\lambda_i = 0,006 \cdot d_i^{-0,9}$;	
- для пластмассовых	$\lambda_i = 0,024 \cdot d_i^{-0,8}$.	
- бетонных колодцев	$\lambda_k = 0,028$.	

Трудоемкость ремонтных работ на сети, в чел. ч, определяется по формуле, которая взята из работы [82]:

$$T_i^p = 485 \cdot d_i - 504 \cdot d_i^2 - 27. \quad (4.5)$$

На основе (4.3) и (4.5) можно определить годовые объемы аварийных стоков. Вместе с тем, этими формулами надо пользоваться очень осторожно и, надо набирать и обрабатывать статистику по отказам того района, для которого проектируется система водоотведения.

В настоящее время такая работа проводится практически в каждом городе и населенном месте, хотя этой статистики еще недостаточно.

Вопросы надежности и безопасности систем водоотведения особенно актуальны на территориях с повышенной сейсмической опасности. Проведенные исследования последствий крупных землетрясений показали [56], что на аварийность системы существенно влияет мощность землетрясения, направления сейсмического воздействия и ряд других факторов и получена следующая формула:

$$K^\alpha = 0,08418 \cdot \sin(74,709 + \alpha) \cdot B^{2,6} \quad (4.6)$$

Где бальности (Б) по шкале MSK -64., α – угол направления сейсмического воздействия.

При проектировании развивающихся систем водоотведения необходимо стремиться выбирать и обосновывать такие варианты, которые бы имели минимальные стоимостные показатели и обладали свойствами устойчивости к землетрясением, надежности и управляемости. Существует несколько способов достижения этих целей, один из которых предлагается ниже.

Предлагается при оптимизации новых и реконструируемых систем водоотведения учитывать фактор надежности через затраты на ликвидацию аварийных ситуаций и через ущербы, которые наносятся сточными водами, попадающими на поверхность земли [176,173].

При этом использована ранее полученная зависимость диаметра трубопровода от расхода для его полного сечения (как это и отмечалось выше):

$$d_i = \frac{N_i^{0,375}}{0,6477 \cdot I_i^{0,1875}} \cdot x_i^{0,375}, (0,1 \leq d_i \leq 0,48 \text{ , м}). \quad (4.7)$$

Подставляя (4.4) – (4.6) в (4.3) получим:

$$\Delta Q_{сбр} = \sum_{i=1}^n \frac{(17 \cdot \lambda_i^k + \lambda_i)}{8760} \cdot \left(\frac{748,8 \cdot N_i^{0,375}}{I_i^{0,1875}} \cdot x_i^{0,375} - \frac{1200 \cdot N_i^{0,75}}{I_i^{0,375}} \cdot x_i^{0,75} - 27 \right) \cdot x_i \cdot l_i \quad (4.8)$$

Для асбестоцементных:

$$\Delta Q_{сбр} = \sum_{i=1}^n \left(17132 + 1221 \cdot \frac{N_i^{-0,3}}{I_i^{-0,15}} \cdot x_i^{-0,3} \right) \cdot \left(\frac{748,8 \cdot N_i^{0,375}}{I_i^{0,1875}} \cdot x_i^{1,375} - \frac{1200 \cdot N_i^{0,75}}{I_i^{0,375}} \cdot x_i^{1,75} - 27 \cdot x_i \right) \cdot l_i \quad (4.9)$$

Для чугунных:

$$\Delta Q_{сбр} = \sum_{i=1}^n \left(17132 + 136,4 \cdot \frac{N_i^{-0,3375}}{I_i^{-0,169}} \cdot x_i^{-0,3375} \right) \cdot \left(\frac{748,8 \cdot N_i^{0,375}}{I_i^{0,1875}} \cdot x_i^{1,375} - \frac{1200 \cdot N_i^{0,75}}{I_i^{0,375}} \cdot x_i^{1,75} - 27 \cdot x_i \right) \cdot l_i \quad (4.10)$$

Функции (4.8)- (4.1) близки к линейным и хорошо аппроксимируются как $\Delta Q_{сбр} = a_i \cdot x_i$, где a_i см. табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Коэффициент аппроксимации значений аварийности трубопроводов из различного материала a_i

	Асбестоцементные трубы	Чугунных трубы	Полиэтиленовые трубы	Керамические трубы
Γa_i	1	2	3	4
0,001	170330	175034	149666	164775
0,002	163765	170113	140738	160586
0,003	158497	165627	134570	156329
0,004	154286	161901	129902	152701
0,005	150799	158754	126154	149604
0,006	147831	156041	123027	146917
0,007	145247	153659	120347	144549
0,008	142962	151537	118004	142435
0,009	140913	149625	115923	140526
0,01	139057	147885	114053	138787

С учетом выполненных преобразований задачу максимизации надежности можно сформулировать как минимизацию одной из функций (4.8) – (4.12) на множестве допустимых значений потокараспределения в сети:

$$\Delta Q_{сбр} = \sum_i^n a_i \cdot x_i \rightarrow \min, \tag{4.13}$$

$$\text{при } \underline{e}_i \leq x_i \leq \bar{e}_i, \quad A \cdot x = q'_{ср}, \tag{4.14}$$

Можно в стоимостную функцию добавить затраты на ликвидацию аварий и перейти к решению следующей задачи:

$$\sum_{i=1}^n C(x_i) + T \cdot \sum_{i=1}^n C(a_i \cdot x_i) \rightarrow \min, \tag{4.15}$$

$$\text{при } \underline{e}_i \leq x_i \leq \bar{e}_i, \quad A \cdot x = q'_{ср} \tag{4.16}$$

В результате оптимизации с учетом факторов надежности и без них получены решения, которые представлены на рисунке 4.1, а и рисунке 4.1, б. Полученные решения значительно отличаются друг от друга.

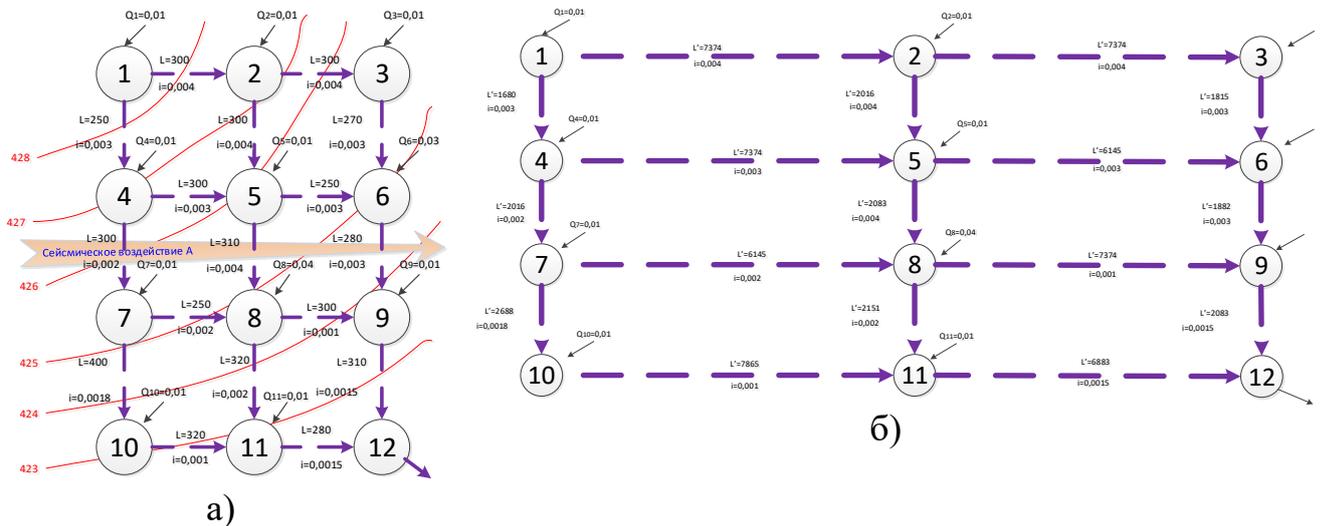
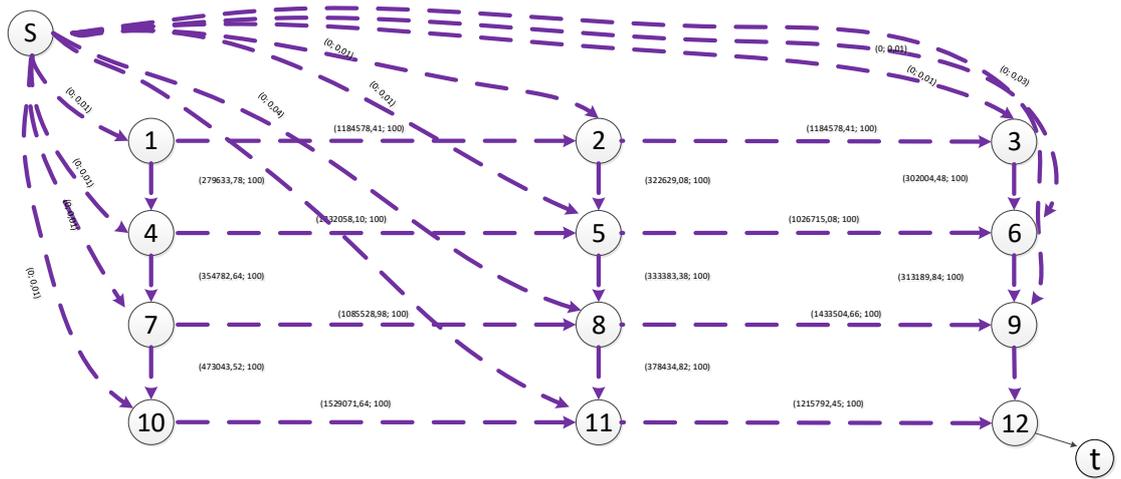
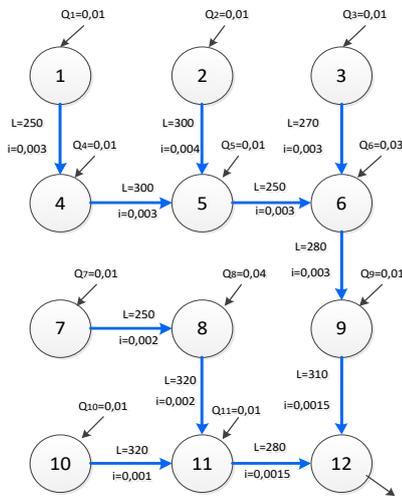


Рисунок 4.1 – Оптимальные структуры СВО с учетом надёжности и сейсмостойкости



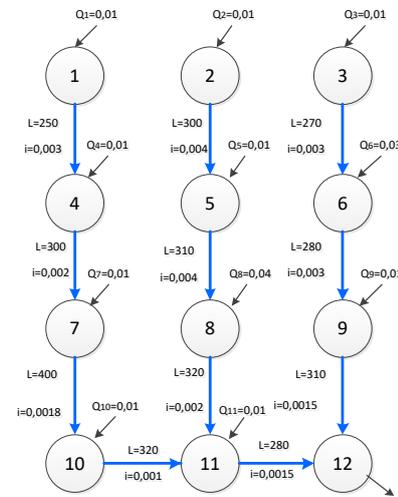
В)



Г)

$$\sum C = 2818,43 \text{ тыс. руб.}$$

$$\Delta Q_{сбр.} = 420 \ 127 \ m^3 / год$$



Д)

$$\sum C = 3103,04 \text{ тыс. руб.}$$

$$\Delta Q_{сбр.} = 285 \ 432 \ m^3 / год$$

Рисунок 4.1 – Оптимальные структуры СВО с учетом надёжности и сейсмостойкости. Окончание.

На рисунке 4.1, д. представлен оптимальный вариант, для которого суммарные затраты составили 31 579.46 тыс. руб.

Рассмотрим случаи повышения надёжности путем параллельной прокладки дополнительных резервных коллекторов и кольцевых систем водоотведения (см. рисунки 4.2 и 4.2). При этом капиталовложения в увеличение надёжности будут изменяться согласно рисунку 4.3.

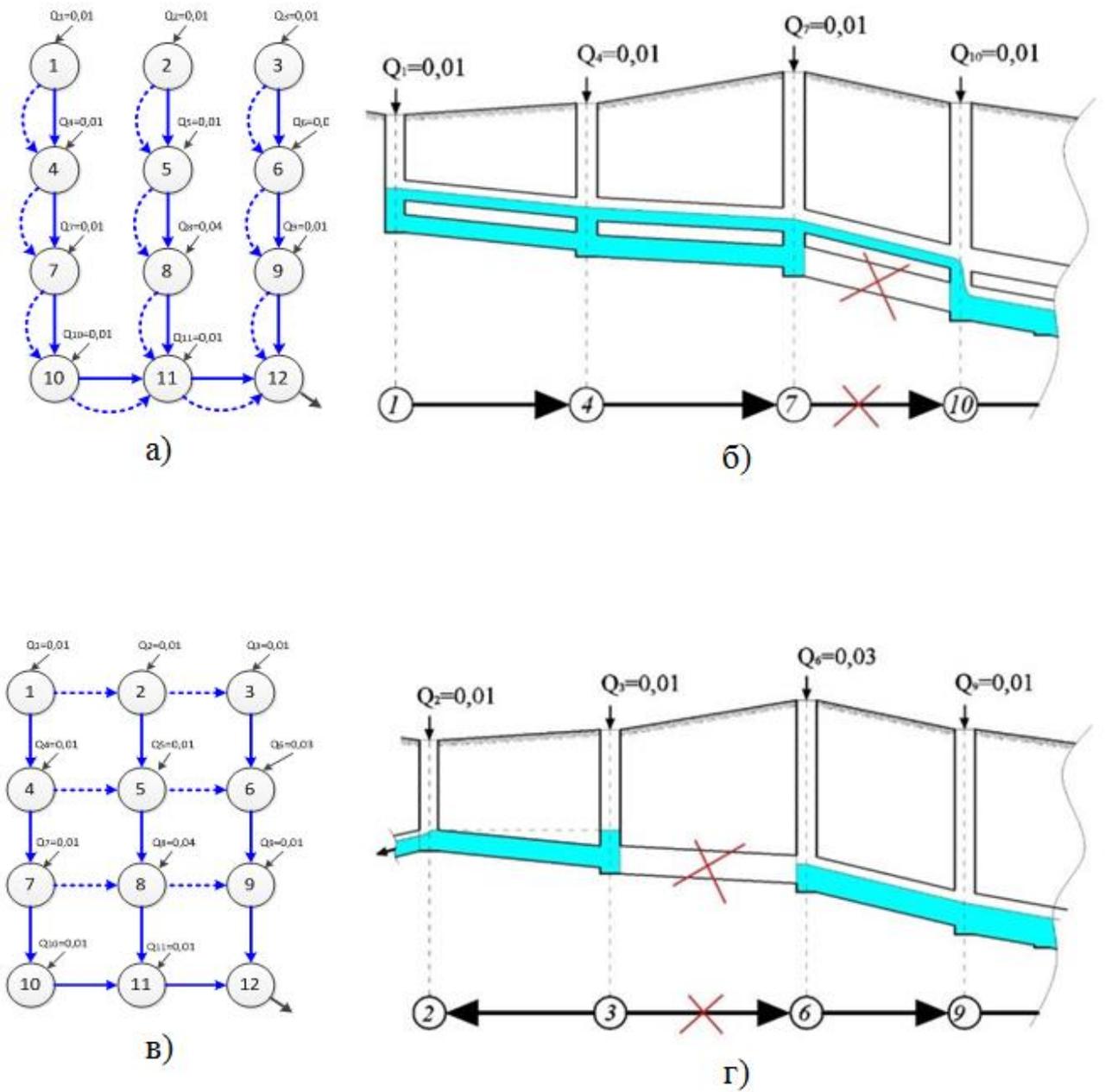


Рисунок 4.2 - Схемы резервирования системы водоотведения



Рисунок 4.3 – Цена надежности (резервирования) СВО

Согласно рисунку 4.3 если требуется спроектировать и построить схему с 100% резервированием, то затраты практически удваиваются. Если имеются ограниченные инвестиции, то, вкладывая их в строительство, можно определить оптимальный процент резервирования. Можно также определить оптимальный способ резервирования – параллельная прокладка или переход на кольцевые структуры.

4.2. Повышения надежности реконструируемых систем водоотведения

Рассмотрим задачу (4.15) – (4.16). На рисунке 4.4 представлена система водоотведения микрорайона «Юбилейный» г. Иркутска

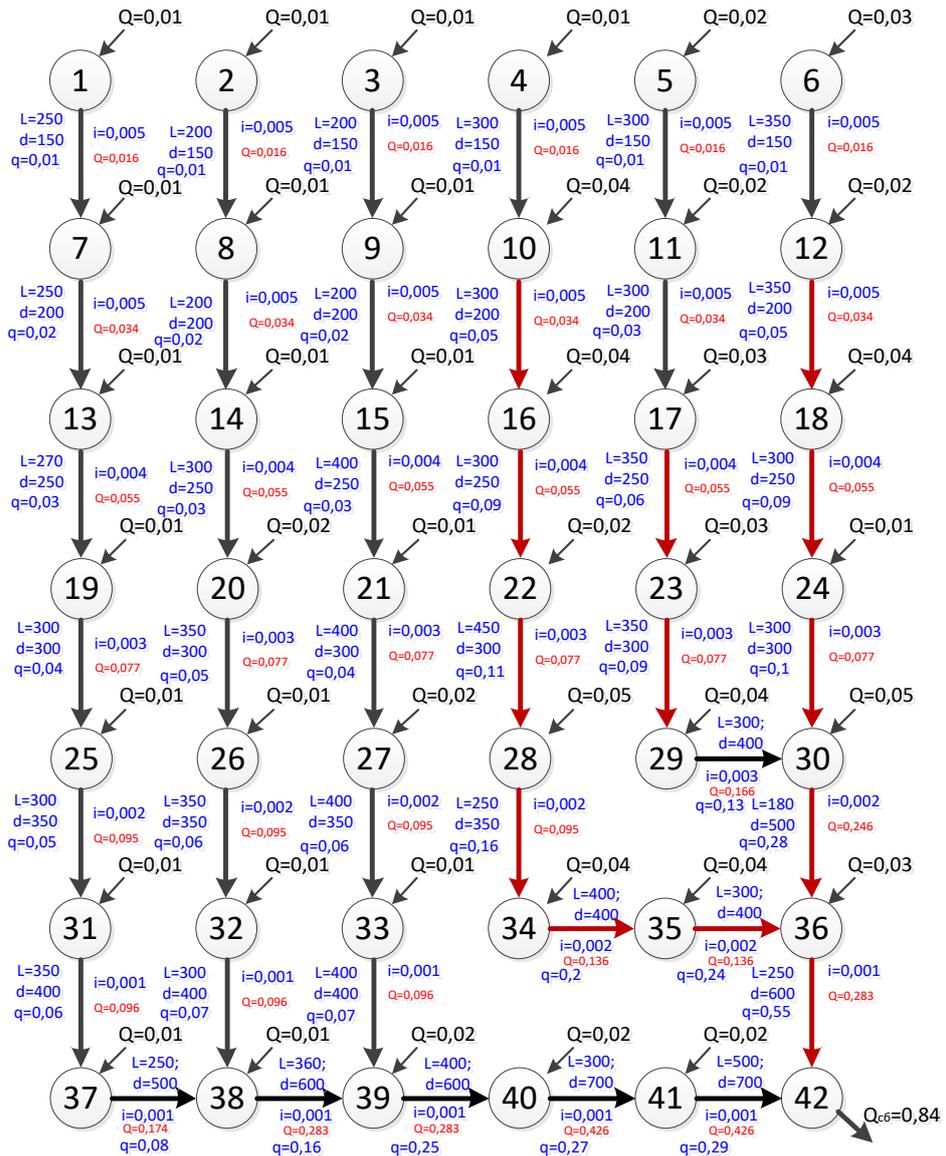


Рисунок 4.4 - Система водоотведения микрорайона «Юбилейный»

К 2020 г будут подключены к узлам 1- 12 новые абоненты, которые приведут к переполнению коллекторов, показанных на рис. 4.4, которые потребуется переложить. При этом необходимо выбрать оптимальный способ их реконструкции. Для чего намечен граф возможных вариантов реконструкции (см. 4.5). Указано направление сейсмического воздействия в 9 баллов.

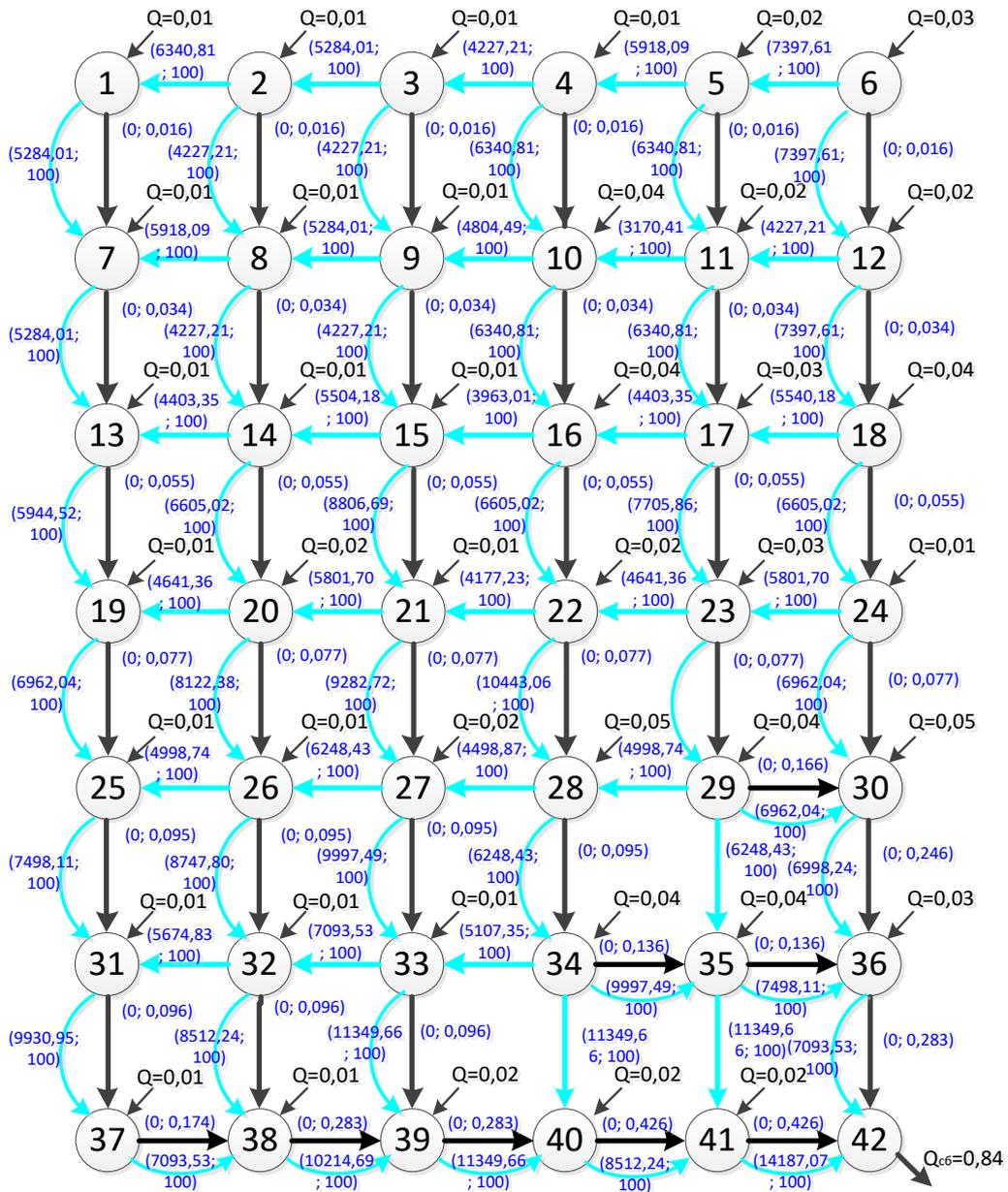


Рисунок 4.5 – Схема с увеличенными длинами для учета ориентации сейсмического воздействия

На рис. 4.6 представлен оптимальный вариант без учета надежности, стоимость которого составляет,

76 млн. руб. и $\Delta Q_{ср.} = 3$ млн m^3 в год, а на рис.4.7 – с учетом надежности.

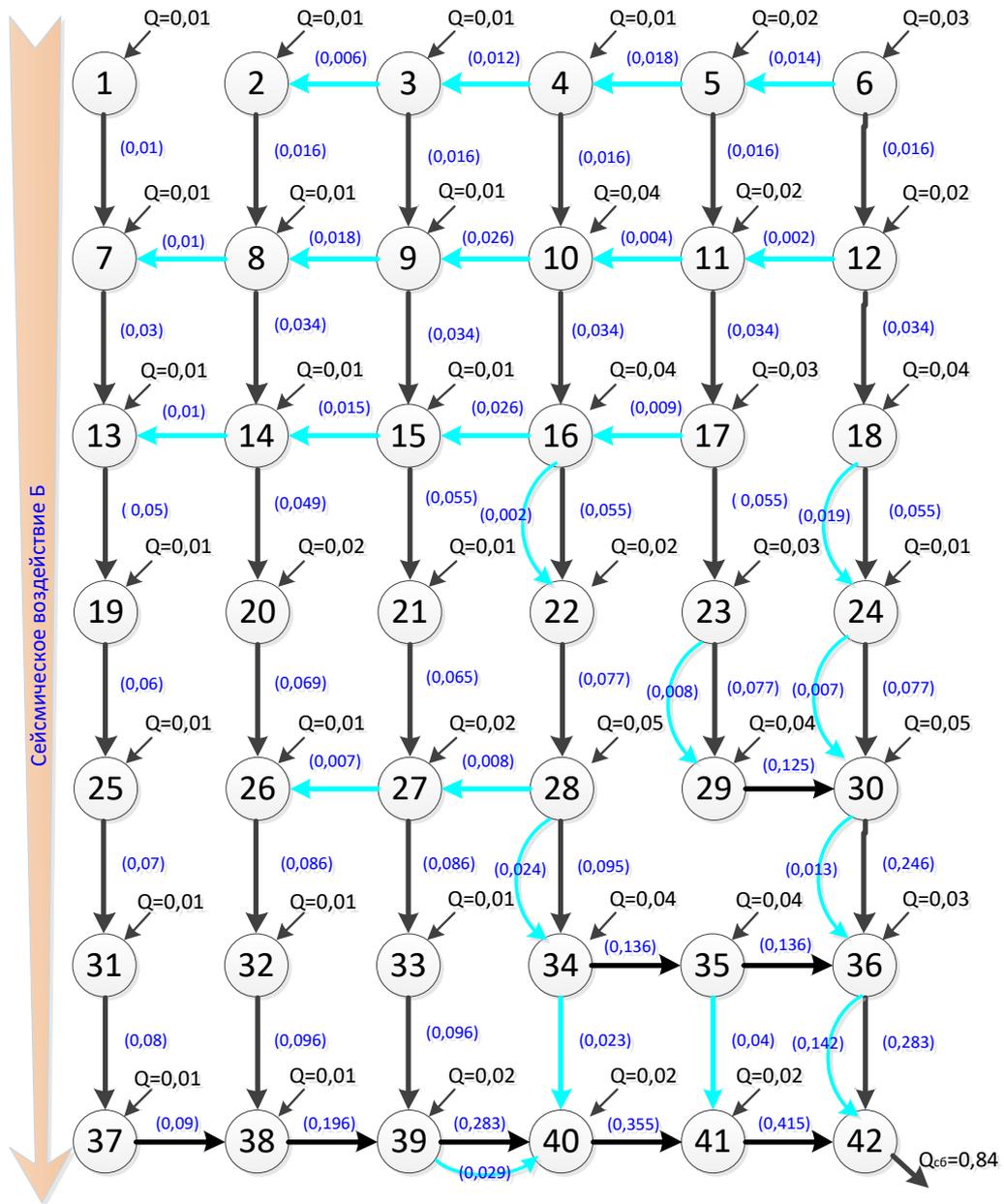


Рисунок 4.6 – Результаты расчета и оптимальный вариант реконструкции без учета надежности и сейсмостойкости

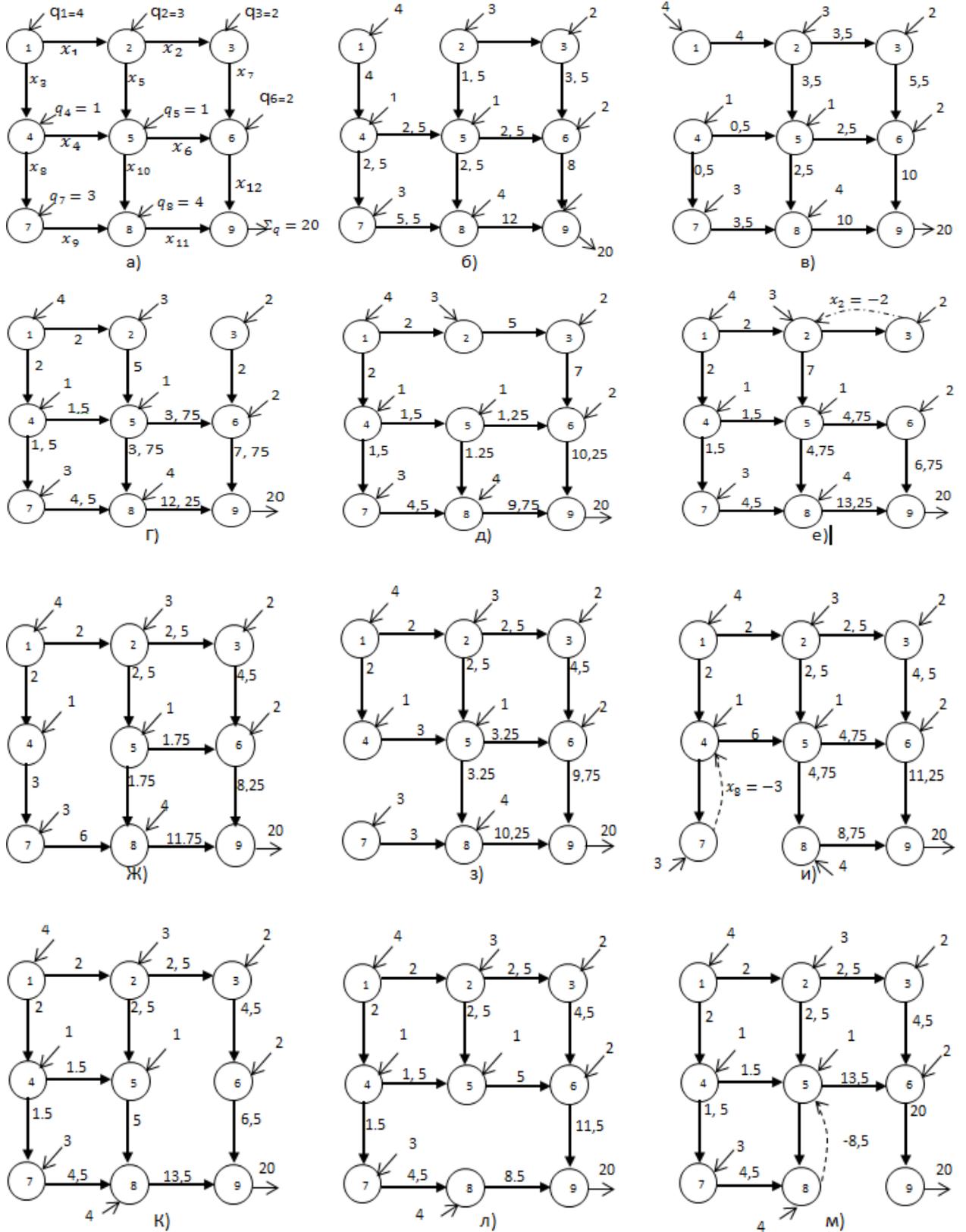


Рисунок 4.8 – Иллюстрация к методике оптимизации кольцевых СВО

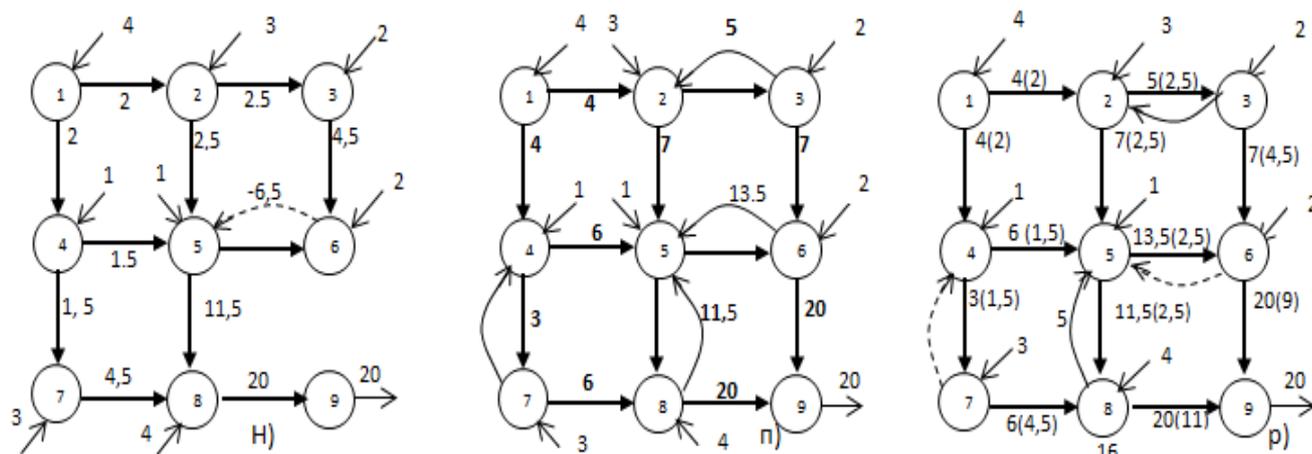


Рисунок 4.8 – Иллюстрация к методике оптимизации кольцевых СВО. Окончание

При обосновании параметров кольцевых сетей водоотведения рассматриваются участки с прямым уклоном, с параллельной вертикальной или горизонтальной прокладкой дополнительных коллекторов, с обратным уклоном и выбирается из них оптимальный (см. рис. 4.8,п). Варианты «холодного или горячего» резервирования можно так же определить с помощью предлагаемой в работе методики.

4.4. Оптимизация параметров и мест установки перекачивающих насосных станций и шиберных устройств для повышения управляемости системы водоотведения

Для повышения управляемости, регулирования и распределения сточных вод по различным коллекторам и районам водоотведения применяются насосные станции (КНС), строятся разгрузочные коллектора и шиберные устройства. При этом возникает задача, какое их количество должно быть, какими параметрами они должны обладать и где на сети они должны располагаться.

В работе для решения этой задачи предлагается методика избыточных проектных схем, в которую включаются всевозможные насосные станции, шиберные устройства, разгрузочные коллектора [166, 221, 199]. Требуется из их числа выбрать эффективные по эксплуатационным затратам сооружения (например, по суточным затратам электроэнергии). При выборе оптимального

решения предлагается использовать разработанную в данной работе методику оптимизации, изложенную в данной главе.

В качестве примера рассмотрим агрегированную схему системы водоотведения г. Ангарска (см. рисунок 4.9), где узлы 3 и 8 – шиберы. Участки 1-2; 6-7; 11-12; 4-5; 9-10; 14-15; 8-3; 13-8 - канализационные насосные станции. Требуется минимизировать затраты электроэнергии за исследуемый интервал времени - сутки. Математически задача записывается следующим образом [110]:

$$\sum_{t=1}^{24} C_t^{\text{ЭЛК}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n \frac{9,8 \cdot z_t^3 \cdot H_{it} \cdot x_{it}}{\eta_i} \rightarrow \min, \text{ при } \underline{v}_i \leq x_{it} \leq \bar{v}_i, \quad (4.16)$$

Где: Z_t^3 - стоимость электроэнергии, руб. за Квт час в зависимости от времени ее потребления (ночные или дневные часы); η_i - коэффициент полезного действия (К.П.Д) i -той насосной станции; H_{it} - напор i -той насосной станции, м в час t ; x_{it} – расход сточной жидкости i -того участка сети в час t , в м³/час.

Задача решается для каждого часа поступления стоков в систему водоотведения от абонентов и определяются оптимальные потоки по участкам схемы, в том числе и по участкам - насосным станциям и шиберам:

$$t = 1, \dots, T$$

$$C_t^{\text{ЭЛК}} = \sum_{i=1}^n \frac{9,8 \cdot z_t^3 \cdot H_{it} \cdot x_{it}}{\eta_i} \rightarrow \min, \text{ при } \underline{v}_i \leq x_{it} \leq \bar{v}_i. \quad (4.17)$$

$$C = \sum_{t=1}^T C_t^{\text{ЭЛК}}$$

Результаты оптимизации представлены в табл. 4.2.

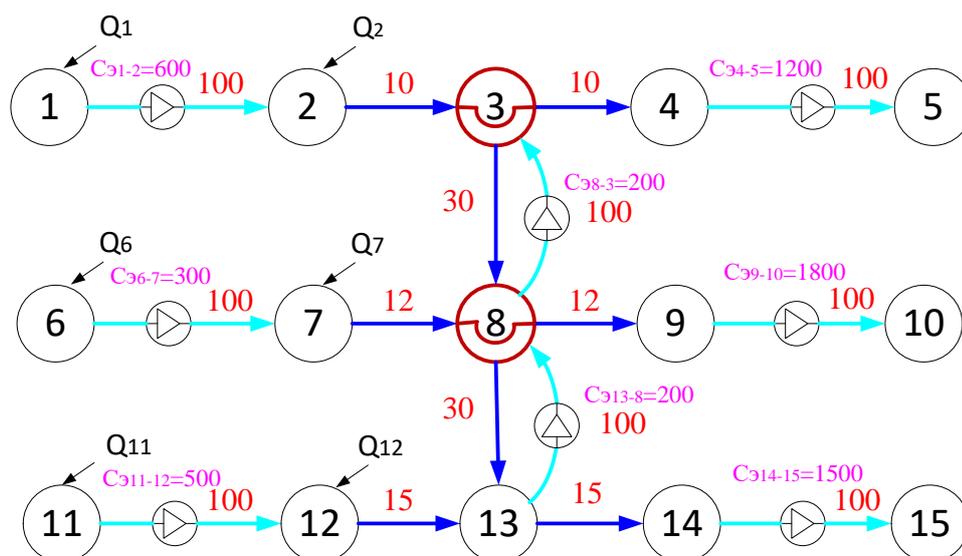


Рисунок 4.9 - Агрегированная схема системы водоотведения г. Ангарска

Таблица 4.2 – Формирование графиков КНС и шиберных устройств

Q_i	№ узла	Время					
		0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
$Q_1, \text{ м}^3/\text{с}$	1	1	1	2	2	1	2
$Q_2, \text{ м}^3/\text{с}$	2	2	4	5	2	2	4
$Q_6, \text{ м}^3/\text{с}$	6	1	3	5	4	3	4
$Q_7, \text{ м}^3/\text{с}$	7	2	3	6	6	1	1
$Q_{11}, \text{ м}^3/\text{с}$	11	3	4	6	5	5	2
$Q_{12}, \text{ м}^3/\text{с}$	12	2	6	8	7	1	7
НС (участок 8-3), $\text{ м}^3/\text{с}$		7	5	3	6	7	4
НС (участок 13-8), $\text{ м}^3/\text{с}$		4	0	0	0	3	0
Шибер узла (3-8), $\text{ м}^3/\text{с}$		0	0	0	0	0	0
Шибер узла (8-13), $\text{ м}^3/\text{с}$		0	1	1	3	0	1
Затрата электроэнергии, тыс. руб.		18100	33000	55400	42600	22500	31200
$\Sigma=202800$ тыс. руб.							

Шибер 3-8 оказался не задействован. Следовательно, он и не нужен.

Изложенный выше подход расширяет возможности методики избыточных проектных схем. Однако требует формирования расчетных прогнозных графиков работы системы водоотведения. Очевидно, что эту задачу надо решать как для далекой перспективы, так и при обосновании первой очереди строительства.

Выводы

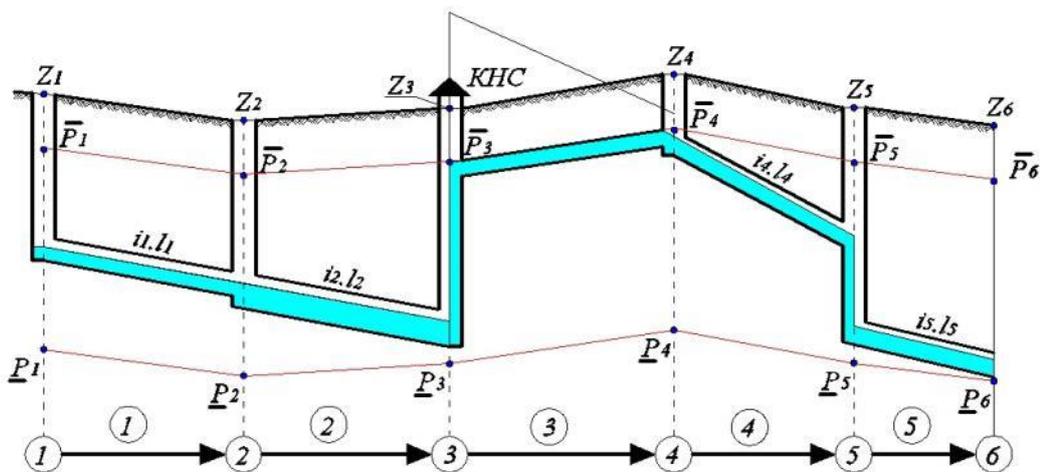
1. Предложено оценивать надежность систем водоотведения количественным показателем – объемом сточных вод, который в следствии аварийных ситуаций, попадает на поверхность земли и в водоемы без очистки.
2. Предложено в методах оптимизации надежность и сейсмостойкость учитывать через интенсивность отказов и следовательно, через повышение затрат на ликвидацию аварийных ситуаций.
3. При решении задач повышения управляемости систем водоотведения предлагается переходить к их кольцевым структурам и оптимально расставлять на сети насосные станции перекачки стоков и шиберные устройства.

