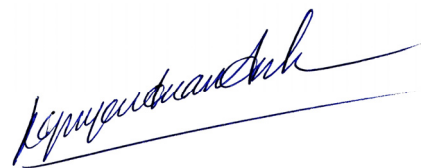


На правах рукописи



НГУЕН ТУАН АНЬ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ СХЕМ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза – 2016

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Иркутский Национальный исследовательский
технический университет»

Научный руководитель: **Чупин Роман Викторович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Иркутский Национальный исследовательский технический университет»

Официальные оппоненты: Терехов Лев Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и гидравлики;

Чижи́к Константин Иванович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», доцент кафедры водоотведения и водной экологии

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (СИБСТРИН)»

Защита диссертации состоится «25» марта 2016 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, ПГУАС, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/>.

Автореферат разослан « » 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бикунова
Марина Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшими для жизнеобеспечения современного города являются системы водоотведения бытовых, промышленных и поверхностных сточных вод. История проектирования и строительства этих систем насчитывает несколько тысячелетий. Тем не менее, только XXI век необходимо рассматривать как век бурного развития городов и городских агломераций, в структуре которых важнейшее место занимают системы водоотведения. Эти системы являются крупными потребителями труб из различных материалов, электроэнергии и энергосилового оборудования. В то же время, проведенный анализ их состояния и режимов функционирования показал, что многие участки перегружены, работают в режиме размывающих скоростей, другие недогружены и в них происходит накопление осадков. В период интенсивных дождей трубопроводы и колодцы систем поверхностного водосбора и ливневой канализации переполняются, приводя к подтоплению проезжей части, переходов, подвалов зданий и других инженерных сооружений. Основными причинами их неудовлетворительного состояния и надежности являются недостаточно обоснованные решения при выборе структуры и параметров сетей и сооружений, не эффективные технологии эксплуатации, не своевременная замена и реконструкция. Это, в свою очередь, связано с отсутствием комплексных подходов и методов расчета потокораспределения и оценки надежности, оптимизации проектных решений и анализа поведения системы водоотведения в экстремальных условиях, которые могут возникнуть в будущих периодах ее функционирования. В этой связи возникает необходимость в совершенствовании теории и методологии расчета, оптимизации и управления развитием систем водоотведения с учетом требований надежности, сейсмостойкости, экологической безопасности, динамики развития и экономики рыночных механизмов. В представленной диссертации обобщен опыт работы в области моделирования и оптимизации развивающихся систем водоотведения и впервые предложена методика обоснования структуры и параметров перспективных схем развития систем водоотведения, с учетом надежности и сейсмостойкости.

Степень разработанности диссертационных исследований. В отечественной и зарубежной литературе представлено множество различных моделей и методов оптимизации систем водоотведения, но в большинстве они предназначены для обоснования параметров новых объектов водоотведения и не направлены на повышение их надежности, сейсмостойкости и режимной управляемости. В проектной практике эта проблема до сих пор решается путем сопоставления двух – трех заранее намеченных вариантов.

Целью работы является разработка методики оптимизации реконструкции и развития систем водоотведения бытовых, промышленных и ливневых сточных вод и

повышение их надёжности, сейсмостойкости и режимной управляемости.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе рассмотрены и решены следующие задачи:

1. Математическая постановка задачи оптимизации структуры и параметров реконструируемых и развивающихся систем водоотведения с учетом их надежности и сейсмостойкости, развитие методики избыточных проектных схем;
2. Оценка критериальной функции, области допустимых значений, обоснование и выбор метода оптимизации реконструкции проектируемых и развивающихся систем водоотведения;
3. Разработка методики оптимизации существующих и реконструируемых систем водоотведения с учетом их надёжности и сейсмостойкости;
4. Алгоритмизация и программная реализация предлагаемой методики оптимизации;
5. Исследование эффективности методики оптимизации при обосновании перспективной схемы развития системы водоотведения на примере городов Иркутской области.

Научная новизна работы:

1. Впервые сделана постановка комплексной задачи оптимизации реконструируемых и развивающихся систем водоотведения с учетом их надежности и сейсмостойкости;
2. Исследована задача оптимизации и теоретически реконструируемых и развивающихся систем водоотведения, обосновано ее решение для новых систем в виде разветвленных структур и кольцевых структур;
3. Предложена и разработана методика оптимизации систем водоотведения с учетом надежности транспортирования стоков, сейсмостойкости сооружений и экологической безопасности территории;
4. Показана эффективность предлагаемой методики оптимизации систем водоотведения и определено ее место в задачах формирования перспективных схем развития систем водоотведения городов и населенных мест.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования заключается в следующих положениях:

1. Показана экономическая целесообразность при реконструкции и развитии систем водоотведения, перехода к кольцевым структурам, когда часть стока будет транспортироваться по существующим коллекторам, другая по новым разгрузочным кольцевым коллекторам;

2. На численных примерах показано, что учет при проектировании систем водоотведения сейсмических воздействий и количественных показателей надежности оказывают существенное влияние на выбор их основных трасс и структуры сооружений;

3. Кольцевые структуры систем водоотведения повышают не только их надежность и сейсмостойкость, но и обеспечивают при эксплуатации маневренность и режимную управляемость.

4. Разработанные в работе методические положения, методы и средства позволяют повысить обоснованность принимаемых решений в краткосрочных и долгосрочных периодах развития систем водоотведения. Предлагаемые методы и программные средства способствуют проектировщикам оперативно анализировать и принимать решения по выбору трассы и параметров новых и реконструируемых систем водоотведения с учетом их надежности, сейсмостойкости.

Методология и методы диссертационного исследования. Теория систем, методы математического моделирования, гидравлика и гидродинамика, теория графов, теория гидравлических цепей, методы оптимизации, методы решения линейных и нелинейных уравнений, теория надежности и математическая статистика, методы вычислительной математики, алгоритмизация и программная реализация.

Положения, выносимые на защиту.

1. Постановка задачи оптимизации реконструируемых и развивающихся систем водоотведения и ее исследование;

2. Методы оптимизации новых, реконструируемых и развивающихся систем водоотведения разветвленной и многоконтурной структуры;

3. Методика оптимизации систем водоотведения с учетом их надежности и сейсмостойкости;

4. Методика повышения управляемости систем ливневой, промышленной и хозяйственно – бытовой канализации за счет строительства кольцующих напорных и безнапорных коллекторов, перекачивающих насосных станций и шиберных устройств.

Достоверность результатов исследований. Обеспечивается корректной математической постановкой задачи оптимизации систем водоотведения с учетом реальных физических процессов движения стоков, законов сохранения массы и энергии. Подтверждается так же многочисленными расчетами и сопоставлениями их с замерами реальных режимов работы систем водоотведения.

Апробация работы и публикации. Результаты диссертационных исследований опубликованы в 13 печатных работах (из них 3 работы входят в список изданий, рекомендованных ВАК) и обсуждались: на ежегодной всероссийской научно–практической

конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (Томск 2010, 2011, 2012гг.); на всероссийском фестивале науки «Изобретатель XXI века» (Иркутск, сентябрь 2012г.); на международной научно-практической конференции: «Водоснабжение, Водоотведение, Очистка сточных вод» (Санкт-Петербург, 24–28 ноября 2014г.); на ежегодной научно-практической конференции «Вода – это жизнь» (Иркутск 2010, 2015гг.); на выставке «Транспорт и дороги Сибири. Спецтехника. Сибавтосервис» (Иркутск, 22–24 апреля 2015г.); на международной научно-практической конференции: «Ресурс энергосберегающих технологий в жилищно-коммунальном хозяйстве и строительстве» (Иркутск, 03–06 сентября 2015г.).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка, включающего 174 наименования и 3 приложения. Общий объем диссертации составляет 211 страниц машинописного текста, включая 103 рисунка, 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, определены научная новизна, результаты, выносимые на защиту, практическая значимость работы и личный вклад автора, аннотируются основные положения работы.

В первой главе проведен анализ развития методологии моделирования и оптимизации систем водоотведения, сделана оценка их технического состояния, обозначен уровень оптимизации и анализа режимов функционирования, выделены основные свойства, характеризующие современные системы водоотведения. Произведена структуризация задач моделирования и оптимизации систем водоотведения, дана содержательная постановка задачи комплексной оптимизации развивающихся систем водоотведения.