ГЛАВА 5. КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ

5.1. Оптимизация СВО древовидной структуры

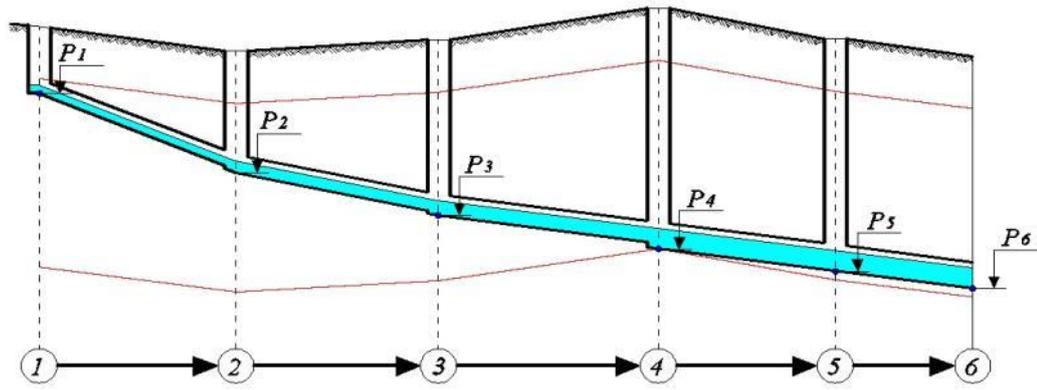
Данная проблема возникает при назначении параметров системы водоотведения первой очереди строительства, и при ее детальном рассмотрении и проектировании. При этом топология сети считается уже заданной или выбранной.

На рисунке 5.1, а. представлен один из возможных профилей при транспортировании сточных вод. Согласно данной схеме движение стоков происходит под действием сил гравитации с пьезометрическим напором P_1 в колодце 1. Затем по мере движения стоков до узла 3 часть данного напора расходуется на преодоление сил трения трубопровода, работающего в самотечном режиме: $P_1 - P_3 = h_1 + h_2 = l_1 * i_1 + l_2 * i_2$, l – длина трубопровода, i – уклон. Далее в узле 3 стоки поднимаются (с помощью насосной станции) до отметки P_3 и транспортируются по напорному трубопроводу с потерями напора h_3 , на участке 4 происходит движение стоков в самотечном режиме, а в узле 5 – напор понижается (с помощью перепадного колодца), а на участке 5 стоки перемещаются в самотечном режиме.



a)

Рисунок 5.1 - Возможные пьезометрические поверхности системы водоотведения



б)

Рисунок 5.1 - Возможные пьезометрические поверхности системы водоотведения. Окончание

Пьезометрический напор в узле P_1 будет связан с P_6 следующим образом:

$$P_1 = P_6 + h_6 + H_5 + h_4 - (H_3 + h_3) + h_2 + h_1. \quad (5.1)$$

Данному варианту (5.1) будут соответствовать конкретные значения капиталовложений и эксплуатационных затрат за год, или жизненный цикл системы. Не трудно убедиться, что подобных вариантов может быть бесчисленное множество. Например, при тех же самых ограничениях на прокладку системы водоотведения, возможно устройство всех пяти участков в самотечном режиме (см. рисунок 5.1, б).

В качестве *фазовых переменных* принимаются узловые пьезометрические напоры (отметки свободной поверхности стоков) в начале и в конце расчетного участка I (их соответственно будет Z и C):

$$P_i^{(z)} = \{P_2^{(z)}\}; \quad z \in Z_i,$$

$$P_i^{(c)} = \{P_6^{(c)}\}; \quad c \in C_i,$$

Последовательность которых $P^{(z)} = \{P_1^{(z)}, \dots, P_n^{(z)}\}$, $P^{(c)} = \{P_1^{(c)}, \dots, P_n^{(c)}\}$

является множеством *возможных состояний* рассматриваемых систем водоотведения.

Следует отметить, что для участка i начальные переменные связаны с конечными следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} P_c^{(к)} &= P_z^{(н)} + h_y - H_u; \\ P_c^{(к)} &= P_z^{(н)} + h_y + H_v. \end{aligned} \quad (5.2)$$

В (5.2) h_y представляет значения потерь напора по участкам сети, которые для самотечных коллекторов вычисляются $h_y = I_y \cdot L_i$, (уклон на длину). Уклон вычисляется следующим образом:

$$I_y = \frac{q_y^2 \cdot N_i^2}{0,0986 \cdot d_y^{5,334}}, \quad (5.3)$$

Где q_y - расход сточной жидкости, вычисляется для бытовой и ливневой канализации согласно методики, изложенной в главе 2; d_y - диаметр коллектора, который является дискретным и соответствует сортаменту труб, выпускаемых промышленностью; N_i - коэффициент шероховатости трубопроводов. Рассматривая дискретные диаметры согласно (5.3), формируются дискретные значения уклонов. Как на управляющие, так и на фазовые переменные накладываются ограничения параллелепипедного типа:

$$\begin{aligned} \underline{h}_i &\leq h_y \leq \overline{h}_i; \\ \underline{H}_i &\leq H_u \leq \overline{H}_i; \\ \underline{H}_i &\leq H_v \leq \overline{H}_i; \\ \underline{P}_i^{(H)} &\leq P_c^{(н)} \leq \overline{P}_i^{(H)}; \\ \underline{P}_i^{(к)} &\leq P_z^{(к)} \leq \overline{P}_i^{(к)}, \end{aligned} \quad (5.4)$$

Где $\underline{h}_i, \overline{h}_i$ - ограничения, соответствующие минимально и максимально допустимому уклону на участке сети I ; $\underline{H}_i, \overline{H}_i$ - ограничения на напоры насосных станций; $\underline{H}_i, \overline{H}_i$ - ограничения на величины перепадов в соответствующих

колодцах; $\underline{P}_i^{(H)}, \leq \overline{P}_i^{(H)}$ - ограничения на прокладку трубопроводов в грунте в начале участка i (не менее глубины промерзания, минус 0.5 м, не более 8 м); $\underline{P}_i^{(K)}, \overline{P}_i^{(K)}$ - то же в конце участка i . Верхнее ограничение может быть и другим.

В силу дискретности управляющих переменных переход от $P_z^{(H)}$ к $P_c^{(K)}$ не всегда может быть осуществлен, т.е. не всегда найдется такая комбинация $h_y, y \in Y_i, H_u, u \in V_i; H_v, v \in V_i$, чтобы соблюдалось условие (5.4). Целесообразно в этом случае принимать в качестве фазовых переменных не точечные их значения, а некоторые подмножества:

При условии дискретных значений управляемых переменных $h_i, H_u^{(-)}, H_y^{(+)}$, целевая функция затрат жизненного цикла принимает следующий вид:

$$F(P, h, H) = \sum_{i=1}^n F_i(h_i, H_i^{(+)}, H_i^{(-)}, P_i^{(H)}, P_i^{(K)}),$$

Функциональное уравнение для вычисления условно-оптимальных решений относительно h_y на шаге i запишем следующим образом:

$$\Psi_i(P_c^{(K)}) = \min_{\substack{h_y, y \in Y_i \\ z \in Z_i}} \{ \Psi_i^*(P_z^{(H)}) + F_i(h_y, P_c^{(H)}, P_z^{(K)}) \} \quad (5.5)$$

Согласно данному выражению, условно-оптимальное решение, соответствующее фазовой переменной Z в начале участка, получается путем минимизации (или поиска наилучшего) перехода в P_c из любых допустимых состояний $P_z^{(H)}$ (Z пробегает значения $z=1, \dots, Z_i$) с помощью управлений h_y (y пробегает $y=1, \dots, Y_i$). При этом для каждого анализируемого $P_z^{(H)}$ и h_y определяется численное значение функции затрат $F(h_y, P_c^{(H)}, P_z^{(K)})$ согласно (3.4), (3.15) в сооружении трубопровода (см. рис 5.2). Во внимание принимаются лишь те управления, для которых справедливо условие (5.4):

$$P_c^{*(K)} = P_z^{*(H)} + h_y, \quad z = 1, \dots, Z_i, y = 1, \dots, Y_i$$

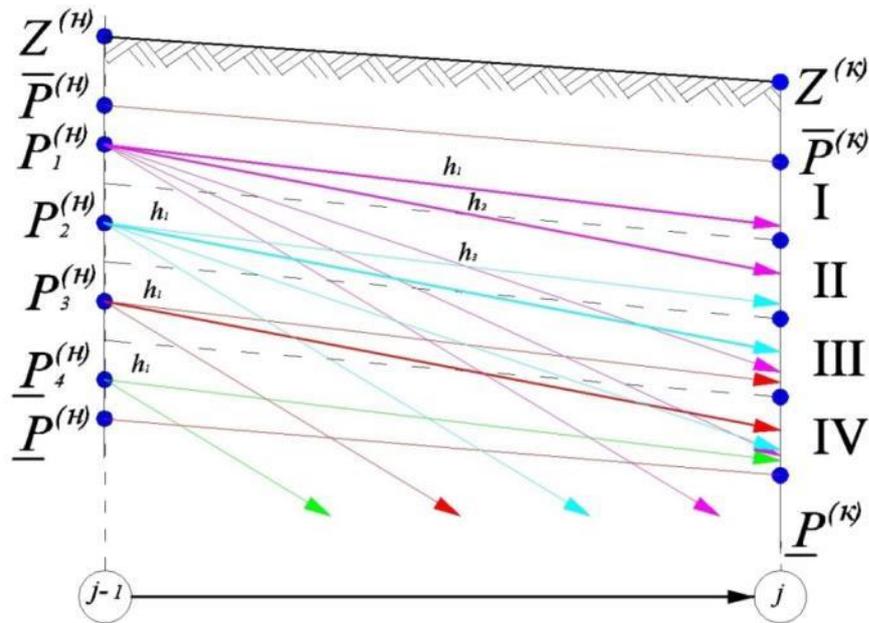


Рисунок 5.2 – Нарращивание условно-оптимальных решений по потерям напора в трубопроводах

Используя стандартный ряд значений потерь напора, начиная с первого интервала конечных фазовых переменных, последовательно пробуются переходы к начальным фазовым переменным:

$$P_1^{(1)} = P_1^{(n)} + h_1; \quad \Psi_1^{(1)} = \Psi_i^*(P_1^{(n)}) + F_i(P_1^{(1)}, P_1^{(n)}, h_1);$$

$$P_2^{(1)} = P_1^{(n)} + h_2; \quad \Psi_2^{(1)} = \Psi_i^*(P_1^{(n)}) + F_i(P_2^{(1)}, P_1^{(n)}, h_2);$$

$$P_y^{(1)} = P_1^{(n)} + h_y; \quad \Psi_y^{(1)} = \Psi_i^*(P_1^{(n)}) + F_i(P_y^{(1)}, P_1^{(n)}, h_y);$$

$$P_y^{(2)} = P_2^{(n)} + h_y; \quad \Psi_y^{(2)} = \Psi_i^*(P_2^{(n)}) + F_i(P_y^{(2)}, P_2^{(n)}, h_y);$$

$$P_y^{(z)} = P_z^{(n)} + h_y; \quad \Psi_y^{(z)} = \Psi_i^*(P_z^{(n)}) + F_i(P_y^{(z)}, P_z^{(n)}, h_y).$$

Лучшее решение запоминается:

$$\Psi_i(P_c^{(k)}) = \min \{ \Psi_i(P_c^{(k)}), \Psi_y^{(c)} \}.$$

Для насосных и перепадных сооружений:

$$\Psi_i^{(HC)}(P_c^{(k)}) = \min_{H_u, u \in U} \{ \Psi_i(P_y^{(k)}) + f_i^{(HC)}(H_u) \}; \quad (5.6)$$

$$\Psi_i^{(\partial)}(P_c^{(k)}) = \min_{\substack{H_v, v \in V_i \\ \mu = c-1, \dots, 1}} \{ \Psi_i(P_\mu^{(k)}) + f_i^{(\partial)}(H_v) \}. \quad (5.7)$$

На рисунке 5.3 представлена схема вычислительного процесса в соответствии с уравнениями (5.6) и (5.7).

а) для насосных станций:

$$P_1^{(1)} = P_c^{(\kappa)} - H_1; \quad \Psi_1^{(1)} = \Psi_i(P_c^{(\kappa)}) + f_i^{(HC)}(H_1);$$

$$P_2^{(1)} = P_c^{(\kappa)} - H_2; \quad \Psi_2^{(1)} = \Psi_i(P_c^{(\kappa)}) + f_i^{(HC)}(H_2);$$

$$P_v^{(1)} = P_c^{(\kappa)} - H_v; \quad \Psi_v^{(1)} = \Psi_i(P_c^{(\kappa)}) + f_i^{(HC)}(H_i);$$

$$P_1^{(2)} = P_{c-1}^{(\kappa)} - H_1; \quad \Psi_1^{(2)} = \Psi_i(P_{c-1}^{(\kappa)}) + f_i^{(HC)}(H_1);$$

$$P_v^{(2)} = P_{c-1}^{(\kappa)} - H_v; \quad \Psi_v^{(2)} = \Psi_i(P_{c-1}^{(\kappa)}) + f_i^{(HC)}(H_v);$$

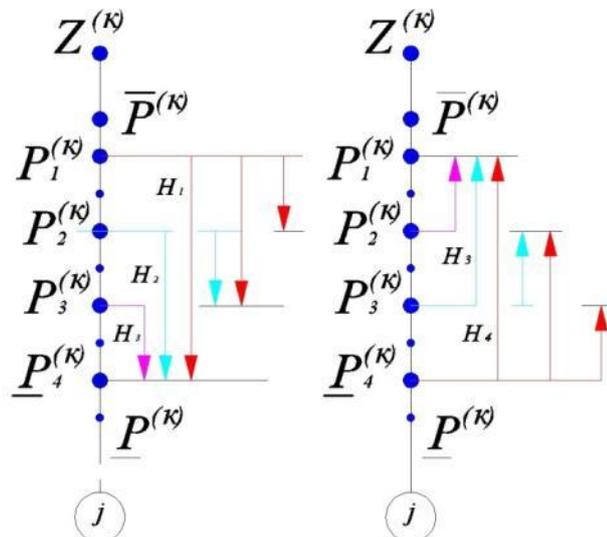


Рисунок 5.3 - Оптимизация по H

б) для перепадных сооружений:

$$P_1^{(1)} = P_1^{(\kappa)} + H_1; \quad \Psi_1^{(1)} = \Psi_i(P_1^{(\kappa)}) + f_i^{(\delta)}(H_1);$$

$$P_v^{(1)} = P_1^{(\kappa)} + H_v; \quad \Psi_v^{(1)} = \Psi_i(P_1^{(\kappa)}) + f_i^{(\delta)}(H_v);$$

$$P_v^{(2)} = P_{c-1}^{(\kappa)} + H_v; \quad \Psi_v^{(c-1)} = \Psi_i(P_{c-1}^{(\kappa)}) + f_i^{(\delta)}(H_v);$$

Затраты в сооружение насосных станций и перепадных сооружений определяются согласно (3.13)- (3.15). Лучшие решения запоминаются:

$$\Psi_i(P_c^{(\kappa)}) = \min \{ \Psi_i(P_c^{(\kappa)}), \Psi_u^{(c)}, \Psi_v^{(c)} \}.$$

Если проектируется канализационный коллектор, имеющий один узел притока сточной жидкости и один узел сброса, то многошаговый процесс оптимизации можно организовать либо от узла - абонента, поскольку для него, как правило, определены диапазоны фазовых переменных, либо от узла сброса и поступления стоков на КОС, для которого фиксированы значения $P_i^{(k)}$. В этом нет принципиальной разницы. Для систем водоотведения разветвленной структуры, процесс оптимизации целесообразно начинать от «висячих» вершин, т.е. от абонентов (зданий, микрорайонов, районов) в направлении к узлу КОС. При этом достаточно просто осуществляется «стыковка» условно-оптимальных решений в узлах слияния потоков.

На рисунке 5.4 дана иллюстрация прямого (синий цвет) и обратного (сиреневый цвет) ходов предлагаемой методики оптимизации, на рисунке 5.5 показан оптимальный профиль, соответствующий сиреневой линии рисунка 5.4.

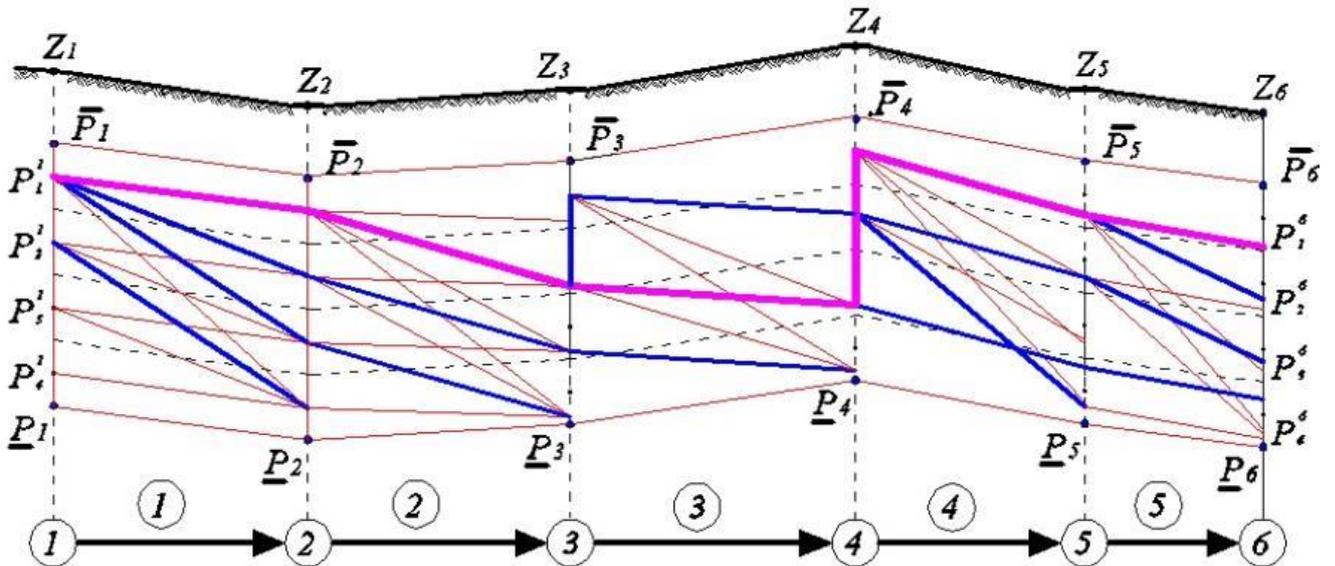


Рисунок 5.4 - Нарастивание условно – оптимальных решений

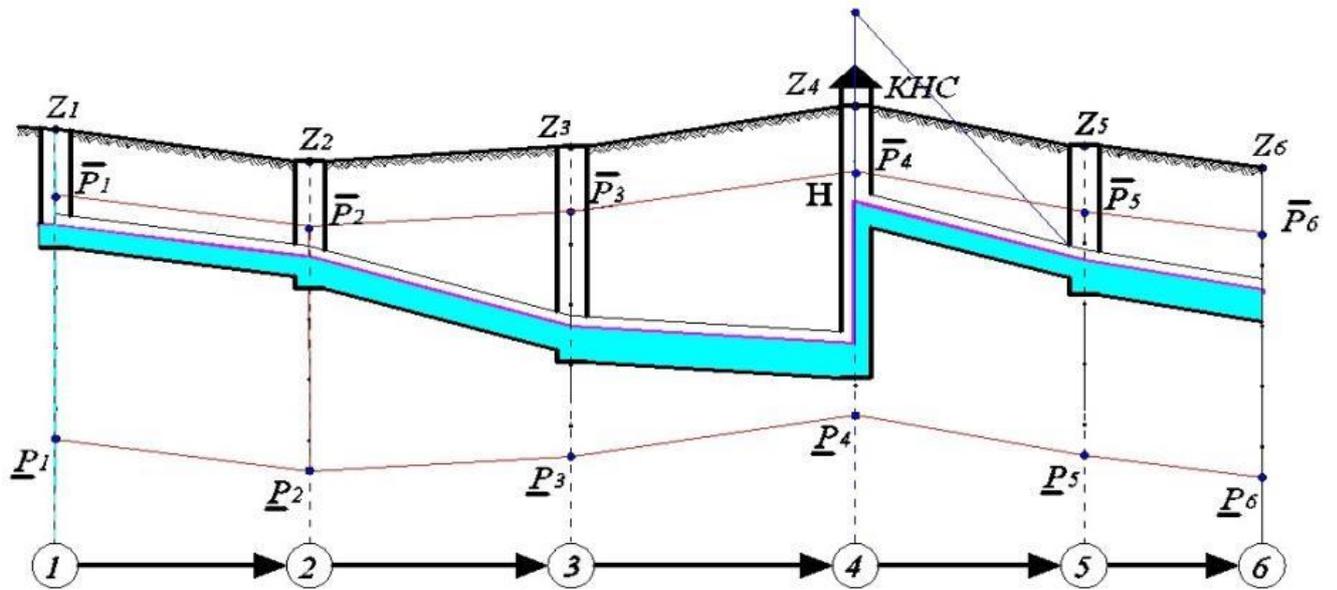


Рисунок 5.5 – Результаты оптимизации

При сложном рельефе местности и значительных перепадах отметок земли решается следующая задача.

Выявляются эти случаи путем анализа управлений:

$$\underline{P}^{(\partial)} = \underline{P}_z^{(H)} - h_y;$$

$$\underline{P}^{(HC)} = \underline{P}_1^{(H)} - h_1.$$

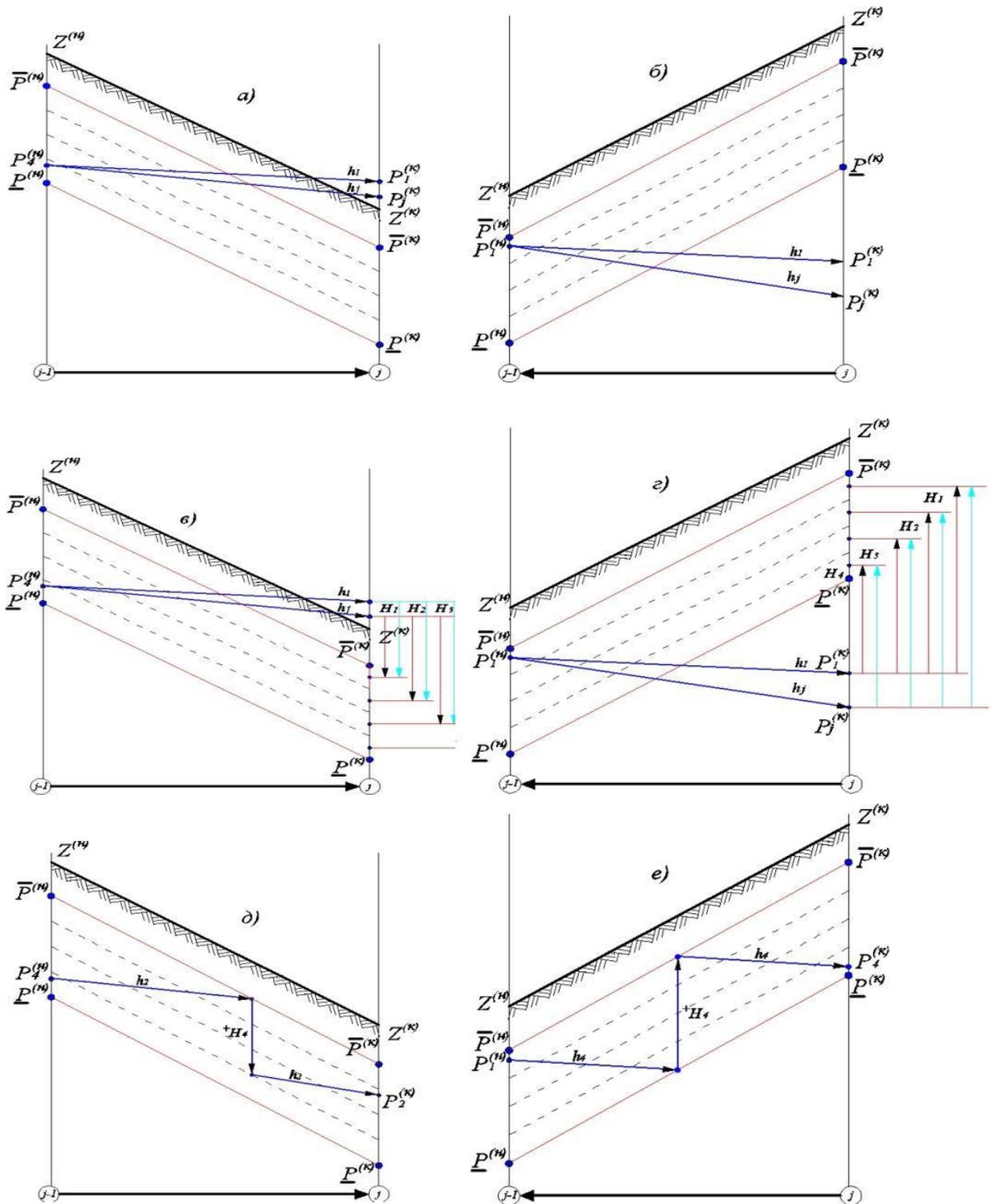


Рисунок 5.6 – Определение количества и место положения перепадных колодцев и каскада насосных станций

Переходная функция имеет вид:

$$\Psi_{i+1}(P_z^{(x)}) = \begin{cases} \Psi_i(P_c^{(x)}), & \text{при } \sum_{i \in I} abs(aji) \leq 2; \\ \sum_{jk=ik}^{in} \Psi_{jk}(P_c^{(x)}), & \text{при } \sum_{i \in I} abs(aji) > 2, \end{cases} \quad (5.10)$$

$$P_{z,i+1}^{(x)} = \begin{cases} P_{c,i}^{(x)}, & \text{при } \sum_{i \in I} abs(aji) > 2; \\ \max\{P_{ik}^{(x)}, \dots, P_{in}^{(x)}\}, & \text{при } \sum_{i=1} abs(aji) > 2. \end{cases}$$

Если допускается перекладка существующего коллектора, то при наращивании условно-оптимальных решений коллектор считается как новым и все вычисления осуществляются согласно (5.5) – (5.7). При этом существующий вариант остается в вычислительном процессе, если наполнение в трубопроводе соответствует безнапорному режиму движения стоков. В противном случае может рассматриваться параллельная прокладка нового трубопровода с уклоном, равным уклону существующего участка сети и диаметром, вычисленным для расхода стоков, транспортировку которого необходимо осуществить в самотечном режиме.

Можно так же рассмотреть и вариант бес канального расширения существующего коллектора.

В итоге предлагается следующий алгоритм многошагового процесса оптимизации параметров системы водоотведения.

1. Информация об узлах схемы перекодируется на сквозную, начиная с корневой вершины: 1, 2, ..., m. (m – количество расчетных узлов схемы)

2. Для каждого участка сети формируются области начальных и конечных фазовых переменных путем разбивки ($\underline{P}_j, \bar{P}_j$) на C интервалов.

Формируется массив степеней вершин. Например, для сети, представленной на рисунке 5.7 а, он имеет вид:

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
JQ	1	1	1	2	2	2	2	3	3

5. Формируется массив (W):

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W	4	5	6	7	8	9	8	9	0

6. В массиве степеней вершин определяются элементы, значения которых равны единице, т.е. находят «висячие» вершины, а в массиве информации об участках сети на соответствующих позициях фиксируют начальные узлы.

На рисунке 5.7, а показан процесс оптимизации параметров СВО, начиная от вершин 1, 2, 3 в направлении к узлу 9. Синим цветом показана оптимальная траектория, которой будут соответствовать вполне определенные диаметры, наполнения и уклоны.

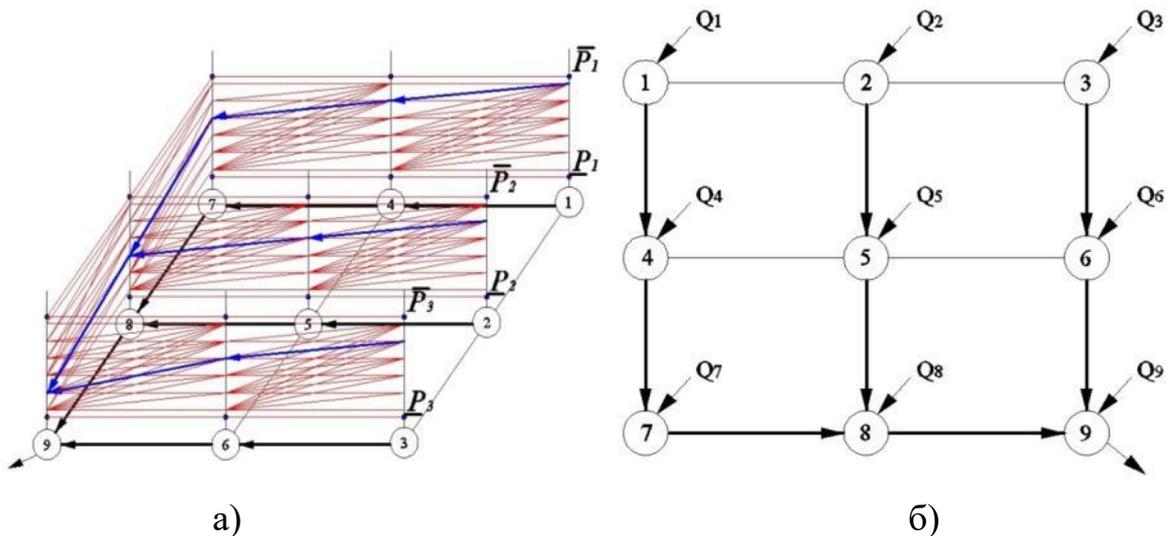


Рисунок 5.7 – Нарращивание условно-оптимальных решений в разветвленной СВО

Как уже отмечалось, управляющие переменные принимают множество вполне определенных дискретных значений, каждому из которых будут соответствовать

свои значения фазовых переменных из диапазона $[P_j; \bar{P}_j]$. По условиям стыковки пьезометрических графиков, для сокращения размерности задачи, и упрощения алгоритма этот диапазон разбивается на интервалы. В каждом конкретном случае шаг разбиения (т.е. числа C и Z) должен выбираться таким, чтобы была обеспечена допустимая точность оптимизации. Эффективным в этом смысле является подход, основанный на алгоритме «блуждающих трубок» [109]. Подробно он изложен в монографии автора данной работы [175].

Изложенные в настоящем параграфе методика и алгоритмы оптимизации параметров систем водоотведения реализованы в программном комплексе TRACE-VK. Кроме того, данная методика входит в состав математических моделей комплексной оптимизации структуры и параметров систем водоотведения, представленной в следующем параграфе.

С помощью TRACE-VK были проведены вычислительные эксперименты, направленные на исследования сходимости и быстродействия вычислительного процесса оптимизации параметров систем водоотведения:

- влияние количества управлений по h_i (т.е. числа стандартных диаметров труб в списке) на результаты решения;
- влияние шага разбиения фазовых переменных (количества интервалов) на результаты оптимизации;
- влияние шага разбиения (с применением управляющих трубок) на результаты решения.

Эксперименты показали:

- с ростом количественных фазовых переменных и управлений пропорционально увеличивается время счета, а расчетные затраты, соответствующие получаемым решениям, уменьшаются при этом незначительно;
- наиболее приемлемый для практических расчетов шаг разбиения можно принимать исходя из величины интервала разбиения, равного одному метру перепада высот.

5.2. Схемно- структурная и схемно-параметрическая оптимизация СВО

Нередко на практике возникает задача оптимизации трассы и параметров отдельных коллекторов или напорных трубопроводов, соединяющих два узла, один из которых узел поступления стоков, другой сброса. Для решения такой задачи предлагается новый подход, основанный на алгоритме построения кратчайших цепей [219,227].

Все узлы избыточной схемы условно разбиваются на два подмножества: $Jg^{(v)}$ – узлов, формирующих поддерево и $Jx^{(v)}$ – узлов подграфа вне дерева, $v = 1, \dots, m$.

Предлагаемая методика сводится к выполнению шести этапов:

1. В массив $Jx^{(v)}$ заносятся номера всех узлов схемы, а в $Jg^{(v)}$, вначале заполненный нулями, заносится лишь узел J , соответствующий источнику. Для всех узлов, как и в алгоритме оптимизации параметров, формируются два массива фазовых переменных. Первый из них содержит C пар элементов P_{jc} и $\Psi_{jc}(P_{jc})$, а второй состоит из z групп элементов, каждая из них включает – номер узла j , из которого осуществляется переход в узел $j+1$; номер соответствующего интервала z , с которым мы приходим в интервал c ; номер управления по h_y и номер управления по H_u и H_v . Для подмножества $j \in Jg^{(v)}$ значения $\Psi_{jc} = 0$, а для $j \in Jx^{(v)}$ - $\Psi_{jc} = \infty$. На данном этапе $v = 0$.

2. В подмножестве $Jx^{(v)}$ определяются узлы $j+1$, имеющие связи с узлом $j \in Jg^{(v)}$, и для соответствующих им ветвей наращиваются условно-оптимальные решения .

3. Для каждого интервала C производится сопоставление условно-оптимальных решений, полученных на этапе 2, с уже имеющимся решением в узле $j+1 \in Jx^{(v)}$:

$$\Psi_{jc} = \min \{ \Psi_j(P_c^{(H)}, \Psi_{jc}) \}$$

Лучшие из них запоминаются, и соответствующие значения фиксируются в информационных массивах. Затем для каждого узла определяется максимальный выигрыш:

$$\Psi_{jc} = \frac{\min}{c} \{\Psi_{jc}\}, j \in J_x^{(v)}$$

4. Среди оптимумов для узлов подграфа вне дерева выбирается наилучший:

$$\Psi = \min_{j \in J_x^{(V)}} \{\Psi_j\}$$

и соответствующий узел переходит в подмножество $J_q^{(v)}$.

5. Принимаем $v = v+1$ и вычисления 2-4 повторяются до тех пор, пока v не станет равным $m-1$, что будет соответствовать переходу всех узлов из подмножества J_x в J_g .

6. Для узла стока среди условно-оптимальных решений выбирается наилучшее и обратным ходом через информационные массивы осуществляется восстановление оптимальных значений параметров системы и пути, ведущего из узла-источника в узел-стока.

В качестве иллюстрации работы описанного алгоритма рассмотрим избыточную сеть (рисунок 5.8 а) размерностью: $m=9$; $n=12$. Источником в ней является узел 1, а стоком – 9. Тогда $j \in J_x^{(0)}$ будет соответствовать узел 1, $\Psi_1 = 0$, $\Psi_j = \infty$, $j = 2, \dots, 9$. Узлы 2 и 4 – соседние с 1, и поэтому для участков 1-2 и 1-4 наращиваются условно-оптимальные решения (рисунок 5.8, б). Для конечных фазовых переменных анализируемых участков определяются максимальные выигрыши Ψ_4 и Ψ_2 , которые, в свою очередь, сопоставляются между собой: $\Psi = \min \{\Psi_4, \Psi_2\}$ и узел 4 переходит в подмножество $J_g^{(1)}$.

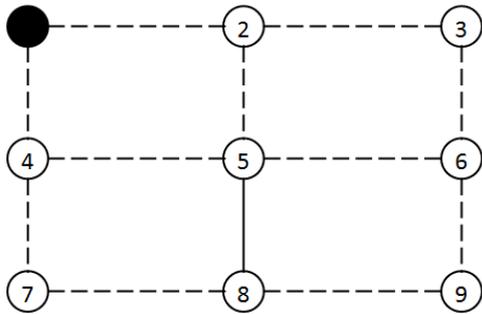
Следующий шаг заключается в определении узлов, соседних с 4-ым узлом. Ими будут 7 и 5. Далее, уже для участков 4-7 и 4-5 наращиваются условно-оптимальные решения, определяются максимальные выигрыши и производится сопоставление:

$$\Psi = \min \{\Psi_2, \Psi_5, \Psi_7\} = \Psi_2.$$

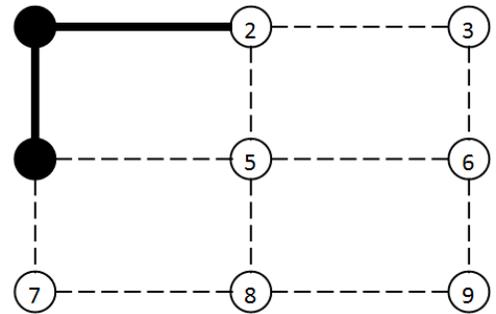
Узел 2 переходит в подмножество $J_g^{(2)}$ (рисунок 5.8, в). Для узла 2 соседними будут 5 и 3, поэтому наращивание условно-оптимальных решений осуществляется по участкам 2-3 и 2-5. Поскольку для узла 5 Ψ_{5c} отлично от ∞ , то по каждой фазовой переменной c : $c = 1, \dots, c$ производится сопоставление условно-оптимальных

решений, полученных по ветвям 4-5 и 2-5. Лучшие значения и соответствующие пути из 4 или 2 до источника запоминаются в информационных массивах. После чего по узлам 3, 5, 7 определяются максимальные выигрыши, которые сопоставляются между собой:

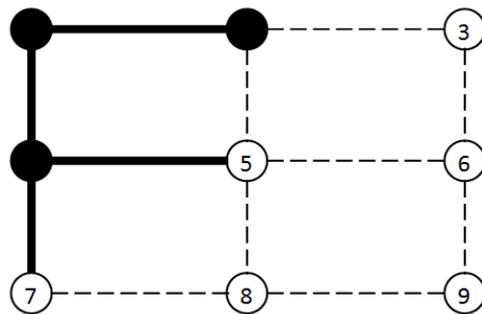
$$\Psi = \min \{ \Psi_3, \Psi_5, \Psi_7 \} = \Psi_5.$$



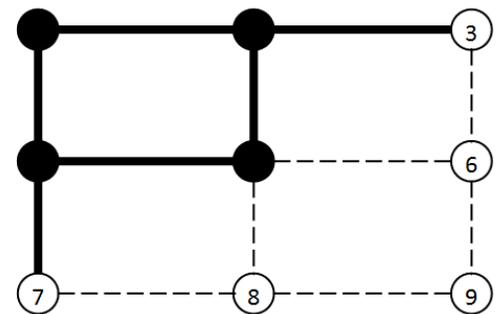
a)



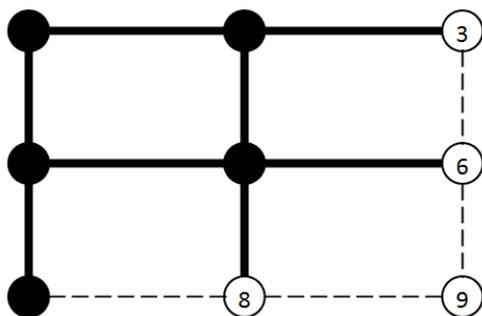
б)



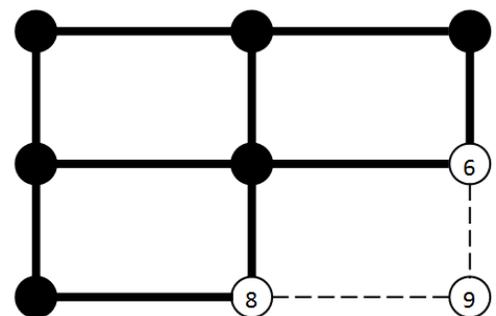
в)



г)

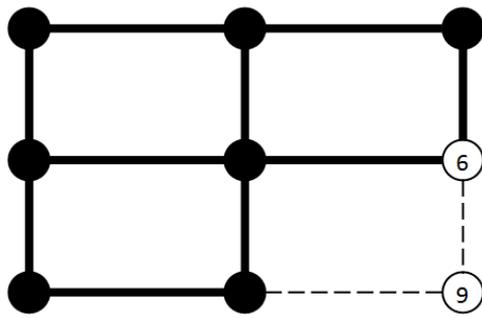


д)

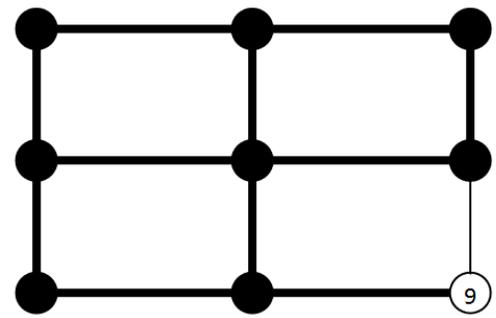


е)

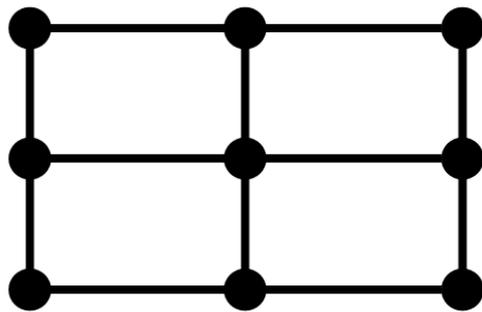
Рисунок 5.8 - Алгоритм оптимизации трассы и параметров магистрального коллектора



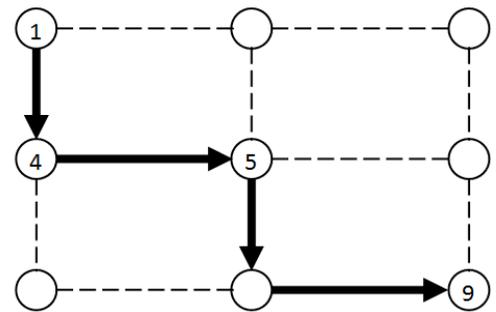
ж)



з)



и)



к)

Рисунок 5.8 - Алгоритм оптимизации трассы и параметров магистрального коллектора. Окончание

Узел 5 переходит в подмножество $J_g^{(3)}$ (рисунок 5.8, з) и т.д. На рисунок 5.8 показаны последующие этапы вычислений, а на рисунок 5.8, к представлена оптимальная трасса, полученная в результате обратного хода, путем восстановления оптимальных значений параметров и пути, ведущего из 1 в узел 9.

Покажем эффективность работы данной методики на примере обоснования трассы перспективной схемы водоотведения г. Иркутска и Иркутского района [124], в частности. В Схеме предлагается осуществить водоотведение от п. Листвянка, расположенного на берегу о. Байкал (на отм. 456.10м БС) до п. Новая-Лисиха, далее до п. Пивовариха, п. Дзержинск, до КНС-20а г. Иркутска. Коллектор, протяженностью 78 км предлагается построить в виде напорных и безнапорных трубопроводов и насосных станций. Задача состоит в том, где и с каким напором устанавливать насосные станции, какие диаметры и уклоны должны иметь трубопроводные участки системы водоотведения.