Системы водоотведения (СВО) в современных городах, населенных пунктах и промышленных предприятиях представляют сложные инженерные сооружения, состоящие из множества самотечных и напорных трубопроводов, насосных станций, регулирующих резервуаров, перепадных колодцев, быстротоков и других сооружений. Проведенный анализ показал, что для большинства из перечисленных сооружений износ составляет от 60% и выше. При этом существующие СВО характеризуются низкой автоматизацией и диспетчеризацией, высоким уровнем энергопотребления и значительной аварийностью. В то же время, они являются непрерывно развивающимися системами, что требует постоянного увеличения их пропускной способности за счет устройства дополнительных насосных станций, перекладки трубопроводов на большие диаметры или сооружение новых параллельных линий. Такие мероприятия, особенно в черте города, нежелательны, хотя

иногда и неизбежны. Поэтому возникает задача выбора наиболее рациональных способов реконструкции, которые бы обеспечили минимальные затраты в их реализацию и дальнейшую эксплуатацию.

Анализ функционирования существующих СВО показал, что основными причинами их неудовлетворительной надежности являются недостаточно обоснованные решения при выборе структуры и параметров сетей. Это, в свою очередь, связано с отсутствием эффективных методов расчета СВО, в том числе и с учетом требований надежности и сейсмостойкости.

Важнейшие работы по оптимизации систем водоотведения с привлечением современных методов вычислительной математики (Монте–Карло, Лагранжа, Беллмана и др.) выполнены отечественными учеными: Н.Ф. Федоров, Н.У. Койда, В.В. Найденко, Е.И. Чечик, А. Куличевский, Г.К. Шацко, И.А. Абрамович, Н.И. Голик, В.С. Ленденева и др.

Заслуживают особого внимания работы по технико–экономическому анализу и надежности систем водоотведения: М.И. Алексеева, Ю.А. Ермолина, С. Ю. Игнатчик, Е. М. Гальперина, А.К. Стрелкова, А.К. Кузина, В.С., Ю.М. Ласкова и др., а также работы зарубежных ученых: Грей, П. Джеймсон, В.С. Хубер (Америка), Б. Баланджи, П. Мариаппан, Н. Шаха (Индия), Л. Чабан, С. Станко (Словакия), М. Маурисио–Иглесисс (Дания), Н. Бург, Р. Холте (Канада), Д. Соуса, А. Рибейро (Португалия), Ж. Холаса (Чехия), Д. Гиральдо (Колумбия), Г. Раковитеану, С. Перзу, Л. Строя (Румыния), Б. Жозеф–Дюран, С. Сагер (Каталония) и др.

В этих работах широко представлены математические модели и методы анализа и оптимизации решения многих практических задач управления потоками в системах водоотведения, обоснования их параметров и способов реконструкции. Сложилась целая наука – «Гидроинформатика». Развиваются геоинформационные системы и гидродинамические модели SWWMM, MIKE URBAN, Sewer GEMS и др. Однако, многие методические подходы, методы и программы, предлагаемые перечисленными авторами, в основном, ориентированы на моделирование и проектирование новых систем водоотведения и не учитывают надежность и сейсмостойкость и, следовательно, требуют дальнейшего совершенствования и развития.

Во второй главе рассмотрены вопросы математического моделирования систем водоотведения. Обобщены и приведены к удобному виду формулы расчета установившегося равномерного и неравномерного движения стоков в самотечном и напорном режимах эксплуатации, с учетом времени транспортирования стоков и возможного выхода их на поверхность земли.

Предложена общая схема расчета и моделирования режимов движения хозяйственно бытовых, промышленных и ливневых стоков в самотечных и напорных коллекторах. Эта схема следующая:

1. Определяются расчетные расходы стоков по трубопроводам и коллекторам;
2. Для каждого расчетного участка сети рассчитываются расходы стоков при работе коллектора полным сечением:

$$q_i = q_n = \frac{0,314}{N} \cdot d^{2,667} \cdot I^{0,5}, \quad (1)$$

где N – коэффициент шероховатости трубопровода; d – диаметр трубопровода, м; I – гидравлический уклон.

3. Если расчетные расходы для всех коллекторов будут меньше, чем расходы для полного сечения, то в сети будет наблюдаться самотечный режим. В этом случае вычислительный процесс организуется от абонентов (висячих вершин дерева) в направлении КНС или КОС (т.е. к корню дерева). Для определения величины наполнения в трубопроводах, скорости движения стоков, построения кривых свободной поверхности достаточно одного прохода от висячих вершин до корня дерева.

4. Если, хотя бы для одного участка сети расчетный расход будет больше расхода для полного сечения, то установится напорный или напорно–безнапорный режим движения стоков. В этом случае, после прямого хода, организуется вычислительный процесс от корня дерева в направлении, к его висячим вершинам, что позволяет провести корректировку линии свободной поверхности стоков и определить участки сети с подпором.

На рисунке 1 показан пример такого гидравлического расчета и указаны все кривые сопряжения.

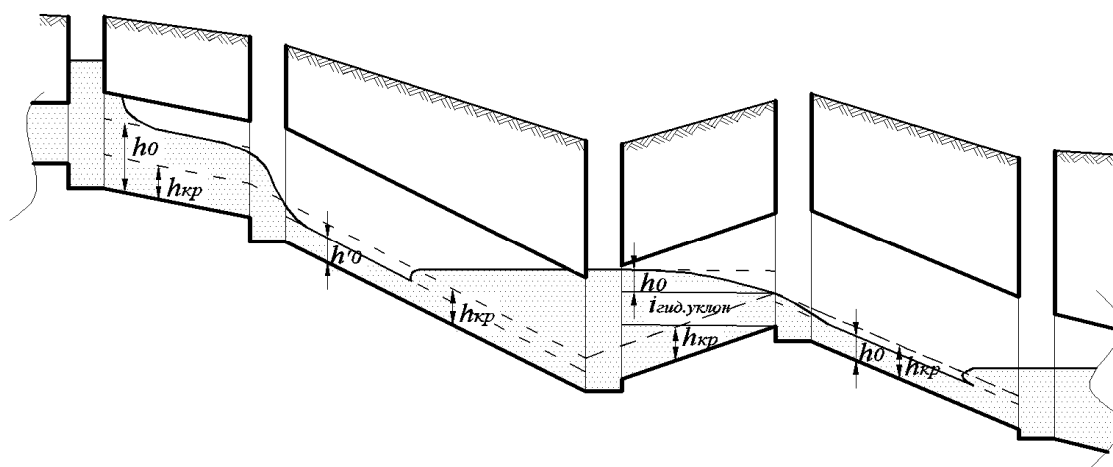


Рисунок 1 – Расчет свободной поверхности стоков в самотечном коллекторе

В третьей главе дана математическая постановка задачи оптимизации развивающихся систем водоотведения, исследована целевая функция и определена область

допустимых значений. Для решения задачи развития и обоснования перспективных схем водоотведения предложена методика, основанная на предварительном построении избыточных проектных схем и поиске на них максимального потока минимальной стоимости (метод Форда Л.Р., Фалкерсона Д.Р.). Показана эффективность предлагаемой методики оптимизации на примерах расчета реальных существующих, новых и реконструируемых систем водоотведения и отдельных самотечных коллекторов.

Как показали проведенные исследования, критерий оптимизации в виде приведенных расчетных затрат, в основном направлены на минимизацию единовременных капиталовложений. Хотя известно, что эксплуатационные затраты за жизненный цикл систем водоотведения превышают единовременные капиталовложения в 10–20 раз. Очевидно, при обосновании проекта реконструкции и развития систем водоотведения следует учитывать затраты всего жизненного цикла системы. Для сети водоотведения, состоящей из n участков и неизменных эксплуатационных затратах за исследуемый временной период T :

$$C = \sum_{i=1}^n \left(C_i^{TP} + \frac{T}{(1+r)^T} \cdot C_{ЭКСi}^{TP} \right) + \sum_{i=1}^n \left(C_i^{HC} + \frac{T}{(1+r)^T} \cdot (C_{ЭКСi}^{HC} + C_{ЭЛKi}) \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{Di}}{(1+r)^T} \right), \quad (2)$$

где: C_I^{TP}, C_{II}^{HC} – затраты, связанные с проектированием, с приобретением оборудования (труб, механизмов, средств автоматизации и диспетчеризации), с строительством и монтажом системы водоотведения; $C_{ЭКС}^{TP}, C_{ЭКС}^{HC}$ – эксплуатационные затраты, состоящие из затрат на оплату труда основных производственных рабочих, отчислений на социальное страхование, амортизационных отчислений на полное восстановление, ремонтного фонда, цеховых и общеэксплуатационных расходов (накладных), прочих прямых расходов (рассчитываются согласно документу: «Методика планирования, учета и калькулирования себестоимости услуг жилищно–коммунального хозяйства», утвержденной Постановлением Госстроя РФ № 9 от 23.02.99 г); $C_{ЭЛК}$ – годовые затраты электроэнергии на перекачку сточной жидкости; C_D – затраты на разборку и утилизацию отслужившего свой срок оборудования; T – время жизненного цикла (принимается временной интервал, соответствующий оборудованию с наибольшим сроком службы); r – норма дисконта (величина ставки рефинансирования ЦБ РФ), играет роль базового уровня, в сравнении с которым оценивается экономическая эффективность варианта проекта. Следует отметить, для оборудования с меньшим сроком службы единовременные капиталовложения C_I^{TP}, C_{II}^{HC} увеличиваются на коэффициент кратности в отношении оборудования с наибольшим сроком службы.