При обосновании перспективной схемы развития системы водоотведения были намечены три варианта трасс прохождения главного коллектора и

сформирована избыточная схема (рис. 5.9). Первый вариант предусматривает устройство коллектора вдоль автомобильного тракта, второй по лесному массиву и третий вариант вдоль равнинной, но достаточно болотистой местности. В результате расчетов по изложенной выше методике оптимальной оказалась трасса, показанная на рисунке 5.9 сиреневым цветом.

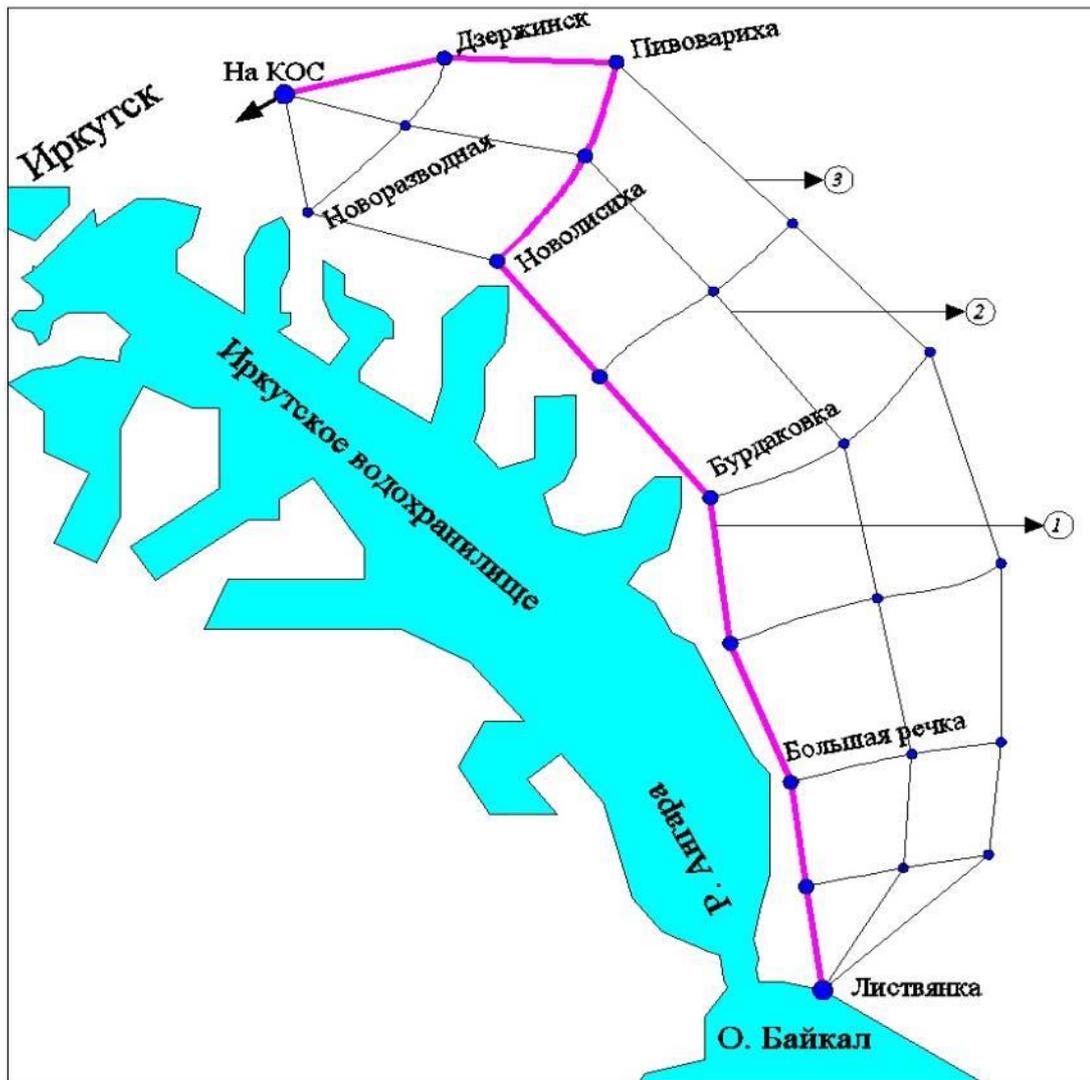


Рисунок 5.9 – Расчетная схема и оптимальная трасса трубопровода сточных с территории Байкал – Иркутск

Согласно оптимальному варианту коллектор пройдет вдоль «Байкальского» автомобильного тракта (см. рис. 5.10 и рис. 5.11).

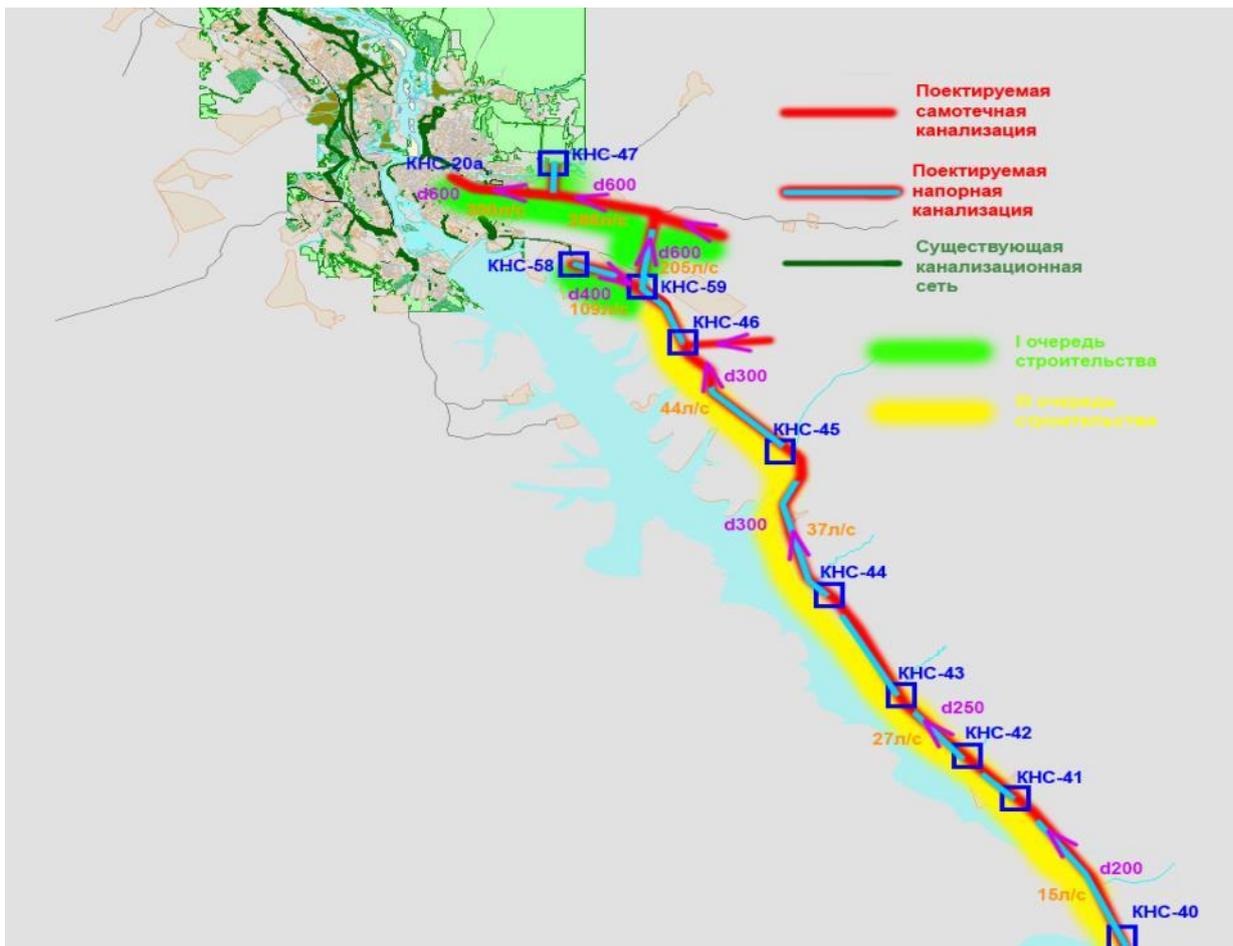


Рисунок 5.10 – Переброска стоков от п. Листвянка на Кос г. Иркутск

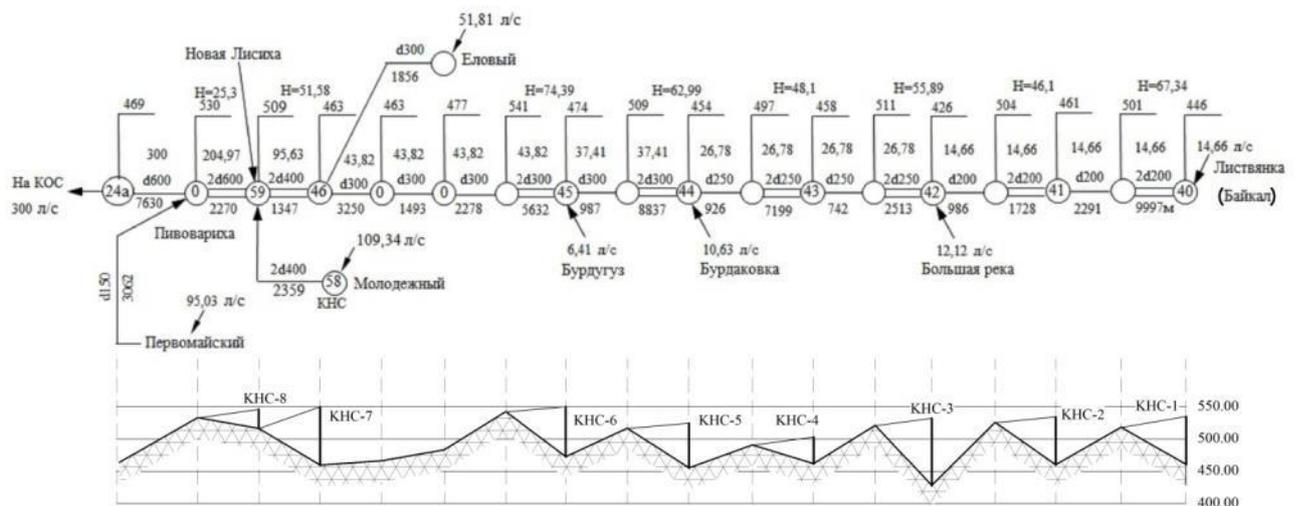


Рисунок 5.11 - Оптимальный профиль главного коллектора

Следует отметить, что при обосновании первой очереди строительства данного коллектора были рассмотрены возможные нагрузки от населенных пунктов (см. таблицу 5.1), рассчитаны 4 варианта устройства коллектора с

различными нагрузками (см. таблицу 5.2), построена матрица рисков (см. таблицу 5.3), согласно которой выбран вариант 2 с расчетным расходом 421.42 л/с. Капиталовложения в этот вариант составили 2118,9 млн. руб.

Таблица 5.1 - Населенные пункты, от которых отводятся сточные воды

Населенные пункты	Узел	Прогнозные расходы, л/с	Очередность ввода в эксплуатацию	Возможные интервалы расходов, л/с.
Листвянка	40	14,66	3	36.4-150
Большая река	42	12,12	3	10-40
<u>Бурдаковка</u>	44	10,63	2	10-20
<u>Бурдугуз</u>	45	6,41	2	5-10
Еловый	46	51,81	1	40-146.5
Молодежный	59	109,34	1	100-120
Первомайский- <u>Пивовариха</u>	59-0	95,03	1	85-105
		∑ 300 л/с		∑ 286.4- 691.5 л/с

Для этого, используя методологию принятия решения, строится «матрица рисков», которая имеет вид, представленный в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - «Матрица рисков»

∑Q (л/с)	286,4	421,42	556,5	691,5	∑ млн. руб.
286,4	0	29,087	54,021	78,277	161,385
421,42	26,417	0	31,144	51,630	109,191
556,5	50,942	24,525	0	35,936	111,403
691,5	73,236	46,819	22,294	0	142,349
Min max	73,236	46,819	54,021	78,277	46,819

В качестве альтернативного вариант прокладки коллектора возник вариант его устройства его по дну Иркутского водохранилища.

После гидрологических исследований, анализа образии берегов были обозначены возможные пять трасс прохождения коллектора с заглублением в дно водохранилища. На основе этих вариантов составлена избыточная схема водоснабжения, представленная на рисунке 5.12. Согласно предлагаемому варианту, одновременно с транспортировкой стоков с населенных пунктов о. Байкал на КОС г. Иркутска предусмотрено осуществить и сбор стоков от 11 населенных пунктов расположенных вблизи Иркутского водохранилища.



Рисунок 5.12 - Избыточная схема для оптимизации коллектора по дну Иркутского водохранилища.

Протяженность водохранилища по фарватеру составляет 57 км. Предлагается коллектор $d=1200\text{мм}$ заглубить в дно водохранилища на глубину 1.5 м. По отдельным участкам требуется предусмотреть мероприятие, предотвращающие вымывание грунтов, образование насосов, мероприятия по защите от шуги и др. В следствие чего, удельные стоимости прокладки по различным участкам различные.

С учетом построенной избыточной схемы и стоимостных показателей по каждому возможному участку прохождения трассы коллекторов были проведены расчеты по методике комплексной оптимизации. В итоге оптимальный вариант трассы прошел практически по фарватеру Иркутского водохранилища и представлен на рисунке 5.13. Трубы полиэтиленовые с суммарной протяженностью в 72 км.

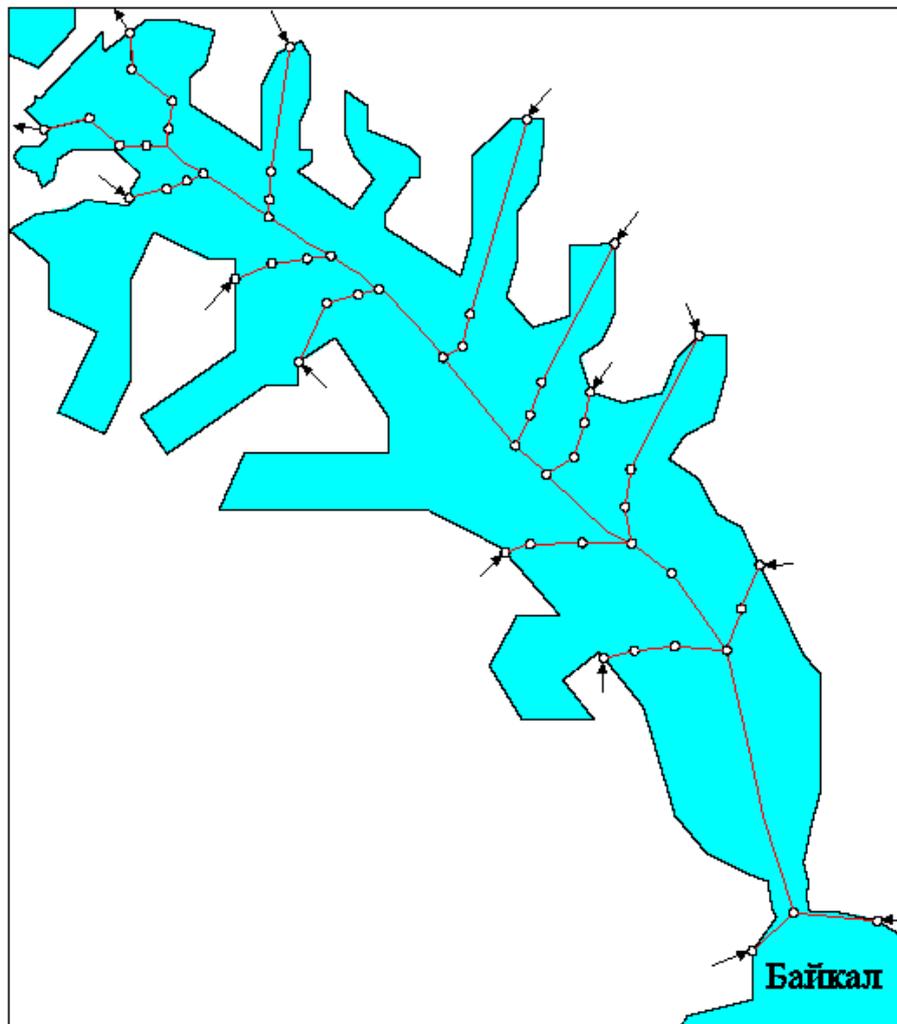


Рисунок 5.13 - Оптимальная трасса самотечной коллектора водоотведения от о. Байкал до г. Иркутска по дну Иркутского водохранилища.

Данный вариант не требует устройства насосных станций и по затратам составляет 1412.6 млн. руб., что в 1.5 раза дешевле, чем если бы этот коллектор проходил вдоль автомобильной трассы. Однако, в виду перепада отметок в 12 м между расчетным уровнем воды в Байкале и у платины ГЭС возле Иркутска уклон будет близок к минимально допустимому. Опыт устройства таких коллекторов пока отсутствует, меры экологической безопасности так же труднореализуемые и требуют отдельного рассмотрения.

5.3. Оптимизация СВО кольцевой структуры

Как уже отмечалось, кольцевые системы водоотведения возникают в процессе их развития и реконструкции. В главе 2 предложена методика расчета потокораспределения в кольцевых системах водоотведения и показана ее практическая значимость. В кольцевых системах водоотведения, работающих в самотечном режиме, всегда найдутся узлы входа потоков и узлы сброса стоков на КОС или в водоемы. В этом случае так же можно использовать алгоритм двойных «меток».

1. Определяется расчетный расход.

2. Формируются два массива степеней вершин отдельно для входа и выхода потоков. Причем в массиве 1 для узла-сброса стоков заносится единица, а для всех оставшихся узлов в массивах 1 и 2 – 0.

Нетрудно заметить, что сформированная таким образом последовательность участков будет соответствовать шагам вычислительного процесса, начиная от некоторых узлов поступления стоков к узлам их сброса, а если сеть, представлена в виде дерева, то от висячих вершин к его корню.

Численные эксперименты показали, что наиболее эффективным распределением затрат является направление их по ветви с наибольшим расходом.

Далее, после просмотра всех участков сети, по аналогии с разветвленной системой водоотведения, в узле источнике выбирается из всех локально-

оптимальных решений, лучшее и обратным ходом восстанавливаются оптимальные параметры по каждому участку кольцевой сети.

Проиллюстрируем работу алгоритма МКО на примере системы, состоящей из 12 участков и 9 узлов (рисунке 5.14, а).

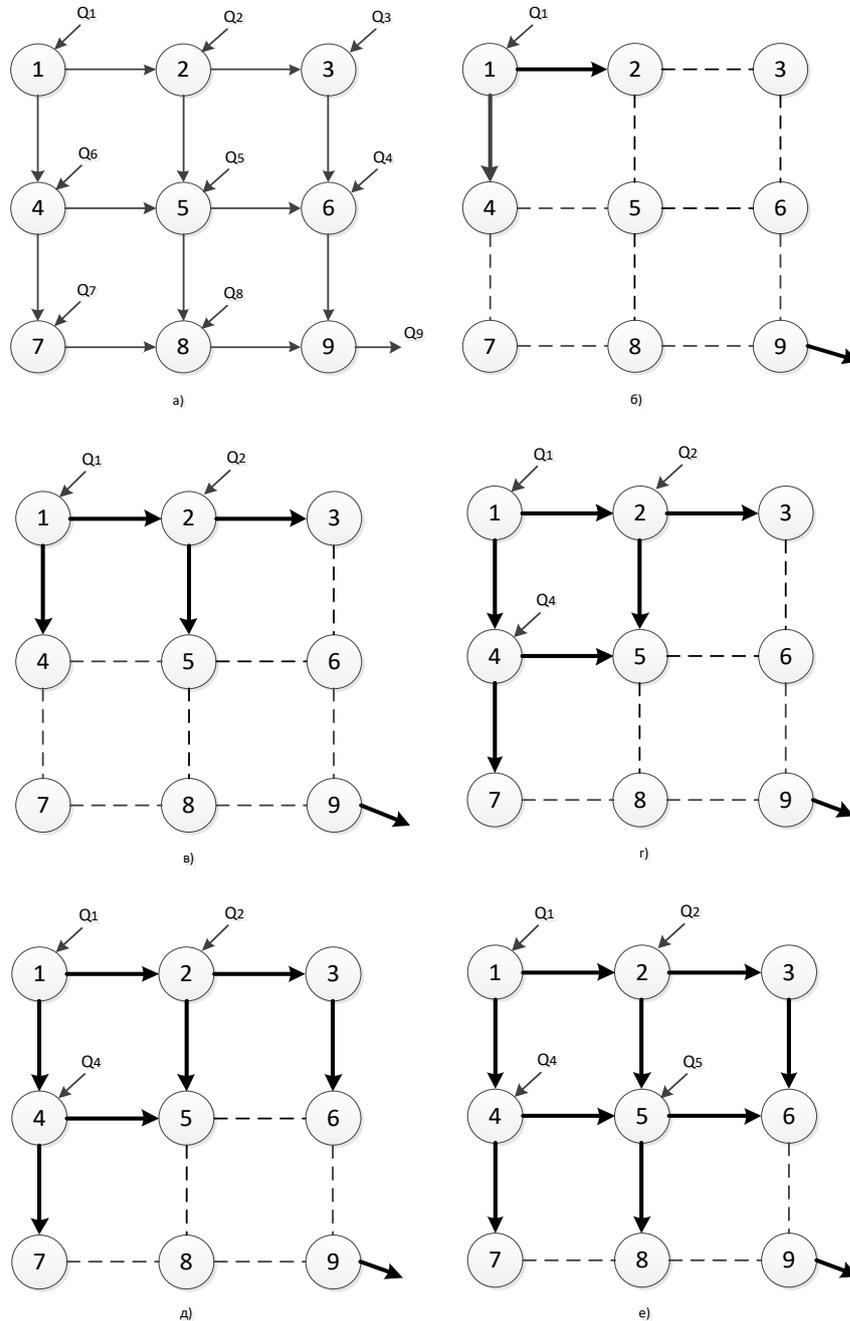


Рисунок 5.14 - Иллюстрация к алгоритму организации вычислительного процесса

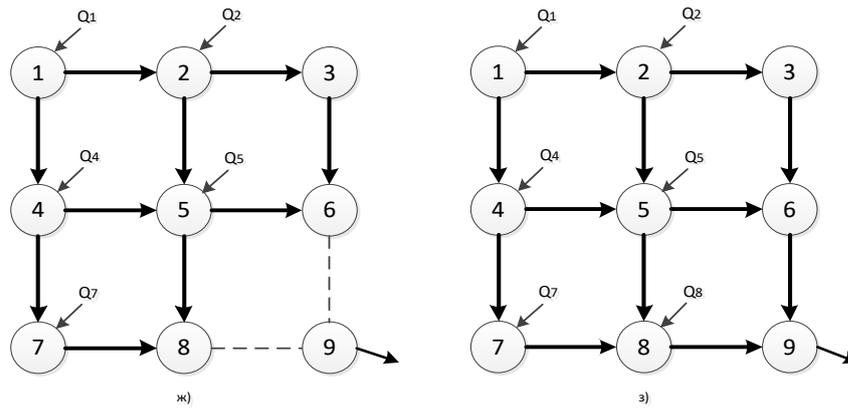


Рисунок 5.14 - Иллюстрация к алгоритму организации вычислительного процесса. Окончание

Для фиксированного потокораспределения (направление движения потоков на схеме указано стрелками) массивы начал и концов участков будут следующими:

i -	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12;
IAI -	1	2	1	4	2	5	3	4	8	5	8	6;
IAJ -	2	3	4	5	5	6	6	7	7	8	9	9;

а массивы степеней узлов:

j -	1	2	3	4	5	6	7	8	9;
I -	0	1	1	1	2	2	1	2	2;
II -	2	2	1	2	2	1	1	1	0.

Через массив IAI определяются ветви, выходящие из узла 1, т.е. 1-2; 1-4. Следовательно, участок 1-2 получает номер 1, а 1-4 – номер 2. В массивах степеней узлов добавляются по единичке для узла 1 в I , а для 2, 4 – в II , т.е.:

j -	1	2	3	4	5	6	7	8	9;
I -	0	0	1	0	2	2	1	2	2
II -	0	2	1	2	2	1	1	1	0.

Затем определяется номер узла j , для которого элемент массива II отличен от 0, а в I равен 0, т.е. узел 2. Через массив IAI определяются ветви, выходящие из узла 2, т.е. 2-3, 2-5. В массивах степеней узлов добавляется по единичке для узла 2 в I и для узлов 4, в II , т.е.:

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9;
I	0	0	0	0	1	2	1	2	2;
II	0	0	1	2	2	1	1	1	0.

В итоге массивы I и II будут следующими:

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9;
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0;
II	0	0	0	0	0	0	0	0	0.

а участки получают следующие номера:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12;
N	1	3	2	5	4	8	7	9	6	10	11	12.

На рисунке 5.15 представлена последовательность шагов оптимизации вычислительного процесса в соответствии с полученной нумерацией N . Как видно, вычисления начинаются с узлов поступления стоков в систему водоотведения в направлении к узлу сброса стоков на КОС по схеме последовательного исключения инцидентных участков данным узлам.

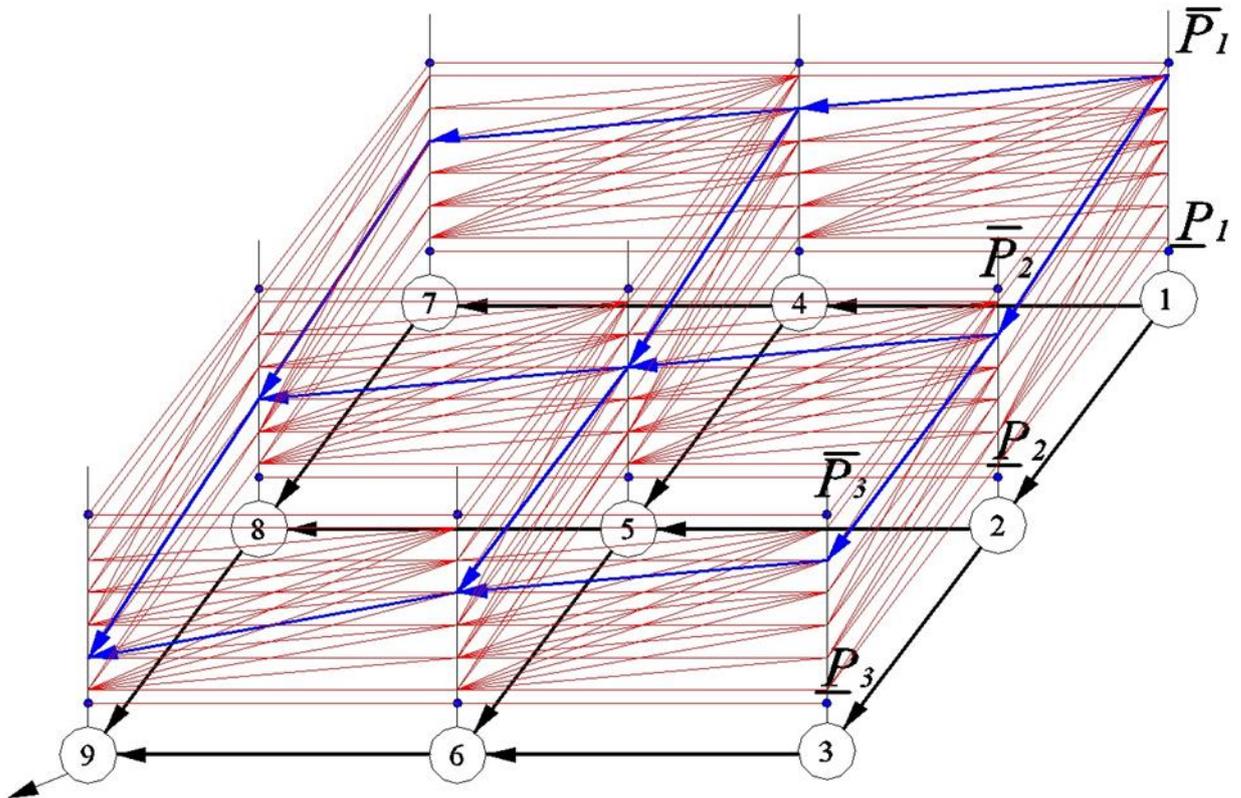


Рисунок 5.15 - Иллюстрация оптимизации кольцевых систем водоотведения

Следует отметить, изложенный выше алгоритм работает и для систем водоотведения древовидной структуры и в случае, когда часть схемы имеет кольцующие трубопроводы. кольцующие трубопроводы.

Устройство системы водоотведения южной зоны о. Байкал

Многие годы под престольным вниманием всех экологов нашей страны находился Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат, расположенный на берегу озера Байкал, от которого все промышленные стоки после их очистки сливались в озеро. В 2015 году по распоряжению Правительства РФ этот комбинат был закрыт. Однако проблема водоотведения и очистки стоков от жилищного сектора и других объектов соцкультбыта и туристических зон осталось не решенной. Существующие технологии доочистки стоков до нормативных показателей сброса их в о. Байкал (мембранные, реагентные способы очистки) являются очень затратными. Предлагается осуществить сброс очищенных стоков в другой водораздел, в частности, в реку Быструю, которая впадает в р. Иркут и далее в р. Ангара. Район прохождения трассы характеризуется сложным рельефом (перепад отметок более 300 м), ограниченными техническими и геологическими условиями. В связи с этим особенно актуальными становятся вопросы выбора трассы и параметров транспортирующих сооружений, включая оптимизацию диаметров трубопроводов, мест расположения насосных станции и их напоров, а также выбора толщины стенок труб и других параметров.

В таблице 5.3 представлены фактические и перспективные нагрузки водоотведения от основных населенных пунктов. С учетом возможных коридоров прохождения трасс намечена избыточная схема, которая представлена на рисунке 5.16. После решения оптимизационной задачи был выбран вариант трассы, показанный на рисунке 5.16 жирной линией.

Таблица 5.3 - Сравнение вариантов устройства системы водоотведения

Муниципальные образования	Численность населения, чел	Объемы водоотведения, м ³ /сут.	Перспективное водоотведение, м ³ /сут.
Байкальское	13 269	6437	6437
Утуликское	1233	133	302
Слюдянское	18 631	3193	3529
Култукское	4485	629	896

Протяженность трассы составляет 68 км, трубопроводы в две нитки диаметром d500 мм, длиной 20 км, d630 мм длиной 47 км, Три насосных станции подкачки с параметрами: $H = 90$ м. в. ст., $q = 400$ м³/ч.

Экономические показатели полученного варианта следующие:

- капиталовложения: в трубопровод – 2 422 282.9 тыс. руб.;
- капиталовложения в насосные станции – 29 918.2 тыс. руб.;
- годовые затраты электроэнергии - 11 664.0 тыс. руб./год.

Вариант устройства новых (двух) и реконструкции существующих (двух) очистных сооружений превышает 5 000 млн. руб.



Рисунок 5.16 - Избыточная проектная схема водоотведения стоков от населенных пунктов южной зон Байкал

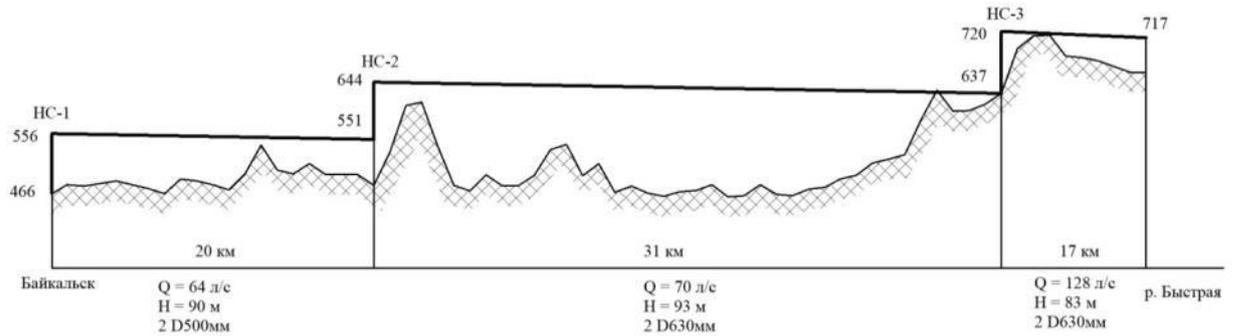


Рисунок 5.17- Оптимальный пьезометрический график напорного канализационного трубопровода от г. Байкальск до реки Быстрая

Выводы по главе 5

1. Разработанные подходы, модели и методы позволяют оптимизировать топологию, профиль и параметры систем водоотведения разветвленной и многоконтурной структуры.
2. Предлагаемые модели и методы рекомендуется использовать при обосновании параметров первой очереди строительства. С другой стороны, они входят в состав более сложных моделей, предназначенных для оптимизации многоуровневых, развивающихся и реконструируемых систем водоотведения, для которых уже существенными становятся вопросы учета их надежности и неопределенности информации о будущих нагрузках и технико-экономических показателях.

ГЛАВА 6. ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ

6.1. Агрегирование и декомпозиция в задачах трассировки развивающихся систем водоотведения

Вопросы обоснования трассировки систем развивающихся систем водоотведения как в черте города, так и на незаселенной территории, являются самыми важными и самыми сложными по следующим причинам:

- вся земля уже кому-то принадлежит и процесс ее выкупа, перевода из одних фондов в другие является самой сложной задачей, порой не имеющей решения;
- в рамках городской застроенной территории трудно найти возможные коридоры для прокладки трубопроводных систем;
- во многих городах, если даже имеются коридоры для прокладки трубопроводных систем, открытым способом этого сделать невозможно, только бесканальной прокладкой или устройством глубинных коллекторов;
- любой возможный вариант прокладки трубопровода требует значительных изыскательских работ по геологии, гидрогеологии, морфологии, археологии и др.;
- даже если по всем перечисленным показателям возможна прокладка трубопровода, требуется согласования практически со всеми коммунальными службами города.

Перечисленные обстоятельства отразились на существующей методологии проектирования и практически свели ее к поиску хотя бы одного, двух варианта трассировки трубопровода. Однако, как уже ранее отмечалось, эти два варианта порождают избыточную схему, на которой можно уже решать оптимизационные задачи. Но правильность и обоснованность решения будет зависеть от все тех же выше перечисленных факторов. По каждому участку необходимо проводить все изыскательские работы, согласования и т.д. При этом вся оптимизация может свестись на нет. Для решения этой проблемы в работе предлагается использовать аппарат теории агрегирования и декомпозиции [174]. Сущность этого подхода

состоит в том, что на первых итерациях формируется избыточная схема, решается задача оптимизации, находится оптимальное решение. Для этого решения формируется избыточная схема, но уже в рамках самого решения, как бы «оконтуривая» его. На рисунке 6.1. дана иллюстрация работы предлагаемого подхода.

Оптимизация по фрагментам проиллюстрирована на рисунке 6.2.

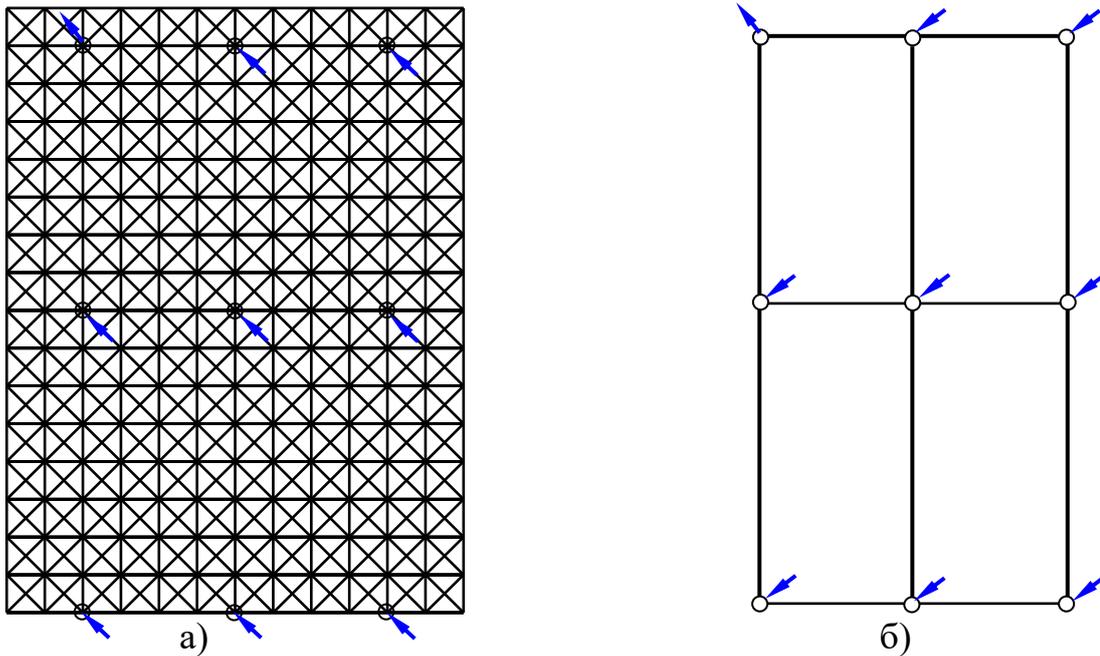


Рисунок 6.1 - Метод «блуждающих трубок»

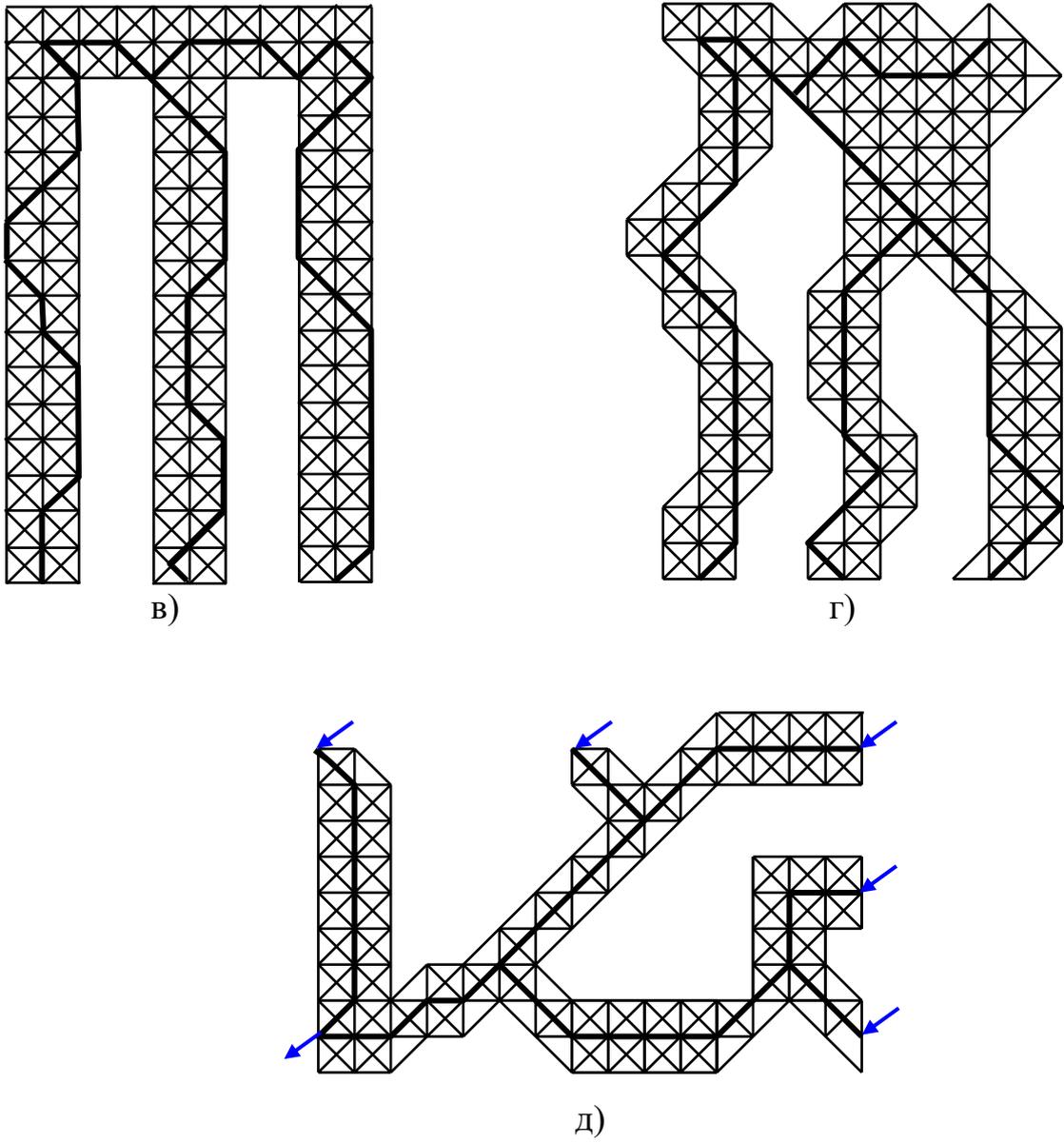


Рисунок 6.1 - Метод «блуждающих трубок». Окончание

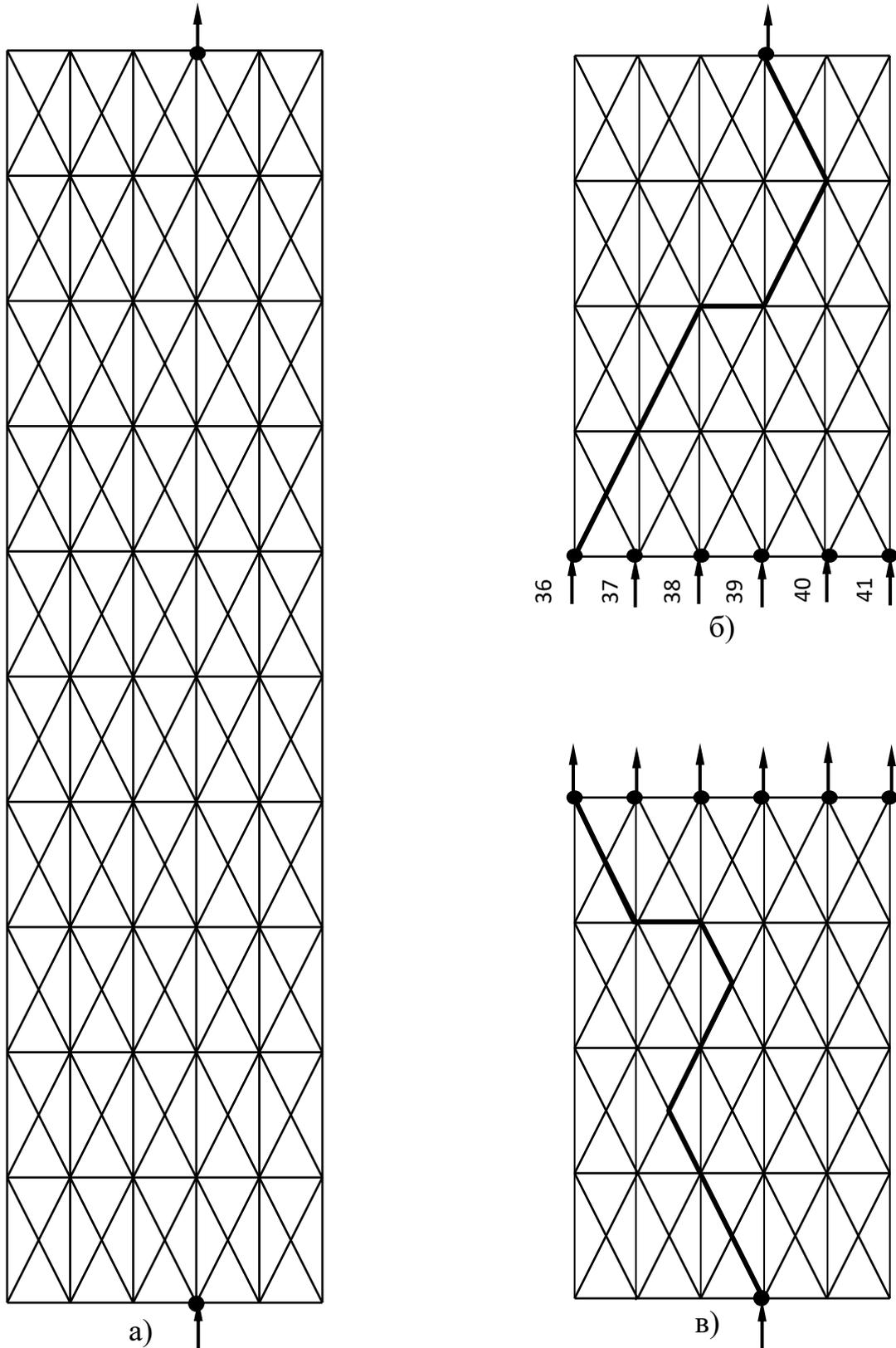


Рисунок 6.2 – Последовательная оптимизация СВО по ее фрагментам

6.2. Комплексная оптимизация магистральных, уличных и дворовых систем сбора и отведения сточных вод

Как уже отмечалось, современные системы водоотведения это сложный инженерный комплекс, состоящий из нескольких уровней сбора отведения, очистки сточных вод и сброса их в водоемы. Очевидно, что невозможно выделять для проектирования и оптимизации какой – то отдельный уровень. А учитывать все уровни сразу – трудоемкая задача, но главное, что она информационно не обеспечена. Выход из этой ситуации может заключаться в использовании методологии многоступенчатой оптимизации [22, 121], согласно которой модели оптимизации последующих уровней формируются на основе агрегированных моделей нижних уровней и т.д. Обратным ходом восстанавливаются оптимальные решения всех уровней сбора и отведения сточных вод.

На первых итерациях многоступенчатой оптимизации можно нижние уровни систем водоотведения рассматривать независимо от всей системы и для них решать следующие задачи:

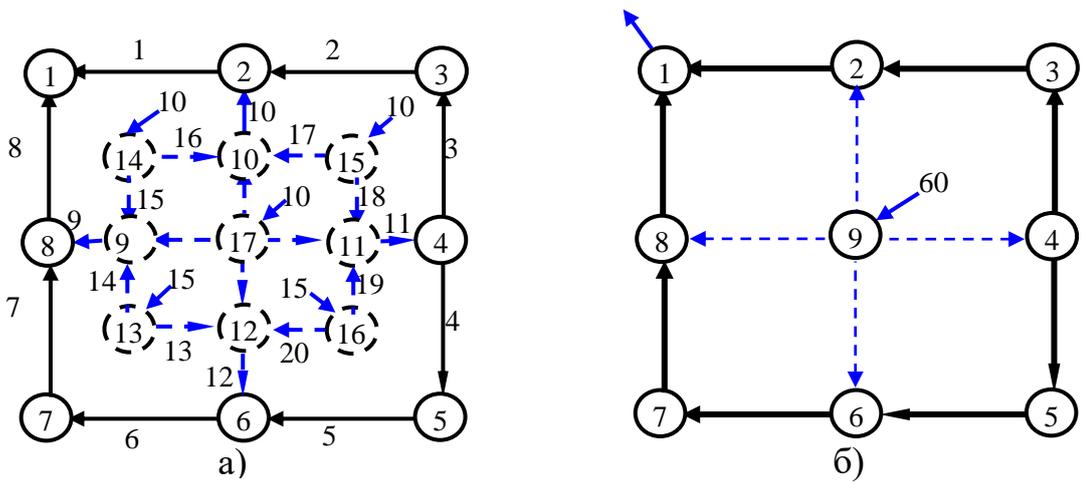
$$Z_{1,v} = f_{1,v}(x_{1,v}, P_{1,v}) \rightarrow \min$$

при условии, что

$$A_{1,v} \cdot x_{1,v} = Q'_{1,v}, \quad A_{1,v}^T \cdot P_{1,v} = h_{1,v} + H_{1,v}.$$

$$v = 1, \dots, \Gamma_1.$$

На рисунке 6.3 проиллюстрирована работа методики многоступенчатой оптимизации



\bar{A}

	\bar{A}																							x	Q
$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	x_1	Q_1
1	-1							-1																x_1	Q_1
2	1	-1								-1														x_2	
3		1	-1																						
4			1	-1								-1													
5				1	-1																				
6					1	-1						-1													
7						-1	1																		
8							-1	1	-1																
9									1				-1	-1									-1		
10										1					-1	-1							-1		
11											1						-1	-1					-1		
12												1	-1						-1	-1			-1		
13													1	1									-1		15
14														1	1								-1		10
15															1	1							-1		10
16																	1	1					-1		15
17																			1	1	1		-1	x_a	15
																								x_{a1}	

В)

A^*_{21}

	A^*_{21}												x	Q			
$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	
1	-1							-1									
2	1	-1								-1							
3		1	-1														
4			1	-1							-1						
5				1	-1												
6					1	-1						-1					
7						-1	1										
8							-1	1	-1								
9									1	1	1	1	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	

Q^*_{11}

Г)

Рисунок 6.3 – Разбивка СВО и ее математической модели на подсистемы и агрегированные блоки

В общем виде алгоритм многоступенчатой оптимизации систем водоотведения иерархической структуры можно представить в виде последовательности решения подзадач:

$$Z_{\mu,\nu} = f_{\mu,\nu}(x_{\mu,\nu}, P_{\mu,\nu}) + f_{\mu-1,\nu}^*(x_{\mu-1,\nu}^*, P_{\mu-1,\nu}) \rightarrow \min,$$

при условии, что

$$\begin{cases} A_{\mu,\nu} \cdot x_{\mu,\nu} = Q'_{\mu,\nu}, \\ A_{\mu-1,\nu}^* \cdot x_{\mu-1,\nu}^* = Q_{\mu-1,\nu}^*, \\ A_{\mu,\nu}^T \cdot P_{\mu,\nu} = h_{\mu,\nu} + H_{\mu,\nu}, \end{cases}$$

$$A_{\mu,\nu}^* = \begin{vmatrix} A_{\mu,\nu} \\ A_{\mu-1,\nu}^* \end{vmatrix},$$

$$\mu = 1, \dots, M; \nu = 1, \dots, \Gamma_{\mu}.$$

Здесь $f_{\mu-1,\nu}^*$, $A_{\mu-1,\nu}^*$, $x_{\mu-1,\nu}^*$, $Q_{\mu-1,\nu}^*$ – агрегированные характеристики нижележащей системы систем водоотведения.

На рисунке 6.4 предложена избыточная схема двухуровневой СВО. Нижние уровни представлены избыточные схемы внутриквартальных сетей водоотведения трех микрорайонов, в качестве верхнего – магистральные трубопроводы транспорта стоков на КОС.

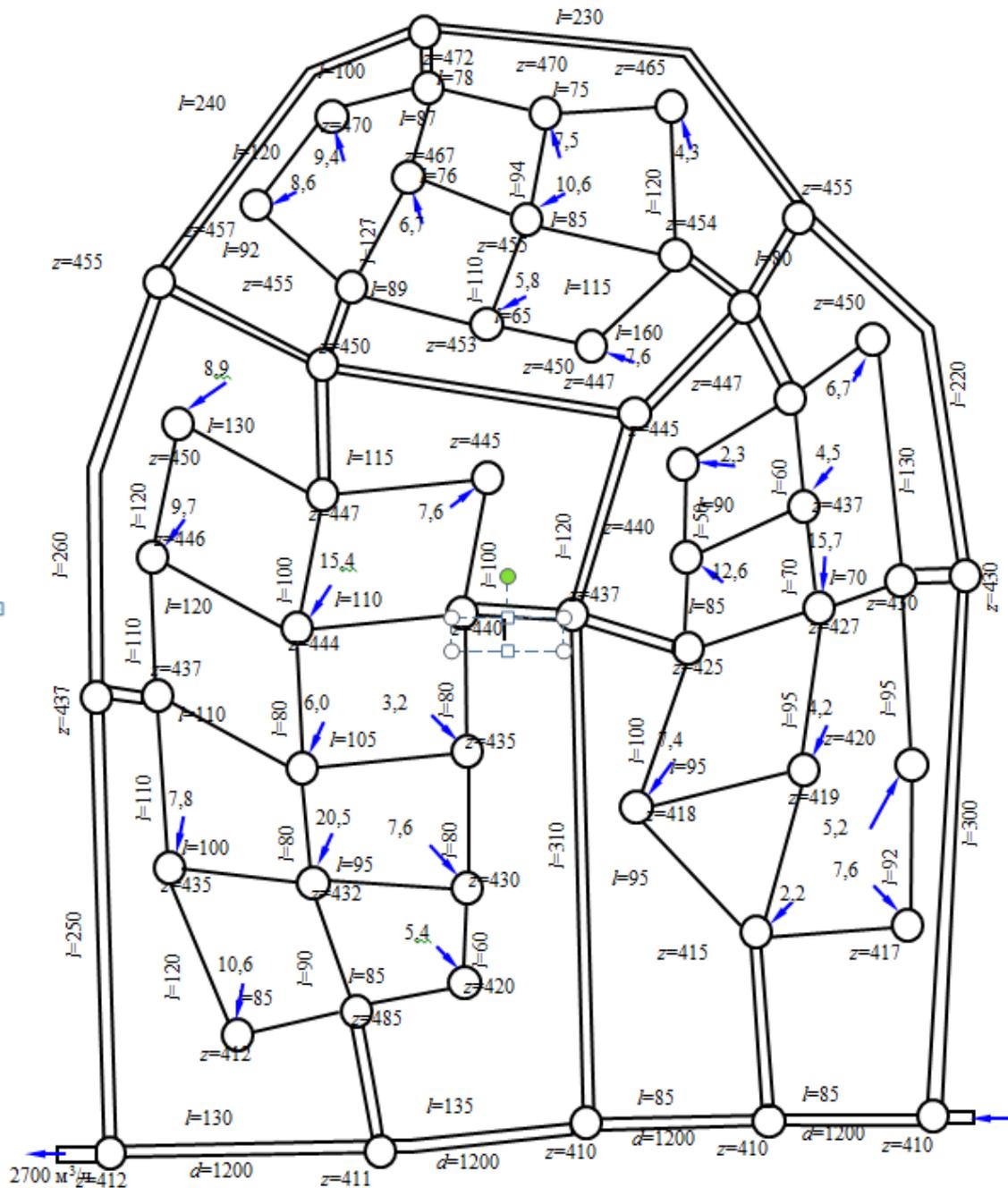


Рисунок 6.4 – Двухуровневая система водоотведения микрорайона г. Иркутска, одинарные линии – нижний уровень, двойные линии верхний уровень

Расчеты будем проводить в следующей последовательности. Наметим возможные узлы поступления сточных вод от систем нижнего уровня в верхний. Таких узлов будет четыре для каждого из трех районов нижнего уровня (см. рисунок 6.5). Затем для каждого из таких узлов сброса потоков на соответствующих избыточных схемах нижних уровней решим оптимизационные

задачи обоснования параметров систем водоотведения нижних уровней и найдем стоимости оптимальных вариантов. Такие расчеты представлены на рис. 6.5.

Далее преобразуем расчетную схему (см. рисунок 6.4) и системы нижних уровней заменим фиктивными ветвями. Каждая из фиктивных ветвей имеет функцию агрегированных затрат, соответствующим решениям нижних уровней. С учетом такой агрегированной избыточной схемы верхнего уровня, решаются для неё оптимизационные задачи. Оптимальное решение показано на рисунке 6.6 жирными линиями, а на рисунке 6.7 оптимальные схемы нижнего и верхнего уровней сбора и отвода сквов.

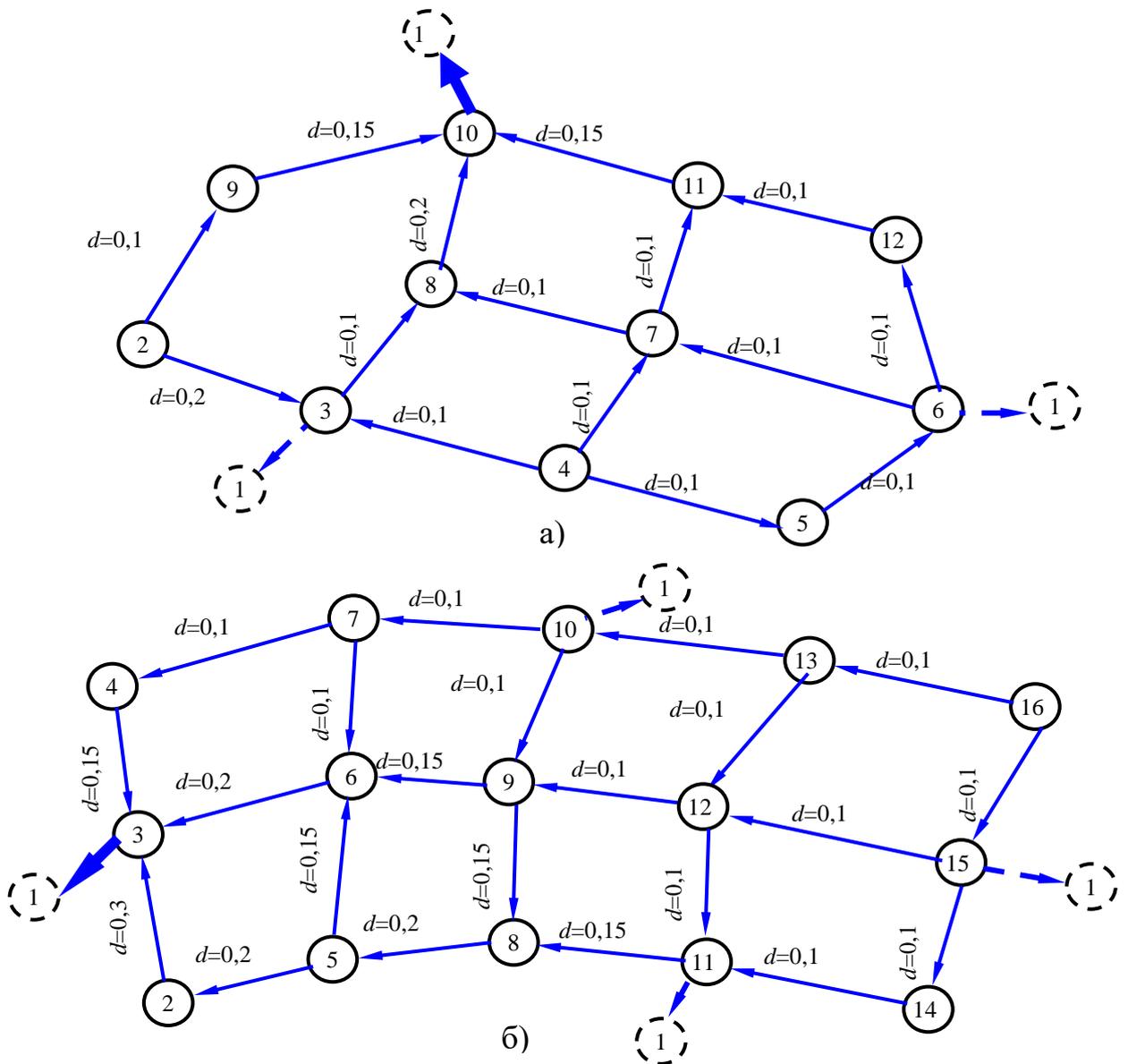


Рисунок 6.5 – Избыточные схемы нижних уровней

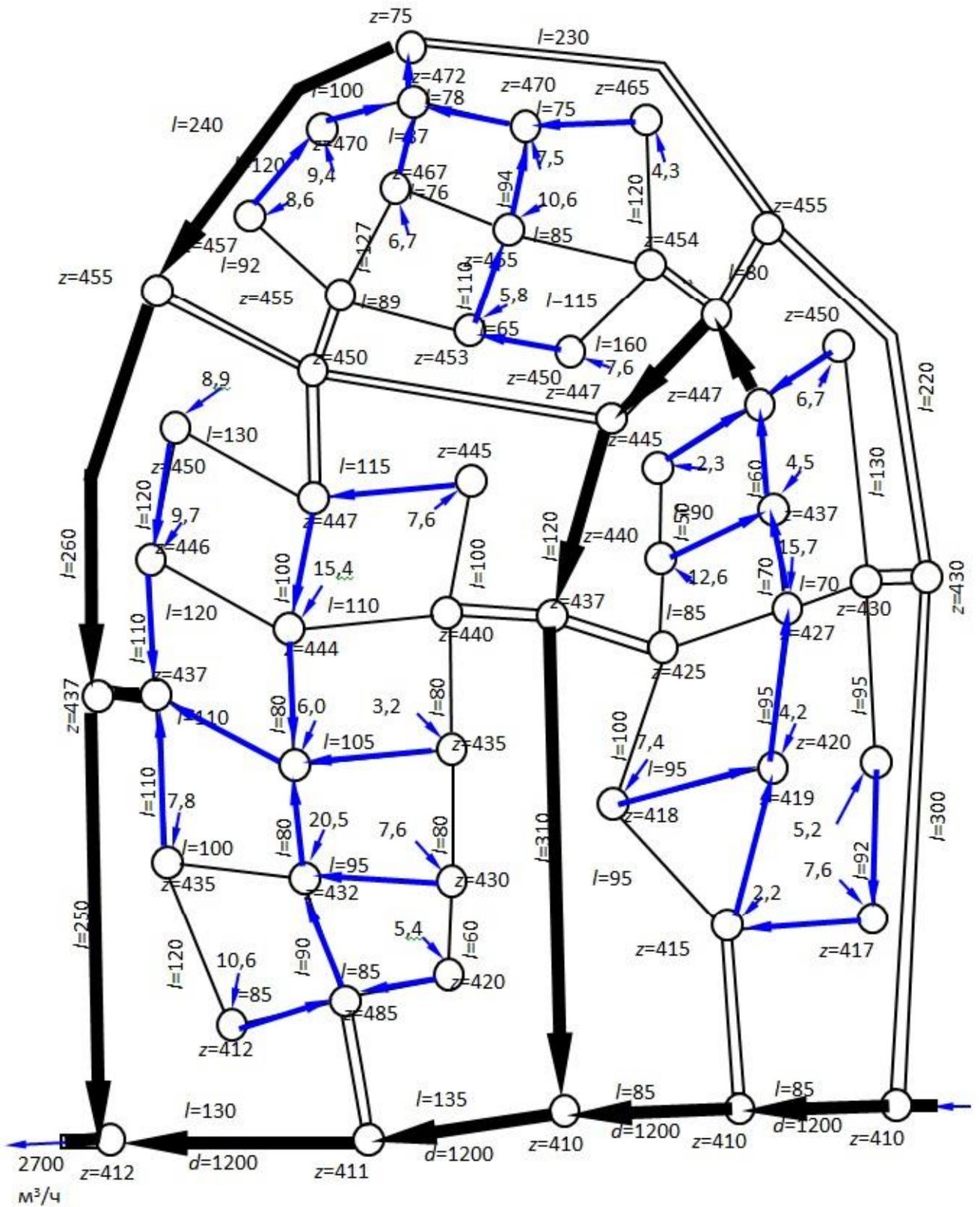


Рисунок 6.7 - Восстановление оптимального решения

Уровней сбора и транспортировки сточных вод может быть несколько, поэтому любой из уровней может по той же схеме агрегироваться, а после оптимизации последнего уровня оптимальное решение дезагрегироваться по всем нижним уровням.

6.3. Учет динамики развития систем водоотведения при обосновании их структуры и параметров

Любая крупная техническая система формируется в два этапа [11]. В начале разрабатывается концепция данной системы и решаются задачи оптимального распределения ресурсов между существующими и проектируемыми системами водоотведения, определяется очередность ввода новых потребителей.

На втором этапе решаются схемно –структурные и схемно-параметрические задачи развития СВО. На этом уровне решается задача оптимизации развития систем водоотведения с учетом их поэтапного ввода в строй. Поэтому в условиях их непрерывного развития задачи оптимизации трасс и параметров необходимо решать с учетом динамики их развития.

Поскольку решение данной задачи осуществляется на втором этапе оптимального управления, то структура поступления стоков (либо динамика их роста) уже должна быть определена на первом этапе и будет являться необходимой информацией для решения «тактических» задач развития систем водоотведения, которые соответствуют задачам оптимизации параметров развиваемых и реконструируемых систем водоотведения при фиксированном этапе строительства v и потребной мощности (нагрузки) уровня g .

Если проектируемая система водоотведения будет реализована в несколько этапов (очередей строительства), даже для первой очереди возникает множество вариантов ее формирования.

Следует отметить, что количество вариантов развития системы водоотведения не зависит от радиальной или последовательной структуры развивающейся системы водоотведения. На рисунке 6.8. для четырех очередей строительства для

радиальной и последовательной схемы количество вариантов будет равным 24.

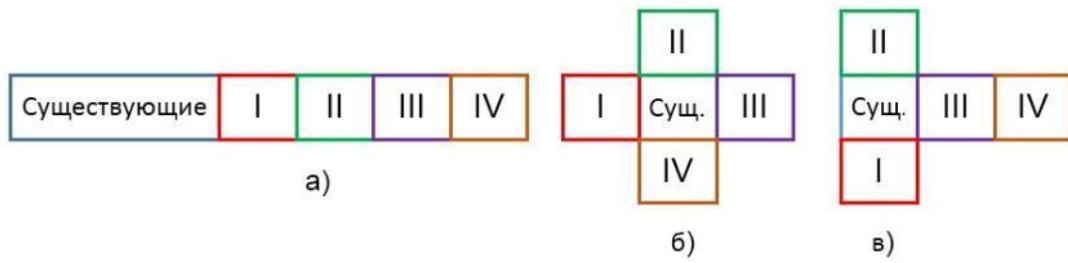


Рисунок 6.8 - Различные схемы развития системы водоотведения в четыре очереди

Простым перебором всех вариантов развития можно осуществить только для трех очередей развития. Для формирования и оценки вариантов развития СВО в четыре и более очередях строительства в работе предложена методика основанная на процедуре многошагового процесса наращивания вариантов развития. На рис. 6.9 для трех, четырёх и пяти очередей строительства показаны возможные траектории развития.

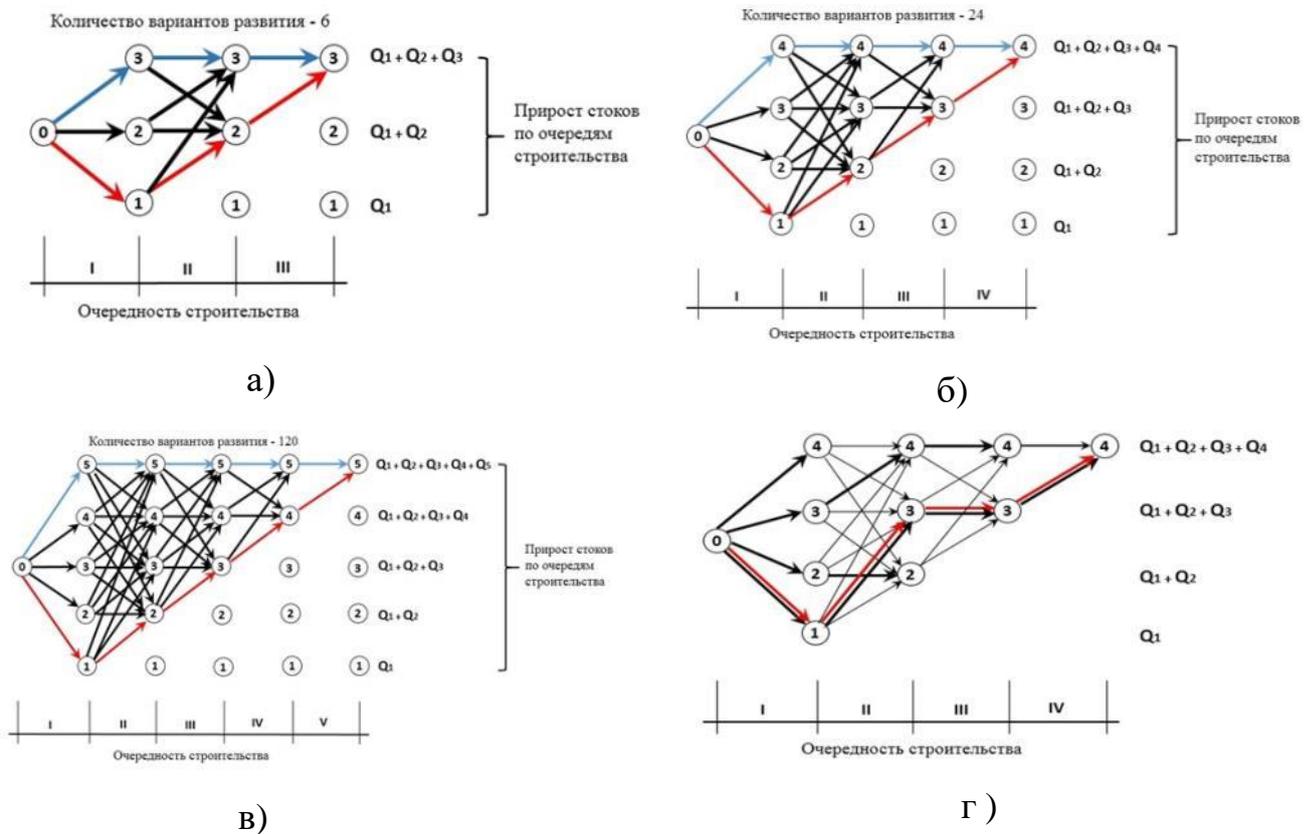


Рисунок 6.9 - Графы вариантов развития системы водоотведения, реализуемой в три (а), четыре (б) и пять (в) очередей развития СВО

Для первой очереди варианты развития можно представить следующей группой уравнений:

$$Z_1(Q_1) = Z_c(Q_c) + \Psi_{0-1}(Q_1);$$

$$Z_1(Q_1 + Q_2) = Z_c(Q_c) + \Psi_{0-2}(Q_1 + Q_2);$$

$$Z_1(Q_1 + Q_2 + Q_3) = Z_c(Q_c) + \Psi_{0-3}(Q_1 + Q_2 + Q_3);$$

$$Z_1(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) = Z_c(Q_c) + \Psi_{0-4}(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4),$$

где $Z_I(Q)$ – результирующие затраты

Соответственно функциональные уравнения перехода системы водоотведения для второй очереди можно записать:

$$Z_2(Q_2) = \min \begin{cases} Z_1(Q_1) + \Psi_{1-2}(Q_1); \\ Z_1(Q_1 + Q_2) + \Psi_{2-2}(Q_1 + Q_2)^*; \\ Z_1(Q_1 + Q_2 + Q_3) + \Psi_{3-2}(Q_1 + Q_2 + Q_3); \\ Z_1(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) + \Psi_{4-2}(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4); \end{cases}$$

$$Z_2(Q_2 + Q_3) = \min \begin{cases} Z_1(Q_1) + \Psi_{1-3}(Q_1)^*; \\ Z_1(Q_1 + Q_2) + \Psi_{2-3}(Q_1 + Q_2); \\ Z_1(Q_1 + Q_2 + Q_3) + \Psi_{3-3}(Q_1 + Q_2 + Q_3); \\ Z_1(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) + \Psi_{4-3}(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4); \end{cases}$$

$$Z_2(Q_2 + Q_3 + Q_4) = \min \begin{cases} Z_1(Q_1) + \Psi_{1-4}(Q_1); \\ Z_1(Q_1 + Q_2) + \Psi_{2-4}(Q_1 + Q_2); \\ Z_1(Q_1 + Q_2 + Q_3) + \Psi_{3-4}(Q_1 + Q_2 + Q_3)^*; \\ Z_1(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) + \Psi_{4-4}(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4). \end{cases}$$

Пусть оптимальными для этого шага будут следующие решения:

$$Z_2(Q_2) = Z_1(Q_1 + Q_2) + \Psi_{2-2}(Q_1 + Q_2);$$

$$Z_2(Q_2 + Q_3) = Z_1(Q_1) + \Psi_{1-3}(Q_1);$$

$$Z_2(Q_2 + Q_3 + Q_4) = Z_1(Q_1 + Q_2 + Q_3) + \Psi_{3-4}(Q_1 + Q_2 + Q_3).$$

Эти решения принимаются за основу для следующего шага оптимизации:

$$Z_3(Q_3) = \min \begin{cases} Z_2(Q_2) + \Psi_{2-3}(Q_2); \\ Z_2(Q_2 + Q_3) + \Psi_{3-3}(Q_2 + Q_3)^*; \\ Z_2(Q_2 + Q_3 + Q_4) + \Psi_{4-3}(Q_2 + Q_3 + Q_4); \end{cases}$$

$$Z_3(Q_3 + Q_4) = \min \begin{cases} Z_2(Q_2) + \Psi_{2-4}(Q_2); \\ Z_2(Q_2 + Q_3) + \Psi_{3-4}(Q_2 + Q_3); \\ Z_2(Q_2 + Q_3 + Q_4) + \Psi_{4-4}(Q_2 + Q_3 + Q_4)^*. \end{cases}$$

Пусть оптимальными на третьем шаге будут следующие переходы:

$$Z_3(Q_3) = Z_2(Q_2 + Q_3) + \Psi_{3-3}(Q_2 + Q_3);$$

$$Z_3(Q_3 + Q_4) = Z_2(Q_2 + Q_3 + Q_4) + \Psi_{4-4}(Q_2 + Q_3 + Q_4).$$

Для четвертой очереди строительства:

$$Z_4(Q_4) = \min \begin{cases} Z_3(Q_3) + \Psi_{3-4}(Q_3)^*; \\ Z_3(Q_3 + Q_4) + \Psi_{4-4}(Q_3 + Q_4). \end{cases}$$

Пусть оптимальным будет следующий переход:

$$Z_4(Q_4) = Z_3(Q_3) + \Psi_{3-4}(Q_3).$$

После просмотра всех очередей развития, выбирается оптимальный и обратным ходом этот вариант развития восстанавливается (см. рис. 6.9 красным цветом). Оптимальным получился вариант постоянных реконструкций.

В общем виде процесс формирования вариантов развития СВО можно записать:

$$Z_v(\sum_{j=v}^V Q_j) = \min \left\{ Z_{v-1}(\sum_{i=v-1}^V Q_i) + \Psi(\sum_{i=v-1}^V Q_i) \right\} \quad (6.4)$$

Если инвестиции в развития СВО ограничены, то вариант, превышающий эти инвестиции, из рассмотрения исключается. Рассмотрим пример развития СВО в четыре очереди (рисунок 6.10,а),

Граф возможных переходов для четырех очередей строительства представлен на рис. 6.9,г., согласно которому получены варианты, представленные на рисунках 6.11-6.34.

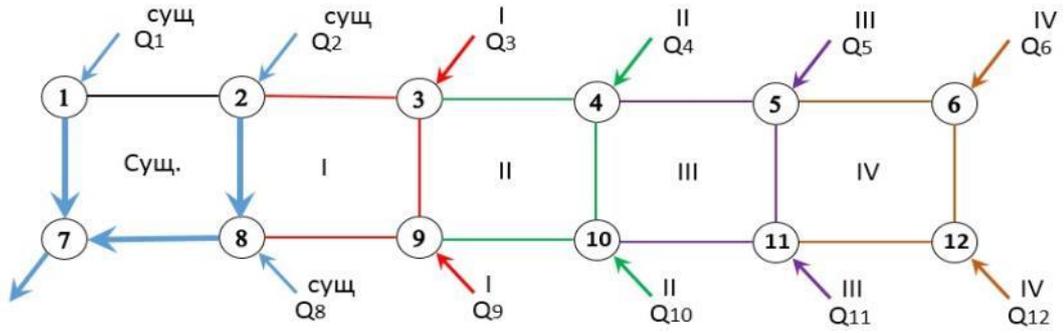


Рисунок 6.10 - Существующая и избыточная схемы развивающейся системы водоотведения

Первый этап

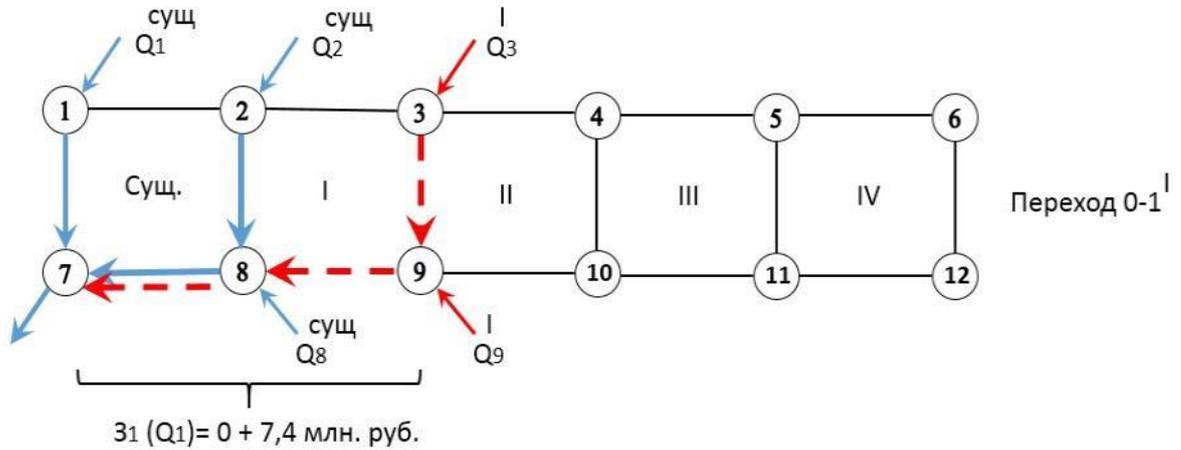


Рисунок 6.11 - Оптимальное решение по строительству первой очереди на нагрузки первого этапа ввода в строй новых абонентов

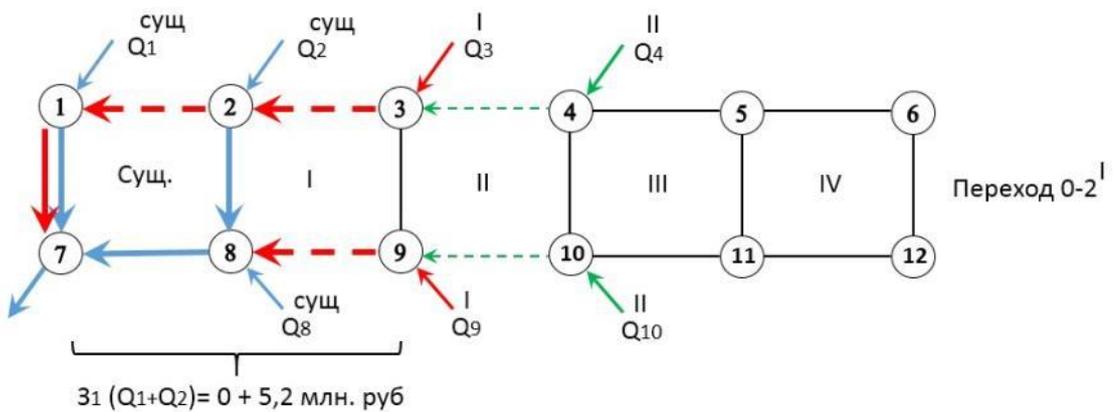


Рисунок 6.12 - Оптимальное решение по строительству первой очереди на нагрузки первого и второго этапов ввода в строй новых абонентов

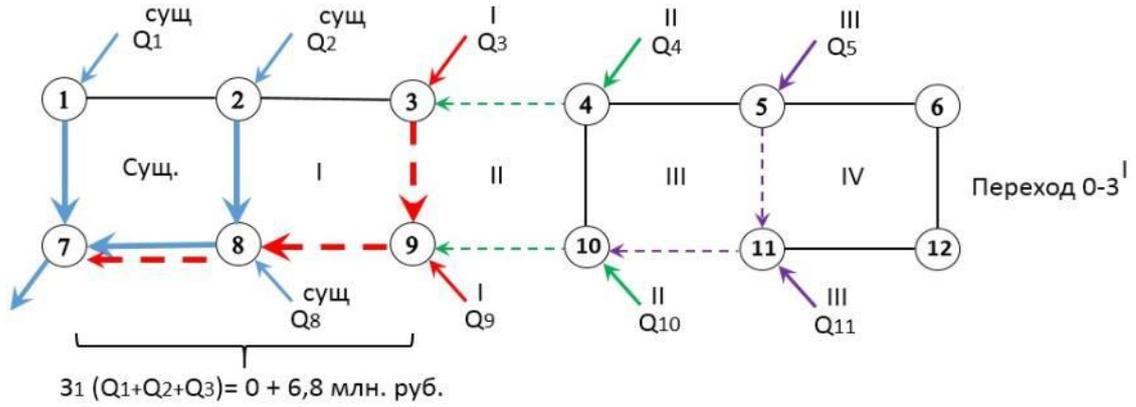


Рисунок 6.13 - Оптимальное решение по строительству первой очереди на нагрузки первого, второго и третьего этапов ввода в строй новых абонентов

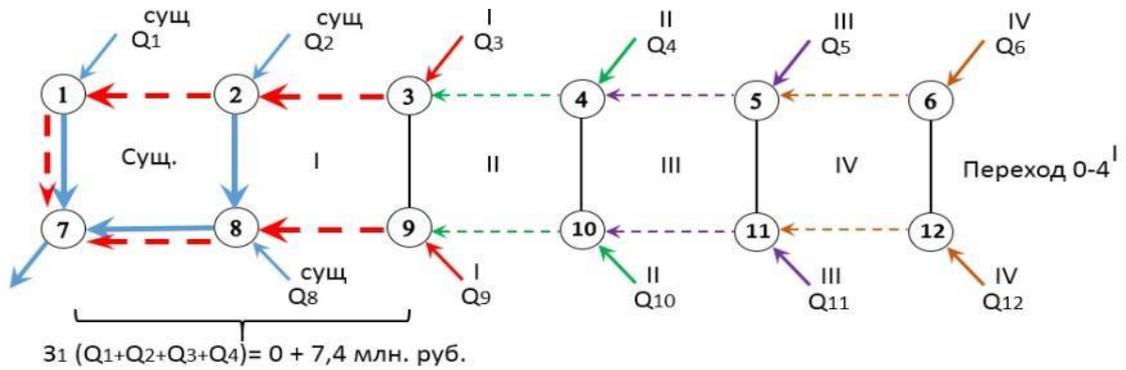


Рисунок 6.14 - Оптимальное решение по строительству первой очереди на нагрузки первого, второго, третьего и четвертого этапов ввода в строй новых абонентов

Второй этап

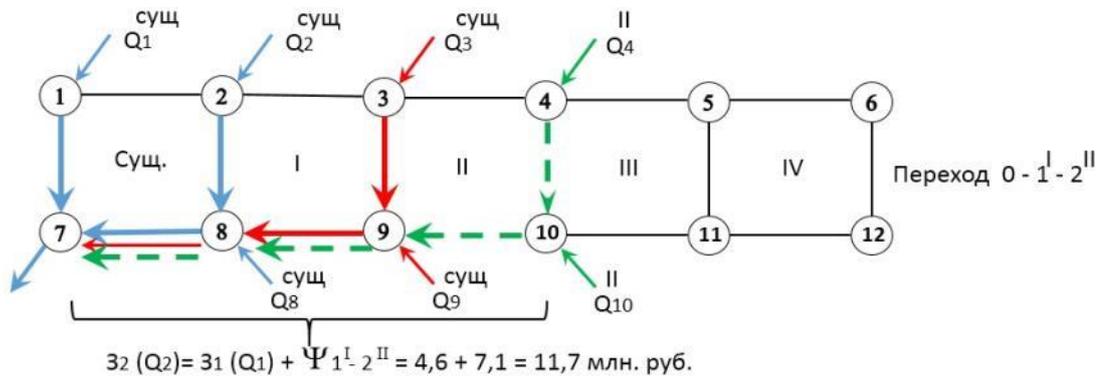


Рисунок 6.15 - Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго этапа ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого этапа ввода в строй абонентов