В работе для конкретизации единовременных и эксплуатационных затрат использована информация, приведенная в укрупненных нормативах цен строительства: НЦС

81–02–14–2012. «Сети водоснабжения и канализации», в документе: «Сметные нормы и расценки на новые технологии в строительстве», в прайс–листах различных производителей и строительных компаний. После обработки информации, представленной в данных документах, получены (с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9$) функции вида, тыс. руб.:

$$C_I^{TP} = (a \cdot \Gamma^\alpha \cdot d_i + b \cdot \Gamma^\beta) \cdot L_i, \quad (3)$$

где: Γ – глубина заложения трубопровода, м; d_i – диаметр трубопровода i , м; a, b, α, β – коэффициенты, которые зависят от материала труб, от состояния грунтов и способов строительства и получены для I –го квартала 2015 г.; L_i – длина участка i , км. С учетом дефляторов стоимости приводятся к соответствующему году строительства и эксплуатации системы водоотведения.

С учетом полученной формулы (3), можно построить функцию стоимости прокладки самотечных коллекторов в зависимости от расхода транспортируемой сточной жидкости. Для этого воспользуемся гидравлической зависимостью диаметра коллектора, работающего полным сечением, от расхода стоков (1):

$$d_i = \frac{N^{0,375}}{0,6477 \cdot I_i^{0,1875}} \cdot q_i^{0,375}, \quad (4)$$

где q_i – расчетный расход на участке i , который вычисляется:

$$q_i = q_{cp, i} \cdot K_{общ, i},$$

где $q_{cp, i}$ – средний секундный расход на участке i , $м^3 / с$; $K_{общ, i}$ – общий коэффициент неравномерности на участке i , полученный на основании фактических или прогнозных графиков поступления и движения стоков в системе водоотведения.

Подставляя выражение (4) в (3), получим:

$$C_I^{TP} = \left(a \cdot \Gamma^\alpha \cdot \frac{N^{0,375}}{0,6477 \cdot I_i^{0,1875}} \cdot q_i^{0,375} + b \cdot \Gamma^\beta \right) \cdot L_i. \quad (5)$$

При проектировании новых сетей водоотведения рекомендуется минимальный уклон принимать:

$$I_i = \frac{\varphi}{1000 \cdot d_i}. \quad (6)$$

Следовательно,

$$d_i = 6,655 \cdot N^{0,411} \cdot q_i^{0,411}. \quad (7)$$

Соответственно, стоимость, тыс. руб.:

$$C_i^{TP} = (6,655 \cdot a \cdot \Gamma^\alpha \cdot N^{0,411} \cdot q_i^{0,411} + b \cdot \Gamma^\beta) \cdot L_i. \quad (8)$$

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

$$C_{\text{ЭКС}i}^{TP} = a \cdot L_i^\alpha + b \cdot L_i \cdot d_i^\beta, \quad (9)$$

Или

$$C_{\text{ЭКС}i}^{TP} = a \cdot L_i^\alpha + b \cdot L_i \cdot \left(\frac{N^{0,375}}{0,6477 \cdot I_i^{0,1875}} \cdot q_i^{0,375} \right)^\beta. \quad (10)$$

Так же получены стоимости проектирования и строительства насосных станций, с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9$ в виде функций следующего вида, тыс. руб.:

$$C_{\text{П}i}^{nc} = (a \cdot H + b) \cdot q_i^{(\alpha \cdot H + \beta)}. \quad (11)$$

Годовые эксплуатационные затраты по КНС, тыс. руб. в год:

$$C_{\text{ЭКС}}^{nc} = 2794,54 \cdot q^{0,1352} + (3,277 \cdot H + 562,5) \cdot q^{0,4948 - 0,011 \cdot H}. \quad (12)$$

Стоимость годовых затрат электроэнергии насосных установок, тыс. руб. в год:

$$C_{\text{ЭЛК}} = z_{\text{э}} \cdot \frac{n_{\text{э}} \cdot H \cdot q_i}{367,2 \cdot \eta}, \text{ или } C_{\text{ЭЛК}} = 108 \cdot z_{\text{э}} \cdot H \cdot q_i, \quad (13)$$

где: $z_{\text{э}}$ – стоимость электроэнергии, руб. за Квт час; $n_{\text{э}}$ – число часов использования нагрузки, для года $n_{\text{э}} = 8768$ час; η – коэффициент полезного действия (К.П.Д) насосных агрегатов; H – действующий напор (напор насосной станции, м); q_i – расход сточной жидкости, м³/с.

В работе для различных материалов и способов производства работ получены численные значения коэффициентов в формулах (4) – (13).

Как видно из рисунка 2, функция (2) имеет выпуклый вверх характер.

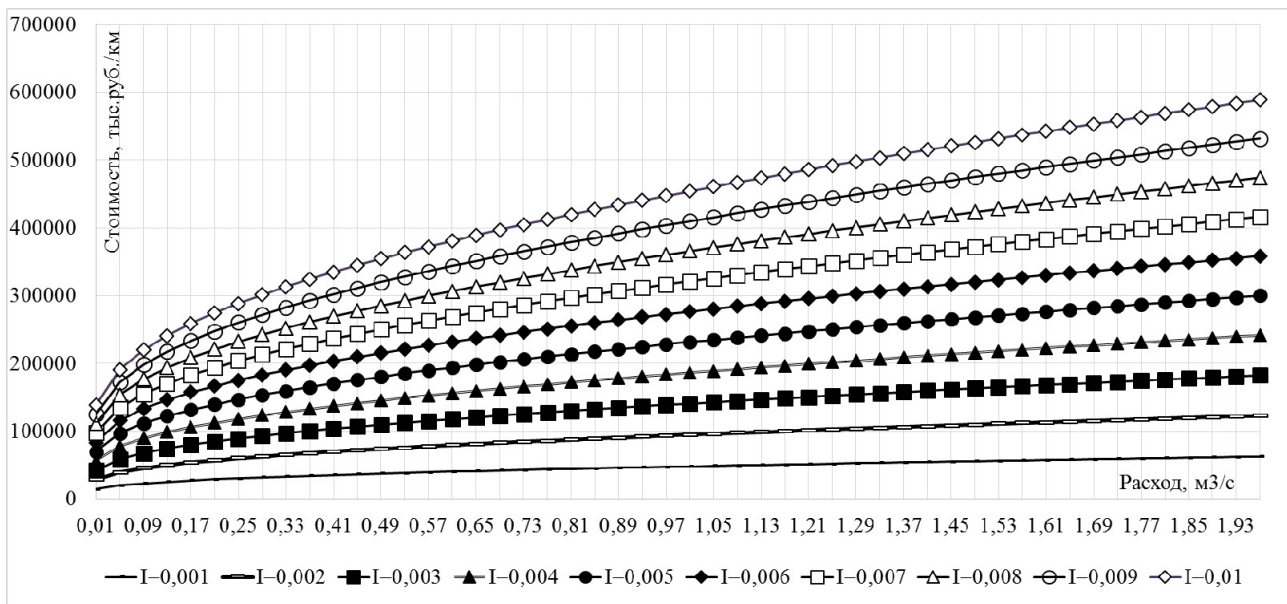


Рисунок 2 – Графическое представление функции затрат жизненного цикла в зависимости от величины потока сточной жидкости

С учетом полученной функции затрат, можно графически интерпретировать решение задачи оптимизации структуры и параметров системы водоотведения. На рисунке 3 представлен функционал для системы водоотведения, состоящей из двух параллельных участков. Функционал рассекается плоскостью, соответствующей условию материального баланса в виде: $X_1 + X_2 = Q$. Эта плоскость на рисунке 3 отсекает в координатах X_1 и X_2 значения, равные $X_1 = Q$ и $X_2 = Q$. В то же время, на функционале эта плоскость формирует две точки минимума затрат (два экстремума), это точки C_1 и C_2 , которые соответствуют участку 1 или 2, т.е. структуре в виде дерева. Для данного примера оптимальным будет участок 1. Все кольцевые решения, например, a , b на рисунке 3 будут более затратными. Такое утверждение справедливо лишь для новых сетей и сооружений. При увеличении нагрузки $Q_1 + Q_2$ для реконструируемых участков функция затрат будет дискретной и не обязательно выпуклой. На рисунке 4 проиллюстрировано это утверждение.