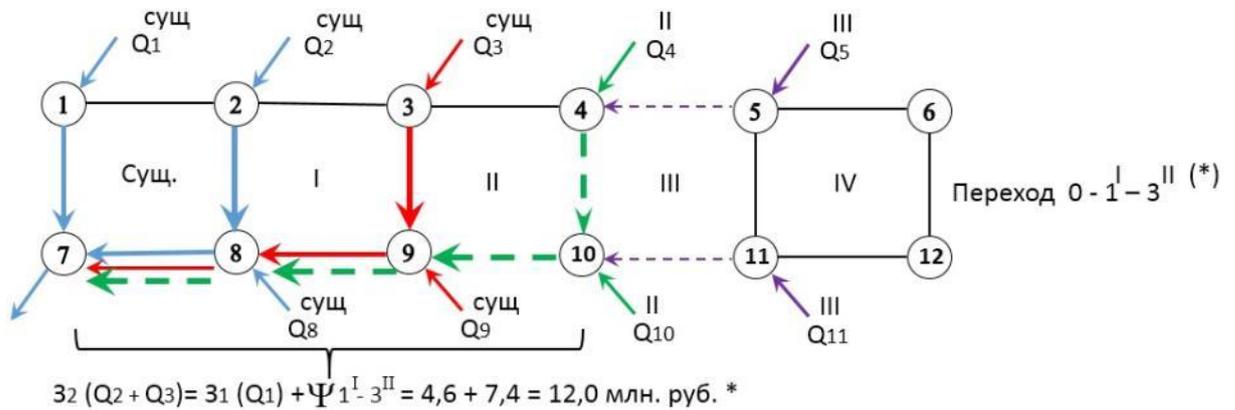


Рисунок 6.16 - Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго и третьего этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого этапа ввода в строй абонентов

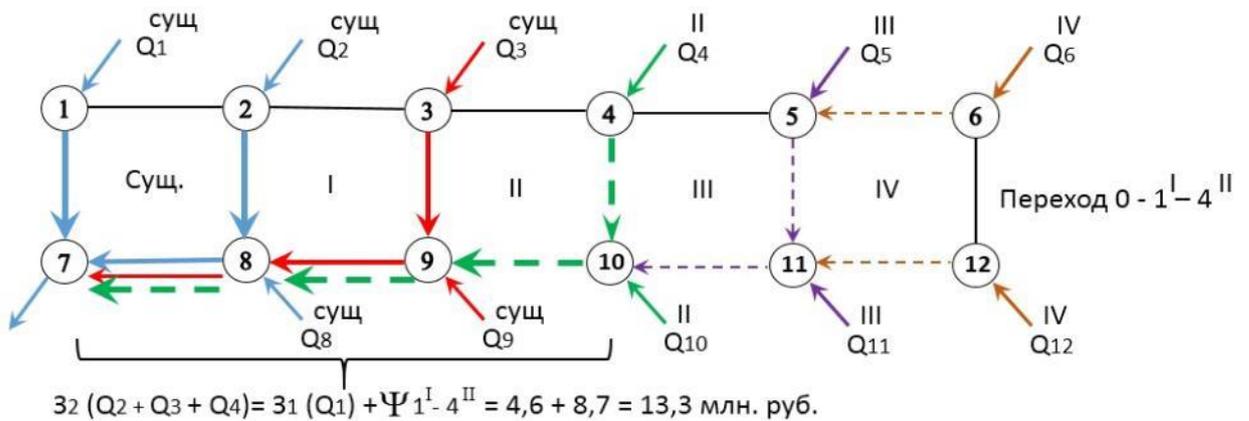


Рисунок 6.17 - Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго, третьего и четвертого этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого этапа ввода в строй абонентов

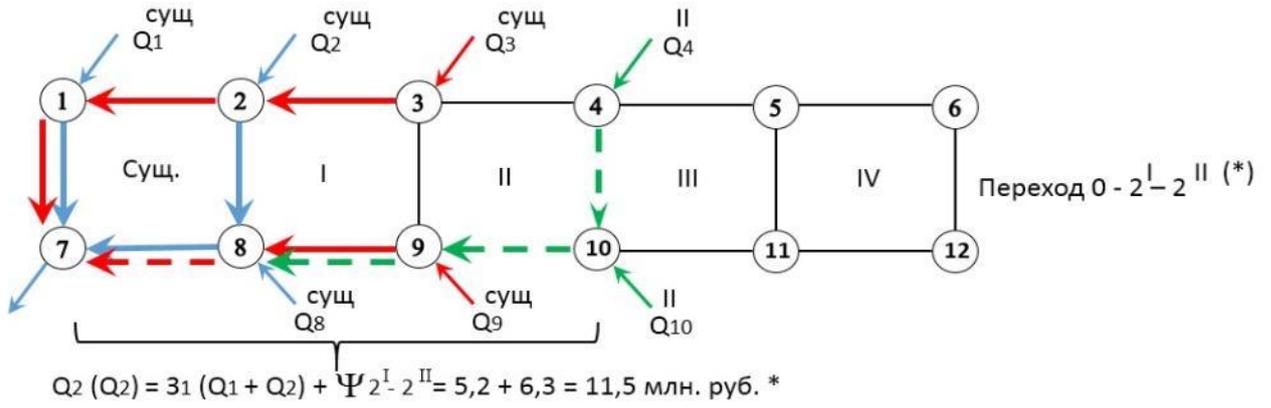


Рисунок 6.18 - Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго этапа ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого и второго этапов ввода в строй абонентов

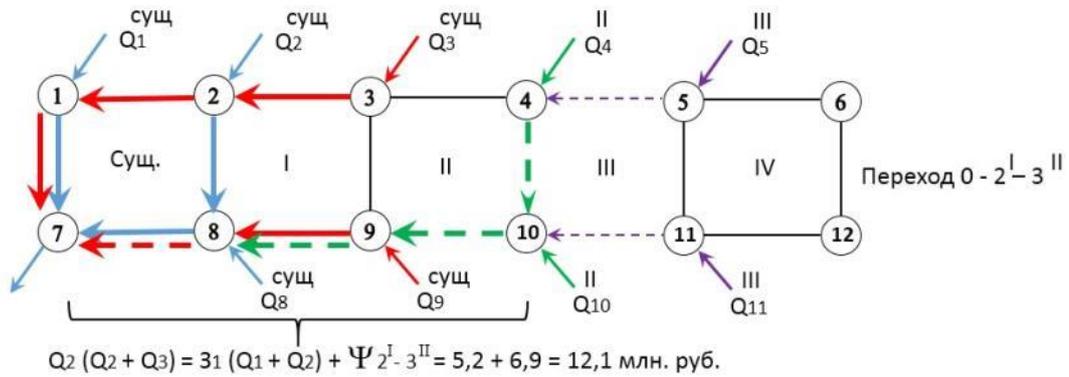


Рисунок 6.19 - Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго и третьего этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого и второго этапов ввода в строй абонентов

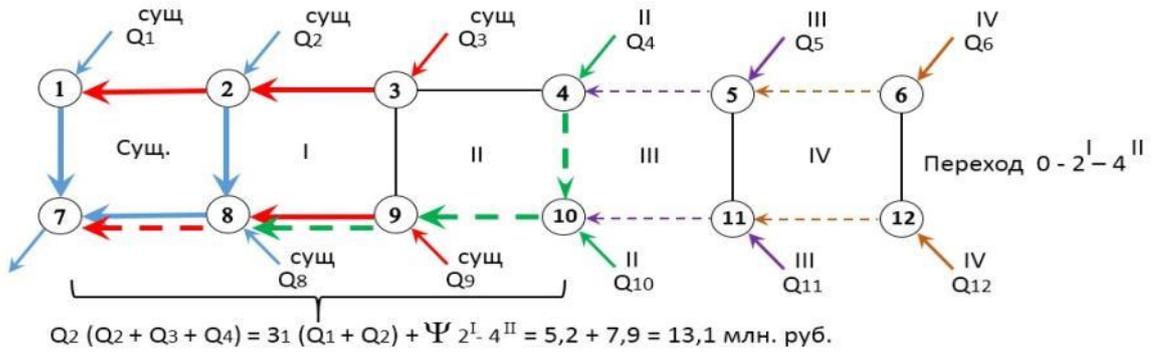


Рисунок 6.20 - Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго, третьего и четвертого этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого и второго этапов ввода в строй абонентов

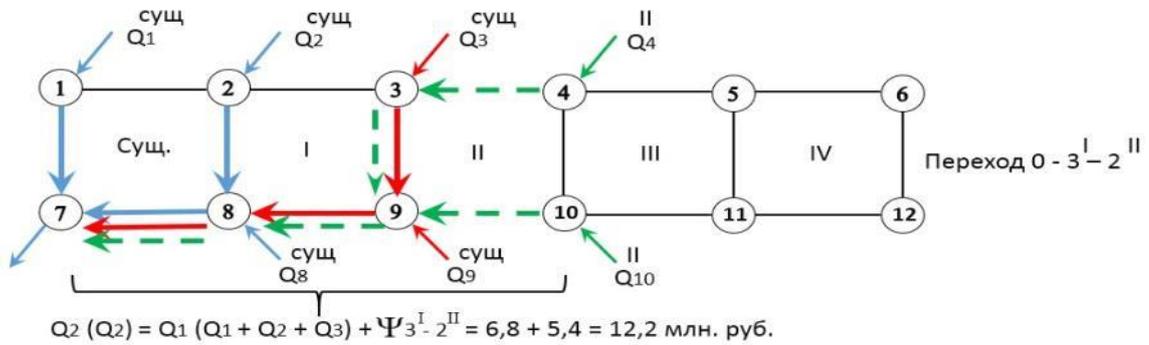


Рисунок 6.21 - Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго этапа ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого, второго и третьего этапов ввода в строй абонентов

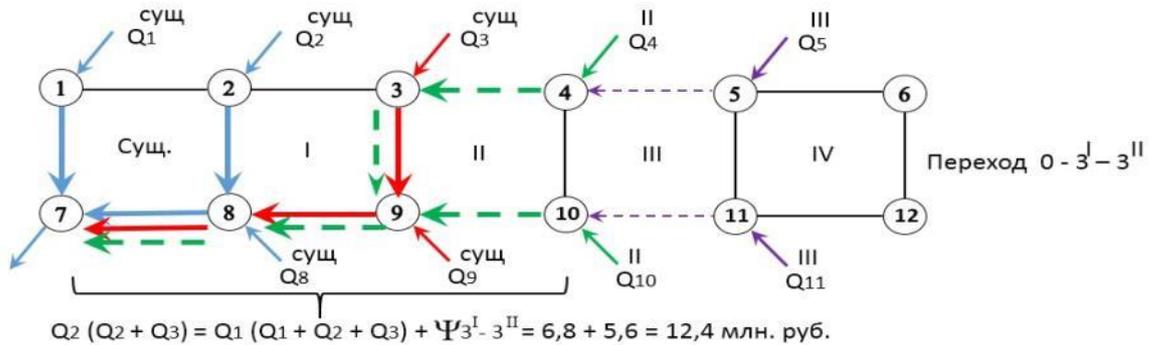


Рисунок 6.22- Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго и третьего этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого, второго и третьего этапов ввода в строй абонентов

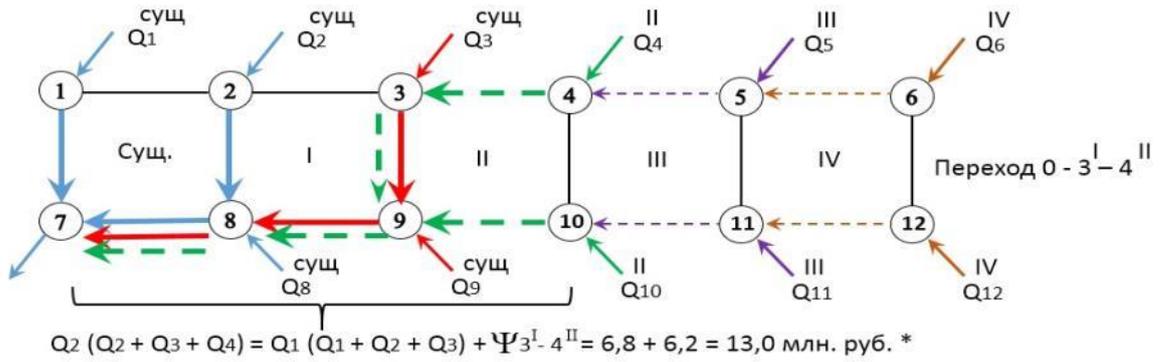


Рисунок 6.23 - Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго, третьего и четвертого этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого, второго и третьего этапов ввода в строй абонентов

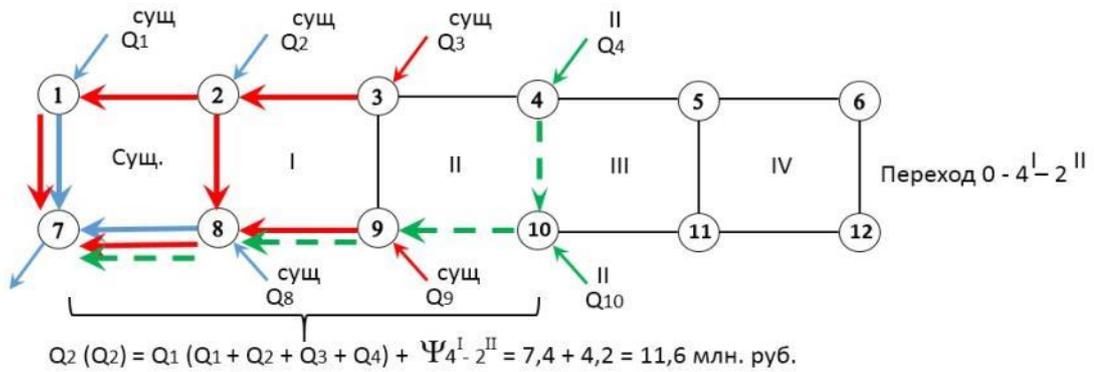


Рисунок 6.24 - Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго этапа ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого, второго, третьего и четвертого этапов ввода в строй абонентов

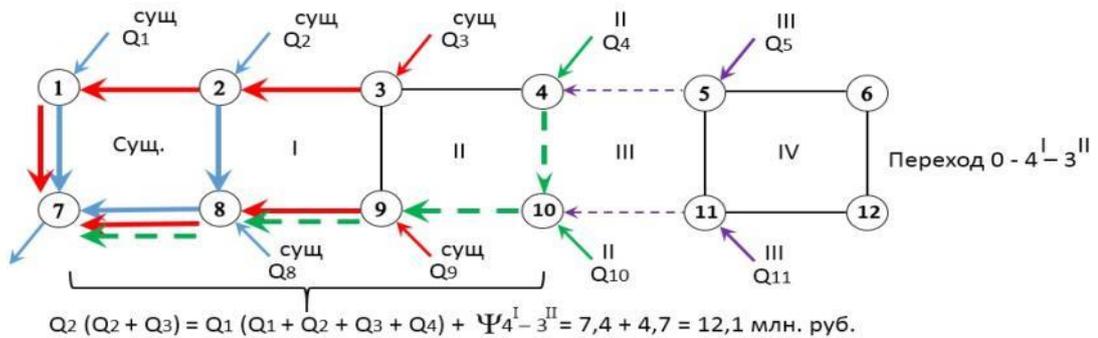


Рисунок 6.25 - Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго и третьего этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого, второго, третьего и четвертого этапов ввода в строй абонентов

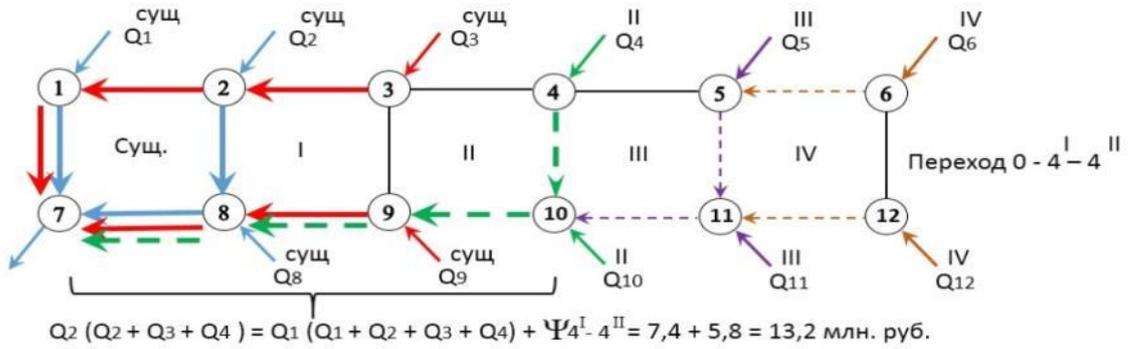


Рисунок 6.26 - Оптимальное решение по строительству второй очереди на нагрузки второго, третьего и четвертого этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы и первой очереди, рассчитанной на нагрузки первого, второго, третьего и четвертого этапов ввода в строй абонентов

Третий этап

И так оптимальные переходы в 2^{II} из 2^I ; в 3^{II} из 1^I ; в 4^{II} из 3^I .

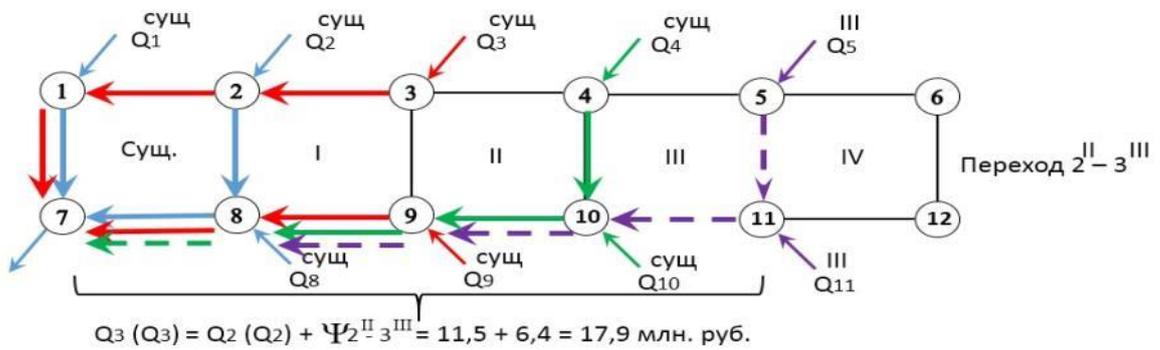


Рисунок 6.27 - Оптимальное решение по строительству третьей очереди на нагрузки третьего этапа ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы, первой и второй очередей, рассчитанных на нагрузки первого и второго этапов ввода в строй абонентов

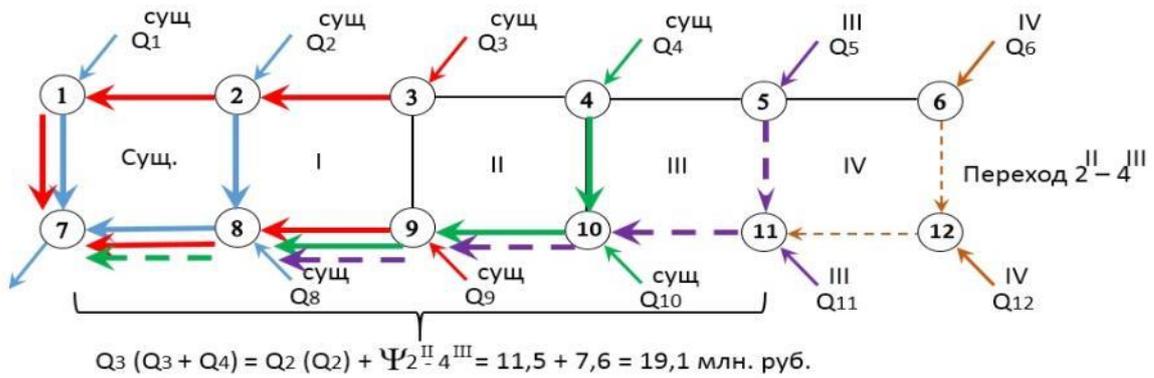


Рисунок 6.28 - Оптимальное решение по строительству третьей очереди на нагрузки третьего и четвертого этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы, первой и второй очередей, рассчитанных на нагрузки первого и второго этапов ввода в строй абонентов

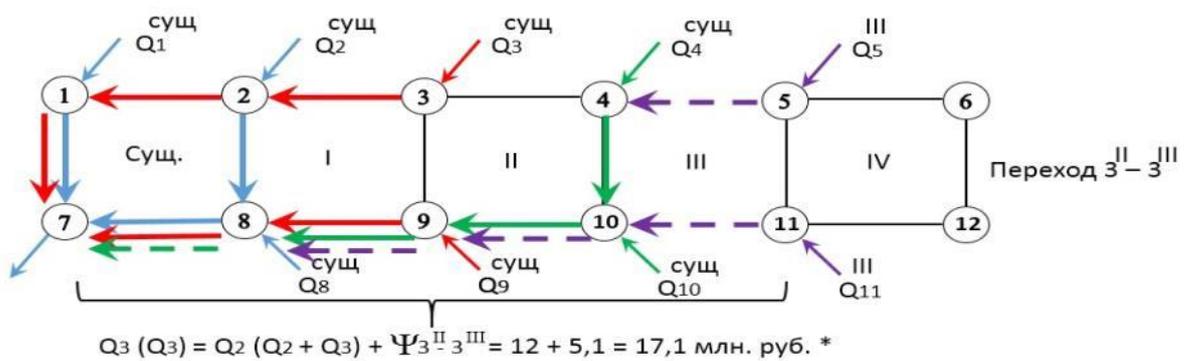


Рисунок 6.29 - Оптимальное решение по строительству третьей очереди на нагрузки третьего этапа ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы, первой и второй очередей, рассчитанных на нагрузки первого и второго и третьего этапов ввода в строй абонентов

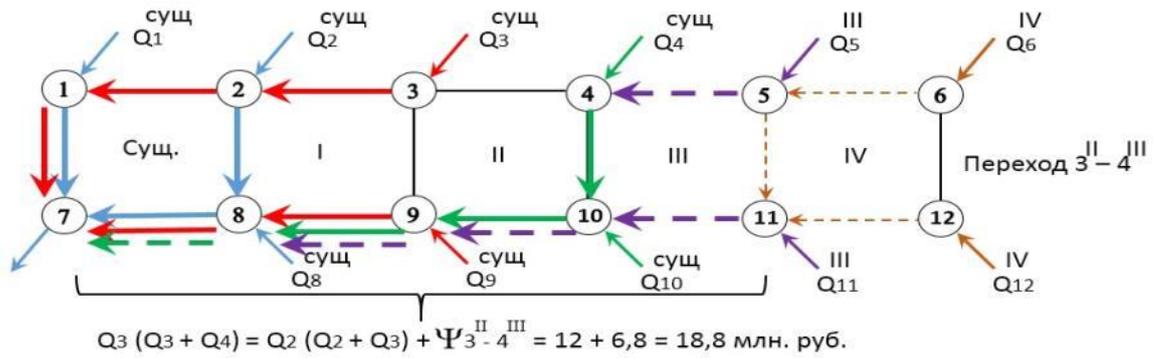


Рисунок 6.30 - Оптимальное решение по строительству третьей очереди на нагрузки третьего и четвертого этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы, первой и второй очередей, рассчитанных на нагрузки первого, второго и третьего этапов ввода в строй абонентов

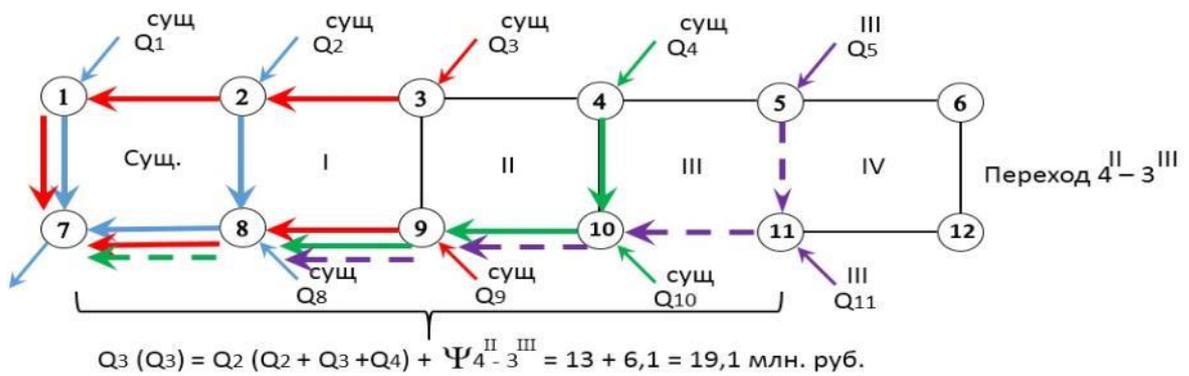


Рисунок 6.31 - Оптимальное решение по строительству третьей очереди на нагрузки третьего этапа ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы, первой и второй очередей, рассчитанных на нагрузки первого, второго, второго и четвертого этапов ввода в строй абонентов

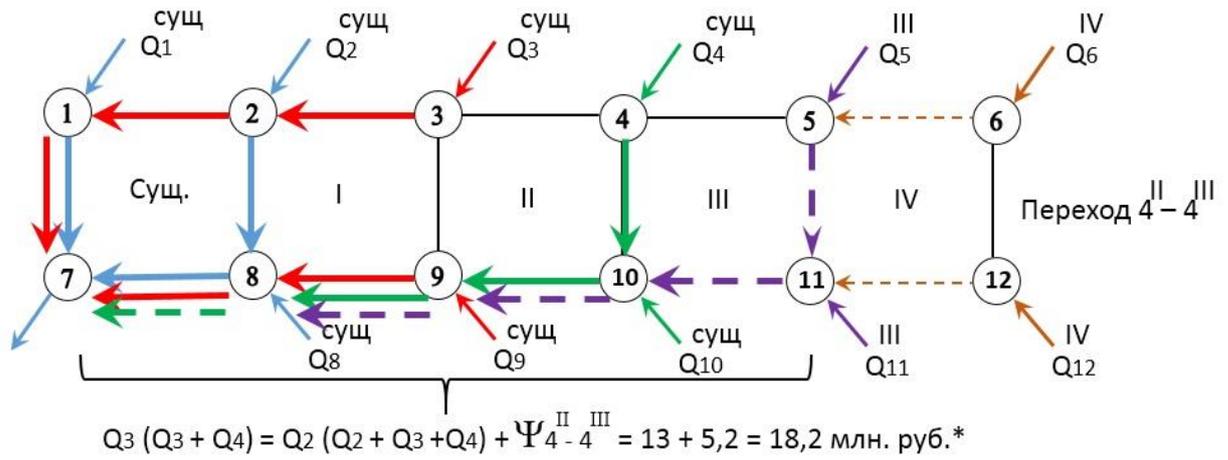


Рисунок 6.32 - Оптимальное решение по строительству третьей очереди на нагрузки третьего и четвертого этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы, первой и второй очередей, рассчитанных на нагрузки первого, второго, третьего и четвертого этапов ввода в строй абонентов

Четвертый этап

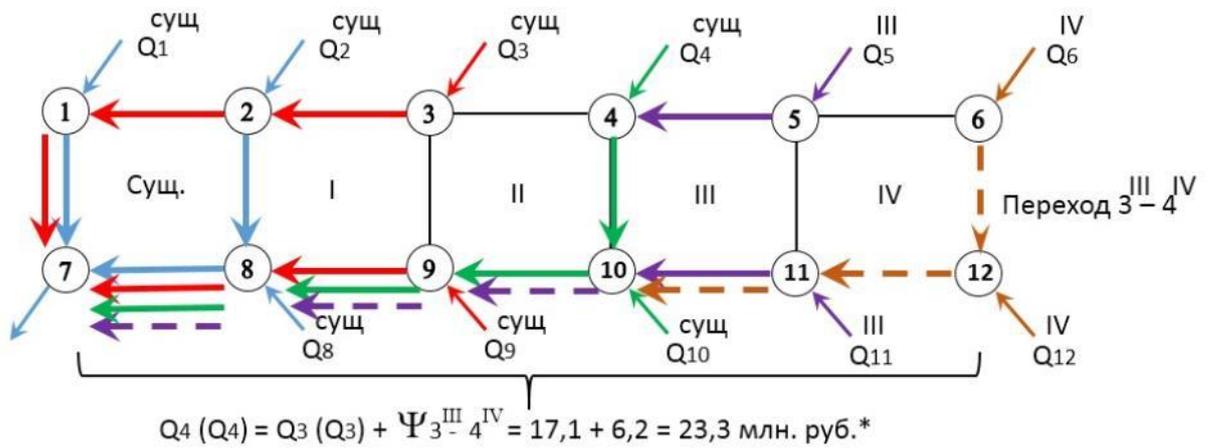


Рисунок 6.33- Оптимальное решение по строительству четвертой очереди на нагрузки четвертого этапов ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы, первой, второй и третьей очередей, рассчитанных на нагрузки первого, второго и третьего этапов ввода в строй абонентов

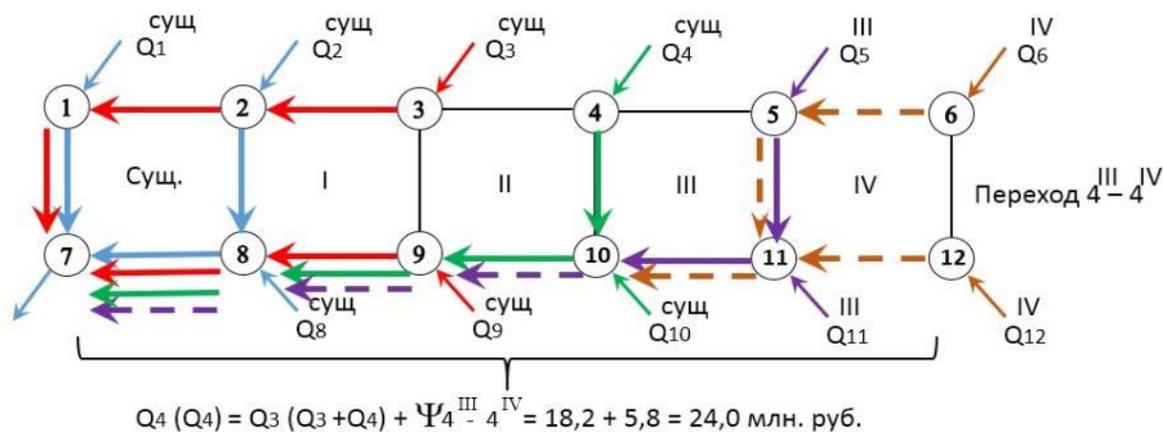


Рисунок 6.34 - Оптимальное решение по строительству четвертой очереди на нагрузки четвертого этапа ввода в строй новых абонентов с учетом реконструкции существующей системы, первой, второй и третьей очередей, рассчитанных на нагрузки первого и второго, третьего и четвертого этапов ввода в строй абонентов

В результате расчета получен оптимальный вариант развития системы водоотведения, который представлен на рисунке 6.34.

Проведенные многочисленны расчеты реальных и тестовых примеров показали, что в отсутствии ограничений на инвестиции оптимальным является вариант, рассчитанный на полное развитие (на суммарные нагрузки всего периода управления). При ограничениях на инвестиции требуется расчеты по изложенной выше методике.

В случае неопределенности значений объемов сточных вод, поступающих в систему водоотведения, строится матрица рисков [22,35,105] и выбирается предпочтительный вариант развития.

Методика реализована в программном комплексе TRACE-VK [17].

Выводы по главе 6

1. Разработаны подходы и методы агрегирования и декомпозиции при оптимизации систем водоотведения, имеющих многоуровневую структуру.
2. Предложен алгоритм формирования вариантов развития системы водоотведения и методика их оценки по критерию затрат жизненного цикла с учетом очередности реализации каждого из анализируемых вариантов.

ГЛАВА 7. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ НА РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ

7.1. Описание программного комплекса TRACE-VK

На основе изложенных подходов и методов расчета и оптимизации СВО разработаны алгоритмы и программы, которые вошли в ПК TRACE-VK. Комплекс включает:

Структура построения вычислительного комплекса TRACE-VK изложена в работе [181]. Последовательность этапов следующая.

1. Ввод исходных данных. Структуризация объектов СВО представлена на рисунке 7.1.

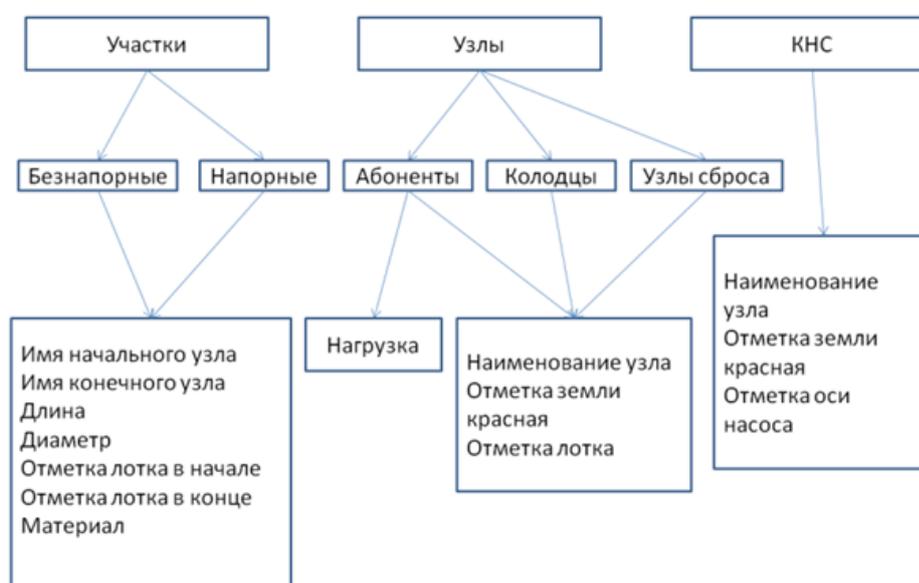


Рисунок 7.1 – Характеристика входной информации

2. Подготовка исходных данных:



Рисунок 7.2 – Перекодировка данных и формирование расчетной схемы

3. Анализ потокораспределения.

Выделяются фиктивные участки с отрицательными и положительными расходами. Для участков с положительными расходами сопоставляется их величина с расчетными значениями поступления сточных вод от абонентов. Если расход на фиктивной ветви будет больше расчетного расхода от абонентов, то фиктивная ветвь удаляется, а расход абонента становится сосредоточенным.

Организуется итеративный процесс, при котором осуществляется:

- анализ данных в структуре файлов результатов расчета по участкам сети и поиск фиктивного участка, направленного к колодцу;
- участок отмечается для дальнейшего удаления;
- удаляются отмеченные участки;
- выполняется анализ итогов расчета;
- цикл повторяется;
- читается файл результатов расчета.

При просмотре файла результатов расчета осуществляются следующие операции:

- если окажется, что фиктивный участок стал направленным к фиктивному узлу, констатируется излив сточной жидкости на поверхность земли;

- если окажется, что фиктивный участок остался направленным от фиктивного узла, а его расход оказался меньше расчетной величины, констатируется случай частичного поступления стоков от абонента в колодец, и частичного выхода его на поверхности земли;

Блок схема и алгоритм таких вычислений представлен на рисунке 7.3.

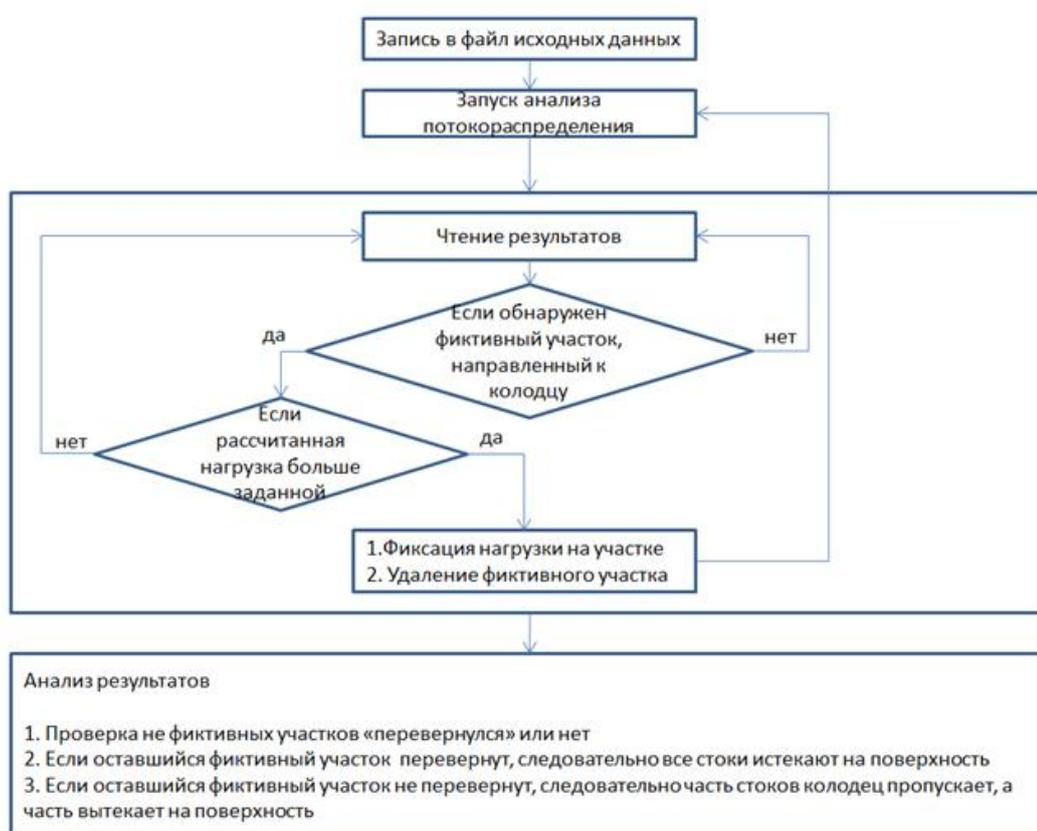


Рисунок 7.3 – Алгоритм расчета расходов сточных вод

4. Прямой ход вычислений.

Осуществляется в направлении от висячих вершин к корню дерева.

1. Формируется два массива: степеней вершин входа потока; степеней вершин выхода потоков.

2. Запускается цикл. Производится анализ: Если узел висячий, то обрабатывается инцидентная ему ветвь. Условием окончания цикла является отсутствие входящих ветвей в фиктивном узле.

В этом цикле:

- 1) определяется участок с насосной станцией и рассчитываются его параметры, согласно рисунку 7.4.

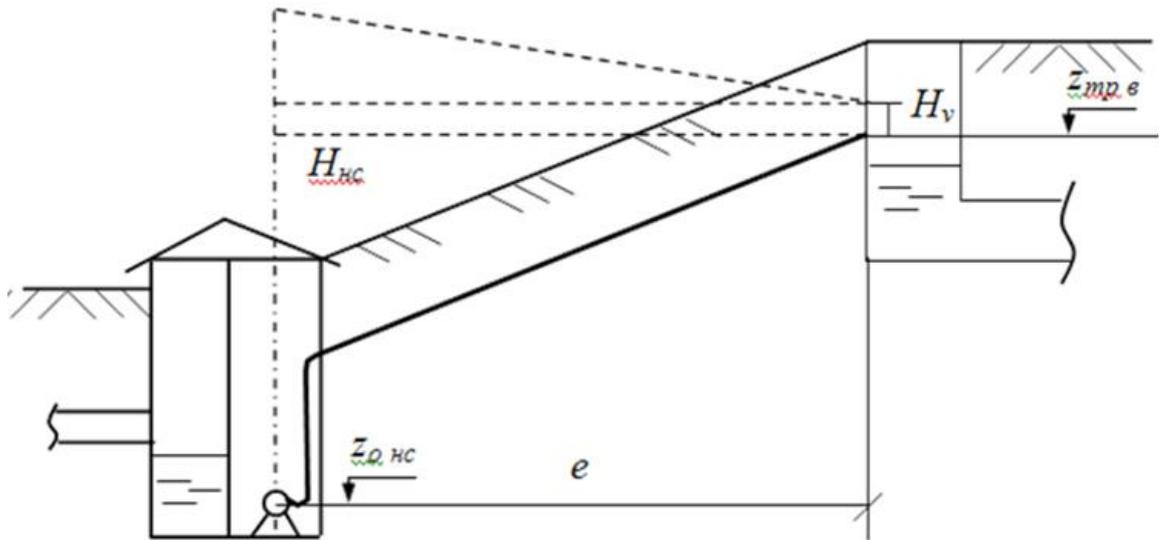


Рисунок 7.4 – Расчет параметров трубопровода и насосной станции

- 2) производится сопоставление расчетного расхода с расходом для полного сечения и констатируется работа его либо в самотечном или напорном режиме;
- 3) для участков с безнапорным режимом движения стоков, определяются значения глубин потока в начале и конце трубопровода;
- 4) для некоторых участков, имеющих перепады, рассчитываются кривые сопряжения:

При $i>0$,

$$\frac{i \cdot L}{D} = \frac{h_2}{D} - \frac{h_1}{D} - \frac{h_0}{6D} \cdot \ln \frac{1 + \frac{h_2}{h_0} + \left(\frac{h_2}{h_0}\right)^2}{1 + \frac{h_1}{h_0} + \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{h_1}{h_0}\right)^2}{\left(1 - \frac{h_2}{h_0}\right)^2} + \frac{h_0}{\sqrt{3}D} \left(\arctg \frac{2 \frac{h_2}{h_0} + 1}{\sqrt{3}} - \arctg \frac{2 \frac{h_1}{h_0} + 1}{\sqrt{3}} \right) + \frac{\left(\frac{h_{xp}}{D}\right)^4}{3 \left(\frac{h_0}{D}\right)^3} \cdot \ln \left| \frac{\left(\frac{h_2}{D}\right)^3}{\left(\frac{h_0}{D}\right)^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^3}{1 - \left(\frac{h_2}{h_0}\right)^3} \right|$$

При $i=0$,

$$2,3 \frac{Q^2 \cdot L}{K_n \cdot D} = \left(\frac{h_1}{D}\right)^4 - \left(\frac{h_2}{D}\right)^4 + 4 \left(\frac{h_{xp}}{D}\right)^4 \cdot \ln \frac{h_2}{h_1} \cdot \frac{h_2}{D};$$

При $i<0$,

$$\frac{|i| \cdot L}{D} = \frac{h_1}{D} - \frac{h_2}{D} + \frac{h_0}{6D} \cdot \ln \frac{\left(1 + \frac{h_2}{h_0}\right)^2}{\left(1 + \frac{h_1}{h_0}\right)^2} \cdot \frac{1 - \frac{h_1}{h_0} + \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^2}{1 - \frac{h_2}{h_0} + \left(\frac{h_2}{h_0}\right)^2} - \frac{h_0}{\sqrt{3}D} \left(\arctg \frac{2 \frac{h_2}{h_0} - 1}{\sqrt{3}} - \arctg \frac{2 \frac{h_1}{h_0} + 1}{\sqrt{3}} \right) + \frac{\left(\frac{h_{xp}}{D}\right)^4}{3 \left(\frac{h_0}{D}\right)^3} \cdot \ln \left| \frac{\left(\frac{h_2}{D}\right)^3}{\left(\frac{h_1}{D}\right)^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^3}{1 - \left(\frac{h_2}{h_0}\right)^3} \right|$$

Этапы вычисления кривых сопряжения представлены на рисунке 7.5.