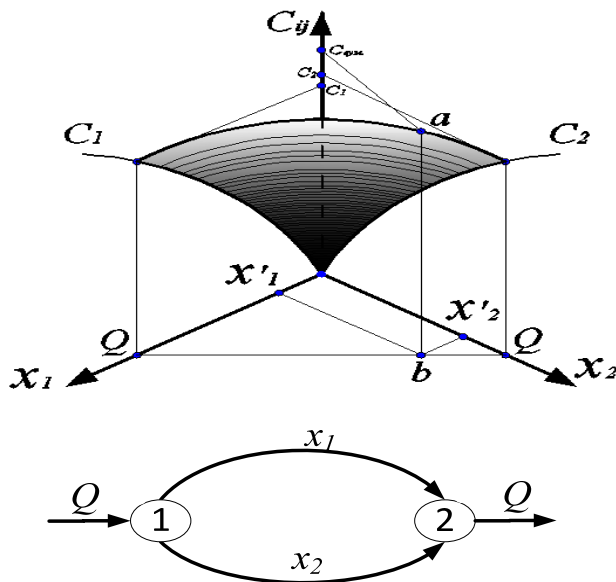


Рисунок 3 – Интерпретация задачи оптимизации новых сетей водоотведения

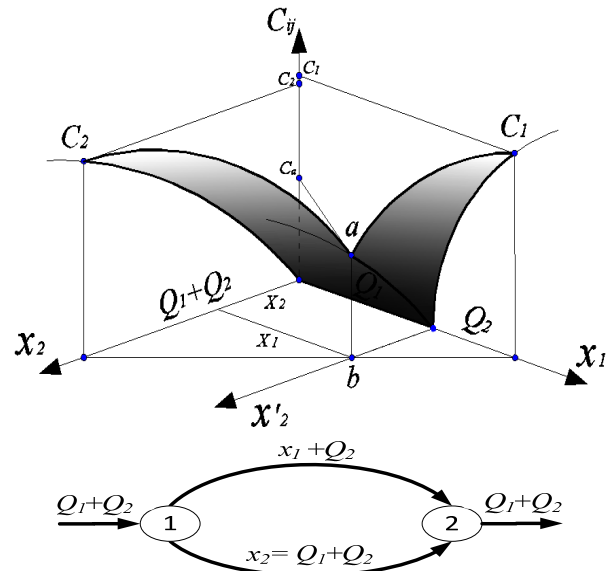


Рисунок 4 – Интерпретация задачи оптимизации развивающихся систем водоотведения

В работе задачу оптимизации систем водоотведения предлагается решать на основе предварительно построенных избыточных схем, которые формируются путем наложения нескольких, заранее проработанных вариантов развития систем водоотведения. На основе избыточной схемы составляется транспортная сеть, на которой решается задача поиска максимального потока минимальной стоимости (метод Форда–Фалкерсона). При этом ограничения на пропускные способности существующих коллекторов назначаются из условия не заиливающих скоростей (нижние ограничения) и недопустимости работы самотечных коллекторов в напорном режиме (верхние ограничения). Стоимость единицы потока определяется по каждому участку сети на основе стоимостных данных по капиталовложениям и эксплуатационным затратам. В результате оптимизации определяются трасса и параметры новых участков сети, варианты реконструкции существующих коллекторов (перекладка открытым способом, или бес канальная перекладка, или прокладка параллельного трубопровода).

Задача в этом случае формируется следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n C_i \cdot K_{\text{общ}, i} \cdot x_i \rightarrow \min, \text{ при } \underline{g}_i \leq x_i \leq \bar{g}_i, A \cdot x = q_{\text{ср}}, \quad (14)$$

где C_i – стоимость единицы потока; x_i – искомый поток на ветви избыточной или транспортной сети; A – матрица смежности узлов и участков схемы; $q_{\text{ср}}$ – вектор средних секундных расходов стоков, поступающих в системе водоотведения; $\underline{g}_i, \bar{g}_i$ – нижние и верхние ограничения на поток. При этом поток должен быть больше потока, соответствующего не заиливающим скоростям и меньше потока для полного сечения.

Работа метода начинается с выбора кратчайшего маршрута от S к t , который соответствует минимальному значению сумме удельных величин стоимости потока. Затем величина потока увеличивается с помощью систематического поиска всех возможных маршрутов от S к t . Как только будет найдена одна из таких цепей, поток вдоль нее увеличивается до максимального значения. Алгоритм заканчивает работу и дает максимальный поток, если нельзя найти ни одну цепь, увеличивающую поток. При этом граф распадается на два несвязных подграфа. Метод Форда – Фалкерсона относится к методам целочисленного и линейного программирования. Поэтому выпуклая вверх стоимостная функция (2) заменяется кусочно–линейной. Для полиэтиленовых труб на рисунке 5 такие преобразования показаны. При этом в избыточной и транспортной сети каждый расчетный участок заменяется на два параллельных участка (или на k участков, в зависимости от количества линий аппроксимации) с соответствующими ограничениями на потоки. Этим участкам приписываются соответствующие удельные стоимости потока (рисунок 6).

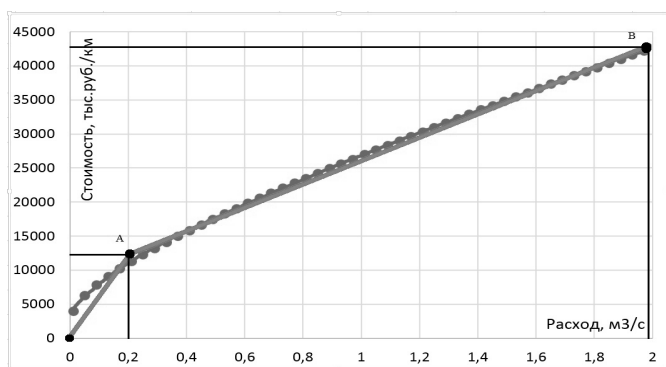


Рисунок 5 – Кусочно–линейная аппроксимация функции (15) стоимости строительства трубопроводов от расхода сточной жидкости

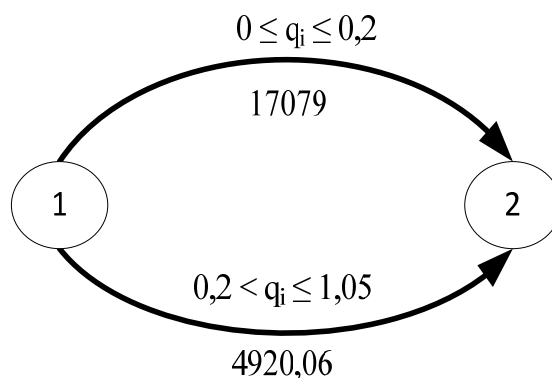


Рисунок 6 – Граф аппроксимации выпуклой функции затрат

Для новых участков сети, ее максимальная пропускная способность не ограничивается, либо ограничивается исходя из аппроксимации выпуклой функции стоимости затрат.

Рассмотрим изложенную выше методику применительно к решению задачи оптимальной реконструкции существующей системы водоотведения, представленной на рисунке 7 жирными линиями. После проведенных гидравлических расчетов оказалось, что участки 6–9, 8–9, 9–12 работают в напорном режиме (рисунок 8). Следовательно, требуется реконструкция. На рисунке 9 представлена избыточная схема реконструируемой системы водоотведения, а на рисунке 10 показана ее транспортная сеть. После решения задачи (14) оптимальным оказался вариант схемы, представленный на рисунке 11, согласно которому требуется параллельная прокладка коллектора на участке 6–9 и нового участка 8–11.

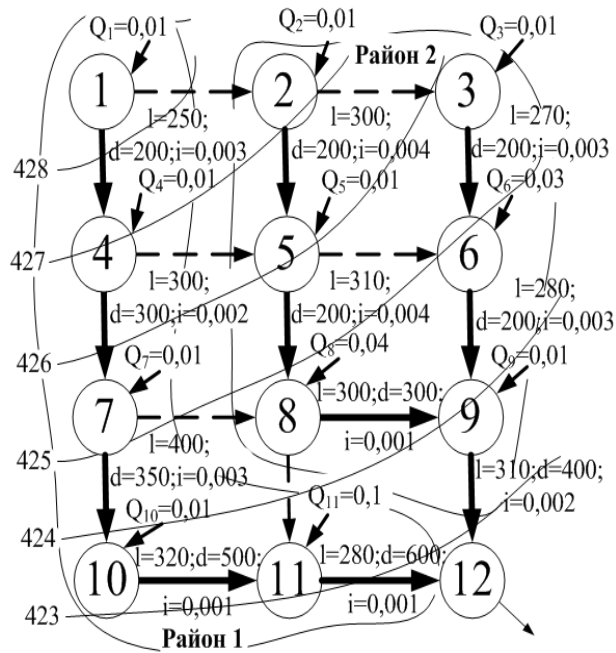


Рисунок 7 – Существующая схема системы водоотведения

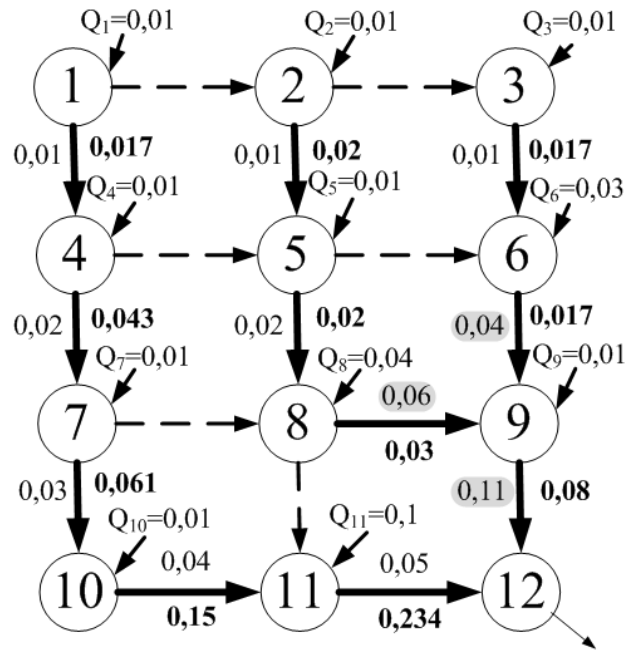


Рисунок 8 – Существующая схема системы водоотведения с показанием перегруженных участков

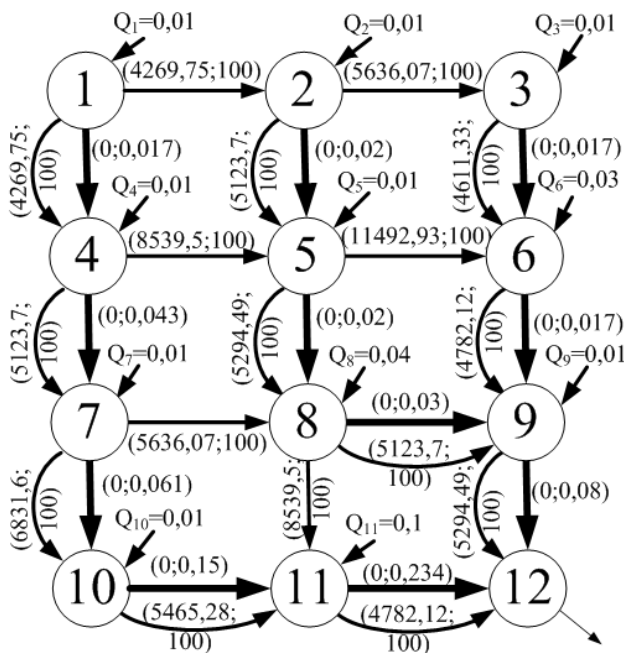


Рисунок 9 – Избыточная схема реконструирующей системы водоотведения

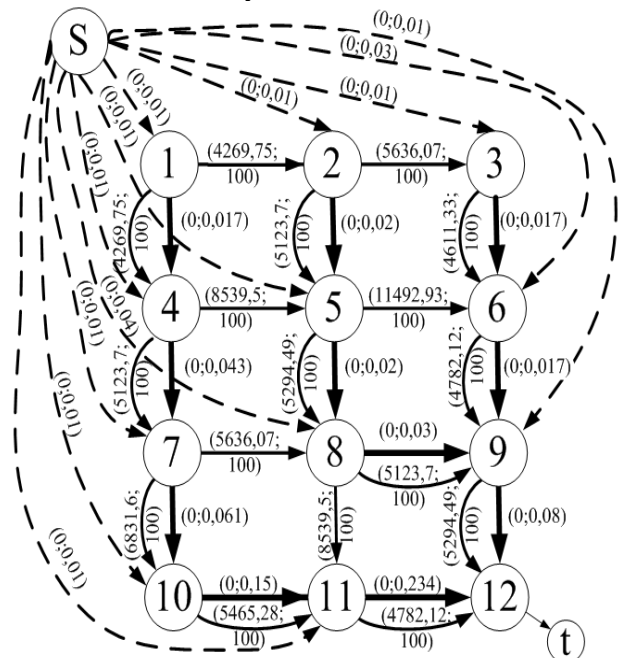


Рисунок 10 – Транспортная сеть реконструируемой системы водоотведения

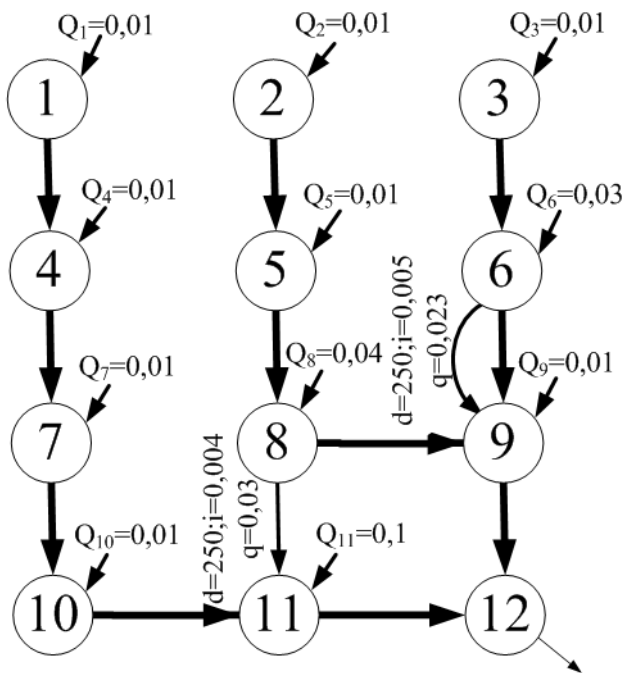


Рисунок 11 – Оптимальная схема реконструируемой системы водоотведения

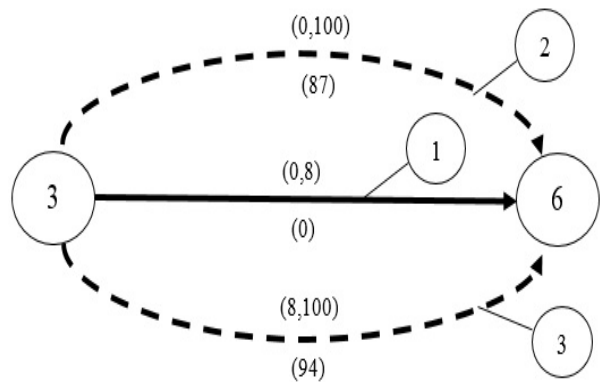


Рисунок 12 – Моделирование способов реконструкции существующего коллектора:
 1 – существующий
 2 – перекладка на больший диаметр
 3 – бесканальное расширение коллектора

Если одновременно требуется выбрать оптимальный способ реконструкции (открытый способ замены на больший диаметр, параллельная прокладка дополнительного трубопровода, бесканальный способ расширения существующего трубопровода и др.), то в транспортную сеть вводятся дополнительные участки со своими удельными стоимостями потоков (рисунок 12). При этом должны выполняться следующие принципы: диаметр последующего участка не должен быть меньше предыдущего, параллельный новый участок должен иметь диаметр не больше существующего, соединение должно быть «шелыга в шелыгу».

С помощью метода поиска максимального потока минимальной стоимости можно так же определять и наилучший способ реконструкции отдельных участков сети и самотечных коллекторов.