Расчет напорного режима показан на рис 7.6.

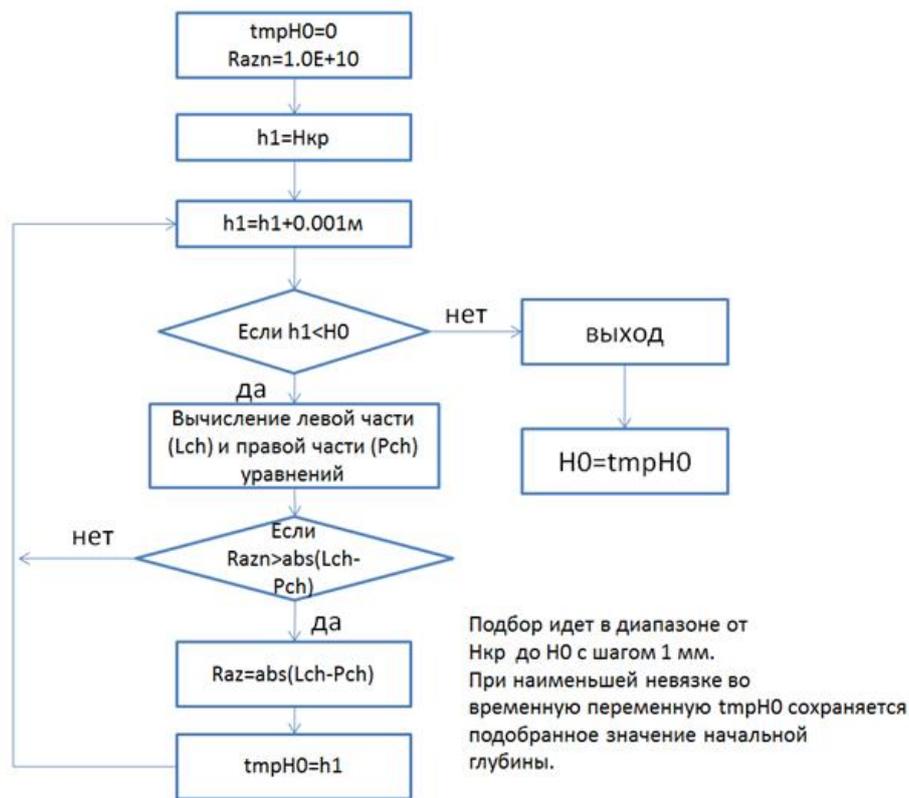


Рисунок 7.5 – Алгоритм вычисления кривых сопряжения

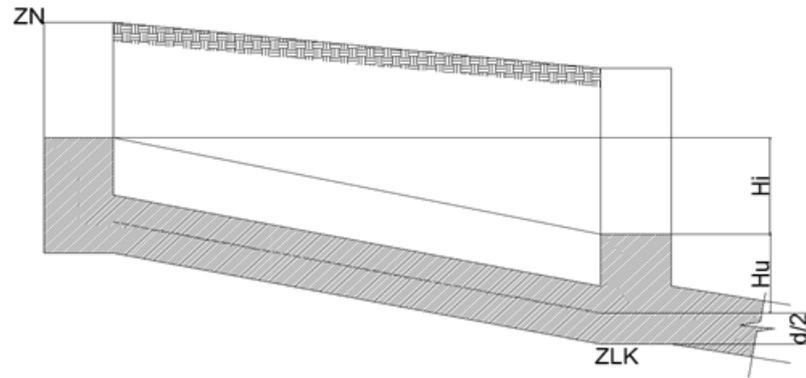


Рисунок 7.6 – иллюстрация к алгоритму расчета напорного режима

Расчет напорно-безнапорного режима представлен на рисунке 7.7

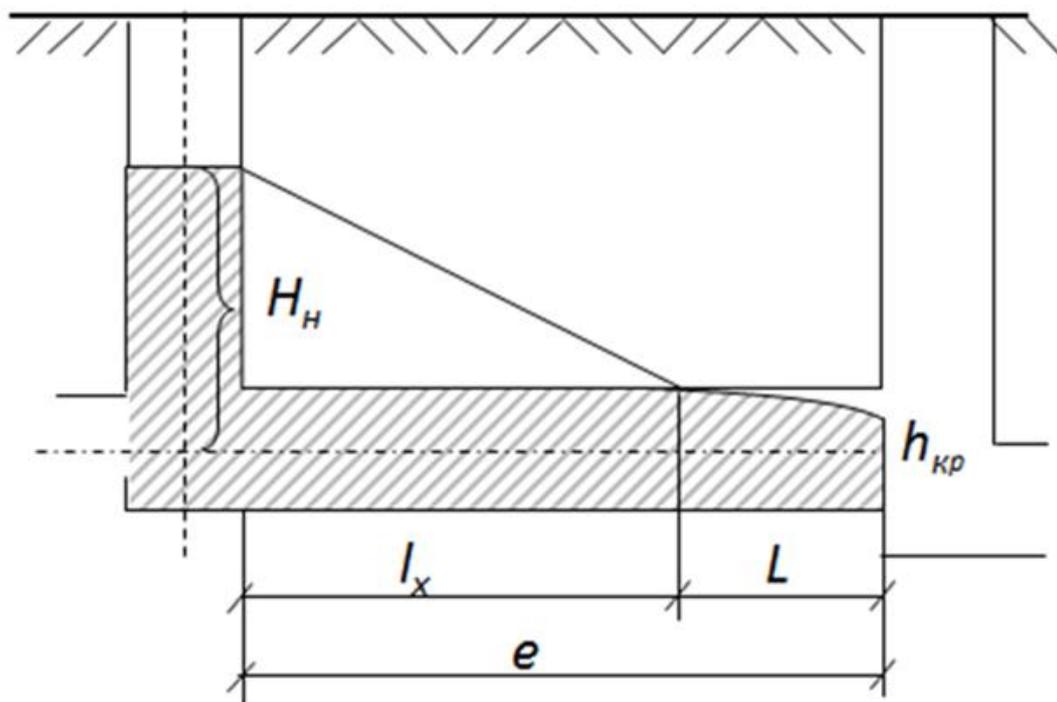


Рисунок 7.7 – К расчету напорного – безнапорного режим движения стоков

При наличии в конце участка перепада вычисления производятся согласно рисунку 7.9, а при его отсутствие - рисунок 7.8.

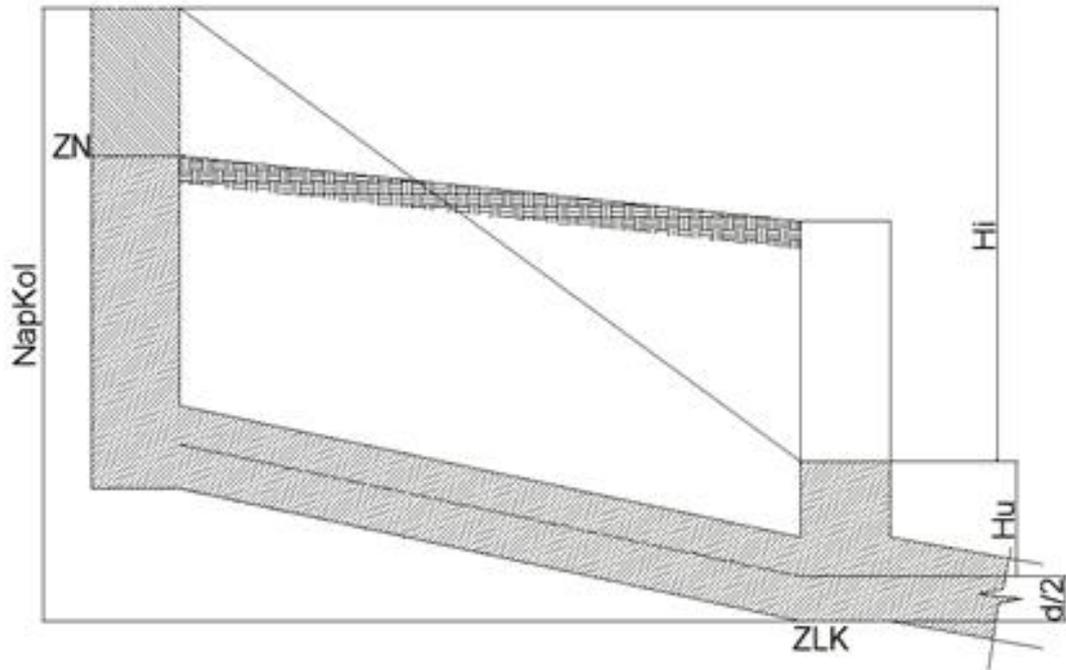


Рисунок 7.8 – Выход стока на поверхность земли

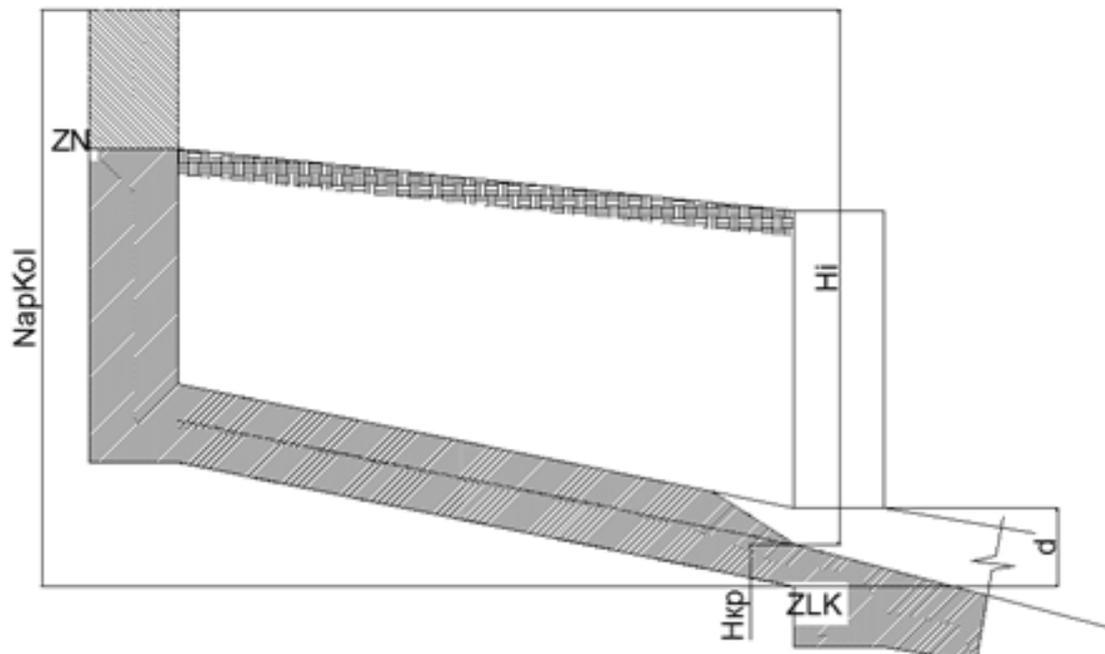


Рисунок 7.9 - Выход стока на поверхность земли

Организация прямого хода вычисления представлена на рисунок 7.10.

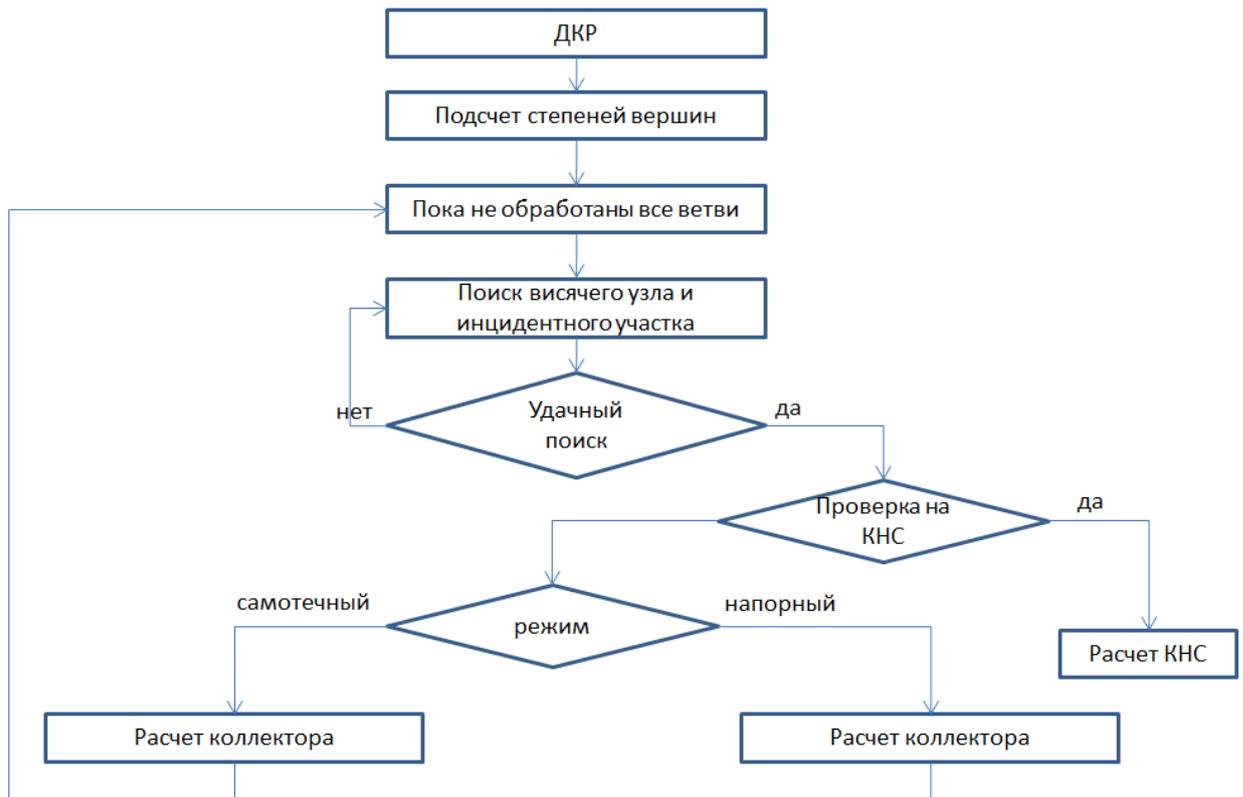


Рисунок 7.10 – Алгоритм реализации операций прямого хода

5. Организация обратного хода вычислений

При этом выполняются следующие операции:

- Если в конечном узле - колодце имеется напор, то производятся вычисления согласно рисунку 7.11.

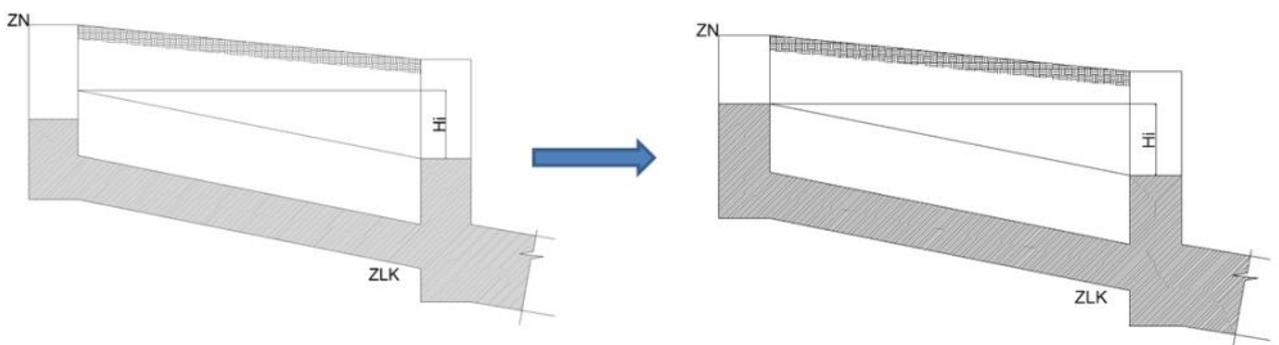


Рисунок 7.11 - Изменение напора в колодцах при работе обратного хода

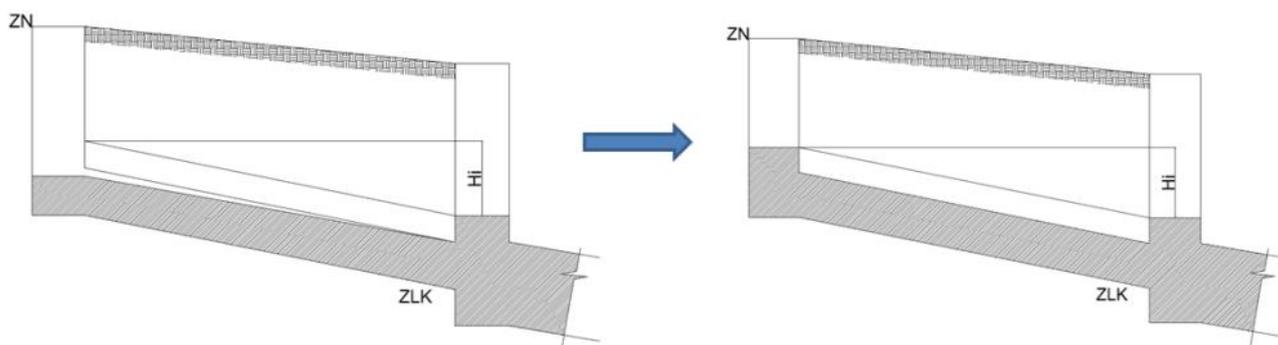


Рисунок 7.12 – Изменение напора в колодцах при работе обратного хода

- Результаты расчетов представляются в графической форме в виде различных световых полей по скоростному режиму, по наполнению и напорам в статическом, динамическом режимах работы системы водоотведения.

Следует отметить, что в параграфах 7.2, 7.3, и 7.4 приведены результаты расчетов по методикам и программам, разработанным автором, а так же его аспирантом Нгуен Туан Ань [115], который по результатам этих исследований в 2016 защитил кандидатскую диссертацию.

7.2. Г. Ангарск. Обоснование перспективной схемы водоотведения

Городские сети и насосные станции эксплуатирует муниципальное предприятие, а часть сетей и КОС и локальные очистные сооружения находятся в ведении АНХК (ангарская нефти-химическая компания). На сети имеются две головных насосных станций перекачки стоков на два КОС АНХК и имеются два шиберных устройства (см. рис. 7.3).

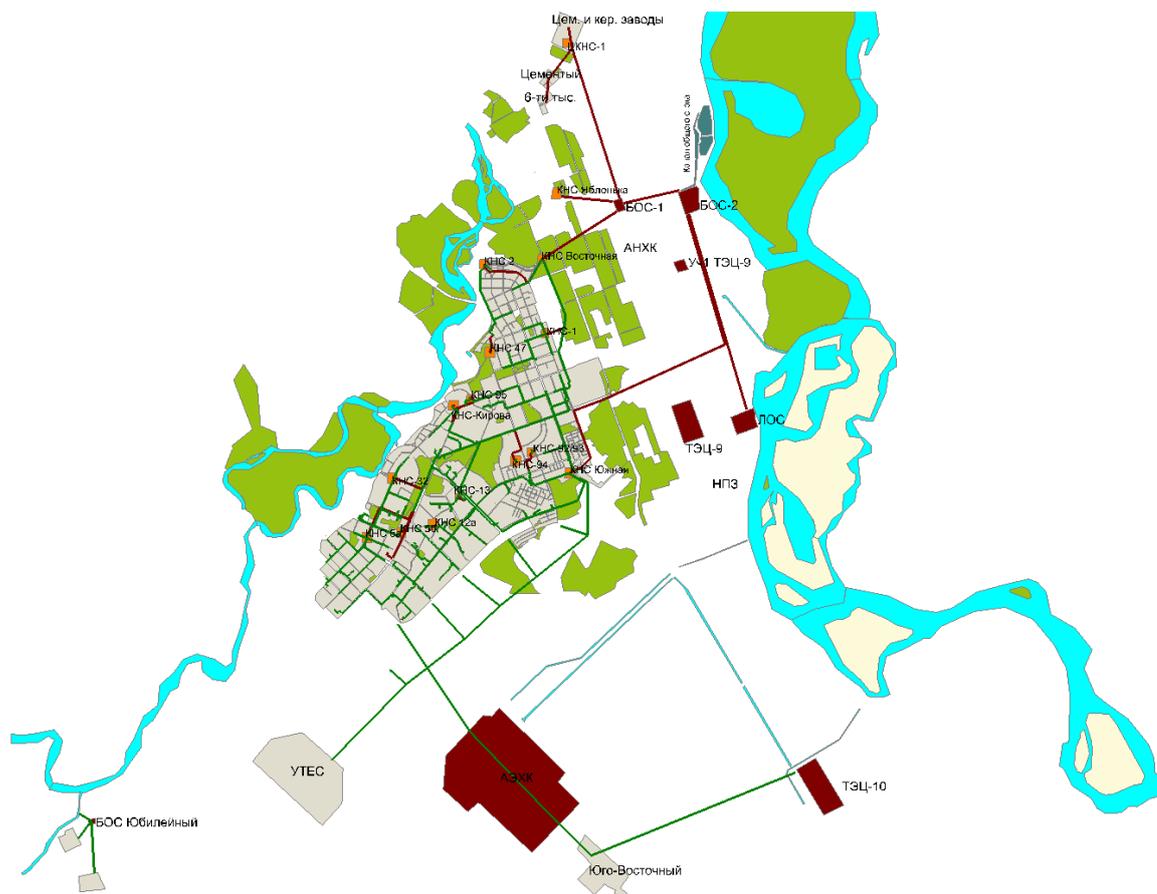


Рисунок 7.13 - Схема водоотведения г. Ангарск.

В случае каких-либо отключений с помощью шибберных устройств можно стоки переправлять в другие коллектора, тем самым можно предотвращать попадания сточных вод на поверхность земли.

Для оценки работоспособности системы были проведены многочисленные поверочные расчеты, выполнены замеры глубины сточной воды в отдельных коллекторах, получена адекватная картина по распределению потоков и она графически представлена на рисунке 7.14.



Рисунок 7.14 - Карта распределения потоков и заполненности коллекторов
сточными водами

Расчеты показали большинство коллекторов заполнены не более 50%.
Реконструкция сетей не требуется.

Схема новых районов показана на рисунке 7.15.

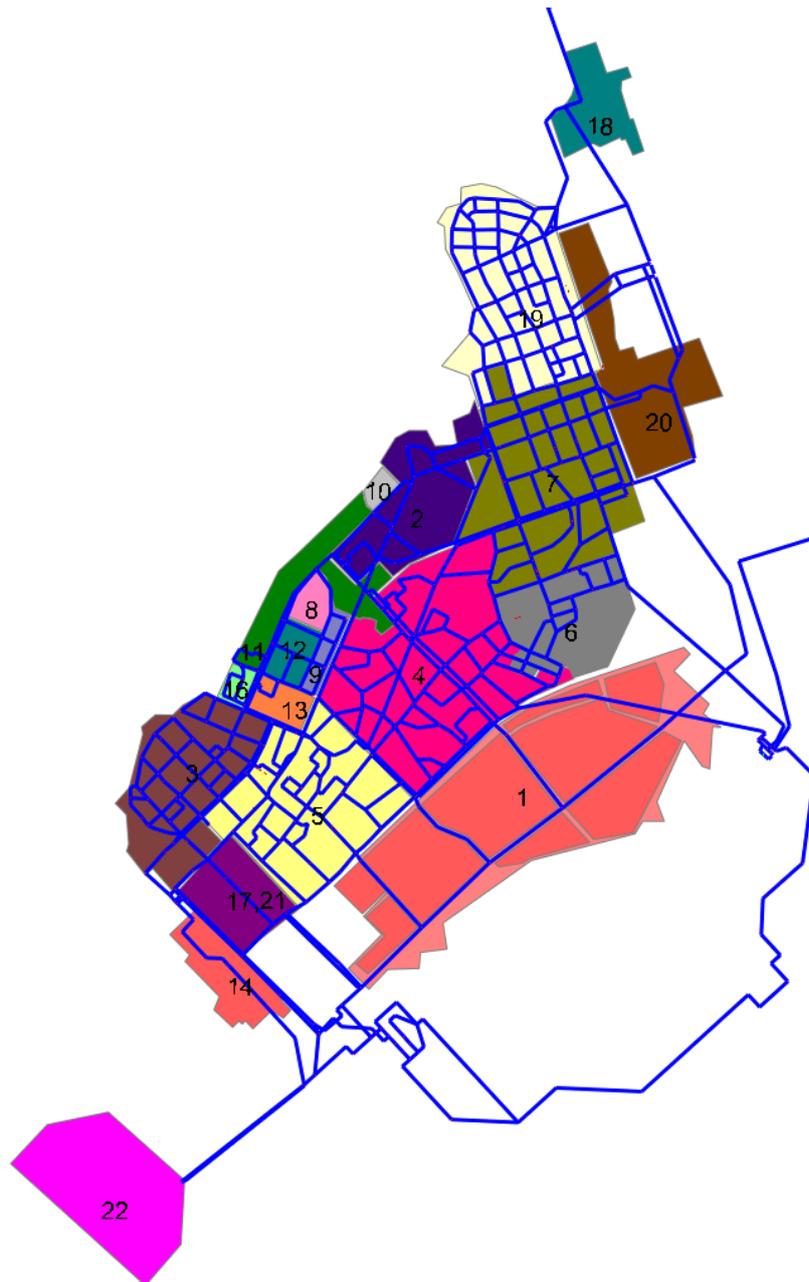


Рисунок 7.15 – Развитие жилищного строительства, цветом указаны новые районы

Проведенные расчеты показали (см. рис. 7.16), что существующие коллектора перешли в напорный режим.



Рисунок 7.16 - Карта распределения потоков и наполненности коллекторов с учетом перспективных нагрузок

На рисунке 7.17 показаны участки, работающие в напорном режиме, Они требуют перекладки (см. табл. 7.1).

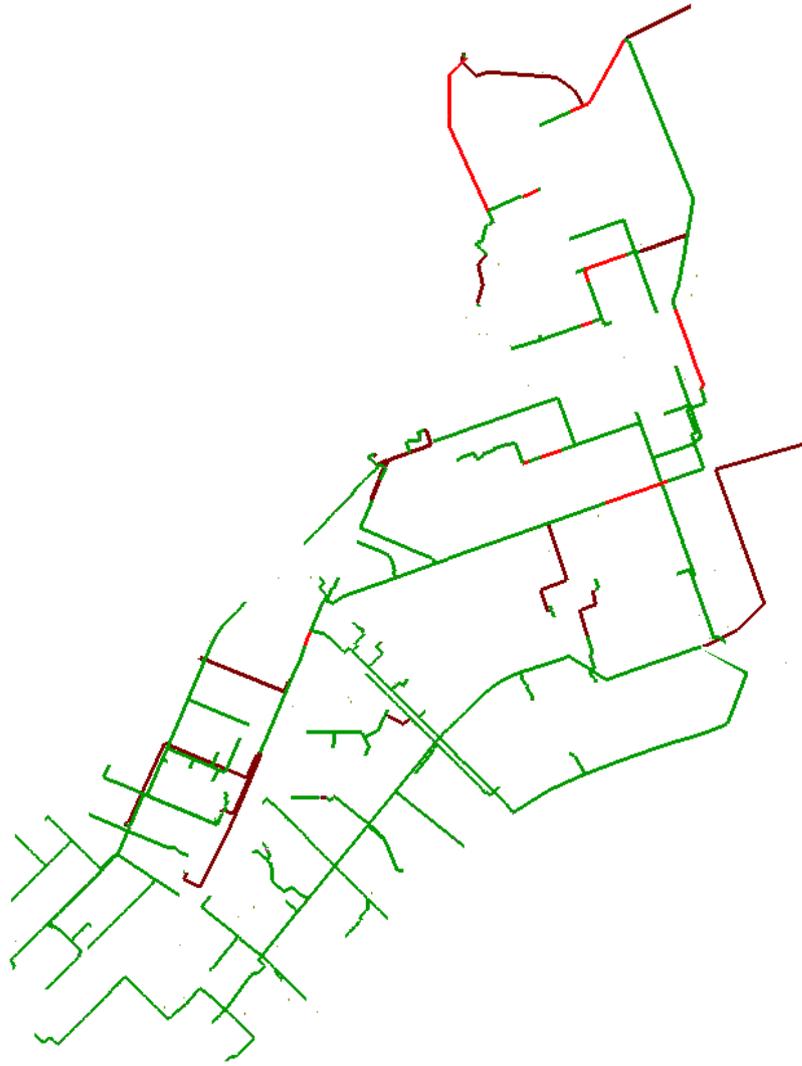


Рисунок 7.17 – Красным цветом обозначены переполненные участки сети

Таблица 7.1 – Расчеты затрат на перекладку трубопроводов

№ п/п	Ду, существующие участки, мм	Длина, м	Ду, новые участки, мм	Итого, тыс. руб. (в ценах 2014 года)	№ п/п	Ду, существующие участки, мм	Длина, м	Ду, новые участки, мм	Итого, тыс. руб. (в ценах 2014 года)
1	350	20,12	600	181,35	50	250	26	500	191,94
2	350	30,46	600	274,52	51	300	49,66	500	366,59
3	350	99,81	600	899,44	52	300	50,57	500	373,3
4	350	48,75	600	439,35	53	300	43,46	500	320,85
5	350	49,66	600	447,5	54	350	24,04	600	216,65
6	350	31	600	279,36	55	350	30,61	600	275,84
7	350	44	600	396,51	56	350	41,94	600	377,96
8	350	45	600	405,52	57	350	45,98	600	414,34
9	350	45	600	405,52	58	350	46,82	600	421,91
10	350	11,94	600	107,6	59	350	49,65	600	447,41
11	350	40	600	360,46	60	350	23,41	600	210,95
12	350	46	600	414,53	61	350	22,47	600	202,51
13	350	45	600	405,52	62	350	41,11	600	370,46
14	350	45	600	405,52	63	350	37	600	333,43
15	350	32	600	288,37	64	350	29,73	600	267,93
16	350	30	600	270,35	65	350	24,35	600	219,44
17	350	31,14	600	280,66	66	350	33,84	600	304,93
18	350	50,93	600	458,97	67	350	49,98	600	450,4
19	350	26,17	600	235,85	68	350	33,24	600	299,56
20	300	42,54	500	314,07	69	350	23,09	600	208,05
21	300	55,04	500	406,29	70	350	19,92	600	179,55
22	300	41,63	500	307,32	71	350	31,38	600	282,82
23	300	55,04	500	406,29	72	350	19,72	600	177,73
24	300	39,4	500	290,83	73	350	29,53	600	266,11
25	350	50,92	600	458,88	74	350	50,61	600	456,04
26	350	18,97	600	170,98	75	350	50,12	600	451,66
27	350	44,6	600	401,9	76	350	33,12	600	298,47
28	350	45,54	600	410,4	77	350	55,07	600	496,29
29	300	26,57	500	196,15	78	350	49,24	600	443,77
30	300	30,68	500	226,46	79	350	50,12	600	451,66
31	1000	24,35	1400	516,02	80	350	49,24	600	443,77
32	1000	47,76	1400	1 012,05	81	350	50,12	600	451,66
33	300	34,44	500	254,23	82	350	39,82	600	358,88
34	200	92,2	400	462,16	83	350	49,65	600	447,41
35	350	7,62	600	68,63	84	1000	65,92	1300	1 291,38
36	350	37,64	600	339,22	85	150	21,02	300	89,36
37	1000	50,92	1400	1 079,05	86	1100	26,93	1600	656,82
38	1000	7,28	1400	154,27	87	1100	53,49	1600	1 304,77
39	1000	41,44	1400	878,06	88	1100	73,74	1600	1 798,69
40	1000	100,9	1400	2 138,13	89	1100	47,54	1600	1 159,66
41	1000	28,46	1400	603,09	90	1100	44,6	1600	1 087,91
42	1000	48,7	1400	1 032,04	91	1100	46,49	1600	1 133,97
43	1000	52,2	1400	1 106,17	92	1100	79,06	1600	1 928,48
44	1000	49,04	1400	1 039,19	93	1100	14,87	1600	362,64
45	1000	48,7	1400	1 032,04	94	1100	36,77	1600	896,94
46	150	14,32	300	60,85	95	1100	68,95	1600	1 681,92
47	150	27,31	300	116,09	96	1100	124,6	1600	3 040,70
48	150	53,23	300	226,23	97	1100	28,79	1600	702,35
49	150	13	300	55,25	98	1000	58,19	1300	1 139,86
Итого, тыс. руб.									54 761,64

. Оптимальный вариант реконструкции представлен на рисунке 7.18 и в таблице 7.2, где кружками обозначены участки с параллельной прокладкой.

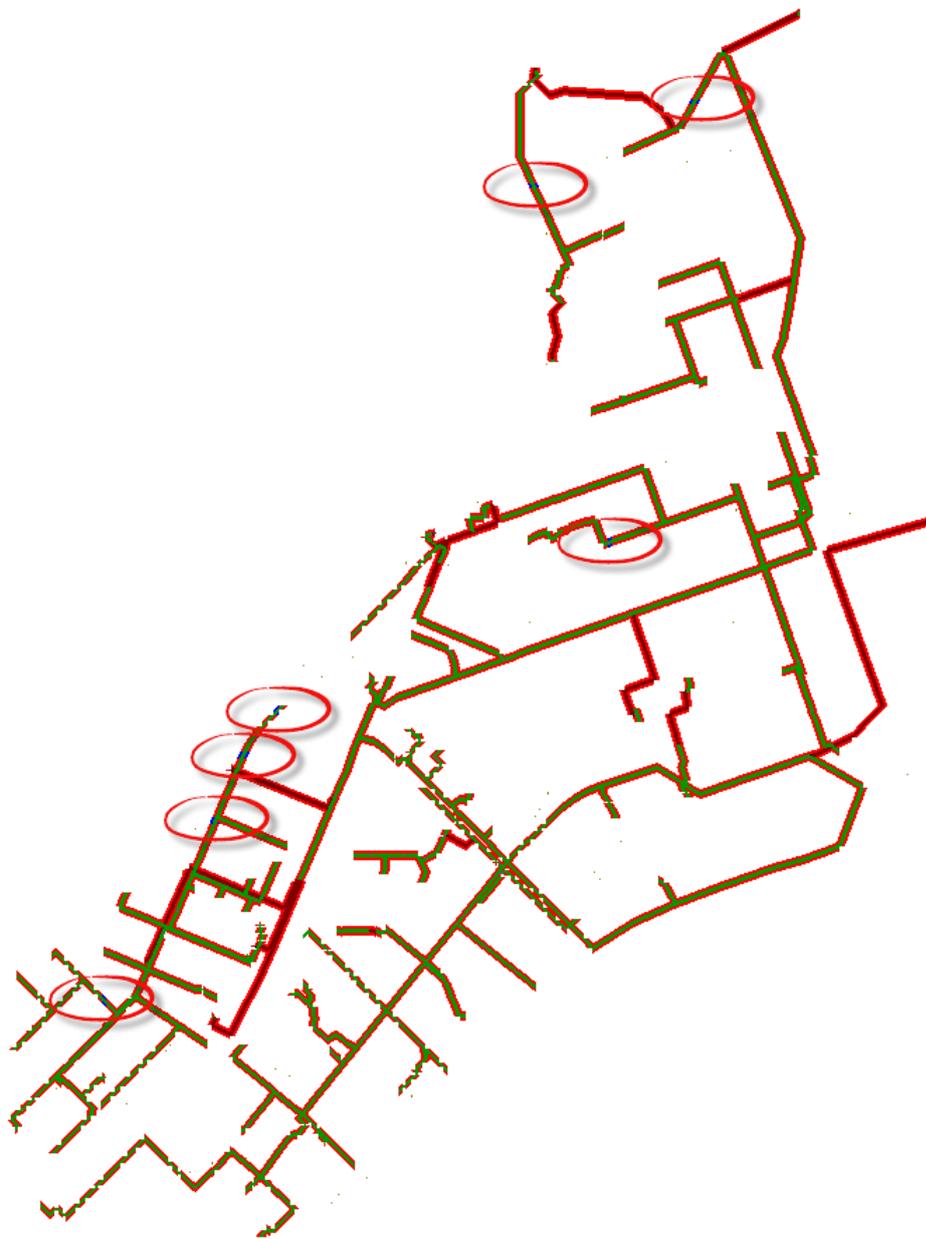


Рисунок 7.18 – Оптимальный вариант с перекладкой трубопроводов

Таблица 7.2. Стоимость перекладки

№ п/п	Диаметр, мм	Итого, тыс. руб. (в ценах 2014 года)
1	160	89,676
2	200	202,722
3	250	249,759
4	200	138,207
5	225	182,468
6	180	115,635
7	180	153,861
Итого		1132,32

Экономия составляет 53 628.7 тыс. руб.

Оптимальная трасса канализационного коллектора от новых микрорайонов показана красным цветом на рисунке 7.19., ее стоимостные показатели представлены в табл. 7.3.

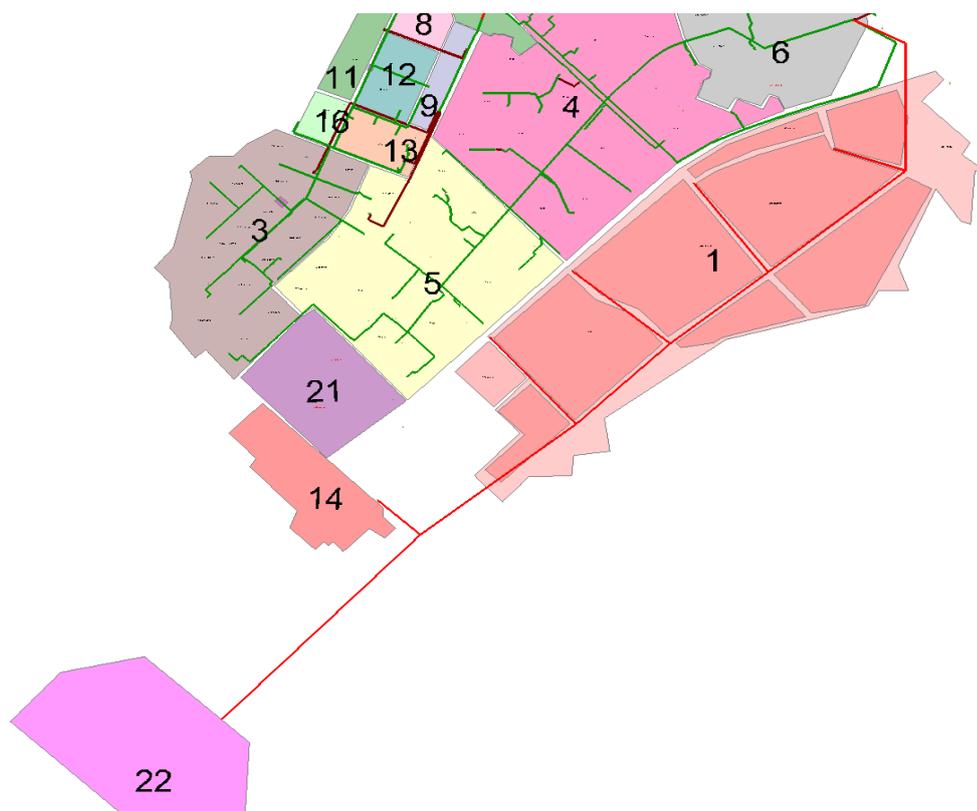


Рисунок 7.19 – оптимальная трасса канализационного коллектора от новых микрорайонов 1, 14, 22

Таблица 7.3 - Расчеты затрат по проектному варианту трассировки

№ п/п	Длина, м	Диаметр, мм	Описание	Итого, тыс. руб. (в ценах 2014 года)
1	2266,43	280	К СНТ «Утес»	3012,232
2	1576,69	315	За ул. Декабристов	1727,249
3	1030,70	400	За ул. Декабристов	5977,857
4	1001,70	450	За ул. Декабристов	5545,564
5	1412,00	500	За ул. Декабристов	7090,588
6	1121,01	560	За ул. Декабристов	10565,717
7	462,89	560	За ул. Декабристов	11117,415
8	984,82	225	За ул. Декабристов	976,266
9	1006,57	200	За ул. Декабристов	853,279
10	1026,64	180	За ул. Декабристов	725,859
11	607,16	180	----	425,983
Сумма				48 000.0

На рис. 7.20 зеленым цветом показан оптимальный вариант, его параметры представлены в таблице 7.4.