Встречаются случаи, когда переброска стоков из одного района в другой (или коллектор) возможна только в напорном режиме. Для рассмотрения такого варианта в транспортную сеть добавляются участки с двухсторонним движением сточной жидкости. В одном направлении поток будет перемещаться в самотечном режиме, в другом направлении его движение возможно будет только в напорном режиме, что потребует устройства насосной станции и напорного трубопровода.

В четвертой главе рассмотрены вопросы повышения надежности и сейсмостойкости систем водоотведения, исследована функция затрат, предложена на основе алгоритма поиска максимального потока минимальной стоимости методика оптимального синтеза систем

водоотведения с учетом их надежности и сейсмостойкости, показана ее эффективность на примерах расчета существующих, новых, реконструируемых систем водоотведения и отдельных самотечных коллекторов.

Вопросы повышения надежности и сейсмостойкости систем водоотведения являются актуальными и должны рассматриваться при разработке перспективных схем развития территорий и городов, а также в инвестиционных программах предприятий коммунального комплекса. В работе предлагается методика оптимизации структуры систем водоотведения, основанная на построении их избыточных схем и поиске максимального потока минимальной весовой функции (минимальной стоимости затрат жизненного цикла). Надежность оценивается количественным показателем – объемом неочищенных стоков, которые образуются за определенный интервал времени в результате возникновения аварий и их времени восстановления. Сейсмостойкость учитывается через увеличение интенсивности отказов в зависимости от бальности землетрясений и ориентации сейсмического воздействия. Алгоритмически, в предлагаемой ниже методике, это учитывается путем увеличения длины расчетных участков избыточной схемы.

Можно в качестве критерия надежности принять и объем осадков в трубопроводах, образующихся за определенный интервал времени (см. работы Башару Таофика), однако этот критерий в большей степени отражает эксплуатационную надежность. В работах Светланы Юрьевны Игнатчик (Санкт–Петербург) количественный критерий объема неочищенных стоков имеет следующий вид:

$$\Delta Q_{сбp} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \gamma_i \cdot t, \quad (15)$$

где $\Delta Q_{сбp}$ – объем стоков, m^3 , поступающих на территорию и в водоемы без очистки за время t (год); x_i – расчетный расход стоков на участке сети i , $i=1, \dots, n$, (m^3/c); n – количество расчетных участков системы водоотведения; $\gamma_i = \frac{\lambda_i^{yc}}{\mu_i^{yc}}$; $\lambda_i^{yc} = (17 \cdot \lambda_i^k + \lambda_i) \cdot l_i$; $\mu_i^{yc} = \frac{8760}{T_i^p}$, где l_i – длина участка сети i , км. λ_i^k – интенсивность заявок на ремонт и обслуживание колодцев (1/год); 17 – среднее количество колодцев на 1 км, λ_i – интенсивность отказов трубопроводов (1/год), зависит от диаметров трубопроводов; t – время эксплуатации системы водоотведения за год.

Трудоемкость ремонтных работ на сети (T_i), чел – часах, также зависит от диаметров трубопроводов.

Следует отметить, что при определении зависимости интенсивности отказов от диаметров трубопроводов требуется учитывать многообразие грунтовых, климатических

особенностей, особенностей распространения сейсмических волн по различным территориям. Необходимо собирать такую статистику и получать такие зависимости для каждого города или населенного пункта, для которого выполняются оптимизационные расчеты СВО.

В работах Гехмана А.С., Зайнетдинова Х.Х. на основе изучения статистического материала по отказам трубопроводных систем, при различных землетрясениях в различных городах, получены зависимости увеличения интенсивности отказов от ориентации сейсмического воздействия и их бальности (B) по шкале MSK–64:

$$K^{\alpha} = 0,08418 \cdot \sin(74,709 + \alpha) \cdot B^{2,6}. \quad (16)$$

Следует отметить, что при бальности меньше 4 сейсмические воздействия на трубопроводы не проявляются.

В настоящей работе рассматриваются и исследуются задачи максимизации надежности и оптимизации систем водоотведения за период ее жизненного цикла. В качестве метода оптимизации так же применяется методика поиска максимального потока минимальной стоимости (весовой функции) на избыточной сети проектируемой системы водоотведения.

В работе для различных материалов труб, диаметров трубопроводов (м), интенсивности отказов λ , выраженных в [1/км год], формула (15) представляется в следующем виде:

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

Графически эта зависимость для различных материалов труб представлена на рисунке 13 (при $l = 1$ км, $t = 1$ год и уклоне $0,001$).

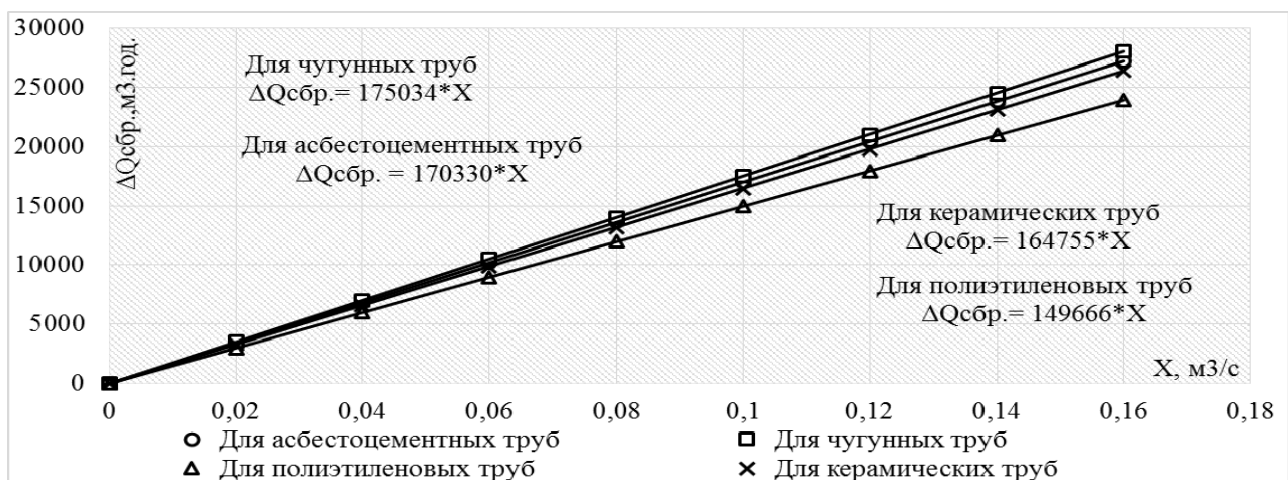


Рисунок 13 – Зависимости объемов аварийных стоков от их расхода по коллекторам сети водоотведения

Как видно из рисунка 13, полученные зависимости, близки к линейным. Следовательно, задачу максимизации надежности можно сформулировать следующим

образом. Требуется найти такую структуру сети и потоков, которые бы обеспечивали минимум функции вида:

$$\Delta Q_{сбp} = \sum_i^n a_i \cdot x_i \rightarrow \min, \text{ при } \underline{\underline{v_i}} \leq x_i \leq \overline{\overline{v_i}}, A \cdot x = q'_{cp}. \quad (18)$$

Задача минимизации затрат за жизненный цикл системы водоотведения формулируется следующим образом. Требуется найти такую структуру сети и потоков системы водоотведения, которая бы обеспечивала минимум затрат в строительство системы, в ее эксплуатацию и в предотвращение попадания аварийных неочищенных стоков на поверхность территории и в водоемы за период ее жизненного цикла:

$$\sum_{i=1}^n C(x_i) + T \cdot \sum_{i=1}^n C(a_i \cdot x_i) \rightarrow \min, \text{ при } \underline{\underline{v_i}} \leq x_i \leq \overline{\overline{v_i}}, A \cdot x = q'_{cp}. \quad (19)$$

В формуле (19), первое слагаемое – единовременные капиталовложение в строительство СВО, второе – эксплуатационные затраты, затраты на ликвидацию аварийных ситуаций с учетом мероприятий по очистке аварийных стоков за время жизненного цикла T (год).

В качестве примера, рассмотрим задачу обоснования надежной и сейсмостойкой структуры самотечной системы водоотведения. На рисунке 14 а представлена избыточная схемы проектируемой системы водоотведения, состоящей из 11 узлов поступления стоков и одного узла сброса. Сейсмическое воздействие в 9 баллов и его направление указано на рисунке 14 а большой стрелкой.

Сейсмические воздействия учитываются путем увеличения длины расчетных участков избыточной схемы, соответственно расположенных перпендикулярно сейсмическому воздействию в 6,7 раза, параллельно сейсмическому воздействию – в 24,6 раза. С учетом увеличенной длины в избыточной схеме (рисунок 14 б) строится транспортная сеть, которая представлена на рисунке 14 в.

В результате решения задачи (19), получена структура сети водоотведения, которая представлена на рисунке 14 г – без учета сейсмических воздействий и на рисунке 14 д – с учетом сейсмических воздействий. Как видно из рисунков, учет сейсмических воздействий оказывает существенное влияние на выбор структуры сети.

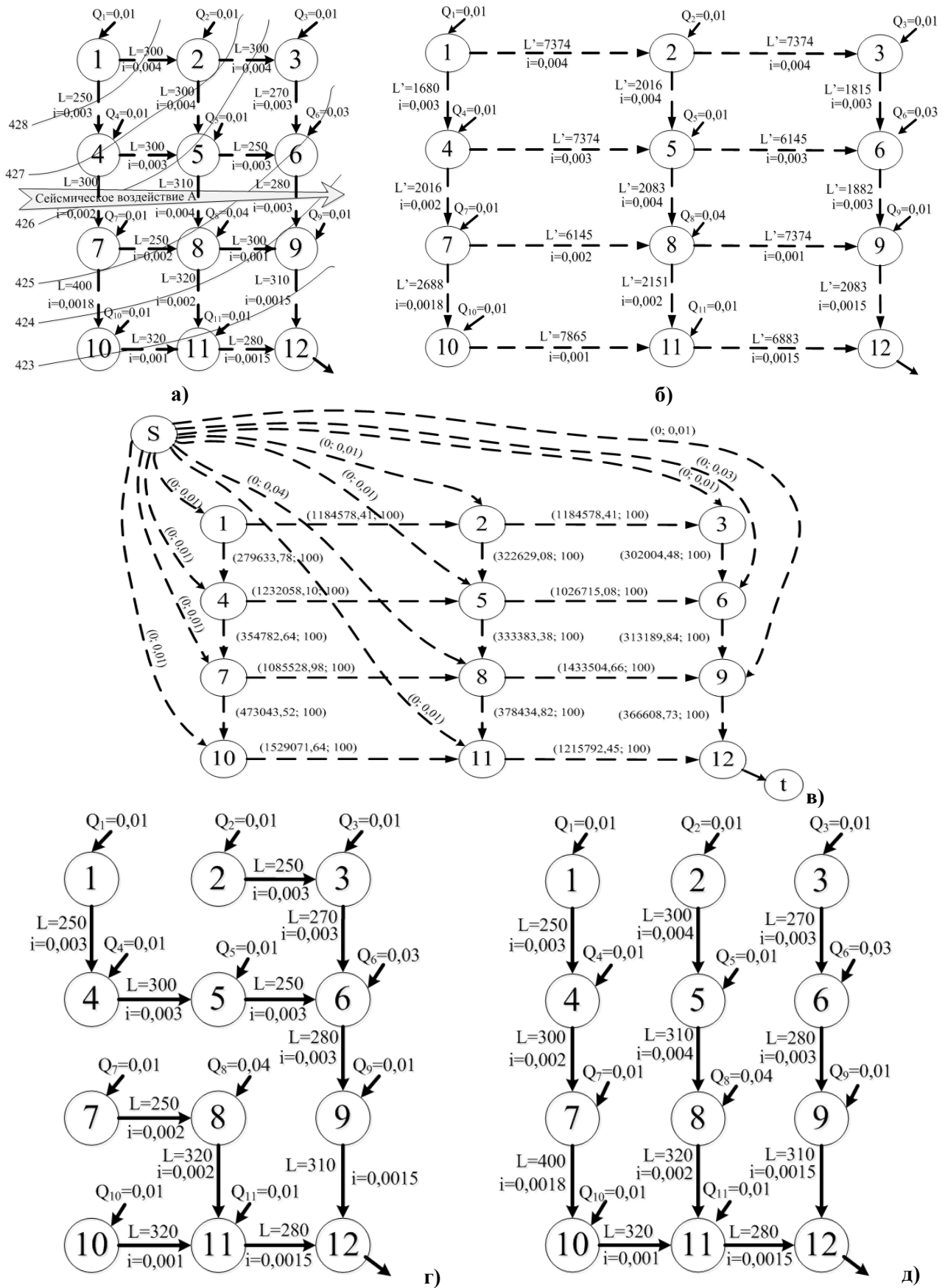


Рисунок 14 – Оптимизация проектируемой систем водоотведения с учетом надёжности и сейсмостойкости

Рассмотрим задачу минимизации затрат за жизненный цикл системы (19) на том же примере (рисунок 14 а). Пусть период эксплуатации составляет 50 лет, а стоимость эксплуатации системы водоотведения и очистки аварийных стоков ориентировочно равна 20 руб. за 1 м³ стоков. В результате решения задачи (19) оптимальная структура сети оказалась такой же, как и на рисунке 14 д. При этом суммарные затраты составили до 31 579,46 тыс. руб.

Следует отметить, что древовидные структуры систем водоотведения не исключают выход аварийных стоков на поверхность земли. Наиболее надежными являются кольцевые сети в виде параллельных разгрузочных коллекторов (рисунок 15 а) или коллекторов для переброски стоков в другие районы канализования (рисунок 15 в). Например, при выходе из строя коллектора 7–10 (рисунок 15 б), произойдет поднятие уровня стоков, и они будут транспортироваться по верхним коллекторам. Для кольцевых структур, например, при выходе из строя коллектора 3–6 (рисунок 15 г), так же произойдет поднятие уровня стоков, и они будут перемещаться по коллектору 2–3 в обратном направлении.

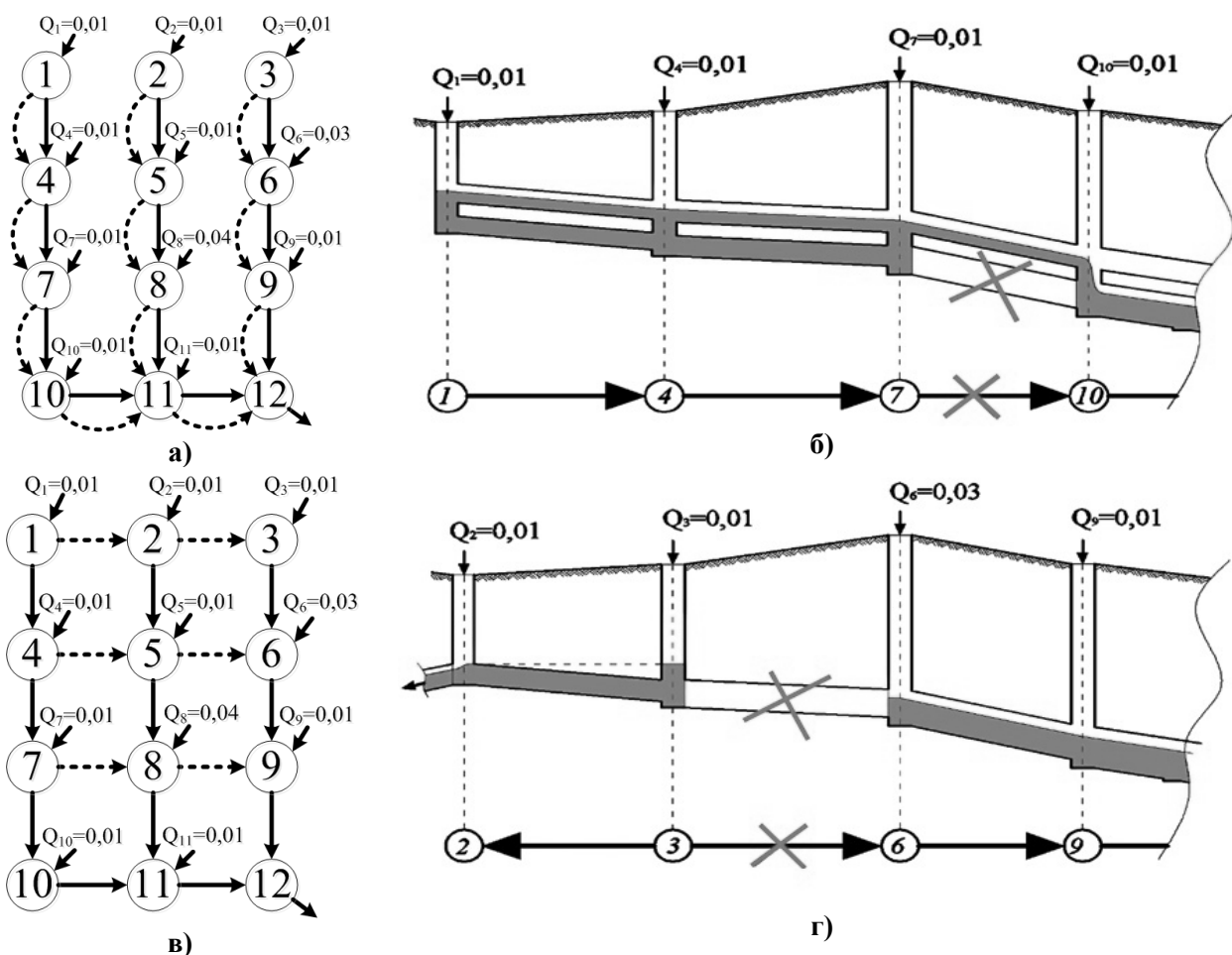


Рисунок 15 – Схемы резервирования системы водоотведения, Q_i – величина поступления стоков в систему водоотведения от абонента, м³/с

Проведенные исследования и разработанная методика оптимизации систем водоотведения могут быть полезны разработчикам перспективных схем развития систем

водоотведения и специалистам, занимающихся нормированием показателей надежности трубопроводных систем коммунального хозяйства, а также преподавателям в учебном процессе строительных специальностей.

В пятой главе излагаются разработанные алгоритмы и программы, реализующие предлагаемые в работе методы и методики. Представлены полученные на основе этих методик и программ результаты обоснования перспективных схем развития систем водоотведения городов Иркутской области: Ангарска, Байкальска, Шелехова. Показана **экономическая эффективность предлагаемых подходов и методик, которая, по сравнению с проектными решениями, составляет по каждому объекту в среднем 10 млн руб.**

Заключение

1. Проведенный анализ технического состояния систем водоотведения и имеющихся подходов и методов к их проектированию и моделированию подтвердил необходимость дальнейшего развития методики оптимизации систем водоотведения с учетом повышения их надежности и сейсмостойкости.

2. Для оценки состояния существующих и реконструируемых систем водоотведения и их пропускной способности предложены математические модели потокораспределения с учетом появления напорного, напорно–безнапорного движения стоков и выхода их на поверхность земли.

3. На основе критерия затрат жизненного цикла сделана математическая постановка задачи оптимизации развивающихся систем водоотведения, исследована целевая функция и область допустимых решений, показано, что оптимальной структурой для новых систем водоотведения является разветвленная сеть, а для реконструируемых систем водоотведения оптимальными возможны и кольцевые решения.

4. Для решения задач развития и обоснования перспективных схем водоотведения в работе предложена методика, основанная на предварительном построении избыточных проектных схем и поиске на них максимального потока минимальной стоимости (метод Форда Л.Р., Фалкерсона Д.Р.), показана ее эффективность при оптимизации существующих, новых и реконструируемых систем водоотведения и отдельных самотечных коллекторов.

5. Проведенные в работе исследования показали, что учет фактора надежности и сейсмостойкости оказывает существенное влияние на выбор структуры и параметров систем водоотведения. При этом в качестве критерия оценки надежности и сейсмостойкости предлагается количественный показатель – объем стоков за жизненный цикл системы водоотведения, который в результате отключения аварийных участков попадает на поверхность земли и в водоемы без очистки. С учетом данного критерия на основе алгоритма

поиска максимального потока минимальной стоимости в работе предложена методика оптимального синтеза систем водоотведения с учетом их надежности и сейсмостойкости, показана ее эффективность на примерах расчета реальных существующих и реконструируемых систем водоотведения.

6. Предлагаемые в работе методики анализа режимов функционирования систем водоотведения и оптимизации их развития и реконструкции с учетом повышения надежности и сейсмостойкости, реализованы в виде программного комплекса ТРАСЕ–ВК, который написан на языке СИ++, имеет графический интерфейс, базу данных и хорошо конвертируется в среду AutoCAD и др. графические системы.

7. Программный комплекс ТРАСЕ–ВК уже применяется в Водоканалах городов Иркутской области, в г. Твери, а также в Грузии (г. Тбилиси) для расчета режимов, поиска перегруженных участков и засоров в сети. На основе ТРАСЕ–ВК разработаны схемы развития систем водоснабжения и водоотведения городов Иркутск, Ангарск, Шелехов, Байкальск и др.

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. **Нгуен, Т.А.** Разработка схемы системы водоснабжения и водоотведения агломерации городов: Иркутска, Ангарска и Шелехова / В. Р. Чупин, Т.А. Нгуен // Сб.: Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов. Материалы международной научно–практической конференции. (25–27 апреля 2012) – Томск, 2012 – С. 180–184.

2. **Нгуен, Т.А.** Планировка и застройка жилого района Лисиха в городе Иркутске / Т. А. Нгуен, А.Г. Большаков, Е.В. Пуляевская // Сб.: Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов. Материалы международной научно–практической конференции (24–26 мая 2011) – Томск – С. 172–174.

3. **Нгуен, Т.А.** Уровень моделирования, оптимизации и анализа режимов функционирования систем водоотведения (СВО) / В.Р. Чупин, Е.С. Мелехов, Т.А. Нгуен // Вестник стипендиатов ДААД – 2013 – Т. 1 – № 1–1 (10) – С. 35–41.

4. **Нгуен, Т.А.** Оптимизация параметров систем ливневой канализации / В.Р. Чупин, Е.С. Мелехов, Т.А. Нгуен // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость – 2014 – № 1 (6) – С. 73–80.

5. **Нгуен, Т.А.** Оптимальная реконструкция систем водоотведения / В. Р. Чупин, И.В. Майзель, Р. В. Чупин, Т. А. Нгуен // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость – 2014 – № 5 (10) – С. 86–103.

6. **Нгуен, Т.А.** Выбор оптимальных схем проектируемых систем водоотведения / Р. В. Чупин, Т. А. Нгуен // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость – 2014 – № 6 (11) – С. 92–103.

7. **Нгуен, Т.А.** Оптимизация развивающихся систем водоотведения / В.Р. Чупин, И.В. Майзель, Р. В. Чупин, Т.А. Нгуен // Сб.: Инновационные системы отведения и очистки поверхностного стока с урбанизированных территорий. Материалы международной научно-практической конференции. Петрозаводск. 12-14 ноября. – Изд.: «Свое издательство», 2014. – С. 105-127.

8. **Нгуен, Т.А.** Обоснование параметров проектируемых систем водоотведения / Р.В. Чупин, Т. А. Нгуен - Сб.: Инновационные системы отведения и очистки поверхностного стока с урбанизированных территорий. Материалы международной научно-практической конференции. Петрозаводск. 12-14 ноября. – Изд.: «Свое издательство», 2014. – С. 132-145.

9. **Нгуен, Т.А.** Оптимальная реконструкция систем водоотведения / Р.В. Чупин, Т.А. Нгуен // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – №2. – С. 58-66.

10. **Нгуен, Т.А.** Оптимизация систем водоотведения с учетом их надежности и сейсмостойкости / Р.В. Чупин, Т.А. Нгуен, Н.Б. Беликова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – №4. – С.110-116.

11. **Нгуен, Т.А.** Оптимальное управление потоками сточной жидкости / Р.В. Чупин, Т.А. Нгуен // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – №9. – С.99-108.

12. **Нгуен, Т.А.** Разработка методики оптимизации перспективных схем развития систем водоотведения / Т.А. Нгуен. Р. В. Чупин // Труды VI-й международной научно-практической конференции «Ресурсоэнергосберегающие технологии в жилищно-коммунальном хозяйстве и строительстве». – Иркутск: ИРНИТУ, 2015. – 23 с.

13. **Nguyen, T.A.** Optimal upgrade of sewers / R.V. Chupin, T.A. Nguyen, M.T. Le // The Transport Journal - Hanoi University of Transport Technology. – Hanoi, Vietnam. – 2015. – №12. – P.67-71.

* *Примечание: Курсивным шрифтом выделены работы в журналах, рекомендованных ВАК.*

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СХЕМ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ

НГУЕН ТУАН АНЬ

05.23.04 – Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов

А в т о р е ф е р а т

Подписано в печать 22.01.2016. Формат 60 × 90 / 16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.

Тираж 100 экз. Заказ № 34 . Поз. плана 9н.

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