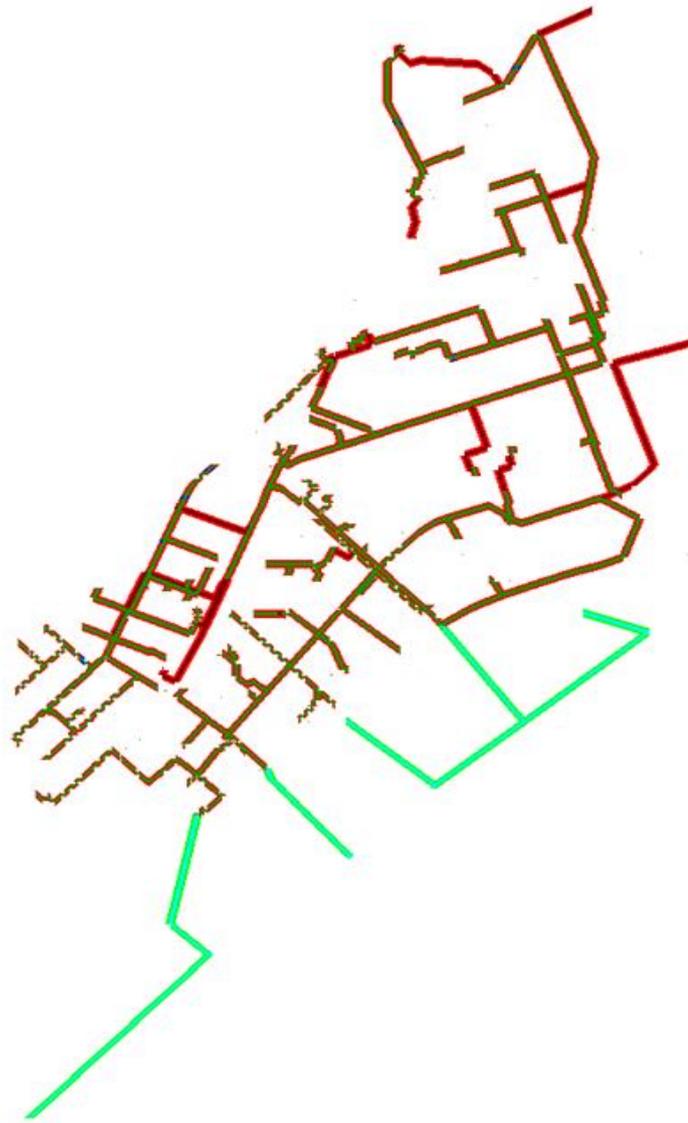


Рисунок 7.20 - Оптимальный вариант перспективной схемы водоотведения г.
Ангарск

Таблица 7.4 - Расчеты затрат по оптимальному варианту

№ п/п	Диаметр, мм	Итого, тыс. руб. (в ценах 2014 года)
1	450	2989,692
2	250	612,118
3	400	6011,171
4	280	3012,232
5	280	1066,129
6	280	1532,897
7	280	2412,810
8	400	4131,941
9	200	867,783
10	180	596,031
11	180	451,460
12	160	76,593
13	200	173,084
14	250	213,522
15	200	118,259
16	225	157,377
17	180	100,035
18	180	131,405
Итого		24 654,54

Сравнительные результаты расчетов показали высокую экономическую эффективность получаемых решений с помощью разработанного ПВК по сравнению с традиционным подходом проектирования. Экономия составила 56 932 тыс. руб.

7.3. Г. Байкальск. Оптимизация схемы водоотведения

Схема СВО г. Байкальска представлена на рисунке 7.21.

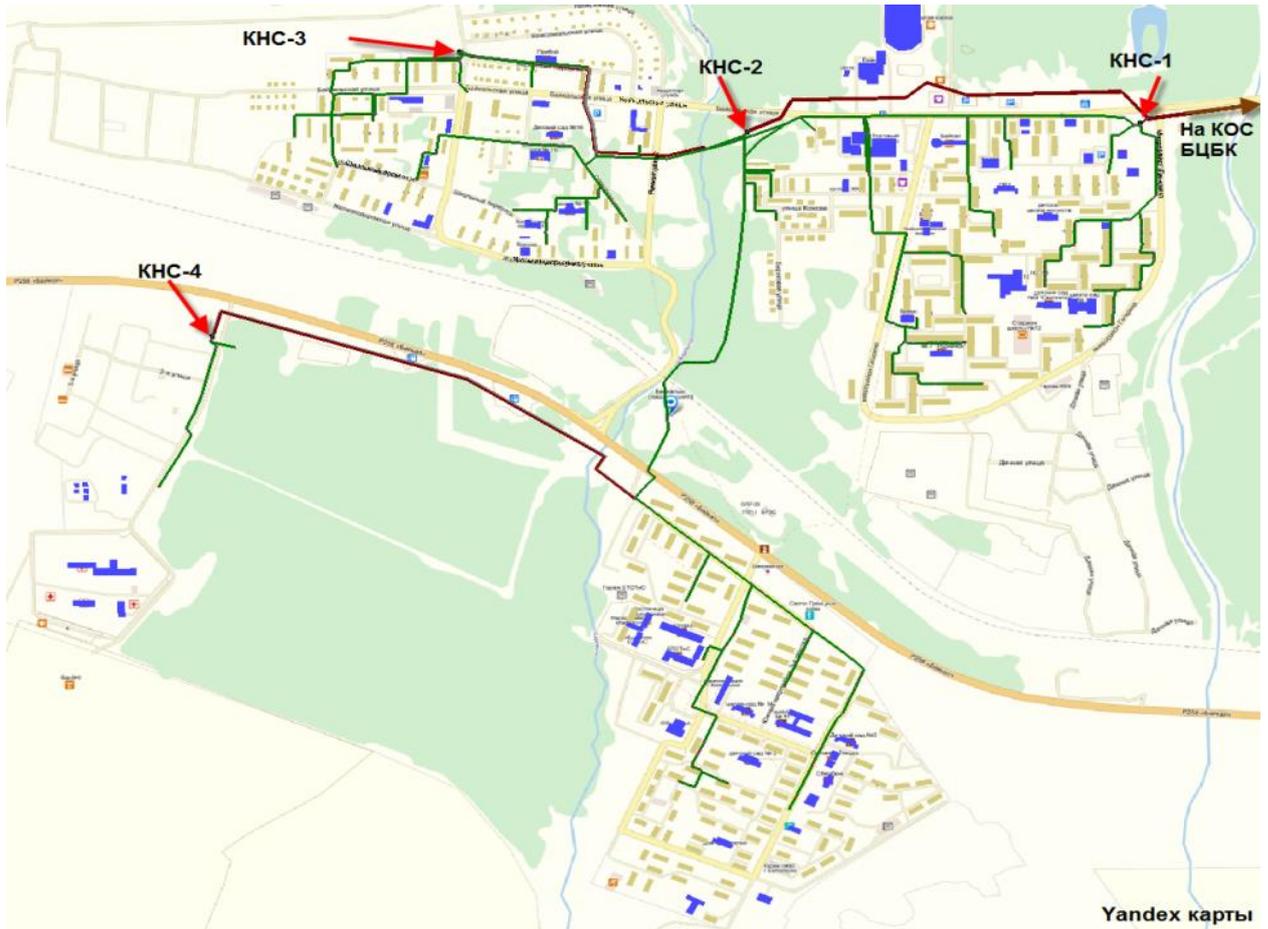


Рисунок 7.21 - Схема СВО г. Байкальска, где зелёный цвет – самотечные, коричневый –напорные трубопроводы

. От города Байкальска сточные воды подаются на КОС четырьмя насосными станциями (см. рисунок 7.21).

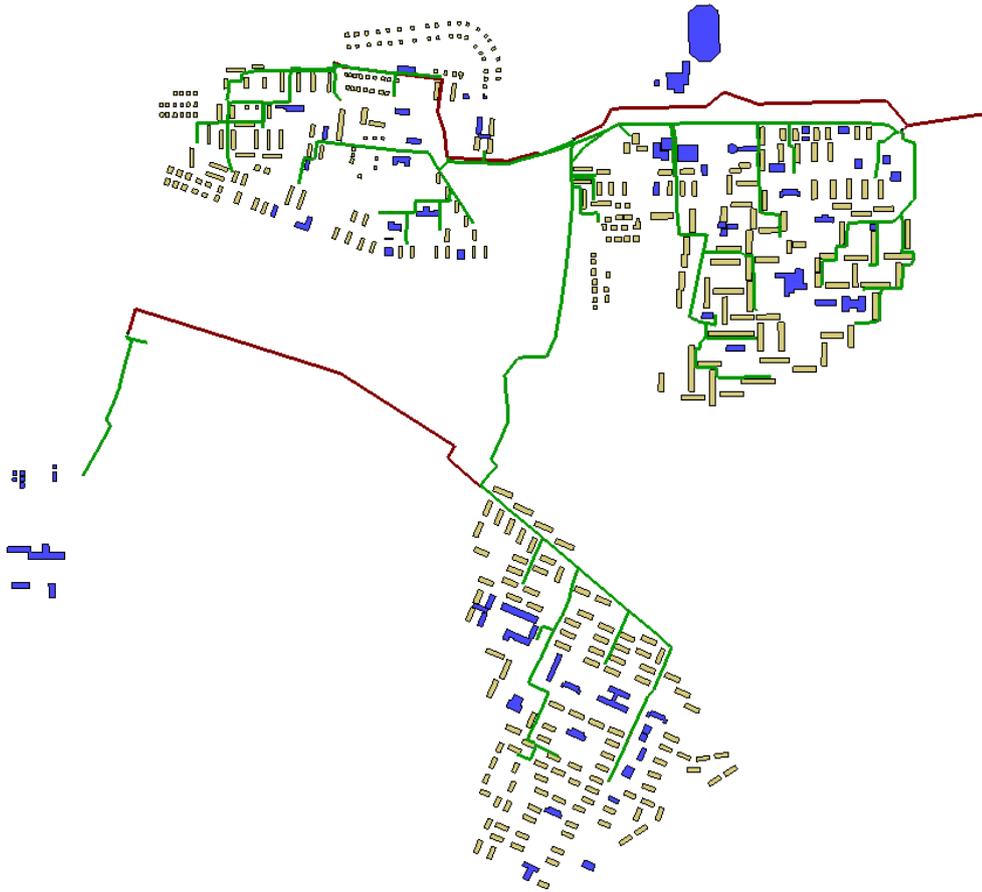


Рисунок 7.22 – Математическая модель СВО г. Байкальска

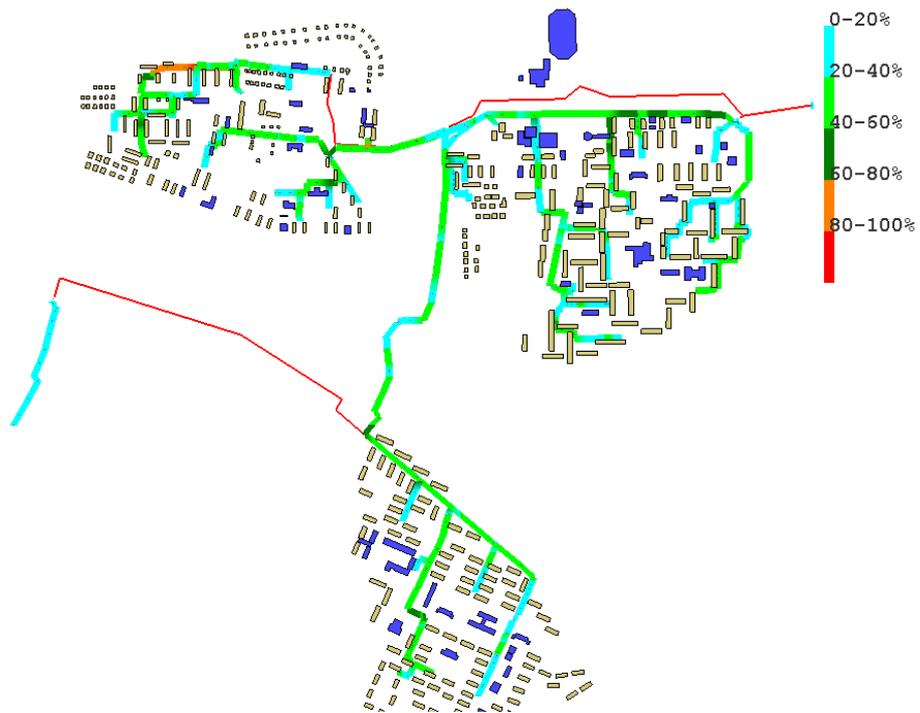


Рисунок 7.23 – Распределение потоков при максимальном водопотреблении

Распределение потоков и наполнение трубопроводов с учетом перспективной нагрузки представлены на рис. 7.24 и рис. 7.25.

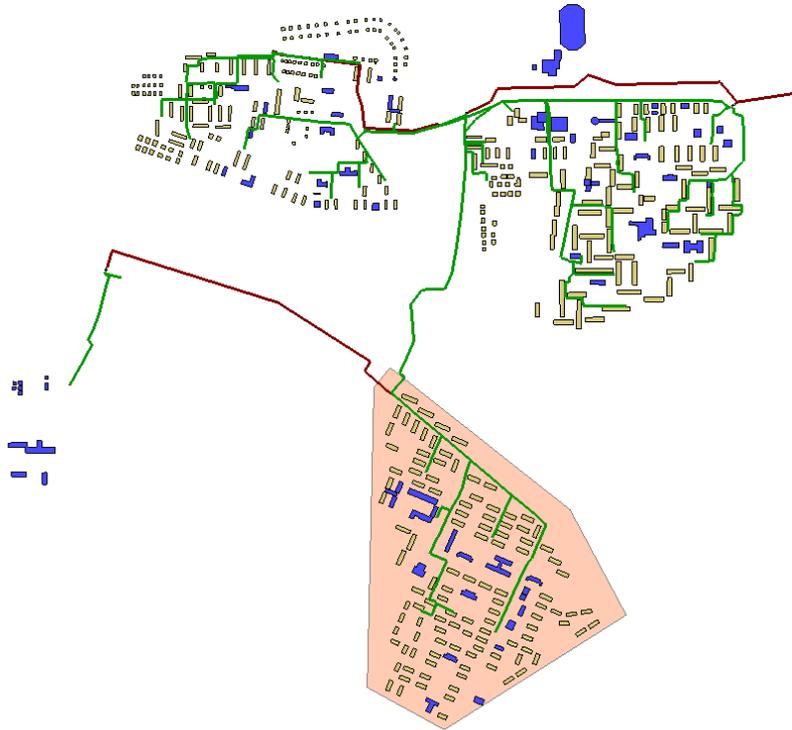


Рисунок 7.24 – Развитие системы водоотведения за счет новой застройки

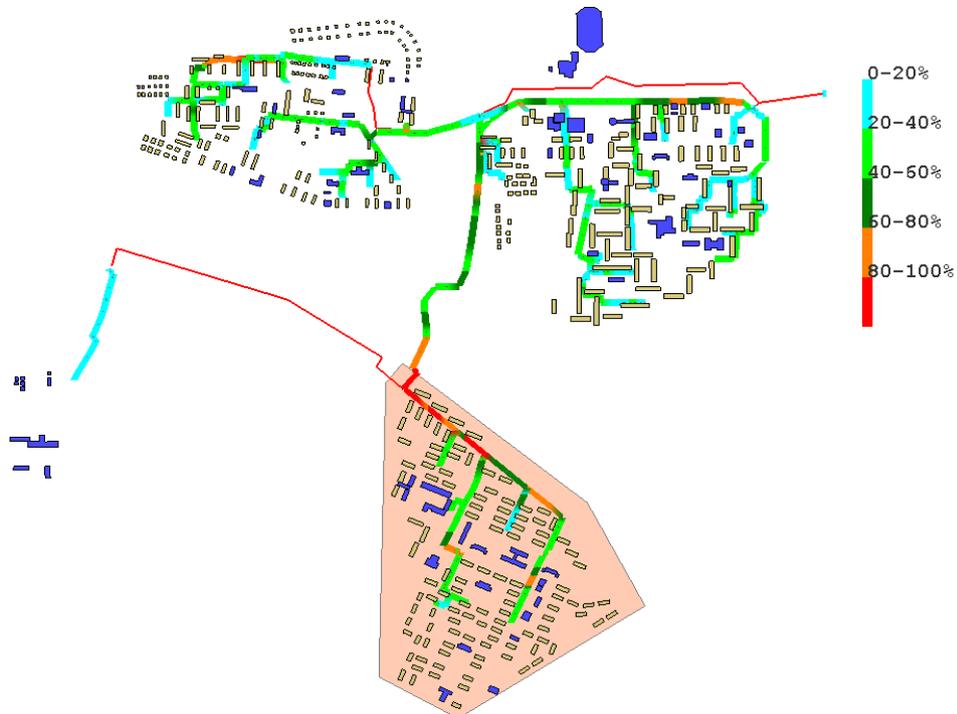


Рисунок 7.25 – Работа коллекторов в напорном режиме, красным цветом

Затраты на реконструкцию составляют 95 млн. руб.

На рисунке 7.26 представлен результат оптимизации в выбран новый самотечный коллектор.

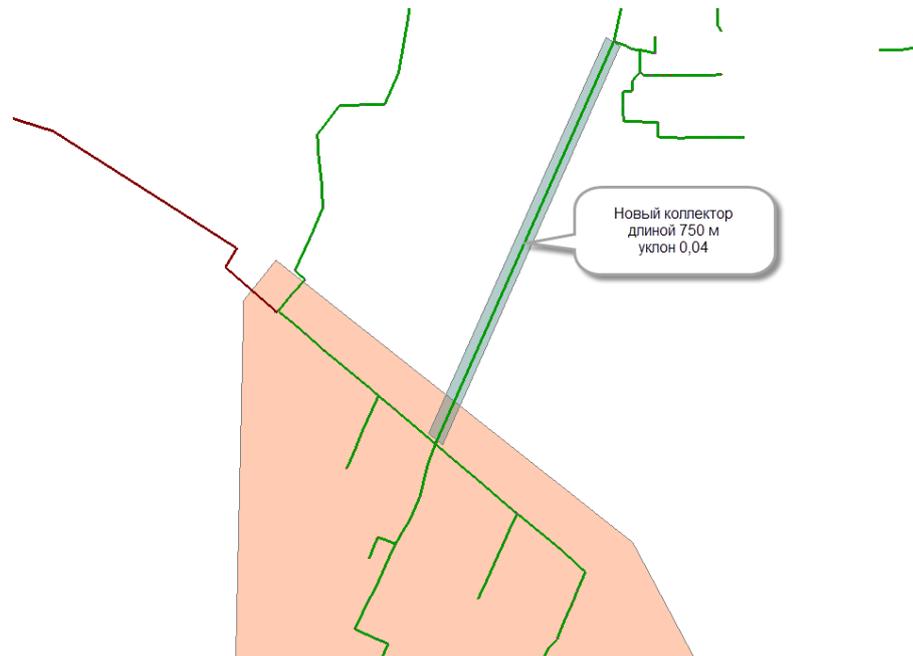


Рисунок 7.26 – Результаты оптимизации

Таким образом получен вариант, который на 48 % меньше по затратам варианта, полученного существующими методами проектирования.

7.4. Г. Шелехов. Оптимизация схемы водоотведения

Существующая схема водоотведения показана на рисунке 7.27, где красным цветом обозначены напорные трубопроводы, зеленым безнапорные коллектора.



Рисунок 7.27 – Существующая система водоотведения г. Шелехов
Перспектива развитие города представлена на рисунке 7.28.



Рисунок 7.28 – Перспективная застройка города

Карта наполнений представлена на рисунке 7.29.

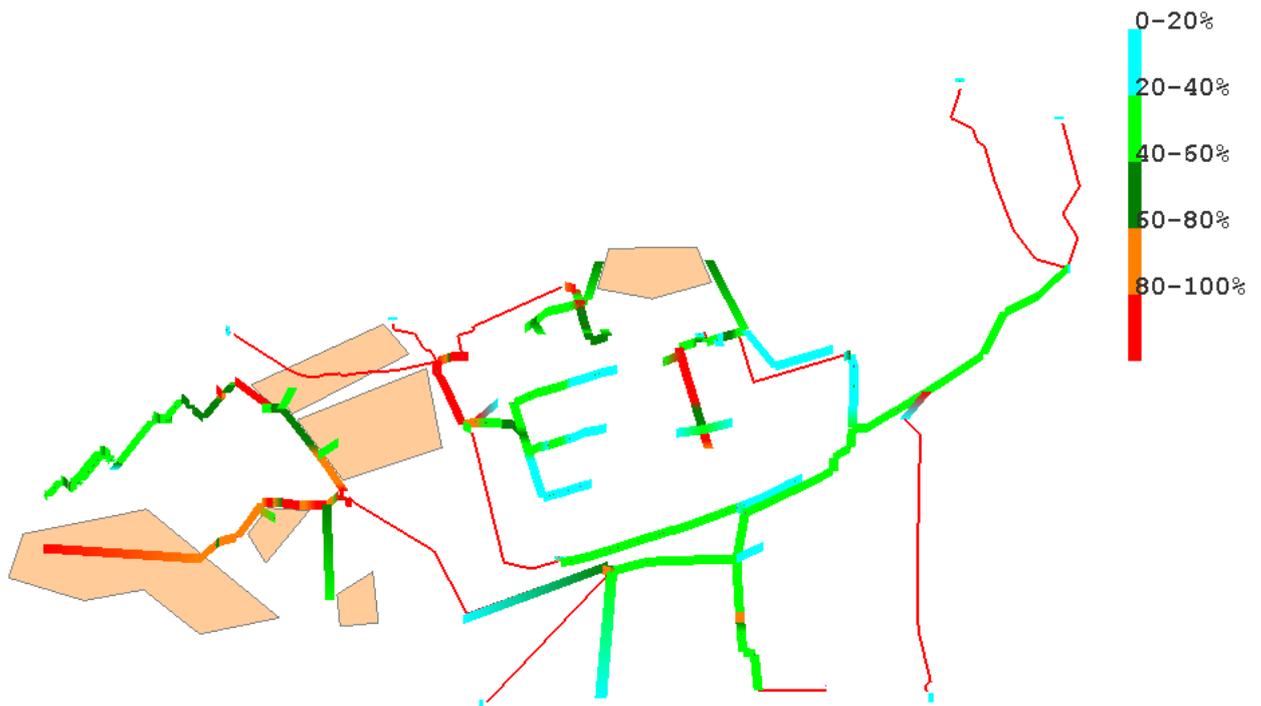


Рисунок 7.29 - Карта наполнений коллекторов водоотведения г. Шелехов (красные тонкие линии - напорные коллектора, толстые красные линии – перегруженные коллектора)

Стоимость реконструкции этих коллекторов составила 54 000.0 тыс. руб. Окончательный вариант представлен на рис. 7.30.

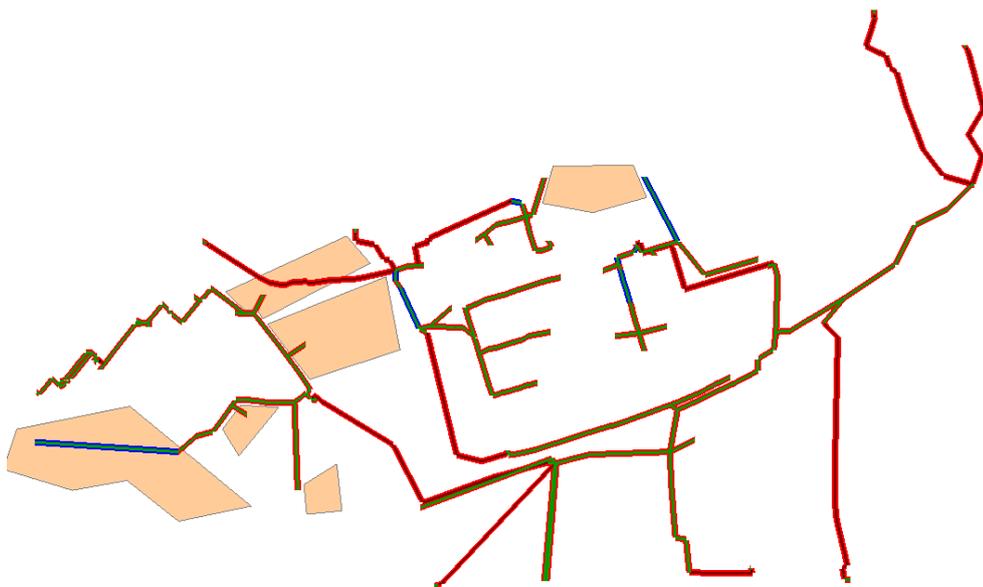


Рисунок 7.30 – Оптимальная схема развития системы водоотведения, новые трубопроводы обозначены красным цветом

Капиталовложения в этот вариант составляют **12 147,8 тыс. руб.**, что почти на 50% меньше перекладки на новые коллектора.

Выводы по главе 7

Предлагаемая в работе методика оптимизации развивающихся систем водоотведения позволяет не только оперативно проанализировать множество различных вариантов устройства систем водоотведения но и сэкономить инвестиции почти 50% по сравнению с традиционными подходами решения этих задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа технического состояния современных систем водоотведения (СВО) обоснована необходимость разработки новых теоретических и методических основ управления реконструкцией и развитием СВО. Доказана целесообразность оценки технико-экономической эффективности различных систем водоотведения с позиции их общих принципов математического моделирования и решения задач реконструкции и развития.

2. Впервые в задачах моделирования развития и реконструкции систем водоотведения для обоснования вариантов развития, анализа и оптимизации использована теория принятия решений и модели нечетких множеств и учтён фактор неопределенности информации о прогнозных величинах удельного водопотребления.

3. На основе принципов индикативного и адаптивного управления разработана новая методология моделирования развития и реконструкции систем водоотведения в условиях проектного финансирования и вариативности перспективного отведения сточных вод.

4. Теоретически обоснованы подходы и методы моделирования и анализа режимов работы систем водоотведения, позволяющие производить оценку технической реализуемости принимаемых решений развития систем водоотведения.

5. Предложена уточнённая методика расчета ливневой канализации, включающая моделирование аварийных режимов её работы, а также рекомендации для коррекции диаметров и уклонов участков сети, работающих полным сечением.

6. На основе гидравлических и экономических зависимостей получены функции затрат жизненного цикла и дисконтированных приведенных затрат от объемов транспортируемых по участкам сети сточных вод. Обоснована технико-экономическая эффективность применения древовидных структур при разработке новых систем водоотведения населенных пунктов. Показано, что при реконструкции существующих самотечных систем водоотведения создание кольцевых структур является экономически обоснованным решением.

7. Предложена новая методика расчёта потокораспределения в канализационных сетях и метод оптимизации проектных решений. При оптимизации новых и реконструируемых систем водоотведения населенных мест и городов Прибайкальской территории показана эффективность предлагаемой методики и программ, которые позволяют получать решения на 20-25% менее затратные, чем полученные традиционными методами проектирования.

8. Доказана необходимость учета критериев надежности и сейсмического районирования при обосновании структуры и параметров СВО. На основе оценки технико-экономических и гидравлических параметров трубопроводов разработаны методика и метод оптимизации и повышения надежности СВО. Варианты схем и параметров систем водоотведения, полученные по предлагаемой методике, уменьшают вероятность попадания аварийных стоков на поверхность земли на 25%-30% по сравнению с вариантами без учета факторов надежности.

9. Для обоснования первой очереди строительства и при детальном проектировании СВО с применением метода динамического программирования предложена методика комплексной оптимизации диаметров и уклонов трубопроводов, напоров насосных станций, а также размеров перепадов и быстротоков.

10. Для оптимизации систем водоотведения, состоящих из нескольких уровней сбора и транспортировки сточных вод, разработана методика агрегирования избыточных схем и ступенчатой оптимизации СВО разветвленной и многоконтурной структур.

11. Получены математические зависимости для определения изменения капиталовложений и эксплуатационных издержек от гидравлических параметров канализационной сети, а также объемов аварийных стоков, выходящих на поверхность земли, от величин расходов сточных вод и уклонов трубопроводов и коллекторов самотечной канализации.

12. Предлагаемые методики и их программные реализации вошли в состав ПК TRACE-VK в виде отдельных вычислительных модулей. Программный комплекс TRACE-VK включен в систему диспетчерского управления Водоканала города Иркутска и на его основе разработаны схемы развития систем

водоснабжения и водоотведения городов Иркутской области. Годовой экономический эффект от применения разработанных методик и программ по исследуемым городам составил 256,81 млн. руб. в ценах 2019 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов, Н.Н. Водоснабжение / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1974. – 480 с.
2. Абрамов, Н.Н. Надежность систем водоснабжения / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1979.
3. Абрамов, Н.Н. О проблемах надежности систем водоснабжения / Н.Н. Абрамов – Тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева. – М.: Издательство МИСИ, 1973. – 138 с.
4. Абрамов, Н.Н. Расчет водопроводных сетей / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1976. – 304 с.
5. Абрамов, Н.Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1972. – 287 с.
6. Абрамович, И.А. К вопросу об инфильтрации притоков в коллекторы городской канализации / И.А. Абрамович, Е.М. Глух // Водоснабжение и канализация населенных мест: Сб. науч. трудов. – М.: ЦНИИЭП инженерного оборудования, 1981. – С.22-29.
7. Абрамович, И.А. Методика оптимизации уклонов коллекторов городской канализации / И.А. Абрамович, В.А. Штейнберг // Основные направления водоотведения очистки сточных вод и обработки осадка: Всесоюз. научно-техн. конф: тез. докл. – Харьков.: Б.и., 1982. – С.43-46.
8. Абрамович, И.А. Надежность систем канализации больших городов / И.А. Абрамович, В.Ф. Шкундин. – М.: ГОСИНТИ, 1975. – 20с.
9. Абрамович, И.А. Некоторые вопросы корректировки норм проектирования / И.А. Абрамович, Г.Н. Семчук // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995. – №12. – С.15-16.
10. Абрамович, И.А. Некоторые направления построения графиков водоотведения для системы городской канализации / И.А. Абрамович, В.А. Штейнберг // Основные направления водоотведения очистки сточных вод и обработки осадков: Всесоюз. научно-техн.конф.: тез. докл. – Харьков.: Б.и., 1982. – С.25-29.

11. Абрамович, И.А. Новая стратегия проектирования и реконструкции систем транспортирования сточных вод / И.А. Абрамович // Прак. пособие. Харьков.: Основа, 1996. – 300с.
12. Абрамович, И.А. Повышение достоверности расчета сетей водоотведения / И.А. Абрамович // Водоснабжение и санитарная техника. – 1985. – №3. – С.4-5.
13. Абрамович, И.А. Проветривание канализационных коллекторов глубокого заложения в период эксплуатации / И.А. Абрамович, В.Д. Лишбергов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1975. – №3. – С.18-19.
14. Абрамович, И.А. Строительство системы канализации глубокого заложения в Харькове / И.А. Абрамович // Водоснабжение и санитарная техника. – 1973. – №10. – С.34-35.
15. Абрамович, И.А. Эксплуатация сетей канализации с глубоким заложением сетей / И.А. Абрамович // Совершенствование эксплуатации сетей водоснабжения: Всесоюз. научно-техн. Семинар. – М.: Б.и., 1987. – С.12-13.
16. Алексеев, В.С. Повышение надежности систем водоснабжения в чрезвычайных ситуациях / В.С. Алексеев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – № 5.1. – С.2-4.
17. Алексеев, М. И. Концепция нормативного обеспечения экологической безопасности поверхностных вод / М. И. Алексеев, Л.И. Цветкова, Е.В. Неверова – Дзюнак // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 6. – С.12-14.
18. Алексеев, М. И. Определение показателей надежности объекта при посезонно изменяющейся интенсивности отказов / М. И. Алексеев, Ю.А. Ермолин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2007. – № 5. – С.11-13.
19. Алексеев, М. И. Эксплуатация систем водоснабжения и канализации: Учебное пособие / М. И. Алексеев, В.Д. Дмитриев, Б.Г. Мишуков. – М.: Высшая школа, 1993. – 60 с.
20. Алексеев, М.И. Гидравлический расчет сетей водоотведения: Справочное пособие / М.И. Алексеев, Ф.В. Кармазинов, А.М. Курганов. Л.: СПИСУ, 1997. – 128 с.

21. Алексеев, М.И. Использование оценки надежности стареющих канализационных сетей при их реконструкции / М.И. Алексеев, Ю.А. Ермолин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – №5. – С.21-23.
22. Алексеев, М.И. Метод декомпозиции и эквивалентирования канализационной сети / М.И. Алексеев, Ю.А. Ермолин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – №11. – С.7-10.
23. Алексеев, М.И. Надежность систем водоотведения / М.И. Алексеев, Ю.А. Ермолин. – СПб. гос. архит. строит. ун-т., 2010. – 166 с.
24. Алексеев, М.И. Оптимизация процесса водоотведения в крупных городах: Монография / М.И. Алексеев, Ю.А. Ермолин. – М.: Издательство АСВ, 2013. – 184 с.
25. Алексеев, М.И. Расчет расхода и объема талого стока с урбанизированных территорий / М.И. Алексеев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 7. – С.5-8.
26. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
27. Андрияшев, М.М. Расчеты водопроводных сетей с учетом коэффициентов часовой неравномерности водопотребления / М.М. Андрияшев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1974. – №11. – С.7-10.
28. Арутюнян, К.Г. Предложения по уточнению строительных норм и правил, касающихся проектирования канализационных сетей / К.Г. Арутюнян, Н.М. Григоров // Водоснабжение и санитарная техника. – 1976. – №2. – С.28-31.
29. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1973. – Т.1. – 632 с.
30. Благодоров, А.И. Математическая модель канализационной сети / А.И. Благодоров, М.С. Гоухберг, А.И. Козлов // Новые методы и сооружения для водоотведения и очистки сточных вод. – Л.: СПИСУ, 1981. – С.124-129.

31. Богомолов, С.В. Моделирование волн на мелкой воде методом частиц / С.В. Богомолов, Е.В. Захаров, С.В. Зеркаль // Математическое моделирование. – 2002. – Т. 14. – № 3. – С.103-116.
32. Бородин, В.И. К вопросу об оптимизации систем водоотведения / В.И. Бородин // Материалы Всерос. молодежн. науч.-практ. конф. «Инженерное оборудование населенных мест и зданий». – Иркутск. ИрГТУ, 2007. – С.59-61.
33. Бородин, В.И. Оптимизация параметров новых и реконструируемых систем водоотведения / В.И. Бородин // Вестник ИрГТУ. Иркутск. – 2007. – №2. – С.27-35.
34. Ботук, Б.О. Канализационные сети : Учебное пособие / Б.О. Ботук, Н.Ф. Федоров. – М.: Стройиздат, 1976. – 272 с.
35. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
36. Вантеева, О.В. Вероятностное моделирование установившегося потокораспределения в гидравлических цепях с нефиксированными нагрузками / О.В. Вантеева // Трубопроводные системы энергетики. Методы математического моделирования и оптимизации: Сб. науч. трудов. – Новосибирск: Наука, 2007. – С.7-18.
37. Вантеева, О.В. Исследование задач и разработка методов вероятностного моделирования потокораспределения в гидравлических цепях / О.В. Вантеева // Системные исследования в энергетике: Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2002. Вып. 32. – С.8-17.
38. Венцель, Е.С. Задачи и упражнения по теории вероятностей : Учебное пособие для вузов. 3-е изд., стер. / Е.С. Венцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 2000. – 366 с.
39. Венцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Венцель – М.: Высш. шк., 2001. – 575 с.
40. Вербицкий, А.С. Влияние условий водопотребления на часовую неравномерность расходования воды населением / А.С. Вербицкий, М.П.

Майзельс // Научные труды АКХ им. К. Д. Памфилова, ОНТИ АКХ. – М.:, 1978. – № 155. – С.56-69.

41. Вербицкий, А.С. Методы управления развитием систем водоснабжения больших городов. Серия - Проблемы больших городов. Обзорная информация. ГОСИНТИ. / А.С. Вербицкий, У. Бахрамов, Э.А. Месропян. – М.:, 1980. – Вып.26. – 20 с.

42. Вербицкий, А.С. Расчетный режим водопотребления и его использование при проектировании / А.С. Вербицкий // Научные труды АКХ "Водопотребление и вопросы проектирования и эксплуатации систем коммунального водоснабжения", ОНТИ АКХ, 1978. – Вып.155 – С.42-50.

43. Внутренний водопровод и канализация зданий. (СНиП 2.04.01-85). – М.: ЦИТП Госстрой России, 2004. – 58 с.

44. Водоснабжение: Техничко-экономические расчеты / Под ред. Г.М. Басса. – Киев: Вища школа, 1977. – 124 с.

45. Воронов, Ю.В. Реконструкция и интенсификация работы канализационных сооружений / Ю.В. Воронов, В.П. Саломеев, А.Л. Ивчатов. – М.: Сройиздат, 1989. – 224 с.

46. Гальперин, Е.М. Выбор показателей надежности канализационной сети / Е.М. Гальперин, А.К. Стрелков // Водоснабжение и санитарная техника. – 2003. – №3. – С.10-13.

47. Гальперин, Е.М. Надежностные расчеты кольцевых водопроводных сетей / Е.М. Гальперин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2003. – № 3. – С.26-29.

48. Гальперин, Е.М. Надежность водоотводящих сетей города / Е.М. Гальперин, А.К. Стрелков // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – №3. – Ч 1. – С.20-26.

49. Гальперин, Е.М. Надежность и экономичность кольцевых водопроводных сетей / Е.М. Гальперин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1991. – №5. – С.7-9.

50. Гальперин, Е.М. Надежность канализационной сети и пути ее повышения / Е.М. Гальперин, А.Е. Сидорова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №12. – С.14-16.

51. Гальперин, Е.М. Надежность систем водоснабжения и водоотведения / Е.М. Гальперин, В.И. Полуян, В.Н. Чувиллин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – №9. – Ч 2. – С.38-41.

52. Гальперин, Е.М. Надежность функционирования кольцевой водопроводной сети / Е.М. Гальперин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1987. – №4. – С.4-5.

53. Гальперин, Е.М. Определение надежности функционирования кольцевой водопроводной сети / Е.М. Гальперин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1989. – №6. – С.11-13.

54. Гальперин, Е.М. Пути повышения надежности функционирования канализационной сети / Е.М. Гальперин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2014. – №1. – С.63-69.

55. Гальперин, Е.М. Численное моделирование аварийного состояния системы подачи и распределения воды. / Е.М. Гальперин // Изв. вузов.: Строительство и архитектура. – 1984. – №2. – С.103-106.

56. Гехман, А.С. Расчет, конструирование и эксплуатация трубопроводов в сейсмических районах / А.С. Гехман, Х.Х. Зайнетдинов. – М.: Стройиздат, 1988. – 184 с.

57. Голик, Н.И. Оптимальное проектирование систем канализации / Н.И. Голик. - Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1980. – 168с.

58. Голик, Н.И. Разработка рациональных методов проектирования систем канализации с помощью ЭВМ : Дисс. на соиск. уч. степени к.т.н. – Одесса, 1978. – 21с.

59. Государственные сметные нормативы. Укрупненные нормативы цены строительства. НЦС 81-02-14-2012.

60. Данилов, Д.Т. Эксплуатация канализационной сети / Д.Т. Данилов. – М.: Стройиздат, 1977. – 127с.

61. Дерюшев, Л.Г. Надежность систем водоснабжения и водоотведения / Л.Г. Дерюшев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №12. – С.6-9.
62. Дерюшев, Л.Г. О вопросах оценки надежности трубопроводных систем водоснабжения / Л.Г. Дерюшев, А.В. Минаев // Надежность водопроводных систем: Тез. докл. – М.: МДНТП, 1988.
63. Дерюшев, Л.Г. Оценка надежности систем водоснабжения / Л.Г. Дерюшев, А.В. Минаев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1988. – № 11. – С.4-5.
64. Дерюшев, Л.Г. Показатели надежности трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения / Л.Г. Дерюшев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №12. – ч.1. – С.6-9.
65. Добромыслов, А.Я. Гидравлический расчет безнапорных трубопроводов / А.Я. Добромыслов // Трубопроводы и экология. – 2000. – №2. – С.21-24.
66. Добронез Б.С. Интервальная математика/ Б.С. Добронез: Учебное пособие/«СФУ», - Красноярск, 2007. – 287 с.
67. Дрозд, Г.Я. Надежность канализационных сетей / Г.Я. Дрозд // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – №12. – С.2-4.
68. Евдокимов, А.Г. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов, А.Д. Тевяшев, В.В. Дубровский. –М: Стройиздат, 1990. – 368 с.
69. Евдокимов, А.Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов, А.Д. Тевяшев. – Харьков: Виша школа, Изд. при Харьков.ун-те, 1980. – 144 с.
70. Евдокимов, А.Г. Оптимальные задачи на инженерных сетях / А.Г. Евдокимов. - Харьков: Виша школа, 1976. – 153 с.
71. Евдокимов, А.Г. Потокораспределение в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов, В.В. Дубровский, А.Д. Тевяшев. – М.: Стройиздат, 1979. – 200 с.
72. Ермолин, Ю.А. Алгоритм локализации мест повреждения канализационной сети / Ю.А. Ермолин, Н.В. Пальгунов, Л.Ф. Скребин| // Водоснабжение и сан. техника. – 1989. – №3. – С.18-21.

73. Ермолин, Ю.А. Надежность городских систем водоотведения / Ю.А. Ермолин, М.И. Алексеев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №9. – С.24-25.

74. Ермолин, Ю.А. Надежность канализационных сетей: цели, задачи и методология исследования / Ю.А. Ермолин, М.И. Алексеев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1996. – № 10. – С.2-5.

75. Ермолин, Ю.А. О методологии исследования надежности стареющих элементов и систем водопровода и канализации / Ю.А. Ермолин, М.И. Алексеев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – №1. – С.2-4.

76. Ермолин, Ю.А. Оптимальное управление канализационной сетью по критерию минимума энергозатрат / Ю.А. Ермолин // Изв. Вузов: Строительство и архитектура, 1983. – №6. – С.48-51.

77. Ермолин, Ю.А. Оценка потенциального ущерба, связанного с ненадежностью канализационной сети / Ю.А. Ермолин, М.И. Алексеев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №2. – С.30-32.

78. Забощиков, О.В. Определение расчетных расходов сточных вод при расчете бытовых канализационных сетей населенных мест / О.В. Забощиков, А.И. Сергеев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1971. – №69. – С.138-150.

79. Зайцев, И.Д. К вопросу оптимизации трубопроводных сетей на стадии проектирования / И.Д. Зайцев, В.Г. Вайнер // Экономика и математические методы. – 1979. – Т15. – Вып.1. – С.171-176.

80. Зыков, А.А. Теория конечных графов / А.А. Зыков. – Новосибирск: Наука, 1969. – 543с.

81. Игнатчик, С.Ю. Обеспечение надежности и энергосбережения при расчете сооружений для транспортирования сточных вод / С.Ю. Игнатчик // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – №8. – С.56-63.

82. Игнатчик, С.Ю. Расчет надежности, безопасности и инвестиционной эффективности сетей водоотведения / С.Ю. Игнатчик // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – №12. – С.57-67.

83. Игнатчик, С.Ю. Энергосбережение и обеспечение надежности при реконструкции канализационных насосных станций / С.Ю. Игнатчик // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – №12. – С.37-43.

84. Ильин, Ю.А. Определение показателей экологической безопасности канализационных очистных сооружений / Ю.А. Ильин, В.С. Игнатчик, С.Ю. Игнатчик // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – №3. – Ч 1. – С.11-17.

85. Ильин, Ю.А. Расчет надежности подачи воды / Ю.А. Ильин. – М.: Стройиздат, 1987. – 317с.

86. Калицун, В.И. Водоотводящие системы и сооружения: Учеб. для вузов / В.И. Калицун. – М.: Стройиздат, 1987. – 336 с.

87. Калицун, В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: Учеб. для вузов / В.И. Калицун, Ю.М. Ласков. – М.: Стройиздат, 2000. – 417 с.

88. Калицун, В.И. Гидравлический расчет водоотводящих сетей: Справочное пособие / В.И. Калицун. – М.: Стройиздат, 1987. – 72с.

89. Карамбиров, С.Н. Математическое моделирование системы подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неопределенности: Монография / С.Н. Карамбиров. – М.: Стройиздат, 2004. – 197 с.

90. Карамбиров, С.Н. Совершенствование методов расчета систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неполной исходной информации – Автореф. дис.. канд. техн. наук. М., 2005. – 46 с.

91. Княгин, В.Ф. Пространственное развитие России в долгосрочной перспективе / В.Ф. Княгин В.Ф., Ю.А. Перельгин // Эксперт, 2007, № 1- 2. С.6-11.

92. Койда, Н.У. Техничко-экономических расчет канализационной сети с помощью ЭЦВМ / Н.У. Койда, Н.Ф. Федоров. – Л.: Стройиздат, 1971. – 119 с.

93. Константинов, Ю.М. Гидравлический расчет сетей водоотведения / Ю.М. Константинов, А.А. Василенко, А.А. Сапухин, Б.Ф. Батченко. – Киев: Будівельник, 1987. – 120с.

94. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика / Н.Ш. Кремер. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573с.

95. Куранов, Н.П. Оценка безопасности и риска аварий гидротехнических сооружений / Н.П. Курано, Н.Н. Розанов, Е.А. Тимофеева, Т.Г. Войнич-Сяноженский // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – №12. – С.16-22.
96. Курганов, А.М. Расчет дождевых сетей канализации на ЭВМ ЕС: Метод. указания для студентов / А.М. Курганов, М.И. Алексеев. – Л.: ЛИСИ, 1983. – 51с.
97. Курганов, А.М. Расчет канализационных сетей для отведения бытовых и производственных сточных вод на ЭВМ ЕС: Метод. указания для студентов / А.М. Курганов, М.И. Алексеев. – Л.: ЛИСИ, 1983. – 46с.
98. Ленденев, В.С. Расчет и оптимизация развивающихся систем водоотведения: Дисс. на соиск. уч. степени к.т.н. 1989. – 143с.
99. Лобачев, В.Г. Вопросы рациональных расчетов водопроводных сетей / В.Г. Лобачев. – М.: ОНТИ, 1936. – 148с.
100. Лобачев, В.Г. Новый метод увязки колец при расчете водопроводных сетей / В.Г. Лобачев // Санитарная техника. – 1934. – № 2. – С.8-12.
101. Лобачев, В.Г. Приемы расчета водопроводных сетей / В.Г. Лобачев. – Л.: МКХ РСФСР, 1950. – 80с.
102. Макогонов, В.С. Исследование надежности водопроводных сетей: Автореф. диссерт. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1972. – 20 с.
103. Макогонов, В.С. Надежность систем водоснабжения / В.С. Макогонов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1974. – № 11. – С.16-21.
104. Медведев, Т.П. Канализация городов ФРГ / Т.П. Медведев. – Л.: Стойиздат, 1982. – 168 с.
105. Мелентьев, Л.А. Системные исследования в энергетике / Л.А. Мелентьев. – М.: Наука, 1983. – 454 с.
106. Мельник, Е.А. Пути решения проблемы энергосбережения в системах канализования Санкт – Петербурга / Е.А. Мельник, О.Н. Рублевская // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – №12. – С.45-51.
107. Меренков, А.П. Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 278 с.

108. Многомерные статистические методы. Часть IV. Кластерный анализ: Учебно-методическое пособие – Составители: Н.И. Гришаккина, В.С. Дмитриева, Н.В. Манова, С.В. Мельникова, О.Д. Притула, Е.А. Антонова, А.В. Кякинен. НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2005. – 54с.
109. Моисеев, Н.Н. Методы оптимизации / Н.Н. Моисеев, Ю.Л. Иванилов, Е.М. Столярова. – М.: Наука, 1987. – 351 с.
110. Муравлева, О.О. Использование энергетически эффективных двигателей в регулируемом приводе насосов / О.О. Муравлева, П.В. Тютёва // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 5. – С.29-32.
111. Надежность систем водоснабжения и водоотведения: Учебное пособие / Е.М. Гальперин, Самарский гос. арх.-строит. ун-т. – Самара, 2005. – 140 с.
112. Найманов, А.Я. Особенности оценки надежности кольцевой водопроводной сети. / А.Я. Найманов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 12. – С.11-16.
113. Небольсин, Г.П. Алгоритм задачи гидравлической увязки кольцевых водопроводных сетей / Г.П. Небольсин // 26-я научная конференция. –Воронеж, 1971. – С.202.
114. Никаев, М.А. Совершенствование проектирования водоотводящих сетей / М.А. Никаев. – М.: Стройиздат, 1984. – 48с.
115. Николаев, В.Г. Влияние характеристик насосов на энергопотребление канализационных насосных станций и качество очистки сточных вод / В.Г. Николаев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – № 10. –ч 2. – с.3-10.
116. Ноймеге, Ф. Исследование режимов водопотребления жилых объектов для выявления действительной неравномерности водопотребления, расчета и обоснования надежности водообеспечения потребителей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИСИ, 1972. – 26 с.
117. Обухов, Е.С. Аварии канализационных коллекторов и борьба с ними / Е.С. Обухов. – М. Л.: Госстройиздат, 1939. – 116 с.
118. Орлов, В.А. Стратегия и методы восстановления подземных трубопроводов / В.А. Орлов, В.А. Харькин. – М.: Стройиздат, 2001. – 96с.

119. Пахомов, А.Н. Повышение эксплуатационной надежности системы водоотведения Москвы / А.Н. Пахомов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – №3. – С.27-32.

120. Первов, Г.И. Инфильтрация грунтовых вод в канализационную сеть / Г.И. Первов. – М.: Стройиздат, 1948. – 112с.

121. Первозданский, А.А. Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация / А.А. Первозданский, В.Г. Ганугори. – М.: Наука, 1976. – 342 с.

122. Петросян, А.С. Дополнительные главы теории мелкой воды / А.С. Петросян. – М.: Серия Механика, управление, информатика, 2014. – 60 с.

123. Порядин, А.Ф. Водоснабжение и водоотведение в экстремальных условиях / А.Ф. Порядин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – №3. – Ч 2. – С.20-23.

124. Примин, О. Г. Разработка и применение информационных технологий для оценки и обеспечения экологической безопасности и надежности сетей водоснабжения и водоотведения города: автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / О. Г. Примин. – М., 2001.

125. Примин, О.Г. Методика сбора и обработки статистических данных по отказам отдельных элементов системы подачи и распределения воды / О.Г. Примин, Л.Д. Климиашвили // Вопросы надежности систем водоснабжения: Сборник трудов. – М.: МИСИ, 1978. – №170. – С. 82-94.

126. Примин, О.Г. Разработка схем водоснабжения городов России/О.Г. Примин, Б.С. Борткевич, Миркус В. И., Контор Л. И., Винарский С. Л. // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. №7. С.28-31.

127. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. – М.: ФГУП НИИВОДГЕО, 2006. – 132с.

128. Родин, В.Н. Распределение числа отказов элементов канализационных сетей / В.Н. Родин, Я.А. Карелин, М.М. Султанов // Водоснабжение и канализация населенных мест. – М.: Стройиздат, 1981. – С.23-28.

129. Родионов, А.И. Математическая статистика: Учебное пособие для студентов заочного обучения специальности 0608.00. / А.И. Родионов. – М.: МГУЛ, 2002.
130. Розин, В.Н., Шопенский и др. К вопросу определения расчетной нагрузки начальных участков канализационной сети / В.Н. Розин [и др.] // Водоснабжение и канализация населенных мест, жилых и общественных зданий. – М.: Стройиздат, 1980. - С.40-41.
131. Саломеев, В.П. Реконструкция инженерных систем и сооружений водоотведения / В.П. Саломеев. – М.: Издательство АСВ, 2009. – 192 с.
132. Самарин, О.Д. О расчете расхода воды в системах холодного и горячего водоснабжения. // Информационная система по теплоснабжению [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.termo-izol.ru/>
133. Селезнев, А.Н. Оценка и обеспечение надежности трубопроводов канализационной сети / А.Н. Селезнев, С.А. Алексеев, С.К. Максимов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №10. – С.21-22.
134. Соболев, И.М. Численные методы Монте-Карло / И.М. Соболев. – М.: Наука, 1973. – 311 с.
135. СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения».
136. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч.2. Водопровод и канализация. – Под ред. И.Г. Староверова и Ю.И. Шиллера. – М.: Стройиздат, 1990. – 248 с.
137. Сумароков, С.В. Математическое моделирование систем водоснабжения / С.В. Сумароков. – Новосибирск: Наука, 1983. – 167 с.
138. Трубопроводные системы энергетики. Методы математического моделирования и оптимизации. – Под ред. Н.Н. Новицкого. Новосибирск. Изд.: Наука, 2010. – 419 с.
139. Украинец, Н.А. Исследование влияния повреждаемости сетей и неравномерности водопотребления на возможность бесперебойного водоснабжения: Автореф. диссерт. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: МИСИ, 1972. – 21 с.

140. Ухоботов В.И. Избранные главы теории нечетных множеств /В.И. Ухоботов. Учебное пособие. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2011. – 245 с.
141. Федорец, А.А. Дифференциальные уравнения установившегося движения в трубопроводах при неравномерном изменении путевого расхода / А.А. Федорец // Изв. Вузов: Архитектура и строительство. – 1976. – №10. – С.114-119.
142. Федорец, А.А. Установившееся движение жидкости в открытых руслах с неравномерным увеличением расхода вдоль потока / А.А. Федорец // Изв. Вузов: Архитектура и строительство. – 1976. – №4. – С.102-105.
143. Федоров, Н.Ф. Городские подземные сети и коллекторы: учебник для вузов / Н.Ф. Федоров, С.Ф. Веселов. – М.: Стройиздат, 1972. – 303 с.
144. Федоров, Н.Ф. и др. Канализационные сети и сооружения / Н.Ф. Федоров [и др.]. – Л. М.: Госстройиздат, 1961. – 315с.
145. Федоров, Н.Ф. и др. Новая программа расчета бытовой канализационной сети / Н.Ф. Федоров [и др.] // Санитарная техника. – Л.: ЛИСИ, 1970. – С.83-84.
146. Федоров, Н.Ф. Новые исследования и гидравлические расчеты канализационных сетей / Н.Ф. Федоров. – М.: Л.: Госстройиздат, 1956. –258 с.
147. Филд, Р. Проблема переполнения общесплавной системы канализации / Р. Филд // Гражданское строительство. – 1973. – №2. – С.27-32.
148. Форд, Л.Р. Потоки в сетях / Л.Р. Форд, Д.Р. Фалкерсон. – М.: Мир, 1963. – 216 с.
149. Харьков, В.А. Разработка системного подхода и оптимизация эксплуатации безнапорных водоотводящих сетей: дисс. на соиск. уч. степени д. н., 2005. – 196с.
150. Хасилев, В.Я. Линейные и линеаризованные преобразования схем гидравлических цепей / В.Я. Хасилев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1964. – №2. – С.231-243.
151. Хасилев, В.Я. Элементы теории гидравлических цепей / В.Я. Хасилев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1964. – №1. – С.69-88.

152. Хранов, С.С. Моделирование динамики поверхностных вод / С.С. Хранов, А.В. Хоперсков, М.А. Еремин. – Волгоград: Изд-во Волгоградского госуниверситета, 2010. – 122 с.

153. Хренов, К.Е. Повышение надежности работы канализационной системы г. Москвы в условиях чрезвычайных ситуаций / К.Е. Хренов, О.В. Ромашкин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – №1. – С.22-24.

154. Ху, Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях / Т. Ху. – М.: Мир, 1974. – 520 с.

155. Черников, Н.А. Теоретические и методологические принципы совершенствования нормативной базы в области водоотведения: автореф. дисс. на соиск. ученой степени д-ра техн. наук. – 2003. – 41с.

156. Чечик, Е.И. Выбор оптимального профиля канализационной сети с использованием ЭЦВМ / Е.И. Чечик, С.А. Одельская, Р.Я. Цаль // Водоснабжение и санитарная техника. – 1968. – №6. – С.30-34.

157. Чупин В.Р. Выработка рекомендаций по минимизации последствий от аварийных ситуаций в системах водоснабжения / В.Р. Чупин, М.Б. Малевская // Водоснабжение и санитарная техника. – 1994. – №4. – С. 8-9.

158. Чупин В.Р. Оптимизация развивающихся систем подачи и распределения воды: автореф. дисс. д-ра техн. наук. – М.: ВНИИВОДГЕО, 1991. – 41 с.

159. Чупин, В.Р. Оптимизация развивающихся систем водоотведения / В.Р. Чупин, И.В. Майзель, Р.В. Чупин, Т.А. Нгуен // Известия ВУЗов: Инвестиции. Строительство. Недвижимость ИрГТУ. – 2014. – №2.(3).

160. Чупин, В.Р. Моделирование и оптимизация трубопроводных систем коммунального хозяйства / В.Р. Чупин, Д.И. Майзель, Р.В. Чупин // Вестник ИрГТУ. – 2008. – Т.1. – № 1. – С.169-180.

161. Чупин, В.Р. Напорно - безнапорное движение стоков в системах водоотведения кольцевой структуры / В.Р. Чупин, А.М. Зеленин, Р.В. Чупин // Материалы международной научно-практической конференции: Строительный

комплекс России. Наука. Образование. Практика. – Улан-Удэ. Издат. ВСГУТУ, 2012. – С. 137-143.

162. Чупин, В.Р. Напорное движение стоков в безнапорных коллекторах / В.Р. Чупин, Е.С. Мелехов, Р.В. Чупин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – №7. – С.15–24.

163. Чупин, В.Р. Нормирование и тарифообразование в сфере коммунальных услуг / В.Р. Чупин, В.В. Шлафман // Жилищное и коммунальное хозяйство. – 2000. – №3. – С7–11.

164. Чупин, В.Р. Оптимизация развивающихся систем водоотведения / В.Р. Чупин, В.С. Ленденев // Изв. Вузов: Архитектура и строительство. – 1987. – № 6. – С.102-106.

165. Чупин, В.Р. Оптимизация реконструируемых систем водоотведения / В.Р. Чупин, В.С. Ленденев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1988. – №5. – С.14-17.

166. Чупин, В.Р. Оптимизация совместной работы канализационных насосных станций на общий напорный коллектор / В.Р. Чупин, Е.С. Мелехов, Р.В. Чупин // Вестник ИрГТУ. – 2013. – №2. – С.114-118.

167. Чупин, В.Р. Развитие методики гидравлических расчетов систем водоотведения / В.Р. Чупин, Е.С. Мелехов, Р.В. Чупин // Вода и экология. – 2010. – №1. – С.3-11.

168. Чупин, Р.В. Безнапорное движение стоков в системах водоотведения кольцевой структуры / Р.В. Чупин, Т.И. Шишелова, А.А. Бобер // Фундаментальные исследования. – 2012. – №11. – Ч.6. – С.1480-1486.

169. Чупин, Р.В. Движение стоков в кольцевых каналах прямоугольного сечения / Р.В. Чупин // Вестник ИрГТУ. – 2013. – №11. – С.114-118.

170. Чупин, Р.В. Комплексная оптимизация систем водоотведения поверхностного водостока и ливневой канализации / Р.В. Чупин // Известия ВУЗов: Инвестиции. Строительство. Недвижимость ИрГТУ. –2014. – №2.(3).

171. Чупин, Р.В. Моделирование режимов работы городских систем водоотведения / Р.В. Чупин, Е.С. Мелехов // Вестник Иркутского гос. тех. ун-та. – 2010. – № 2(42). – С.141-149.

172. Чупин, Р.В. Напорное Безнапорное движение стоков в системах водоотведения кольцевой структуры / Р.В. Чупин // Интернациональный журнал MOTROL. – 2014. – Vol. 16. – No 5. Lublin. Polish. – С.3-15.

173. Чупин, Р.В. Оптимальная реконструкция систем водоотведения / Чупин Р.В., Т.А. Нгуен // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 6.

174. Чупин, Р.В. Оптимизация многоуровневых систем водоснабжения и водоотведения / Р.В. Чупин, И.В. Майзель // Вестник ИрГТУ. – 2011. – №9 (56). – С.90-100.

175. Чупин, Р.В. Оптимизация развивающихся систем водоотведения: Монография / Р.В. Чупин. – Иркутск: изд-во ИрГТУ, 2015. – 418 с.

176. Чупин, Р.В. Повышение надежности проектируемых и реконструируемых систем водоотведения / Р.В. Чупин, А.А. Бобер // Вестник ИрГТУ. – 2012. – №9. – С.111-119.

177. Чупин, Р.В. Повышение пропускной способности системы водоотведения поверхностного водостока / Р.В. Чупин, Е.С. Мелехов // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2010. – №9. – С.42-48.

178. Чупин, Р.В. Потокораспределение в системах водоотведения кольцевой структуры / Р.В. Чупин, А.М. Зеленин // Материалы международной научно-практической конференции: Строительный комплекс России. Наука. Образование. Практика. – Улан-Удэ: Издат. ВСГУТУ, 2012. – С. 125-128.

179. Чупин, Р.В. Развитие методики гидравлических расчетов систем дождевой канализации / Р.В. Чупин, Е.С. Мелехов // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2010. – №4. – С.32-36.

180. Чупин, Р.В. Развитие теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения / Р.В. Чупин, Е.С. Мелехов. – Иркутск: Изд. ИрГТУ, 2011. – 323 с.

181. Чупин, Р.В. Разработка информационной системы моделирования

режимов движения стоков в системах водоотведения / Р.В. Чупин, Е.С. Мелехов // Вестник ИрГТУ. – 2012. – №12. – С.148-155.

182. Чупин, Р.В. Расчет систем водоотведения с замкнутыми контурами и разгрузочными коллекторами / Р.В. Чупин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2014. – №1. – С.56-62.

183. Чупин, Р.В. Совершенствование методов расчета и анализа режимов работы систем водоотведения / Р.В. Чупин // Инженерное оборудование населенных мест и зданий: сб. трудов Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 31 марта 2010), 2010. – С.32-39.

184. Шацило, Г.К. Исследования в области механизации гидравлических и технико-экономических расчетов производственных и бытовых канализационных сетей: дисс. на соиск. уч. степени к.т.н. – Л.:, 1975. – 21с.

185. Шацило, Г.К. Механизация расчета бытовой канализационной сети со станциями перекачки / Г.К. Шацило [и др.] // Санитарная техника. – Л.: Б.и, 1970. – С.142-143.

186. Шигорин, Г.Г. Некоторые данные о колебаниях притока сточных вод / Г.Г. Шигорин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1936. – №2. – С. 71-73.

187. Шопенский, Л.А. Аналитическое описание режимов водопотребления и построения расчетных графиков / Л.А. Шопенский // Сб. научных трудов. – М.: ОНТИ ЦНИИЭП инженерного оборудования. – Вып. I – 1975.

188. Шопенский, Л.А. Исследование режимов работы водопроводов жилых зданий: автореферат диссертации канд. техн. наук. – М., 1968.

189. Шопенский, Л.А. Некоторые вопросы применения методов теории вероятности к расчету внутренних водопроводов / Л.А. Шопенский // Сб. научных трудов. – М: ОНТИ ЦНИИЭП инженерного оборудования, Вып. 3. –1972. – С. 3-20.

190. Шопенский, Л.А. Построение расчетных графиков водопотребления / Л.А. Шопенский, И.П. Юрьева // Водоснабжение и санитарная техника. – 1985. – №11. – С.25-27.

191. Шопенский, Л.А. Сборник результатов аналитических и экспериментальных исследований, выполненных в 1974 году лабораториями внутренних санитарно-технических систем, канализации, экономических исследований и автоматизации и диспетчеризации. Протокол № 1 от 20 февраля 1975 г.

192. Штейнмиллер, О.А. Схемы водоснабжения и водоотведения. Техническое обследование централизованных систем водоснабжения и водоотведения / О.А. Штейнмиллер // Инженерные системы АВОК. – Северо-Запад, 2013. – №4. – С.16-24.

193. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика / Д.В. Штеренлихт. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640с.

194. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжение: справочник. – Л.: Стройиздат, 1988. – 382с.

195. Яковлев, С.В. Водоотведение и очистка сточных вод: учеб. для вузов / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, В.И. Калицун. – М.: Стройиздат, 1996. – 591с.

196. Яковлев, С.В. Водоотведение и очистка сточных вод: учебник для вузов / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. – М.: АСВ, 2002. – 704с.

197. Яковлев, С.В. Водоотводящие системы промышленных предприятий: учебник для ВУЗов / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, Ю.В. Воронов. – М.: Стройиздат, 1990. – 511с.

198. Яковлев, С.В. Самоочищение канализационной сети / С.В. Яковлев, В.И. Калицун // Водоснабжение и санитарная техника. – 1970. – №7. – С.4-7.

199. Balaji, B. A cost estimate model for sewerage system / B. Balaji, P. Mariappan and S. Senthamilkumar // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – May 2015. – Vol. 10, No. 8. – p.3327-3332.

200. Bernat, J.D. Minimization of Sewage Network Overflow / J. D. Bernat, Michael N. Jung, Carlos Ocampo-Martinez, Sebastian Sager and Gabriela Cembrano. – The EU Project EFFINET (FP7-ICT-2011-8-31855) October, 2013. – p.19.

201. Burch, N. Automating Layouts of Sewers in Subdivisions / N. Burch, R. Holte, M. Müller, D. O'Connell, J. Schaeffer – Department of Computing Science, University of Alberta, Canada. – p.6.
202. Chabal, L. Sewerage pumping station optimization under real conditions / L. Chabal, S. Stanko – GeoScience Engineering Volume LX (2014). – No.4. – p. 19-28, ISSN 1802-5420.
203. Curtis, T.G., and W.C. Huber, (1993), SWMM AML - An ARC/INFO Processor for the Storm Water Management Model (SWMM), Proc. 1993 Runoff Quantity and Quality Modeling Conference, Reno, NV, (NTIS, in press), U.S. EPA, Athens, GA, 30605.
204. Development plan for water supply and sewerage infrastructure / Prepared by: Experts Group for Water Supply and Sewerage (GEUK) - Peja, April 2008. – 49p.
205. Dijkstra, E.W. A note on two problems in connection with graphs / E.W. Dijkstra // Numerische Mathematik. – 1959, –1., – p. 269.
206. Dond, H. Optimized sewer design cuts cost / H. Dond // Water and Sewage. –1980. – Reference Number.
207. Donigian, A.S. Modeling of Nonpoint Source Water Quality in Urban and Non-Urban Areas / A.S. Donigian, Jr. and W.C. Huber // EPA/600/3-91/039, U.S. EPA, Athens, GA, 30605. – 1991.
208. Ford, L.R. Network flow theory. Rand Corporation Report / L.R. Ford. – Jr., 1946. – p. 923.
209. Giffen, A.E. Andersook ap laboratorium - schaal. naar do suleldeonlwik - keling in ivatswater en de bestriiding daarvan / A.E. Giffen // Tijdschrift Waterwoorgning an afvai. Waterbehandeling. – 1976, – № 24.
210. Giraldo, J.M. Nonlinear optimization for improving the operation of sewer systems: the Bogotá Case Study / J.M. Giraldo, S. Leirens, M.A. Diaz-Granados, J.P. Rodriguez – International Environmental Modelling and Software Society (iEMSS) 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada. – 8p.

211. Grau, A. Tedmische Bestimmungen Problematik bei der Aufstellung nach 918 b WHG / A. Grau, D. Kohlhoff, K. Retter // Korrespondenz Abwasser. –1980. – № 1.

212. Holas, J. Development Plan of Water Supply and Sewerage in the Hradec Králové Region / J. Holas // Head of the GIS department Hradec Králové Region – PROJECTS, the BEST 2006. – p. 38-40.

213. Huber, W.C. Deterministic Modeling of Urban Runoff Quality / W.C. Huber // In: H.C.Torno et. al. (eds.) Urban Runoff Pollution, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Urban Runoff Pollution, Montpellier, France. Springer-Verlag, New York, Series G: Ecological Sciences, 10. –1986. – p.167-242.

214. Huber, W.C. Experience with the U.S. EPA SWMM Model for Analysis and Solution of Urban Drainage Problems, Proceedings, Inundaciones / W.C. Huber // Y Redes De Drenaje Urbano, J. Dolz, M. Gomez, and J.P. Martin, eds., Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain. – 1992. – p.199-220.

215. Huber, W.C. Integration of the SWMM Runoff Block with ARC/INFO and AutoCAD / W.C. Huber [and ect.] // A Case Edison, NJ, Contract VN1-320-420000, from Dept. of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville. – 1991.

216. Huber, W.C. Storm Water Management Model / W.C. Huber, R.E. Dickinson // Version 4, User's Manual, EPA/600/3-88/001a (NTIS PB88-236641/AS), U.S. EPA, Athens, GA, 30605. – 1988.

217. Huber, W.C., Heaney, J.P. and B.A. Cunningham, (1985), Storm Water Management Model (SWMM) / W.C. Huber, J.P. and B.A. Cunningham // Bibliography, EPA/600/3-85/077 (NTIS PB86-136041/AS), U.S. EPA, Athens, GA, September 1985. – p. 35-43.

218. Kloss, H. Ogólne problemy niesawodnosci systemow wodociagowych i kanalizacyjnych / H. Kloss, M. Roman // Gas, voda i tehnika sanitarna. –1974. – №9. 208(1).

219. Kruskal, J.B. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. / J.B Kruskal // Proc. American Mathematical Soc. –1956. –Vol.7, p.

48.

220. Kunow, K.E. Predicting sulfide in force mains / K.E. Kunow, K.K. Kunow // *Water and Sewerage Works*. – 1978. – №12.

221. Martin, J.L. Modification of the Storm Water Management Model's (SWMM's) Transport Submodel for Creation of a Hydrodynamic Linkage to the Water Analysis Simulation Program (WASP) / J.L. Martin // Report to Camp, Dresser Report, 11024DOC07/71 (NTIS PB-203289), U.S. EPA, Washington, DC, 20460. – 1993.

222. Mattyvs, S. Einsparmöglichkeit und Energiekosten sur Wasserforderang durch Einsatz Virbehalters / S. Mattyvs // *GWF-Wasser. Abwasser*. –1981. – 122c.

223. Mauricio-Iglesias, M. Self-optimising control of sewer systems / M. Mauricio-Iglesias, I. Montero-Castro, A. L. Mollerup, G. Sin // Preprints of the 10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems The International Federation of Automatic Control December 18-20, Mumbai, India. – 2013. – c.708-712.

224. Muleta, M.K. Multi-objective optimization for optimal design of urban drainage systems / M.K. Muleta and P.F. Boulos // *World Environmental and Water Resources Congress*. – 2007. – pp.1-10

225. Muniyappa, N.C. Improving the performance of Public Water Utilities – A case study of Bangalore / N.C. Muniyappa – Presentation..., India. – 14p.

226. Nagoshe, S. R. Optimization of sewerage network by dynamic programming / S. R. Nagoshe, R. K. Rai, K. N Kadam // *Proceedings of 3-rd IRF International Conference, 10-th May-2014, Goa, India, ISBN: 978-93-84209-15-5*. – p.120-125.

227. Paul, A.J. Jr. Generation of directed trees and 2 – trees without duplication / A.J. Jr Paul // *IEEE trans.*, – 1967 CT-14. p. 354.

228. Racoviteanu, G. Using Bentley Software Solutions for the Calculus and Optimization of Sewer Networks / G. Racoviteanu, S. Perju, L. Stroia – Technical University of Civil Engineering Bucharest, Department of Sanitary Engineering and Water Protection, Conferentiar, 9p.

229. Shah, N.K. City Development Plan, Karjat Water Supply and Sanitation / Narendra Shah – Dissertation, Indian Institute Of Technology Bombay. – 2011. – 111p.

230. Skehan, C.A. Exploring spatial optimization techniques for the placement of flow monitors utilized in RDII studies / Christopher A. Skehan – Submitted to the faculty of the University Graduate School in partial fulfillment of the requirements for the degree Master of Science in the Department of Geography, Indiana University, July 2010. – 32p.

231. Sousa, J. An optimization approach to wastewater systems planning at regional level / J. Sousa, A. Ribeiro, M. C. Cunha, A. Antunes // IWA Publishing 2002 Journal of Hydroinformatics. – 04.2.2002. – p.115-123.

232. Storm water management model manual. Verssion II. National environmental Research Center Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency by Waym C. Huber, James P. Heang and others. – 1975. – p. 27-34.

233. Vojinovic, Z. Optimising Sewer System Rehabilitation Strategies between Flooding, Overflow Emissions and Investment Costs / Z. Vojinovic, A. Sánchez and W.J. Barreto // 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK. – 2008. – p.1-10.

ПРИЛОЖЕНИЯ 1



**МИНИСТЕРСТВО ЖИЛИЩНОЙ
ПОЛИТИКИ, ЭНЕРГЕТИКИ И
ТРАНСПОРТА ИРКУТСКОЙ
ОБЛАСТИ**

Ленина ул., д. 1а, Иркутск, 664027
Тел. (3952) 214-800 факс 214-804
E-mail: komjch@govirk.ru

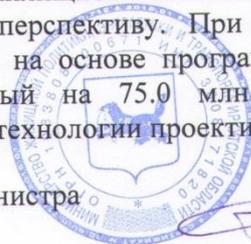
от 16.10.2018 № 644-П
на № _____ от _____

СПРАВКА

О применении результатов диссертационных исследований Романа Викторовича Чупина в практике эксплуатации, реконструкции и развития систем водоснабжения и водоотведения Иркутской области

При активном участии Р.В. Чупина, и на основе предложенного им вычислительного комплекса Трасе-ВК, были разработаны программы комплексного развития инженерной инфраструктуру, схемы водоснабжения и водоотведения городов и населенных мест: Иркутска и Иркутского района, Шелехова и Шелеховского района, Ангарска и Ангарского района. Для городов Братск, Усть-Илимск, Усолье-Сибирское, Зима, Залари, Нижнеудинска разработаны компьютерные модели систем водоснабжения и водоотведения, которые позволили нормализовать гидравлические режимы их работы. Программный комплекс Трасе – ВК внедрен в водоканалах перечисленных городов, где на основе его оперативно рассчитываются наполнение и скорости движения стоков в напорных и безнапорных коллекторах и трубопроводах при различных нагрузках и режимах поступления стоков от абонентов. При этом моделируются возможные режимы переполнения самотечных систем и выхода стоков на поверхность земли, определяются места образования засоров, степень заиливания и зарастания коллекторов и трубопроводов. Методика и программный комплекс используются в системе диспетчерского управления при анализе последствий от различных коммутаций в системах водоснабжения и водоотведения, а также при анализе решений по их развитию и реконструкции. Проведенные в 2017 г (при активном участии Р.В. Чупина) экспедиционные обследования систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов, расположенных на берегу Братского водохранилища, и выданные рекомендации по их модернизации и развитию являются основой для планирования и работы Министерства жилищной политики, энергетики и транспорта Иркутской области на ближайшую перспективу. При обосновании схемы канализации центральной зоны о. Байкал на основе программного комплекса Трасе-ВК был предложен вариант, который на 75.0 млн. руб. меньше варианта, полученного по существующей технологии проектирования согласно СП 32.13330.2012

Заместитель министра



Е.П. Ветров

МУНИЦИПАЛЬНОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

«ВОДОКАНАЛ»

666034, Иркутская область, г. Шелехов,
Култукский тракт, 3
тел. (39550) 6-30-96, факс (39550) 6-16-94
e-mail: post@shelvoda.ru, сайт: shelvoda.ru
р/с 40702810110000000166
АО «БайкалИнвестБанк» г. Иркутск
к/с 30101081050000000706
БИК 042520706 ОГРН 1033802256730
ИНН 3821005886 КПП 381001001
ОКПО 16841374

17.04.18г. № 652

СПРАВКА

О применении результатов диссертационных исследований Р.В. Чупина в практике эксплуатации и проектирования систем водоснабжения и водоотведения г. Шелехов

Вычислительный комплекс Трасе - ВК внедрен в МУП Водоканал г. Шелехов и был использован при разработке программы комплексного развития коммунальной инфраструктуры, схемы водоснабжения и водоотведения г. Шелехов на период 2014 -2030 гг. Схема утверждена и принята к исполнению. Программный комплекс позволяет оперативно рассчитывать наполнение и скорости движения воды и стоков в трубопроводах из различных материалов, коллекторах различного сечения, открытых каналов с различными откосами и облицовкой при различных нагрузках и режимах поступления стоков от абонентов. При этом моделируются возможные режимы переполнения самотечной системы и выхода стоков на поверхность земли. При сопоставлении расчетных и фактических наполнений в колодцах систем водоотведения и глубин в открытых каналах можно оперативно определять места образования засоров, степень заиливания и зарастания коллекторов и каналов. Методика и программный комплекс будут использоваться в системе диспетчерского управления при анализе последствий от различных коммутаций в системе водоснабжения и водоотведения, а также при анализе решений по их развитию и реконструкции. С помощью предлагаемых методик и программ проведены поверочные расчеты проектов развития систем водоснабжения и водоотведения, проведена их корректировка и получены обоснование решения для инвестиционных программ Водоканала. В дальнейшем, предлагаемые методические разработки и программный комплекс будут применяться при выдаче технических условий на подключение новых абонентов к сетям водоснабжения и водоотведения. Применение программного комплекса Трасе-ВК при обосновании перспективной схемы водоснабжения и водоотведения г. Шелехова по сравнению с существующими технологиями проектирования согласно СП 32.13330.2012 оказалось эффективнее на 25897.0 тыс. руб. Методические и алгоритмические подходы разработаны к.т.н. Р.В. Чупиным в ходе его диссертационных исследований.

Директор




Ю.Н. Баймашев



105005, Москва, Платовский пер., 2. Тел. (499) 763-34-34, факс (499) 265-22-01 E-mail: post@mosvodokanal.ru ОКПО 03324418

11.01.2012 № 02-18-3764/11-0/0-1
 На № 05-2954-15 от 21.11.2011

О представленной
 монографии

Иркутский государственный
 Технический университет
 Проректору по научной работе
В.В.ПЕШКОВУ

Уважаемый Виталий Владимирович!

Специалисты МГУП "Мосводоканал" с большим интересом ознакомились с представленной монографией. В настоящее время на нашем предприятии существует опыт решения задач оптимизации структуры и параметров трубопроводных систем различного технологического назначения.

Книга молодых учёных рассматривает системы водоснабжения и водоотведения с позиций общих принципов проектирования, моделирования и оптимизации. Авторами представлена система математических моделей, методов и программ для решения задач анализа и синтеза развивающихся многоуровневых систем водоснабжения и водоотведения, предложены новые подходы к учету динамики развития систем с обоснованием их структуры и параметров. Монография, безусловно, будет интересна специалистам в области проектирования и эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения, сотрудникам МГУП "Мосводоканал", всем, интересующимся современным состоянием и перспективами развития отрасли.

Выражаем Вам свою благодарность за возможность ознакомиться с книгой "Развитие теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения".

с уважением,
 Первый заместитель
 генерального директора
 МГУП "Мосводоканал"

К.Е.Хренов



МУНИЦИПАЛЬНОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
АНГАРСКОГО ГОРОДСКОГО ОКРУГА
“АНГАРСКИЙ ВОДОКАНАЛ”

665830, г. Ангарск, ул. Мира-2а, а/я 101
тел/факс: (3955) 52-34-84
E-mail: vdk@avk.irtel.ru

Байкальский Банк ПАО Сбербанк г. Иркутск
р/с40702810918310101197 к/с30101810900000000607
ИНН 3801006828 БИК 042520607 КПП 380101001

18.04.2018г № 1233

СПРАВКА

*О применении результатов диссертационных исследований Р.В. Чупина в
практике эксплуатации и проектирования систем водоснабжения и
водоотведения г. Ангарска*

Методика анализа и интенсификации режимов функционирования самотечных систем водоснабжения и водоотведения, а также ее программная реализация в виде вычислительного комплекса Трасе-ВК внедрена в МУП АГО «Ангарский Водоканал» г. Ангарска. Программный комплекс позволяет оперативно рассчитывать наполнение и скорости движения воды и стоков в трубопроводах из различных материалов, коллекторах различного сечения, открытых каналах с различными откосами и облицовкой при различных нагрузках и режимах поступления стоков от абонентов. При этом моделируются возможные режимы переполнения самотечной системы и выхода стоков на поверхность земли. При сопоставлении расчетных и фактических наполнений в колодцах систем водоотведения, и глубин в открытых каналах можно оперативно определять места образования засоров, степень заиливания, зарастания коллекторов и каналов. Методика и программный комплекс будут использоваться в системе диспетчерского управления при анализе последствий от различных коммутаций в системе водоснабжения и водоотведения, а также при анализе решений по их развитию и реконструкции. С помощью предлагаемых методик и программ проведены поверочные расчеты проектов развития систем водоснабжения и водоотведения, проведена их корректировка и получены обоснование решения для инвестиционных программ Водоканала. В дальнейшем, предлагаемые методические разработки и программный комплекс будут применяться при выдаче технических условий на подключение новых абонентов к сетям водоснабжения и водоотведения. Применение программного комплекса Трасе-ВК при обосновании перспективной схемы водоснабжения и водоотведения г. Ангарска по сравнению с существующими технологиями проектирования согласно СП 32.13330.2012 оказалось эффективнее на 56 932.0 тыс. руб. Методические и алгоритмические подходы разработаны к.т.н. Р.В. Чупиным в ходе его диссертационных исследований.

Главный инженер



А.М. Зеленин



№ 409909

D 13.05.15

Методика анализа и интенсификации режимов функционирования самотечных систем водоснабжения и водоотведения, а также ее программная реализация в виде вычислительного комплекса АНГАРА-ВК внедрена в ВОДОКАНАЛЕ г. Тбилиси (Грузия). Программный комплекс позволяет оперативно рассчитывать наполнение и скорости движения воды и стоков в трубопроводах из различных материалов, коллекторах различного сечения, открытых каналов с различными откосами и облицовкой при различных нагрузках и режимах поступления стоков от абонентов. При этом моделируются возможные режимы переполнения самотечной системы и выхода стоков на поверхность земли. При сопоставлении расчетных и фактических наполнений в колодцах систем водоотведения и глубин в открытых каналах можно оперативно определять места образования засоров, степень заиливания и зарастания коллекторов и каналов. Методика и программный комплекс будут использоваться в системе диспетчерского управления при анализе последствий от различных коммутаций в системе водоснабжения и водоотведения, а также при анализе решений по их развитию и реконструкции. Методические и алгоритмические подходы разработаны к.т.н. Р.В.Чупиным в ходе его диссертационных исследований.

Директор по учету и развитию активов, к.т.н.

В.В.Шлафман

სსს კორპორაცია "საქართველო ელექტროსისტემა"

GEORGIAN WATER AND POWER LTD

მის: 0179 თბილისი, მ. ყიბტიყას 1 მუხანზვანი №33
ელ-ფოსტა: info@georgianwater.com

ტელ: +995 (32) 293 11 11; ფაქსი: +995 (32) 298 26 07
www.georgianwater.com



Муниципальное унитарное предприятие
«Водоканал» г. Иркутска

664081, г. Иркутск, ул. Станиславского, 2
Телефон: (3952) 21-47-99
Сервисный центр: (3952) 21-46-46
Факс: (3952) 21-46-45
E-mail: secretar@irkvkkx.ru
www.irkvkkx.ru

17.04.2018 № 21-18-02069

На № _____ от _____

СПРАВКА

О применении результатов диссертационных исследований Р.В. Чупина в практике эксплуатации и проектирования систем водоснабжения и водоотведения г. Иркутска

Вычислительный комплекс Трасе-VK внедрён в МУП «Водоканал» г. Иркутск и был использован при разработке программы комплексного развития коммунальной инфраструктуры, схемы водоснабжения и водоотведения г. Иркутск на период 2011 -2025 гг. Схема утверждена и принята к исполнению. Программный комплекс позволяет оперативно рассчитывать наполнение и скорости движения воды и стоков в трубопроводах из различных материалов, коллекторах различного сечения, открытых каналах с различными откосами и облицовкой при различных нагрузках и режимах поступления стоков от абонентов. При этом моделируются возможные режимы переполнения самотечной системы и выхода стоков на поверхность земли. При сопоставлении расчётных и фактических наполнений в колодцах систем водоотведения и глубин в открытых каналах можно оперативно определять места образования засоров, степень заиливания и зарастания коллекторов и каналов. Методика и программный комплекс будут использоваться в системе диспетчерского управления при анализе последствий различных переходных процессов в системах водоснабжения и водоотведения, а также при анализе решений по их развитию и реконструкции. С помощью предлагаемых методик и программ проведены поверочные расчёты проектов развития систем водоснабжения и водоотведения, проведена их корректировка и получены обоснованные решения для инвестиционных программ МУП «Водоканал». В дальнейшем, предлагаемые методические разработки и программный комплекс будут применяться при выдаче технических условий на подключение новых абонентов к сетям водоснабжения и водоотведения. Применение программного комплекса Трасе-VK при обосновании перспективной схемы водоснабжения и водоотведения г. Иркутска по сравнению с существующими технологиями проектирования согласно СП 32.13330.2012 оказалось эффективнее на 98 861.0 тыс. руб.

Методические и алгоритмические подходы разработаны к.т.н. Р.В. Чупиным в ходе его диссертационных исследований.

Главный инженер



А.В. Куртин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016615463

TRACE-VK

Правообладатели: *Мелехов Евгений Сергеевич (RU), Чупин Виктор Романович (RU), Чупин Роман Викторович (RU)*

Авторы: *Мелехов Евгений Сергеевич (RU), Чупин Виктор Романович (RU), Чупин Роман Викторович (RU)*

Заявка № 2016611275

Дата поступления 12 февраля 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 мая 2016 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев