МОДЕЛИ функциональной и структурной диагностики при оптимизации трубопроводных систем

А.С.Селиванов

МОДЕЛИ функциональной и структурной диагностики при оптимизации трубопроводных систем

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ **1**

ПРЕДИСЛОВИЕ **5**

ГЛАВА 1. ЦЕЛЕВЫЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ (СПРВ) **8**

1.1 Состояние и тенденции развития СПРВ и их расчета 8

1.2 Постановка задачи исследования 31

1.3 Выводы по главе 38

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ **39**

2.1 «Мягкое» моделирование и первичная диагностика СПРВ 39

2.1.1 Способы описания неопределенности параметров модели СПРВ 39

2.1.2 Задача первичной диагностики в рамках стохастического подхода 42

2.1.3 Задача первичной диагностики в рамках интервального и лингвистических подходов 47

2.2 Классификация элементов СПРВ в условиях неопределенности исходных данных 52

2.3 Оптимизация СПРВ в условиях неопределенности 66

2.3.1 Использование генетических алгоритмов для решения оптимизационных задач в особых условиях 66

2.3.2 Методика применения генетических алгоритмов при решении сетевых задач на примере задачи оптимального синтеза СПРВ 70

2.4 Выводы по главе 83

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПРВ В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ **84**

3.1 Цели и задачи моделирования 84

3.2 Моделирование фоновых утечек 84

3.3 Моделирование аварийных ситуаций 90
3.4 Учет влияния дестабилизирующих факторов на аварийность участков водопроводной сети 104
3.5 Моделирование процессов коррозионного зарастания трубопроводов 107
3.5.1 Количественная оценка степени внутренней коррозии металлических труб и ее влияния на пропускную способность металлических труб 107
3.5.2 Использование результатов решения обратных задач потокораспределения для определения степени «зарастания» и изменения пропускной способности металлических труб 115
3.5.3 Решение обратной задачи в условиях неполноты исходной информации 118
3.5.4 Построение модели изменения шероховатости металлических труб во времени 121
3.5.5 Использование конкурирующих моделей при оценке скорости коррозии 127
3.6 Анализ неравномерности водопотребления 129
3.6.1 Статистическое описание процессов водопотребления 129
3.6.2 Использование результатов решения обратных задач потокораспределения для изучения процессов водопотребления 133
3.7 Выводы по главе 140
ГЛАВА 4. ЗАДАЧА КОМПЛЕКСНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ И СТРУКТУРНОЙ ДИАГНОСТИКИ СПРВ 141
4.1 Основные принципы решения задачи 141
4.2 Представление осложнений на участках сети при решении задачи функциональной и структурной диагностики 142
4.3 Математическая постановка задачи 144
4.4 Практическая реализация 149

4.4.1 Описание алгоритма решения задачи функциональной и структурной диагностики *149*
4.4.2 Программная реализация методики «мягкого» моделирования СПРВ *151*
4.4.3 Экономическая эффективность от внедрения и использования диагностической системы *162*
4.4.4 Результаты моделирования СПРВ микрорайона Куковка г. Петрозаводска *177*
4.5 Выводы по главе 186
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 188
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 190

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технический прогресс в развитии инженерных (трубопроводных) сетей предъявляет высокие требования к надежности и безопасности работы этих систем. Многоуровневые разветвленные системы трубопроводов являются неотъемлемыми атрибутами современного города.

В ведении коммунальных служб находятся трубопроводные системы, построенные несколько десятилетий назад и находящиеся сегодня в неудовлетворительном состоянии. В настоящее время на процесс эксплуатации инженерных сетей наиболее ощутимое влияние оказывают два фактора. Внешний – рост доли выплат за потребленную электроэнергию при подаче воды, внутренний – износ существующих коммуникаций и оборудования. Экстраполируя на ближайшую перспективу, можно гарантировать усугубление ситуации в связи с дальнейшим ростом тарифов в энергетике. С другой стороны техническое состояние действующих инженерных систем представляет собой значительную угрозу экономического и экологического характера.

Особое значение приобретают исследования по поиску оптимальных решений при проектировании (планировании) этих сооружений, их реконструкции, сетевой идентификации, обнаружению утечек, несанкционированных отборов, внутритрубных коррозионных образований при недостатке или неопределенности исходных данных.

При решении данного класса задач основная проблема заключается в построении адекватной модели инженерной системы, учитывающей большое количество факторов, условия неопределенности, и позволяющей «заглянуть в будущее» на достаточное для задач оптимизационного планирования количество шагов. Для реальных инженерных объектов процесс выбора подлежащих замене элементов не может быть четко унифицирован и сведен к решению одной конкретной задачи. Более того, невозможно построение последовательной универсальной цепочки

взаимодействия математических задач, решение которых позволило бы рассматривать процесс составления плана реконструкции как детерминированный. Решающую роль при решении подобных задач имеет опыт инженера. Учитывая существование противоречивых требований и наличие неопределенностей, с которыми сталкивается лицо, принимающее решения, нельзя рассчитывать на надежные результаты. В процессе решения подобных задач значительное время занимает неформальный анализ и поиск компромиссов. Это приводит к использованию оптимизационных моделей, которые должны быть только лишь вспомогательным элементом.

Таким образом, проблема разработки моделей, обеспечивающих возможность симбиоза «ЭВМ – инженер» при выявлении «узких» мест функционирования систем подачи и распределения воды (СПРВ), поиске оптимальных стратегий восстановления водопроводных сетей, является актуальной.

Монография состоит из введения и заключения, четырех глав и приложения.

Первая глава посвящена обзору состояния систем подачи и распределения воды, задачам и методам их расчета. Формулируется задача комплексной диагностики, обозначаются цели исследования.

Во второй главе разрабатывается методология моделирования СПРВ в условиях неполноты исходных данных и неопределенности при решении прямых и обратных задач потокораспределения. Рассматривается задача первичной диагностики СПРВ.

Третья глава посвящена моделированию СПРВ при работе в условиях функциональных и структурных возмущений, обусловленных утечками и авариями на отдельных участках сети, изменением гидравлических сопротивлений элементов системы, неравномерностью водопотребления.

В четвертой главе монографии на основе результатов, полученных во второй и третьей, разрабатывается подход к решению задачи функциональной и структурной диагностики в условиях неопределенности и

неполноты исходных данных, рассматриваются особенности программной реализации разработанных автором алгоритмов и методов, приводятся некоторые результаты моделирования реальных сетей на основе разработанного программного обеспечения.

В заключении формулируются основные выводы по работе.

Автор приносит благодарность своему научному консультанту на начальном этапе исследований безвременно ушедшему из жизни профессору С.Н. Карамбирову.

ГЛАВА 1. ЦЕЛЕВЫЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ (СПРВ)

1.1 Состояние и тенденции развития СПРВ и их расчета

В относительно недалеком прошлом решение задач, связанных с повышением эффективности принимаемых инженерных решений при проектировании и эксплуатации систем транспортирования воды, откладывалось на будущее из-за острой необходимости прокладки дополнительных водоводов и сетей для обеспечения возрастающих потребностей в питьевой воде.

В результате в большинстве городов Российской Федерации СПРВ не отвечают требованиям, выполнение которых необходимо для бесперебойного водоснабжения. В течение последних 20-30 лет, вопреки п. 8.21 СНиП 2.04.02-84*, при строительстве водопроводов применялись стальные трубы, не защищенные от коррозии и образования отложений на их внутренней поверхности, а также чугунные трубы, не имеющие покрытий, предотвращающих образование этих отложений [42]. Общая доля полимерных труб в составе магистральных сетей не превышает 5% [42], [94]. Кроме того, имеются противоречивые сведения относительно соответствия полимерных материалов гигиеническим требованиям и их безопасности для здоровья человека.

В этой связи весьма актуальными в настоящее время становятся проблемы восстановления структуры (топологии) инженерных сетей, обнаружения утечек, несанкционированных отборов, внутритрубных коррозионных образований, а также задачи разработки оптимальной стратегии восстановления инженерных сетей с учетом надежности снабжения водой потребителей в условиях износа коммуникаций и оборудования. Соответственно в технологии моделирования и расчета трубопроводных систем изменяются приоритеты и цели. В настоящее время отходят в прошлое задачи проведения стационарных расчетов как основной

цели моделирования гидравлических сетей, на первый план выдвинулись задачи оптимального синтеза новых (проектируемых) систем и управления уже существующими сетями.

Рассмотрим более подробно этапы развития методологии моделирования и расчета СПРВ. Значительный вклад в создание методов гидравлических и технико-экономических расчетов систем водоснабжения внесли отечественные ученые: М.М. Андрияшев, Н.Н. Абрамов, Ю.А. Ильин, М.В. Кирсанов, А.М. Курганов, В.Г. Лобачев, Н.Н. Меренков, Д.М. Минц, Л.Ф. Мошнин, М.А. Сомов, С.В. Сумароков, Ф.А. Шевелев. Этими специалистами были разработаны методы расчета, анализа и проектирования систем водоснабжения. Работами В.Г. Лобачева, М.М. Андрияшева заложены основы инженерных методов расчета систем подачи и распределения воды. М.В. Кирсанов, Д.М. Минц, В.Г. Лобачев, Н.Н. Абрамов, Ю.А. Ильин исследовали фундаментальные вопросы статической и динамической оптимизации сетей водоснабжения. Ими предложены постановки задач технико-экономического расчета, исследованы свойства решений оптимальных задач.

При анализе работ, связанных с моделированием и расчетом СПРВ, будем придерживаться предложенной в [51] классификации задач расчета напорных трубопроводных систем (см. рис. 1.1).

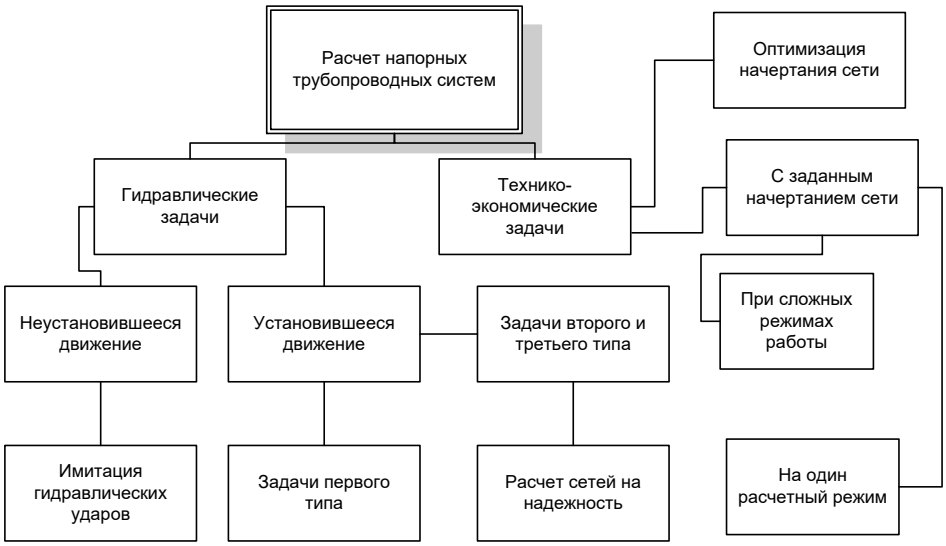


Рис. 1.1 Классификация задач расчета систем подачи и распределения воды

В хронологическом отношении первыми в практике проектирования СПРВ стали проводиться **гидравлические расчеты первого типа для случая установившегося движения жидкости**, заключающиеся в поиске потокораспределения в сети при заданных узловых отборах и подачах.

Среди ранних работ, посвященных решению данной задачи, следует выделить [99]. Уже на первом этапе исследований авторами предлагались различные схемы эквивалентирования исходных схем, способы их упрощения. Однако отсутствие удобных для «ручного использования» численных методов делало невозможным решение реальных гидравлических задач даже сравнительно небольшой размерности.

С появлением работы Х.Кросса, а чуть позже В.Г. Лобачева, эта проблема была решена. В дальнейшем метод контурных расходов стал основным для проведения гидравлической «увязки» кольцевых сетей. В его конкретных реализациях использовались различные численные методы. Анализ численных методов в отношении удобства применения для программной реализации был проведен в [23].

Широкое применение вычислительной техники сделало возможным проведение гидравлических **расчетов второго и третьего типов**. При решении данных задач узловые подачи выражались через технические характеристики насосного оборудования (задачи второго типа), а в ряде случаев, кроме того, отборы потребителей также считались функцией сетевого давления (задачи третьего типа).

В последующем развитие теории позволило формализовать модель водопроводной сети для проведения гидравлических расчетов. Структура водопроводной сети в самом общем случае решения задач третьего типа моделируется конечно ориентированным связным графом с e дугами и υ вершинами [23], [24]. Математически линейный граф отображается $\upsilon \times e$ матрицей инциденций A. Элемент a_{ki} матрицы A равен μ1 в том случае, если i-я дуга инцидентна вершине k (правило знаков использует

направленность дуги по отношению к инцидентной вершине) и 0 в том случае, если i-я дуга неинцидентна вершине k.

Деревом графа называется подграф, содержащий все вершины графа и не образующий ни одного замкнутого цикла. Дуги, входящие в дерево, называются ветвями дерева, остальные – хордами. Цикломатическое число, определяющее число хорд, находится по формуле $\mu = (e - \upsilon + 1)$. Любому произвольно выбранному дереву графа однозначно соответствует $\upsilon - 1$ главное сечение и фундаментальная система μ циклов.

Главное сечение представляет собой подмножество дуг графа, содержащее ветвь дерева и хорды, соединяющие два поддерева графа, которые образуются из рассматриваемого дерева после удаления этой ветви дерева; фундаментальный цикл – подмножество ребер графа, содержащее хорду и ветви графа, образующие единственную простую цепь, соединяющую концевые точки этой хорды. Для ориентированного графа $\upsilon - 1$ главное сечение математически записывается матрицей главных сечений Q, а система главных циклов – цикломатической матрицей B.

Элемент q_{ki} матрицы Q равен $\mu 1$ в том случае, если i-я дуга принадлежит j-му сечению (правило знаков использует направленность дуги по отношению к направлению ветви дерева), и 0 в том случае, если i-я дуга не принадлежит j-му сечению.

Элемент b_{ki} матрицы B равен $\mu 1$ в том случае, если i-я дуга входит в j-й фундаментальный цикл (правило знаков использует направленность дуги по отношению к направлению хорды цикла), и 0 в том случае, если i-я дуга не входит в j-й цикл.

Между матрицами A, Q, B существует взаимосвязь, матрица Q – может быть получена путем элементарных преобразований матрицы A, взаимосвязь между матрицами Q, B определяется основной теоремой топологии сетей [25]: $BQ' = QB' = 0$. (1.1)

Последнее соотношение при некоторых условиях может быть представлено в более удобной для практического применения форме. Этим

условием может быть, например, требование (1.2), чтобы в графе представления сети первые $\upsilon - 1$ дуг являлись ветвями дерева сети, остальные μ - хордами (ветвями антидерева).

Это условие может быть выполнено всегда при помощи перенумерации дуг графа. Преобразуем (1.1) при выполнении условия (1.2). Представим матрицы фундаментальных циклов и главных сечений в виде

$$Q = \left[\frac{I}{Q_2} \right], \quad B = \left[\frac{B_1}{I} \right] \tag{1.3}$$

где I - единичная матрица соответствующей размерности.

После подстановки (1.3) в (1.1) имеем $\left[\frac{I}{Q_2} \right] \left[\frac{B_1}{I} \right]^T = 0 \Rightarrow Q_2 + B_1^T = 0$. Из последнего соотношения следует $Q_2 = -B_1^T$. (1.4)

Рассмотрение законов движения воды в кольцевой сети дает два условия, позволяющие составить некоторое число уравнений для определения искомых неизвестных стационарной модели, описывающей мгновенное распределение потоков в сети:

1. Сумма линейных расходов, приходящих к любому узлу, равна сумме линейных расходов, уходящих от этого узла, плюс узловой расход;

2. В каждом замкнутом контуре сети (кольце) сумма потерь напора на участках h, где движение воды совершается по часовой стрелке (по отношению к данному контуру), равна сумме потерь напора на участках, на которых вода движется против часовой стрелки.

В матричной форме эти законы (законы Кирхгофа) могут быть сформулированы следующим образом

$$\begin{cases} Q \times \overset{\rho}{q} = 0 \\ B \times \overset{\rho}{h} = 0 \end{cases}. \tag{1.5}$$

Законы Кирхгофа при выполнении требования (1.2) из стандартной формы (1.5) могут быть преобразованы во вспомогательную (1.6):

$$\left.\begin{cases} \overset{\rho}{q} = \begin{bmatrix} \overset{\rho}{q}_1 \\ \overset{\rho}{q}_2 \end{bmatrix} \\ \overset{\rho}{h} = \begin{bmatrix} \overset{\rho}{h}_1 \\ \overset{\rho}{h}_2 \end{bmatrix} \end{cases}\right\} \Rightarrow \begin{cases} \begin{bmatrix} I \\ Q_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \overset{\rho}{q}_1 \\ \overset{\rho}{q}_2 \end{bmatrix} = 0 \\ \begin{bmatrix} B_1 \\ I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \overset{\rho}{h}_1 \\ \overset{\rho}{h}_2 \end{bmatrix} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \overset{\rho}{q}_1 = -Q_2 \times \overset{\rho}{q}_2 \\ \overset{\rho}{h}_2 = -B_1 \times \overset{\rho}{h}_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \overset{\rho}{q}_1 = B_1^{\ T} \times \overset{\rho}{q}_2 \\ \overset{\rho}{h}_2 = -B_1 \times \overset{\rho}{h}_1 \end{cases}. \qquad (1.6)$$

Форма (1.6) наиболее удобна при реализации программного обеспечения для моделирования работы напорных сетей.

Система уравнений (1.5) не является определенной, порядок системы равен $b = e = (\upsilon + \mu - 1)$, число же неизвестных – $2 \times e$. Недостающие замыкающие соотношения можно получить из гидравлических соображений в виде характеристики гидравлических сопротивлений или насосного оборудования $\overset{\omega}{h} = f(\overset{\rho}{q})$. В результате имеем систему уравнений порядка $a = 2 \times e = 2 \times (\upsilon + \mu - 1)$ и числом неизвестных, равных $2 \times e$.

В работах [64], [110] получены аналитические выражения характеристик $h = f(q)$ для большинства производимого в то время насосного и пневматического оборудования. Характеристики **<u>приближенно</u>** описывают зависимость между подачей насосного оборудования и развиваемого ими напора. При моделировании насосного оборудования зарекомендовал себя метод электрогидравлической аналогии, позволяющий значительно повысить точность гидравлических расчетов [47].

Исследования в области моделирования гидравлических сопротивлений водопроводных линий в нашей стране регулярно проводились, начиная с середины двадцатых годов прошлого века. Широко известны и используются на практике модели Андрияшева, Шевелева, НИИ ВОДГЕО. Уделялось внимание и изучению изменений гидравлических сопротивлений металлических труб с течением времени [74]. Рядом авторов были предложены эмпирические зависимости для определения фактических потерь напора. Например, в [110] для чугунных труб предлагалась следующая зависимость для определения гидравлического уклона $\mathrm{i} = \dfrac{0.00163 \times \mathrm{K_s} \times Q^{1.81}}{d_p^{4.9}}$,

где $K_s = (1 + a_2 \times \lg(T+1)) \times \left(1 - \frac{0.00353 \times K_1^{0.33}}{d_p}\right)^{-2.45}$, T - срок эксплуатации в годах, d_p - фактический диаметр трубопровода, K_s, K_1, a_2 - эмпирические коэффициенты.

Действующими нормативными документами рекомендуется использовать при проведении гидравлических расчетов различные эмпирические формулы, часто «оптимизированные» для ручного счета.

В соответствии с действующими нормами (СНиП 2.04.02-84*) коэффициент гидравлического сопротивления с учетом сопротивления стыковых соединений водопроводных труб следует определять по формуле

$$\lambda = \frac{A_1 \times \left(A_0 + \frac{C}{\upsilon}\right)^m}{d^m},$$

где d - диаметр трубопровода; υ - скорость движения жидкости в трубопроводе; A_1 A_0 C, m - эмпирические коэффициенты для конкретного материала.

Указывается, что показатели степени и коэффициентов для стальных, чугунных, железобетонных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных труб должны приниматься, как правило, согласно таблице 1 обязательного приложения 10 СНиП 2.04.02-84*. Там же указывается, что значения этих коэффициентов соответствует современной технологии изготовления труб. При проведении технико-экономических расчетов систем подачи и распределения воды потери напора на единицу длины трубопровода рекомендуется определять по формуле $i = K \times \frac{q^n}{d^p}$,

где d - диаметр трубопровода; q - расход жидкости в трубопроводе; K, n, p - эмпирические коэффициенты для конкретного материала.

Располагая информацией о коэффициенте трения (или гидравлическом уклоне), можно получить недостающие замыкающие соотношения,

сложность, однако, и заключается в точном определении коэффициента гидравлического трения.

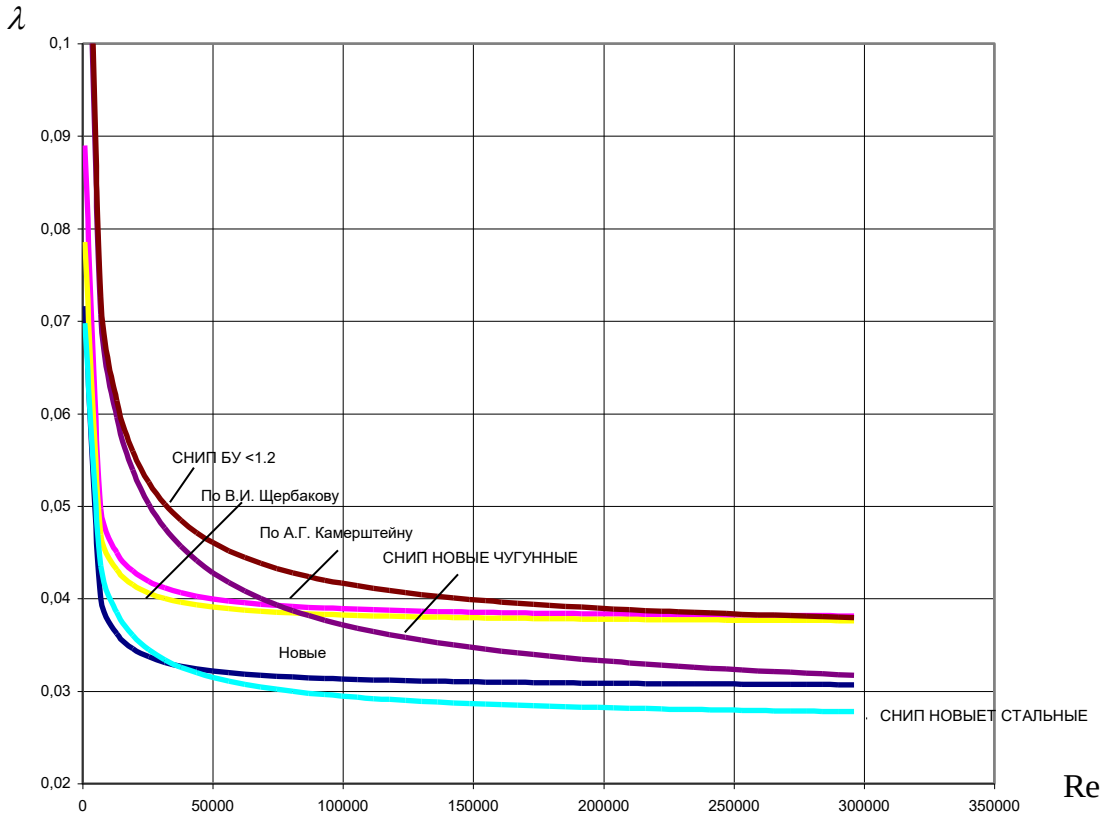


Рис. 1.2 Коэффициенты гидравлического трения, определенные по различным эмпирическим формулам

На рисунке 1.2 приведены зависимости $\lambda = \lambda\left(\mathrm{Re}, \frac{\Delta}{d}\right)$, полученные а) по полуэмпирическим формулам А.Д. Альтшуля и Кольбрука, б) формулам, рекомендуемым СНиП 2.04.02-84* при проведении гидравлических расчетов водопроводных сетей. Кривая «Новые» получена по формуле Кольбрука для трубы диаметром 100 мм с шероховатостью 0.1 мм, кривая «По В.И. Щербакову» – тоже через 20 лет, кривая «По А.Г. Камерштейну» – тоже через 20 лет.

Очевидно, что кривые типа (б) представляют собой достаточно грубую аппроксимацию первых (пересечение кривых между собой и кривыми первой группы явно не имеет физического смысла). Более того, вызывает большие

сомнения точность гидравлических расчетов, произведенных по формулам, рекомендуемым действующим СНиП.

Применение вычислительной техники снимает любые ограничения, связанные с трудоемкостью гидравлических расчетов, а потому, на наш взгляд, сегодня совершенно необоснованно применение грубых и неадекватных моделей при наличии альтернативы. В качестве еще одного, возможно наиболее убедительного, аргумента, стоит указать на следующую деталь – все зарубежные разработки в области моделирования систем подачи и распределения воды используют при определении гидравлических потерь формулу Кольбрука:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} = -2\lg\left(\frac{K_Э}{3.7d} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}\times\sqrt{\lambda_1}}\right), \qquad (1.7)$$

где $K_Э$, $\Delta = \frac{K_Э}{d}$ - абсолютная и относительная шероховатость трубы соответственно; d - диаметр трубы; λ - коэффициент гидравлического трения; $\mathrm{Re} = \frac{v \times d}{\varsigma}$ - критерий Рейнольдса для соответствующего режима движения жидкости в трубе; ς - кинематическая вязкость воды для данных условий; $v = \frac{4 \times q}{\pi \times d^2}$ - скорость движения жидкости в трубе.

Данные о шероховатости труб, выполненных из различных материалов и различного возраста, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Эквивалентная шероховатость труб из различных материалов

Материал и способ изготовления труб	**Состояние трубы**	$K_Э$**, мм**
Стальные электросварные	Новые	$\frac{0.03 \div 0.12}{0.05}$
Стальные бесшовные		$\frac{0.01 \div 0.02}{0.014}$

Материал и способ изготовления труб	**Состояние трубы**	$K_э$**, мм**
Стальные оцинкованные		$\frac{0.10 \div 0.20}{0.15}$
Стальные	Со следами коррозии	$\frac{0.10 \div 0.20}{0.15}$
	Слабокорродированные	$\frac{0.15 \div 0.30}{0.2}$
	Среднекорродированные	$\frac{0.30 \div 0.70}{0.5}$
	Сильнокорродированные	$\frac{5 \div 10}{7.5}$
	Заросшие (с большими отложениями)	$\frac{10 \div 20}{15}$
	С цементно-песчаным покрытием	$\frac{0.2 \div 0.4}{0.3}$
Из цветных металлов	Новые	$\frac{0.001 \div 0.002}{0.0015}$
Чугунные	Новые с битумными покрытиями	$\frac{0.08 \div 0.26}{0.12}$
	Новые без покрытия	$\frac{0.20 \div 0.50}{0.30}$
	Заросшие	До 3
	Сильно заросшие	$\frac{5 \div 10}{7.5}$
Железобетонные	Новые виброгидропрессованные	$\frac{0.184 \div 1.567}{0.8}$
	Новые центрифугированные	$\frac{0.15 \div 0.30}{0.2}$
	Заросшие	$\frac{0.30 \div 0.80}{0.5}$
	Бетонные	$1.0 \div 3.0$

Материал и способ изготовления труб	**Состояние трубы**	$K_э$**, мм**
Асбестоцементные	Новые	$\frac{0.05 \div 0.10}{0.085}$
Пластмассовые		$\frac{0.004 \div 0.04}{0.02}$

Из приведенной таблицы следует, что значения шероховатости представляют собой нечетко заданные параметры (задаются интервально с указанием ожидаемого значения). Размах значений шероховатостей значителен. Пренебрежение интервальной неопределенностью, если не ставит под сомнение адекватность детерминированной модели СПРВ, то, по крайней мере, снижает ценность результатов расчетов.

В случае проведения гидравлических расчетов первого типа необходимо задаться сетевыми отборами, которые также нельзя рассматривать как точечные характеристики. За рубежом и в России накоплен большой объем статистической информации, разработаны соответствующие модели и методики определения сетевых отборов. С их помощью можно получить распределения случайных величин сетевых отборов или построить доверительные интервалы для заданного уровня значимости. Однако в этих моделях сетевой отбор представляет не точечную, а неопределенную величину, заданную интервалом или плотностью распределения.

В семидесятые годы прошлого века впервые в России под руководством НИИ КВОВ были проведены комплексные исследования по оценке фактического водопотребления, результатами которых явились оценки потерь в жилищном фонде в масштабе всей страны и разработанная методика определения ориентировочных расходов воды во внутренних системах водоснабжения. В действующих нормах расчетные расходы воды задаются интервально без учета неучтенных расходов.

Подводя итог сказанному, отметим особо, что при проведении гидравлических расчетов неопределенность величин сетевых отборов, гидравлических сопротивлений, технических характеристик насосного оборудования в ранних работах никак не учитывалась. На несоответствие требований нормативных документов и использующихся методов расчета обратили внимание лишь в последнее время. В работе С.Н. Карамбирова [38] впервые предложено использовать элементы «вычислительных технологий» (нечеткие множества) при решении задач расчета СПРВ с учетом интервальной и лингвистической (нечеткой) неопределенности.

Для решения гидравлических задач, кроме подхода, основанного на составлении уравнений Кирхгофа, использовались и вариационные принципы. В соответствии с теоремой Максвелла-Хасилева распределение расходов и напоров в гидравлической цепи должно соответствовать минимуму диссипации энергии $Э(\overset{\rho}{q}) = \overset{\mu}{h}^T \times \overset{\rho}{q}$ при выполнении первого закона Кирхгофа. Данный подход при решении основной задачи анализа получил значительно меньшее распространение. В работах В.И. Щербакова, М.Я. Панова, И.С. Квасова [73], [118], [119] на основе этого подхода развиваются принципы энергетического эквивалентирования для расчета гидравлических цепей, порождаемых сетями водоснабжения крупных городов. Условия энергетического эквивалентирования, сформулированные на уровне энергетического функционала, позволили определить сопротивления и расходы на фиктивных участках, за счет которых обеспечивается сворачивание исходной системы в эквивалентную ей:

$$\begin{gathered}\sum_{j\in J_\pi^{zr}}\int_0^{q_j}(Z_j+H_j)dq_j-\sum_{j\in J_\pi^{zr}\cup J_\eta^{mr}}\int_0^{q_j}(Z_j+H_j)dq_j-\sum_{j\in I^{zr}\cup I^{mr}}\frac{S_i\times Q_i^{\alpha+1}}{\alpha+1}=\to\\ \to\sum_{j\in J_\pi^{zr}}\int_0^{q_j}(Z_j+H_j)dq_j-\sum_{j\in J_\pi^{zr}\cup J_\eta^{mf}}\int_0^{q_j}(Z_j+H_j)dq_j-\sum_{j\in I^{zr}\cup I^{mf}}\frac{S_i\times Q_i^{\alpha+1}}{\alpha+1}\end{gathered}, \qquad (1.8)$$

где Q, S - расчетные расходы и коэффициент гидравлического трения на участках сети, q, Z, H - узловой отбор, геодезический уровень и

пьезометрический напор узла, z,m - принадлежность к расчетной зоне и метасистеме, r, f - реальные и фиктивные структуры, π, η - источники и стоки (потребители), I, J - множество участков и узлов СПРВ, α - показатель степени в формуле Дарси-Вейсбаха.

Гидравлическим расчетам водопроводных сетей при неустановившихся режимах посвящено гораздо меньшее число работ. Это объясняется сложностью модели процессов, а также большим объемом вводимой информации, необходимой для проведения подобных расчетов [38]. Модель неустановившегося потокораспределения предусматривает решение системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathrm{h}}{\partial t} + U \times \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{C^2}{g} \times \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \mathrm{h}}{\partial x} + \frac{U}{g} \times \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{g} \times \frac{\partial U}{\partial t} + \lambda \times \frac{U \times |U|}{2 \times g \times d} = 0 \end{cases}, \qquad (1.9)$$

где h, U - напор и скорость в точке сети, C - скорость распространения ударной волны, d - диаметр участка сети, λ - коэффициент гидравлического трения, g - ускорение свободного падения.

Поведение сооружений на сетях моделируется через введение соответствующих граничных условий для системы (1.9). В работах [37], [38] разработаны соответствующие модели для расчета сетей водоснабжения. Особый интерес представляет стационарный гидравлический расчет на основе метода установления. Тем не менее, в настоящее время расчеты СПРВ в условиях переходных процессов осуществляются редко.

Расчет сетей на надежность длительное время ограничивался поверочными расчетами при исключении из работы одного или нескольких участков сети одновременно. Имитация работы потребителей в условиях нехватки воды моделировалась авторами различными методами.

Известно несколько методов проведения поверочных расчетов, позволяющих оценить резервы саморегулирования системы. Наиболее известны два из них. Первый был предложен в работах СЭИ и заключался в расширении полной системы добавлением дополнительных уравнений,

связывающих нефиксированные отборы между собой посредством регулируемых параметров. Известны вариации предложенного подхода, заключающиеся в сокращении блока дополнительных уравнений. В [32] предлагалось в частности фиксировать отборы в узлах, для которых выполняется условие $H_{св} > H_{тр}$,

где $H_{св}$ - свободный напор в узле, $H_{тр}$ - требуемый для осуществления нормального режима водоснабжения, свободный напор в узле.

Второй подход был предложен для проведения ориентировочных «ручных» расчетов и заключался в том, что фиксированные отборы в узлах сети при авариях могут уменьшаться по всей сети пропорционально допустимому изменению подачи воды от источника питания путем умножения фиксированных отборов на коэффициент обеспечения расхода.

Одной из первых в России работ, посвященных надежности систем водоснабжения, стала монография [2]. В работе предложены методы оценки надежности работы отдельных сооружений системы водоснабжения, способы сбора инвентаризационной информации. Автором сформулированы общая постановка задачи повышения надежности СПРВ, предложены способы практической реализации указанных задач. Идеи Н.Н Абрамова в области надежности систем подачи и распределения воды получили дальнейшее развитие в работах Ю.А. Ильина, исследовавшего проблемы надежности и качества водоснабжения, рассмотревшего конкретные способы определения показателей надежности, обобщившего и внедрившего в практику водоснабжения основные идеи общей теории надежности.

С точки зрения теории надежность представляет собой свойство системы в течение некоторого времени сохранять свои характеристики в определенных пределах при заданных условиях эксплуатации. В зависимости от содержания комплекса потенциально возможных мер удобно представить надежность инженерных сетей города в виде трех составляющих: структурной, конструктивной и технологической [83]. *Структурная надежность* определяется конфигурацией инженерной сети,

топологическими связями между ее отдельными элементами. *Конструктивная надежность* зависит от прочностных характеристик элементов и сооружений, главным образом, от их способности противостоять механическим повреждениям. *Технологическая надежность* определяется качеством эксплуатации инженерной сети. Нарушение этой составляющей в общей надежности происходит в результате ошибок обслуживающего персонала в процессе эксплуатации системы. Конструктивная и технологическая надежность определяют функциональные возможности системы (*функциональная надежность*).

Структурная и функциональная надежность СПРВ может быть просчитана на этапе проектирования. Известны три подхода при оценке структурной и функциональной надежности: моделирование аварийных состояний посредством Марковских процессов [31], [32] и применение методов анализа структурно-сложных схем [83], в отдельных случаях используют комбинированный метод, когда граф состояний строится на основе структурной схемы водопроводной сети.

В первом случае моделируется вероятность пребывания комплекса оборудования в различных состояниях.

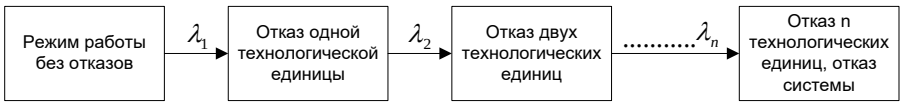


Рис 1.3 Марковский процесс отказа оборудования

Например, для схемы, приведенной на рисунке 1.3

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \lambda_{i-1} \times P_{i-1}(t) - \lambda_i \times P_i(t)\,. \qquad (1.10)$$

При начальных условиях $t = 0$, $P_0(0) = 1$ можно получить решение для вероятности безотказной работы. При решении обычно используют специфические свойства преобразования Лапласа. Ю.А. Ильиным для

целого ряда задач практики получены аналитические решения оценки надежности работы.

Аналогичные задачи могут рассматриваться с помощью методов анализа структурно-сложных систем.

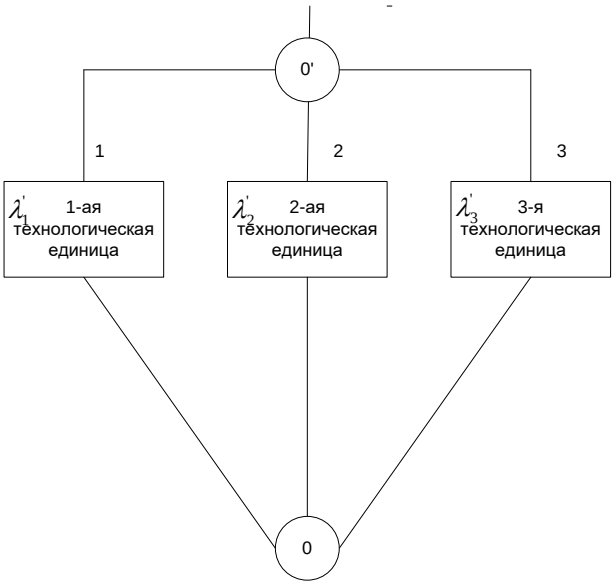


Рис 1.4 Структурная схема для определения вероятности безотказной работы оборудования

Функцию алгебры логики для определения вероятности работы этой системы можно представить в виде ортогональной дизъюнктивной нормальной формы (ОДНФ)

$$F(X) = (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3) \vee (\bar{x}_1 \wedge x_2 \wedge x_3) \vee (x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3) \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge \bar{x}_3). \qquad (1.11)$$

Рассматривая Пуассоновский процесс, принимаем для вероятности безотказной работы каждого элемента показательный закон $P(t) = 1 - e^{-\lambda \times t}$. В результате решения получаем идентичные результаты. Методы дополняют друг друга.

Относительно несложно использовать методы структурного анализа для решения задач надежности систем с восстановлением. Сложностью применения логико-вероятностных методов при решении задач надежности является переход от формулы структурной надежности к полному

замещению на вероятностную функцию. Известно несколько форм функций алгебр логики, которые являются замещаемыми (одной из них является ОДНФ), а также большое количество методов, с помощью которых любую структурную функцию можно привести к форме перехода к полному замещению. Для расчета структурно сложных систем с большим числом элементов, для преобразования функции алгебры логики в ортогональную дизъюнктивную нормальную форму разработан ряд эффективных алгоритмов [83].

Известные в настоящее время методы расчета на надежность основаны на детерминированных моделях: структура сетей предполагается известной, поток отказов элементов принимается простейшим, а его параметры задаются точечно. Задачи надежности СПРВ сопровождаются ограниченностью или отсутствием достоверных данных о надежности их элементов. Однако методы, позволяющие получать граничные оценки надежности СПРВ в условиях неполной информации о законах распределения отказов элементов, в настоящее время не разработаны.

Отдельным направлением стала разработка методов решения **задачи оптимального синтеза СПРВ** (по классификации, приведенной на рисунке 1.1, оптимизационные задачи) при различных условиях (с учетом надежности, для условий развития и др.). Общим моментом было желание получить такую СПРВ, которая при удовлетворении ряда общих (модель потокораспределения) и специальных условий минимизировала бы значение удельных приведенных затрат.

Удельные приведенные затраты на строительство и эксплуатацию трубопроводной системы принято оценивать по детерминированным формулам вида $C = \dfrac{(p+E)\times\sum_{i=1}^{n}\left(a+b\times D_i^{\alpha}\right)\times l_i+\left(H_0+\sum_{i=1}^{n}h_i\right)\times Q\times k}{Q(t)}$, (1.12)

где p - нормативный процент ежегодных отчислений на амортизацию и ремонт сети, E - величина, обратная сроку окупаемости капиталовложений,

k - коэффициент, учитывающий амортизационные расходы при эксплуатации системы, n - число участков трубопроводов, входящих в состав системы, D - диаметры участков сети, l - длины участков, H_0 - пьезометрическая высота в диктующей точке относительно уровня воды в источнике водоснабжения, h - потери энергии на участках сети, Q - полный расход воды, подаваемый в систему, $Q(t)$ - расход воды за расчетный период, a, b, α - коэффициенты, учитывающие стоимость прокладки трубопроводов при различных условиях. В работах П.Д. Хоружия [110], Г.П. Небольсина, А.С. Вербицкого, Н.А. Украинца указанная модель была тщательно исследована. Однако в настоящее время в связи с существенными изменениями в структуре экономики вообще и в коммунальном хозяйстве в частности целый ряд полученных ранее результатов потерял свою актуальность.

В качестве специальных условий, накладываемых на оптимизационную задачу, можно наложить требования надежности синтезируемой системы. В простейшем случае [98] оценивалась безотказная работа участка сети $R_i = \exp(-\tau \times \lambda_i(d_i, l_i)), i \in I$,

где I - множество участков сети.

Показатель надежности снабжения узла оценивался надежностью пути его снабжения $RR_j = \prod_i R_i, j \in J$,

где J - множество узлов сети. При синтезе СПРВ требовалось обеспечение условия $RR_j \geq H_j^{\varphi}$, где H_j^{φ} - норма надежности пониженного снабжения, определяемая как вероятность безотказной подачи потребителям во время аварий не менее $\varphi\%$ расчетного количества воды $Q_j^{'} = \varphi_j \times Q_j$.

Адекватность детерминистических подходов постоянно подвергалась сомнению. Очевидно в частности, что применение модели (1.12) без учета неопределенности расчетных коэффициентов в условиях динамично

развивающейся экономики может дать ошибочные результаты. Однако иных способов решать задачи синтеза СПРВ долгое время не существовало.

В работах С.Н. Карамбирова [37], [38] для решения оптимизационных задач на сетях в условиях нечетко заданных исходных данных вводится целевая функция, показывающая степень близости параметров системы к требуемым. Для этой цели определяются функции принадлежности и их произведение, результатом оптимизации является минимизация функции цели $\mu_{опт} = \max\min \mu_i$. Представляется перспективным дальнейшее развитие методов оптимального синтеза СПРВ в условиях неопределенности исходных данных и динамично изменяющейся экономической ситуации.

Отдельным направлением в области моделирования инженерных сетей, не отраженным в классификации [51], являются **обратные задачи потокораспределения,** представляющие собой совокупность математических методов и моделей, с помощью которых возможно определение фактических сопротивлений и расходов на участках сети, расходов у потребителей, мест аварий и величины утечки.

Обратные задачи изотермического и неизотермического потокораспределения (определение фактических сопротивлений и расходов на участках сети, расходов у потребителей, мест аварий и величины утечки) рассмотрены в главе «Идентификация трубопроводных систем» докторской диссертации А.П. Меренкова «Математические модели и методы для анализа и оптимального проектирования трубопроводных систем» 1974 г. В ней были сформулированы также постановки задач для дальнейших исследований, включая учет и подавление влияния ошибок измерений, применение методов регуляризации, понижение размерности задач и др.

А.П. Меренков был идеологом и разработчиком сетевого подхода к проблеме идентификации трубопроводных систем, известного под названием «Метод математического расходомера» (авторское свидетельство № 283746, 1970 г., А.П. Меренков, В.Я. Хасилев, К.С. Светлов). Центральной идеей

«математического расходомера» является использование сетевых уравнений потокораспределения в расчетах различных режимов работы СПРВ.

В общем случае задача по определению фактического потокораспределения (или гидравлических сопротивлений) сводится к минимизации функции, характеризующей отличия модельных и натурных давлений в узлах сети:

$$F(s,x^{(l)}) = \sum_{l=1}^{p}\Big(\sum_{i=1}^{k}\Big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_j^{(l)} - q_i^{(l)}\Big)\cdot\Big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_j^{(l)} - q_i^{(l)}\Big) + \\ + \sum_{i=k+1}^{n}\Big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}s_j\,|x_j^{(l)}|^{\beta-1} - H_{j-k}^{(l)}\Big)\Big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}s_j\,|x_j^{(l)}|^{\beta-1} - H_{j-k}^{(l)}\Big) + \\ + \sum_{i=k+n+1}^{n+R}\Big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}s_j\,|x_j^{(l)}|^{\beta-1}x_j^{(l)} - \Delta h_{i-k-r}^{(l)}\Big)\cdot\Big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}s_j\,|x_j^{(l)}|^{\beta-1}x_j^{(l)} - \Delta h_{i-k-r}^{(l)}\Big)\Big), \quad (1.13)$$

где c - коэффициенты, определяемые по правилу знаков закона Кирхгофа, s,β - параметры закона гидравлического сопротивления, H - напоры в узлах сети, x - неизвестные расходы, q - узловые отборы, Δh - невязки, l, i, j - индексы режимов работы, участков, узлов; на первых d участках установлены датчики расходов.

Данная задача сложна в вычислительном отношении: плохо обусловленная матрица Якоби данной системы фактически не позволяет решать задачи большой размерности с помощью градиентных методов. Достоинство «математического расходомера» перед прочими инженерными методами сетевой идентификации заключается в том, что первый позволяет решать задачи по локализации аварийных ситуаций и вопросы рационального эквивалентирования. Последняя задача рассмотрена в работе [61]. Главный недостаток - наличие большого объема исходных данных, к точности которых предъявляются высокие требования. Это существенно девальвирует возможности метода [61]. Дело в том, что на практике давления и расходы определяются по приборам, имеющим невысокий класс точности, поэтому в силу неизбежной погрешности замеряемых величин в качестве исходных

данных можно положить лишь оценки искомых параметров трубопроводных сетей. По этой причине представляется перспективным развитие методов идентификации трубопроводных систем в случае неполноты и неопределенности исходных данных.

В конце 90-х годов прошлого века появился ряд зарубежных публикаций (см., например, работы Tang K.W., Zhang F, Savic D.A., Walters G.A., Vitkovsky J.P., Simpson A.R., Murthy L.J.), в которых было предложено решать обратные задачи потокораспределения в рамках сетевого подхода с применением нейронных сетей и генетических алгоритмов. Это позволило исследователям решить ряд принципиальных сложностей, связанных с некорректностью обратной задачи.

Кроме методов сетевой идентификации, построенных на «математическом расходомере», известны и другие способы определения параметров системы [68], [98]. В работе [110] описывается технология построения изолиний пьезометрических отметок как способ оценки сетевых параметров. Автором предложены эвристические алгоритмы оценки гидравлической загруженности сети по характеру распределения и густоте линий равных пьезометрических отметок. Верификация состояния оценивается по степени соответствия с предельными экономическими уклонами $I_{\min} = \dfrac{8 \times \lambda \times Q_{\min}^2}{\pi \times g \times d_p^2}$, $I_{\max} = \dfrac{8 \times \lambda \times Q_{\max}^2}{\pi \times g \times d_p^2}$, (1.14)

где $Q_{\max}$, $Q_{\min}$ - предельные экономические расходы воды, принимаемые в зависимости от материалов труб и условий работы.

Кратко остановимся на **вычислительных аспектах**, связанных с разработкой программного обеспечения моделирования СПРВ.

В работах Н.Н. Абрамова, М.А. Сомова, С.В. Сумарокова, А.Г. Евдокимова, Ю.А. Ильина, Н.У. Койды, Н.Ф. Федорова, Г.К. Шацилло, Ю.М. Шарыгина, В.С. Дикаревского, А.П. Таубина разрабатываются методы применения ЭВМ для расчета и оптимального проектирования инженерных сетей.

В СССР, а затем и в СНГ, было разработано большое количество программных систем, предназначенных для моделирования СПРВ и решения гидравлических и технико-экономических задач. Данные разработки отличались качеством проработки, возможностями работы с задачами высокой размерности, способом представления исходной и выходной информацией. Однако спектр решаемых задач оставался в основном стабилен: поиск стационарного потокораспределения, технико-экономические расчеты, сводившиеся к минимизации целевой функции приведенных затрат. Задачи синтеза оптимальных СПРВ с учетом надежности решались, как правило, с введением жестких и не всегда адекватных условий. Среди большого количества программных реализаций расчета СПРВ можно выделить следующие.

В НИИ ВОДГЕО был разработан комплекс программ для проведения гидравлических и технико-экономических расчетов ГРСПВ и руководство по анализу условий работы систем подачи и распределения воды. Отличительной особенностью разработанной модели являлся отказ от классического метода контурных расходов и применение метода Ньютона-Рафсона к полной системе потокораспределения непосредственно. Данный подход позволил решать ряд новых задач, например, позволил производить расчет системы водоподачи с учетом определения параметров регуляторов для поддержания требуемых режимов.

MikeNet (EPANET Modeling System) – одна из наиболее известных и эффективных систем моделирования СПРВ. Общей тенденцией для всех разработок в этой области является наращивание графических возможностей, что позволяет получать наиболее наглядные формы представления результатов моделирования, интеграция с СУБД, ГИС, упрощающая механизм ввода исходных данных. Расчетные модели в целом не подвергались серьезным изменениям еще с середины прошлого века, а различия между программными реализациями моделей потокораспределения заключаются в численных методах решения систем уравнений. MikeNet

обеспечивает решение основной задачи анализа (стационарное потокораспределение), определение резерва системы для работы в форс-мажорных условиях, моделирование процессов переноса, синтез СПРВ с учетом минимизации приведенных затрат, калибровку модели с применением отдельных элементов эволюционного программирования. Несмотря на широкие возможности при проведении расчетов на ЭВМ разработчики обошли стороной вопросы моделирования нестационарных процессов в СПРВ, полирежимных расчетов, обратных задач потокораспределения и реализации механизма фуззификации (учета неопределенности) исходных данных. В целом такое положение вещей не является исключением в отношении только Mike Net.

Разработанный С.Н. Карамбировым пакет ПО позволяет в рамках нечеткого подхода моделировать переходные процессы в СПРВ.

Отечественная система ГИДРОГРАФ, построенная с применением методологии энергетического эквивалентирования [119], позволяет повысить эффективность решения задач большой размерности, упрощает анализ результатов расчета.

ГИС Zulu с интегрированными модулями гидравлических расчетов, кроме стандартных задач на сетях, позволяет моделировать переходные процессы (гидравлические удары).

Следует отметить, что практически все существующие системы расчета и синтеза систем ПРВ ограничивают возможности лица, принимающего решения (проектировщика), оперируя с детерминированными исходными данными и выдавая безапелляционно-конкретные результаты. В этом случае опыт и знания проектировщика используются в минимальном объеме.

Таким образом, наряду со значительными достижениями в области моделирования СПРВ целый круг вопросов остается либо слабо проработанным, либо не исследованным вовсе. Это касается, прежде всего, методологии расчета, синтеза и идентификации СПРВ в условиях неопределенности и неполноты исходных данных и аппарата для разработки

систем поддержки принятия решений при проектировании и реконструкции инженерных систем, позволяющего инженеру принимать творческое участие в этих процессах. Доля выплат за потребленную электроэнергию при транспортировке воды составляет солидную часть расходов, связанных с эксплуатацией систем водоснабжения. Учитывая тенденции роста тарифов на электроэнергию, эта доля будет неизбежно расти. Ситуация усугубляется значительным износом действующих сетей и оборудования. Поэтому в настоящее время большое научное и практическое значение приобретают исследования в области понижения энергоемкости систем подачи и распределения воды. Первым этапом при решении указанных проблем является анализ фактического состояния СПРВ, который может быть осуществлен на основе решения обратных задач потокораспределения. В этом контексте определяется актуальность темы нашего исследования. Целью работы являлось обобщение существующих и разработка необходимых методов для решения обратных задач потокораспределения в условиях неопределенности и неполноты исходных данных как способа повышения эффективности принятия решений, расширения аналитических возможностей служб, снижения энергопотребления и сокращения безвозвратных потерь воды в СПРВ, разработка программного обеспечения для создания СППР в управлении инженерными сетями.

1.2 Постановка задачи исследования

В самом общем случае задача сетевой диагностики (идентификации) заключается в определении набора параметров (характеристик) инженерной сети, проявляющих себя при ее эксплуатации. Эти характеристики можно отнести к одному из двух классов.

Класс структурных характеристик определяет топологическую эффективность сети, структурные связи между ее отдельными элементами. С математической точки зрения класс структурных характеристик представляет

собой набор матриц, полностью определяющих структуру графа водопроводной сети.

Класс функциональных характеристик является показателем эксплуатационной эффективности, указывающим на наличие или отсутствие технологических осложнений на участках сети.

Под технологическим осложнением понимается нежелательное отклонение одной или нескольких функциональных характеристик от своего нормального (проектного) положения. Классические постановки идентификационной задачи [24], [25], [98] предполагали выявление по данным пьезометрических съемок степени проявления какого-либо ***одного осложнения***, чаще всего, изменения коэффициента гидравлического трения вследствие внутренней коррозии.

В работе выделяются *три типа технологических осложнений* при эксплуатации наружных водопроводных сетей: несанкционированные отборы, утечки, коррозионное зарастание. Под несанкционированным отбором понимается превышение расходов воды у потребителей выше установленных норм, что может быть обусловлено: а) самовольным подключением абонентов к магистральным сетям, б) значительными утечками на внутренних сетях водопровода. Утечки на наружных сетях представляют собой полностью неустранимые потери воды, связанные с частичным или полным нарушением герметичности системы подачи воды вследствие целого ряда факторов. Коррозионное зарастание – изменение внутренней структуры участков трубопроводов вследствие коррозии, приводящее к увеличению сопротивления движению воды за счет изменения шероховатости труб.

Идентификационную задачу, построенную в рамках сетевого подхода, в которой учитывается возможность проявления нескольких технологических осложнений одновременно и приводящих к нарушению целостности СПРВ и утрате части ее функциональных возможностей, нами было предложено называть ***задачей функциональной и структурной диагностики***.

Решением задачи функциональной и структурной диагностики называется набор характеристик инженерной сети, адекватный набору исходных данных. Задача функциональной и структурной диагностики заключается в том, чтобы по имеющемуся набору исходных данных определить степень проявления ряда технологических осложнений на отдельных участках сети, характеризующих ее функциональную и структурную надежность.

Одна из ключевых проблем при решении задачи заключается в особом представлении исходных данных. Здесь необходимо учитывать неопределенность, которая заключается в невозможности дать точечную численную характеристику ряду параметров. Причем это относиться не только к описательным характеристикам, но также и к количественным (зачастую неопределенной является информация о диаметрах участков). Необходимость учета неопределенности при решении задачи функциональной и структурной диагностики обусловлена: низкой точностью оперативной информации, получаемой с объектов управления вследствие погрешности датчиков замеров технологических параметров; недоопределенностью понятий и терминов, использующихся при описании технического состояния сетевого оборудования; неточностью и идеализацией моделей функционирования системы [38], [48]; невозможностью в силу непреодолимых в настоящее время вычислительных трудностей напрямую рассматривать системные многоуровневые иерархические модели и потерей эквивалентности при их декомпозиции.

Согласно работе М. Блэка [41], неопределенность имеет место, когда универсальное множество состоит более чем из одной точки. Если для этих элементов множества заданы соответствующие вероятности или другие вероятностные характеристики, то имеет место вероятностная неопределенность. Если известны только граничные элементы множества - интервальная неопределенность. И, наконец, при задании для каждого элемента множества соответствующей степени принадлежности - нечеткость.

Иная трактовка предусматривает классификацию неопределенности по ее степени, при этом выделяются: полная определенность, вероятностная, лингвистическая, интервальная, полная неопределенность.

В случае решения диагностических задач целесообразно учитывать неопределенность в рамках нечеткого подхода: во-первых, при использовании стохастических моделей возникает целый ряд трудностей, связанных со сложностью получения плотностей распределения вероятностей для параметров, нерегулярными явлениями при решении стохастических дифференциальных уравнений [41]; во-вторых, сама природа неопределенностей при рассмотрении инженерных объектов в большинстве случаев не является случайной; в третьих, значительная часть информации, необходимой для математического описания, существует в форме представлений или пожеланий экспертов.

Еще одна сложность при решении задачи функциональной и структурной диагностики заключается в ее некорректности. Дело в том, что по отношению к математической постановке задача является комбинированной: по известным значениям части компонент входного X и выходного Y векторов восстановить оставшиеся неизвестные компоненты. Согласно Ж.Адамару, для корректности постановки задачи необходимо:

- существование решения при всех допустимых исходных данных;
- единственность данного решения;
- устойчивость решения к изменениям (малым) исходных данных.

При решении комбинированной задачи не может быть гарантировано единственность решения и его устойчивость.

Для решения некорректно поставленной комбинированной задачи функциональной и структурной диагностики нами было предложено рассматривать ее как задачу оптимизации параметров системы по отношению к заданной функции ценности, характеризующей степень адекватности решений. Для этого предлагается воспользоваться методом наименьших квадратов для учета соответствия модельных решений и

натурных данных, предварительно дополнив модель, инкапсулирующую законы Кирхгофа, замыкающими соотношениями, описывающими локальные процессы (утечки, коррозионное зарастание, несанкционированные отборы). При этом ввиду сложности предлагается произвести декомпозицию задачи.

В результате получаем набор взаимосвязанных между собой моделей. При декомпозиции задачи среди моделей, описывающих состояние водопроводной сети, можно выделить *базовые*, характеризующие функционирование системы в целом. К таким моделям относятся модели потокораспределения, отбора воды из сети, диссипации энергии на ее участках, а также модели работы насосного и пневматического оборудования. Другая группа моделей (*локальные*) описывает процессы, дестабилизирующие нормальный эксплуатационный процесс. К этой группе отнесены модели аварийного истечения, коррозионного зарастания, несанкционированных отборов, технического состояния. При этом важно отметить, что эти модели описывают одну и ту же систему в один и тот же момент времени, следовательно, результаты расчета по данным моделям не должны до определенной степени противоречить друг другу. Целевая функция, характеризующая меру этой непротиворечивости, степень соответствия модельных и натурных давлений, используется для выбора адекватных модельных решений

Для поиска решения задачи необходимо построить целевую функцию, учитывающую большое количество факторов. При этом следует обеспечить гибкость целевой функции, обусловленную, во-первых, неопределенностью исходных данных, во-вторых, взаимоисключающим характером локальных моделей.

Результат работы диагностической задачи должен быть доступен для анализа лицом, принимающим решения. И лишь он должен осуществить выбор наиболее подходящего. Это предполагает наличие некоторого набора альтернатив наиболее вероятных (адекватных) решений.

Особенности решения диагностической задачи, описанные выше, требуют применения специальных методов для ее решения. В качестве набора таких методов в работе предлагается использовать «эволюционное моделирование» («вычислительные технологии»). В работе нейронные, нейронно-нечеткие системы применяются для построения плохо формализующихся моделей процессов, дестабилизирующих нормальные режимы эксплуатации сети. Нечеткое управление используются для построения многокомпонентной целевой функции, отражающей степень адекватности решения. Поиск оптимума целевой функции осуществляется с помощью генетических алгоритмов, хорошо зарекомендовавших себя при решении подобных задач [49].

Основная идея поиска адекватных решений заключается в следующем (рис 1.5). На начальном этапе, варьируя характеристики инженерной сети (отборы, сопротивления, имитации утечек и аварий), генерируется набор возможных решений (начальный план). В этот набор включаются решения, в определенном объеме удовлетворяющие условию равенства модельных и натурных давлений в сети.

Доминирующим фактором при выборе адекватных решений является степень соответствия модельных давлений в узлах сети натурным для характерного режима работы сети. Улучшение плана достигается за счет применения специальных методов оптимизации – генетических (эволюционных) алгоритмов.

Осложнения на участках сети определяются совокупностью функциональных характеристик участка сети (расходов и сопротивлений), определение которых само по себе представляет значительную ценность. Однако в условиях неопределенности целесообразно отобразить функциональные характеристики участка относительной степенью проявления на нем трех, выделенных ранее, технологических осложнений, поскольку само решение задачи можно рассматривать только как приблизительное.

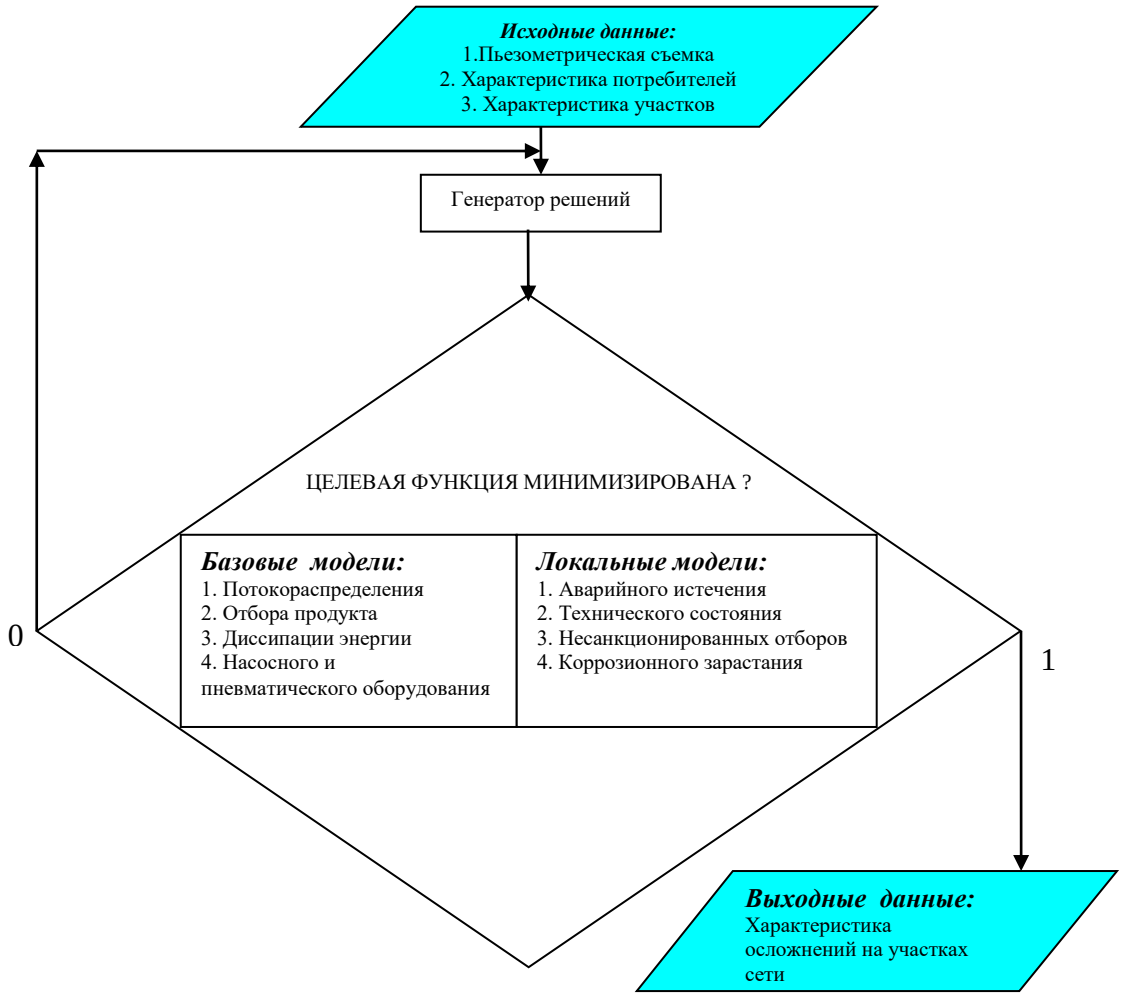


Рис 1.5 Способ решения некорректно поставленной задачи функционально-структурной диагностики

Описанный подход при решении идентификационных задач учитывает неопределенность, присущую исходным данным, а также неопределенность, возникающую при декомпозиции исходной модели посредством введения нечеткой целевой функции. При этом сложная система разделяется на группу более мелких подсистем с такой взаимосвязью, чтобы глобальная задача оптимизации преобразовалась в группу локальных задач оптимизации, т.е. отдельные решения будут приниматься по ограниченной информации, без использования всего объема сведений [41]. Переход к иерархической структуре управления сужает в общем случае множество допустимых решений, но одновременно снижает и уровень неопределенности, т.е. делает возможным получение более качественного решения. Гибкость

междумодельного взаимодействия и снижение дополнительной неопределенности, обусловленной декомпозицией задачи, осуществляется за счет использования нечеткого подхода (нечеткое управление).

Таким образом, для решения поставленной задачи функциональной и структурной диагностики необходимо разработать методологию «мягкого» (в условиях неопределенности) моделирования СПРВ для возмущенного состояния (при возможности утечек, коррозионного зарастания труб, наличия несанкционированных отборов), методы решения оптимизационных задач в условиях неопределенности. Этим вопросам посвящены две следующие главы монографии.

1.3 Выводы по главе

1. Проведенный анализ публикаций по моделированию СПРВ показал, что вопросы решения прямых и обратных задач в условиях неопределенности, неполноты исходных данных исследованы недостаточно. Большинство систем моделирования СПРВ сильно ограничивают или исключают возможность полноценного участия инженера при решении сетевых задач;
2. Поставлена задача функционально-структурной диагностики, представляющая собой особую разновидность ранее не решавшихся обратных задач потокораспределения: по информационно неполному и недостоверному набору исходных данных, полученных по результатам пьезометрических съемок и статистических данных эксплуатационных организаций, оценить степень проявления технологических осложнений на участках сети: утечек, несанкционированных отборов, коррозионного зарастания.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 «Мягкое» моделирование и первичная диагностика СПРВ

2.1.1 Способы описания неопределенности параметров модели СПРВ

Неопределенность, присущая любой непротиворечивой системе, в том числе и СПРВ, может быть описана различными способами: вероятностным, лингвистическим (нечетким) или интервальным. Рассмотрим возможности использования различных способов задания неопределенности для возможности построения «мягкой» модели СПРВ.

С точки зрения **теории вероятности** мера неопределенности случайной величины X определяется функцией плотности вероятности $f(x)$, задающей вероятность того, что случайная величина X принимает значения, попадающие в интервал $(x, x+\Delta x)$, при $\Delta x \to 0$. Стохастическая модель применяется, когда факторам неопределенности можно приписать случайный вероятностный характер, т. е. задать их плотность вероятности.

В рамках **интервального подхода** неопределенность величины X ограничивается диапазоном возможных значений, которые может принимать величина X: $X \in [a,b]$. Пусть $x \in [a,b]$ и $y \in [c,d]$ два интервальных числа, тогда с точки зрения стандартной интервальной арифметики будут справедливы следующие соотношения для базовых арифметических операций:

$$x + y = [a,b] + [c,d] = [a+c, b+d], \tag{2.1}$$

$$x - y = [a,b] - [c,d] = [a-d, b-c], \tag{2.2}$$

$$x \times y = [a,b] \times [c,d] = [\min(a\times c, b\times c, a\times d, b\times d), \max(a\times c, b\times c, a\times d, b\times d)], \tag{2.3}$$

$$x / y = [a,b] / [c,d] = [\min(a/c, b/c, a/d, b/d), \max(a/c, b/c, a/d, b/d)]. \tag{2.4}$$

Нечеткая величина описывается множеством пар $A = ((x, \mu(x)); x \subseteq X)$, причем функция принадлежности $\mu(x): X \to [0,1]$. Функция принадлежности приписывает каждому элементу X степень его принадлежности к нечеткому множеству A. При $\mu(x)$ равном 1 элемент полностью принадлежит нечеткому множеству, равенство $\mu(x)$ нулю говорит об отсутствии принадлежности

элемента к нечеткому множеству, промежуточные значения обозначают частичную принадлежность элемента к нечеткому множеству. В том случае, если A определяется на оси действительных чисел, то множество A называют нечетким числом.

Конкретный вид функции принадлежности определяется соображениями о свойствах факторов неопределенности, представлениями экспертов о характере исследуемой системы и др. [70].

В работе будет использоваться ряд стандартных функций принадлежности, зарекомендовавший себя при моделировании технических систем [81].

Функция принадлежности S- класса $\mu_1(x,a,b)=\begin{cases}0; x\le a\\ \dfrac{2\times(x-a)^2}{(b-a)^2}; a<x\le\dfrac{a+b}{2}\\ 1-\dfrac{2\times(x-a)^2}{(b-a)^2}; \dfrac{a+b}{2}<x<b\\ 1; x\ge b\end{cases}$ - базовая функция, использующаяся для построения остальных. Функция принадлежности π- класса $\mu_2(x,a,b,c)=\begin{cases}\mu_1(x,a,b); x\le b\\ 1; b\le x\le c\\ 1-\mu_1(x,c,c+b-a); x>c\end{cases}$

и функция принадлежности t- класса $\mu_3(x,a,b,c)=\begin{cases}0; x\le a\\ \dfrac{x-a}{c-a}; a\le x\le c\\ \dfrac{b-x}{b-c}; c<x<b\\ 0; x\ge b\end{cases}$

используются для описания нечетких узловых отборов, расходов на участках и гидравлических сопротивлений. Функции принадлежности $\mu_4(x,a,b)=(1+\exp(-a\times(x-b)))^{-1}$ и $\mu_5(x,a,b,c)=\begin{cases}1; x\le c\\ \left(1+(a\times(x-c))^b\right)^{-1}; x>c\end{cases}$ будут использоваться для описания целевых функций разных типов. Графическая интерпретация функций принадлежности указанных классов представлена на рисунке 2.1.

Арифметические операции над нечеткими числами A и B определяются в соответствии с принципом расширения следующим образом.

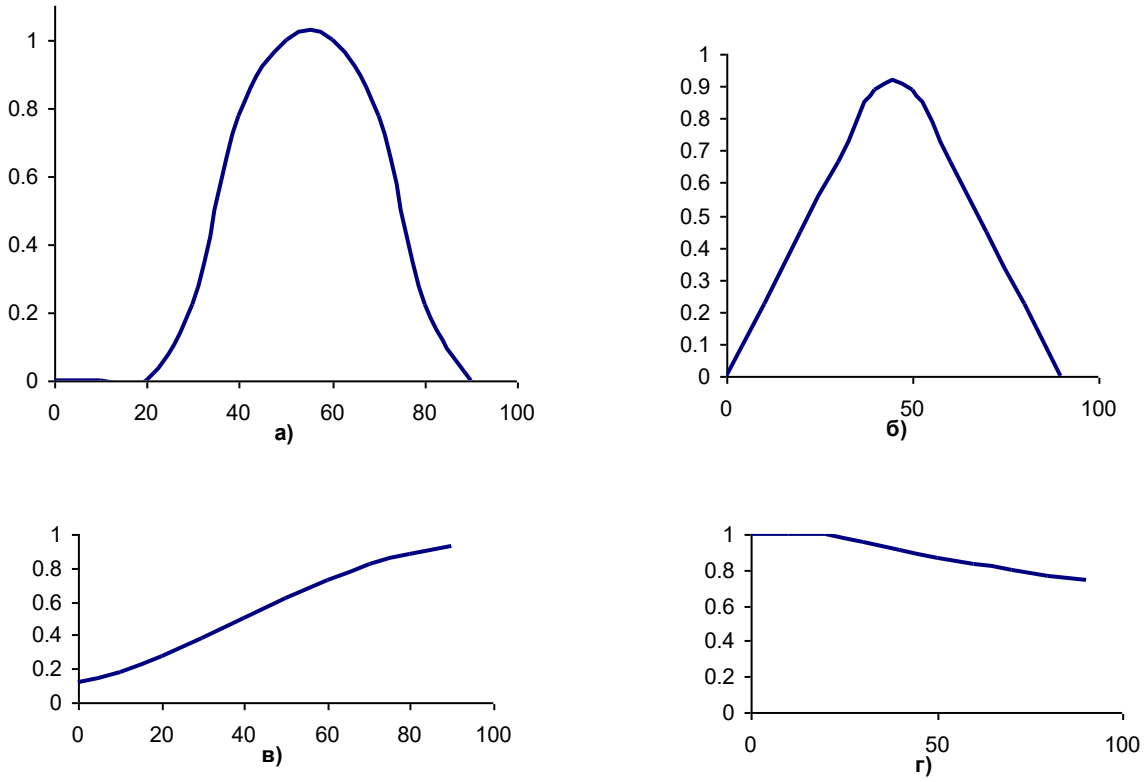


Рис. 2.1 Функции принадлежности стандартных классов, использующиеся при моделировании технических систем: а) функция π-класса, б) функция t-класса, в) функция μ_4, в) функция μ_5,

Арифметическая операция двух нечетких чисел A и B обозначается по определению $C = A \otimes B$, причем функция принадлежности задается выражением в виде $\mu_C(z) = \sup\limits_{\substack{x,y \\ z=s\otimes y}} \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$, здесь $\otimes$ - арифметическая операция.

Для проведения арифметических операций над нечеткими числами с непрерывными функциями принадлежности можно использовать обратный численный метод, заключающийся в сведении операций над нечеткими числами к интервальным вычислениям.

Зададим равномерное разбиение на отрезке [0, 1] – $r_i, i = 1 \div n$. Решив уравнения $\mu_A(x) = r_i, x \in [a,b]$, $\mu_B(y) = r_i, y \in [c,d]$ относительно x и y, получим r_i – уровневые множества $\sigma_{r_i}(A) = [x_i^1, x_i^2]$ и $\sigma_{r_i}(B) = [y_i^1, y_i^2]$. Для интервальных величин $[x_i^1, x_i^2]$ и $[y_i^1, y_i^2]$ можно выполнить операцию $\otimes$, руководствуясь, например, аксиоматикой (2.1) - (2.4). Интервал-результат следует рассматривать как r_i – уровневое множество, соответствующее в нечетком числе-результате степени принадлежности $\mu_C(z) = r_i$.

Для каждого r_i получаем набор интервалов, соответствующих различным уровням. От дискретного решения можно перейти к непрерывному, аппроксимируя полученные точки некоторой кривой.

Целесообразность применения подхода, при котором сети рассчитываются в условиях полирежимности и неполноты исходных данных с привлечением теории нечетких множеств, показана в работе [38]. Подход, в рамках которого гидравлические сопротивления, узловые отборы и давления рассматриваются как нечеткие числа, будет использован в работе при решении задачи функциональной и структурной диагностики. Здесь продемонстрируем возможности применения «мягкой» модели СПРВ для решения задачи первичной диагностики - метода сетевой идентификации, направленного на выявление в первом приближении «узких» мест в функционировании системы.

2.1.2 Задача первичной диагностики в рамках стохастического подхода

При эксплуатации систем подачи и распределения воды производятся периодические контрольные испытания по определению пропускной способности сети, испытания гидродинамической съемкой. По результатам верификации последних с результатами модельных расчетов делаются выводы о техническом состоянии СПРВ. По существу вопросы идентификации при данном подходе выносятся вне сферы моделирования,

поскольку соответствие модельных и натурных давлений оценивает инженер.

Задача о первичной диагностике может быть решена с использованием «мягкой» модели СПРВ в рамках стохастического, интервального и нечеткого подходов.

Будем рассматривать задачу стохастического моделирования 2 типа в случае нефиксированных подач водопитателей. Подачи насосных агрегатов и развиваемые ими напоры связаны функциональными зависимостями – техническими характеристиками. Воспользуемся вариационным подходом к решению системы уравнений Кирхгофа для сильносвязанного графа водопроводной сети. Подачи водопитателей будем моделировать фиктивными участками, которые (кроме одного водопитателя) при построении дерева графа отнесем к хордам. В этом случае полная система принимает следующий вид

$$\begin{cases} y = 1 - \left(\sum_{i=1}^{e} \int \left(\sum_{j=1}^{m_i} h_{ij}^{(n)}(q_i) - \sum_{j=1}^{n_i} h_{ij}^{(a)}(q_i) \right) dq_i \right) \to \max \\ q_i = \sum_{r=\upsilon}^{e} b_{1ri} q_r (i = \overline{1,\upsilon-1}; r = \overline{\upsilon,e}) \\ h_i = f(q_i); (i = \overline{1,e}) \end{cases}, \qquad (2.5)$$

где B – цикломатическая матрица, B_1 - цикломатическая матрица для перенумерованных дуг графа сети $B = [B_1 / I]$, I - единичная матрица размерности μ, $h_{ij}^{(n)}$ - параллельная переменная j – пассивного элемента i – дуги, $h_{ij}^{(a)}$ - параллельная переменная j – активного элемента i – дуги, m_i - число пассивных элементов, n_i - число активных элементов, μ - цикломатическое число, e - число дуг графа водопроводной сети, υ - число вершин графа водопроводной сети. В графе представления сети первые $\upsilon - 1$ дуг являются (это всегда можно обеспечить при перенумерации элементов графа) ветвями дерева сети, остальные μ - хордами (ветвями антидерева).

В общем случае узловые расходы не являются постоянными, а представляют собой случайные величины [93].

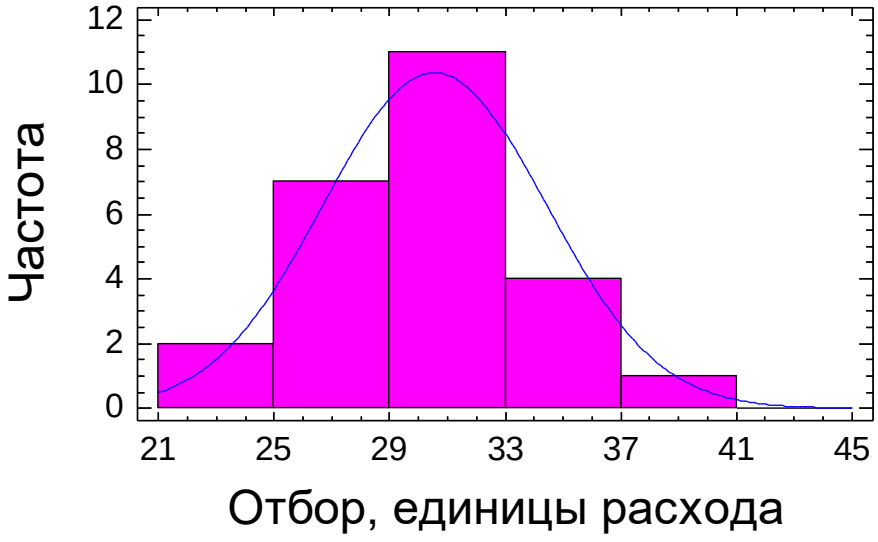


Рис. 2.2 Типичное распределение случайной величины сетевых отборов

С точки зрения задачи первичной диагностики важной является возможность получения доверительных интервалов для оценок (или интервалов адекватных значений) параллельных (давления) и последовательных (расхода) переменных, которые также являются случайными величинами. Вероятно, наиболее ценные результаты можно получить только при имитационном моделировании СПРВ. По результатам подобных расчетов можно получить распределения последовательных и параллельных переменных по участкам сети. Результаты имитационного моделирования показывают, что расходы на участках сети и давления в узлах сети можно в ряде случаев рассматривать как случайные величины, подчиняющиеся нормальному закону (см. рисунок 2.3).

Доверительный интервал оценок математических ожиданий последовательных и параллельных переменных для имитационной модели выражается в виде $I_\beta = \left(m - t_\beta \times \sigma_m, m + t_\beta \times \sigma_m\right)$,

где $\sigma_m = \sqrt{\frac{D}{n}}$, оценка математического ожидания $m = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$, оценка дисперсии

$D = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - m)^2}{n-1}$, $t_\beta = \frac{1}{\sqrt{2\times\pi}} \times \int_{-\infty}^{\frac{1+\beta}{2}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$. Отсюда можно определить количество необходимых реализаций для проведения имитации.

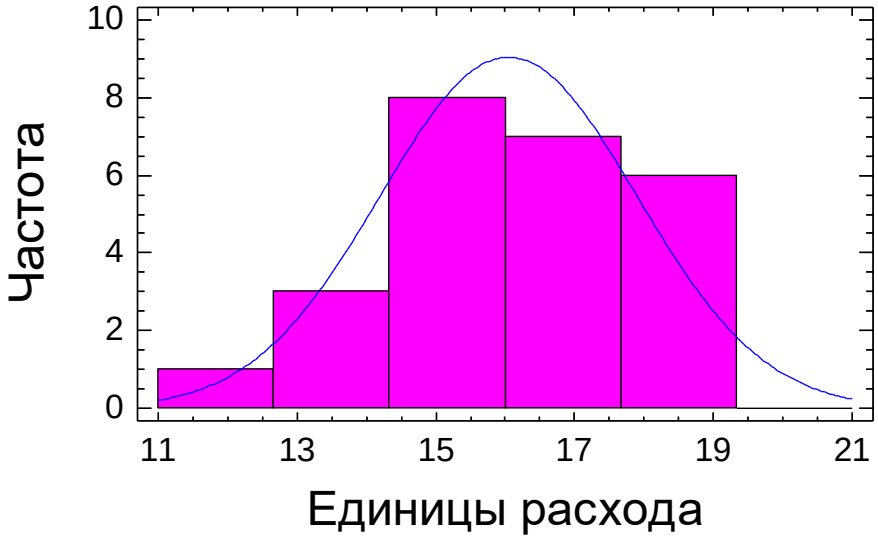


Рис. 2.3 Типичное распределение случайной величины сетевых расходов

Проведение подобных расчетов требует значительных вычислительных ресурсов, что делает в ряде случаев их использование невозможным. Оценочные расчеты могут быть выполнены по следующему алгоритму.

Модель потокораспределения можно представить в компактной форме

$$\overset{\cup}{Y} = \varphi(\overset{\cup}{X}), \qquad (2.6)$$

где $\overset{\cup}{Y}$ - случайный вектор решения, $\overset{\cup}{X}$ - случайный вектор исходных данных, φ - в общем случае нелинейная функция, инкапсулирующая законы Кирхгофа и замыкающие соотношения стационарной модели.

В первом приближении функцию φ в окрестностях точки $M_{\overset{\cup}{X}}$ можно заменить линейной, ограничиваясь при разложении φ в ряд Тейлора членами первого порядка. Линеаризации в данной модели подвергаются замыкающие соотношения.

В этом случае имеем систему случайных величин модели потокораспределения, связанных между собой линейными функциями типа

$y = \sum_{i=1}^{n} a_i \times x_i + b$. Математическое ожидание m_y и дисперсия σ_y^2 линейной функции определяются соотношениями

$$m_y = \sum_{i=1}^{n} a_i \times m_{x_i} + b,$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^{n} a_i^2 \times \sigma_{x_i}^2 + 2 \times \sum_{i \pi j} a_i \times a_j \times r_{ij} \times \sigma_{x_i} \times \sigma_{x_j}.$$

Линеаризация энергетического функционала $y = 1 - \left(\sum_{i=1}^{e} \int \left(\sum_{j=1}^{m_i} h_{ij}^{(n)}(q_i) - \sum_{j=1}^{n_i} h_{ij}^{(a)}(q_i) \right) dq_i \right)$ в системе, описывающей потокораспределение в сети, приводит к уравнениям типа

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{e} S_i \times m_{x_i} \to \min \\ \sum_{i=1}^{e} S_i^2 \times \sigma_{x_i}^2 + 2 \times \sum_{i \pi j} S_i \times S_j \times r_{ij} \times \sigma_{x_i} \times \sigma_{x_j} \to \min \end{cases}, \qquad (2.7)$$

где $S_i = S_{i0} \times q_i^{\,2}$ - фиктивные потери напора на участке, определяемые по результатам предварительного стационарного расчета, q_i - расход на соответствующем участке сети для стационарного расчета, S_{i0} - потери напора на i-ом участке, m_x - математическое ожидание расхода на участке сети, σ_x - дисперсия расхода на участке сети, x – случайная величина расхода на участке сети.

Особую проблему представляет определение нормированной корреляционной матрицы системы случайных величин

$$\left\| r_{ij} \right\| = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1n} \\ & 1 & r_{23} & \dots & r_{2n} \\ & & 1 & \dots & r_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \end{vmatrix},$$

где $r_{ij} = \dfrac{K_{ij}}{\sigma_i \times \sigma_j}$ - коэффициент корреляции случайных величин, $\sigma_i = \sqrt{D_i}$, $\sigma_j = \sqrt{D_j}$, D - дисперсии соответствующих случайных величин.

Имитационные расчеты СПРВ показывают, что некоторую часть элементов нормированной корреляционной матрицы можно принимать равными нулю. Прежде всего, это касается элементов, соответствующих отборам. Для прочих элементов предлагается назначать коэффициенты корреляции по результатам предварительных стационарных расчетов, варьируя сетевые отборы и определяя силу корреляционной связи расходов воды на участках.

Давление в узлах сети в силу того, что является композицией нормальных случайных величин (при линеаризации задачи), также является нормальной случайной величиной. Интервалы наиболее возможных значений для последовательных и параллельных переменных определяются из соотношения $P(|x-m|<l)=2\times\frac{1}{\sqrt{2\times\pi}}\times\int_{-\infty}^{\frac{l}{\sigma}}e^{-\frac{t^2}{2}}dt-1$, (2.8)

где $2\times l$ - ширина интервала, соответствующего вероятности P. Выход значений за пределы интервала может свидетельствовать о наличии осложнений эксплуатации на участках сети.

Верификация с имитационной моделью показала возможность применения описанного алгоритма при исследовании работы сети для характерных режимов водопотребления для незначительно отличающихся узловых отборов (при малых дисперсиях).

2.1.3 Задача первичной диагностики в рамках интервального и лингвистических подходов

Рассмотрим способ решения аналогичной задачи в рамках интервального подхода. Пусть узловые отборы представляют собой интервальные числа. В этом случае расходы на участках сети, а, значит, и узловые давления также интервалы. Выход натурных давлений за интервалы модельных можно рассматривать как индикацию на возможное осложнение. Воспользуемся алгебраическим подходом при моделировании сети.

Для простоты рассмотрим задачу 1-го типа с фиксированными подачами водопитателей. Потокораспределение в сети для стационарного состояния

описывается системой уравнений Кирхгофа с замыкающими соотношениями, полученными из гидравлических соображений:

$$\begin{cases} Q \times \overset{\rho}{q} = \overset{\rho}{q}_0 \\ B \times \overset{\rho}{h} = 0 \\ \overset{\varpi}{h} = f(\overset{\rho}{q}) \end{cases}, \qquad (2.9)$$

где Q – матрица главных сечений графа сети, B – цикломатическая матрица графа сети, f - функция, связывающая потери напора на участках сети $\overset{\cup}{h}$ с протекающими по ним расходами воды $\overset{\cup}{q}$, $\overset{\cup}{q}_0$ - интервальный вектор узловых отборов (подач). Будем считать, что количество воды, которое подается в сеть, полностью потребляется, и вектор $\overset{\cup}{q}_0$ этому условию удовлетворяет.

Система уравнений (2.9) нелинейная и содержит интервальный вектор. Методы решения систем нелинейных интервальных уравнений в настоящее время плохо изучены, поэтому для получения приблизительного решения задачи (2.9) линеаризуем систему.

Для линеаризации произведем гидравлический расчет для стационарного (когда узловые отборы заданы точечно) случая и перейдем от замыкающих соотношений вида $h_i = s_i \times q_{i0}^2$ к уравнениям типа $h_i = s_i \times q_{i0} \times q_i = s_{i0} \times q_i$,

где s_i - гидравлическое сопротивление i-го участка, q_{i0} - расход воды на i-ом участке для стационарного расчета, $s_{i0} = s_i \times q_{i0}$ - фиктивное гидравлическое сопротивление для интервального расчета, q_i - неизвестный интервал расходов на i-ом участке сети.

В результате такой линеаризации получим систему n алгебраических интервальных уравнений вида $S \times \overset{\cup}{U} = \overset{\cup}{F}$. (2.10)

Для решения (2.10) нами предлагается использовать метод Гаусса, адаптированный к решению систем интервальных линейных уравнений. Для определения компонентов интервального вектора расходов на участках сети $\overset{\cup}{U}$ необходимо преобразовать исходную матрицу S в матрицу треугольного вида при соответствующих преобразованиях вектора $\overset{\cup}{F}$. Переход от $S^{(i)}$ к

$S^{(i+1)}$ (при $i \le n-1$) матрице осуществляется по формулам Гаусса с использованием правил интервальной арифметики (2.1) – (2.4):

$$s_{i+1,i+1}^{(i+1)} = 1, \tag{2.11}$$

$$s_{k,i+1}^{(i+1)} = 0; \overline{k = i+2, n}, \tag{2.12}$$

$$s_{i+1,j}^{(i+1)} = s_{i+1,j}^{(i)} / s_{i+1,i+1}^{(i)}; \; j = \overline{i+2, n}, \tag{2.13}$$

$$f_{i+1}^{(i+1)} = f_{i+1}^{(i)} / s_{i+1,i+1}^{(i)}, \tag{2.14}$$

$$f_k^{(i+1)} = f_k^{(i)} - s_{k,i+1}^{(i)} \times f_{i+1}^{(i+1)}; k = \overline{i+2, n}, \tag{2.15}$$

$$s_{k,j}^{(i+1)} = s_{k,j}^{(i)} - s_{k,i+1}^{(i)} \times s_{i+1}^{(i+1)}; k = \overline{i+2, n}; \; j = \overline{i+2, n}. \tag{2.16}$$

На i-ом шаге преобразований матрица система уравнений имеет вид

$$\begin{pmatrix} 1 & s_{12}^{(1)} & s_{13}^{(1)} & \dots & \dots & \dots & s_{1n}^{(1)} \\ 0 & 1 & s_{23}^{(1)} & \dots & \dots & \dots & s_{2n}^{(2)} \\ . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & \dots & \dots & 1 & s_{i,i+1}^{(i)} & \dots & s_{in}^{(i)} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & s_{i+1,i+1}^{(i)} & \dots & s_{i+1,n}^{(i)} \\ . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & \dots & \dots & \dots & s_{n,i+1}^{(i)} & \dots & s_{nn}^{(i)} \end{pmatrix} \overset{\rho}{U} = \begin{pmatrix} f_1^{(1)} \\ f_2^{(2)} \\ \dots \\ f_i^{(i)} \\ f_{i+1}^{(i)} \\ \dots \\ f_n^{(i)} \end{pmatrix}. \tag{2.17}$$

После завершения перехода к треугольному виду компоненты вектора $\overset{\nu}{U}$ могут быть определены из соотношений

$$u_n = f_n^{(n)}, \tag{2.18}$$

$$u_i + \sum_{j=i+1}^{n} s_{ij}^{(i)} \times u_j = f_i^{(i)}; i = n-1, \dots 1. \tag{2.19}$$

В общем случае можно ввести интервальные гидравлические сопротивления в матрице S, однако предложенный алгоритм обеспечивает устойчивость только в том случае, когда S - интервальная M - матрица, F - неотрицательный интервальный вектор, то есть $f \ge 0$ для всех $f \in F$.

Ниже приводится пример решения задачи первичной диагностики в рамках интервального подхода. ■ Рассмотрим подачу воды в двухкольцевой сети, состоящей из трех участков длиной l_1 = 200 (м), l_2 = 100 (м), l_3 = 200 (м), из стальных труб условным проходом $D_1 = 100$ (мм), $D_2 = 125$ (мм),

$D_3 = 150$ (мм). Удельные гидравлические сопротивления участков $S_1 = 173\left(\frac{c^2}{м^6}\right)$, $S_2 = 76\left(\frac{c^2}{м^6}\right)$, $S_3 = 31\left(\frac{c^2}{м^6}\right)$. Пусть отборы в узле подачи и отбора заданы интервально $q_{узл} = 40 \div 50$ (л/с). Необходимо определить интервалы изменения давления в узле отбора.

Определим фиктивные сопротивления участков сети. Составим систему уравнений Кирхгофа, соответствующую задаче в четкой постановке с отборами, равными средним из интервала $q_{узл} = 40 \div 50$ (л/с):

$$\begin{cases} q_{10} + q_{20} + q_{30} = 0.045 \\ 34600 \times q_{10}^2 - 7600 \times q_{20}^2 = 0 \\ 7600 \times q_{20}^2 - 6200 \times q_{30}^2 = 0 \end{cases} \qquad (2.20)$$

Из решения системы уравнений (2.20) определяем значения фиктивных сопротивлений $S_{10} = 228\left(\frac{c}{м^2}\right)$, $S_{20} = 129\left(\frac{c}{м^2}\right)$, $S_{30} = 118\left(\frac{c}{м^2}\right)$. Запишем линеаризованную систему интервальных уравнений:

$$\begin{cases} q_1 + q_2 + q_3 = 0.04 \div 0.05 \\ 228 \times q_1 - 129 \times q_2 = 0 \\ 129 \times q_2 - 118 \times q_3 = 0 \end{cases}.$$

Решим систему уравнений методом Гаусса (2.11) – (2.19):

шаг 0: $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 228 & -129 & 0 \\ 0 & 129 & -118 \end{pmatrix} \times \overset{\rho}{U} = \begin{pmatrix} 0.04 \div 0.05 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$,

шаг 1: $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & -357 & -228 \\ 0 & 129 & -118 \end{pmatrix} \times \overset{\rho}{U} = \begin{pmatrix} 0.04 \div 0.05 \\ -11.4 \div -9.12 \\ 0 \end{pmatrix}$,

шаг 2: $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0.64 \\ 0 & 0 & -200.6 \end{pmatrix} \times \overset{\rho}{U} = \begin{pmatrix} 0.04 \div 0.05 \\ 0.026 \div 0.032 \\ -4.128 \div -3.354 \end{pmatrix}$,

шаг 3: $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0.64 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \overset{\rho}{U} = \begin{pmatrix} 0.04 \div 0.05 \\ 0.026 \div 0.032 \\ 0.0167 \div 0.021 \end{pmatrix}$.

Отсюда получаем, $q_3 = 0.0167 \div 0.021(м^3/с)$, $q_2 = 0.0153 \div 0.0186(м^3/с)$, $q_1 = 0.008 \div 0.0104(м^3/с)$. Для определения интервала изменений давления в узле отбора достаточно подсчитать потери напора по любой линии, они составят интервал $\Delta h = 1.7 \div 2.6(м.в.с.)$, соответственно колебания давления составят $\pm 0.9(м.в.с.)$. ■

В рамках нечеткого подхода систему уравнений (2.9) необходимо будет решить n раз по количеству разбиений на r_i – уровневые множества.

Кроме предложенных здесь подходов к решению задачи первичной диагностики и «мягкого» моделирования СПРВ, известны и некоторые другие. В работе [38] для приближенного решения задачи о нечетких отборах предлагается рассматривать координатные функции кольцевых сетей как четкие функции нечетких аргументов и применять для построения функций принадлежности обратный численный метод. Иными словами, автор вводит в набор алгебраических операций $\otimes$ новую – операцию гидравлической увязки кольцевой сети, распространяя на нее обратный численный метод. Этот метод будет использован в нашей работе при решении обратных задач потокораспределения.

Сравнение различных методов моделирования СПРВ в условиях неопределенности доказывает преимущества нечеткого и интервального (лингвистического) подходов.

При использовании стохастических моделей возникает проблема получения плотностей распределения вероятностей для параметров. Построить такие распределения можно только при наличии обширного статистического материала, представленного в соответствующей математической форме. На практике информация, необходимая для математического описания параметров модели СПРВ (давления, расходы, сопротивления), существует в форме представлений или пожеланий экспертов. Природа неопределенностей при рассмотрении инженерных объектов в большинстве случаев является не случайной, а нечеткой. При решении обратных задач исходная информация всегда представлена в

нечеткой форме, поскольку ее неопределенность обусловлена низким классом точности приборов, используемых при натурных замерах параметров СПРВ и понятийным аппаратом, использующимся экспертами.

В рамках стохастического подхода возникает целый ряд трудностей, связанных со сложностью, нерегулярными явлениями при решении систем стохастических уравнений.

2.2 Классификация элементов СПРВ в условиях неопределенности исходных данных

Для оценки состояний участков сети, возможности объединения их в группы – кластеры по различным признакам при решении задач диагностики был предложен способ их классификации на основе нейронно-нечетких систем и нечеткой информации эксплуатационных организаций.

Нами в качестве первой (основной) оценки состояния вводится **индекс аварийности** I_D**,** характеризующий степень принадлежности участка сети к множеству ненадежных. Здесь под множеством ненадежных участков понимается некоторое нечеткое множество со своей функцией принадлежности. Индекс аварийности представляет собой значение функции принадлежности (функции многих переменных) для конкретного участка сети. Цель классификации заключается в том, чтобы установить эту функцию и по ее виду определять количественную оценку эксплуатационной надежности участка сети. Из двух участков нами более надежным считается тот, у которого количество отказов за расчетных временной период меньше, чем у другого. При этом сам индекс не выводится напрямую из величины интенсивности отказов, а рассматривается как результат комплексной оценки определенного количества косвенных дестабилизирующих факторов, влияющих на показатели надежности участков трубопроводов в реальных условиях эксплуатации. В ряде работ рассматривается возможность выделения косвенных факторов с последующим ранжированием их по значимости. В [111] ранги приоритетности выстраивались посредством

составления матрицы доминирования, устанавливающей общую связность всех элементов системы дестабилизирующих факторов. Внутреннее ранжирование осуществлялось на основании опыта специалиста-эксперта.

Здесь предлагается использовать динамический аналог описанного подхода, при этом значимость дестабилизирующих факторов определяется на основании эксплуатации реальных инженерных сетей. Применение самонастраивающегося классификатора позволяет рассматривать процесс отказов на водопроводной сети, обусловленный помимо всего прочего еще и старением системы. Напомним, что в инженерной практике при проведении расчетов на надежность систем подачи и распределения воды обычно рассматривается простейший процесс, где реология не учитывается вообще.

В качестве инструмента для определения функции принадлежности к множеству ненадежных участков на основе имеющейся статистики используются модели искусственных нейронных сетей. По существу **искусственные нейронные сети** – класс нелинейных регрессионных моделей, включающий в себя большое количество однородных или разнородных элементов, соединенных различным способом, обладающих интерполяционными и экстраполяционными свойствами, позволяющими на информационном уровне моделировать поведение сложных объектов и систем. Рассмотрим модель нейронной сети и ее возможности при решении задач классификации.

Базовый элемент нервной системы – это нервная клетка, называемая нейроном. В нейроне выделяют тело клетки, называемое сомой, а также исходящие из него два вида отростков:

- по которым в нейрон поступает информация – дендриты;
- по которым нейрон передает информацию – аксон.

Каждый нейрон имеет только один выходной отросток, по которому он может передавать импульс нескольким другим нейронам. Кроме того, нейрон передает возбуждение другим нейронам через нервные стыки, называемые синапсами, при этом процесс передачи сигналов имеет сложную

электрохимическую природу. Синапсы играют роль репитеров информации, в результате функционирования которых возбуждение может усиливаться или ослабляться. Как следствие к нейрону приходят сигналы, одна часть из которых оказывает возбуждающее, а вторая – тормозящее воздействие.

Пусть $U_1,...,U_n$ - входные сигналы данного нейрона, приходящие от других нейронов, $w_1,...,w_n$ - синаптические веса, y – выходной сигнал нейрона, v - пороговое значение. Выходной сигнал нейрона может быть представлен в виде

$$y = \begin{cases} 1, \sum_{i=1}^{n} w_i u_i \geq v \\ 0, \sum_{i=1}^{N} w_i u_i < v \end{cases}. \qquad (2.21)$$

Из модели (2.21) можно исключить явно пороговое значение v

$$\begin{cases} y = f\left(\sum_{i=0}^{n} w_i u_i\right) \\ f(x) = \begin{cases} 1, x \geq 0 \\ 0, x < 0 \end{cases} \end{cases}. \qquad (2.22)$$

Модель (2.22) известна как модель МакКаллока и Паттсома. Функция $f(x)$ может быть задана различными способами. Здесь целесообразно представить ее в виде

$$f(x) = \begin{cases} 1, x \geq 0 \\ -1, x < 0 \end{cases}. \qquad (2.23)$$

Функция (2.23) называется биполярной функцией активации. Исторически первой моделью ИНС стал простейший персептрон (однослойная нейронная сеть с единственным нейроном). В основе построения персептрона лежит модель МакКаллока – Питса.

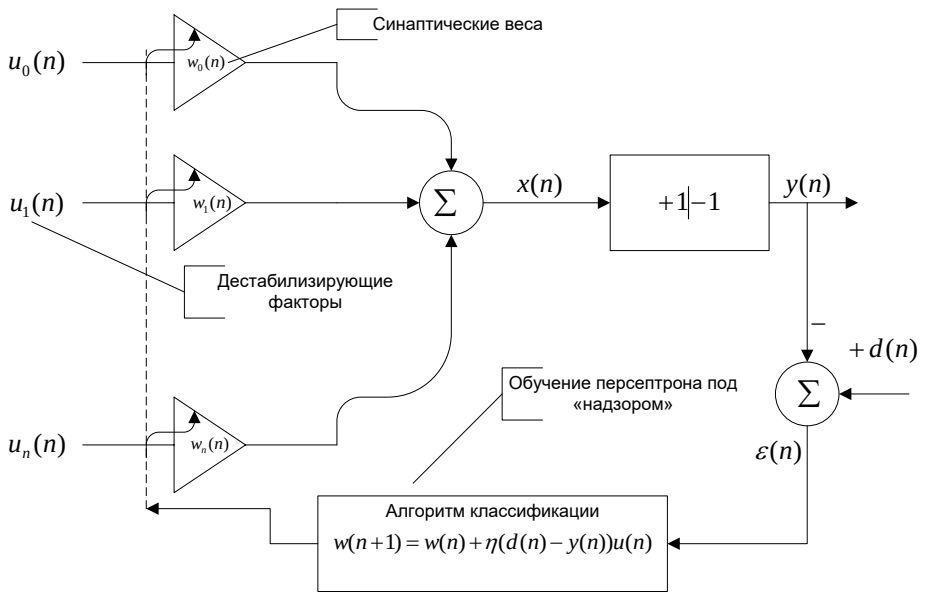


Рис. 2.4 Обучение простейшего персептрона под контролем

В качестве функции $f(x)$ применяется биполярная функция активации. Сигнал x на выходе линейной части персептрона задается выражением

$$x=\sum_{i=1}^{N} w_i u_i - v = \sum_{i=0}^{N} w_i u_i \,, \tag{2.24}$$

где $w_0 = v$, $u_0 = -1$.

Задача классификации в простейшем случае заключается в том, чтобы, располагая набором показателей (дестабилизирующими факторами), указать на возможность отнесения элемента к определенному множеству. Эта задача может быть сформулирована в рамках теории нейронных сетей следующим образом.

Необходимо классифицировать вектор $u=[u_{1,}...,u_n]^T$ в смысле отнесения его к одному из двух классов, обозначаемых символами L_1 и L_2. Персептрон относит вектор $u=[u_{1,}...,u_n]^T$ к классу L_1, если выходной сигнал y принимает значение 1, и к классу L_2, если выходной сигнал y принимает значение -1. После этого персептрон разделяет N-мерное пространство входных векторов $u=[u_{1,}...,u_n]^T$ на два полупространства ($N-1$)-мерной гиперплоскостью, задаваемой уравнением

$$\sum_{i=1}^{N} w_i u_i - v = \sum_{i=0}^{N} w_i u_i = 0 . \qquad (2.25)$$

Пусть синаптические веса $w_1,...,w_n$ в уравнении гиперплоскости (2.25) неизвестны, и пусть на вход персептрона последовательно подаются обучающие сигналы $u_n = [u_{1n,}...,u_{nn}]^T$.

Неизвестные значения весов будут определяться в процессе обучения персептрона. Обучение заключается в корректном отнесении сигналов $u_n = [u_{1n,}...,u_{nn}]^T$ к классам L_1 и L_2, несмотря на неизвестность весов уравнения решающей границы. По завершению процесса обучения персептрон должен корректно классифицировать поступающие на его вход сигналы, в том числе и те, которые отсутствовали в обучающей последовательности.

В n-й момент времени сигнал на выходе линейной части персептрона определяется выражением $x(n) = \sum_{i=0}^{N} w_i(n) u_i(n) = w^T(n) u(n)$, (2.26)

где $u(n) = \{-1, u_{1n}, u_{2n},...u_{Nn}\}$, $w(n) = \{v(n), w_{1n}, w_{2n},...w_{Nn}\}$.

Обучение персептрона заключается в рекуррентной коррекции вектора весов $w(n)$ согласно формуле

$$w(n+1) = \left[\begin{array}{l} \begin{cases} w(n), w^T(n)u(n) \geq 0 \wedge u(n) \in L_1 \\ w(n), w^T(n)u(n) < 0 \wedge u(n) \in L_2 \end{cases} \\ \begin{cases} w(n) - \eta \times u(n), w^T(n)u(n) \geq 0 \wedge u(n) \in L_2 \\ w(n) + \eta \times u(n), w^T(n)u(n) < 0 \wedge u(n) \in L_1 \end{cases} \end{array} \right. , \qquad (2.27)$$

где параметр η при $0 < \eta < 1$ - шаг коррекции, тогда как начальные значения компонент вектора весов устанавливаются равными нулю $w(0) = 0$ (необследованная водопроводная сеть).

Формула (2.27) может быть представлена в виде

$$w(n+1) = w(n) + (d(n) - y(n)) \times u(n), \qquad (2.28)$$

где $y(n) = \mathrm{sgn}(w^T(n) \times u(n))$, а $d(n) = \begin{cases} +1, u(n) \in L_1 \\ -1, u(n) \in L_2 \end{cases}$.

Соотношение (2.28) позволяет рассматривать $d(n) - y(n)$ как погрешность между эталонным сигналом $d(n)$ и фактическим выходным сигналом $y(n)$.

Сходимость (2.28) исследовал Розенблатт и сделал вывод, что при принятом условии линейной сепарабельности входных сигналов уравнение (2.28) сходится. Сказанное иллюстрирует рисунок 2.4.

По завершению обучения (обследования инженерной сети) решающая граница персептрона определяется выражением $\sum_{i=0}^{N} w_i(n_0)u_i = 0$, а персептрон корректно классифицирует сигналы, которые не принадлежат к обучающей выборке $u_n = [u_{1n,}...,u_{nn}]^T$.

Модель нейронной сети с единственным нейроном обладает ограниченными возможностями при решении реальных практических задач. Для определения функции принадлежности множества ненадежных участков воспользуемся моделью искусственной многослойной нейронной сети без обратных связей. В этих сетях сигнал передается в направлении от входного слоя через скрытые слои к выходному слою.

Для исследования возможности построения классифицирующей схемы (функции принадлежности нечеткого множества) применялась модель многослойной нейронной сети с базовым элементом типа Адалайн [81] с сигмоидальной функцией активации. Для построения нечеткой функции принадлежности к множеству надежных участков используется метод, получивший название в специальной литературе «обучение нейронной сети с учителем». Применительно к поставленной задаче он используется следующим образом.

На первом этапе собирается фактический материал об отказах на инженерных сетях: количество отказов на конкретных участках, характеристика участков сети, на которых имели место отказы. Таким образом, каждый участок однозначно характеризуется вектором (X) – его характеристикой и количеством отказов за рассматриваемый временной период (Y) (см. рисунок 2.5). Нормированную величину количества отказов (принимающую значения от 0 до 1) можно рассматривать как значение функции принадлежности к множеству ненадежных участков – **индекс**

аварийности. Располагая информацией об экономическом ущербе от возникшей аварийной ситуации, можно по аналогии ввести **индекс неблагоприятности** I_C – значение функции принадлежности множества участков, аварии на которых приводят к значительным экономическим потерям.

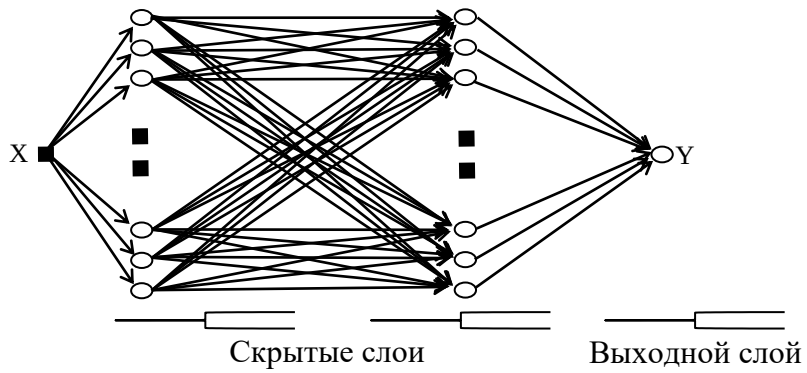


Рис. 2.5 Многослойная нейронная сеть со скрытыми слоями (уровнями)

На втором этапе производится процесс «обучения» нейронной сети, результатом которого является формирование такой ее структуры, которая по вектору характеристик участка (входной характеристики) однозначно определяет его индексы аварийности и неблагоприятности (выходные характеристики), т.е. значения функции принадлежности к соответствующим множествам. Фактически на основе собранной статистики осуществляется преобразование синаптических матриц. Для этой цели имеющийся массив статистических данных делится на две части. Первая часть (составляющая 80% от всего объема информации) используется для обучения сети. Процесс обучения заключается в следующем: на вход сети последовательно подаются векторы характеристик участков, на выход – известные индексы аварийности и неблагоприятности (эталонные сигналы); в результате осуществляется итерационный процесс обучения - связи внутри искусственной нейронной сети подвергаются трансформации. Конечным результатом такой

трансформации является то, что искусственная нейронная сеть начинает однозначно по исходному вектору характеристик классифицировать участки по степени принадлежности к множеству ненадежных и неблагоприятных. Вторая часть массива статистических данных (20% от всего объема статистической информации) используется для проверки работы обученной сети.

В дальнейшем построенная и обученная искусственная нейронная сеть позволяет классифицировать участки, не вошедшие в выборку, которая использовалась для обучения. Достоинство предложенного подхода заключается в том, что значимость дестабилизирующих факторов определяется на основе конкретного статического материала и может уточняться в дальнейшем при эксплуатации системы. Нейронная классификация позволяет корректно обращаться с неопределенно (интервально, нечетко) заданными характеристиками. Эффективность метода по объему обучающих выборок превосходит известные статистические методы.

При программной реализации метода в качестве входных сигналов искусственной нейронной сети принимались параметры, характеризующие (см. рисунок 2.6):

- ***год укладки участка трубопровода;***
- ***материал труб;***
- ***диаметр участка трубопровода и толщину его стенки;***
- ***химический состав вод, перекачиваемых по участку трубопровода;***
- ***глубину заложения труб;***
- ***гидродинамические особенности участка трубопровода;***
- ***состояние грунтов вокруг трубопровода;***
- ***наличие подземных вод;***
- ***особенности движения и интенсивность транспортных потоков;***
- ***наличие СКЗ и защитных слоев на материале труб;***
- ***дефекты поверхности и тела трубы.***

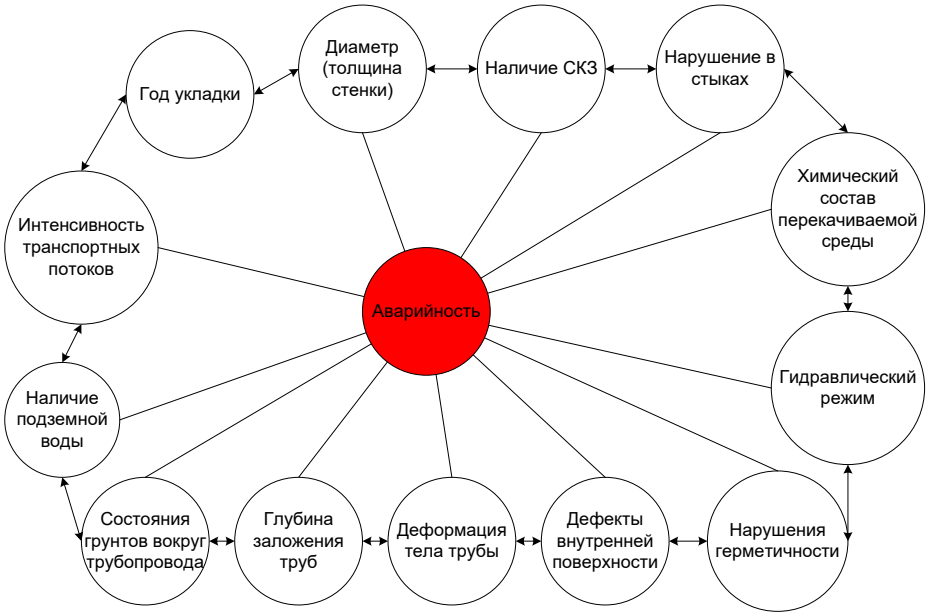


Рис. 2.6 Дестабилизирующие факторы эксплуатации водопроводных сетей

Входные сигналы – числа от 0 до 1, характеризующие степень проявления соответствующего фактора. Для формализации неточных и многозначных понятий используются нечеткие множества. На рисунке 2.7 для примера показана возможная функция принадлежности нечеткого множества «большой диаметр» трубопровода, использующаяся при описании состояния участка сети. Эксперты самостоятельно устанавливают соответствующие функции принадлежности для описания дестабилизирующих факторов, которыми они руководствуется при анализе. Работники же эксплуатационных служб могут иметь различные представления о степени проявления дестабилизирующих факторов на каждом конкретном участке водопроводной сети и по-разному оценивать ситуацию по дестабилизирующим факторам. По этим причинам использовать стандартные методы классификации здесь затруднительно. Замечательной особенностью нейросетевых моделей являются их внутренние регуляризирующие свойства, позволяющие получать малые ошибки обобщения при работе с нечеткими величинами.

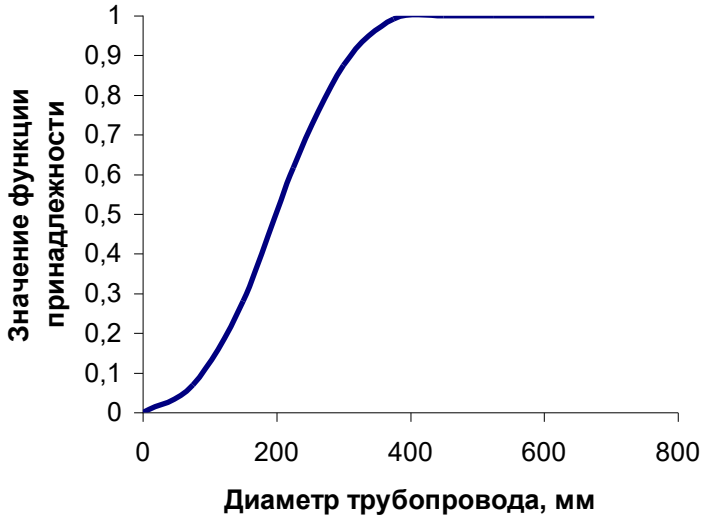


Рис. 2.7 Функция принадлежности нечеткого множества «большой диаметр» трубопровода

В предлагаемой информационной структуре отсутствует ряд элементов, отвечающих за оценку характеристик надежности материала трубопровода непосредственно. Однако исследования работы нейронного классификатора позволили убедиться, что данная структура позволяет косвенно эксплицировать большинство дестабилизирующих факторов.

При использовании нейронных сетей для целей классификации информация о структуре связей между указанными дестабилизирующими факторами не требуется. Такие связи устанавливаются классификатором самостоятельно в процессе обучения.

В качестве выходных сигналов (искомых критериев) рассматриваются числа в диапазоне от 0 до 1 – **индекс аварийности** I_D и **индекс неблагоприятности** I_C.

Как уже было сказано, для решения реальной задачи применялась многослойная нейронная сеть с элементами типа Адалайн.

Обучение сети осуществлялось методом обратного распространения ошибки [81]:

$$
\begin{aligned}
&y_i^{(k)}(n) = f(s_i^{(k)}(n)) \\
&s_i^k(n) = \sum_{j=0}^{N_{k-1}} w_{ij}^{(k)}(n) \times x_j^{(k)} \\
&\varepsilon_i^{(k)}(n) = \begin{cases} d_i^{(L)}(n) - y_i^{(L)}(n), k = L \\ \sum_{m=1}^{N_{k+1}} \partial_m^{(k+1)}(n) \times w_{mi}^{(k+1)}(n), k = 1..., L-1 \end{cases} \\
&\partial_i^{(k)}(n) = \varepsilon_i^{(k)}(n) \times f'(s_i^{(k)}(n)) \\
&w_{ij}^{(k)}(n+1) = w_{ij}^{(k)}(n) + 2\eta \times \partial_i^{(k)}(n) \times x_j^{(k)}(n) + \alpha\left(w_{ij}^{(k)}(n) - w_{ij}^{(k)}(n-1)\right)
\end{aligned}
\quad , \qquad (2.29)
$$

где $w_{ij}^{(k)}$ - j синаптический вес i нейрона для k слоя, $s_i^k(n)$ - аргумент функции активации i нейрона для k слоя, $d_i^{(L)}(n)$ - эталонный выходной сигнал i нейрона последнего слоя нейронной сети, $y_i^{(k)}(n)$ - фактический выходной сигнал i нейрона для k слоя, $\varepsilon_i^{(k)}(n)$ - различие между фактическим выходным сигналом i нейрона для k слоя и тем, который требуется для того, чтобы на выходе из сети получить эталонный выходной сигнал, $x_j^{(k)}$ - j выходной сигнал от нейронов $k-1$ уровня, поступающих на k уровень, $\partial_i^{(k)}(n)$ - поправочный коэффициент i нейрона для k слоя, L - количество слоев искусственной нейронной сети, $f(s)$ - функция активации нейрона, η, α - параметры итерационного процесса обучения, подбирающиеся экспериментально.

На основе модели искусственной многослойной нейронной сети нами был разработан комплекс программ, реализующих принцип классификации (см. рисунок 2.8) участков сети.

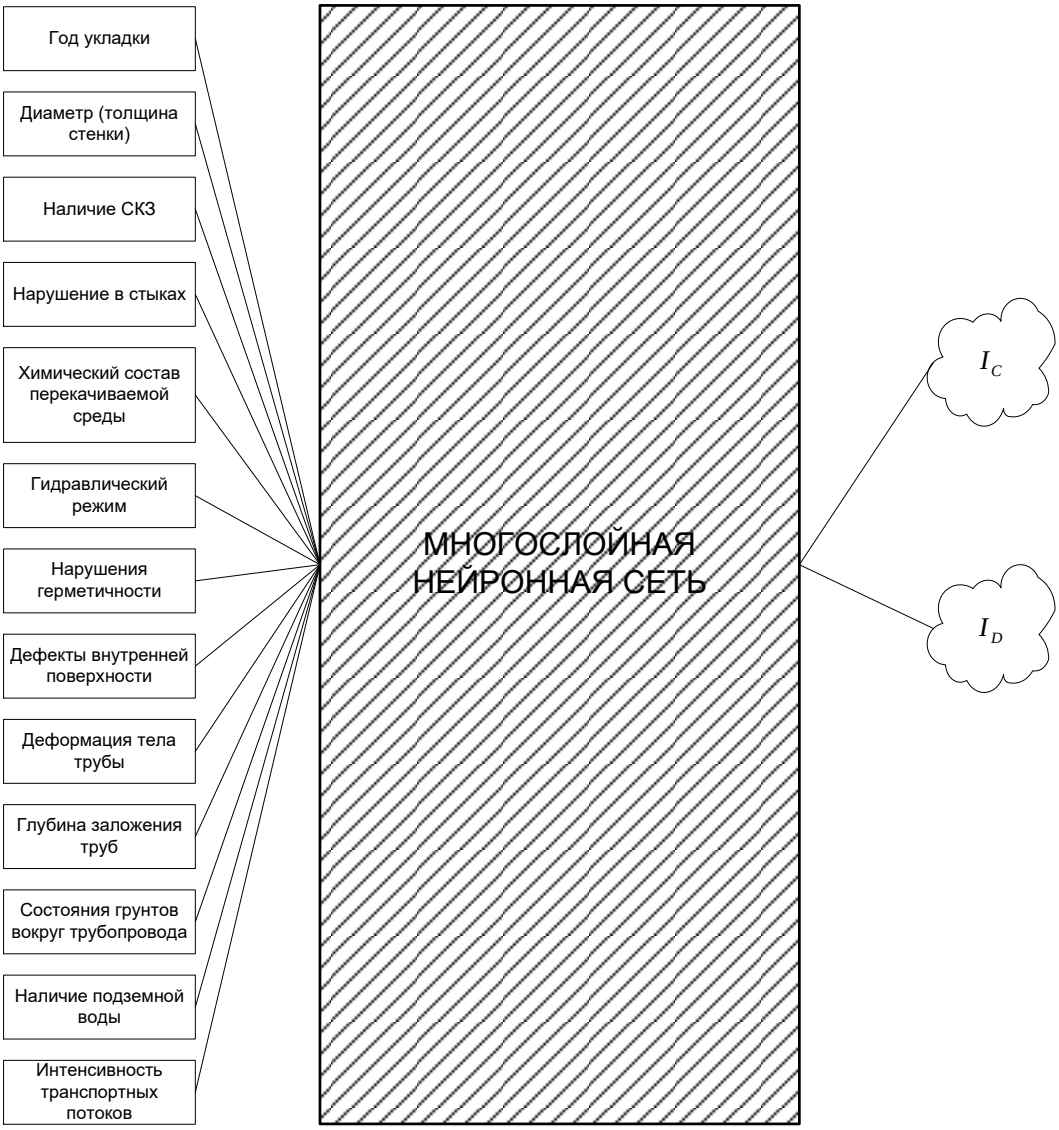
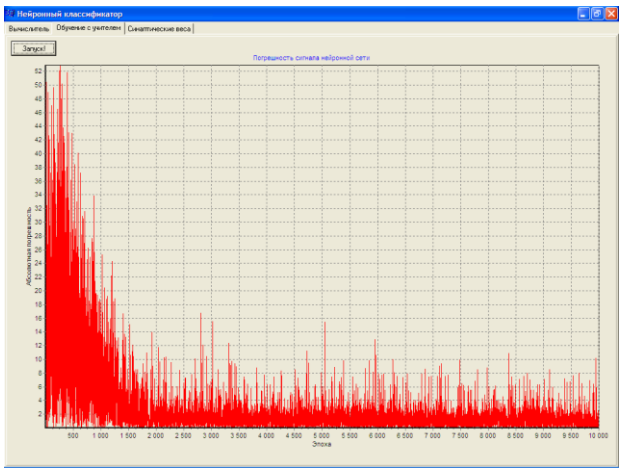


Рис. 2.8 Применение многослойных нейронных сетей для классификации участков сетей

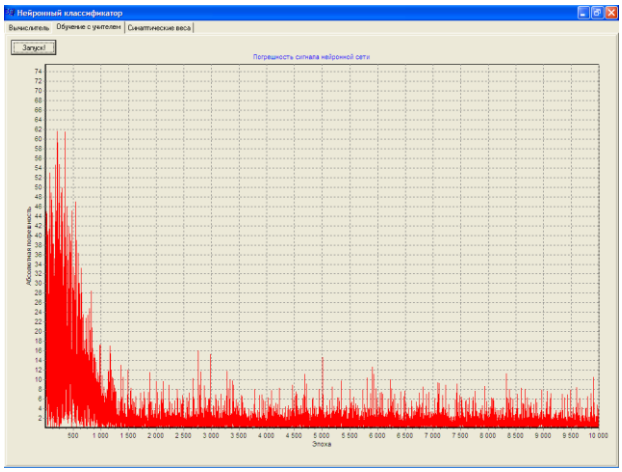
Для обучения системы использовались данные эксплуатации реальных водопроводных сетей Республики Карелия и Ленинградской области. Результаты обучения нейронных сетей приведены на рисунках 2.9 – 2.11.



Y

X

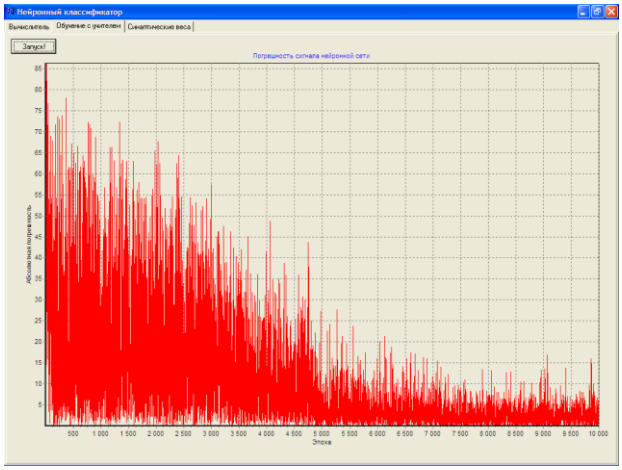
Рис. 2.9 Результат обучения двухслойной нейронной сети с 13 нейронами на скрытом уровне, X – объем обучающей выборки, Y – относительная погрешность выходного сигнала



Y

X

Рис. 2.10 Результат обучения двухслойной нейронной сети с 20 нейронами на скрытом уровне, X – объем обучающей выборки, Y – относительная погрешность выходного сигнала



Y

X

Рис. 2.11 Результат обучения трехслойной нейронной сети с 30 нейронами на скрытых уровнях, X – объем обучающей выборки, Y – относительная погрешность выходного сигнала

Как видно, двухслойная нейронная сеть с 20 нейронами на скрытом уровне позволяет с высокой степенью достоверности классифицировать по дестабилизирующим факторам принадлежность участка к множеству ненадежных (**индекс аварийности**). При этом для обучения классификатора понадобилось 1500 эталонных сигналов, что относительно немного.

После обучения классификатора появляется возможность получать функциональные зависимости между различными дестабилизирующими факторами и изменением степени принадлежности участка к множеству ненадежных. Результаты классификации при исследовании влияния дестабилизирующих факторов на аварийность водопроводных сетей приведены в третьей главе работы.

2.3 Оптимизация СПРВ в условиях неопределенности

2.3.1 Использование генетических алгоритмов для решения оптимизационных задач в особых условиях

Для решения оптимизационных задач в условиях неопределенности, неполноты исходных данных и «мягком» моделировании СПРВ требуются особые методы. В данной работе предложено использовать генетические алгоритмы (ГА), сочетающие свойства градиентных и случайных методов поиска, построенные на эволюционной метафоре, зарекомендовавшие себя при решении оптимизационных задач высокой размерности

История эволюционных вычислений началась с разработки ряда различных независимых моделей. Основными из них были генетические алгоритмы и классификационные системы Голланда (Holland), опубликованные в начале 60-х годов и получившие всеобщее признание после выхода в свет книги, ставшей классикой в этой области, - "Адаптация в естественных и искусственных системах" ("Adaptation in Natural and Artifical Systems", 1975). В последующем генетические и эволюционные алгоритмы стали широко применяться для решения самых разнообразных технических и экономических задач [81].

Генетические алгоритмы (ГА) – это методы случайного поиска, инкапсулирующие отдельные механизмы естественной биологической эволюции. Результатом работы подобных алгоритмов является пространство решений (в терминологии ГА – популяция), которое с некоторыми оговорками можно назвать оптимальным. Окончательный выбор в пользу того или иного решения принимает человек (инженер) на основании собственного опыта, интуиции и эвристического анализа.

В самом общем виде алгоритм решения любой оптимизационной задачи с точки зрения теории генетических алгоритмов может быть представлен следующим образом (см. рис. 2.12). В пространстве допустимых решений можно выделить некоторое количество наиболее ожидаемых решений. Причем «ожидаемость» на самом деле может быть относительной.

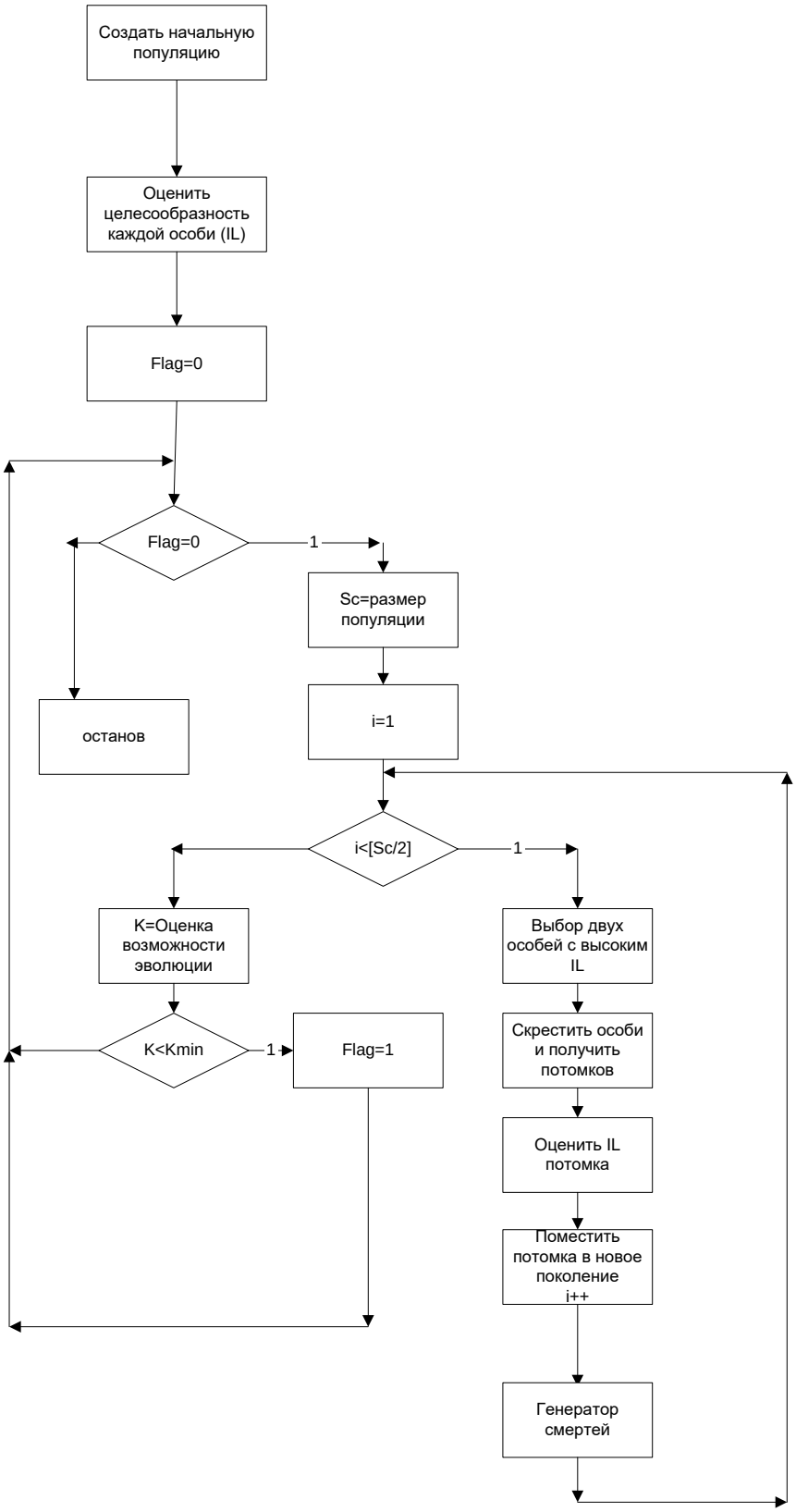


Рис. 2.12 Общий вид генетического алгоритма при решении оптимизационных задач

Инициализация

Популяция P_K

Хромосома 1: [00…0]
Хромосома 2: [10…0]
Хромосома 3: [11…0]
…
Хромосома N: [11…1]

Оценивание приспособленности:

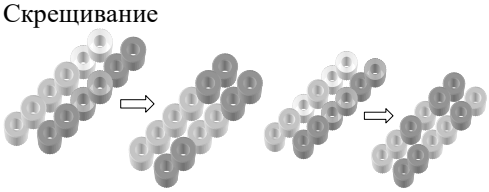
Условия завершения поиска:
Значение целевой функции достигло теоретического минимума или больше не уменьшается

Новая популяция

Популяция P_{K+1}

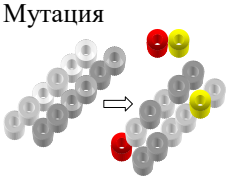
Хромосома 1: [00…0]
Хромосома 2: [10…0]
Хромосома 3: [11…0]
…
Хромосома N: [11…1]

Генетические операторы:
Скрещивание



$$\begin{cases}[01...10..1]\\[10...01..0]\end{cases} \Rightarrow \begin{cases}[01...11..1]\\[10...00..0]\end{cases}$$

Мутация



$$\{[10...1...0] \Rightarrow [10...0...0]$$

Селекция:
- элитный отбор
- неэлитный отбор (отбор с атавизмами)

Рис. 2.13 Структура генетического алгоритма

Процесс выделения первоначальных допустимых решений в рамках теории генетического моделирования (ТГМ) называется функцией создания начальной популяции. Таким образом, каждый из вариантов решения задачи представляет собой «особь», наделенную рядом специфических свойств. Совокупность генов (хромосома), определяет конкретную особь (вариант водопроводной сети). Жизнь особей подчиняется ряду законов, основными из которых являются:

- закон кроссинговера;
- закон мутации;
- закон смерти.

Конкретное содержание каждого из законов определяется особенностями решаемых оптимизационных задач. В общих чертах закон кроссинговера определяет операцию, при которой две хромосомы обмениваются своими частями, закон мутации определяет случайное изменение одной или нескольких позиций в хромосоме, закон смерти выделяет наиболее приспособленные к условиям задачи особи. В целом генетический алгоритм имитирует эволюцию первоначальной популяции как циклический процесс скрещивания индивидуумов и смены поколений.

Жизненный цикл популяции - это несколько случайных скрещиваний (посредством кроссинговера) и мутаций, в результате которых к популяции добавляется какое-то количество новых индивидуумов. Отбор в генетическом алгоритме - это процесс формирования новой популяции из старой, после чего старая популяция погибает. После отбора к новой популяции опять применяются операции кроссинговера и мутации, затем опять происходит отбор, и так далее (см. рисунок 2.13).

Отметим главные особенности генетических алгоритмов при решении оптимизационных задач [81]:

1) генетические алгоритмы обрабатывают не значения параметров самой задачи, а их закодированную форму;

2) осуществляют поиск решения, исходя не из единственной исходной точки, а из их некоторой популяции;

3) используют только целевую функцию, а не ее производную или иную дополнительную информацию;

4) применяют вероятностные, а не детерминированные правила выбора.

К достоинству предложенного метода можно отнести возможность находить альтернативы на всём множестве возможных решений без излишних вычислительных затрат, альтернативы всегда доступны лицу, принимающему решения (ЛПР), и окончательное решение о выборе той или иной всегда остается за ним. Кроме того, появляется возможность искусственно ограничивать пространство возможных решений, модифицируя формулировку задачи оптимизации под собственные нужды.

2.3.2 Методика применения генетических алгоритмов при решении сетевых задач на примере задачи оптимального синтеза СПРВ

Генетические алгоритмы будут использованы нами при исследовании пространства решений задачи функциональной и структурной диагностики, решении частных обратных задач потокораспределения при определении фактических гидравлических сопротивлений участков СПРВ, сетевых отборов в узлах.

Методика использования ГА при решении различных задач в целом однотипна. Более подробно проиллюстрируем порядок использования ГА на примере решения общей задачи оптимального синтеза СПРВ [90] в условиях нечетко заданной целевой функции.

Здесь будем считать, что топология сети задана, а варьироваться будут диаметры сети с тем, чтобы обеспечить минимизацию приведенных затрат на строительство и эксплуатацию системы.

В общем случае оптимизационная задача ставится следующим образом. Требуется определить диаметры участков сети, удовлетворяющие критерию

оптимальности, который принимается равным сумме капитальных и эксплуатационных затрат в виде

$$f = \sum_{i \in M} A_i D_i^n + \sum_{i \in M} B_i h_i q_i \,, \qquad (2.30)$$

где A - комплекс, определяющий стоимость прокладки участка трубопровода, B – комплекс, учитывающий стоимость перекачки транспортируемой среды по участку трубопровода и эксплуатации насосного оборудования, h - диссипация энергии на участке, q – расход на участке.

На комплексы A и B могут накладываться дополнительные условия, которые определяют специфику решаемой задачи. Часть этих условий не может быть сформулирована аналитически, и при решении задачи классическими методами нелинейного дискретного математического программирования их бы пришлось игнорировать. Рассмотрим сначала возможности минимизации целевой функции при ограничениях в виде неравенств и двусторонней ограниченности переменных (случай статической оптимизации при проектировании новой СПРВ):

$$y = \sum_{i \in M} A_i D_i^n + \sum_{i \in M} B_i h_i q_i \to \min \,. \qquad (2.31)$$

Ограничения, определяющие область допустимых решений:

1) Ограничения, накладываемые моделью потокораспределения

$$q_i = \sum b_{1ri} q_r \, (i = \overline{1, \upsilon - 1}; r = \overline{\upsilon, e}) \,, \qquad (2.32)$$

$$\Delta h = \sum_{i=1}^{m_r} h_{ri}^{(n)}(q_r) - \sum_{i=1}^{n_r} h_{ri}^{(a)}(q_r) + \sum_{i=1}^{\upsilon-1} b_{1ri} \left(\sum_{j=1}^{m_i} h_{ij}^{(n)}(q_i) - \sum_{j=1}^{n_i} h_{ij}^{(a)}(q_i) \right) = 0 \,, \qquad (2.33)$$

где B – цикломатическая матрица, B_1 - цикломатическая матрица для перенумерованных дуг графа сети $B = [B_1 / I]$, в которой первые $\upsilon - 1$ дуг являются ветвями дерева сети, остальные μ - хордами, I - единичная матрица размерности μ, $h_{ij}^{(n)}$ - параллельная переменная j – пассивного элемента i – дуги, $h_{ij}^{(a)}$ – параллельная переменная j – активного элемента i – дуги, m_i - число пассивных элементов, n_i - число активных элементов, μ -

цикломатическое число, e - число дуг графа водопроводной сети, υ- число вершин графа водопроводной сети;

2) Ограничения, накладываемые сортаментом $D_i^+ \le D_i \le D_i^{++} (i \in M)$; (2.34)

3) Ограничения, накладываемые величиной напоров источников и скоростями движения воды в сети

$$h_i^+ \le h_i \le h_i^{++} (i \in L), \quad (2.35)$$

$$h_i^+ \le h_i \le h_i^{++} (i \in M), \quad (2.36)$$

где L – множество индексов участков с насосными станциями, M – множество индексов участков водопроводной сети;

4) Дополнительные ограничения, определяемые спецификой задачи (в том числе и нечеткие).

Особенности решения данной оптимизационной задачи заключаются в следующем. Условие (2.34) превращает рассматриваемую задачу в задачу дискретного программирования при ограничениях в виде неравенств и двусторонней ограниченности переменных. Функция (2.30) на множестве допустимых решений является выпукло-вогнутой.

Упрощенный вариант решения задачи, используемый на практике, предусматривал: а) снятие дискретности с условия (2.34) с последующим восстановлением после получения решения, б) поиск оптимального решения для заданного «оптимального» потокораспределения, в) игнорирование дополнительных нечетких ограничений.

Приближенное решение оптимизационной задачи (2.31) было обусловлено отсутствием математического аппарата по решению задачи (задача дискретного программирования при ограничениях в виде неравенств и двусторонней ограниченности переменных). Применение аппарата генетического программирования позволяет обойти, в том числе, и эту проблему.

Для каждого варианта водопроводной сети разрабатывается структура состояния (хромосома), экспликацией которой является семантическое описание варианта. В данном случае хромосома несет информацию только о

диаметрах участков сети, соответственно каждый участок характеризуется одним параметром (геном) – его диаметром. Необходимо найти такие решения, которые оптимизируют значения целевой функции (функции пригодности), описывающей затраты на строительство и эксплуатацию сети.

Особой проблемой при разработке ГА является построение функции пригодности. Именно она определяет направление генетического поиска, степень адекватности решения. Преимущества ГА заключаются в том, что на функцию пригодности не накладываются никакие ограничения, но, тем не менее, выбор структуры функции пригодности должен быть четко обоснован. В данном случае в качестве функции пригодности принимается функция (2.30).

Решение рассматриваемой можно разбить на следующие вспомогательные подзадачи:

а) начальный этап

На начальном этапе, исходя из «экономичных» интервалов скоростей движения воды в трубах сети, создается начальная популяция (варианты) решения задачи - назначаются диаметры участков сети.

б) вычисление функции пригодности (целевой функции)

Для каждого возможного варианта решается главная задача анализа (определение потокораспределения сети), возможно и для нескольких характерных режимов работы (максимальное водопотребление в сутки максимального водопотребления, минимальное водопотребление в сутки минимального водопотребления, пожар в час максимального водопотребления).

После решения главной задачи анализа вычисляется значение целевой функции. Определение потокораспределения в сети с точки зрения вариационного подхода есть задача безусловной оптимизации. В теории гидравлических цепей доказывается [61], что существует унимодальная функция, переменные которой связаны между собой соотношением (2.32), и стационарные точки совпадают с корнями системы (2.32) и (2.33):

$$y = \sum_{i=1}^{e} \int \left(\sum_{j=1}^{m_i} h_{ij}^{(n)}(q_i) - \sum_{j=1}^{n_i} h_{ij}^{(a)}(q_i) \right) dq_i \ . \qquad (2.37)$$

Функция (2.37) при выполнении первого закона Кирхгофа (3.32) строго выпукла, что позволяет решать задачу потокораспределения, используя методы безусловной оптимизации, при этом в виду унимодальности (2.37) гарантируется сходимость при любом начальном приближении задачи. Этот факт существенно упрощает решение. Быстродействие современной вычислительной техники позволяет при поиске оптимума функции (2.34) для сетей, содержащих 200 – 600 участков работать с популяцией, состоящей из 100 – 200 особей. Этого вполне достаточно, чтобы за приемлемое время получить «оптимальную» популяцию. При этом надо помнить о фиктивном характере такой «оптимальности», обусловленным, во-первых, природой самого метода, а, во-вторых, выпукло-вогнутостью функции (2.37).

в) реализация собственно оптимизационного алгоритма

Главная проблема – обозначить области применения различных типов кроссинговера в зависимости от специфики решаемой задачи. В целом независимо от реализации кроссинговер контролирует баланс между дальнейшим использованием уже исследованных и благоприятных в отношении целевой функции областей пространства допустимых решений и исследованием новых [81].

В простейшем случае все решения, целевая функция которых на данном этапе расчета меньше средней в популяции, исключаются из процесса «эволюции». Новые решения генерируются путем случайной рекомбинации двух вариантов (по одному фрагменту от каждого) решения задачи. Этот подход имеет свои достоинства (см. далее), однако не позволяет исследовать пространство решений наиболее эффективным образом.

При разработке генетического оптимизатора использовались три различные реализации функции кроссинговера и селекции. Генетические схемы и результаты работы разработанной нами программы генетического оптимизатора водопроводных сетей приведены ниже. Для примера была

рассмотрена задача оптимизации гидравлической цепи (общий вид приведен на рисунке 2.14), состоящей из 27 участков, образующих 7 независимых циклов. В результате исследования определялись вычислительные затраты на поиск оптимальных (субоптимальных) решений, влияние различных типов кроссинговера на расширение пространства возможных решений, возможности исключения технически непригодных решений за счет особенностей генетического алгоритма.

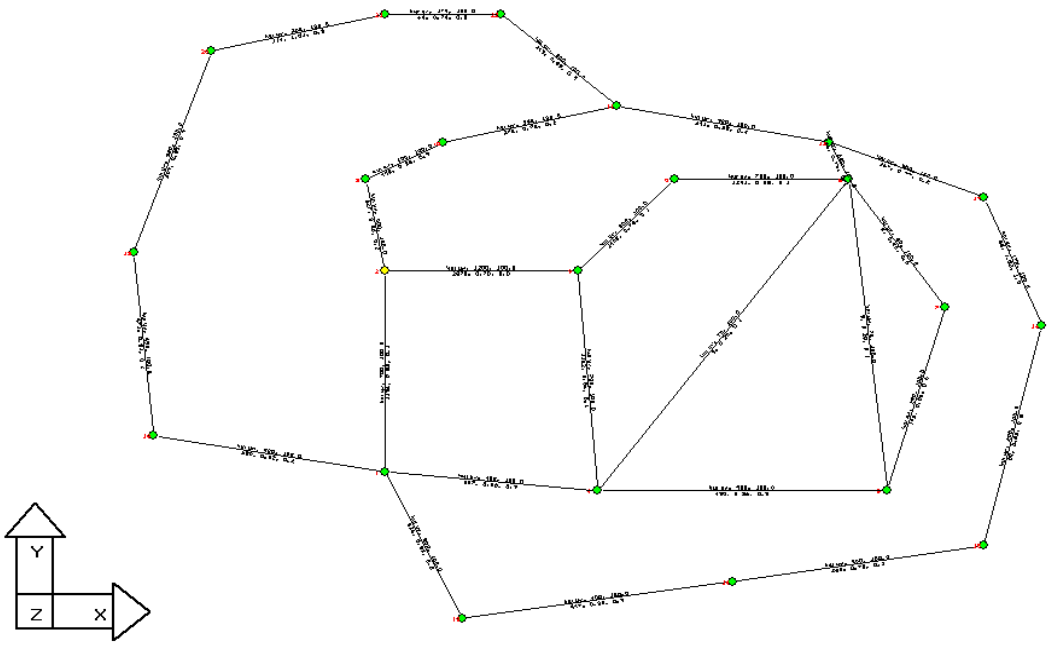


Рис. 2.14 Общий вид гидравлической цепи, подлежащей оптимизации

Модель 1: Элитный отбор с одноточечным кроссинговером (см. рисунок 2.15)

Возможности мутации по этому варианту исключаются (запрет на случайные изменения в решении), новые решения генерируются путем случайной рекомбинации двух вариантов (по одному фрагменту от каждого) решения задачи. Все решения, целевая функция которых на данном этапе расчета меньше средней в популяции, исключаются из процесса «эволюции».

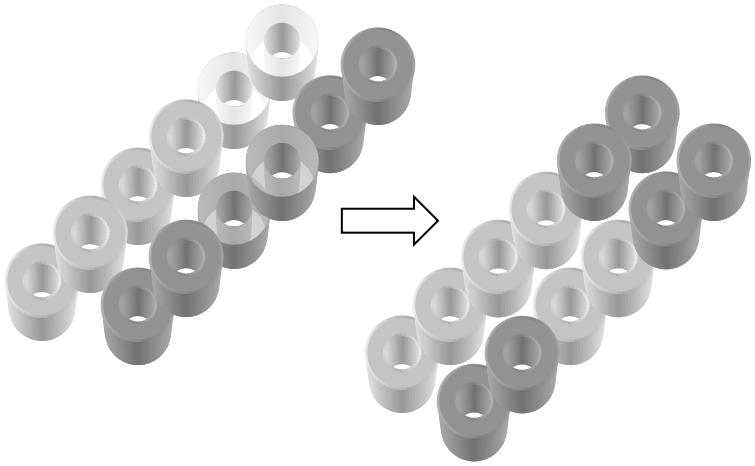


Рис. 2.15

Таблица 2.1

Размер популяции	**Продолжительность эволюции (шагов)**	**Целевая функция (% от максимального значения)**
5	6	100%
20	14	91%
100	34	91%
300	107	91%

Модель 2: Неэлитный отбор с двухточечным кроссинговером с атавизмами (см. рисунок 2.16)

Возможности мутации по этому варианту исключаются, новые решения генерируются путем случайной рекомбинации двух различных вариантов (по два фрагмента от каждого) решения задачи. Решения, целевая функция которых на данном этапе расчета меньше средней в популяции, исключаются из процесса «эволюции» частично.

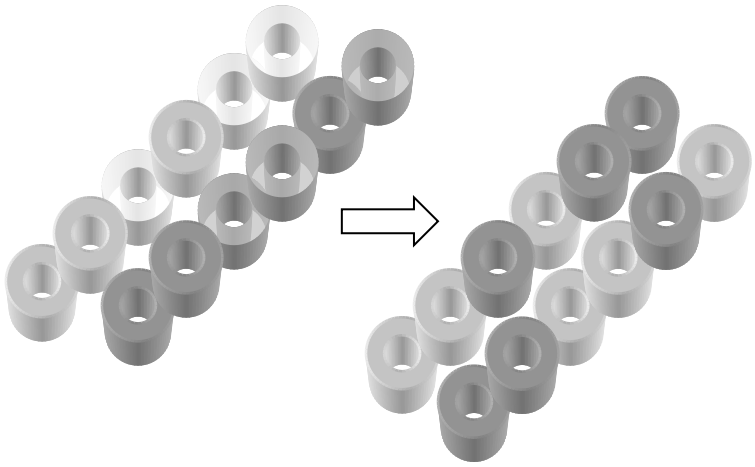


Рис. 2.16

Таблица 2.2

Размер популяции	**Продолжительность эволюции (шагов)**	**Целевая функция (% от максимального значения)**
5	6	100%
20	39	84%
100	75	76%
300	206	74%

Модель 3: Неэлитный отбор с двухточечным кроссинговером с атавизмами и мутацией (см. рисунок 2.17)

Новые решения генерируются путем случайной рекомбинации различных вариантов решения задачи и расширения пространства возможных решений за счет случайного изменения некоторых генов. Решения, целевая функция которых на данном этапе расчета меньше средней в популяции, исключаются из процесса «эволюции» частично.

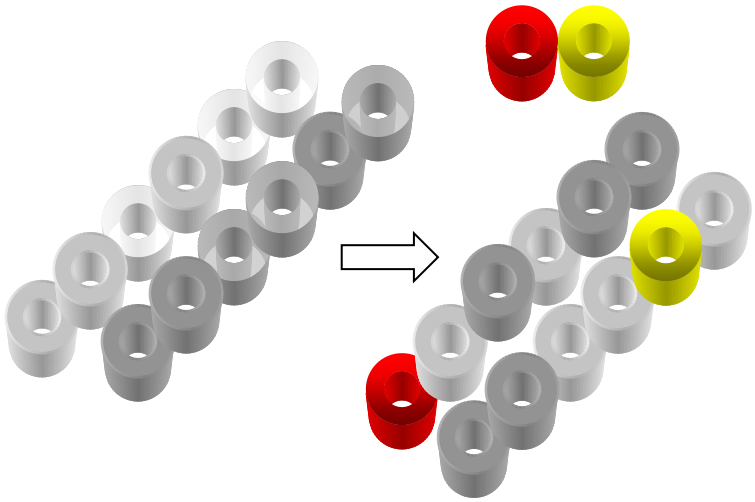


Рис. 2.17

Таблица 2.3

Размер популяции	**Продолжительность эволюции (шагов)**	**Целевая функция (% от максимального значения)**
5	29	84%
20	166	39%
100	~500	38%
300	----------	----------

Модель №3 позволяет получить решение, близкое к точному (вырождение кольцевой сети в тупиковую). Для экспресс-анализа возможностей оптимизации целесообразно использование первых двух моделей. Возможности моделей №1 и №2 сильно зависят от способа получения начальной популяции. В разработанной системе, например, генератор определяет начальные диаметры участков исходя из «экономичных» значений скоростей движения воды в трубах сети. В этом случае генетический алгоритм априори сориентирован на поиск минимума с учетом попадания в интервал этих скоростей. Это не означает, что найденное решение является оптимальным, поскольку само определение «экономичной» скорости достаточно условно. С другой стороны, подобные ограничители позволяют исключить недопустимые (в техническом

отношении, например) варианты решения. По этой причине модели № 1 и №2 могут быть полезны при решении специальных оптимизационных задач. Заметим также, что по результатам работы генетического алгоритма предлагается не единственное решение, а некоторый их набор, соответствующий примерно одинаковым значениям целевой функции. Из этого набора проектировщик может выбрать такое решение, которое в большей степени соответствует его представлениям о качестве инженерной системы.

Типичный ход оптимизационного процесса с применением генетических алгоритмов приведен на рисунках 2.18, 2.19. Скачкообразное уменьшение значений целевой функции обусловлено процессом «мутации». В качестве признака завершения процесса генетической оптимизации было принято попадание лагов автокорреляционной функции случайной величины затрат в 95% доверительный интервал (т.е. дальнейшее выполнение алгоритма не приводит к улучшению достигнутого значения целевой функции).

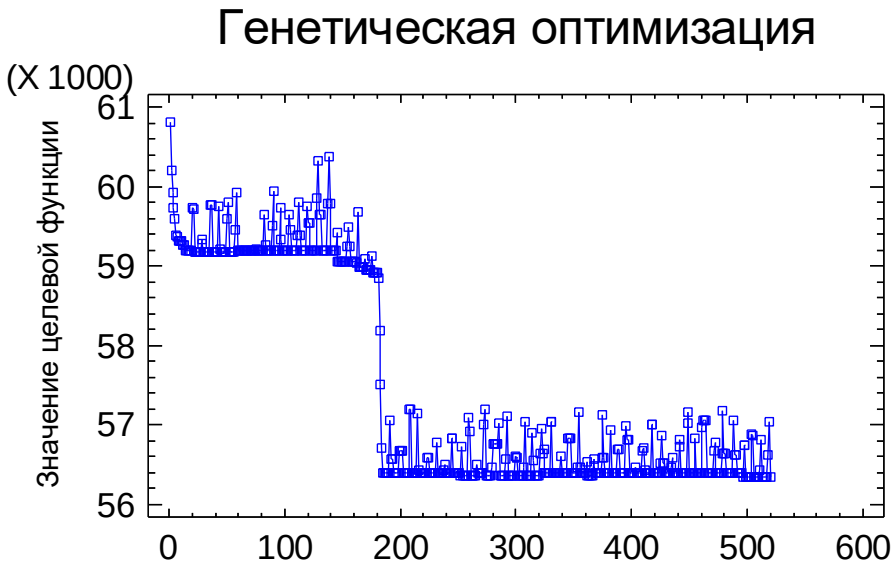


Рис. 2.18 Изменение целевой функции в результате генетической оптимизации

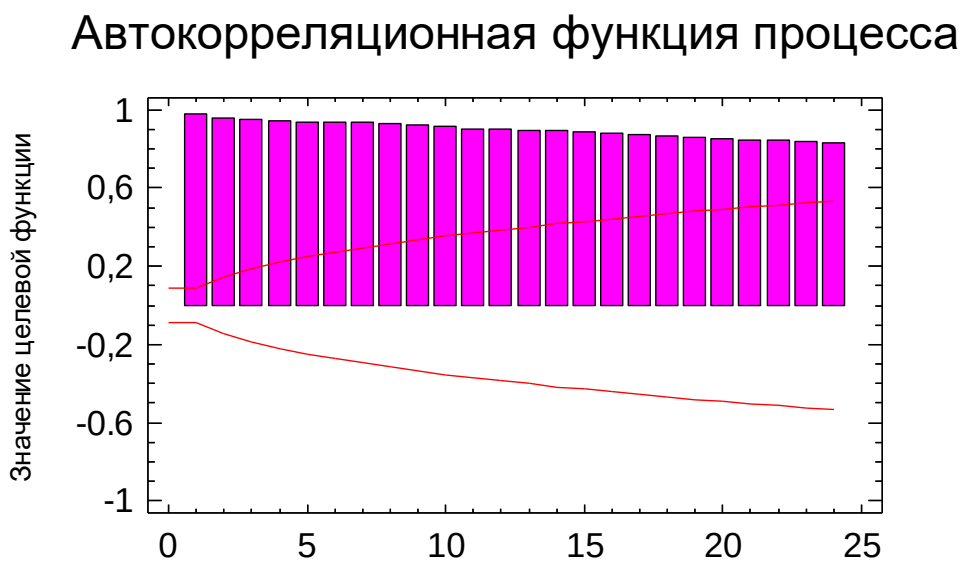


Рис. 2.19 Автокорреляционная функция случайной величины приведенных затрат

Следует отметить, что задача дискретного программирования при ограничениях в виде неравенств и двусторонней ограниченности переменных является трудно разрешимой в общем виде. Как правило, она решается приближенно при допущении, что диаметры участков сети изменяются непрерывно. При округлении установленных в результате решения задачи значений диаметров трудно ожидать, что полученное решение оптимально. Описанный выше метод оптимизации этого недостатка лишен, а возможность наложения на комплексы A и B неограниченного количества дополнительных условий (в том числе и неформальных) делает его особенно привлекательным при решении инженерных задач. Предложенный подход апробирован при решении обратных задач потокораспределения (некорректно поставленных), сетевой идентификации, синтеза оптимальных СПРВ в условиях неполноты исходных данных и продемонстрировал хорошие результаты.

Увеличить скорость сходимости алгоритма можно за счет особого представления вариантов решения – схемы алгоритма. Из теоремы схем [81] следует $c(S,k+1) \geq c(S,k) \times \frac{F(S,k)}{\overline{F}(k)} \times \left(1 - p_c \times \frac{d(S)}{L-1} - p_m \times o(S)\right)$, (2.38)

где S - рассматриваемая схема, k - номер популяции, c - количество особей в популяции, соответствующих схеме, F - среднее значение функции приспособленности для хромосом, соответствующих схеме, $\overline{F}$ - среднее значение функции приспособленности в популяции, o - порядок схемы, L - длина хромосомы, соответствующей схеме, d - охват схемы, p_c - вероятность скрещивания, p_m - вероятность мутации. Охват схемы – это расстояние между первым и последним постоянными компонентами (фиксируемые параметры) решения оптимизационной задачи. Порядок схемы – это количество постоянных компоненты в схеме ГА.

Для увеличения скорости сходимости, т.е. увеличения в числе популяции особей, удовлетворяющих субоптимальной схеме, нами предлагается использовать следующие приемы:

- проектировщиком указываются главные магистральные линии, диаметры которых им назначаются и при оптимизации не изменяются;
- производится перенумерация участков сети таким образом, чтобы минимизировать охват схемы d.

При решении оптимизационных задач на сетях популяция насчитывает не менее 30-40 особей (соответствует сети, состоящей из 20-30 участков) и это соотношение эквивалентно $c(S,k+1) = c(S,k) \times \frac{F(S,k)}{\overline{F}(k)}$, (2.39)

$F(S,k) = \overline{F}(k) + \varepsilon \times \overline{F}(k)$, (2.40)

где ε - относительное улучшение плана.

Следовательно, $c(S,k) = c(S,0) \times \left(1 + \left(F(S,k) - \overline{F}(k)\right) / \overline{F}(k)\right)^k$. (2.41)

Соотношение (2.41) можно рассматривать как оценку сходимости предложенного алгоритма при оптимизации СПРВ по стоимостному показателю.

На следующем этапе решения задачи оптимального синтеза СПРВ целесообразно расширить пространство оптимальных решений за счет введения «мягких» целевых функций. Это делает возможным проведение оптимизационных расчетов для полирежимных моделей, а также позволяет выбирать «не слишком дорогие» и устраивающие проектировщика решения.

Рассмотрим способ построения функции пригодности, формализующей неопределенное понятие «не слишком дорогая» сеть. Для этого воспользуемся теорией нечетких множеств.

В рамках данной работы для формализации понятия «не слишком дорого» воспользуемся стандартной функцией

$$\mu(\mathrm{f}, a, b, c) = \begin{cases} 1, f \le c \\ \left(1 + \left(a \times \left(f - c\right)\right)^b\right)^{-1}, f > c \end{cases}. \qquad (2.42)$$

Здесь параметры функции принадлежности интерпретируются следующим образом: интервал $[0, c]$ - характеризуется как «незначительная приведенная стоимость строительства и эксплуатации сети»; b, c- определяют, как соотносятся рост приведенной стоимости и возможность считать эту стоимость приемлемой – «не слишком дорогой»; μ - степень принадлежности рассматриваемого варианта с приведенной стоимостью строительства и эксплуатации f (определенной по формуле 2.30) к множеству «не слишком дорогих». Сказанное иллюстрирует рисунок 2.20.

При решении оптимизационной задачи в качестве функции пригодности выступает функция принадлежности «не слишком дорогой» вариант сети (2.42). В результате генетической оптимизации (максимизации значения функции 2.42) получаем расширенный набор решений, удовлетворяющих новой функции пригодности.

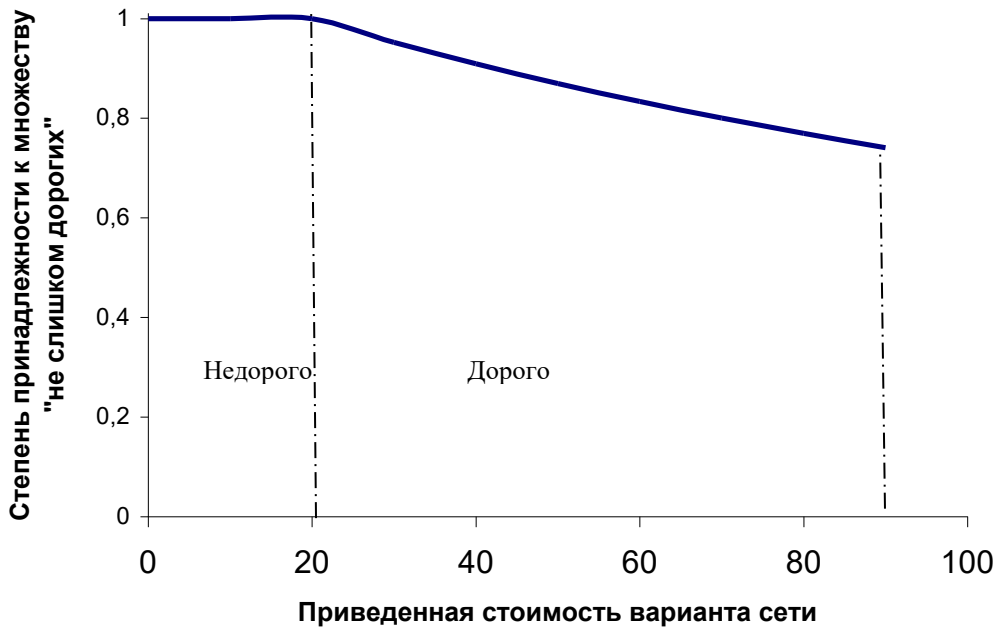


Рис. 2.20 Формализация понятия «не слишком дорогой» вариант сети посредством нечетких множеств

2.4 Выводы по главе

1. Разработана методология моделирования систем подачи и распределения воды в условиях неполноты или неопределенности исходных данных: предложены методы решения прямых задач потокораспределения и первичной идентификации при стохастически, интервально и нечетко заданных сетевых отборах;
2. Предложен метод решения некорректно поставленных задач на сетях; приведен пример его использования для задачи оптимального синтеза СПРВ при нечетко заданной целевой функции;
3. Предложены методики оценки состояния участков сети в условиях неполноты или неопределенности исходных данных, учитывающие влияние дестабилизирующих факторов на нормальный режим эксплуатации трубопроводов;

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПРВ В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

3.1 Цели и задачи моделирования

Для решения задачи функциональной и структурной диагностики необходимы дополнительные модели, описывающие функционирование СПРВ в особых условиях с учетом «фоновых» утечек, наличия несанкционированных отборов, выхода отдельных участков из работы, изменения гидравлических сопротивлений отдельных линий и др. В главе разрабатываются методы моделирования СПРВ с учетом перечисленных дестабилизирующих факторов.

Высокая точность расчета по этим моделям не может быть обеспечена в принципе. Возможность практического использования ограничена оценочными расчетами в рамках «мягкого» моделирования СПРВ. Методика учета результатов расчета по этим моделям при решении задачи функциональной и структурной диагностики приведена в четвертой главе.

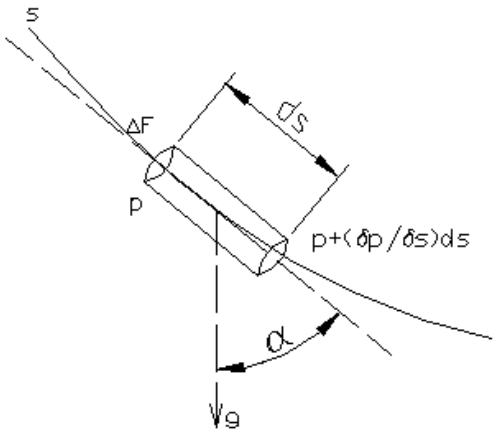
3.2 Моделирование фоновых утечек

При разработке модели «фоновых» утечек на участке сети будем считать ее равномерно распределенной по всему участку. В практике проектирования широко применятся метод эквивалентирования распределенных (так называемых «путевых» Q_n) расходов к узловым по упрощенной методике, предполагающей пренебрежение рядом факторов. Расчетный расход Q_p на участке сети находят из соотношения $Q_p = Q_{тр} + \beta \times Q_n$,

где $Q_{тр}$ - транзитный расход на участке сети. Коэффициент β зависит от способа отбора расхода и от закона гидравлического сопротивления на трение по длине. В работе [51] указывается, что при равномерном распределении расхода с интенсивностью q коэффициент β может быть определен по формуле

$$\beta = \left(\frac{1}{m+1} \times \left(\left(\frac{Q_{тр}}{Q_n} + 1 \right)^{m+1} - \left(\frac{Q_{тр}}{Q_n} \right)^{m+1} \right) \right)^{\frac{1}{m}} - \frac{Q_{тр}}{Q_n}, \qquad (3.1)$$

где m - показатель степени в законе сопротивления. Обычно β принимается равным 0.5 вне зависимости от соотношения путевого и транзитного расходов. Очевидно, что потери напора на участке могут не соответствовать расчетной схеме довольно сильно (максимальная ошибка для данной расчетной схемы составляет 35%). Необходимо также учитывать и то, что соотношение (3.1) получено без учета эффекта восстановления напора и при законе сопротивления, построенном на степенной функции. При гидравлическом расчете водопроводных сетей распределенный расход заменяют узловым, при этом действительно эквивалентный переход возможен лишь в случае разветвленных сетей с одним водопитателем. Здесь для определения потерь напора, возникающих в результате «фоновых» утечек на участке сети, рассмотрим установившееся движение идеальной несжимаемой жидкости в условно перфорированной трубе (см. рисунок 3.1). Можно решить задачу за счет введения в уравнение Бернулли для элементарной струйки диссипативного члена, учитывающего подобные потери. В соответствии со вторым законом Ньютона для элементарного цилиндра выделенного в установившемся потоке несжимаемой жидкости имеем: $\sum \vec{F} = m\vec{a}$.



В случае смешения масс имеет место следующее соотношение

$$\sum \vec{F} = \sum \vec{F}^{ext} + \vec{F}^{\Delta m}, \qquad (3.2)$$

где $\sum \vec{F}^{ext}$ - сумма внешних сил, действующих на элементарный цилиндр, $\vec{F}^{\Delta m}$ - фиктивная сила, учитывающая переменность массы выделенного цилиндра.

Рис. 3.1 Схема участка условно перфорированного трубопровода

Проекция $\overset{\rho}{F}^{\Delta m}$ на ось движения может быть представлена в виде $F^{\Delta m} = (u_1 - u)\dfrac{dm_1}{dt} + (u - u_2)\dfrac{dm_2}{dt}$,

где m_1 - аддитивная масса, присоединившаяся к элементарному цилиндру за время dt, с проекцией скорости на направление движения равной u_1, m_2 - декрементная масса, отделившаяся от элементарного цилиндра за время dt, с проекцией скорости на направление движения равной u_2.

Введем естественную систему координат и спроецируем уравнение (3.2) на ось, касательную линии тока $\sum\left(\overset{\rho}{F}\right)_\tau = \sum\left(\overset{\rho}{F}^{ext}\right)_\tau + \left(\overset{\rho}{F}^{\Delta m}\right)_\tau$. (3.3)

Внешними силами в данном случае являются сила, обусловленная градиентом нормальных напряжений вдоль линии тока $\overset{\rho}{P}_\sigma$, и сила тяжести $\overset{\rho}{P}_g$ (касательные напряжения будут учтены ниже). В данном случае

$$\left|\overset{\rho}{P}_\sigma\right|_\tau = \frac{\partial p}{\partial s}\Delta F ds,$$

$$\left|\overset{\rho}{P}_g\right|_\tau = \rho g \Delta F ds \cos\alpha,$$

где α - угол между осью, параллельной линии тока и вектором силы тяжести.

Ускорение элементарного цилиндра выразим через частные производные

$$|a|_\tau = \frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial s}\frac{ds}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial s}.$$

Что касается проекции на линию тока силы $F^{\Delta m} = (u_1 - u)\dfrac{dm_1}{dt} + (u - u_2)\dfrac{dm_2}{dt}$, то она может быть выражена через объемные расходы в форме $\left|\overset{\rho}{F}^{\Delta m}\right|_\tau = \rho \times (u_1 - u) \times dq_1 + \rho \times (u - u_2) \times dq_2$, где элементарный приток и отток обозначены, как dq_1 и dq_2 соответственно.

Полная производная $\dfrac{dq_1}{ds}$ может быть также выражена через частные

$$\frac{dq_1}{ds} = \frac{\partial q_1}{\partial s} + \frac{\partial q_1}{\partial t}\frac{dt}{ds} = \frac{\partial q_1}{\partial s} + \frac{1}{u}\frac{\partial q_1}{\partial t}.$$

Аналогично $\dfrac{dq_2}{ds} = \dfrac{\partial q_2}{\partial s} + \dfrac{\partial q_2}{\partial t}\dfrac{dt}{ds} = \dfrac{\partial q_2}{\partial s} + \dfrac{1}{u}\dfrac{\partial q_2}{\partial t}$.

После подстановки в (3.3) и некоторых преобразований имеем:

$$\frac{1}{g}\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{g}u\frac{\partial u}{\partial s}+\frac{1}{\rho g}\frac{\partial p}{\partial s}+\frac{\partial z}{\partial s}+\frac{(u-u_1)}{g\Delta F}\frac{\partial q_1}{\partial s}+\frac{(u-u_1)}{gu\Delta F}\frac{\partial q_1}{\partial t}-\rightarrow$$
$$\rightarrow\frac{(u-u_2)}{g\Delta F}\frac{\partial q_2}{\partial s}-\frac{(u-u_2)}{gu\Delta F}\frac{\partial q_2}{\partial t}=0 \quad . \qquad (3.4)$$

Для реальной жидкости уравнение (3.4) с учетом уклона трения ξ можно представить таким образом:

$$\frac{1}{g}\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{g}u\frac{\partial u}{\partial s}+\frac{1}{\rho g}\frac{\partial p}{\partial s}+\frac{\partial z}{\partial s}+\frac{(u-u_1)}{g\Delta F}\frac{\partial q_1}{\partial s}+\frac{(u-u_1)}{gu\Delta F}\frac{\partial q_1}{\partial t}-\rightarrow$$
$$\rightarrow\frac{(u-u_2)}{g\Delta F}\frac{\partial q_2}{\partial s}-\frac{(u-u_2)}{gu\Delta F}\frac{\partial q_2}{\partial t}=-\xi \quad . \qquad (3.5)$$

Введем обозначения $k_1=\frac{u}{u_1}$, $k_2=\frac{u}{u_2}$.

Интегрирование по s дает

$$\frac{1}{g}\int\frac{\partial u}{\partial t}ds+\frac{1}{g}\int\frac{(1-k_1)}{\Delta F}\frac{\partial q_1}{\partial t}ds-\frac{1}{g}\int\frac{(1-k_2)}{\Delta F}\frac{\partial q_2}{\partial t}ds+\frac{1}{g}\int\frac{(1-k_1)u}{\Delta F}dq_1-\rightarrow$$
$$\rightarrow\frac{1}{g}\int\frac{(1-k_2)u}{\Delta F}dq_2+\frac{u^2}{2g}+\frac{p}{\rho g}+z+h_f=const \quad . \qquad (3.6)$$

Для дальнейших преобразований уравнения (3.6) были сделаны следующие допущения:

1. рассматривалось только установившееся движение жидкости;
2. распределение скоростей по сечению учитывалось путем введения корректива Кориолиса;
3. потери по длине могут быть определены по формулам для потока установившегося плавноизменяющегося движения жидкости.

При этих условиях из уравнения (3.6) можно получить уравнение для потока:

$$\frac{1}{g}\int\frac{(1-k_1)\times\alpha\times\upsilon}{F}dQ_1+\frac{1}{g}\int\frac{(1-k_2)\times\alpha\times\upsilon}{F}dQ_2+\frac{\alpha\times\upsilon^2}{2g}+\frac{p}{\rho g}+z+h_f=const, \qquad (3.7)$$

где $Q=Q_0+Q_1-Q_2$, Q_0 - начальный, постоянный расход потока, Q_1 - аддитивный расход, Q_2 - декрементный расход. В случае раздачи воды на участке

$$\frac{1}{g}\int\frac{(1-k)\times\alpha\times\upsilon}{F}dQ+\frac{\alpha\times\upsilon^2}{2g}+\frac{p}{\rho g}+z+h_f=const,$$

где $k=k_2$, $dQ=-dQ_2$.

Далее $\frac{1}{g}\int(1-k)\times\alpha\times\upsilon d\upsilon+\frac{\alpha\times\upsilon^2}{2g}+\frac{p}{\rho g}+z+h_f=const$. (3.8)

Представим (3.8) в дифференциальной форме, пренебрегая изменением геодезической отметки начального и конечного участка (что допустимо в случае моделирования магистральных водопроводных сетей)

$$(2-k)\frac{\alpha\times\upsilon\times d\upsilon}{2g}+dp+dh_f=0.$$

Приближенное решение получим для $(2-k)\frac{\alpha\times\upsilon\times d\upsilon}{2g}+dp+S_0Q^2ds=0$, (3.9)

где S_0 - удельное сопротивление для квадратичной области. Введем следующие обозначения Q_{start} - расход жидкости в начале участка, Q_{end} - расход жидкости в конце участка, q - распределенный расход.

Расход в любом сечении трубы на расстоянии s от начального можно представить как $Q=Q_{start}+q\times s$. (3.10)

С учетом (3.10) уравнение (3.9) можно представить в виде

$$(2-k)\frac{\alpha\times Q\times q\times ds}{2gF^2}+dp+S_0Q^2ds=0. \quad (3.11)$$

Точное решение может быть получено при подстановке в (3.7) $dh_f=\lambda\times\frac{\upsilon^2}{2\times g\times d}\times ds$.

Имеем $dh_f=\lambda\times\frac{\left(\frac{Q\times 4}{\pi\times d^2}\right)^2}{2\times g\times d}\times ds=0.11\left(\Delta+\frac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0.25}\times\frac{\left(\frac{Q\times 4}{\pi\times d^2}\right)^2}{2\times g\times d}\times ds$,

$$dh_f=0.88\times\frac{\left(\Delta+68\frac{\pi\times d\times\nu}{4Q_{start}+4\times q\times s}\right)^{0.25}}{g\times\pi^2\times d^5}\times(Q_{start}+q\times s)^2,$$

$$(2-k)\frac{\alpha\times Q\times q\times ds}{2gF^2}+dp+0.88\times\frac{\left(\Delta+68\frac{\pi\times d\times\nu}{4Q_{start}+4\times q\times s}\right)^{0.25}}{g\times\pi^2\times d^5}\times(Q_{start}+q\times s)^2ds=0. \quad (3.12)$$

Уравнение (3.12) при решении основной задачи анализа (поиска потокораспределения) решается численно.

Аналитическое решение можно получить, решая уравнение упрощенной модели (3.11). Проинтегрируем уравнение (3.11) по s, имеем

$$\frac{(2-k)}{2gF^2}\left(Q_{end}^2 - Q_{start}^2\right) - \Delta p + \frac{S_0\left(Q_{end}^3 - Q_{start}^3\right)}{3q} = 0\,. \qquad (3.13)$$

Уравнение (3.13) представим в более удобном для машинных расчетов виде и выразим коэффициент удельного сопротивления через коэффициент гидравлического трения

$$\Delta p = \frac{\varphi\left(Q_{end}^2 - Q_{start}^2\right)}{gF^2} + \frac{8\lambda\left(Q_{end}^3 - Q_{start}^3\right)}{3q \times g\pi^2 d^5}\,. \qquad (3.14)$$

Геометрический смысл коэффициента φ заключается в том, что величина $2(1-\varphi)$ есть косинус угла между вектором скорости аварийного истечения и средней скоростью движения жидкости в трубопроводе.

В системе гидравлического расчета используется уравнение (3.12), позволяющее получить наиболее точное решение задачи о распределенном расходе. Погрешность определения диссипации энергии при использовании различных расчетных схем приведена ниже на рисунке 3.2

Удельные потери воды за счет инфильтрации в грунт по данным [117] составляют $2.5 \div 7\left(\frac{м^3}{сут}\right)$ на км сети. Сокращение потерь воды ниже данных пределов экономически не оправдано, поэтому данную интервальную величину потерь воды можно рассматривать как фоновую. Из этих соображений назначается величина q для фоновых утечек. Встраивание полученных соотношений (3.12, 3.14) в модель СПРВ позволяет оценить влияние фоновых утечек на потокораспределение в сети. Для упрощения реализации методики полагается, что точки сходов потоков находятся в узлах. При этом узловые расходы определяются с учетом направления движения воды на расчетном участке (узловой расход, равный путевому, приписывается узлу, от которого осуществляется движение воды по участку).

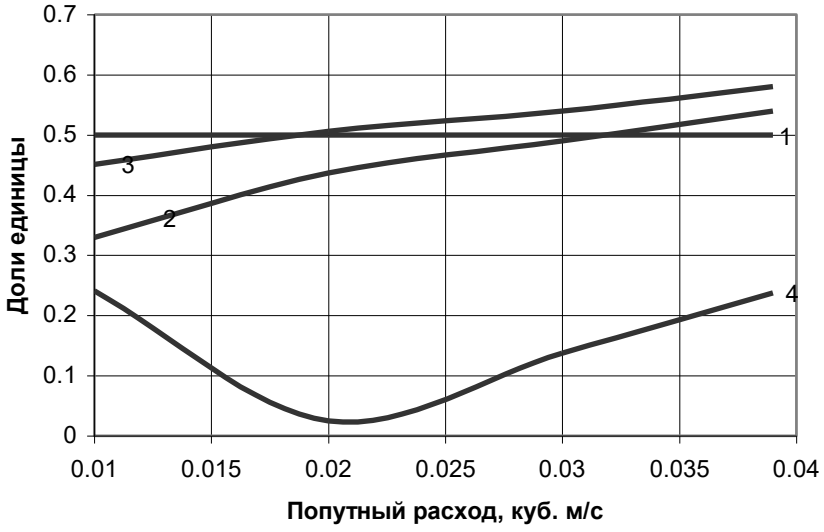


Рис. 3.2 Коэффициенты эквивалентирования путевых расходов к узловым при течении воды в трубе Ø200 мм при начальной скорости 2.55 (м/с): 1 – без учета соотношения путевого и транзитного расхода, эффекта восстановления трубопровода и при постоянном коэффициенте гидравлического трения; 2 – при постоянном коэффициенте гидравлического трения по уравнению (3.11); 3 – полученный по уравнению (3.12), 4 – относительная погрешность определения диссипации энергии при использовании упрощенной схемы

3.3 Моделирование аварийных ситуаций

Для приблизительной инвентаризации утечек воды часто используется аналитический метод [43], [44], в основе которого лежат известные формулы гидравлики.

Скорость движения жидкости во всех случаях истечения определяется, как правило, по формуле Торичелли $\upsilon = \varphi \times \sqrt{2 \times g \times H}$,

где φ - коэффициент скорости, g – ускорение свободного падения (9.81 м/с²), H – гидродинамическое давление в трубопроводе в области истечения (метров водяного столба).

Расход воды определяется из уравнения неразрывности $Q = k_{10} \times \varepsilon \times \omega \times \upsilon$,

где ε - коэффициент сжатия струи, ω - площадь приведенного живого сечения (м²), $k_{1\{\}}$ - серия эмпирических коэффициентов, определяющих гидравлические особенности истечения жидкости при различных повреждениях на водопроводной сети.

Объем воды рассчитывается по формуле

$$W = k_{2\{\}} \times Q \times t = k_{1\{\}} \times k_{2\{\}} \times \varphi \times \varepsilon \times \omega \times \sqrt{2 \times g \times H} \times t,$$

где t – время истечения воды (с), $k_{2()}$ - серия эмпирических коэффициентов, учитывающих особенности распределения стохастических величин (давление, расход и т.д.) в течение времени истечения жидкости.

Серии коэффициентов $k_{1\{\}}, k_{2\{\}}$ могут определяться на основании исследований работы водопроводной сети города, в первом приближении могут быть приняты равными единице.

В этом случае основная расчетная зависимость для определения объема утечек воды для всех видов повреждения принимает вид

$$W = \varphi \times \varepsilon \times \omega \times \sqrt{2 \times g \times H} \times t = \mu \times \omega \times \sqrt{2 \times g \times H} \times t. \quad (3.15)$$

Проблема заключается в исследовании адекватности модели (3.15). Необходимо заметить, что при определении объемов утечки использована зависимость между динамическим напором в сети и величиной скорости истечения $\upsilon = \varphi \times \sqrt{2 \times g \times H}$.

Связь между скоростью (или расходом), напором и ускорением свободного падения, как показывает опыт, действительно существует [18], [114]. Это факт может быть использован при вычислении объема утечки воды при аварии.

Кроме того, нетрудно показать единственность структуры зависимости скорости от напора. Для этого достаточно рассмотреть следующую функциональную зависимость $q = f(H, g)$ или $\upsilon = k \times H^x \times g^y$, (3.16)

где k – безразмерный коэффициент пропорциональности. Заменяя в уравнении (3.16) физические величины их размерностями, получим:

$$L^1 \times T^{-1} = L^{x+y} \times T^{-2y}. \quad (3.17)$$

Очевидно единственное решение: x = ½; y = ½. Подставляя эти значения в исходное уравнение (3.16), получаем $\upsilon = k \times \sqrt{g \times H}$. Переходя к коэффициенту скорости, получаем $\upsilon = \varphi \times \sqrt{2 \times g \times H}$. Однако возникают трудности при определении коэффициента скорости для повреждений различного типа, и, самое главное, динамического напора H.

Как следует из таблицы 3.1, в использующихся в настоящее время для расчетов утечек формулах коэффициент расхода μ принят равным 0.65 и не зависящим от характера повреждений. Опыт эксплуатационных организаций свидетельствует о значительной грубости данной модели.

Таблица 3.1

Повреждение	ω *м*^{2}	W *м*^{3}
Разрывы	$0.56 \times d^2$	$5358 \times d^2 \times \sqrt{H} \times t$
Течь сальников, фланцев	0.0002	$1.9 \times \sqrt{H} \times t$
Трещины	$0.04 \times d^2$	$383 \times d^2 \times \sqrt{H} \times t$
Переломы	$0.56 \times d^2$	$5358 \times d^2 \times \sqrt{H} \times t$
Свищи	0.0002	$1.9 \times \sqrt{H} \times t$
Стыки	0.0002	$1.9 \times \sqrt{H} \times t$
Промывка системы с выпуском воды из пожарных гидрантов		$\frac{2.65 \times \pi \times 0.125^2 \times N \times \sqrt{H}}{4} \times t$ N – количество гидрантов

Для повышения степени адекватности результатов расчетов по определению потерь воды при авариях водопроводные цепи моделируются как цепи с регулируемыми параметрами (задачи гидравлического расчета 3-го типа). Рассмотрим процесс трансформации расчетной схемы без регулируемых параметров в гидравлическую цепь с регулируемыми параметрами (см. рисунок 3.3).

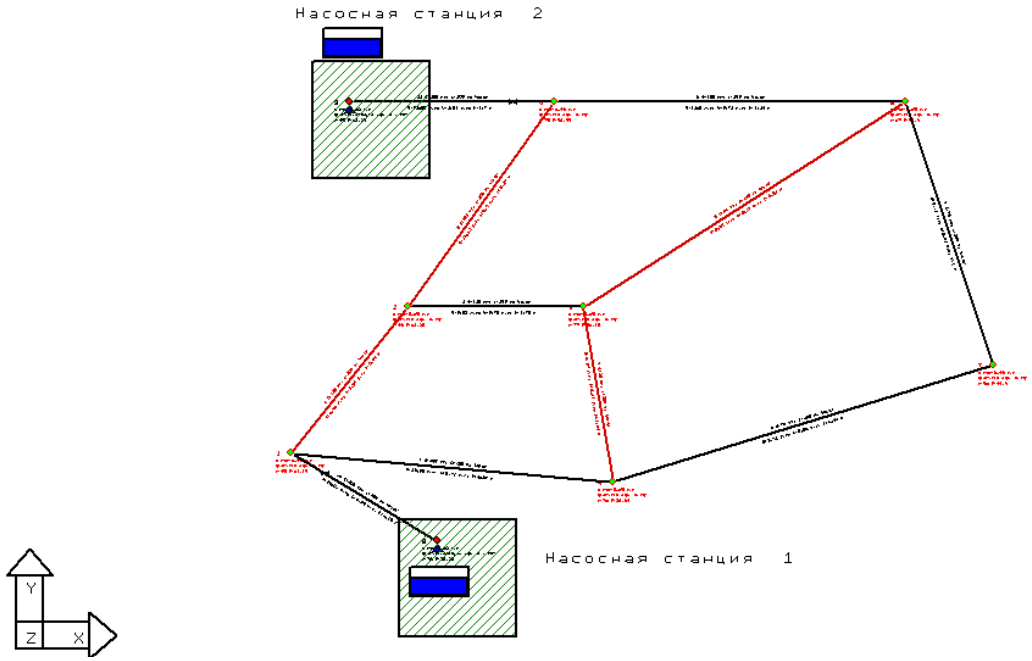
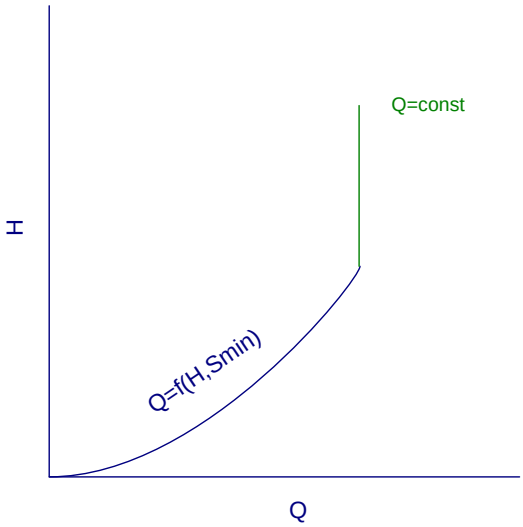


Рис. 3.3 Гидравлическая цепь сети водоснабжения города без регулируемых параметров



При разработке элементов с регулируемыми параметрами используются следующие предпосылки [61], [98].

Каждый потребитель стремится получить воду в количестве, необходимом ему для собственных нужд, регулируя ее поступление с помощью регулирующей и запорной арматуры (см. рис. 3.4).

Рис. 3.4 Регулирование сетевого отбора потребителями

Таким образом, внутреннее сопротивление абонентов S регулируется вручную для поддержания расходов воды на определенном уровне, причем сопротивление может уменьшаться до некоторого предельного значения, соответствующего полностью открытой арматуре. В соответствии с этими

представлениями каждого отдельного потребителя можно рассматривать как элемент гидравлической цепи с регулируемыми параметрами.

Если давление на входе потребителя выше, чем это необходимо для обеспечения требуемого расхода, то он стремится увеличить свое сопротивление для поддержания расхода воды на нужном уровне. В этом случае потребитель работает в режиме регулирования, описываемом областью $Q = const$. Возможность работы в этой области, как правило, должна гарантироваться при нормальном (безаварийном) режиме функционирования сети.

При аварии в сети давление в месте присоединения потребителя может упасть до такого значения, что уже не будет обеспечен требуемый расход воды.

Потребитель начинает работать в режиме дросселирования, описываемом областью $Q = f(H, S_{\min})$, при этом внутреннее сопротивление его будет минимальным и соответствующим полностью открытой водоразборной арматуре.

Из сказанного понятно, что моделирование водопроводных сетей как цепей с регулируемыми параметрами целесообразно для адекватного описания ее состояния при технологических осложнениях и несанкционированных отборах. При моделировании работы водопроводной сети в аварийных ситуациях для повышения степени адекватности также необходимо рассматривать цепи с регулируемыми параметрами. Модели с регулируемыми параметрами можно получить из моделей с сосредоточенными параметрами путем усложнения расчетных схем и систем алгебраических уравнений нелинейной гидравлической цепи. В данном конкретном случае необходимо построение расширенной циклической схемы цепи с помощью введения фиктивно-активных ветвей, моделирующих потребителей и насосные станции и замыкаемых на общий узел с атмосферным давлением. Значение сопротивлений фиктивных ветвей при этом не фиксируются, а меняются в процессе расчета.

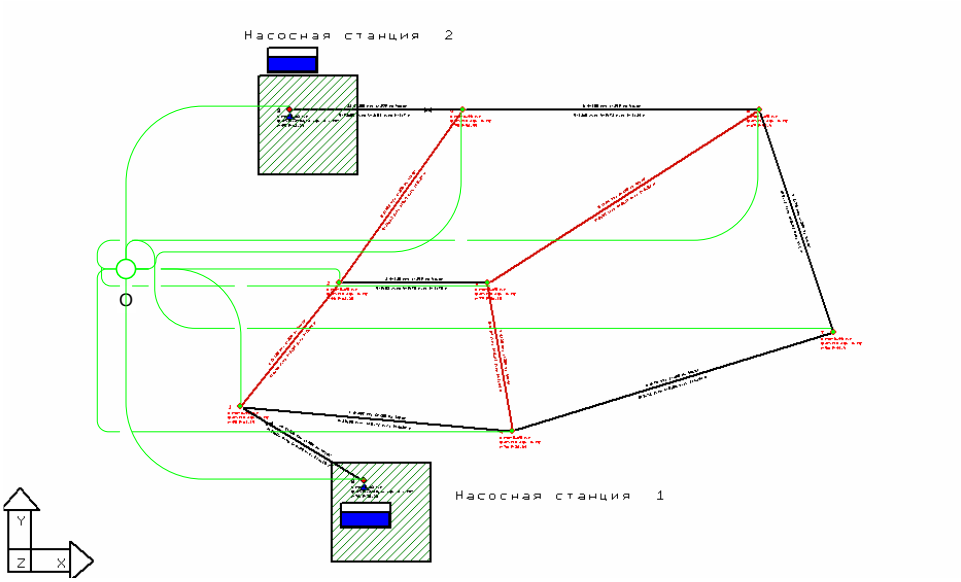


Рис. 3.5 Гидравлическая цепь сети водоснабжения города с регулируемыми параметрами

Одной из особенностей решения системы (1.5) при моделировании аварийных режимов работы является необходимость учета ветвей цепи, имитирующих регулируемые сопротивления потребителей. Методика решения подобных задач впервые была предложена в Сибирском энергетическом институте [61].

Во внешнем цикле итераций осуществляется пересчет регулируемых параметров фиктивных ветвей по формуле $S_n^{M+1} = S_n^M \times \frac{\left(q_n^M\right)^2}{Q_p{}^2}$, (3.18)

где M - номер внешней итерации, q_n^M - полученное на внутренней итерации значение расхода на фиктивной ветви, Q_p - требуемый расход у потребителя.

Что касается величины S – сопротивления местных систем потребителей, то, во-первых, $S_n^{M+1} \geq S_{\min}$, во – вторых, $S_{\min} = \frac{H_{тр.св}}{Q_{\max}^2}$. (3.19)

В отличие от элементов гидравлической сети, моделирующих потребителей, элементы, отвечающие за аварийное истечение, всегда должны рассматриваться как нефиксированные отборы, поскольку работают в режиме дросселирования [91].

В ряде случае «аварийный элемент» можно рассматривать как тройник с нерегулируемыми параметрами. Тройник с нерегулируемыми параметрами (см. рисунок 3.6) может быть рассчитан с помощью уравнения баланса мощности.

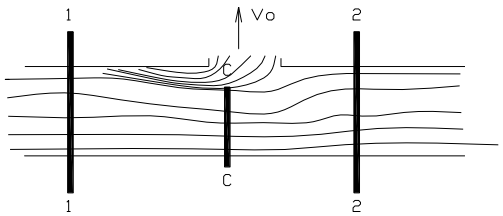


Рис. 3.6 Схема тройника – элемента аварийного истечения

В случае аварийного истечения жидкости из тройника, образованного участком трубопровода в области локализации повреждения, систему уравнений описывающих функционирование этого элемента в составе гидравлической цепи, можно получить, используя уравнения баланса мощностей для тройника, уравнения Бернулли для сечений с-с и 2-2 и гипотезы, в соответствии с которой аварийный расход функционально связан с давлением в сжатом сечении с-с:

$$\begin{cases} Q_1 = Q_2 + Q_0 \\ Q_c = Q_2 \\ \dfrac{p_c}{\gamma} + \dfrac{\upsilon_c^{\,2}}{2g} = \dfrac{p_2}{\gamma} + \dfrac{\upsilon_2^{\,2}}{2g} + \dfrac{(\upsilon_c - \upsilon_2)^2}{2g} \\ Q_0 = \mu \times S_0 \sqrt{2g \times \dfrac{P_c}{\gamma}} \\ \left(\dfrac{\upsilon_1^{\,2}}{2g} + \dfrac{p_1}{\gamma}\right) Q_1 = \left(\dfrac{\upsilon_2^{\,2}}{2g} + \dfrac{p_2}{\gamma}\right) Q_2 + \dfrac{(\upsilon_c - \upsilon_2)^2}{2g} Q_2 + \dfrac{\upsilon_0^{\,2}}{2g} Q_0 \\ \upsilon_1 = \dfrac{4 \times Q_1}{\pi d^2} \\ \upsilon_2 = \dfrac{4 \times Q_2}{\pi d^2} \end{cases}.$$

Полученная математическая модель тройника - «аварийного элемента» при истечении в атмосферу имеет вид

$$
\begin{cases}
\left(\dfrac{\left(\dfrac{4\times Q_{start}}{\pi d^2}\right)^2}{2g}+\dfrac{p_{start}}{\gamma}\right)Q_{start}=\left(\dfrac{\left(\dfrac{4\times Q_{end}}{\pi d^2}\right)^2}{2g}+\dfrac{p_{end}}{\gamma}\right)Q_{end}+\rightarrow \\
\rightarrow+\dfrac{\left(\dfrac{1}{\varepsilon}-1\right)\left(\dfrac{4\times Q_{end}}{\pi d^2}\right)^2}{2g}Q_{end}+\dfrac{\left(\mu\times S_0\sqrt{2g\left(\dfrac{p_{end}}{\gamma}-\left(1-\dfrac{1}{\varepsilon}\right)\times\dfrac{\left(\dfrac{4\times Q_{end}}{\pi d^2}\right)^2}{g}\right)}\right)^3}{2g\times S_0{}^2} \\
Q_{start}=Q_{end}+\mu\times S_0\sqrt{2g\left(\dfrac{p_{end}}{\gamma}-\left(1-\dfrac{1}{\varepsilon}\right)\times\dfrac{\left(\dfrac{4\times Q_2}{\pi d^2}\right)^2}{g}\right)} \\
p_{start}-p_{end}=\dfrac{\varphi\left(Q_{end}^2-Q_{start}^2\right)}{g\left(\dfrac{\pi d^2}{4}\right)^2}+\dfrac{8\lambda\left(Q_{end}^3-Q_{start}^3\right)}{3\left(\dfrac{\mu\times S_0\sqrt{2g\left(\dfrac{p_{end}}{\gamma}-\left(1-\dfrac{1}{\varepsilon}\right)\times\dfrac{\left(\dfrac{4\times Q_2}{\pi d^2}\right)^2}{g}\right)}}{l_{damage}}\right)\times g\pi^2 d^5}
\end{cases}
,(3.20)
$$

где l_{damage} - длина перфорации (повреждения). При использовании модели аварийного элемента (3.26) известными принимаются давление и расход на входе элемента (Q_{start}, p_{start}), геометрические размеры (S_0, l_{damage}) и соответствующий им коэффициент расхода (μ). Неизвестными являются давление и расход на выходе (Q_{end}, p_{end}) и коэффициент сжатия струи (ε). Три неизвестных можно найти из трех уравнений системы (3.20), после чего определить расход аварийного истечения.

В случае истечения в грунт система (3.20) дополняется условиями потери напора при фильтрации.

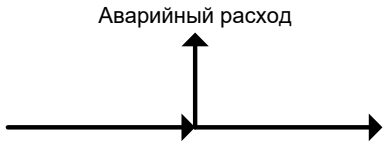
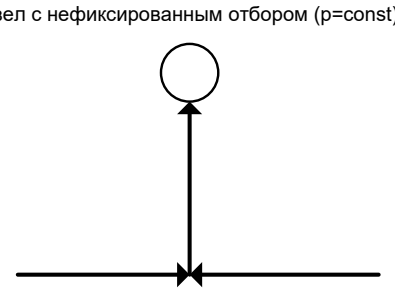
Таким образом, тогда как для определения объемов аварийного истечения предлагается использовать модели гидравлических цепей с регулируемыми параметрами (в качестве параметрически регулируемых элементов выступают потребители, для которых величина сопротивления (S) уточняется в процессе итерационного процесса), элементы гидравлической цепи, имитирующие аварийные участки, рассматриваются как элементы с явно нерегулируемыми параметрами (постоянный коэффициент расхода μ). Однако и здесь можно говорить о скрытом регулируемом параметре – коэффициенте сжатия струи (ε), определяемом внешними условиями (давлением и расходами на входе и выходе из элемента). Оба параметра рассматриваемых элементов (ε, S) уточняются во внешнем итерационном цикле.

Для определения параметров элементов, моделирующих аварийные процессы в сети, требуется проведение натурных экспериментов. При моделировании подобных элементов необходимо учитывать большое количество факторов (геометрические и гидравлические особенности повреждения, свойства грунтов, глубина заложения трубопроводов в области повреждения) [91]. На базе предприятия МУП «Водоканал» г. Петрозаводска была проведена серия экспериментов по определению объемов утечек при повреждениях на водопроводных сетях.

Характер повреждения и его геометрические размеры существенно влияют на гидравлический режим работы аварийного участка. В этой связи целесообразно выделить две группы элементов, «отвечающих» за процесс аварийного истечения (см. таблицу 3.2).

Тройник с нерегулируемыми параметрами может быть рассчитан с помощью уравнения баланса мощности.

Таблица 3.2 Схемы аварийного истечения

Характер повреждения	**Расчетная схема**
Свищи, продольные и поперечные трещины, нераскрывшиеся переломы.	 Моделируется как тройник с нерегулируемыми параметрами (тип 1)
Переломы и разрывы, крупные трещины и свищи. Размеры повреждения сопоставимы с площадью живого сечения трубопровода в области локализации аварии	 Моделируется как узел с нефиксированным отбором при фиксированном давлении, равном атмосферному (тип 2)

Предлагаемая модель тройника с нерегулируемыми параметрами предполагает, что расход аварийного истечения

$$q_{accident} = f(p, \rho, \eta, D, d, \sigma, L) \times S_0, \qquad (3.21)$$

где p - избыточное давление в трубопроводе в сечении с-с,

ρ - плотность жидкости,

η - динамическая вязкость жидкости,

D - характерный размер повреждения,

d - толщина стенок трубы,

σ - коэффициент поверхностного натяжения жидкости,

υ - средняя скорость движения жидкости в сечении повреждения,

L - глубина заложения трубопровода,

S_0 - площадь повреждения.

В соответствии с π- теоремой зависимость (5.6) может быть представлена как функция четырех независимых симплексов.

В качестве первого симплекса примем число Эйлера $Eu = \dfrac{p}{\frac{1}{2}\rho\upsilon^2}$. (3.22)

В качестве второго симплекса примем число Вебера $We = \dfrac{\rho\upsilon^2 D}{\sigma}$. (3.23)

В качестве третьего симплекса примем число Рейнольдса $\mathrm{Re}_D = \dfrac{\upsilon D}{\nu}$. (3.24)

$$Eu = f_2(\eta, D, d, \sigma, L). \quad (3.25)$$

$$Eu = f_3(\mathrm{Re}_D, \frac{d}{D}, We, \frac{L}{D}). \quad (3.26)$$

$$q_{accident} = f_5(\mathrm{Re}_D, \frac{d}{D}, We, \frac{L}{D}) \times \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \times S_0 = f_5(\mathrm{Re}_D, \frac{d}{D}, We, \frac{D}{L}) \times \sqrt{2gH} \times S_0. \quad (3.27)$$

Для изучения функциональной зависимости (3.27) были произведены специальные эксперименты, целью которых было изучение функции $\mu = f_5(\mathrm{Re}_D, \frac{d}{D}, We, \frac{L}{D})$.

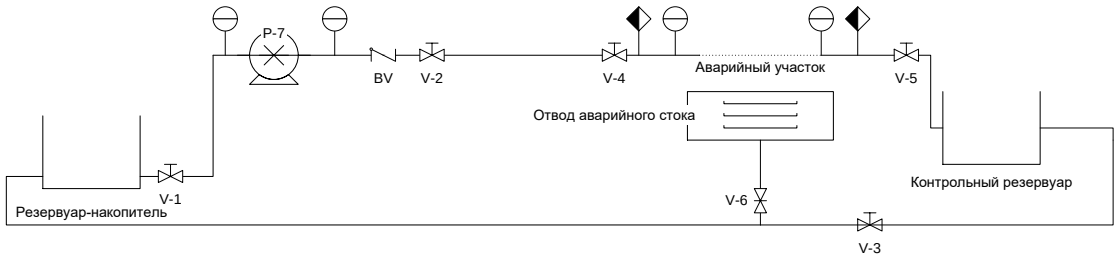


Рис. 3.7 Принципиальная схема экспериментальной установки

Для проведения экспериментов использована установка оборотного водоснабжения цеха тарировки водомеров МУП «Водоканал» г. Петрозаводска (см. рис. 3.7). Условия истечения изменялись в широких пределах: скорость движения в основном трубопроводе от 0.1 до 4 (м/с), давление от 5 до 70 м. в. с., трубы $D_y = 25 \div 125(мм)$. Повреждения имитировались сквозными круглыми отверстиями, дополнительно проводились исследования для условий стесненного истечения в грунт.

В результате экспериментов, проведенных на установке, принципиальная схема которой приведена выше, установлено, что функция f_5 в уравнении (3.27) может принимать существенно различающиеся значения. Коэффициент расхода μ не является постоянной величиной и не может даже в первом приближении приниматься равным для повреждений любого типа.

После статистической обработки результатов экспериментов на трубах диаметром 20 – 100 (мм) была получена общая формула для определения расхода истечения жидкости в форме $q_{accident} = f_5(\mathrm{Re}_D, \frac{d}{D}, We, \frac{L}{D}) \times \sqrt{2gH}$. (3.28)

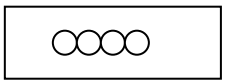
При этом было установлено, что по отношению к критерию Вебера имеет место автомодельность, а сама функция при фиксированном в некоторой окрестности $\frac{L}{D}$ $f_5(\mathrm{Re}_D, \frac{d}{D}, We, \frac{L}{D})$ может быть представлена в виде

$$f_5 = \left(\mu_0 - (\mathrm{Re} \times delta + 1)^{-\gamma}\right),$$

где μ_0, γ - эмпирические коэффициенты, определяющие характер повреждения, $delta$- безразмерная величина равная отношению толщины стенки трубы к приведенному диаметру повреждения.

Таблица 3.3 К определению коэффициентов расхода при аварийном истечении

Характер повреждения	μ_0	$delta$	γ^{-1}
Свищи при фиксированном $delta$ (см. графу 3) в случае свободного истечения	0.97	[0.22,3]; при давлении свыше 20 м.в.с. принимать равной 0.22	-1
Свищи при фиксированном $delta$ в случае свободного истечения	0.97	[0.15,0.22]	[–.9,–1]

Характер повреждения	μ_0	*delta*	γ^{-1}
Свищи при фиксированном *delta* в случае стесненного истечения	Конкретные значения зависят от $\frac{D}{L}$ [0.1,0.6]	> 0.15	$[-1,-.4]$
Условная перфорация с приведенным к круглому отверстию сечением без стеснения 	При увеличении длины перфорации коэффициент уменьшается, конкретные значения зависят от конфигурации [0.1,0.54]	> 0.15 - для приведенного сечения	-1
То же со стеснением	[0.05,0.54]	> 0.15 - для приведенного сечения	$[-1,-.4]$

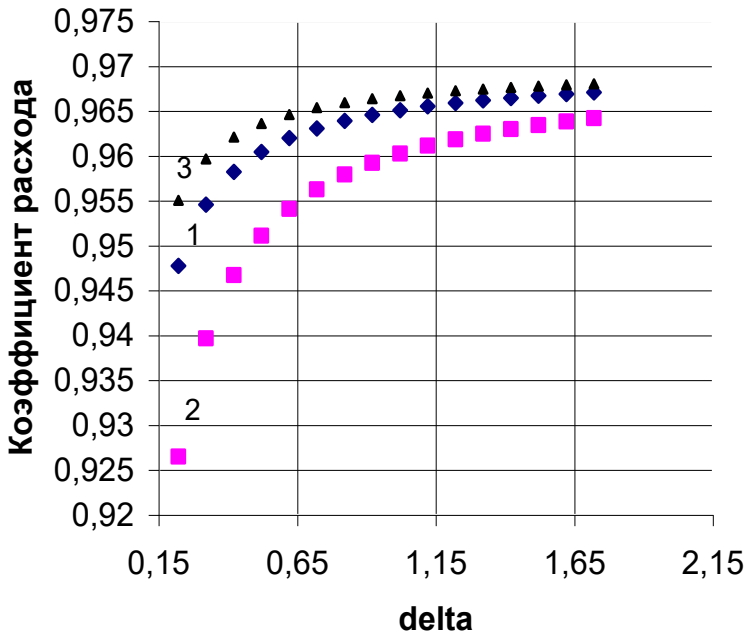


Рис. 3.8 Коэффициенты расхода при истечении в атмосферу (без стеснения) при повреждении типа «свищ»:

1 – при Re=200, 2 – при Re=100, 3 – при Re>2000

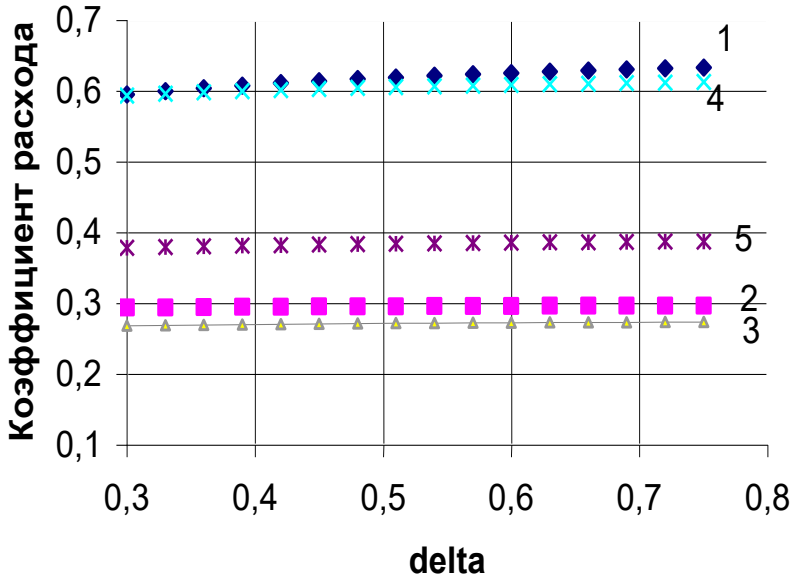


Рис. 3.9 Коэффициенты расхода при истечении (со стеснением) Re>2000:

1 - при повреждении типа «свищ» $\frac{L}{D} = 200 \div 400$, 4 – при повреждении типа «свищ» $\frac{L}{D} = 400 \div 600$, 5 - при повреждении типа «свищ» $\frac{L}{D} = 600 \div 800$;

2 – при повреждении типа «перфорация» (продольная трещина) $\frac{L}{D} = 275 \div 325$, 3 – при повреждении типа «перфорация» $\frac{L}{D} = 375 \div 425$

3.4 Учет влияния дестабилизирующих факторов на аварийность участков водопроводной сети

На основе имеющейся статистики с помощью методов нейро-нечеткой классификации была построена функция принадлежности к нечеткому множеству ненадежных участков, позволяющая на основе нечеткого описания дестабилизирующих факторов оценить техническое состояние участка и возможность аварийного истечения на нем. Для анализа имеющейся статистики использовалась двухслойная нейронная сеть с 20 нейронами на скрытом уровне.

Входные сигналы – числа от 0 до 1, характеризующие дестабилизирующие факторы, при этом: 0 – проявление дестабилизирующего фактора на участке пренебрежимо мало, 1 – проявление дестабилизирующего фактора значительно. Использование порядковой шкалы позволяет использовать результаты обследования без привязки к конкретной инженерной сети.

Входные сигналы: 1) год укладки трубопровода (0 – самый старый в выборке, 1 – самый новый), 2) диаметр трубопровода (0 – самый малый в выборке, 1 – самый большой), 3) нарушения в стыках (0 – нет, 1 – ярко выраженные), 4) – дефекты внутренней поверхности (0 – нет, 1 – ярко выраженные), 5) – ожидаемое избыточное давление (0 – менее 20 м.в.с., 1 – более 60 м.в.с.), 6) – нарушение герметичности (0 – не наблюдалось, 1 – имелись) , 7) деформация тела трубы (0 – нет, 1 – ярко выраженные), 8) глубина заложения трубы (0 – самая малая в выборке, 1 – самая большая в выборке), 9) состояние грунтов вокруг трубопровода (0 – удовлетворительное, 1 – дестабилизирующее), 10) наличие грунтовых вод (0 – нет, 1 – наличие агрессивных подземных вод), 11) интенсивность транспортных потоков (0 – низкая, 1 – высокая).

Выходной сигнал – степень принадлежности к множеству ненадежных.

Для данной сетевой архитектуры получены следующие значения всех синаптических весов искусственной нейронной сети для определения степени принадлежности участка к множеству ненадежных.

Слой №1

Нейрон №1:-0,10 0,02 0,95 0,01 0,04 0,07 0,04 0,09 0,34 0,24 0,45

Нейрон №2:0,37 -0,02 -0,05 -0,01 0,20 0,84 -0,05 0,10 -0,02 -0,17 0,80

Нейрон №3:-0,33 0,81 -0,17 -0,25 -0,34 -0,24 -0,18 -0,14 -0,23 -0,28 -0,01

Нейрон №4:0,77 -0,04 0,11 -0,07 -0,22 -0,18 -0,14 -0,04 -0,08 1,00 -0,06

Нейрон №5:0,87 0,87 0,12 -0,09 0,03 0,15 -0,02 0,01 0,01 0,00 0,20

Нейрон №6:-0,30 -0,03 0,17 -0,03 -0,07 0,14 0,26 0,08 -0,05 1,12 0,24

Нейрон №7:-0,02 0,01 0,01 0,00 0,03 0,13 0,06 0,37 0,04 0,69 0,01

Нейрон №8:-0,29 -0,17 -0,13 -0,20 -0,09 -0,04 -0,17 -0,19 -0,16 -0,15 -0,07

Нейрон №9:0,90 0,04 0,44 0,92 0,16 0,02 0,02 0,26 0,01 0,37 0,03

Нейрон №10:0,53 0,53 0,94 0,20 0,38 0,33 0,19 0,19 0,36 0,91 0,32

Нейрон №11:-0,07 -0,22 0,31 -0,10 -0,26 0,15 -0,09 -0,06 -0,30 -0,48 -0,12

Нейрон №12:-0,19 -0,23 -0,15 -0,15 -0,11 -0,08 -0,25 0,08 -0,28 -0,08 -0,08

Нейрон №13:0,10 0,06 0,20 0,15 0,12 0,01 0,06 0,96 0,88 -0,12 1,00

Нейрон №14:0,00 0,42 -0,12 0,23 0,11 0,37 0,00 -0,03 -0,04 0,34 0,02

Нейрон №15:0,06 0,17 0,21 0,16 0,96 0,15 0,42 0,97 0,05 0,04 0,53

Нейрон №16:-0,02 0,82 0,62 -0,08 0,71 -0,10 -0,05 0,75 -0,10 0,00 -0,12

Нейрон №17:-0,05 -0,29 -0,14 -0,25 0,01 -0,23 -0,14 -0,16 -0,25 -0,02 -0,17

Нейрон №18:0,01 0,27 0,55 0,23 0,63 -0,13 -0,09 -0,30 -0,11 0,42 -0,12

Нейрон №19:0,05 0,31 0,02 -0,05 -0,01 0,85 -0,03 -0,12 0,19 0,38 -0,25

Нейрон №20:-0,05 0,00 0,94 0,90 0,26 -0,05 0,08 0,16 0,08 -0,02 0,01

Слой №2

Нейрон №1:0,22 0,40 -1,06 0,72 0,28 0,73 0,62 -2,45 -0,02 -0,43 -2,25 -2,16 0,00 0,55 -0,07 0,26 -1,41 0,59 0,91 -0,03

Степень принадлежности к множеству ненадежных определяется из соотношений, описывающих процесс распространения сигналов в сети

$$y_i^{(k)}(n) = f(s_i^{(k)}(n))$$
$$s_i^k(n) = \sum_{j=0}^{N_{k-1}} w_{ij}^{(k)}(n) \times x_j^{(k)}, \quad (3.29)$$

где $w_{ij}^{(k)}$ - j синаптический вес i нейрона для k слоя, $s_i^k(n)$ - аргумент функции активации i нейрона для k слоя, $y_i^{(k)}(n)$ - фактический выходной сигнал i - го нейрона для k слоя, $x_j^{(k)}$ - j выходной сигнал от нейронов $k-1$ уровня, поступающих на k уровень, $f(s)$ - функция активации нейрона принята сигмоидальной $\mathrm{f}(\mathrm{s}) = \frac{1}{1+e^{-s}}$. Выходной сигнал – степень принадлежности к множеству ненадежных.

По результатам исследования полученной информационной модели был построен ранжированный ряд дестабилизирующих факторов (таблица 3.4) и, в частности, установлено, что наиболее опасными дестабилизирующими факторами являются состояние грунтов в окрестностях трубопровода и наличие грунтовых вод (обычно сопутствуют друг другу), а, например, не возраст коммуникаций. После обучения классификатора появляется возможность получать функциональные зависимости между различными дестабилизирующими факторами и изменением степени принадлежности участка к множеству «ненадежных».

Таблица 3.4 Ранжированный ряд дестабилизирующих факторов, влияющих на аварийность участков водопроводной сети

Дестабилизирующий фактор	**Вклад в функцию принадлежности к множеству «ненадежных», %**
Состояние грунтов вокруг трубопровода, Наличие грунтовых вод	10.6 10.6
Возраст трубопровода	9.3
Дефекты внутренней поверхности, Избыточное давление на участке, Нарушение герметичности	8.8 8.8 8.8

Дестабилизирующий фактор	Вклад в функцию принадлежности к множеству «ненадежных», %
Деформация тела трубы	8.6
Глубина заложения трубы, Интенсивность транспортных потоков, Нарушение в стыках	7.8 7.8 7.8

3.5 Моделирование процессов коррозионного зарастания трубопроводов

3.5.1 Количественная оценка степени внутренней коррозии металлических труб и ее влияния на пропускную способность металлических труб

Изменение пропускной способности металлических труб обусловлено суммарным воздействием трех основных процессов: 1) образованием и ростом внутритрубных образований - «бугорков», связанных, главным образом, с процессами электрохимической коррозии; 2) гидродинамическим воздействием потока на внутритрубные образования, вымыванием отложений; 3) образованием и ростом внутритрубных образований, обусловленных процессами жизнедеятельности микроорганизмов.

Образование бугорков связано с точечной коррозией на внутренней поверхности труб. Бугорки состоят из продуктов коррозии, покрывающих анодные поверхности в местах изъявлений при точечной коррозии. Первоначально бугорки увеличивают скорость разъедания под ними, но позже, когда они становятся более плотными, скорость коррозии может значительно уменьшится – труба «зарастает». Основное неудобство, причиняемое образованием бугорков, – увеличение сопротивления движению воды вследствие изменения шероховатости труб.

В активном растущем бугорке вода имеет pH=6; pH слегка повышается, когда рост бугорков приостанавливается (6.4 – 6.8). Обработанная вода городского водопровода имеет большие значения pH. Концентрация анионов в бугорках значительно выше, а черная гидратированная Fe_3O_4 в результате магнитного притяжения прикрепляется к железу в виде пористых столбчатых волокон.

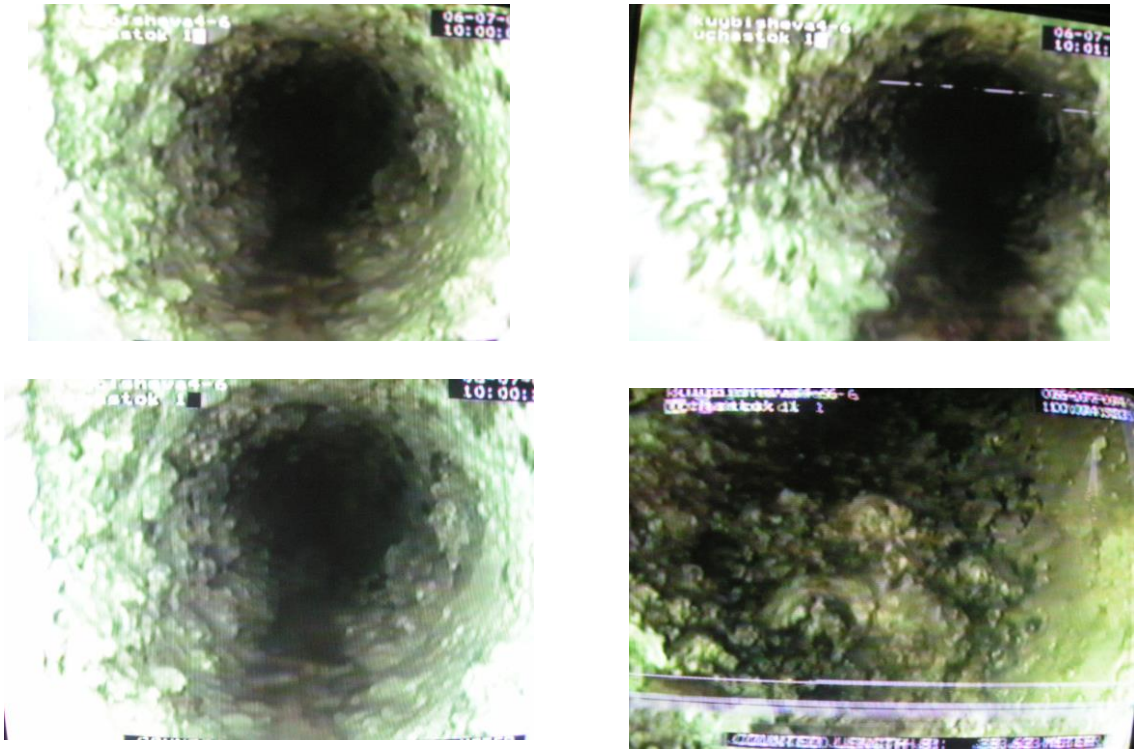


Рис. 3.10 Образование бугорков в стальной трубе Ø200 (Петрозаводск)

Микроорганизмы, восстанавливающие сернокислые соединения с образованием сероводорода, для поддержания жизнедеятельности которых не требуется свободного доступа кислорода, могут успешно развиваться в бугорках, где концентрация кислорода мала. Их жизнедеятельность способствует сохранению достаточно высокого перепада концентрации кислорода, что усиливает местное разъедание в раковинах под бугорками.

Таким образом, образование бугорков (увеличение шероховатости) напрямую связано с процессами внутренней коррозии трубопроводов, на который значительное влияние оказывает химический состав перекачиваемой воды и свойства материала труб.

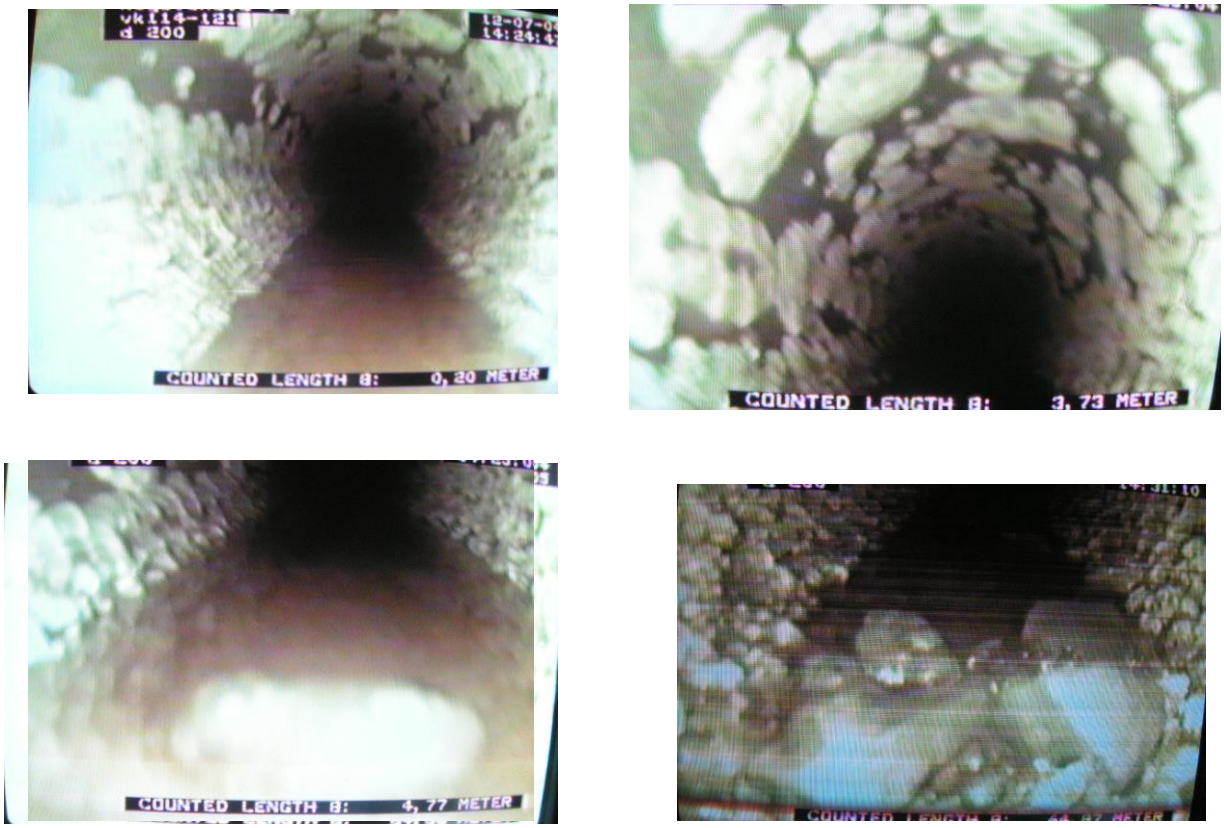


Рис. 3.11 Отложения в стальной трубе Ø200 (Петрозаводск)

Для оценки степени возможного «зарастания» металлических трубопроводов могут быть использованы сравнительные характеристики коррозионной стойкости трубопроводов, выполненных из различных материалов и перекачивающих воду различного состава.

Для получения подобной информации нами выполнен ряд вспомогательных исследований. Для исследования сравнительной коррозионной стойкости трубопроводов, выполненных из различных материалов, использовался метод гальванопар, при этом создавались близкие к натурным условия протекания окислительно-восстановительных процессов. Установка представляет собой термостатированный сосуд с мешалкой (см. рисунок 3.12). В сосуд, заполненный сетевой водой, попарно помещаются образцы материалов труб. Последние подсоединяются через переключатель к гальванометру. Образцы изготовлялись из водопроводных труб различных материалов, специально зачищались и обезжиривались. Для предотвращения окислительно-восстановительных процессов на границе

раздела металл-металл место контакта образца с электрическим проводом изолировалось эпоксидной смолой. Продолжительность опыта ограничивалась периодом увеличения концентрации железа в сетевой воде до 0.3 мг/л, что соответствует предельно допустимой концентрации ионов железа в питьевой воде.

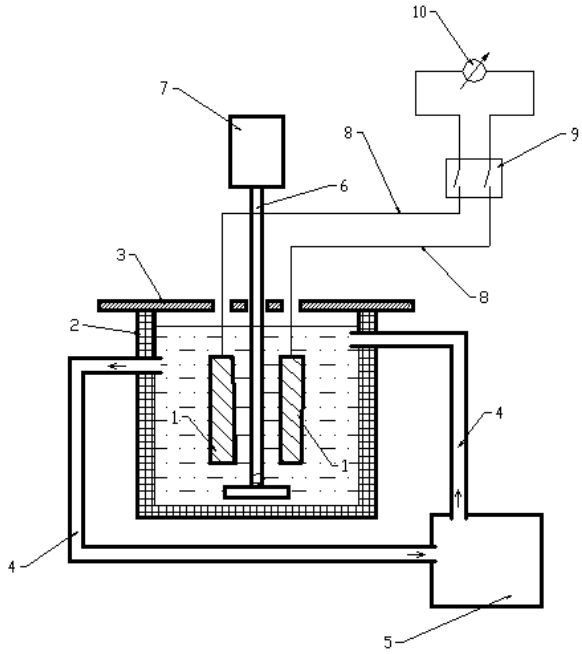


Рис. 3.12 Установка для исследования коррозионной стойкости труб из различных материалов

1 - образцы металлов, 2 – термостатированный стакан, 3 – крышка стакана, 4 – шланги, 5 – термостат, 6 – мешалка, 7 – мотор, 8 – электропривод, 9 – переключатель, 10 – микроамперметр

Образцы помещали таким образом, чтобы скорость их омывания водой была одинаковой. На образце, обладающем более низкой коррозионной способностью, создавался более отрицательный потенциал. По направлению и силе тока можно делать выводы о различиях в коррозионной стойкости материалов. Кроме того, изменяя частоту вращения мешалки, солевой состав воды и ее температуру можно судить о вкладе этих факторов в процесс внутренней коррозии водопроводных систем. Используя установленные в результате потенциометрических исследований на установке в различных средах значения потенциалов коррозии, по калибровочным кривым могут

быть определены токи коррозии металла труб, учитывающие возможные колебания pH водопроводной воды и содержание в ней активного хлора (полученного при электролизе поваренной соли). Скорость коррозии для данного металла может быть определена по формуле $П = \frac{3600 \times I_{кор} \times A \times 8.76}{96500 \times n \times s \times \rho_{Fe}}$,

где $П$ - глубинный показатель коррозии, мм/год,

$I_{кор}$ - величина тока коррозии, А,

A - атомная масса железа 55.84 г,

n - число электронов, участвующих в электрохимическом процессе ($n = 2$),

s - площадь электрода, $мм^2$,

ρ_{Fe} - плотность железа, $\frac{г}{см^3}$.

Ниже приводятся результаты, полученные нами при моделировании процессов внутренней коррозии в металлических трубах из «кипящей» стали (см. рис. 3.13 – 3.16).

Повышение pH воды приводит к снижению скорости коррозии. При увеличении концентрации активного хлора скорость коррозии возрастает.

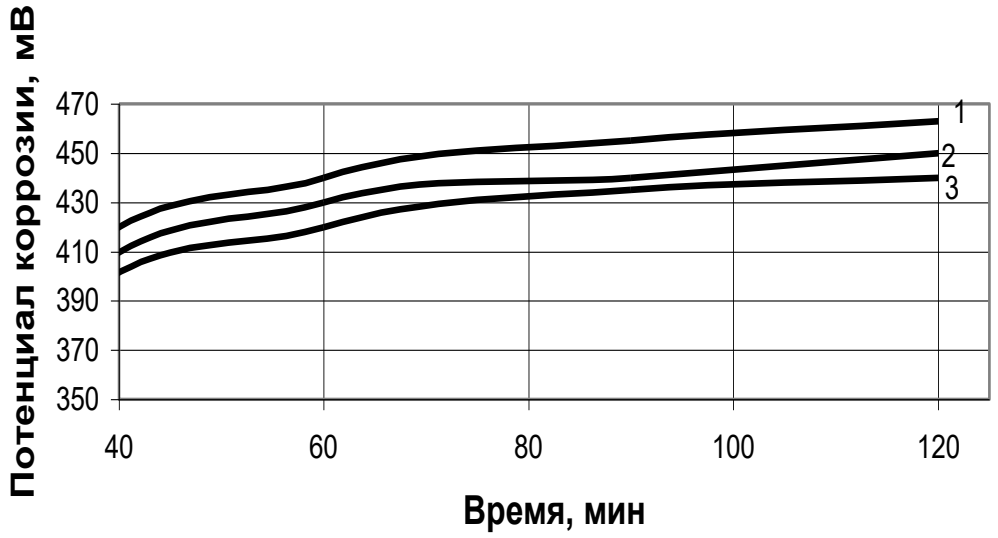


Рис. 3.13 Зависимость потенциала коррозии от концентрации активного хлора и времени:

1 – концентрация активного хлора 0.5 мг/л, 2 - концентрация активного хлора 0.4 мг/л, 3 - концентрация активного хлора 0.3 мг/л

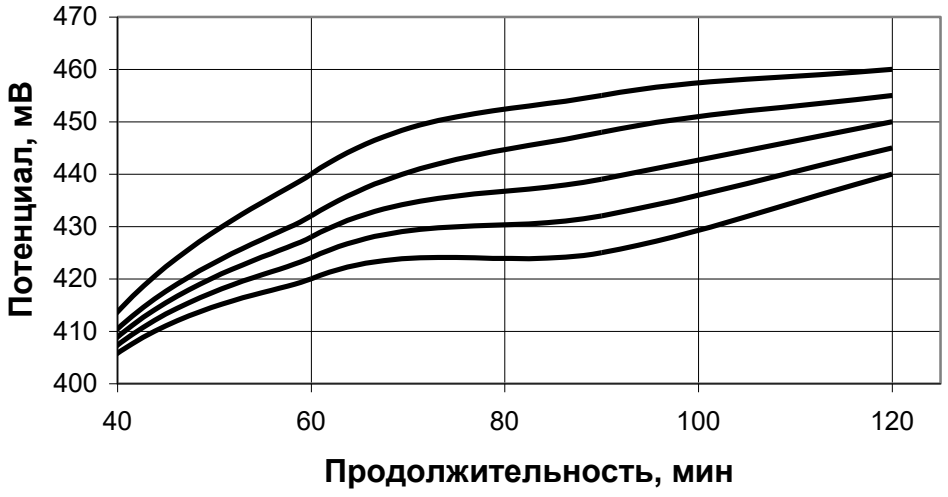


Рис. 3.14 Потенциал коррозии от времени и pH

Кривые построены при pH, изменяющихся от 6 до 8.5 с шагом 0.5 (большему значению потенциала коррозии соответствует меньшее значение pH)

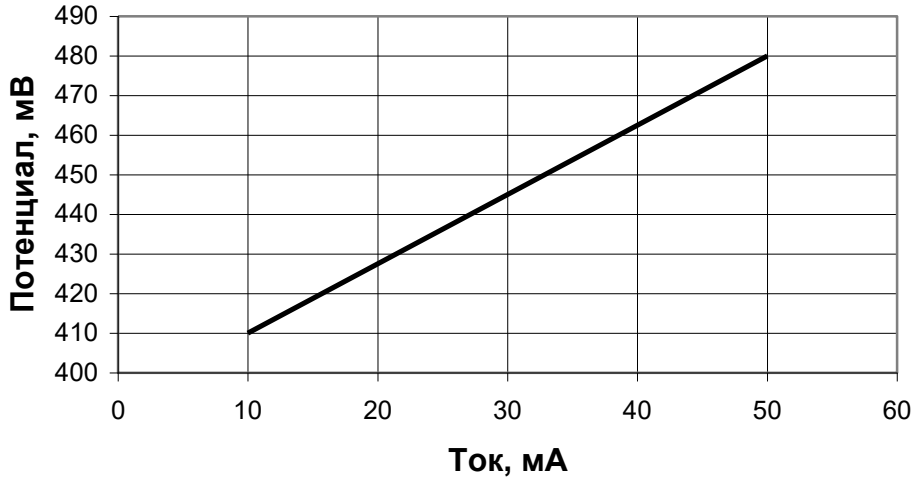


Рис. 3.15 Потенциостатические кривая, полученная при температуре воды 20˚C, pH=6.5, концентрации активного хлора 0.5 мг/л

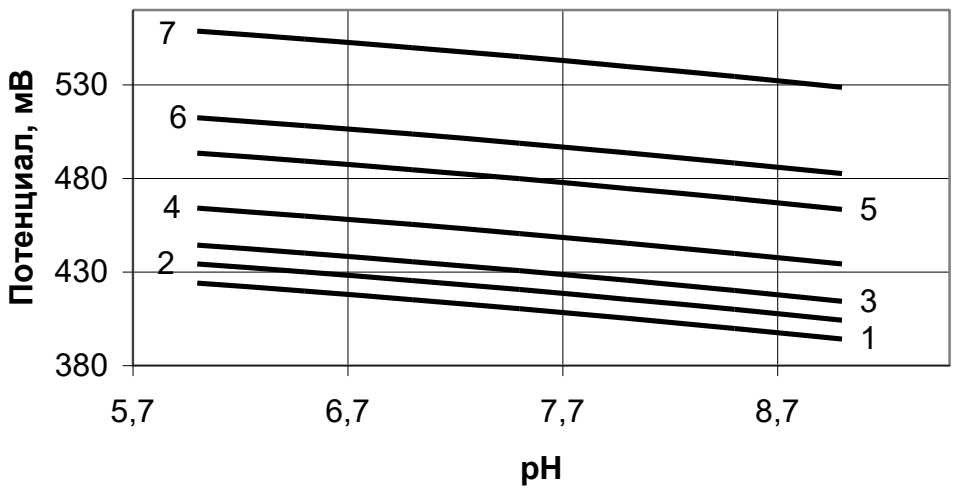


Рис. 3.16 Потенциал коррозии в зависимости от активного хлора и pH

1 – концентрация активного хлора 0.1 мг/л, 2 – 0.2 мг/л, 3 – 0.3 мг/л, 4 – 0.5 мг/л, 5 – 0.8 мг/л, 6 – 1 мг/л, 7 – 1.5 мг/л

Полученные результаты указывают на то, что скорость внутренней коррозии труб в значительной мере зависит от технологического режима хлорирования воды и сетевой удаленности участка от очистных сооружений и, по-видимому, от типа применяющегося хлорсодержащего агента.

Исследование коррозионных свойств материала и перекачиваемой воды с помощью описанного метода позволяет получить лишь качественные результаты, которые могут быть полезны при предварительном ранжировании металлических участков водопроводной сети по степени «зарастания». Прогнозировать изменение гидравлических показателей металлических труб таким способом невозможно.

Как уже было указано связь между внутренней коррозией металлических труб и снижением их пропускной способности обусловлена образованием бугорков. Установить связь между абсолютной гидравлической шероховатостью и конфигурацией бугорков, которая может быть различной, – затруднительно. При решении задачи о внутренней коррозии металлических труб степень «зарастания» предлагается оценивать исключительно по значению абсолютной гидравлической шероховатости безотносительно к характеру «зарастания». Если при этом считать, что

внутренний диаметр труб не уменьшается, то шероховатость однозначно определяется из уравнений гидравлики:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{K}{3.7d} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}\times\sqrt{\lambda}}\right), \qquad (3.30)$$

где K, $\Delta = \frac{K}{d}$ - абсолютная и относительная шероховатость трубы соответственно; d - диаметр трубы; λ - коэффициент гидравлического трения; $\mathrm{Re} = \frac{v \times d}{\varsigma}$ - критерий Рейнольдса для соответствующего режима движения жидкости в трубе; ς - кинематическая вязкость воды для данных условий; $v = \frac{4 \times q}{\pi \times d^2}$ - скорость движения жидкости в трубе.

Располагая информацией о потерях напора на участке трубопровода h, его длине l, диаметре d и расходе q по нему протекающему, можно определить коэффициент гидравлического трения из уравнения Дарси-Вейсбаха:

$$\mathrm{h} = \lambda \times \frac{v^2}{2 \times g} \times \frac{l}{d}, \qquad (3.31)$$

где g - ускорение свободного падения.

Поставляя полученное значение λ в уравнение (3.30), можно получить однозначное значение для абсолютной шероховатости металлической трубы в данный момент времени.

Степень «зарастания» труб в момент времени t предлагается оценивать коэффициентом зарастания I_{cor}:

$$I_{cor} = \frac{K(t)}{K_0}, \qquad (3.32)$$

где $K(t)$ - абсолютная шероховатость трубы в момент времени t, K_0 - абсолютная шероховатость для новой трубы.

Изменение шероховатости труб приводит к существенному увеличению потерь напора на участках сети при неизменных расходах. Зафиксируем величину потерь напора h в уравнении (3.31), тогда каждому значению

абсолютной шероховатости K будет соответствовать определенная скорость (расход) движения воды в трубе.

Можно ввести коэффициент снижения пропускной способности труб I_q, характеризующий отношение расходов воды, которые могут пропустить подвергшаяся коррозии и новая труба при фиксированных потерях напора h: $I_q = 1 - \frac{Q(t)}{Q_0}$, (3.33)

где $Q(t)$ - расход воды в момент времени t, Q_0 - расход воды для новой трубы.

3.5.2 Использование результатов решения обратных задач потокораспределения для определения степени «зарастания» и изменения пропускной способности металлических труб

Посредством натурных замеров давлений в узлах сети можно определить фактическую шероховатость труб участков сети и оценить степень их коррозионного «зарастания». Для решения задачи использовались основные положения теории гидравлических цепей.

Структура водопроводной сети моделируется конечно ориентированным связным графом с e дугами (участками) и υ вершинами (узлами), образующими $\mu = e - \upsilon + 1$ циклов (колец), подачи водопитателей и отборы потребителей считаются фиксированными (задача гидравлического расчета первого типа). Потокораспределение в сети для стационарного состояния описывается системой уравнений Кирхгофа с замыкающими соотношениями, полученными из гидравлических соображений:

$$\begin{cases} Q \times \vec{q} = \vec{q}_0 \\ B \times \vec{h} = 0 \\ \vec{h} = f(\vec{q}) \end{cases}, \qquad (3.34)$$

где Q – матрица главных сечений графа сети, B – цикломатическая матрица графа сети, f - функция, связывающая потери напора на участках сети $\vec{h}$ с протекающими по ним расходами воды $\vec{q}$, $\vec{q}_0$ - вектор узловых отборов (подач).

В случае, когда отборы потребителей и подачи водопитателей $\breve{q}_0$ известны, имеем систему уравнений порядка $a = 2 \times e = 2 \times (\upsilon + \mu - 1)$ и числом неизвестных (расходы воды на участках сети $\breve{q}$, потери напора $\breve{h}$) равных $2 \times e$. Такая система может быть решена, а, следовательно, установлено потокораспределение в сети.

Возможна и обратная задача, когда известными являются потери напора $\breve{h}$ на участках сети (они могут быть определены по результатам пьезометрической съемки), отборы потребителей и подачи водопитателей, а неизвестными величинами – расходы воды на участках сети $\breve{q}$. В этом случае система (3.34) принимает вид:

$$\begin{cases} Q \times \breve{q} = \breve{q}_0 \\ \breve{h} = f(\breve{q}) \end{cases}. \qquad (3.35)$$

Если при этом гидравлические характеристики участка неизвестны (например, коэффициенты гидравлического трения $\breve{\lambda}$), то имеем систему уравнений порядка $b = \upsilon + e - 1$ с числом неизвестных (расходы и параметры гидравлического сопротивления на участках сети) равном $2 \times e$:

$$\begin{cases} Q \times \breve{q} = \breve{q}_0 \\ \breve{h} = f(\breve{q}, \breve{\lambda}) \end{cases}. \qquad (3.36)$$

Системы уравнений (3.35), (3.36) являются неопределенными (количество неизвестных больше количества уравнений) и не могут быть решены численно. Ситуация осложняется еще и тем, что, как правило, все сетевые отборы и подачи не могут быть определены и также являются неизвестными.

В том случае, когда имеется несколько пьезометрических съемок на различные временные периоды функционирования сети решение задачи (3.36) может быть получено. При наличии $T = 2 \times e + 1$ наборов вектора $\breve{h}$ и известном расходе, подаваемом в сеть при одном из режимов работы, систему (3.36) можно замкнуть и определить все неизвестные в полученной системе, в том числе, шероховатости участков труб.

Для решения задачи введем матрицы «связи» отдельных гидравлических режимов, для которых осуществляется пьезометрическая съемка в виде

$$C_i = \begin{pmatrix} \left(\frac{\lambda_1^1 \times h_i^1}{\lambda_i^1 \times h_1^1}\right)^{0.5} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \left(\frac{\lambda_1^2 \times h_i^2}{\lambda_i^2 \times h_1^2}\right)^{0.5} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \left(\frac{\lambda_1^e \times h_i^e}{\lambda_i^e \times h_1^e}\right)^{0.5} \end{pmatrix},$$

где λ_i^j - коэффициент гидравлического трения на j-ом участке для i-го режима функционирования сети, h_i^j- потери напора на j-ом участке для i-го режима функционирования сети. После этого система уравнений для решения обратной задачи при наличии пьезометрических съемок для не менее чем $n = 2 \times e + 1$ режимов работы сети примет вид

$$\begin{cases} Q \times \overset{\rho}{q} = \overset{\rho}{q}_0 \\ Q \times \overset{\rho}{q} \times C_2 = \overset{\rho}{q}_0 \\ \dots \\ Q \times \overset{\rho}{q} \times C_i = \overset{\rho}{q}_0 \\ \dots \\ Q \times \overset{\rho}{q} \times C_n = \overset{\rho}{q}_0 \\ \frac{1}{\sqrt{\lambda_i^j}} = -2\lg\left(\frac{K_Э{}^j}{3.7 d^j} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}_i^j \times \sqrt{\lambda}_i^j}\right) \\ \mathrm{Re}_i^j = \frac{v_i^j \times d_j}{\varsigma} \end{cases}, \qquad (3.37)$$

где $K_Э{}^j$, $\Delta^j = \frac{K_Э{}^j}{d^j}$ - абсолютная и относительная шероховатость труб j-го участка, $\overset{\rho}{q}$ - вектор расходов на участках сети для одного из режимов работы (базовый режим). Последнее соотношение в системе (3.37) – формула Кольбрука, связывающая коэффициент гидравлического трения с шероховатостью труб участка.

В том случае, если считать коэффициент гидравлического трения постоянной для участка сети величиной, то в области квадратичного закона

гидравлического сопротивления система (3.37) становится линейной и может быть легко решена численно. Однако целесообразность такой линеаризации сомнительна, ибо сам по себе коэффициент гидравлического трения не является мерой коррозионного зарастания участка трубопровода.

3.5.3 Решение обратной задачи в условиях неполноты исходной информации

Даже для относительно небольших водопроводных сетей число требуемых пьезометрических съемок $\mathrm{n} = 2 \times e + 1$ велико. Съемки на водопроводных сетях проводятся выборочно, нерегулярно и в таких условиях, когда на точность результатов надеяться не приходится.

Рассмотрим приближенные методы решения задачи (3.37) в условиях неполноты исходных данных, когда $\mathrm{n} < 2 \times e + 1$. Приблизительный характер решения задачи означает, что ценность результатов решения будет повышаться по мере увеличения n.

Введем новые обозначения, пусть $\vec{h}^{\mathrm{model}}$ - вектор потерь напора в сети, соответствующий результатам моделирования водопроводной сети с модельными коэффициентами гидравлического трения участков $\vec{\lambda}$; $\vec{h}^{\mathrm{real}}$ - вектор потерь напора в сети, соответствующий результатам натурной пьезометрической съемки и натурным коэффициентам гидравлического трения.

В том случае, если количество пьезометрических съемок $\mathrm{n} = 2 \times e + 1$ и известен общий расход воды, подающийся в сеть в одном из ее узлов, то система уравнений (3.37) является определенной и $\vec{h}^{\mathrm{model}} = \vec{h}^{\mathrm{real}}$. В том случае, когда пьезометрические съемки исполнялись выборочно (не во всех узлах сети) и $\mathrm{n} < 2 \times e + 1$ задача (3.37) может иметь множество возможных решений. Чтобы иметь возможность оценить степень несоответствия модельного решения натурным данным потребуем заполнить неизвестные компоненты вектора $\vec{h}^{\mathrm{real}}$ соответствующими компонентами вектора $\vec{h}^{\mathrm{model}}$ и введем вектор $\vec{h}_h^{error} = \vec{h}^{\mathrm{model}} - \vec{h}^{\mathrm{real}}$. Длину вектора $\vec{h}_h^{error}$ можно рассматривать как меру

адекватности модельного решения натуре для заданного набора исходных данных по давлениям. Аналогично можно ввести вектор $\overset{\rho}{h}_q^{error} = Q \times \overset{\rho}{q} - \overset{\rho}{q}_0 + \sum_{i=1}^{n} \left(Q \times \overset{\rho}{q} \times C_i - \overset{\rho}{q}_0 \right)$, длина которого характеризует адекватность модельного решения по расходам на участках сети.

В случае неполноты исходных данных неизвестными при решении задачи (3.37) будут являться: e - расходов на участках сети для базового режима, e - значений абсолютных шероховатостей труб участков сети, $n \times \upsilon$ - модельных давлений в узлах сети (от модельных давлений можно перейти к модельным потерям напора), и в общем случае υ-1 узловых отборов (подач) – кроме подачи в одном из узлов сети. Сама задача (3.37) трансформируется в задачу математического программирования:

$$f = \left| \sum_{g=1}^{n} \left(\overset{\rho}{h}_g^{\mathrm{mod}\,el} - \overset{\rho}{h}_g^{real} \right) \right| + \gamma \times \left| Q \times \overset{\rho}{q} - \overset{\rho}{q}_0 + \sum_{i=1}^{n} \left(Q \times \overset{\rho}{q} \times C_i - \overset{\rho}{q}_0 \right) \right| \to \min_{\Omega}$$

$$\Omega : \left| \begin{array}{l} \dfrac{1}{\sqrt{\lambda_i^j}} = -2\lg\left(\dfrac{K_э^{\,j}}{3.7 d^j} + \dfrac{2.51}{\mathrm{Re}_i^j \times \sqrt{\lambda_i^{\,j}}} \right); i = (\overline{1,n});\ j = (\overline{1,e}) \\ h_i^{j\,\mathrm{mod}\,el} = \lambda_i^j \times \dfrac{l_j}{d_j} \times \dfrac{v_i^{j\,2}}{2 \times g}; i = (\overline{1,n});\ j = (\overline{1,e}) \\ v_i^j = \dfrac{4 \times q_i^j}{\pi \times d_j^{\,2}}; i = (\overline{1,n});\ j = (\overline{1,e}) \\ \mathrm{Re}_i^j = \dfrac{v_i^j \times d_j}{\varsigma}; i = (\overline{1,n});\ j = (\overline{1,e}) \\ C_i = \begin{pmatrix} \left(\dfrac{\lambda_1^1 \times h_i^{1\,\mathrm{mod}\,el}}{\lambda_i^1 \times h_1^{1\,\mathrm{mod}\,el}} \right)^{0.5} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \left(\dfrac{\lambda_1^2 \times h_i^{2\,\mathrm{mod}\,el}}{\lambda_i^2 \times h_1^{2\,\mathrm{mod}\,el}} \right)^{0.5} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \left(\dfrac{\lambda_1^e \times h_i^{e\,\mathrm{mod}\,el}}{\lambda_i^e \times h_1^{e\,\mathrm{mod}\,el}} \right)^{0.5} \end{pmatrix} \end{array} \right. , \qquad (3.38)$$

где γ - эмпирический коэффициент, обеспечивающий возможность сравнения ошибок по давлениям и по расходам.

Для решения задачи (3.38) нами предложено использовать генетические алгоритмы. В случае некорректно постановленной задачи (например, при недостатке исходных данных) генетический алгоритм предлагает набор субоптимальных решений, право выбора конкретного из них остается за экспертом.

Применительно к решению задачи (3.38) генетические алгоритмы используются следующим образом. На первом этапе создается начальная популяция – набор ожидаемых решений задачи (3.38). Причем степень ожидаемости весьма условна, начальная популяция может быть сгенерирована случайным образом: для каждого из возможных решений, образующих набор (популяцию) случайным образом назначаются шероховатости $K_Э$ для каждого из участков, модельные потери напора $\overset{\rho}{h}^{model}$ и отборы (подачи) в узлах $\overset{\rho}{q}_0$ для n режимов работы сети, расходы на участках $\overset{\rho}{q}$ для базового режима работы. Настройка (калибровка) генератора случайных чисел осуществляется на пробных прогонах генетического алгоритма.

Для каждого варианта решения из начальной популяции определяется значение целевой функции $f = \left| \sum_{g=1}^{n} \left(\overset{\rho}{h}_g^{model} - \overset{\rho}{h}_g^{real} \right) \right| + \gamma \times \left| Q \times \overset{\rho}{q} - \overset{\rho}{q}_0 + \sum_{i=1}^{n} \left(Q \times \overset{\rho}{q} \times C_i - \overset{\rho}{q}_0 \right) \right|$, характеризующей адекватность решения. Все решения, целевая функция которых на данном этапе расчета меньше средней в популяции, исключаются из процесса «эволюции». Новые решения генерируются путем случайной рекомбинации двух вариантов (по одному фрагменту от каждого) решения задачи. Расширение исследуемого пространства решений задачи осуществляется за счет операции мутации: случайного изменения вектора решения. ГА завершает работу по достижению заданного уровня значений целевой функции в популяции.

Эффективность генетического программирования при решении задач высокой размерности достаточно высока и позволяет за приемлемое время находить экстремумы целевой функции с достаточной степенью точности.

3.5.4 Построение модели изменения шероховатости металлических труб во времени

Располагая результатами решения задачи (3.38) и информацией о возрасте отдельных участков сети можно построить зависимости изменения шероховатости труб во времени, пропускной способности труб. Ниже (рис. 3.17, 3.18) приводятся зависимости, полученные нами по результатам пьезометрических съемок на водопроводных сетях г. Петрозаводска для коэффициента «зарастания» металлических труб I_{cor} и коэффициента снижения пропускной способности I_q. Расчетные точки аппроксимированы гладкими кривыми. Результаты справедливы для водопроводной воды г. Петрозаводска: вода слабоминерализована, обладает выраженными коррозионными свойствами с показателем стабильности до -1.0, концентрация растворенного железа составляет менее 0.1 мг/л.

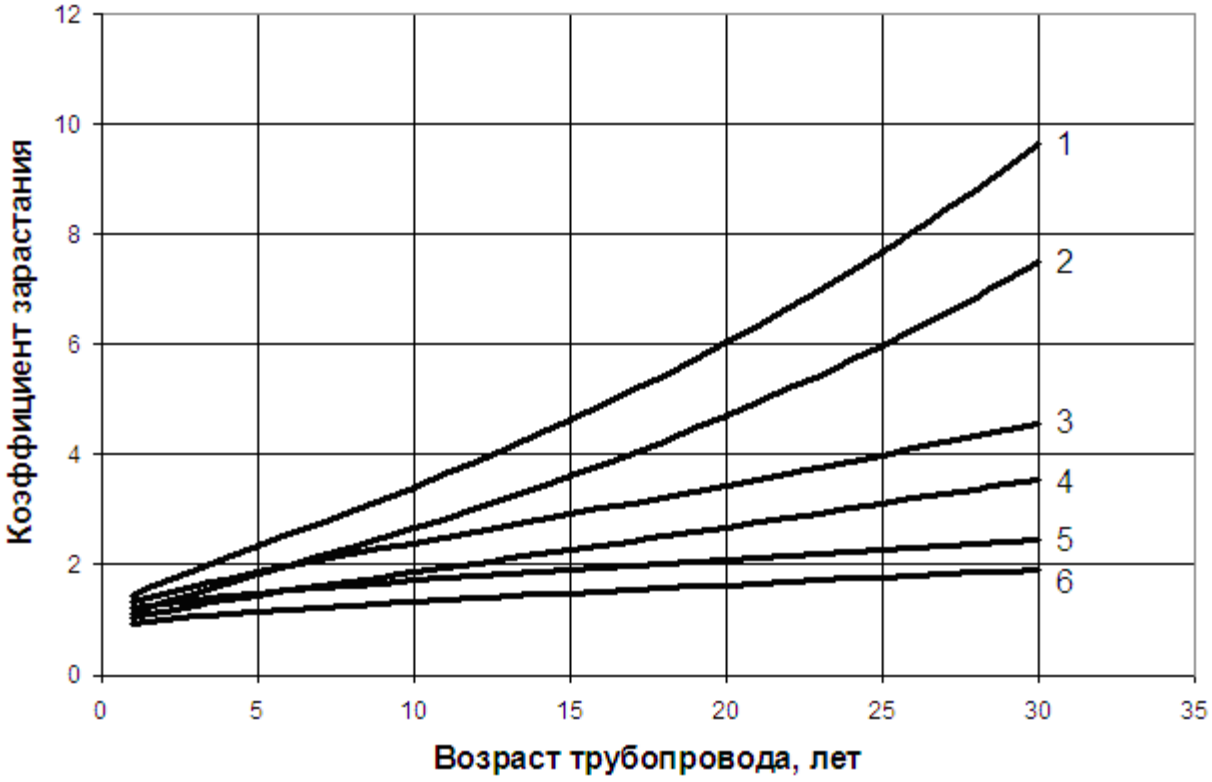


Рисунок 3.17 Коэффициент зарастания для труб из различных материалов и возраста: 1 – стальные трубы Dy=100 мм, 2 – чугунные трубы Dy=100 мм, 3 – стальные трубы Dy=200 мм, 4 – чугунные трубы Dy=200 мм,

5 - стальные трубы Dy=400 мм, 6 – чугунные трубы Dy=400 мм

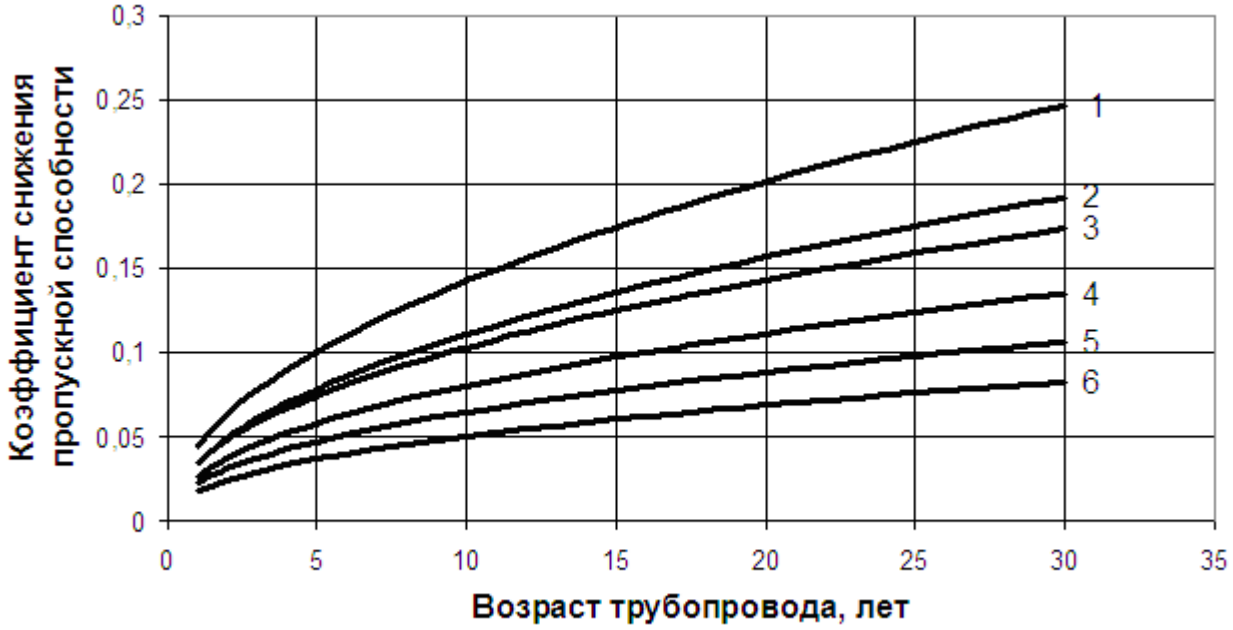


Рисунок 3.18 Коэффициент снижения пропускной способности труб из различных материалов и возраста: 1 – стальные трубы Dy=100 мм, 2 – чугунные трубы Dy=100 мм, 3 – стальные трубы Dy=200 мм, 4 – чугунные трубы Dy=200 мм, 5 - стальные трубы Dy=400 мм, 6 – чугунные трубы Dy=400 мм

На следующем этапе полученные результаты аппроксимируются подходящей зависимостью. Простейшая модель коррозионного зарастания может быть построена следующим образом. Шероховатость в момент t обозначается через Δ. Прирост шероховатости за промежуток времени от t до $t+\Delta t$ пропорционален величине Δt, скорости протекания коррозионных процессов i_a и величине шероховатости в момент времени t:

$$AddV(t,t+\Delta t)=\alpha\times\Delta(t)\times\Delta t\times i_a.$$

Покажем, что i_a можно считать постоянной для сетевой воды заданного состава. Для этого используем результаты, полученные в теории коррозии металлов.

Наиболее известной моделью коррозии железа является механизм, предложенный Бокрисом. На поверхности железа адсорбируются молекулы

H_2O, подвергаясь при этом диссоциации. Такая диссоциативная адсорбция приводит к образованию поверхностного комплекса $Fe(OH)^-_{адс}$:

$Fe + H_2O \Leftrightarrow Fe(OH)^-_{адс} + H^+$.

За адсорбционной стадией следует электрохимическая реакция отщепления первого электрона от атома железа, связанного с частицей OH^-:

$Fe(OH)^-_{адс} \Leftrightarrow Fe(OH)_{адс} + e$.

Стадия, лимитирующая скорость всего процесса, имеет вид $Fe(OH)_{адс} \Leftrightarrow FeOH^+ + e$ и сопровождается диссоциацией комплекса $FeOH^+$ в растворе:

$FeOH^+ + H^+ \Leftrightarrow Fe^{2+} + H_2O$.

С ростом концентрации анионов раствора скорость растворения металла увеличивается:

$(FeOH)_{адс} + (HSO_4^-)_{адс} = Fe^{2+} + SO_4^{2-} + H_2O + e$

или $(FeOH)_{адс} + (SO_4^{2-})_{адс} = Fe^{2+} + SO_4^{2-} + OH^- + e$.

Если самой медленной стадией электрохимического процесса является переход заряженных частиц через границу раздела фаз, то имеет место замедленная стадия разряда – ионизация. Теория, описывающая кинетические закономерности переноса заряда через границу раздела фаз, называется теорией замедленного разряда. Впервые в качественной форме она была сформулирована в работах А.Н. Фрумкина.

Основная причина влияния скачка потенциала на скорость электрохимических реакций заключается в том, что скорость таких реакций лимитируется стадией переноса заряда, энергия активации которого является функцией потенциала на границе металл – раствор. Количественная связь между скоростью электрохимического процесса и электродным потенциалом описывается уравнением Фольмера – Фрумкина. Для простейшего случая протекания процесса в одну стадию, при одновременном отщеплении n электронов, это уравнение записывается в форме $i_a = \dfrac{k \times a_m \times e^{\beta \times n \times F \times (E - E_p)}}{R \times T}$,

где i_a - скорость анодной реакции, выраженная в единицах плотности тока, a_m - активность реагента, β - коэффициент переноса для анодной реакции, E - электродный потенциал металла в данных условиях, E_p - равновесный электродный потенциал металла реакции равновесного обмена электрическими разрядами, F - число Фарадея.

Таким образом, $i_a = k \times a_{(FeOH)_{адс}} \times e^{\left(\frac{\beta \times F \times E}{R \times T}\right)}$ величину $a_{(FeOH)_{адс}}$ можно найти из уравнения Нерста $E = E_p + \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{a_{(FeOH)_{адс}}}{a_{(FeOH)^-_{адс}}}\right)$, подставив в последнее $a_{(FeOH)^-_{адс}} = \frac{K}{a_{H^+}}$, имеем $a_{(FeOH)_{адс}} = k' \times a^{-1}_{H^+} \times e^{\left(\frac{(1+\beta) \times FE}{RT}\right)}$.

В итоге уравнение для скорости растворения железа имеет вид $i_a = k' \times a^{-1}_{H^+} \times e^{\left(\frac{(1+\beta) \times F \times E}{RT}\right)}$.

Если учитывать концентрацию анионов раствора, то можно получить аналогичное выражение

$i_a = k' \times a_{(FeOH)_{адс}} \times a_{HSO_4^-} \times e^{\frac{\beta \times F \times E}{R \times T}} + k'' \times a_{(FeOH)_{адс}} \times a_{SO_4^{2-}} \times e^{\frac{\beta \times F \times E}{R \times T}}$, допуская, что константы скоростей реакций отличаются незначительно, имеем $i_a = k \times a_{(FeOH)_{адс}} \times \left(a_{HSO_4^-} + a_{SO_4^{2-}}\right) \times e^{\frac{\beta \times F \times E}{R \times T}}$. Последнее соотношение удобно представить в виде $\lg i_a = k''' + pH + \lg a_c + (1+\beta) \times \frac{F \times E}{2.3 \times R \times T}$.

Таким образом, скорость анодного процесса определяется солевым составом воды. Будем считать, что солевой состав сетевой воды на различных ее участках изменяется незначительно и различием i_a для отдельных участков для одного и того же материала труб можно пренебречь.

Вымывание отложений за промежуток времени от t до $t + \Delta t$ пропорционально величине Δt и величине шероховатости в момент времени t: $DecV(t, t+\Delta t) = \beta \times \Delta(t) \times \Delta t$.

Прирост шероховатости, обусловленный жизнедеятельностью микроорганизмов, проявляет себя не сразу: пока степень зарастания (шероховатость) мала, влияние этого фактора на величину шероховатости незначительно, когда шероховатость увеличивается, роль микробиологической коррозии резко возрастает. Известно, что микробиологическая активность в значительной мере зависит от солевого состава воды и ее температуры. С учетом всего сказанного дополнительное увеличение шероховатости за счет микробиологических процессов промежуток времени от t до $t+\Delta t$:

$$AddB(t,t+\Delta t)=\gamma\times\Delta(t)^2\times\Delta t\times K_t.$$

Таким образом, приращение шероховатости за период времени от t до $t+\Delta t$ составляет $\Delta(t+\Delta t)-\Delta(t)=AddV(t,t+\Delta t)+AddB(t,t+\Delta t)-DecV(t,t+\Delta t)$,

$$\Delta(t+\Delta t)-\Delta(t)=\alpha\times\Delta(t)\times\Delta t\times i_a+\gamma\times\Delta(t)^2\times\Delta t\times K_t-\beta\times\Delta(t)\times\Delta t,$$

$$\frac{\Delta(t+\Delta t)-\Delta(t)}{\Delta t}=\alpha\times\Delta(t)\times i_a+\gamma\times\Delta(t)^2\times K_t-\beta\times\Delta(t),$$

$$\frac{d\Delta}{dt}=(\alpha-\beta)\times\Delta(t)\times i_a+\gamma\times\Delta(t)^2\times K_t,$$

$$\frac{d\Delta}{(\alpha-\beta)\times\Delta(t)\times i_a+\gamma\times\Delta(t)^2\times K_t}=dt,$$

$$\int_{\Delta_0}^{\Delta}\frac{d\Delta}{(\alpha-\beta)\times\Delta(t)\times i_a+\gamma\times\Delta(t)^2\times K_t}=\int_{t_0}^{t}dt.$$

После интегрирования $\Delta(t)=\dfrac{(\alpha-\beta)\times i_a\times\Delta_0\times e^{(\alpha-\beta)\times i_a\times t}}{(\alpha-\beta)\times i_a+\gamma\times K_t\times\Delta_0\times\left(1-e^{(\alpha-\beta)\times i_a\times t}\right)}$ или после обозначения $\chi=(\alpha-\beta)\times i_a$, $\Delta(t)=\dfrac{\chi\times\Delta_0\times e^{\chi\times t}}{\chi+\gamma\times K_t\times\Delta_0\times\left(1-e^{\chi\times t}\right)}$. (3.39)

Способом наименьших квадратов посредством метода сопряженных градиентов были получены значения коэффициентов в уравнении $\Delta(t)=\dfrac{\chi\times\Delta_0\times e^{\chi\times t}}{\chi+\gamma\times K_t\times\Delta_0\times\left(1-e^{\chi\times t}\right)}$. Результаты справедливы для подготовленной воды Петрозаводской губы Онежского озера, относящейся по классификации А.Г. Камерштейна [51] к группе II. Результаты сведены в таблицу 3.5, на

рисунке 3.19 представлена зависимость изменения коэффициента гидравлического трения во времени для стальных труб.

Таблица 3.5 Модель коррозионного зарастания стальных труб

Материал труб, описание	**Коэффициенты**
«Кипящая» сталь, D = 100 мм, слабоминерализованные коррозионные воды с показателем стабильности до -1.0; воды, содержащие органические вещества и растворенное железо в количестве, меньшем 3 г/м³	$\chi = 0.06, \gamma = 0.005, K_t = 1$
То же, D = 200 мм	$\chi = 0.045, \gamma = 0.002, K_t = 1$
То же, D = 400 мм	$\chi = 0.025, \gamma = 0.00015, K_t = 1$
Трубы чугунные напорные, D = 100 мм, слабоминерализованные коррозионные воды с показателем стабильности до -1.0; воды, содержащие органические вещества и растворенное железо в количестве, меньшем 3 г/м³	$\chi = 0.055, \gamma = 0.004, K_t = 1$
То же, D = 200 мм	$\chi = 0.04, \gamma = 0.0018, K_t = 1$
То же, D = 400 мм	$\chi = 0.022, \gamma = 0.001, K_t = 1$

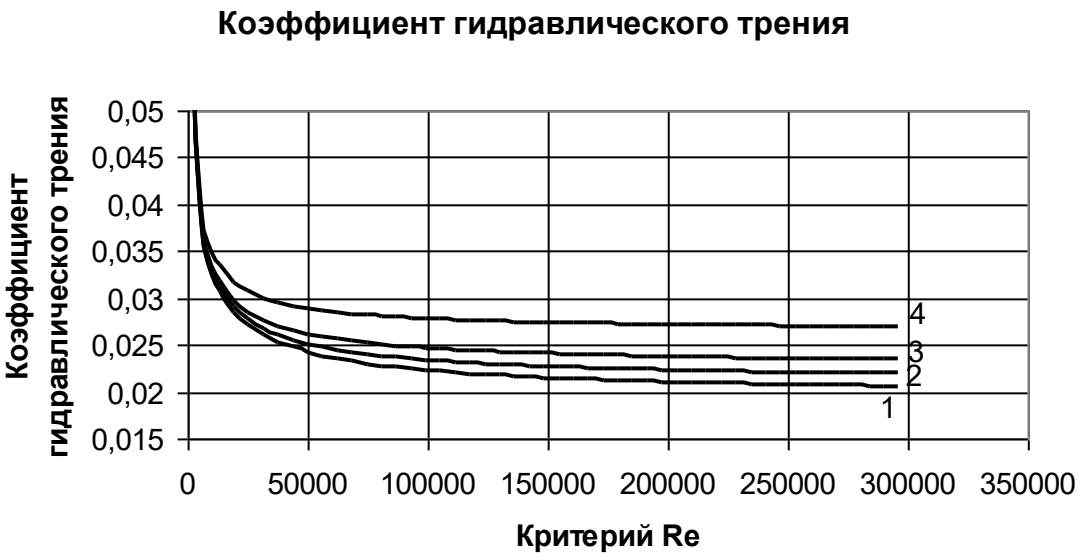


Рис. 3.19 Изменение коэффициента гидравлического трения стальной трубы $D_y = 100(мм)$:

1 – новая, 2 – после 5 лет эксплуатации на водопроводных сетях г. Петрозаводска, 3 – после 10 лет, 4 – после 20 лет

3.5.5 Использование конкурирующих моделей при оценке скорости коррозии

Информация о качестве воды на участках сети (главным образом, данные по концентрации остаточного хлора) может использоваться при оценке скорости внутренней коррозии.

Модуль качества сетевой воды основан на совместной работе гидродинамической модели сети и модели конвективной диффузии и транспорта связных компонентов. Модель конвективной диффузии основана на решении задачи адвекции-дисперсии в одномерном приближении.

Одномерное уравнение адвекции-дисперсии, описывающее закон сохранения массы растворенного или взвешенного материала, имеет вид [77]

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(AD \times \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -A \times K \times C + C_2 \times q\,, \qquad (3.40)$$

где C - концентрация компонента, A - площадь поперечного сечения, D - коэффициент дисперсии, K - линейный коэффициент распада, C_2 -

концентрация притока (оттока), q - боковой приток (отток), x - пространственная координата, t - время.

Уравнение описывает два механизма переноса: адвективный (с осредненным потоком) и дисперсионный перенос, обусловленный наличием градиента концентрации.

Задача решается при следующих допущениях: 1) вещество равномерно распределено по поперечному сечению потока и, в частности, приток немедленно распределяется равномерно по сечению; 2) вещество консервативно или подчиняется закону реакций первого порядка (линейный распад); 3) действует линейный закон диффузии (дисперсионный перенос пропорционален градиенту концентрации).

Коэффициент дисперсии определяется как функция скорости потока $D = f \times \upsilon^d$, где f - фактор дисперсии, υ - скорость потока, d - безразмерный показатель.

Для стационарной модели потокораспределения уравнение адвекции-дисперсии упрощается $\frac{\partial QC}{\partial x} + A \times \frac{\partial^2 CD}{\partial x^2} = -A \times K \times C + C_2 \times q$. В случае использования гидравлических схем, предусматривающих только сосредоточенные узловые отборы, уравнение вырождается в линейное алгебраическое.

Расходы на участках сети определяются на основании результатов работы гидравлического модуля. В качестве известных принимаются длины и диаметры участков, материалы труб, отборы воды в сети, а также результаты отбора проб воды в ряде узлов.

По результатам работы генетического алгоритма определяются дисперсия как функция скорости потока $D = f \times \upsilon^d$, линейный коэффициент распада K, а также концентрации компонентов во всех точках сети наиболее соответствующие набору исходных данных по концентрациям в отдельных узлах.

3.6 Анализ неравномерности водопотребления

При решении задачи функциональной и структурной диагностики СПРВ целесообразно учитывать неопределенный характер узловых отборов, связанный с неравномерностью водопотребления. В этом случае появляется возможность идентифицировать утечки на участках сети и несанкционированные отборы в узлах (превышение норм водопотребления).

Для решения задачи необходимо построить функции принадлежности узловых отборов, учитывающие неравномерность водопотребления. Задача построения нечеткого множества узловых отборов может быть решена разными методами.

3.6.1 Статистическое описание процессов водопотребления

В ряде случаев можно воспользоваться информацией, имеющейся в абонентских отделах организаций, предоставляющих услуги по отпуску воды. При исследовании состояния СПРВ г. Петрозаводска для построения функций принадлежности узловых отборов был использован данный метод.

На начальном этапе был проанализирован характер водопотребления девятиэтажного жилого дома – характерного для района застройки объекта водопотребления. В качестве исходного статистического материала использовались систематически фиксируемые в течение длительного периода показания внутридомовых счетчиков воды.

Базовая статистика приведена на рисунке 3.20. На графике по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат – водопотребление в жилом доме из перерасчета на одного жителя. Очевидно, временной ряд обладает выраженной цикличностью и стационарен.

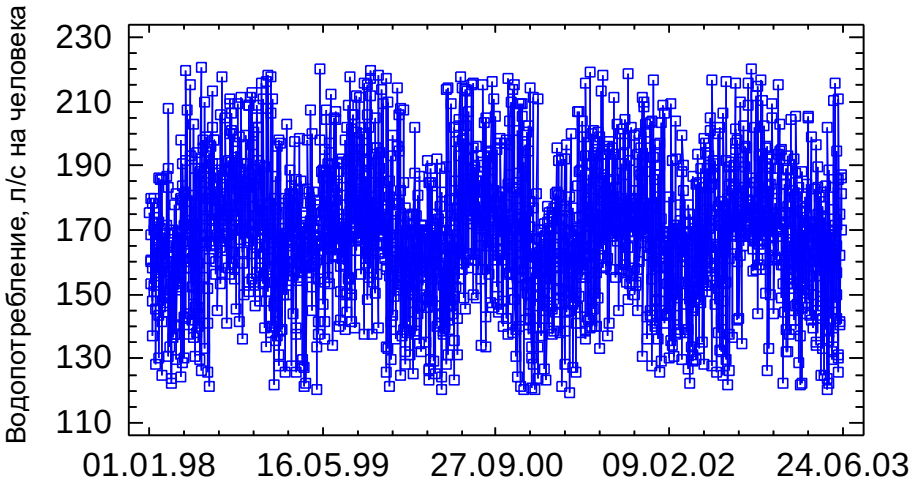


Рис. 3.20 Временной ряд водопотребления девятиэтажного здания, микрорайон Куковка, г. Петрозаводск

Важной характеристикой построенного временного ряда является автокорреляционная функция. Автокорреляция может быть использована при определении регулярности анализируемой переменной. Полученный график автокорреляционной функции хорошо иллюстрирует, что изучаемый временной ряд не является чисто случайной переменной. Его регулярность отчетливо выражается в значительном превышении 95% доверительной границы автокорреляционной функции. Кроме того, график демонстрирует не просто регулярность во временном ряде, а наличие циклической компоненты.

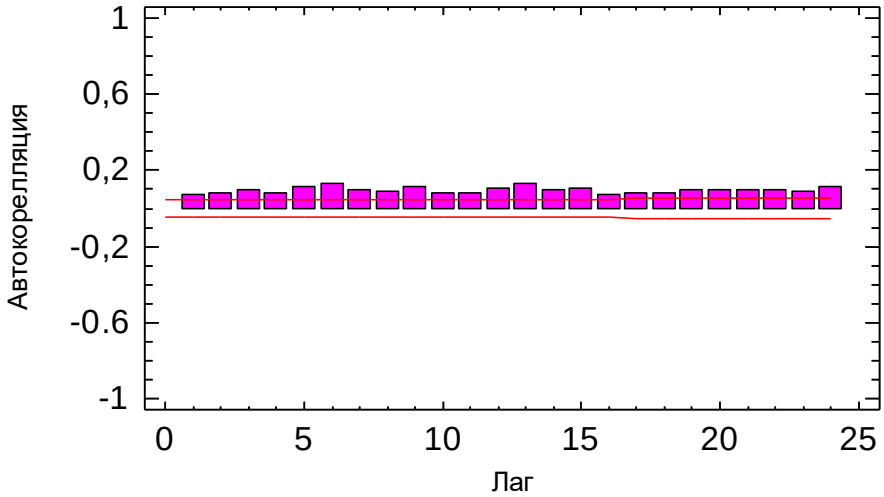


Рис. 3.21 Автокорреляционная функция ряда водопотребления

Испытания временного ряда на регулярности (по медиане, по подъемам и спадам, по сумме квадратов последовательностей чисел) подтверждает наличие определенных закономерностей. Хорошо подобранный параметр сглаживания в процедуре простого скользящего среднего позволяет отчетливо проявить цикличность во временной последовательности.

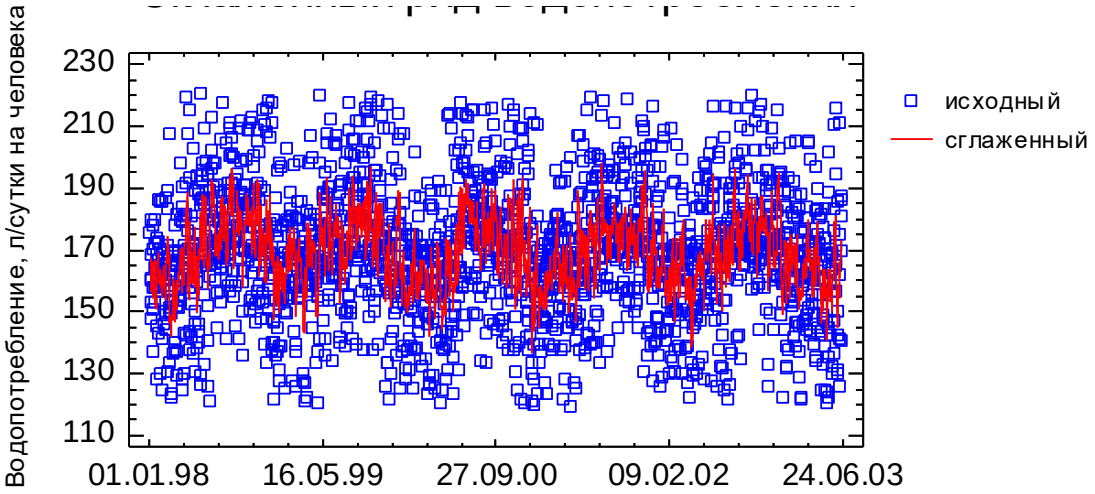


Рис. 3.22 Сглаженный ряд водопотребления

Для более точного определения периодов спада и подъема можно построить периодограмму. На периодограмме наблюдается довольно острый и высокий пик, что свидетельствует о наличии во временной последовательности периодичности. Самой большой ординате периодограммы соответствует временной период 399 дней. В целом можно констатировать существование сезонной компоненты во временном ряду водопотребления. Это означает, что при определении норм водопотребления необходимо учитывать сезонную компоненту.

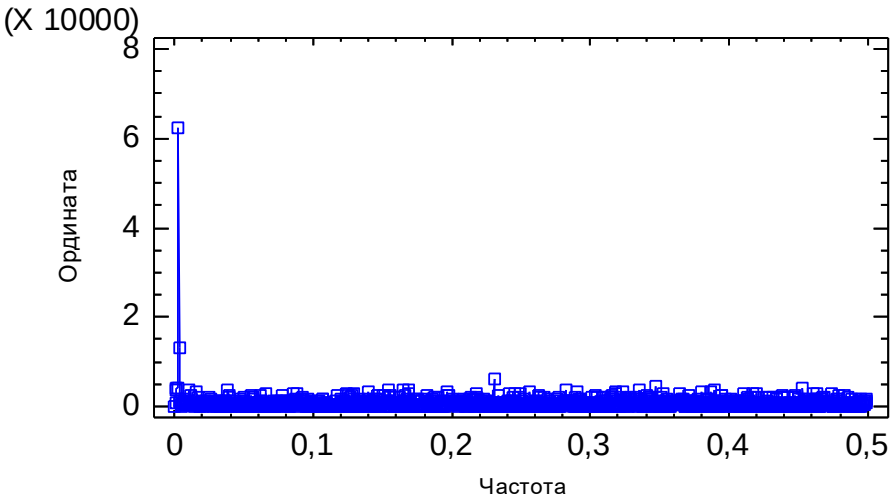


Рис. 3.23 Периодограмма ряда водопотребления

При выборе параметров функции принадлежности узловых отборов важно оценить интервалы изменения последних. Для решения задачи рассматривалась выборка по показаниям внутридомовых счетчиков воды для жилых домов различной степени заселенности для одного и того же временного интервала.

Для выборки строилась модель регрессии, связывающая между собой норму расхода воды, приходящуюся на одного жителя и количество жильцов в жилом доме. Результаты расчетов показывают, что такая корреляционная связь существует. На рисунке 3.24 приведена регрессионная модель водопотребления, построенная на основе данных статистики по району Куковка г. Петрозаводска. Для построения функций принадлежности узловых отборов применялась функция π- класса. В качестве параметров a,b,c использовались математическое ожидание модели, значения соответствующие границам доверительных интервалов для уровней значимости 5% и 10%.

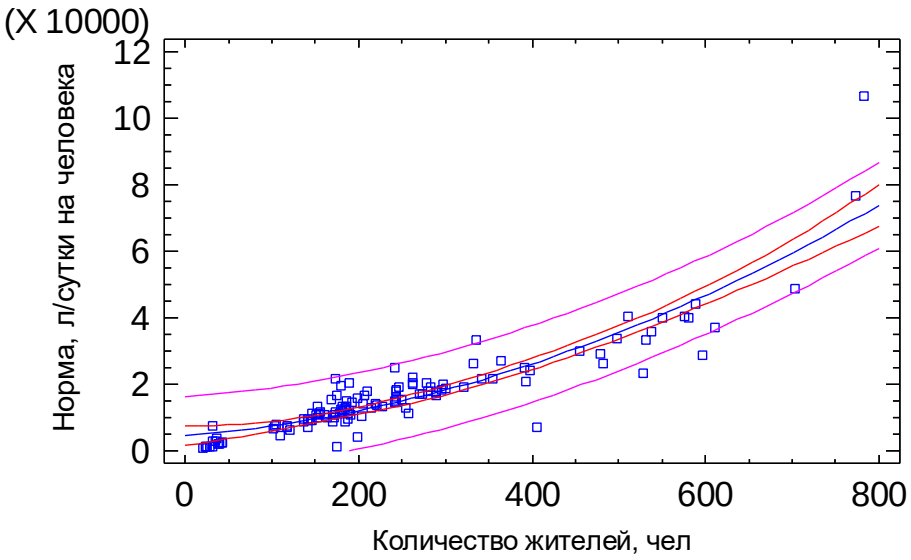


Рис. 3.24 Регрессионная модель водопотребления для построения функции принадлежности узловых отборов

3.6.2 Использование результатов решения обратных задач потокораспределения для изучения процессов водопотребления

Одним из методов исследования фактических объемов водопотребления является анализ решения обратных задач потокораспределения. Возможности метода ограничены проведением оценочных расчетов, позволяющих сравнивать характер отбора воды в различных областях СПРВ.

Точность работы моделей всегда зависит от качества (точности и достоверности) исходных данных. Однако неопределенность и неполнота исходных данных не является основанием для отказа от проведения оценочных расчетов. При решении обратной задачи по определению фактических шероховатостей в качестве массива исходных данных использовались результаты пьезометрических съемок для ряда **различных режимов** функционирования сети, что способствует хорошей обусловленности матриц уравнений задачи. Это позволяет решать задачу в детерминированной (точечной) постановке.

В случае определения фактического водопотребления для характерного режима работы сети **единственной доступной информацией** для анализа является набор фактических распределений давлений в узлах сети для этого режима. При использовании точечного подхода здесь недостоверность

исходных данных может приводить к серьезным ошибкам, поскольку абсолютные значения оцениваемых показателей (узловых отборов) достаточно близки. По этой причине в качестве исходных данных и искомых показателей целесообразно рассматривать нечеткие множества узловых расходов и давлений, а не их точечные оценки. В этом случае сложность решения обратной задачи значительно повышается.

При анализе водопотребления целесообразно выделить фрагмент сети, при работе с которым возможно пренебречь дестабилизирующими факторами: несанкционированными отборами, внутренней коррозией и утечками. Выбор такого фрагмента может свестись на нет из-за невозможности технически точно оценить дестабилизирующие факторы и найти «чистый» в отношении дестабилизирующих факторов фрагмент. С другой стороны, пренебрежение неопределенностью, как указывалось выше, приводит к серьезным ошибкам.

■ В качестве примера рассмотрим подачу воды в элементарном кольце с определенно заданными отборами и неопределенными гидравлическими сопротивлениями участков с тем, чтобы оценить влияние неопределенности на результаты решения задачи. Схема сети приведена на рисунке 3.25.

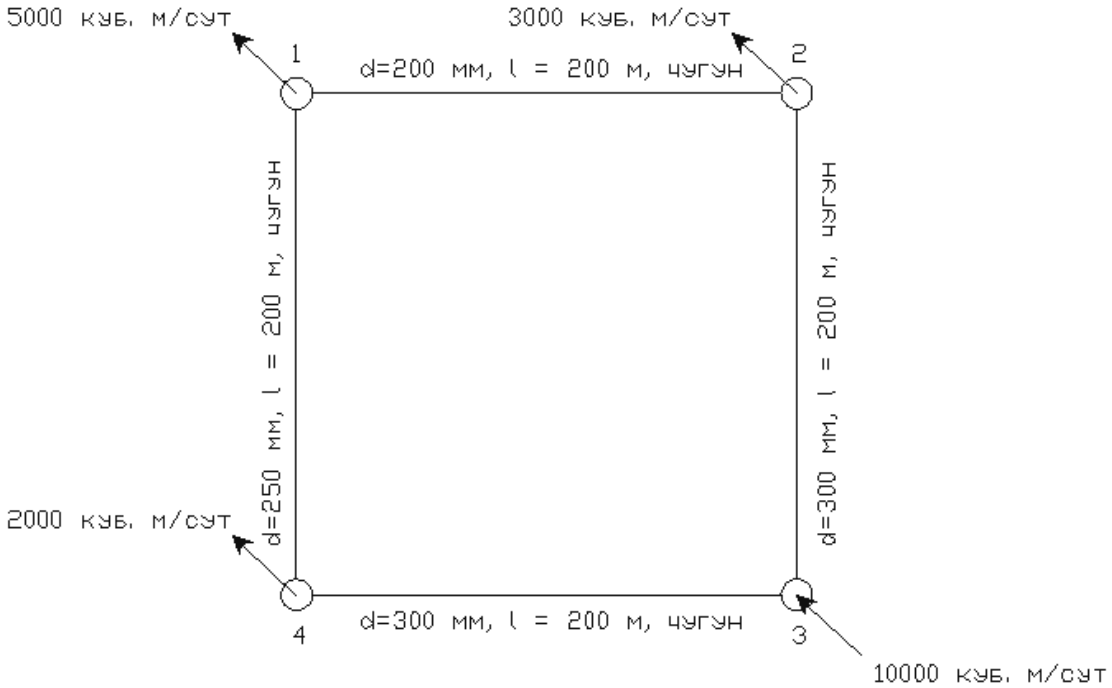


Рис. 3.25 Схема элементарного кольца

Полная система уравнений для поиска потокораспределения для стационарного случая принимает вид

$$\begin{cases} q_{14} + q_{21} = 57.9 \\ q_{34} - q_{41} = 23.1 \\ q_{32} - q_{21} = 34.7 \\ q_{34} + q_{32} = 115.7 \\ f(\overset{\rho}{q})_{\to \min} = s_{34} \times q_{34}{}^2 \times q_{34} + s_{41} \times q_{41}{}^2 \times q_{41} + s_{32} \times q_{32}{}^2 \times q_{32} + s_{21} \times q_{21}{}^2 \times q_{21} \end{cases}, \qquad (3.41)$$

где q - расходы на участке сети, s - удельные сопротивления на участке сети, узловые расходы выражены л/с. В качестве примера будем рассматривать сопротивления, определяемые по формуле А.Д. Альтшуля, с заданной шероховатостью для неновых чугунных труб

$$h = \lambda \times \frac{\upsilon^2 \times l}{2 \times g \times d} = 0.11 \times \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}} \right)^{0.25} \times \frac{16 \times q^2 \times l}{2 \times g \times d^5 \times \pi^2},$$

где λ - коэффициент гидравлического трения, Δ - эквивалентная шероховатость, d - диаметр участка сети, Re - критерий Рейнольдса, υ - скорость на участке сети, l - длина участка сети, а также по формуле Шевелева для чугунных труб, работающих в переходном режиме

$$h = 0.000912 \times \frac{\upsilon^2}{d^{1.3}} \times \left(1 + \frac{0.867}{\upsilon} \right)^{0.3} \times l.$$

Рассмотрим экстремальную задачу, где замыкающие соотношения построены на основе модели А.Д. Альтшуля

$$\begin{cases} q_{21} = 57.9 - q_{14} \\ q_{34} = q_{14} + 23.1 \\ q_{32} = 92.6 - q_{14} \\ f(\overset{\rho}{q})_{\to \min} = s_{34} \times q_{34}{}^2 \times q_{34} + s_{41} \times q_{41}{}^2 \times q_{41} + s_{32} \times q_{32}{}^2 \times q_{32} + s_{21} \times q_{21}{}^2 \times q_{21} \\ s = 0.11 \times \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}} \right)^{0.25} \times \frac{16 \times l}{2 \times g \times d^5 \times \pi^2} \end{cases} \qquad (3.41^*)$$

и аналогичную ей (3.42**), но с замыкающими соотношениями по Ф.А. Шевелеву. Результаты решения представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Задача (3.41*)	**Задача (3.41**)**
$q_{34} = 63.08(л/с)$	$q_{34} = 59.74(л/с)$
$q_{14} = 39.98(л/с)$	$q_{14} = 36.64(л/с)$
$q_{32} = 52.62(л/с)$	$q_{32} = 55.96(л/с)$
$q_{21} = 17.92(л/с)$	$q_{21} = 21.26(л/с)$

Как видно, результаты хотя и незначительно, но различаются. При решении задач высокой размерности различия могут быть значительными. В этих условиях целесообразно оперировать в обратной задаче по определению фактических узловых отборов нечетко заданными сопротивлениями. ■

При решении обратной задачи в нечеткой постановке воспользуемся функциями принадлежности π- класса для описания нечетких отборов и фактических напоров в узлах, сопротивлений на участках сети. Функция принадлежности каждого нечеткого параметра $\mu_2(x,a,b,c)$ СПРВ однозначно определяется тройкой a,b,c. Давления в узлах сети, гидравлические сопротивления на участках и подачи водопитателей считаются известными нечеткими величинами с заданными a,b,c. Обозначим $\mathrm{p}_{\mu}^{\mathrm{real}}$ набор троек a,b,c, описывающий заданные функции принадлежности узловых давлений.

В результате решения обратной задачи должны быть установлены параметры функции принадлежности для нечетких узловых отборов. Для решения задачи воспользуемся введенной в работе [38] операцией увязки сети, для которой можно применить обратный численный метод. Подачи водопитателей будем считать фиксированными (задача гидравлического расчета первого типа) и полностью описывающимися функциями принадлежности.

Если рассматривать координатные функции кольцевых сетей как четкие функции нечетких аргументов, то операция увязки в случае гидравлической задачи первого типа описывается системой уравнений Кирхгофа:

$$\begin{cases} Q \times \overset{\rho}{q} = \overset{\rho}{q}_0 \\ B \times \overset{\rho}{h} = 0 \\ \overset{\varpi}{h} = f(\overset{\rho}{q}) \end{cases} . \qquad (3.42)$$

Операцию увязки можно рассматривать как преобразование узловых отборов в узловые давления. Применяя по отношению к данной операции обратный численный метод в случае нечетко заданных отборов, получаем нечеткие множества узловых отборов.

Пусть $q_{0\mu}$ искомый набор троек a,b,c, описывающий функции принадлежности узловых отборов в каждом из узлов сети. Определенные обратным методом для набора $q_{0\mu}$ функции принадлежности узловых давлений должны соответствовать функциям принадлежности π- класса для набора $\mathrm{p}_{\mu}^{\mathrm{real}}$.

Для оценки соответствия модельного решения натурным данным необходим специальный критерий. В обычной (четкой) математике таким критерием может быть среднеквадратическое отклонение. Однако при оперировании с интервальными и нечеткими величинами тождество $A - A = 0$ не выполняется, следовательно, такой критерий в явном виде использован быть не может.

Для возможности оценки качества решения в нашей работе предлагается сравнивать деффузифицированные нечеткие множества. **Операция деффузификации обращает нечеткое множество в четкое число $\bar{x}$, некоторым образом ему соответствующее.** Известно несколько методов дефуззификации. Из них наиболее распространенными являются метод центра тяжести (center of gravity method, center of area method), в котором $\bar{x} = \dfrac{\int_x x \times \mu(x)dx}{\int_x \mu(x)dx}$, а также метод максимума функции принадлежности $\bar{x} = \max \mu(x)$. Применительно к решению данной задачи целесообразно воспользоваться методом центра тяжести.

В этом случае оценка соответствия нечеткого решения натурным данным δ может быть представлена следующими образом:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{\upsilon}\left(\bar{x}_i^{real} - \bar{x}_i^{model}\right)^2}\ , \qquad (3.43)$$

где $\bar{x}_i^{real}$ - дефуззифицированное нечеткое множество, соответствующие натурным данным для i-го узла, $\bar{x}_i^{model}$ - дефуззифицированное нечеткое множество, соответствующие результатам расчета по модели для i-го узла, υ - количество узлов.

Графическая иллюстрация сравнения двух нечетких множеств приведена на рисунке 3.26.

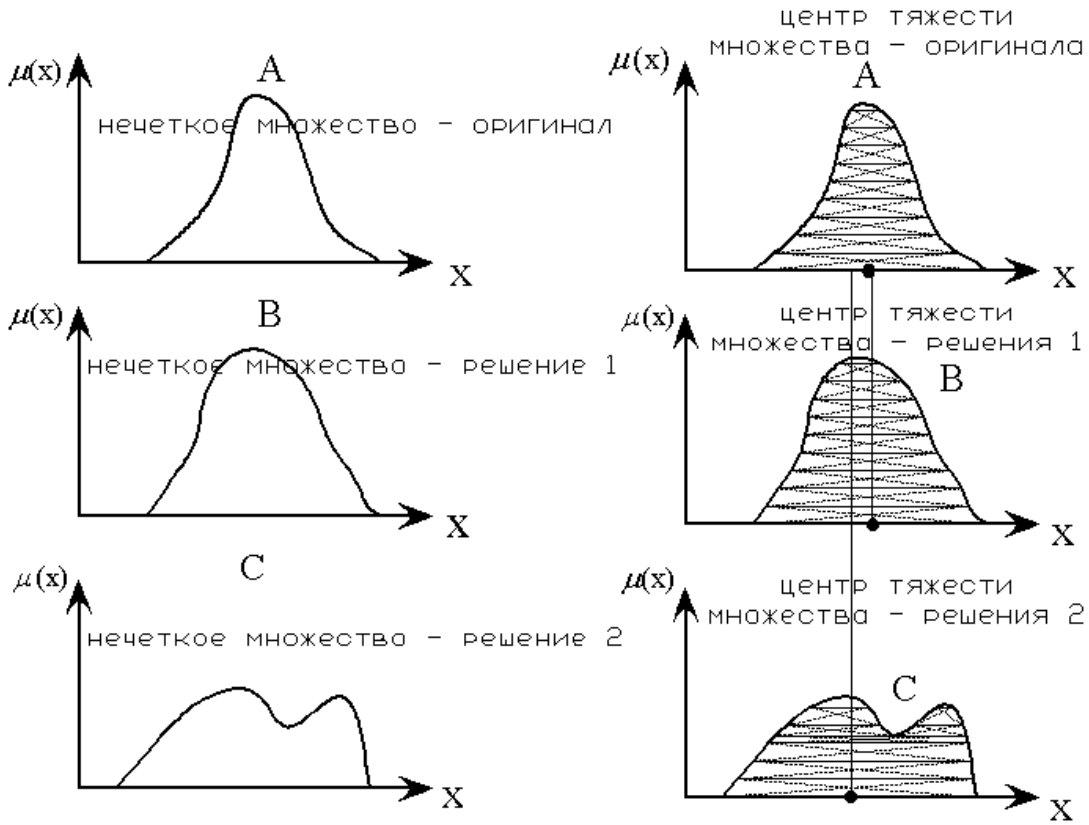


Рис. 3.26 Схема сравнения двух нечетких множеств

При использовании метода центра тяжести здесь более близким к нечеткому множеству - оригиналу принимается нечеткое множество - решение 1.

Для поиска набора $q_{0\mu}$, минимизирующего значения δ, нами предлагается использовать генетические алгоритмы. На первом этапе создается начальная популяция – наборы ожидаемых решений задачи.

Начальная популяция может быть сгенерирована случайным образом: для каждого из возможных решений, образующих набор (популяцию) назначаются $q_{0\mu}$, компоненты которого b,c генерируются случайно в диапазоне установленных норм водопотребления, а компонента a - случайным образом. Настройка (калибровка) генератора случайных чисел осуществляется на пробных прогонах генетического алгоритма.

Для каждого варианта решения из начальной популяции выполняется нечеткий гидравлический расчет по описанной выше методике и определяется значение целевой функции $\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{\upsilon}\left(\bar{x}_i^{real} - \bar{x}_i^{model}\right)^2}$, характеризующей адекватность решения. Все решения, целевая функция которых на данном этапе расчета меньше средней в популяции, исключаются из процесса «эволюции». Новые решения генерируются путем случайной рекомбинации двух вариантов (по одному фрагменту от каждого) решения задачи. Расширение исследуемого пространства решений задачи осуществляется за счет операции мутации: случайного изменения вектора решения. ГА завершает работу по достижению заданного уровня значений целевой функции в популяции.

В результате расчета могут быть произведены оценки фактических норм потребления воды. Расчет по предложенной методике был реализован в разработанном пакете программ. В качестве иллюстрации приводятся результаты расчета для элементарного кольца. Заданными нечеткими величинами являются функции принадлежности узловых давлений, подачи водопитателя и шероховатости участков труб. Неизвестными величинами являются узловые отборы. На рисунке 3.27 показан один из вариантов решения задачи.

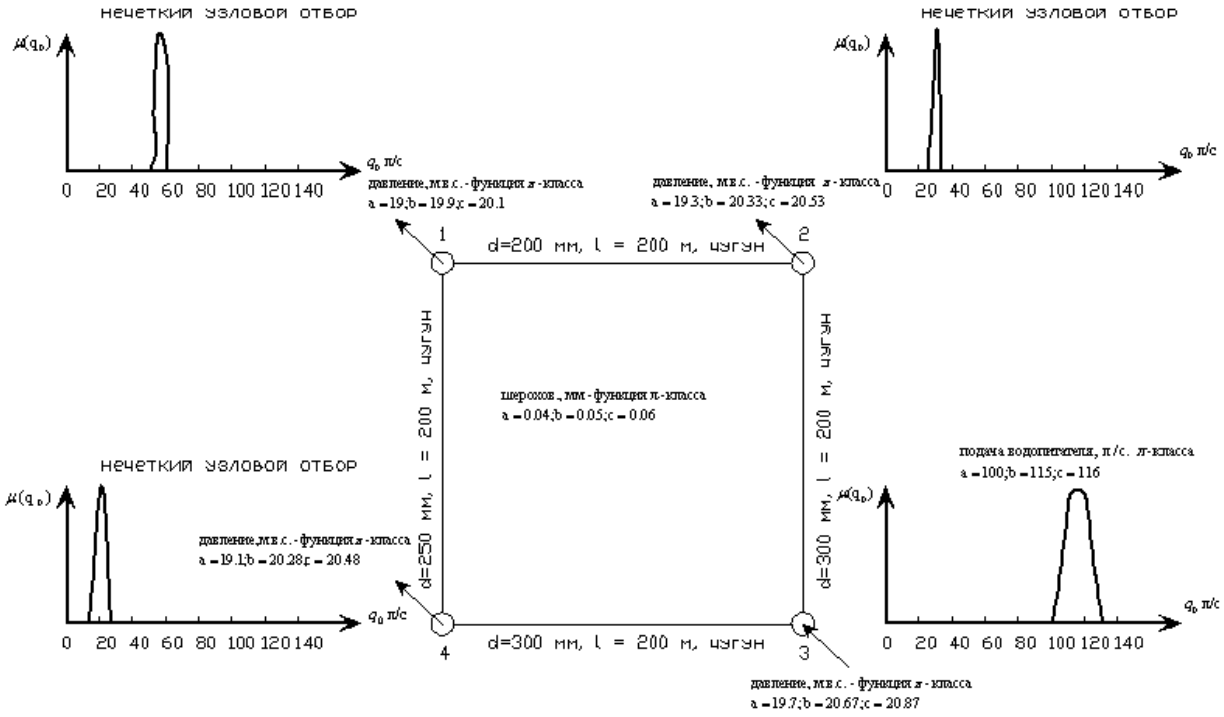


Рис. 3.27 Результат решения задачи для элементарного кольца

3.7 Выводы по главе

Построены модели функционирования СПРВ при работе в условиях функциональных и структурных возмущений, обусловленных утечками и авариями на отдельных участках сети, изменением гидравлических сопротивлений элементов системы, неравномерностью водопотребления:

1. предложены методики для определения функций принадлежности сетевых расходов на основе анализа временных рядов водопотребления и решения обратных задач потокораспределения; моделирования аварийных процессов; определения объемов потерянной воды на сетях вследствие аварийных истечений;
2. исследовано влияние химического состава воды на скорость внутренней коррозии; на основе решения обратных задач потокораспределения была получена зависимость изменения коэффициента гидравлического трения металлических труб, эксплуатирующихся на водопроводных сетях г. Петрозаводска, во времени.

ГЛАВА 4. ЗАДАЧА КОМПЛЕКСНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ И СТРУКТУРНОЙ ДИАГНОСТИКИ СПРВ

4.1 Основные принципы решения задачи

Задача комплексной функциональной и структурной диагностики (идентификации) сводится к поиску некоторого набора решений, характеризующих состояние каждого участка водопроводной сети по каждому из трех дестабилизирующих факторов: утечкам, несанкционированным отборам, коррозионному зарастанию, и при этом удовлетворяющих условиям адекватности. Адекватность решения оценивается некоторой целевой функцией.

Целевая функция при поиске адекватного решения задачи в первом приближении может отражать степень соответствия модельных давлений в узлах сети натурным, или, что то же самое, потерь давления на участках модельной и реальной сетей:

$$f = \sum_{i=1}^{n} \left(h_i^{model} - h_i^{real} \right)^2 , \qquad (4.1)$$

где h_i^{model}, h_i^{real} - модельные и фактические потери напора на i-ом участке сети; n – количество участков.

Очевидно, что в соответствии с критерием пригодности по давлению более адекватно из набора имеющихся решений то, которое минимизирует значение функции (4.1). Проблема заключается в том, что функция пригодности в форме (4.1) может быть использована для достоверного определения только одного типа осложнения (утечки, несанкционированный отбор, коррозионное старение).

Понятно, что целевая функция должна отражать не только степень соответствия расчетных давлений в узлах сети натурным, но и учитывать степень адекватности полученного решения в связи с локальными моделями, описывающими дестабилизирующие процессы. Например, можно получить подходящее решение по давлению, предполагая, что единственным

осложнением является изменение коэффициента гидравлического трения вследствие, например, коррозионного зарастания. Понятно, что для металлических и полимерных труб адекватность подобного решения неравнозначна.

Для того чтобы иметь возможность учитывать соответствие модельного решения набору исходных данных и его внутреннюю непротиворечивость относительно моделей, описывающих дестабилизирующие процессы, требуется ввести еще один параметр A, характеризующий степень адекватности решения по локальным моделям. В этом случае целевая функция может быть представлена в виде $f = A \times \sum_{i=1}^{n} \left(h_i^{model} - h_i^{real} \right)^2$. (4.2)

В пространстве возможных решений задачи следует найти такие, которые минимизируют значение целевой функции. Эти решения будут считаться наиболее адекватными.

4.2 Представление осложнений на участках сети при решении задачи функциональной и структурной диагностики

Задача функциональной и структурной диагностики решается в условиях неопределенности и неполноты исходных данных. Некорректность задачи, неточность эмпирических соотношений, идеализация и упрощение модели потокораспределения не позволяют рассчитывать на высокую точность расчета. По-существу возможности задачи ограничены оценочным приближением. По этой причине для представления степени проявления технологических осложнений на участках сети предлагается использовать специальную порядковую шкалу, позволяющую реализовать факт предпочтения одной ситуации перед другими. Данный подход зарекомендовал себя при решении схожих задач [53], [54].

Каждый участок сети характеризуется тройкой параметров $@c$, $@a$, $@s$, определяющей степень проявления коррозионного зарастания, утечек и несанкционированных отборов соответственно.

Степень коррозионного зарастания $@c$ оценивается по 10-бальной шкале: 0 – соответствует степени шероховатости новых труб для данного типа материала и диаметра, 9 – степень шероховатости данного вида труб после 100 лет эксплуатации (определяются по модели (3.39)). Промежуточные значения определяются посредством линейной интерполяции.

Утечки $@a$ на участке сети оцениваются по 10-бальной шкале: 0 – 5 - соответствуют «фоновым» потерям воды в результате ее инфильтрации в грунт, изменяющимся от $2.5 \div 7\left(\frac{м^3}{сут}\right)$ на км сети, остальные значения 6 – 9 соответствуют значительным аварийным расходам, которые устанавливаются по результатам предварительных расчетов по модели (3.20).

Несанкционированные отборы $@s$ оцениваются долей неоплаченного расхода: 0 – соответствует отсутствию такого отбора, 9 – в случае, когда несанкционированный отбор сопоставим с оплаченным. Промежуточные значения определяются посредством линейной интерполяции.

Соответственно переход от оценки проявления осложнения к его количественной мере осуществляется по формулам вида:

- для коррозионного зарастания $\Delta_{@} = \frac{(\Delta_9 - \Delta_0)}{9} \times @C + \Delta_0$, (4.3)

где Δ_9 - шероховатость, соответствующая степени осложнения равной 9 баллам, Δ_0- шероховатость новых труб, $\Delta_{@}$ - шероховатость, соответствующая степени осложнения равной $@C$;

- для утечек $Q_{accident@} = 0.9 \times @A + 2.5$ при $@A \in [0,5]$, (4.4)

где $Q_{accident@}$ – удельный (на 1 км) расход инфильтрационной воды, соответствующий степени осложнения $@A$. Для $@A > 5$ соотношение определяется по результатам предварительного (до решения задачи диагностики) моделирования работы сетей в условиях аварий. В этом случае

посередине участка устанавливается дополнительный фиктивный узел, в котором имитируется аварийное истечение;

- для несанкционированных отборов $Q_{st@} = \frac{Q_1 + Q_2}{18 \times l} \times @S$, (4.5)

где $Q_{st@}$ - удельный (на единицу длины) несанкционированный расход, соответствующий степени осложнения $@S$; Q_1, Q_2 - нормативные узловые расходы в узлах, которым инцидентен участок, на котором оценивается несанкционированный расход, l - расстояние между этими узлами.

4.3 Математическая постановка задачи

Результатом решения задачи комплексной диагностики является набор троек $@c$, $@a$, $@s$ для каждого i-го участка сети $description_i^{model}$, характеризующий степень проявления осложнений эксплуатации на участках сети, наиболее соответствующих результатам пьезометрической съемки и локальным моделям осложнений. Задача функционально-структурной диагностики может быть представлена следующим образом

$$\begin{cases} y = Y \times \left(\sum\limits_{i \in L^{(h)}} (1 - y_i) \times \left(h_i^{model} - h_i^{real} \right)^2 \right) \to \min\limits_{\Omega} \\ \Omega : \left| \begin{array}{l} q_i^{model} = \sum\limits_{r=\upsilon}^{e} b_{1ri} \times q_r^{model} \left(i = \overline{1, \upsilon - 1} \right) \\ h_r^{model} = -\sum\limits_{i=1}^{\upsilon - 1} b_{1ri} \times h_i^{model} \left(r = \overline{\upsilon, e} \right) \\ h_i^{model} \cong h_i^{model} \left(q_i^{model}, description_i^{model} \right) \left(i = \overline{1, e} \right) \\ y_i \cong y_i \left(description_i^{model}, data \right) \left(i = \overline{1, e} \right) \\ q_i^{model} \geq 0 \left(i \in N \right) \end{array} \right. \end{cases}, \quad (4.6)$$

где N - множество индексов дуг графа сети, представляющих ее стоки; L - множество индексов дуг графа сети, представляющих ее участки (в том числе участки с активными элементами); $E = N \cup L$ - множество индексов всех дуг графа сети; e, υ - количество дуг и узлов графа сети, в графе представления сети первые $\upsilon - 1$ дуг являются ветвями дерева сети, остальные M - хордами;

b_{1ri} - элементы цикломатической подматрицы B_1 ($B = \begin{bmatrix} B_1 \\ I \end{bmatrix}$, I - единичная матрица); q_i, h_i - расход и диссипация энергии на i-ом участке сети; знак $\cong$ обозначает, что величина справа представляет собой результат операций над нечеткими величинами; индекс $real$ относится к наблюдаемым (измеренным) переменным, индекс $model$ – к модельным переменным; $description$ - описание участка в параметрах $@c, @a, @s$; y_i - степень соответствия характеристики состояния i-го участка локальным моделям осложнений; Y- степень соответствия решения локальным моделям осложнений; $data$ - массив информации об элементах сети. Первое соотношение в системе (4.6) характеризует адекватность решения задачи и представляет собой так называемую нечеткую целевую функцию, первая группа уравнений в Ω описывает потокораспределение в сети и замыкающие соотношения, связывающие расходы на участках сети с потерями напора. При решении задачи отборы потребителей моделируются как узловые, «фоновые» утечки и несанкционированные отборы – как распределенные. Потери напора на участках вычисляются для данного $@c, @a, @s$ по формулам (3.39), (3.12) или (3.14). Уравнения $y_i \cong y_i\left(description_i^{model}, data\right)\left(i = \overline{1, e}\right)$ характеризуют внутреннею непротиворечивость решения задачи по i-му участку для принятого $description_i^{model}$.

При определении параметров y_i, Y, учитывающих соответствие принятого решения задачи функциональной и структурной диагностики локальным моделям осложнений и представлениям экспертов о происходящих в системе процессах, в работе предлагается использовать методы нечеткого управления. На базе предложенных в третьей главе монографии моделей могут быть построены различные схемы проверки решения на взаимную непротиворечивость. При разработке программного обеспечения была использована следующая схема.

В пространстве возможных решений задачи (4.6) можно выделить одно, характеризующееся набором *description* в параметрах численных характеристик $@c,@a,@s$ для всех участков сети. Обозначим каждую из численных характеристик для участка сети $@c,@a,@s$, полученную таким образом R_d^1, R_d^2, R_d^3 соответственно. Такие характеристики и переменные в модели СПРВ будем называть сгенерированными. Кроме них будем выделять модельные характеристики R_m^1, R_m^2, R_m^3 полученные расчетом.

Определение модельной характеристики R_m^1**.** Модельное значение шероховатости полимерных труб принимается постоянным и не зависящим от времени, шероховатости металлических труб при известной продолжительности эксплуатации участка t вычисляются по формуле $\Delta(t) = \dfrac{\chi \times \Delta_0 \times e^{\chi \times t}}{\chi + \gamma \times K_t \times \Delta_0 \times \left(1 - e^{\chi \times t}\right)}$. Численная характеристика осложнения R_m^1, полученная расчетом по данной модели, определяется по выражению (4.3).

Определение модельной характеристики R_m^2**.** Численная характеристика осложнения для утечек на участках определяется с учетом индекса I_D, полученного по результатам классификации по дестабилизирующим факторам: $R_m^2 = \dfrac{I_D}{10}$.

Определение модельной характеристики R_m^3**.** Из уравнения $\Delta p = \dfrac{\varphi\left(Q_{end}^2 - Q_{start}^2\right)}{gF^2} + \dfrac{8\lambda\left(Q_{end}^3 - Q_{start}^3\right)}{3q \times g\pi^2 d^5}$ определяется модельная величина удельного расхода, соответствующего несанкционированным отборам. Здесь величина q рассматривается как сумма удельного расхода «фоновых» утечек и несанкционированных отборов, причем удельный расход «фоновых» утечек считается известной величиной, соответствующей принятому значению $@a$, величина Δp принимается равной потерям напора на участке по натурным данным. Численная характеристика осложнения R_m^3, полученная таким образом, определяется по выражению (4.5).

Таким образом, каждому участку можно поставить в соответствие шесть чисел, характеризующих степени проявления технологических осложнений. Три из них R_d^i сгенерированы ГА, три R_m^i получены расчетом по локальным моделям. Близость модельных и сгенерированных характеристик осложнений характеризует адекватность решений задачи функциональной и структурной диагностики. Для формализации учета непротиворечивости решения применяются методы нечеткого управления.

Нечеткое управление – прикладной раздел теории нечетких систем. В основе НУ лежит понятие нечеткого вывода (нечеткой импликации). В отличие от четких логических силлогизмов при нечетком выводе понятие истинности носит нечеткий характер и описывается функцией принадлежности к множеству истинности. Нечеткий вывод строится на основе установленного нечеткого правила. Известно большое число нечетких правил и выбор того или иного в каждом случае носит интуитивный характер. В результате нечеткого вывода формируется нечеткое множество. В результате операции деффузификации удается получить управляющий сигнал (как правило, число от 0 до 1), отражающий степень принадлежности результата некоторому множеству.

Рассмотрим модуль нечеткого управления с лингвистической моделью, описывающейся нечеткими правилами. Часть правил вида ЕСЛИ (x_1 это A_1^k) И (x_2 это A_2^k) …И (x_m это A_m^k) ТОГДА (Z_i это B^k) учитывает представления экспертов об адекватности решений, вторая – взаимную непротиворечивость сгенерированного решения и может быть представлена следующим образом:
ЕСЛИ ($x_{m+1} = R_d^1 - R_m^1$ это число близкое к 0) И ($x_{m+2} = R_d^2 - R_m^2$ это число близкое к 0) … И ($x_n = R_d^3 - R_m^3$ это число близкое к 0) ТОГДА (Z_i это B^k – число близкое к 1),
где R_d, R_m - численные характеристики осложнения на i участке трубопровода, сгенерированные и полученные расчетом по локальным моделям соответственно. Объединяя группы правил нечетким ИЛИ,

получаем результирующее нечеткое множество и его отображение – сигнал y_i, характеризующий непротиворечивость решения для i-го участка.

При нечеткой импликации можно применять различные правила вывода, здесь рассматривается использование правила типа минимум. В этом случае при фуззификации типа синглетон нечеткое множество на выходе блока выработки решения принимает вид, удобный для проведения машинных расчетов $\mu_{B'}(Z_i) = \max\limits_{k=1...N}\left(\min(\mu_{A_1^K}(x_1),...\mu_{A_n^K}(x_n), \mu_{B^k}(Z_i))\right)$,

где k – количество групп правил. Отображение нечеткого множества в управляющий сигнал реализуется через процедуру деффузификации по методу центра тяжести $y_i = \dfrac{\int\limits_{Z_i} Z_i \times \mu_{B'}(Z_i)dZ_i}{\int\limits_{Z_i} \mu_{B'}(Z_i)dZ_i}$. Графическая интерпретация работы блока нечеткого управления на основе минимаксного принципа при оценке решения приведена на рис. 4.1.

В рамках нечеткого подхода целевая функция, отражающая адекватность решения задачи диагностики с учетом соответствия модельных и натурных давлений и непротиворечивости результатов, полученных расчетом по моделям осложнений, примет вид

$$f = \sum_{i=1}^{n}\left(h_i^{model} - h_i^{real}\right)^2 \times \left(1 - y_i\right). \qquad (4.7)$$

Целевая функция дополнена компонентой, характеризующей адекватность решения для всей гидравлической цепи в целом

$$f = Y \times \sum_{i=1}^{n}\left(h_i^{model} - h_i^{real}\right)^2 \times \left(1 - y_i\right). \qquad (4.8)$$

Здесь $\mathrm{Y} = 1 - \prod\limits_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{i}=\upsilon} \mu_{\mathrm{i}}$, где μ_{i}- степень принадлежности сгенерированного узлового отбора множеству характерных узловых отборов для конкретных условий, полученного по методике, изложенной в третьей главе работы.

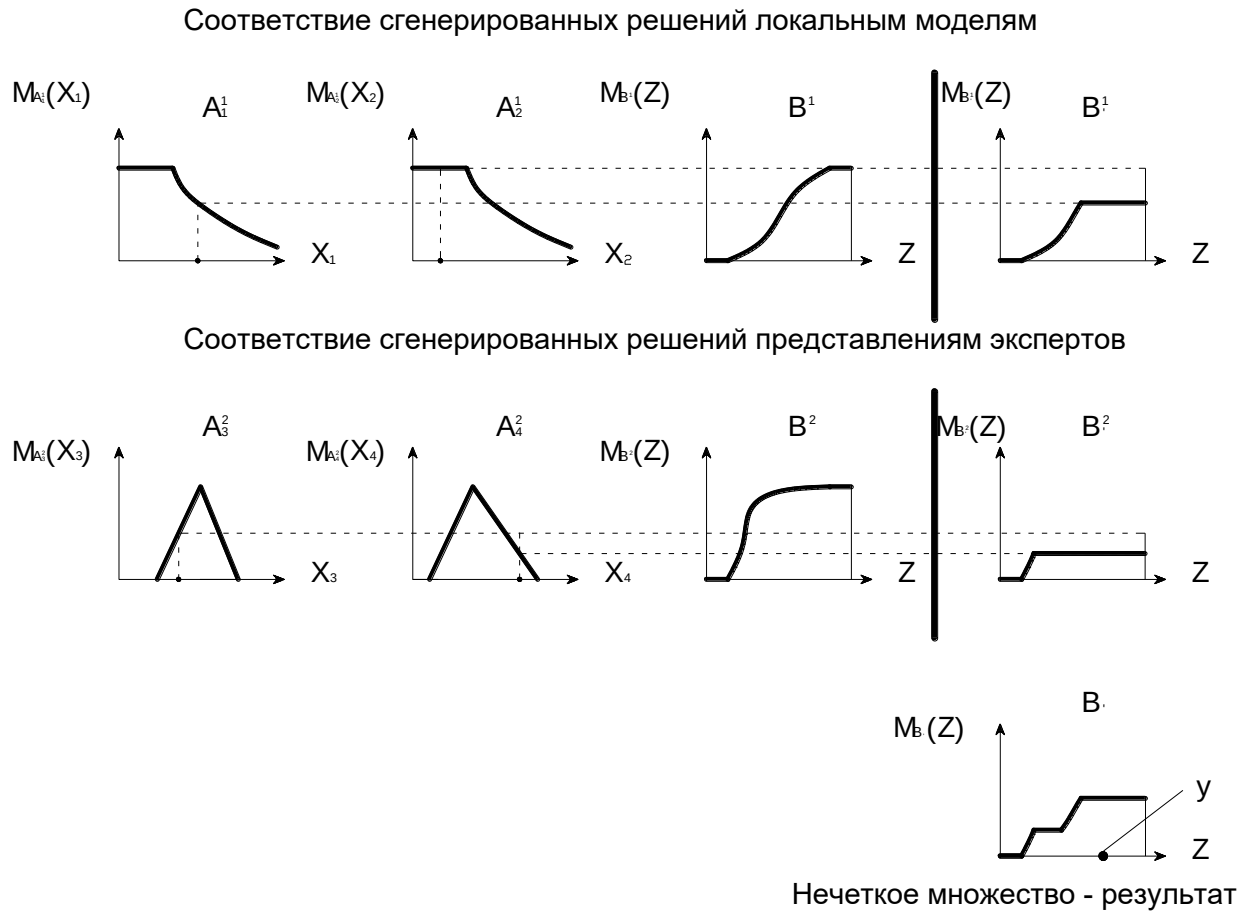


Рис. 4.1 Нечеткое управление при оценке соответствия решения локальным моделям и представлениям экспертов

4.4 Практическая реализация

4.4.1 Описание алгоритма решения задачи функциональной и структурной диагностики

Задача (4.6) в отсутствии нечетких величин может быть сведена к задаче математического программирования при ограничениях в виде равенств и ограниченности снизу ряда переменных.

В общем случае решение задачи (4.6) с помощью классических методов математического программирования [20], [25], [108] невозможно и для ее решения в работе используются генетические алгоритмы.

Решение задачи функциональной и структурной диагностики разбивается на следующие этапы, реализованные в пакете прикладных программ:

1. На основе собранной статистики создаются локальные модели осложнений: а) классификация участков сети по степени принадлежности к множеству ненадежных участков, б) по результатам натурных исследований и решения обратных задач заполняются справочники гидравлических сопротивлений труб, в) на основе анализа водопотребления строятся функции принадлежности узловых расходов, г) на основе имитационного моделирования на сети, подлежащей диагностике, строится модель определения утечек выше «фоновых»;

2. Разрабатывается гидравлическая цепь подлежащего функционально-структурной диагностике фрагмента водопроводной сети. Заполняются базы данных о результатах обследования сети: данные пьезометрических съемок, статистический материал о состоянии отдельных участков водопроводной сети с учетом факторов, указанных на рис. 2.6;

3. Генерируется набор возможных решений задачи (начальный план) диагностики. Каждое из решений характеризуется сгенерированным набором *description* в параметрах численных характеристик $@c, @a, @s$ и целевой функцией, характеризующей адекватность решения; чем больше значение функции, тем меньше сгенерированное модельное решение соответствует натурным данным. Начальный план последовательно улучшается генетическим алгоритмом таким образом, чтобы среднее значение целевой функции в текущем наборе решений было не больше, чем в предыдущем;

4. В результате работы генетического оптимизатора лицу, принимающему решение (ЛПР), предлагаются возможные варианты решения задачи функциональной и структурной диагностики. Выбор наиболее подходящих из них выносится из сферы моделирования и осуществляется ЛПР.

4.4.2 Программная реализация методики «мягкого» моделирования СПРВ

Наиболее эффективное применение разработанных моделей СПРВ для решения различных инженерных задач предполагает наличие их программной реализации. Одним из достоинств разрабатываемого в монографии подхода является возможность полноценного участия ЛПР в оценке результатов, полученных расчетной моделью. На этапе программной реализации разработанных моделей особенно важной и сложной задачей было сохранение этой возможности, иными словами, ставилась задача разработки системы поддержки принятия решений (СППР). Подобная гибкость достигается за счет применения адаптированных к моделированию СПРВ «вычислительных технологий», а также некоторыми особенностями программного обеспечения, разработанного автором.

В системе реализован путь формализации частных задач, при котором последние рассматриваются как подзадачи в одной комплексной математической модели, т.е. осуществлен переход от отдельных математических моделей к системам взаимодействующих моделей, связанных единой технической и информационной базой. Комплексной математической моделью является модель структурной и функциональной диагностики СПРВ, при этом могут представлять ценность и результаты решения отдельных подзадач.

Традиционно в системах подобного рода выделяют вычислительную (моделирующую), информационную и графическую подсистемы [38]. Вычислительная подсистема представляет собой программную реализацию разработанных в монографии моделей, необходимый набор численных методов, а также вспомогательные процедуры для работы с «вычислительными технологиями» - генетическими алгоритмами, нечеткими вычислениями и выводом, нейронными сетями.

Информационная подсистема является необходимой методологической базой для осуществления процесса проектирования в соответствии с

действующими нормативными документами. Гибкость подсистемы обеспечивается за счет повсеместного применения реляционных баз данных для организации справочников оборудования, коммуникаций, характеристики потребителей, параметров расчетных моделей.

Графическая подсистема представляет собой способ диалога между ЛПР и СППР и должна обеспечить возможность ввода исходных данных для генерации модели сети, варьирование внешних и внутренних условий моделирования, вывод результатов в удобной для ЛПР форме.

Информационная подсистема. Источником информации для построения внутренних справочников системы служат информационные базы данных эксплуатационных организаций. Данный подход был апробирован на МУП «Водоканал» г. Петрозаводска. В качестве основного рабочего материала использовались специально расширенные для этой цели формы заявки, оформляемые аварийно – диспетчерской службой г. Петрозаводска для каждого случая аварии на водопроводных сетях (приводится ниже).

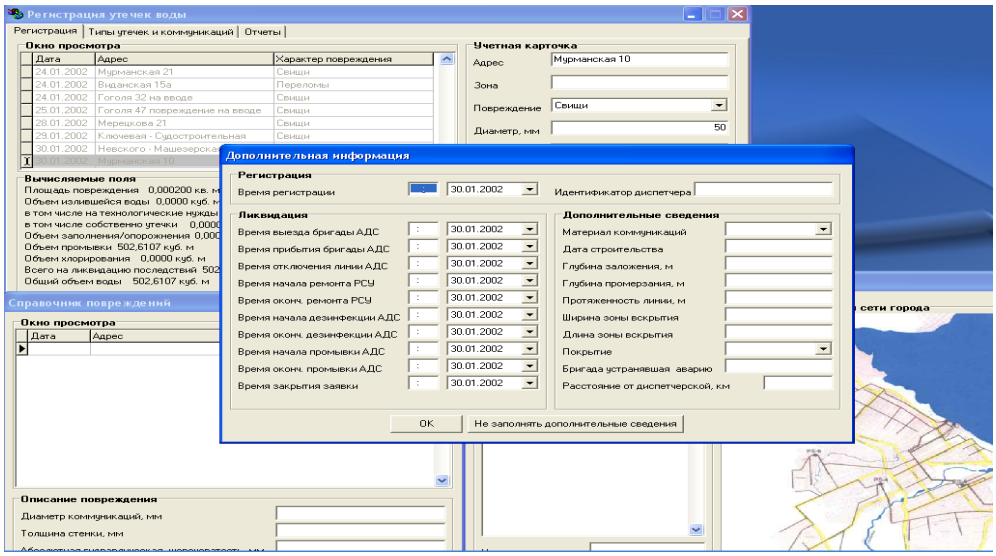


Рис. 4.2 Заполнение формы заявки в ИБД

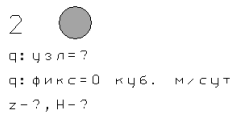
Структура заявки отвечает принятой схеме технологического процесса устранений последствий аварий. Другим важным источником исходной информации для решения диагностических задач являются результаты

натурных пьезометрических съемок. Для хранения статистического материала в системе широко применяются реляционные базы данных.

В ИБД реализован алгоритм вычисления интегральных критериев надежности работы участков водопроводной сети. В основе алгоритма лежит принцип оценки комплекса доминирующего (в качестве которого принят индекс неблагоприятности - интегральная характеристика качественно и количественно определяющая аварийность участка) и дестабилизирующих факторов на основе нейро-нечеткого подхода. Комплекс основного и косвенных факторов определяет интегральную характеристику надежности участка (или участков определенного района) водопроводной сети.

Еще одним источником информации для построения внутренних справочников системы (назначение коэффициентов трения, интервалов норм водопотребления и др.) могут служить результаты решения обратных задач потокораспределения, имитационного моделирования и калибровочных задач.

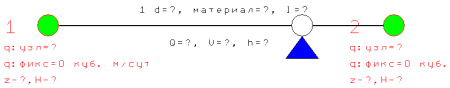
Модельная подсистема. В основе математического моделирования СПРВ находится инструментарий, позволяющий рассматривать инженерную сеть как набор идеальных элементов некоторого виртуального конструктора. Базовый набор включает в себя следующие элементы.



Узел. Существуют два типа узлов: внутренние и внешние. Внешний узел – источник нефиксированного отбора или ввода, внутренний узел – фиксированный отбор или ввод.

Дуга. В представлении графа водопроводной сети участок. Характеризуется неотрицательной протяженностью, диаметром и

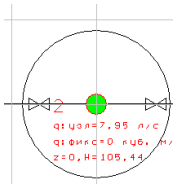
эквивалентной шероховатостью. При необходимости может быть указана связанная с участком зона водопотребления.



Повышающий насос. Не является источником отбора. Характеризуется гидравлическим сопротивлением и статическим напором.

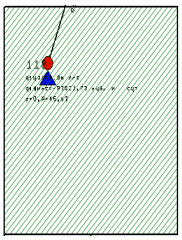
Пояснение

Текстовое пояснение на представлении графа водопроводной сети.



Маркеры колодцев и арматуры. Маркеры колодцев выполняют исключительно декоративную роль. Маркер арматуры, кроме того, характеризуется гидравлическим сопротивлением.

Маркер резервуара. Резервуар моделируется как фиксированный отбор, а сам маркер используется только как атрибут.



Источник нефиксированного отбора (питающие насосы, башни, интеллектуальные потребители) **и маркер нефиксированного отбора.**

Справочники для повышающих установок и источников нефиксированных отборов общие. Источники нефиксированного отбора характеризуются технической характеристикой.

Для решения основной диагностической задачи используются следующие базовые модели и модули, результаты которых могут быть использованы отдельно.

Топологический анализатор позволяет осуществить переход (если это возможно, в противном случае система сообщает об ошибке) от графического представления инженерной сети к ее формальному математическому описанию. Инженерные сети моделируются как сильно связные орграфы. Для поиска независимых циклов в графе сети был разработан специальный алгоритм, позволяющий работать с сетями, содержащими тысячи колец.

Алгоритм предусматривает выделение дерева сети, с последующим формированием списка независимых циклов на основании следующей теоремы.

Основная теорема теории графов (ОТТГ). Если G - граф, то для него будут эквивалентными следующие утверждения.

1. G - свободное дерево;
2. G - связный граф, который при удалении произвольного ребра перестает быть связным;
3. Если V, $\overline{V}$ - различные вершины графа G, то существует единственный простой путь от вершины V к вершине $\overline{V}$.

Кроме того, если граф G – конечен и содержит в точности n > 0 вершин, следующие утверждения также будут эквивалентны утверждениям 1 – 4.

4. G – не содержит циклов и имеет n – 1 ребер;
5. G – связный граф, который имеет n –1 ребер.

Эта теорема позволяет решить ряд задач, связанных с изучением свойств графа водопроводной сети. В частности, относительно несложно выделить циклы, образующие независимую систему. Для этого необходимо найти в графе водопроводной сети свободное поддерево, соединяющее все его вершины. В графе водопроводной сети всегда можно найти свободное поддерево, поскольку эти графы являются связными и согласно пункту 2

ОТТГ, если связный граф G не является свободным деревом, в нем можно удалить ребро и получить граф без потери связности. Этот процесс можно повторять до тех пор, пока не будет построено искомое поддерево. Количество удаленных таким образом дуг графа водопроводной сети соответствует количеству независимых колец; последние легко могут быть определены поиском в глубину на поддереве графа водопроводной сети подграфов с начальной и конечной вершинами, инцидентными одному из удаленных ребер.

Модель потокораспределения основана на совместном решении уравнений Кирхгофа для установившегося движения жидкости в коммуникациях рассматриваемой сети и замыкающих соотношений, связывающих между собой параллельные (давления) и последовательные (расходы) переменные. Это основная задача анализа СПРВ. Известными при решении данной задачи полагаются узловые отборы; диаметры, длины и материалы участков сети. Узловые отборы могут быть заданы точно и неопределенно (стохастически и нечетко), соответственно может быть получен четкий и неопределенный вектор решений. При решении системы Кирхгофа используется покоординатный спуск по последовательным переменным. Выбор основного численного метода продиктован следующими соображениями.

Метод Ньютона, его модификации сходятся значительно быстрее других методов, но требуют большого объема вычислений на каждой итерации. Этот метод всегда приводит к решению рассматриваемой системы уравнений. Скорость его сходимости зависит от начальных приближений, но в меньшей степени, чем у других методов.

Модифицированный метод Ньютона не обеспечивает сходимости решения при произвольных начальных приближениях.

Метод Лобачева-Кросса – самый простой по вычислительной схеме. С другой стороны, математически не обоснован, часто расходится. Дерево сети следует выбирать таким образом, чтобы его ветви принадлежали

минимальному числу циклов и обладали малыми гидравлическими сопротивлениями.

Метод сопряженных градиентов Флетчера-Ривса сходится при произвольных начальных приближениях, по скорости сходимости он занимает промежуточное место между покоординатным спуском и методом Ньютона. По объему занимаемой памяти метод незначительно уступает покоординатному спуску.

Метод Дэвидсона-Пауэлла по скорости сходимости и занимаемому объему памяти приближается к методу Ньютона.

Метод покоординатного спуска сходится при любых начальных приближениях, менее трудоемок по числу элементарных операций в каждом цикле вычислений и требует меньшего объема памяти. По скорости сходимости уступает методу Ньютона.

Частной задачей, которая может быть решена модулем, является задача предварительного потокораспределения, основанная на решении только одной группы уравнений Кирхгофа (тех, которые выражают собой закон сохранения вещества).

Гидравлические сопротивления труб и коммуникаций определяются с учетом эквивалентной шероховатости материалов, степени развития турбулентности в потоке, а также с учетом моделей коррозионного и биологического обрастания.

Генетический оптимизатор представляет собой отдельный модуль системы, позволяющий решать разнообразные идентификационные и оптимизационные задачи. Он оперирует с начальным планом (приближенным решением рассматриваемой задачи), обеспечивая минимизацию целевой функции, которая этому плану соответствует. Модульное построение системы позволяет использовать генетический оптимизатор независимо от других компонентов при решении самых разных задач.

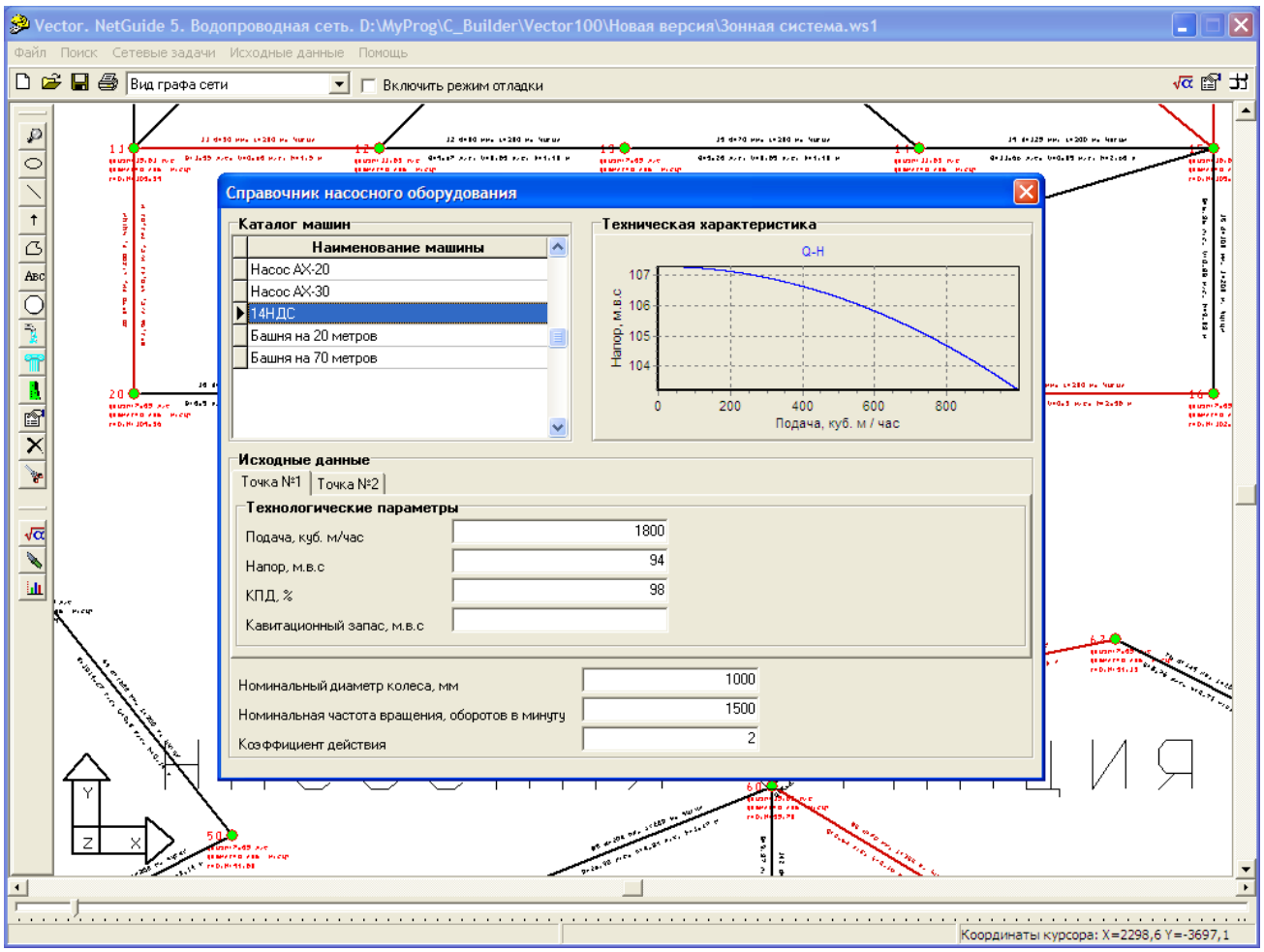


Рис. 4.3 Внутренние справочники системы

Совместное применение генетического оптимизатора и модели потокораспределения позволяет решить задачу оптимального синтеза СПРВ при ее заданной топологии. Неизвестными при решении данной задачи являются диаметры участков трубопроводов. Дополнительно вводится информация, необходимая для построения целевой функции – приведенных затрат на строительство и эксплуатацию СПРВ.

В результате совместного применения моделей потокораспределения и генетического оптимизатора инженер получает некий субоптимальный план отвечающих интервалу допустимых значений целевой функции, из которого может выбрать тот, который отвечает его представлениям оптимальной системы. Таким образом, реализуется основной принцип СППР – симбиоз вычислительного модуля и ЛПР.

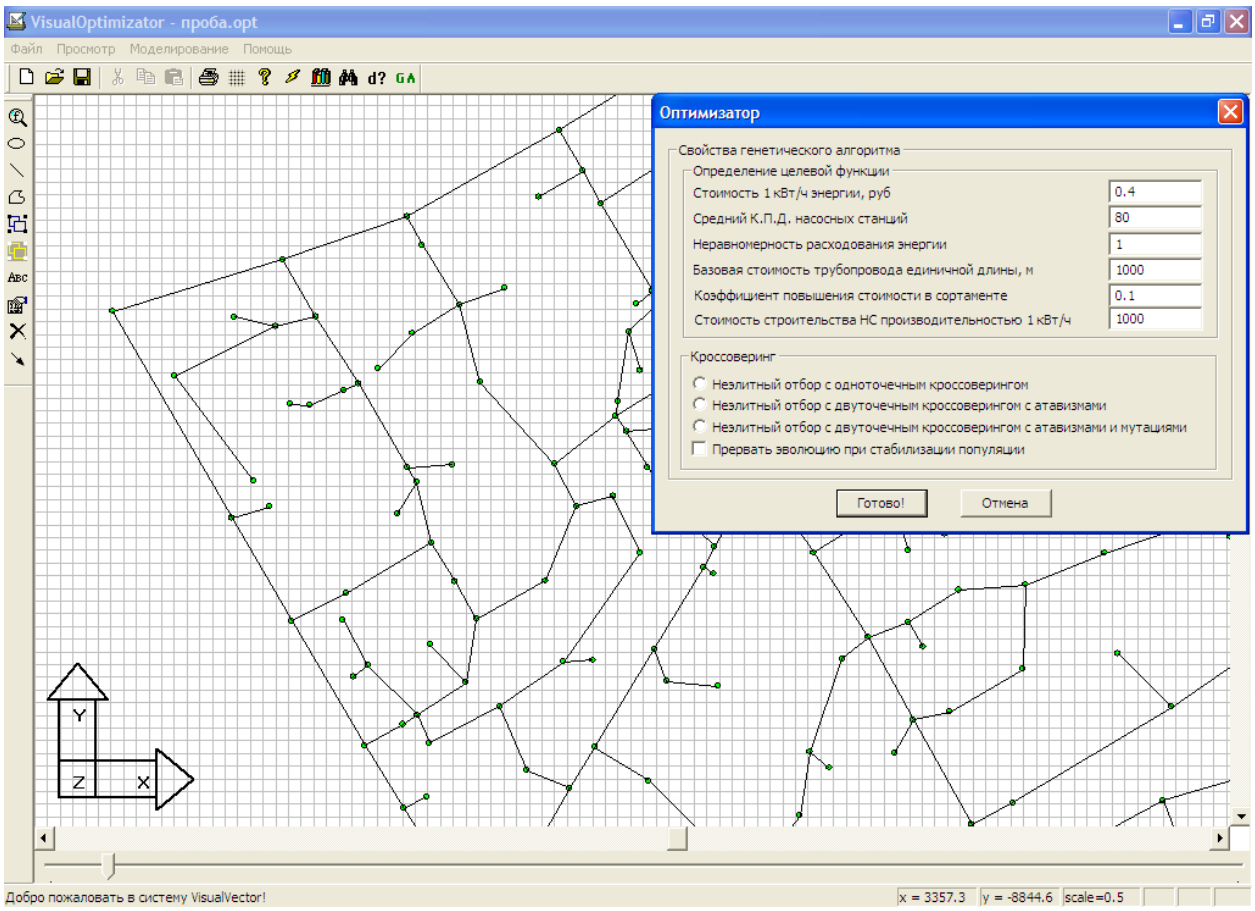


Рис. 4.4 Генетический оптимизатор

Имитационная модель представляет собой набор подпрограмм, реализующих розыгрыш на ЭВМ системы случайных величин с известными законами распределения, которые имитируют параметры или события, происходящие в инженерной сети. Законы распределения случайных величин считаются известными или определяются по результатам статистического анализа данных ИБД.

Модуль нечетких вычислений реализует основные принципы нечетких вычислений и нечеткого вывода для решения задач анализа и обратных задач потокораспределения.

Совместное использование модулей имитационного моделирования (или модуля нечетких вычислений) и модели потокораспределения позволяет решать целый спектр задач, в том числе, определения функций принадлежности параллельных и последовательных переменных, построения моделей аварийного истечения.

При стохастическом расчете сети, результаты которого могут быть использованы, например, для первичной сетевой диагностики, узловые расходы рассматриваются как случайные величины, распределенные по нормальному закону с определенным математическим ожиданием и дисперсией.

В результате решения стохастической задачи можно получить, например, закон распределения параллельной переменной в узлах сети.

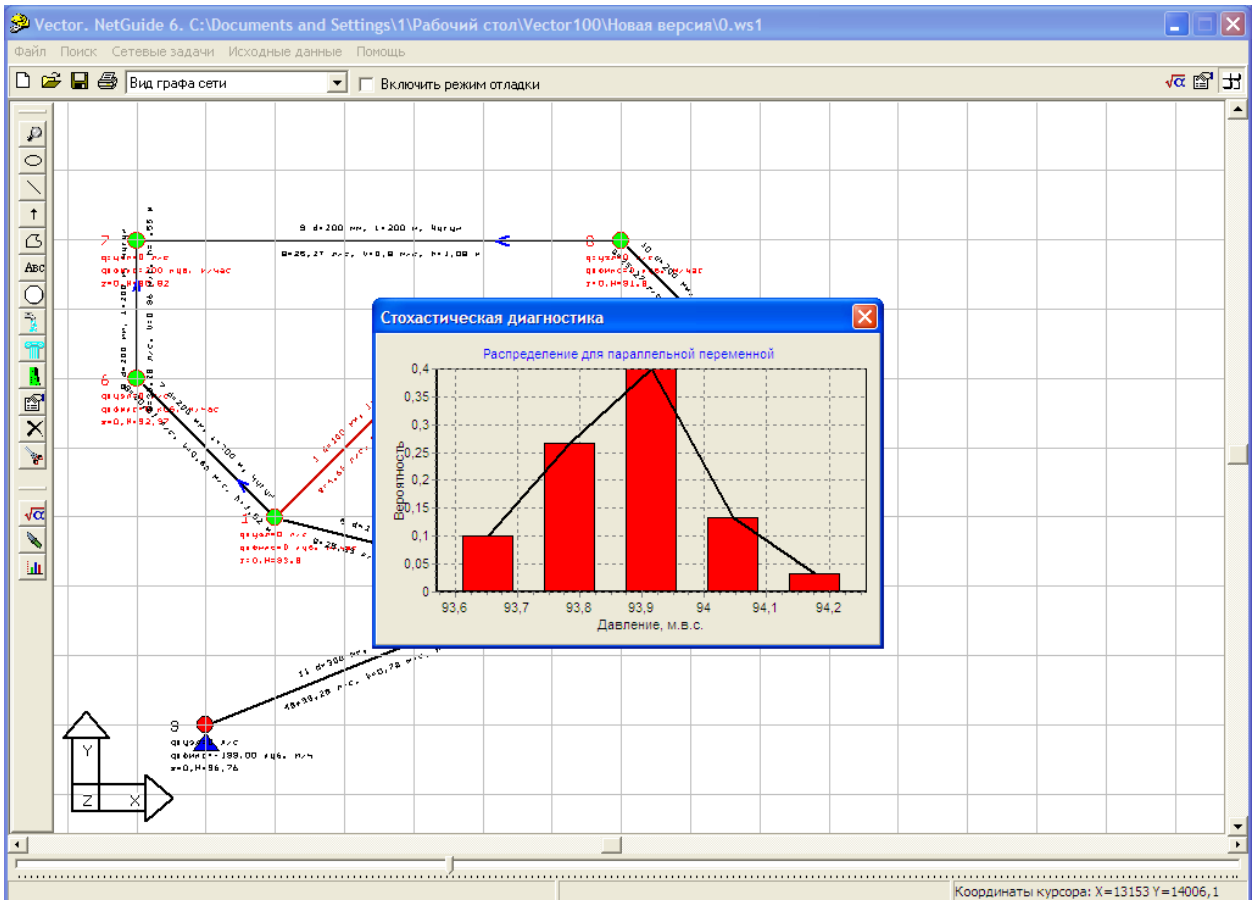


Рис. 4.5 Плотность распределения случайной величины давления в узле сети

На основе указанных моделей была разработана подпрограмма, позволяющая производить гидравлические расчеты водопроводных сетей любой конфигурации и моделировать работу сети в аварийных случаях. При моделировании учитывается целый ряд факторов, в том числе геометрия повреждения, особенности технического состояния трубопроводной системы, свойства грунта. Имеется возможность подключения специальной

корреляционной базы данных, посредством которой обеспечивается учет особенностей работы подлежащей расчету трубопроводной системы.

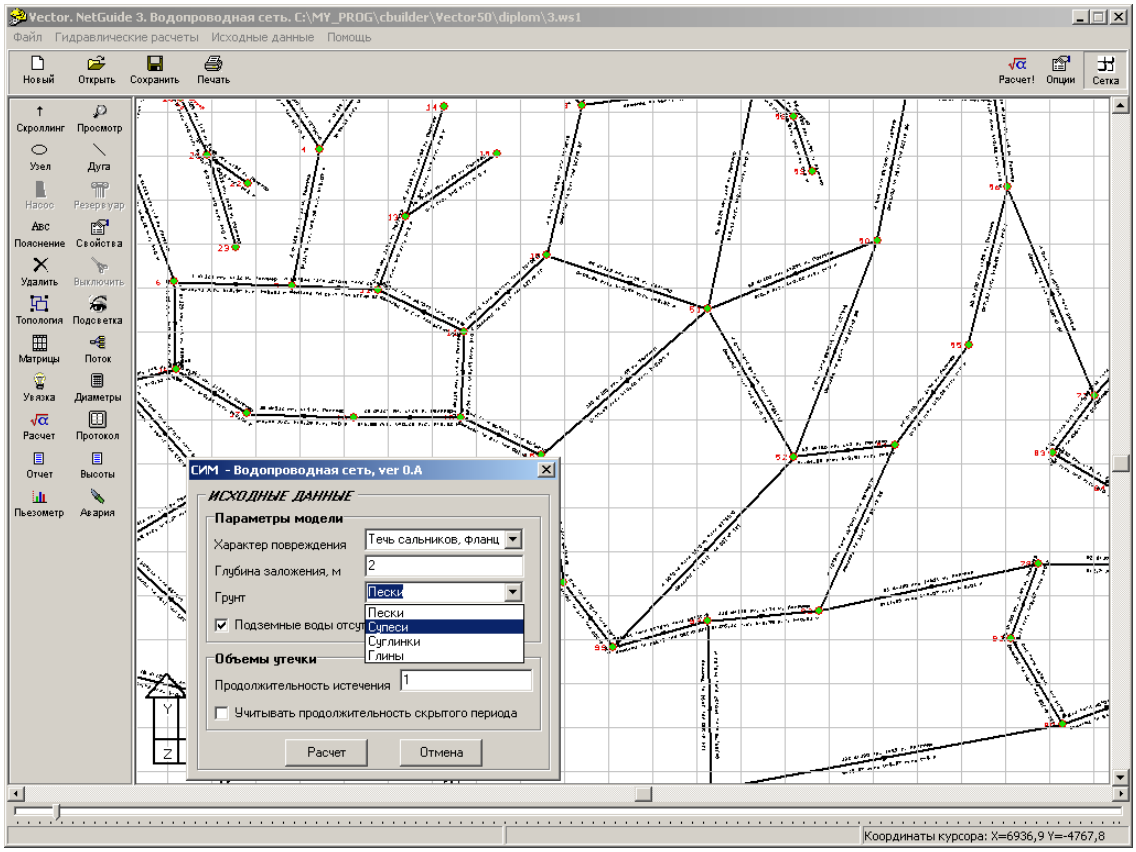


Рис. 4.6 Модуль имитационного моделирования аварийных процессов

Нейронно-сетевой модуль обеспечивает построение моделей трудно формализуемых процессов. В системе он используется, например, при построении модели множества аварийных участков. Имеется возможность оценить влияние одного из факторов на результаты моделирования, пользователю всегда доступна информация об используемой архитектуре нейронной сети.

Совместное использование нейронно-сетевого модуля, модуля нечеткого управления и ИБД позволяет решать задачу об оптимальной стратегии восстановления участков инженерной сети. Результатом решения указанной задачи является построение нечеткого множества аварийных участков и ранжированного ряда, в котором участки сети упорядочиваются по степени принадлежности к этому множеству.

Совместное использование всех указанных выше моделей делает возможным решение задачи комплексной структурно-функциональной диагностики.

В системах поддержки принятия решений (СППР) отношение пользователей и лиц, принимающих решение, к формам своего участия с моделями лежит вне сферы моделирования. Симбиоз «вычислительный комплекс – конечный пользователь» реализуется за счет широкого применения интерактивных средств, визуализации результатов и использования средств самообучения СППР. Решение формируется в результате согласований между компьютерными решениями и выбором инженера. Эффективность использования моделей, используемых в разработанном программном комплексе, определяется согласованным использованием системного неопределенного и точного математических аппаратов.

4.4.3 Экономическая эффективность от внедрения и использования диагностической системы

Для подтверждения важности диагностической оснащенности предприятий, занимающихся эксплуатацией трубопроводных систем в деле энергосбережения и исследования работы структурных подразделений ремонтных служб предприятий ЖКХ, нами была разработана имитационная модель работы этих подразделений.

При моделировании работы ремонтной службы МУП «Водоканал» предполагалось, что существуют два источника поступления заявок на выполнение работ. Один из них связан с отказами оборудования на водопроводной сети, требующими проведения аварийно-восстановительных работ, другой – с планово-предупредительным ремонтом, а также с капитальным ремонтом. Со вторым источником также связываются заявки на выполнение работ, связанных с подключением новых абонентов к водопроводным сетям предприятия.

Процесс устранения аварий на водопроводных сетях и их последствий предлагалось рассматривать нами как технологический.

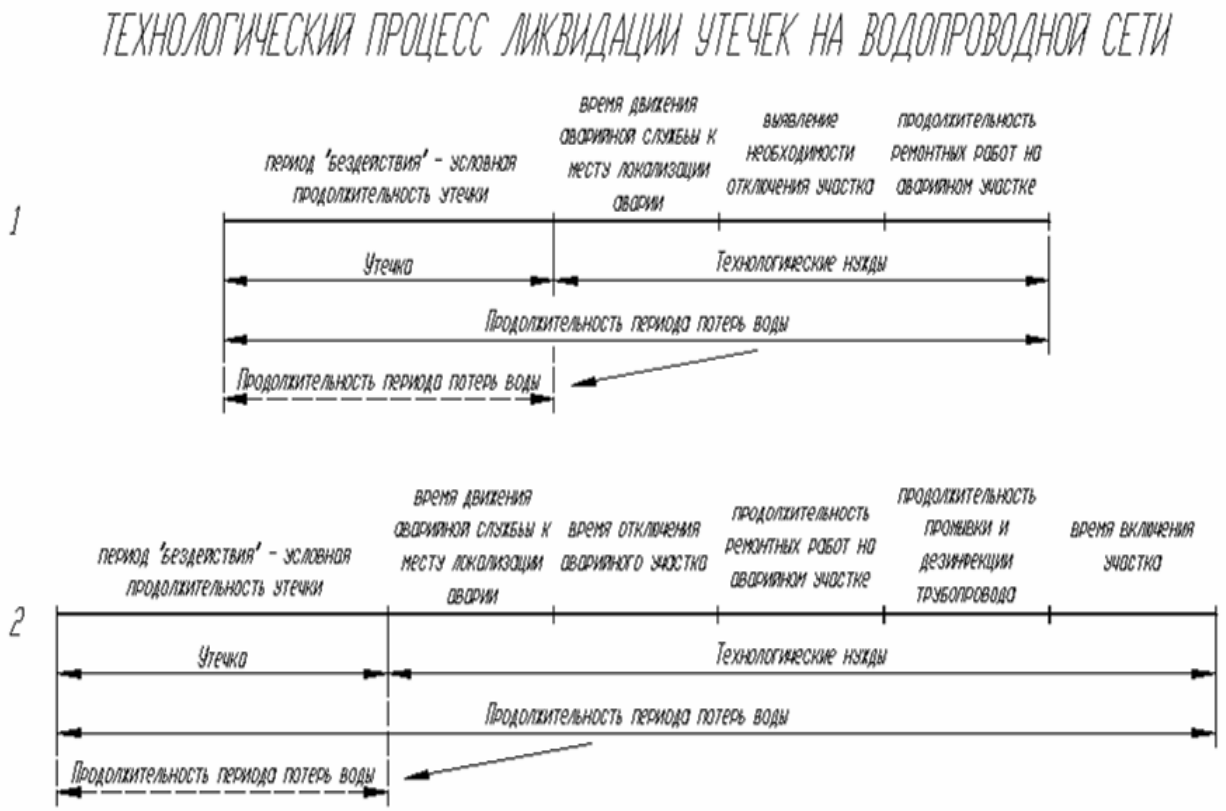


Рис 4.7 Технологический процесс ликвидации утечек на водопроводной сети

Комплексный процесс ликвидации утечек (КПЛУ) на водопроводной сети и их последствий представляет совокупность технологически связанных рабочих процессов, находящихся во взаимной организационной зависимости, а потому поддающийся наблюдению с целью изучения затрат рабочего времени, осуществляемого методами технического учета. При разработке структуры информационной базы данных (ИБД) рассматривались две основные возможности (схемы) осуществления КПЛУ (рис 4.7), в дальнейшем (при эксплуатации ИБД) эти схемы уточнялись, что позволило полностью учесть специфику процесса. Рассмотрение КПЛУ как технологического процесса позволяет, в конечном итоге, поставить знак равенства между продолжительностью утечки и продолжительностью

периода потерь воды, в соответствии с определением этих терминов. Это, вероятно, является достаточно серьезной причиной для того, чтобы учитывать объемы воды, необходимой для устранения последствий аварий на водопроводной сети, в составе норматива забора воды на специальное водопользование.

Для удобства длительность периода устранения аварии может быть представлена следующим образом $T_{ЛИКВ} = T_0 + T_{движ} + T_{откл} + T_{рем}$, (4.9)

где T_0 - продолжительность периода, в течение которого не предпринимаются никакие меры для устранения аварии. Продолжительность этого периода зависит главным образом от масштабов утечки, что позволяет рассматривать функцию зависимости периода T_0 от внешних факторов в виде $T_0 = T_0(l,d)$, где l – протяженность аварийного участка, d – диаметр коммуникаций аварийного участка.

$T_{движ}$ - время движения аварийной службы к месту локализации аварии. Можно считать, что $T_{движ} = T_{движ}(R)$, где R – расстояние от диспетчерской аварийной службы до аварийного участка.

$T_{откл}$ - время отключения аварийного участка, $T_{откл} = T_{откл}(l,d)$.

$T_{рем}$ - продолжительность ремонтных работ на аварийном участке, $T_{рем} = T_{рем}(d,H,h)$, где H – глубина заложения трубопроводов на аварийном участке, h – глубина промерзания. Величина $T_{рем}$ включает в себя также и время, необходимое для проведения дезинфекции, промывки участка и его включения.

Несмотря на то, что в ИБД предусмотрены поля для соответствующих временных периодов, дополнительное дробление $T_{рем}$ здесь не оправдано по следующим причинам. Во-первых, зачастую отсутствуют достоверные данные о продолжительности периодов промывки и дезинфекции участка после ликвидации последствий аварии (если они вообще проводились), во-

вторых, эти технологические операции не определяют границы периодов устранения последствий аварии и собственно утечки.

Периодичность поступления заявок из обоих источников определялась из анализа соответствующих записей в ИБД аварийно-диспетчерской службы МУП «Водоканал» г. Петрозаводска.

Было установлено, что заявки, связанные с необходимостью осуществления ППР, поступают с периодичностью 72 ± 36 часа. Поток поступлений заявок на АВР для удобства рассматривается как простейший (число аварий на интервале времени хорошо аппроксимируется распределением Пуассона) с интенсивностью отказов (λ) $0.027(час^{-1})$, интенсивность восстановления составляет (μ) $0.035(час^{-1})$.

Что касается времени проведения ППР, то оно также определялось исходя из анализа записей в архивах аварийно-диспетчерской службы (в данном случае оно составило 240 ± 216). Не составляет большой сложности и аппроксимация распределений временных интервалов в соответствии с принятой нами схемой технологического процесса устранения аварий. При анализе работы структурных уровней ремонтных служб предприятия этих параметров достаточно.

В том случае, если требуется оценить объемы потерянной воды (утечки на наружных сетях), требуется изучение еще одного временного интервала – **скрытого периода утечки**. При имитационном моделировании процессов аварийного истечения точность определения этого временного интервала оказывает наибольшее влияние на адекватность модели.

Существуют методы приближенной оценки изменения уровня грунтовых вод во времени t при равномерных по длине утечках воды. Они могут быть использованы для определения продолжительности скрытых утечек. Однако все они в качестве известной величины принимают величину этой утечки q, что осложняет их использование при решении практических задач.

Для однородного и неограниченного пласта, например, получена формула вида [117]

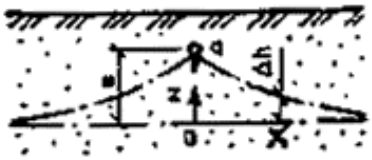


Рис 4.8 Схема однородного и неограниченного пласта

$$\Delta h = \frac{q\gamma}{2\pi k_z} \ln\left[1 + \left(\frac{k_z t}{n\gamma x}\right)^2\right],$$

где k_z - коэффициент фильтрации водоносных пород, n - недостаток насыщения, γ - параметр, характеризующий неравномерность фильтрующих свойств водоносных пород по сечению.

Весьма часто в результате аварийных утечек воды из водонесущих коммуникаций, водопроводящих каналов или водосодержащих емкостей поверхность грунтовых вод принимает куполообразный характер (см. рисунок 4.9), причем эти купола формируются сравнительно быстро.

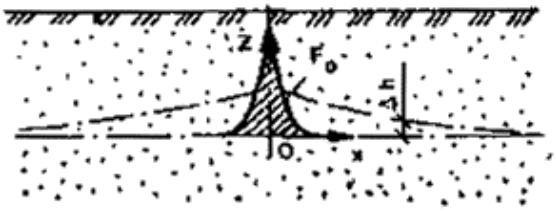


Рис 4.9 Схема образования купола утечки

При ликвидации аварий, устранении или существенном уменьшении утечек эти купола начинают растекаться в стороны, причем в пределах купола уровни грунтовых вод снижаются, однако на прилегающей территории они повышаются.

В работе [117] отмечается, что купола, как правило, имеют близкую к прямоугольной форму (в направлении трубопровода), степень этой близости

определяется в основном неоднородностью грунта. Этот факт особенно важен при гидравлическом расчете системы водовод – грунт – поверхность в случае утечек из водовода.

Исходя из анализа немногочисленных данных и публикаций ряда авторов, следует, что распределение продолжительности скрытого периода подчиняется нормальному закону с параметрами, зависящими только от масштабов утечки. Однако точно установить эти параметры затруднительно. Поэтому при построении имитации в качестве интервала скрытой утечки использовалось ее минимально возможное значение.

Для оценки минимально возможной продолжительности скрытой утечки можно рассмотреть весьма условную задачу о просачивания сетевой воды на поверхность. Качественные исследования [18], [117] указывают на то, что в процессе инфильтрации воды из трубопроводов в его окрестностях образуется каверна. При незначительной инфильтрации из трубопровода имеет место безнапорная фильтрация воды из каверны в грунт ниже отметок трубопровода. При превышении инфильтрационного расхода, равного $q = k \times D \times k_1$,

где k - коэффициент фильтрации грунта, $D \times k_1$ - ширина каверны, функционально связанная с конструктивными размерами трубопровода D, образуется «аварийный купол».

Размеры и очертания купола зависят от большого количества факторов. На движение инфильтрационной воды в грунте влияют следующие факторы: боковое растекание воды, неполное водонасыщение порового пространства, изменение расчетного градиента ввиду недоучета слоистости и капиллярных эффектов, диффузионные эффекты, несоответствие напряженного состояния пород прогнозным условиям.

Оценим продолжительность минимального периода просачивания жидкости на поверхность земли (см. рисунок 4.10).

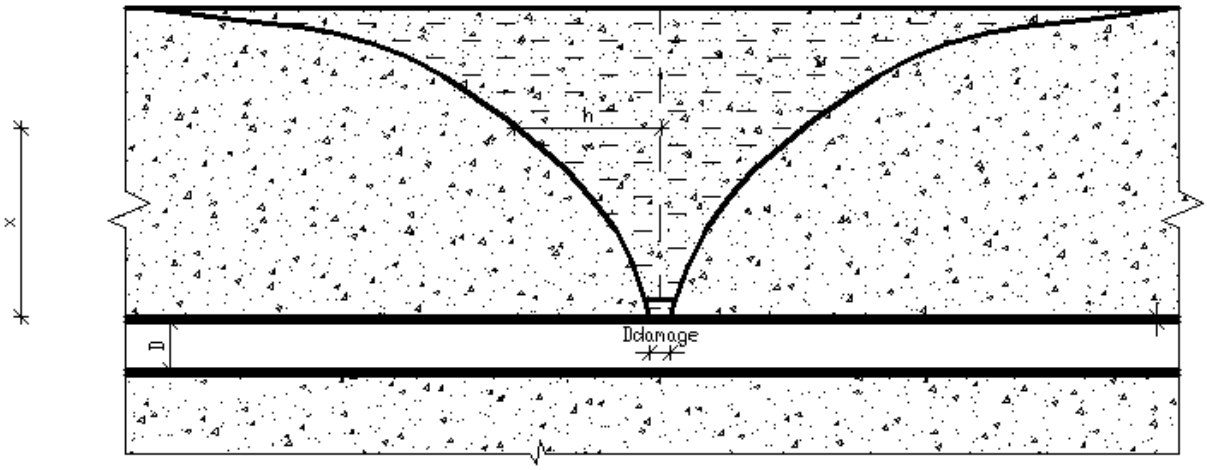


Рис 4.10 Схема к определению минимально возможной продолжительности скрытого периода утечки

Минимально возможная продолжительность скрытого периода утечки определялась исходя из следующих предпосылок:

1) скорость движения воды υ в каждом слое грунта - постоянная величина и подчиняется закону Дарси в виде $i = \frac{\upsilon}{k} + \left(\frac{\upsilon}{k_m}\right)^2$,

где i - гидравлический уклон, k - коэффициент ламинарной фильтрации, k_m - коэффициент турбулентной фильтрации.

2) элементарный слой грунта рассматривается как приведенный к однородному сыпучему пористому материалу с гидравлическим радиусом $R = \frac{n \times d}{6 \times k_ф \times (1-n)}$,

где d - диаметр шара, равновеликого зерну сыпучего материала, $k_ф$ - коэффициент формы: отношение поверхности зерна к поверхности шара диаметром d: $1 < k_ф < 1.05$. Для неоднородного сыпучего материала $\frac{1}{d} = \sum_{i=1}^{m} \frac{\gamma_i}{d_i}$, где γ_i - доля материала с зернами d_i.

3) В некоторый момент времени t_{sh} вода достигает поверхности земли, распределение объема истечения в грунте V ($F(x)$ - живые сечения) в этот момент времени фиксируется и подлежит определению. Продолжительность движения потока жидкости от области повреждения до поверхности земли в указанном объеме рассматривается как оценка минимальной продолжительности периода скрытой утечки t_{sh}.

Таким образом, $t_{sh} = \int_0^z \frac{dx}{\upsilon} = \int_0^z \frac{Fdx}{Q} = \int_0^z \frac{\pi \times h^2}{Q} dx \to \min$ (4.10)

при ограничении на диссипацию энергии в толще грунта H и малой скорости фильтрации $H = \int_0^z \frac{\upsilon}{k} dx = \int_0^z \frac{Q}{\pi \times h^2} \times (a + b \times x) dx$, (4.11)

где a,b учитывают фильтрационные свойства слоя грунта.

Уравнение Эйлера для функционала принимает вид $F_h + \lambda \times G_h = 0$, (4.12)

где $F = \frac{\pi \times h^2}{Q}$, $G = \frac{Q}{\pi \times h^2} \times (a + b \times x)$.

$$\frac{2 \times \pi \times h}{Q} - 2 \times \frac{\lambda \times Q \times (a + b \times x)}{\pi \times h^3} = 0. \quad (4.13)$$

Из последнего соотношения следует, что

$$h = \frac{\sqrt[0.25]{\lambda \times Q^2 \times \pi^2 \times a + \lambda \times Q^2 \times \pi^2 \times b \times x}}{\pi}. \quad (4.14)$$

Подставляя в (4.11), получаем $H = \int_0^z \frac{Q \times \pi \times (a + b \times x)}{\sqrt{\lambda \times Q^2 \times \pi^2 \times a + \lambda \times Q^2 \times \pi^2 \times b \times x}} dx$. (4.15)

Разлагая (4.15) в ряд, имеем

$$\frac{(Q^2 \times \lambda \times \pi^2 \times a)^{3/2}}{a \times Q^3 \times \lambda^2 \times \pi^3} \times z + \frac{1}{4} \frac{(Q^2 \times \lambda \times \pi^2 \times a)^{3/2} \times b \times z^2}{a^2 \times Q^3 \times \lambda^2 \times \pi^3} \to$$
$$\to -\frac{1}{24} \frac{(Q^2 \times \lambda \times \pi^2 \times a)^{3/2} \times b^2 \times z^3}{a^3 \times Q^3 \times \lambda^2 \times \pi^3} + \frac{1}{64} \frac{(Q^2 \times \lambda \times \pi^2 \times a)^{3/2} \times b^3 \times z^4}{a^4 \times Q^3 \times \lambda^2 \times \pi^3} = H. \quad (4.16)$$

Из уравнения (4.16) можно определить область корректных значений параметров a,b, при которых задача в данной постановке имеет решения, и выразить неопределенный множитель

$$\lambda = \frac{1}{36864} \frac{z^2 \times \left(48 \times a^2 \times b \times z - 8 \times a \times b^2 \times z^2 + 3 \times b^3 \times z^3 + 192 \times a^3\right)^2}{H^2 \times a^5}. \quad (4.17)$$

Подставляя выражение для λ из (4.17) в (4.14), получаем уравнение объема истечения

$$h = \frac{1}{24} \times \frac{\sqrt{3} \times \left(\frac{Q^2 \times z^2 \times \left(48 \times a^2 \times b \times z - 8 \times a \times b^2 \times z + 3 \times b^3 \times z^3 + 192 \times a^3\right)^2 \times (a + b \times x)}{H^2 \times a^5} \right)^{0.25}}{\pi}. \quad (4.18)$$

Подставляя (4.18) в (4.10), можно получить оценку для времени минимальной продолжительности скрытого периода утечки.

Объем потерянной воды определялся, исходя из результатов натурных экспериментов, проведенных нами на МУП «Водоканал» г. Петрозаводска. При истечении в атмосферу расход определялся исходя из модели тройника - «аварийного элемента», в случае истечения в грунт потери напора в повреждении определялись, исходя из совместного решения задачи о фильтрации воды в грунте и зависимостью $q_{accident} = f_5(\mathrm{Re}_D, \frac{d}{D}, We, \frac{L}{D}) \times \sqrt{2gH}$ (см. главу 3). Для изучения этой функциональной зависимости нами на базе МУП «Водоканал» г. Петрозаводска были произведены специальные эксперименты, целью которых было изучение функции $\mu = f_5(\mathrm{Re}_D, \frac{d}{D}, We, \frac{L}{D})$.

Структурная схема предлагаемой имитационной модели приведена ниже на рисунке 4.11. Для реализации имитации использовалась система GPSS – общепризнанный инструмент для решения подобных задач [82]. Для оценки степени адекватности решений, полученных с помощью GPSS, их можно верифицировать с оценками, полученными теоретически. Несмотря на то, что точных аналитических методов для расчета многоканальных немарковских систем массового обслуживания не существует, представленная модель с отключенной веткой ППР эквивалентна системе с ожиданием M|M|m|∞. В данном случае общий поток обслуживания близок к простейшему, поскольку можно считать m достаточно большим числом.

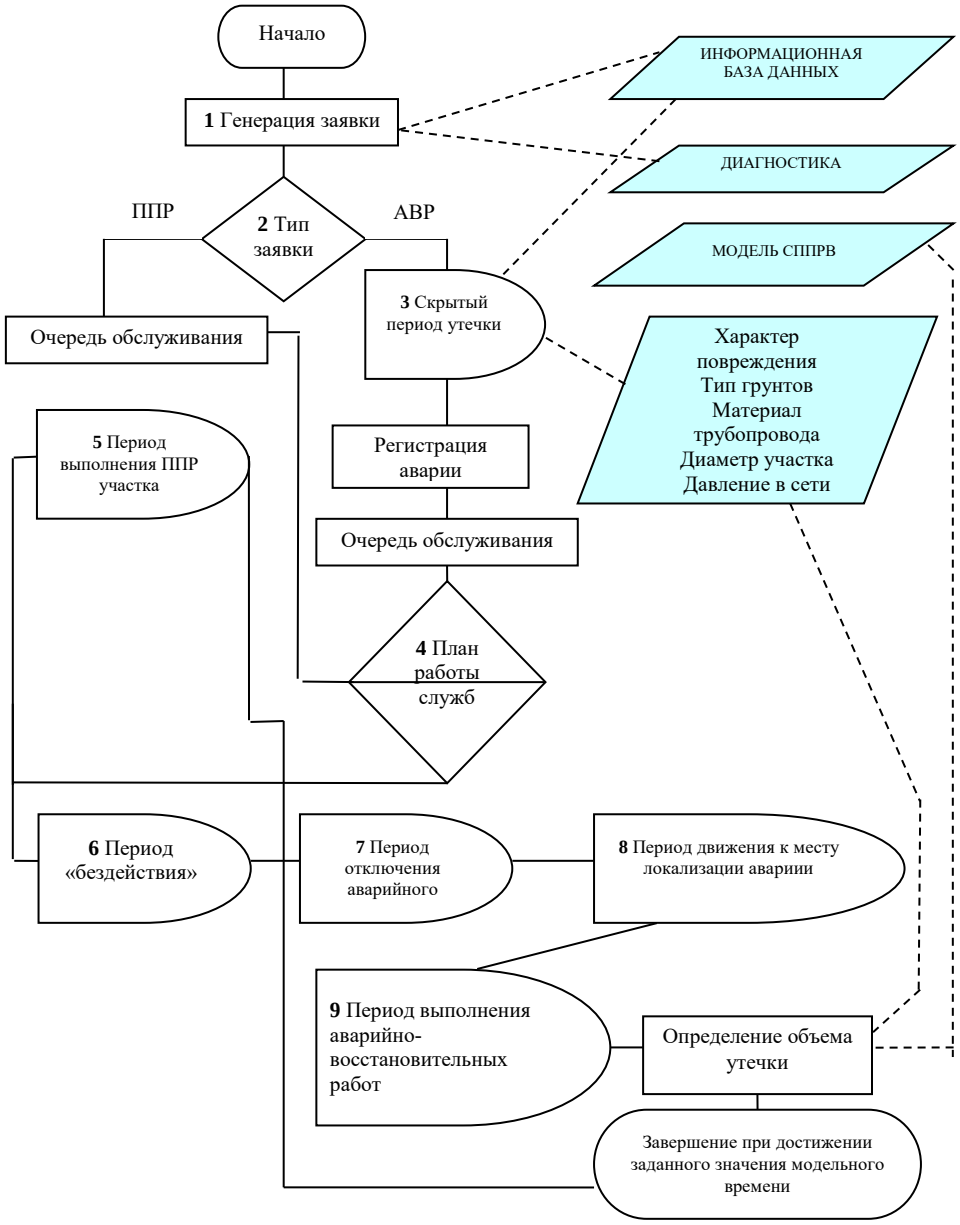


Рис 4.11 Структурная схема имитационной модели

Вероятность отсутствия заявок в системе оценивается по формуле $p_0 = \left(1 + \frac{p}{1!} + \frac{p^2}{2!} + ... + \frac{p^n}{n!} + \frac{p^{n+1}}{n!(n-p)}\right)^{-1}$, среднее число занятых каналов составляет $k = \frac{\lambda}{\mu} = \rho$, среднее число заявок в очереди $L_{оч} = \frac{p^{n+1} \times p_0}{n \times n! \times \left(1 - \frac{p}{n}\right)^2}$, а среднее число

заявок в системе $L_{сист} = \frac{p^{n+1} \times p_0}{n \times n! \times \left(1 - \frac{p}{n}\right)^2} + p$, n – число каналов обслуживания. В соответствии с формулой Литтла среднее время пребывания заявки в очереди и в системе составляет соответственно $W_{оч} = \frac{L_{оч}}{\lambda}$, $W_{сист} = \frac{L_{сист}}{\lambda}$. Результаты расчета по формулам теории СМО и имитационной модели приведены в таблице 4.1.

Результаты сравнения говорят о высоком качестве имитации (погрешность объясняется специалистами недостаточно качественным генератором равномерных псевдослучайных чисел системы GPSS [82], что, впрочем, не может серьезно повлиять на точность имитации достаточно грубой модели), это позволяет, не обращаясь больше к теоретическим зависимостям, приступить к изучению результатов работы построенной модели.

Таблица 4.1 Оценка качества имитации

Параметр[1]	**Теоретическая оценка**	**Модельное значение**
λ, $час^{-1}$	0.027	0.028
μ, $час^{-1}$	0.035	0.035
ρ	0.77	
p_0	0.46	
$L_{оч} = \frac{p^{n+1} \times p_0}{n \times n! \times \left(1 - \frac{p}{n}\right)^2}$	0	0
$L_{сист} = \frac{p^{n+1} \times p_0}{n \times n! \times \left(1 - \frac{p}{n}\right)^2} + p$	0.77	0.802
$W_{оч} = \frac{L_{оч}}{\lambda}$, $час$	0	0.003
$W_{сист} = \frac{L_{сист}}{\lambda}$, $час$	28.52	28.924

[1] Рассматривается модель с дискретным временем с шагом в 1 час

Средняя интенсивность потока заявок (общая) в системе составляет $\lambda = 0.046(час^{-1})$, интенсивность обслуживания заявок АВР $\mu = 0.035(час^{-1})$.

Работа модели позволяет определить, что стационарный режим может установиться при наличии 6 бригад, занимающихся проведением ППР, АВР и их последствий, при этом средняя длина очереди на выполнение работ, связанных с потерями воды в системе составит $L_{оч} = 1.2$ заявки, средняя продолжительность нахождения таких заявок в системе $W_{сист} = 44.4$ часа.

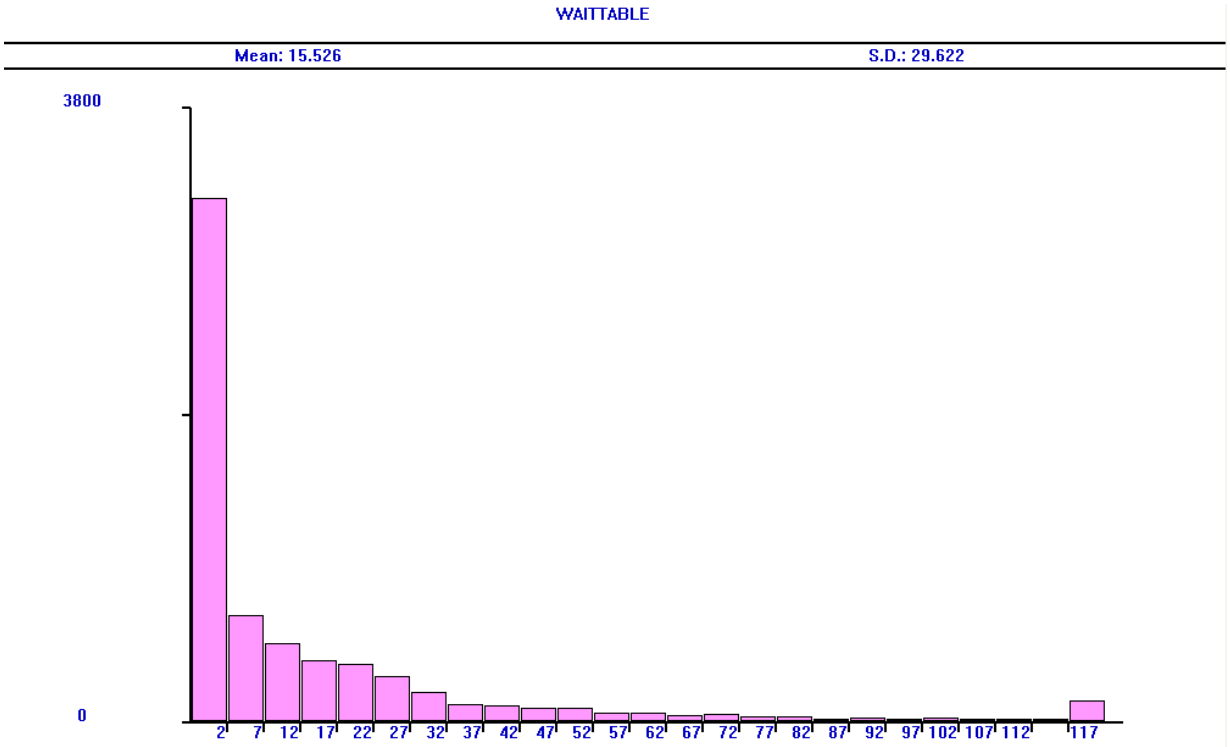


Рис 4.12 Распределение времени ожидания заявки на АВР:
ось абсцисс – продолжительность ожидания, час; ось ординат – частота для данной продолжительности ожидания

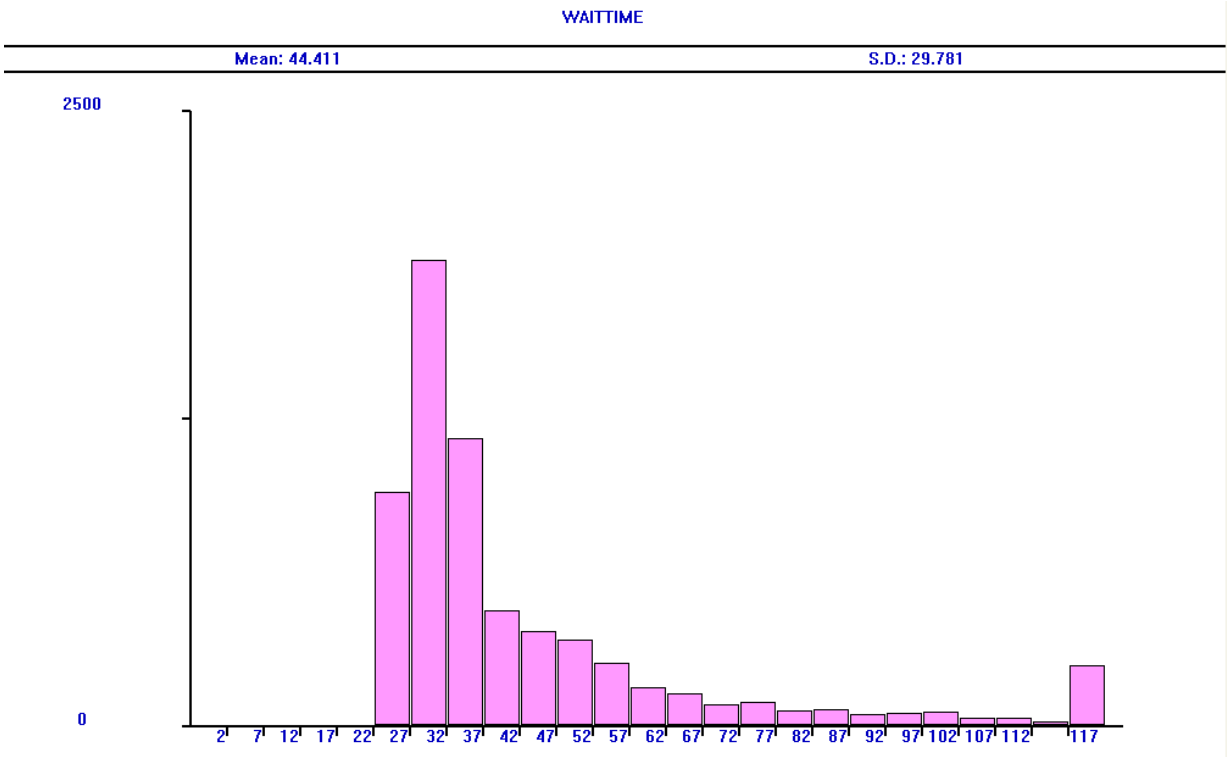


Рис 4.13 Распределение времени пребывания заявки на АВР в системе: ось абсцисс – продолжительность пребывания, час; ось ординат – частота для данной продолжительности пребывания

Коэффициент загруженности системы 0.869. В течение расчетного периода имелись моменты времени, когда бездействовали все 6 бригад, и когда все 6 были заняты обслуживанием заявок.

Модель может быть использована при обосновании норм расхода инструментов и материалов для выполнения АВР и ППР. В нашем случае объектом исследования является объем воды, потерянный предприятием в течение расчетного периода времени, и способы снижения этого объема.

При заданных начальных условиях за 10000 суток функционирования система теряет 131334640 $м^3$ воды, что составляет около 10.1%. Эта оценка близка к полученной по балансовому методу. Динамика роста объема потерянной воды отражена на следующем графике (см. рисунок 4.14).

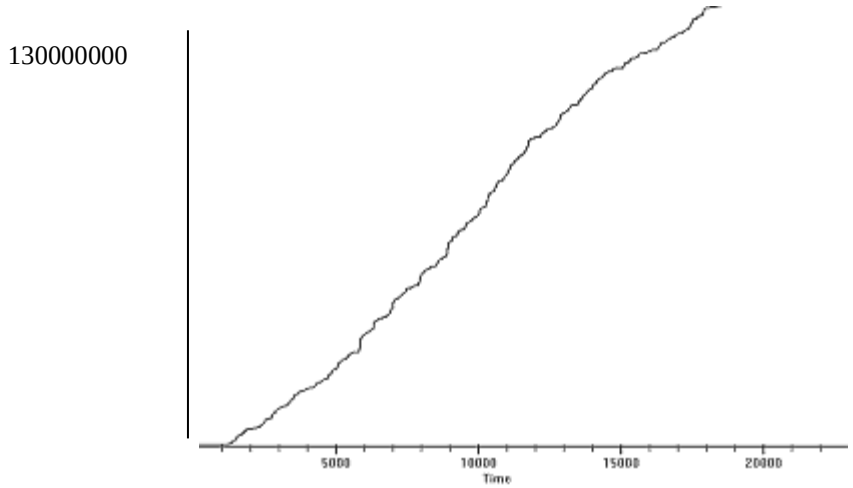


Рис 4.14 Динамика роста объема потерянной воды: ось абсцисс – продолжительность имитации, час; ось ординат – объемы потерь, м³

Увеличение числа бригад не ведет к существенному сокращению объемов энергетических потерь и экономически не оправдано (см. таблицу 4.2).

Таблица 4.2 Эффективность сокращения потерь при увеличении числа бригад

Число бригад	**Процент утечки**
5	10.7%
6	10.1%
7	10.099%
8	9.652%

Сокращение продолжительности этапов 7,8,9 (см. рисунок 4.11) не только экономически нецелесообразно, но и недопустимо по соображениям снижения качества выполнения работ.

Существенным для снижения объемов потерь являются следующие меры:

1) ранжирование заявок АВР и ППР по значимости – долгосрочное планирование мероприятий по поддержке сетей в рабочем состоянии;

2) снижение продолжительности периода скрытой утечки t_{sh} - функциональная диагностика состояния сети.

Эффективность данных мероприятий для сокращения объемов потерь иллюстрирует таблица 4.3.

Таблица 4.3 Мероприятия по снижению энергоемкости системы

Условия	**Процент утечки**
долгосрочное планирование мероприятий по поддержке сетей в рабочем состоянии и диагностика не производятся	10.5%
долгосрочное планирование мероприятий по поддержке сетей в рабочем состоянии и диагностика производятся	до 6%

Таким образом, функциональная диагностика осложнений технологических режимов на сети позволила бы повысить оперативность принятия решений, расширить аналитические возможности служб, снизить энергопотребление системы за счет сокращения безвозвратных потерь воды.

Сканинг-эксперименты с имитационной моделью работы эксплуатационных подразделений МУП «Водоканал» г. Петрозаводска показали, что долгосрочное планирование мероприятий по поддержке сетей в рабочем состоянии, использование результатов функционально-структурной диагностики сетей г. Петрозаводска позволяет сократить потери воды в системе почти на 5-6%.

Общий объем воды, подаваемый НС первого подъема в город, составляет $Q = 130000\left(м^3 / сутки\right)$, объемы потерь воды в настоящее время

оцениваются специалистами предприятия на уровне 11%, что составляет $Q_1 = \frac{11 \times 130000}{100} = 14300(м^3/сутки)$. С использованием средств функционально-структурной диагностики объем потерь сокращается на 5% и составляет $Q_2 = \frac{6 \times 130000}{100} = 7800(м^3/сутки)$, соответственно объемы сэкономленной воды составляют $Q_3 = \frac{5 \times 130000}{100} = 6500(м^3/сутки)$. При средней стоимости 1 м³ реализованной воды 9.45 руб, объем экономии в денежном выражении без учета внедрения системы составляет 22 420 125 руб. в год. По данным финских специалистов стоимость водопроводных очистных сооружений для подготовки воды из Петрозаводской губы Онежского озера по двухступенной схеме очистки может быть оценена по формуле $Ц = 0.006 \times Q + 16.2$ (млн. руб). Отсюда можно определить производительность станции, построенной на сэкономленные за счет внедрения системы средства. За 4 года объем экономии позволил бы построить дополнительный модуль производительностью около $Q = 10000(м^3/сутки)$.

4.4.4 Результаты моделирования СПРВ микрорайона Куковка г. Петрозаводска

Официальной датой ввода в эксплуатацию Петрозаводской водопроводной сети является 1935 год. Позднее выполненные расширения сети позволили создать централизованную систему, обеспечивающую водой весь город. В настоящее время водопроводная сеть г. Петрозаводска протяженностью 290 км обслуживает все крупные городские предприятия и население (273500 человек). Особенностями водопроводной сети г. Петрозаводска являются значительная доля стальных трубопроводов, а также сам возраст труб водораспределительной системы. Средний возраст водопроводных труб составляет 23 года.

Прорывы водопроводной сети происходят главным образом вследствие возникновения гидравлических ударов при остановке насосов, быстром закрытии запорной арматуры и износе труб. Причинами прорывов могут

быть также недоброкачественность стыковых соединений, загрязнение труб различными отложениями, увеличение производительности трубопровода, и, как следствие, повышение давления в нем без производства необходимых контрольных испытаний и выявления технического состояния труб. В городе Петрозаводске вследствие причин, указанных выше, основной причиной прорывов водопроводной сети является значительной износ – оцениваемый на уровне 57% - трубопроводов и коммуникаций, усугубляемый процессами почвенной коррозии, а также блуждающими токами. Для решения различных вопросов надежности системы городского водопровода целесообразным является одновременный сбор данных, как об объемах утечки, так и данных по эксплуатации трубопроводов и оборудования городской водопроводной сети. Источником подобной информации могут являться специально расширенные для этой цели формы заявки (рис. 4.15), оформляемые аварийно – диспетчерской службой г. Петрозаводска для каждого случая аварии на водопроводных сетях.

Анализ собранной статистики за 1996-2003 г. показал, что наиболее неблагоприятными в отношении аварийности являются водопроводные сети микрорайона Куковка г. Петрозаводска.

На основе построенной модели СПРВ г. Петрозаводска в целом были решены частные обратные задачи: определение коэффициентов гидравлического трения, сетевых отборов. Полученные результаты становятся частью информационной подсистемы и используются при решении диагностических задач.

В результате моделирования работы водопроводной сети микрорайона Куковка по фактическим данным по водопотреблению были получены следующие результаты.

поступила дд.мм.гг. чч:мм ПМУП «Водоканал»

РСУ_____ Сообщено в СЭС

СЭС о ликвидации 01_____

Заявка №_____

Адрес повреждения

Диаметр водопровода мм

Утечка воды м³ / час

Ф.И.О. заявителя

Отключено_____

Дата и время выезда бригады АДС
Дата и время прибытия бригады АДС
Дата и время отключения линии бригадой АДС
Дата и время начала ремонта РСУ
Дата и время окончания ремонта РСУ
Дата и время начала дезинфекции АДС
Дата и время окончания дезинфекции АДС
Дата и время начала промывки АДС
Дата и время окончания промывки АДС
Дата и время закрытия заявки
Материал коммуникаций
Глубина заложения, м
Глубина промерзания, м
Протяженность линии, м
Ширина зоны вскрытия, м
Длина зоны вскрытия, м
Тип покрытия
Расстояние от точки выезда, км

Кто отключал _____

Кто устранял, мастер_____ бригадир_____

Характер повреждения _____

Дата и время включения _____

Кто включал _____

Диспетчер_____

Рис. 4.15 Форма заявки АДС

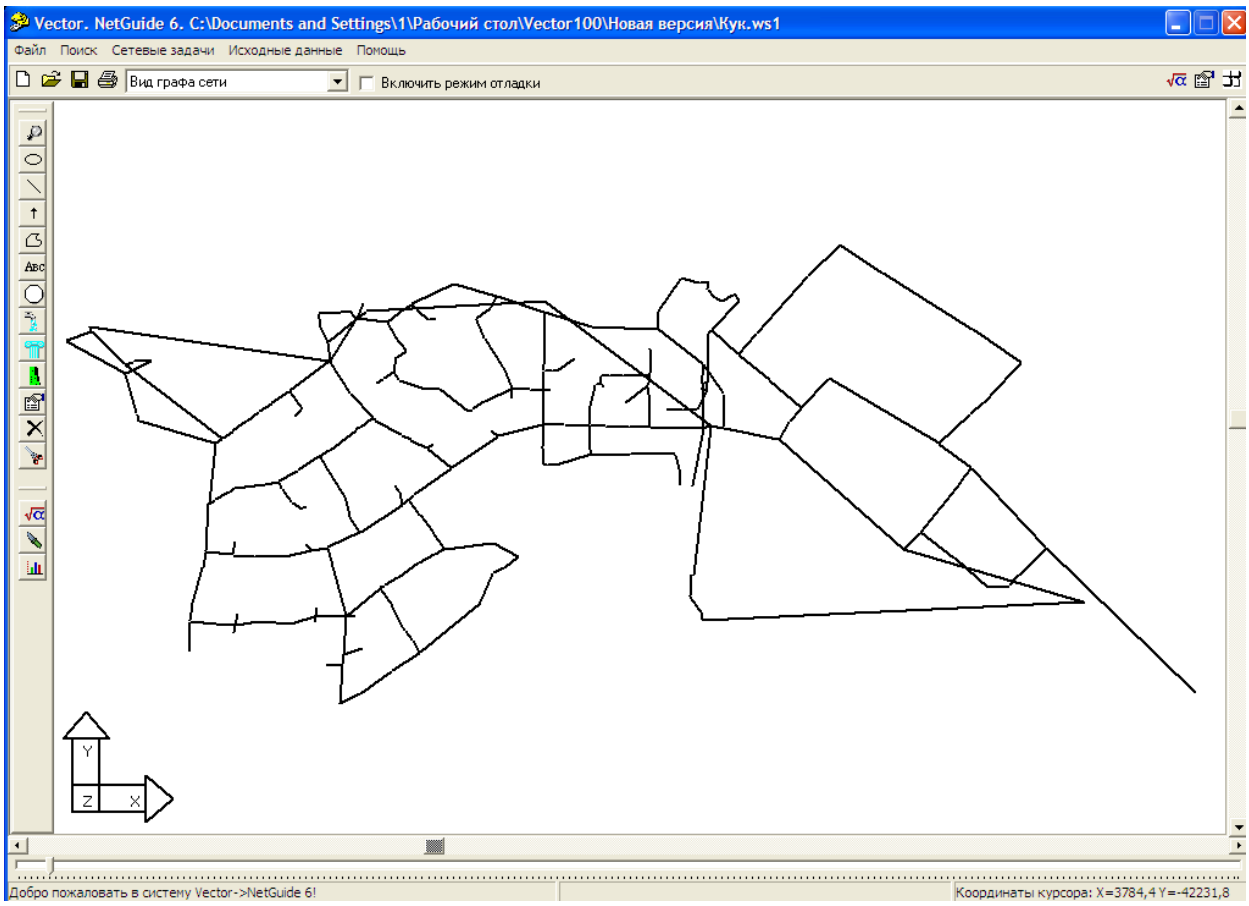


Рис. 4.16 Модель СПРВ микрорайона Куковка г. Петрозаводска

Скорости движения воды в коммуникациях района значительно меньше рекомендуемых и не превышают 0.3 м/с, существуют застойные зоны с крайне низким коэффициентом кратности обмена вода. Давление в узлах сети зачастую превышают нормируемые 60 м.в.с.

Для возможности решения диагностических задач вводится весь массив необходимой информации: описание топологической структуры (в виде матриц или графически), длины и диаметры участков, материалы труб, пьезометрические съемки для определенного режима работы сети (максимальное водопотребление), данные эксплуатационных организаций (год укладки трубопровода, диаметр трубопровода, нарушения в стыках, дефекты внутренней поверхности, нарушение герметичности, деформации тела трубы, глубина заложения трубы, состояние грунтов вокруг трубопровода, наличие грунтовых вод, интенсивность транспортных потоков).

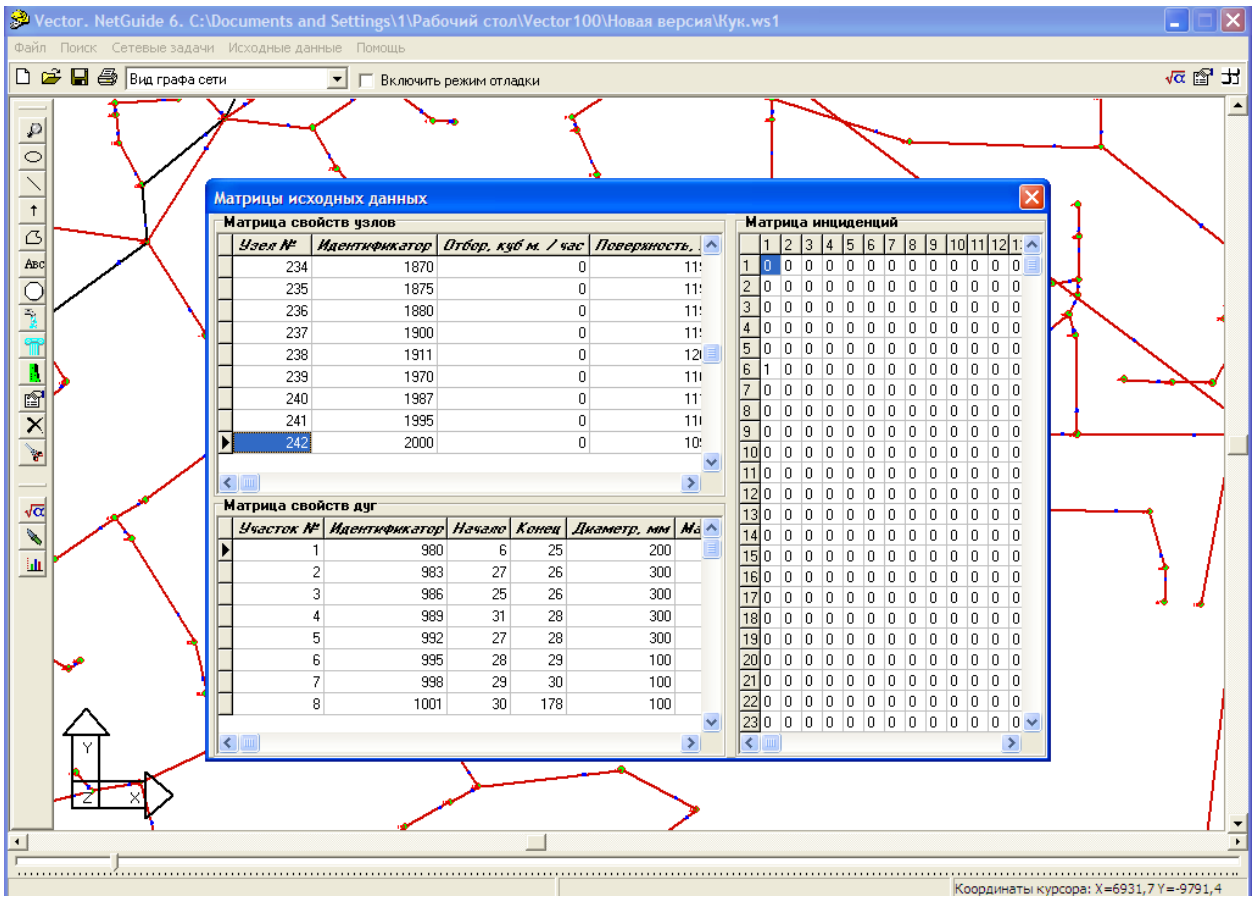


Рис. 4.17 Матрицы исходных данных

По результатам работы диагностического модуля выявляются осложнения эксплуатации сети трех типов: утечки (@A), коррозионное зарастание (@C), несанкционированные отборы (@S). Для решения задачи предварительно запускаются вспомогательные модули (имитационного моделирования, классификации, обратного потокораспределения для формирования локальных моделей). Результат решения задачи представляет собой набор трех индексов для каждого участка сети, представляющих собой количественное описание осложнений (@A, @C, @S).

Указанные индексы принимают значения от 0 до 9 и характеризуют степень проявления технологического осложнения (9 соответствует максимальной степени).

Возможна графическая визуализация результатов решения задачи (расчетные точки или линии уровня). Белый цвет на диаграммах соответствует значениям индексов 0 – 2, зеленый 2 – 4, желтый 4 -6, красный – более 6.

Распределение ситуации по утечкам в сети микрорайона представлено на рисунках 4.18, 4.19.

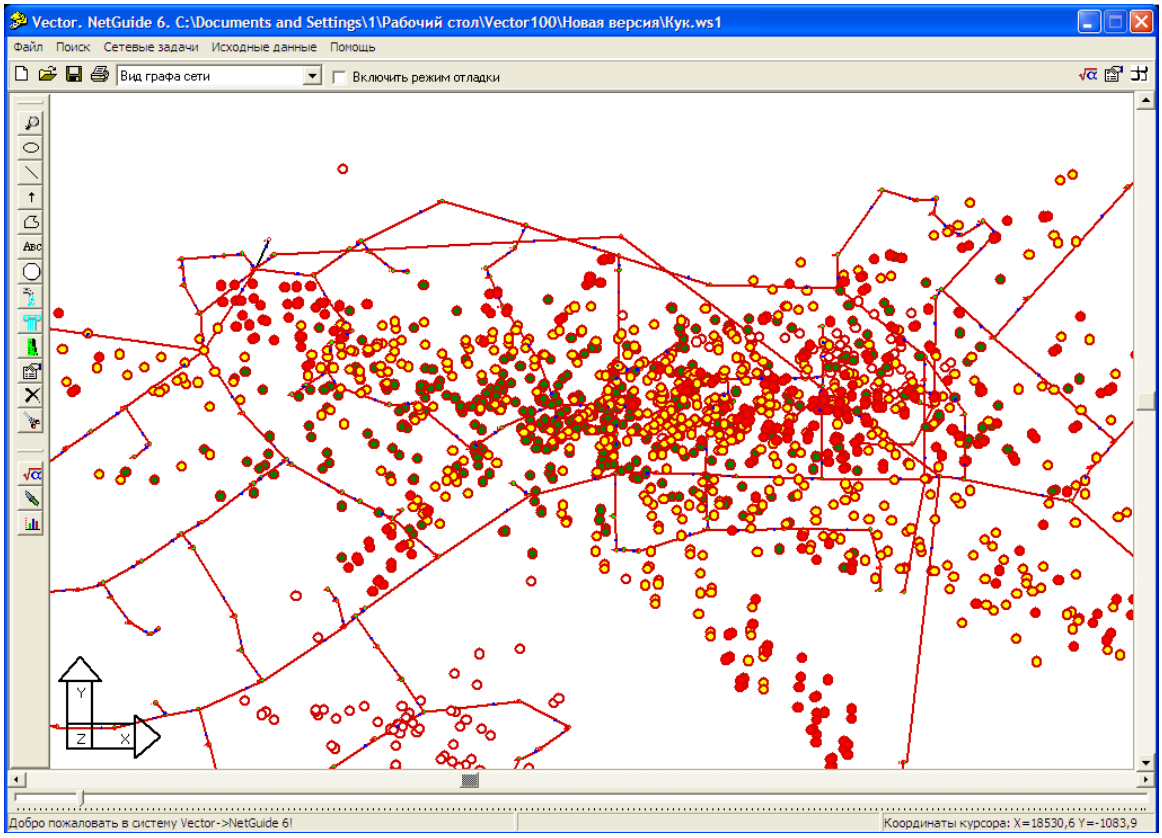


Рис. 4.18 Распределение ситуации по утечкам

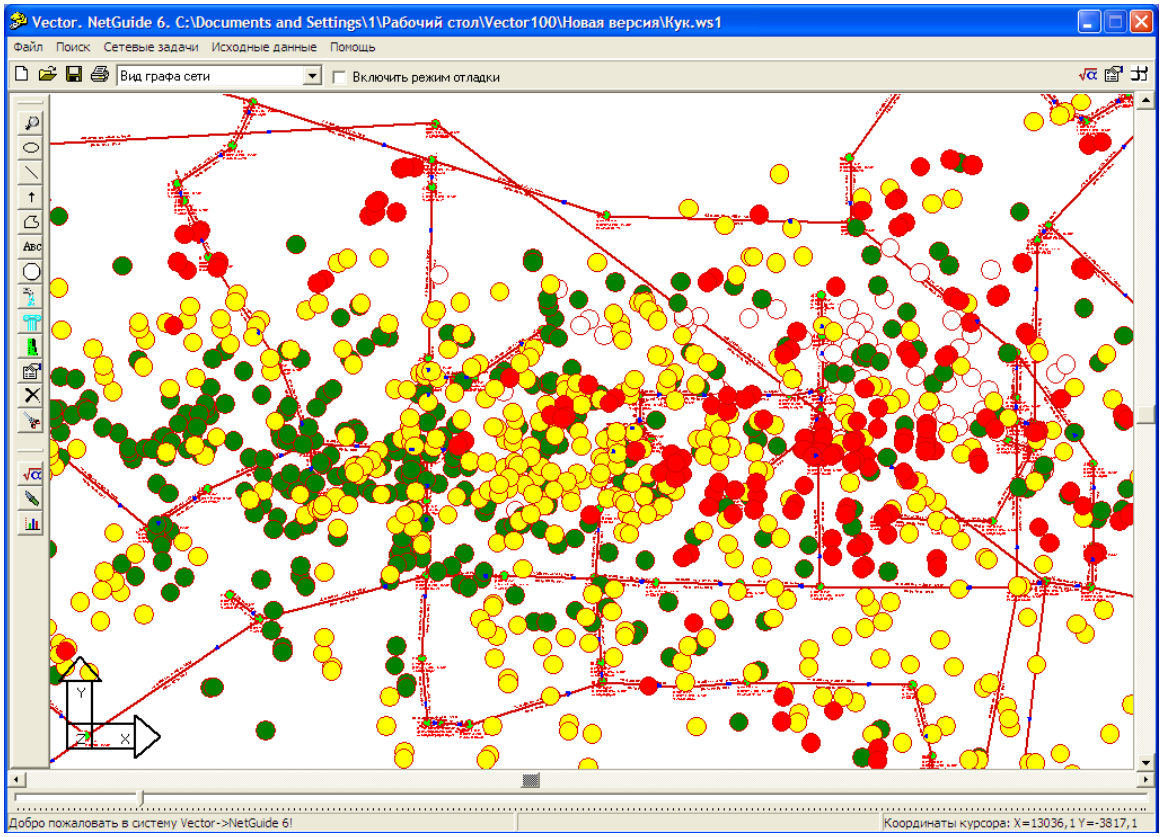


Рис. 4.19 Распределение ситуации по утечкам (увеличено)

Результаты решения диагностической задачи указывают на существование ярко выраженного «контура значительных утечек», который практически точно совпадает с границами зоны избыточных давлений микрорайона. Вообще здесь наблюдается сильная положительная корреляционная связь между объемами утечек и давлением в сети, которое значительно превышает регламентируемый действующими нормами лимит в 60 м.в.с.

Распределение ситуации по коррозионному зарастанию в сети микрорайона представлено на рисунках 4.20, 4.21.

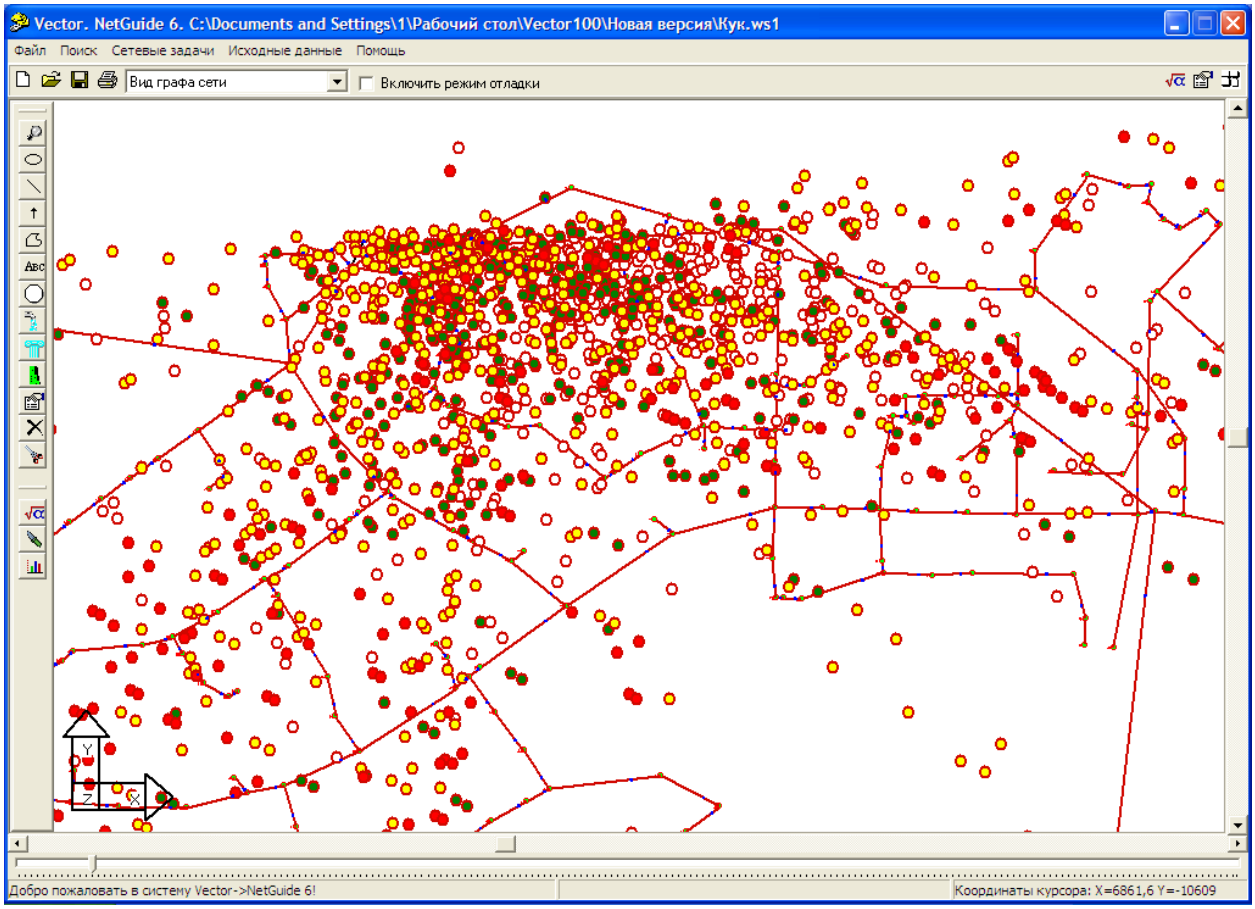


Рис. 4.20 Распределение ситуации по коррозионному зарастанию

В целом полученная в результате моделирования картина по внутренней коррозии материалов труб практически однородна, что объясняется спецификой строительства района. Застройка наиболее интенсивно велась в течение 5 лет, следовательно, коммуникации приблизительно одного возраста, материал труб практически всего района – тонкостенная кипящая сталь (85%).

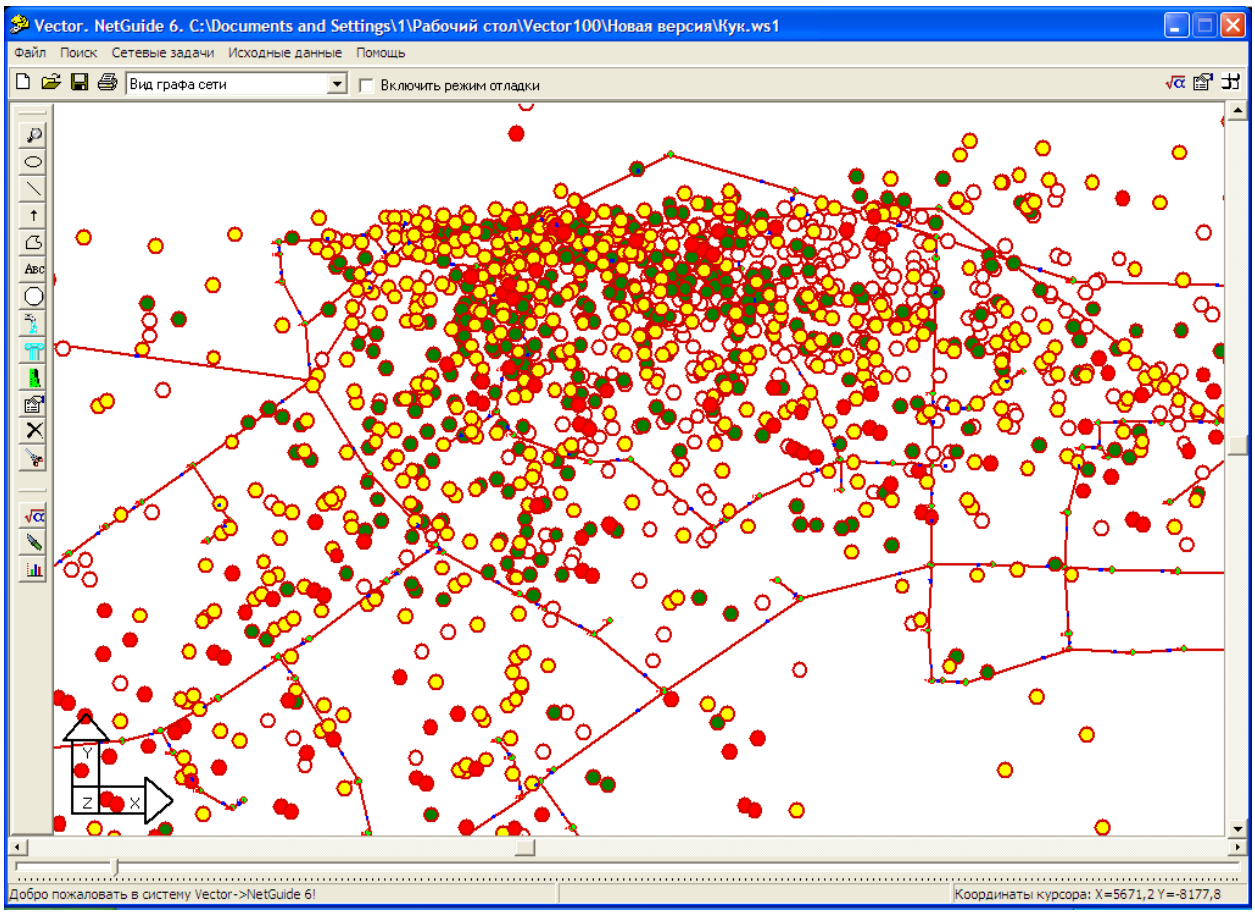


Рис. 4.21 Распределение ситуации по коррозионному зарастанию (увеличено)

Распределение ситуации по несанкционированным отборам в сети микрорайона представлено на рисунках 4.22, 4.23.

Ситуация также в целом однородна – система отвергает гипотезы о возможности несанкционированных отборов, однако можно выделить две области: в одной из них (первая) преобладают значения @S равные 0, в другой (вторая) - колеблются в диапазоне от 1 до 2. Этот факт можно объяснить следующим образом: вторая область попадает в зону избыточных напоров (там же значителен и уровень утечек), средства понижения давления на внутренних сетях зданий отсутствуют, следовательно, и утечки на внутридомовых сетях выше (это подтверждают и исследования, проведенные специалистами МУП «Водоканал» г. Петрозаводска). Увеличение значения индекса @S есть результат превышения норм водопотребления во второй области по сравнению с первой.

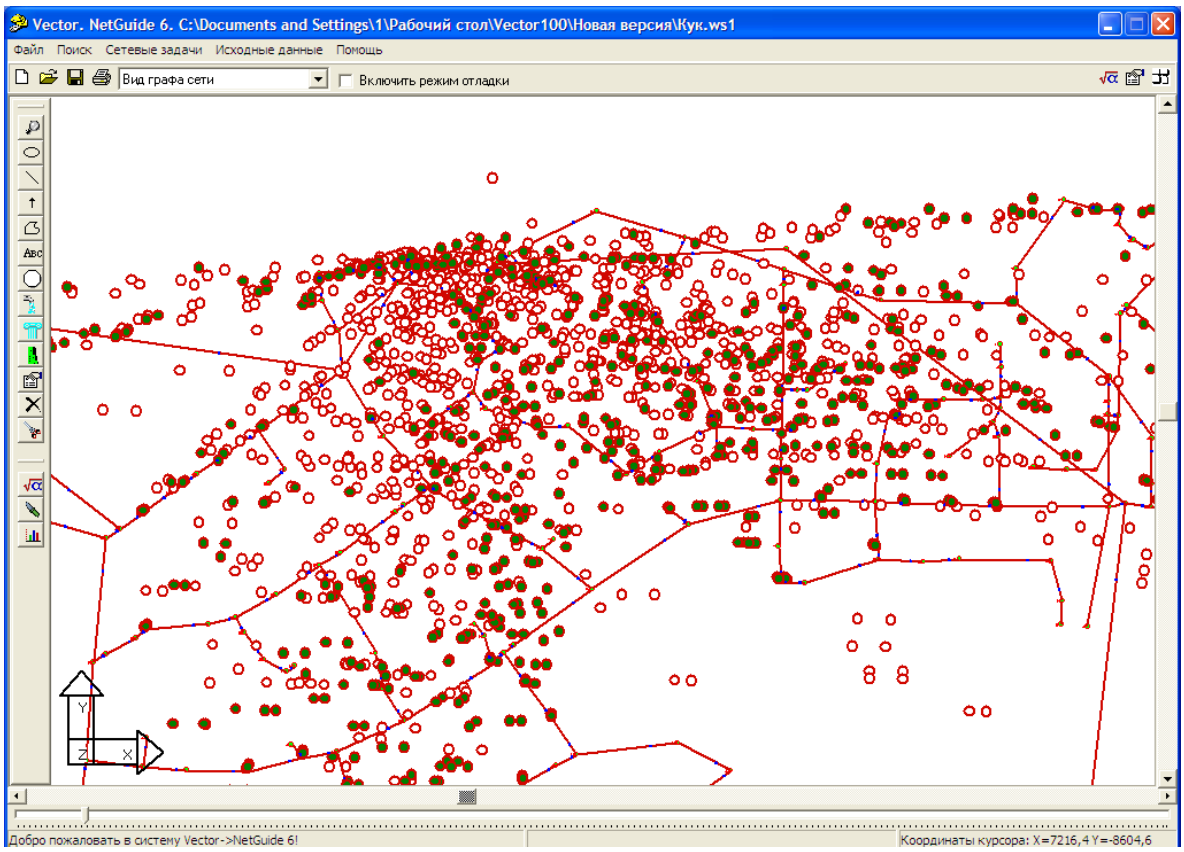


Рис. 4.22 Распределение ситуации по несанкционированным отборам

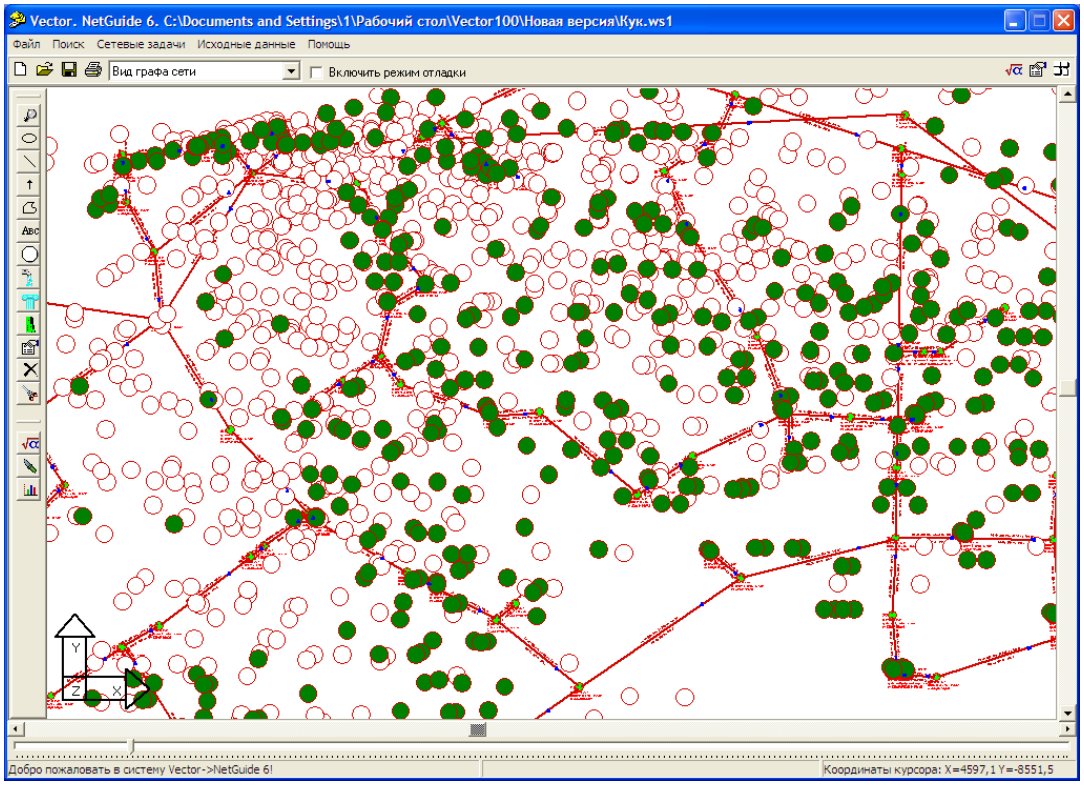


Рис. 4.23 Распределение ситуации по несанкционированным отборам (увеличено)

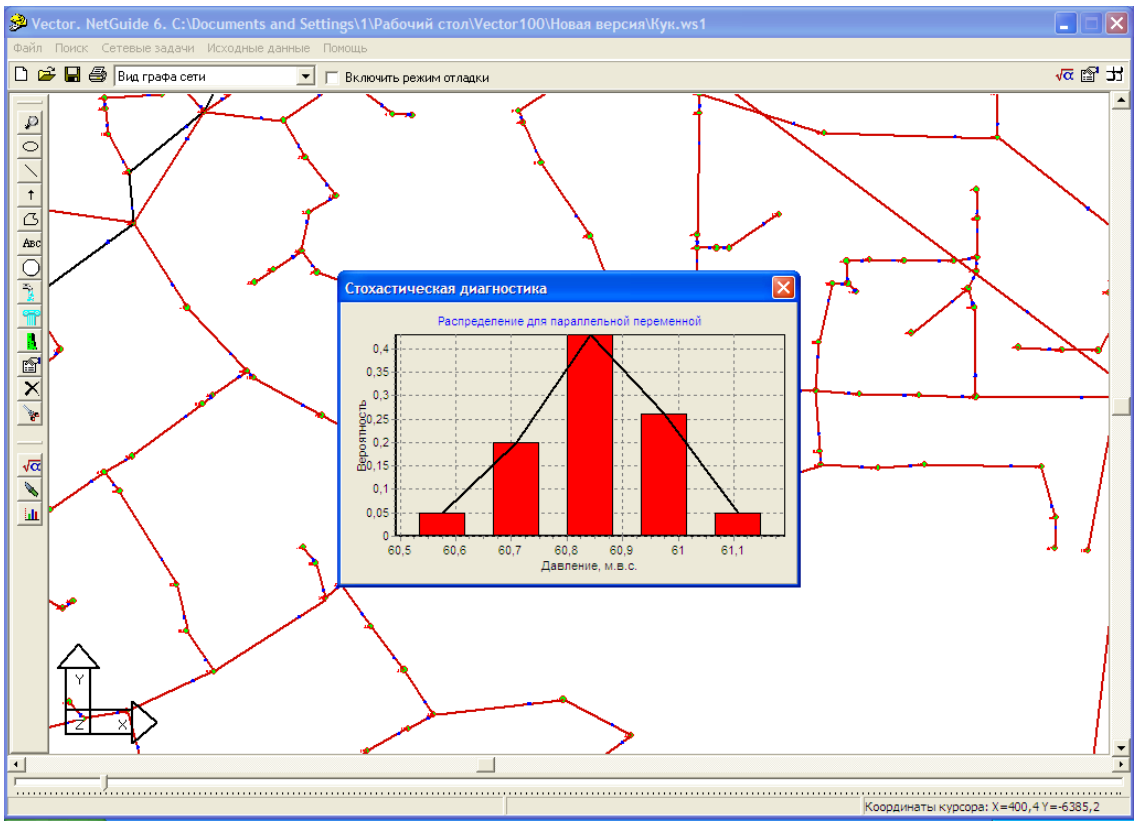


Рис. 4.24 Результаты стохастического моделирования для режима максимального водопотребления

Разработанная система на основе «вычислительных технологий» реализует основные принципы системы поддержки принятия решений при проектировании и эксплуатации СПРВ, обеспечивая возможность симбиоза «вычислительный модуль - лицо, принимающее решения». Возможности системы обеспечивают проведение точечного и полирежимного моделирования СПРВ, решения задач оптимального синтеза, структурной и функциональной диагностики.

4.5 Выводы по главе

1. Задача функционально-структурной диагностики сведена к задаче математического программирования в условиях неполноты и неопределенности исходных данных. Для решения задачи предложено использовать принципы эволюционного моделирования: нечеткое

управление при учете взаимного влияния эксплуатационных осложнений на результат решения; нейронно-нечетких систем для построения трудно формализуемых моделей; генетических алгоритмов для поиска оптимального плана, отвечающего наиболее адекватному набору решений;

2. Разработано программное обеспечение, реализующее основные принципы «мягких» вычислений при моделировании, оптимальном синтезе и идентификации систем подачи и распределения воды. Результаты моделирования и расчета реальных сетей продемонстрировали хорошую вычислительную устойчивость разработанных методик и их совместимость с ресурсами современной вычислительной техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ публикаций по моделированию СПРВ показал, что вопросы решения прямых и обратных задач в условиях неопределенности, неполноты исходных данных исследованы недостаточно. Большинство систем моделирования СПРВ сильно ограничивают или исключают возможность полноценного участия инженера при решении сетевых задач;
2. Сформулирована и поставлена задача функционально-структурной диагностики, представляющая собой особую разновидность ранее не решавшихся обратных задач потокораспределения: по информационно неполному и недостоверному набору исходных данных, полученных по результатам пьезометрических съемок и статистических данных эксплуатационных организаций, оценить степень проявления технологических осложнений на участках сети: утечек, несанкционированных отборов, коррозионного зарастания;
3. Разработана методология моделирования систем подачи и распределения воды в условиях неполноты или неопределенности исходных данных: предложены методы решения прямых задач потокораспределения при нечетко заданных сетевых отборах и сопротивлениях; задачи оптимального синтеза СПРВ при нечетко заданной целевой функции, отражающей противоречивые требования, предъявляемые постановщиком задачи к оптимальному решению;
4. Предложены методики оценки состояния участков сети в условиях неполноты или неопределенности исходных данных, учитывающие влияние дестабилизирующих факторов на нормальный режим эксплуатации трубопроводов;

5. На основе методологии моделирования систем подачи и распределения воды в условиях неопределенности и неполноты исходных данных предложен алгоритм решения задачи функционально-структурной диагностики;
6. Предложены методики для определения функций принадлежности сетевых расходов на основе анализа временных рядов водопотребления и решения обратных задач потокораспределения; моделирования аварийных процессов; определения объемов потерянной воды на сетях вследствие аварийных истечений; экспресс-методы для определения скорости внутренней коррозии;
7. Исследовано влияние химического состава воды на скорость внутренней коррозии; на основе решения обратных задач потокораспределения была получена зависимость изменения коэффициента гидравлического трения металлических труб, эксплуатирующихся на водопроводных сетях г. Петрозаводска, во времени;
8. Разработано программное обеспечение, реализующее основные принципы «мягких» вычислений при моделировании, оптимальном синтезе и идентификации систем подачи и распределения воды. Результаты моделирования и расчета реальных сетей продемонстрировали хорошую вычислительную устойчивость разработанных методик и их совместимость с ресурсами современной вычислительной техники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Абрамов Н.Н.** Водоснабжение / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1982. – 440 с.

2. **Абрамов Н.Н.** Надежность систем водоснабжения / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1979. – 231 с.

3. **Абрамов Н.Н.** Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1972. – 288 с.

4. **Айвазян С.А.** Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

5. **Алексеев А.В.** Применение нечеткой математики в задачах принятия решений / А.В. Алексеев // Методы и системы принятия решений. – Рига: РПИ, 1983. – С. 38-42.

6. **Аленфельд Г.** Введение в интервальные вычисления / Г. Аленфельд, Ю. Херцбергер. – М.: Мир, 1987. – 360 с.

7. **Амосов А.А.** Вычислительные методы для инженеров: Учебное пособие / А. М. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копченова. – М.: Высш. шк., 1994. – 544 с.

8. **Аоки М.** Введение в методы оптимизации / М.Аоки. – М.: Наука, 1977. – 344 с.

9. **Аюкаев Р.И.** Перспективы использования Российской и Финской науки в совершенствовании технологии и экономики водопровода и канализации Карелии / Р.И. Аюкаев // Водоснабжение и канализация. Технические и экономические аспекты. – Петрозаводск, 1999. – С. 30-33.

10. **Балабан-Ирменин Ю.В.** Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей / Ю.В. Балабан-Ирменин, В.М. Липовских, А.М. Рубашов. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 244 с.

11. **Бердичевский Б.Е.** Оценка надежности аппаратуры автоматики / Б.Е. Бердичевский. – М.: Машиностроение, 1966. – 604 с.

12. **Бешелев С.Д.** Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – М., 1980. – 262 с.

13. **Харькин В.А.** К выбору участков безнапорных трубопроводов для приоритетного бестраншейного восстановления / В.А. Харькин, В.А. Орлов, А.А. Отставнов // Сантехника 2004 №5. – С. 24-30.

14. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с.

15. **Волощин А.П.** Оптимизация в условиях неопределенности / А.П. Волощин, Г.Р. Сотиров. – М.: Издательство МЭИ, 1989. – 224 с.

16. **Гальперин Е.М.** Надежность водопроводных насосных станций / Е.М. Гальперин, А.К. Стрелков, В.И. Полуян // Водоснабжение и санитарная техника №1, 1993. – С. 10-12.

17. **Гальперин Е.М.** О надежности функционирования оборудования насосных станций систем водоснабжения и водоотведения / Е.М. Гальперин // Вода и экология №3, 2001. – С. 2-7.

18. **Гиргидов А.Д.** Техническая механика жидкости и газа / А.Д. Гиргидов. – Спб.: Издательство СПбГТУ, 2001. – 395 с.

19. **Гнеденко Б.В.** Курс теории вероятности / Б.В. Гнеденко. – М.: Наука, 1988. – 446 с.

20. **Гольдштейн Ю.Б.** Оптимизация проектных решений / Ю.Б. Гольдштейн. – Петрозаводск: издательство Петрозаводского университета, 2001. – 164 с.

21. **Гутман Э.М.** Механохимия металлов и защита от коррозии / Э.М. Гутман. – М.: Металургия, изд. 2-е перераб. и доп., 1981. – 271 с.

22. **Дмитриев А.В.** Городские инженерные сети / А.В. Дмитриев, А.Б. Кетаов. – М.: Стройиздат, 1988. – 176 с.

23. **Евдокимов А.Г.** Минимизация функций и ее приложение к задачам автоматизированного управления инженерными сетями / А.Г. Евдокимов. – Харьков: Вища школа, 1985. – 288 с.

24. **Евдокимов А.Г.** Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов, А.Д. Тевяшев. – М.: Стройиздат, 1990. – 368 с.

25. **Евдокимов А.Г.** Оптимальные задачи на инженерных сетях / А.Г. Евдокимов. – Харьков: Вища школа, 1976. – 153 с.

26. **Евланов Л.Г.** Экспертные оценки в управлении / Л.Г. Евланов, В.А. Кутузов. – М.: «Экономика», 1978. – 133 с.

27. **Емцев Б.Т.** Техническая гидромеханика / Б.Т. Емцев. – М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.

28. **Жук Н.П.** Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. – М.: Металлургия, 1976. – 586 с.

29. **Заде Л.А.** Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластер-анализе / Л.А. Заде // Классификация и кластер. – М.: Мир, 1980. – С. 208-247.

30. **Захаров А.В.** Алгебраическое интервальное решение систем линейных интервальных уравнений Ах = в и Ах + d = в / А.В. Захаров, Ю.И. Шокин // Препринт ВЦ СО АН СССР, N 5. – Красноярск, 1987. – 17 с.

31. **Ильин Ю.А.** Надежность водопроводных сооружений и оборудования / Ю.А. Ильин. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.

32. **Ильин Ю.А.** Расчет надежности подачи воды / Ю.А. Ильин. – М.: Стройиздат, 1987. – 320 с.

33. **Имомов Т.Ш.** Повышение эффективности и надежности работы систем водоснабжения в условиях центральных Кызылкумов / Т.Ш. Иомов // Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Алматы, 2005. – 26 с.

34. **Каганович Б.М.** Дискретная оптимизация тепловых сетей / Б.М. Каганович. – Новосибирск: Наука, 1978. – 88 с.

35. **Казаков И.Е.** Статистическая теория систем управления в пространстве состояний / И.Е. Казаков. – М.: Наука, 1975. – 432 с.

36. **Карамбиров Н.А.** Сельскохозяйственное водоснабжение / Н.А. Карамбиров. – М.: Колос, 1978. – 445 с.

37. **Карамбиров С.Н.** Оптимизация систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и развития / С.Н. Карамбиров // Вестник гражданских инженеров, №1, 2005. – С. 65-71.

38. **Карамбиров С.Н.** Совершенствование методов расчета систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неполной исходной информации / С.Н. Карамбиров // Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. – М., 2005 – 46 с.

39. **Каримов Р.Х.** Программное обеспечение гидравлических и оптимизационных расчетов / Р.Х. Каримов // Водоснабжение и санитарная техника № 1, 1998. – С. 16-17.

40. **Кейн В.М.** Оптимизация систем управления по минимаксному критерию / В.М. Кейн. – М.: Наука, 1985. – 248 с.

41. **Кини Р.Л.** Принятие решения при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа. – М.: «Радио и связь», 1981. – 560 с.

42. **Киреев Д.М**. Обеспечение безопасной эксплуатации разветленной сети подземных технологических трубопроводов / Д.М. Киреев // Диссертация на соискание ученой степени кандидата доктора технических наук. – Уфа, 2002. – 136 с.

43. **Кожинов И.В**. Пути устранения потерь воды на водопроводах / И.В. Кожинов, Р.Г. Добровольский. – М.: Стройиздат, 1982. – 187 с.

44. **Кожинов И.В.** Устранение потерь воды при эксплуатации систем водоснабжения / И.В. Кожинов, Р.Г. Добровольский. – М.: Стройиздат, 1988. – 384 с.

45. **Константинов Ю.М.** Гидравлика / Ю.М. Константинов. – К.: Вища школа, 1988. – 398 с.

46. **Коросов А.В.** Имитационное моделирование / А.В. Коросов. – Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 2002. – 212 с.

47. **Костышин В.С.** Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии / В.С. Костышин. – Ивано-Франковск, 2000. – 163 с.

48. **Кофман А.** Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

49. **Круглов В.В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2001. – 381 с.

50. **Кузнецов А.В.** Математическое программирование / А.В. Кузнецов, Н.И. Холод. – Минск: «Вышэйшая школа», 1984. – 221 с.

51. **Курганов А.М.** Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения. Справочник / Курганов А.М., Н.В. Федоров. – Л.: Стройиздат, 1986. – 440 с.

52. **Кутуков С.Е.** Идентификация режимов эксплуатации трубопроводов / С.Е. Кутуков, Г.Х. Самигулин // Методы кибернетики химико-технол. процессов. – «КХТП-V-99»: Тез. докл. международ. науч.-техн. конф. / УГНТУ; Ред. Шаммазов А.М. и др. – Уфа, 1999. – Т.2, Кн.2. – С. 152-153.

53. **Кутуков С.Е.** Информационно - аналитические системы магистральных трубопроводов / С.Е. Кутуков. – М.: СИП РИА, 2002. – 324 с.

54. **Кутуков С.Е.** Разработка методов функциональной диагностики технологических режимов эксплуатации магистральных нефтепроводов / С.Е. Кутуков // Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. – Уфа, 2003. – 47 с.

55. **Лаврентьев М.М.** Некорректные задачи математической физики и анализа / М.М. Лаврентьев. – М.: Наука, 1980. – 304 с.

56. **Ладенко И.С.** Имитационные системы (методология исследований и проектирования) / И.С. Ладенко. – Новосибирск: Наука, 1981. – 300 с.

57. **Ле Лонг.** Оптимизация систем водоснабжения СРВ на надежность / Лонг Ле // Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. – М., 1984. – 34 с.

58. **Максимов Ю.И.** Имитационные модели оперативного планирования и управления магистральным транспортом газа / Ю.И. Максимов. – Новосибирск: Наука, 1982. – 194 с.

59. **Мелентьев Л.А.** Оптимизация развития и управления больших систем энергетики / Л.А. Мелентьев. – М.: Наука, 1982. – 323 с.

60. **Мелентьев Л.А.** Системные исследования в энергетике / Л.А. Мелентьев. – М.: Наука, 1983. – 455 с.

61. **Меренков А.П.** Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 278 с.

62. **Можаев А.С.** Современное состояние и некоторые направления развития логико-вероятностных методов анализа систем / А.С. Можаев // Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. – Вып. 1. Препринт 101. СПб. ИПМАШ РАН, 1994. – С. 23-53.

63. **Мороз А.И.** Курс теории систем / А.И. Мороз. – М.: Высшая школа, 1987. – 304 с.

64. **Мошнин Л.Ф.** Методы технико-экономического расчета водопроводных сетей / Л.Ф. Мошнин. – М.: Стройиздат, 1950. – 144 с.

65. **Мызников А.М.** Моделирование и идентификация параметров сложных гидравлических сетей / А.М. Мызников // Автореферат на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Тюмень, 2005. – 18 с.

66. **Нечаев А.П.** Принципы оптимизации систем водоподачи / А.П. Нечаев, Е.Н. Жирнов, Л.Ф. Мошнин, М.А. Сомов // Водоснабжение и санитарная техника № 1, 1998. – С. 6-8.

67. **Николадзе Г.И.** Водоснабжение / Г.И. Николадзе, М.А. Сомов. – М.: Стройиздат, 1995. – 688 с.

68. **Новицкий Н.Н.** Разработка и применение методов идентификации трубопроводных систем как гидравлических цепей с переменными параметрами / Н.Н. Новицкий // Автореферат кандидата технических наук. – Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1986. – 26 с.

69. **Ноздренко Г.В.** Вероятностная оценка эффективности при оптимизации сложных систем / Г.В. Ноздренко, В.В. Зыков, П.А. Щинников, В.Н. Чурашев // Теплоэнергетика: Сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – С. 99-109.

70. **Норвич А.М.** Построение функций принадлежности / А.М. Норвич, И.Б. Турксен // Нечеткие множества и теория возможностей. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 64-71.

71. **Оптнер С.Л.** Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем / С.Л. Оптнер. – М., Советское радио, 1969. – 216 с.

72. **Оре О.** Графы и их применение / О. Оре. – М.: «Мир», 1965. – 174 с.

73. **Панов** М. Я. Моделирование возмущенного состояния гидравлических систем сложной конфигурации на основе принципов энергетического эквивалентирования / М.Я. Панов, В.И. Щербаков, И.С. Квасов // Изв. РАН. Энергетика №5. – 2002. – С. 87-94.

74. **Петросов В.А.** Изменение гидравлических сопротивлений с течением времени / В.А. Петросов // Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Харьков, 1971. – 24 с.

75. **Полубаринова-Кочинова П.Я.** Теория движения грунтовых вод / П.Я. Полубаринова-Кочинова. – М.: Наука, 1977. – 664 с.

76. **Примин О.Г.** Оценка и методы обеспечения надежности районных систем сельскохозяйственного водоснабжения / О.Г. Примин // Автореферат диссертации кандидата технических наук. – М., 1980. – 22 с.

77. **Пряжинская В.Г.** Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами / В.Г. Пряжинская, Д.М. Ярошевский, Л.К. Левит – Гуревич. – М.: Физматлит, 2002. – 496 с.

78. **Романов В.В.** Методы исследования коррозии металлов / В.В. Романов. – М.: Металлургия, 1965. – 279 с.

79. **Руа Б.** Классификация и выбор при наличии нескольких критериев / Б. Руа // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М.: «Мир», 1987. – С. 80-107.

80. **Руденко Ю.Н.** Надежность систем энергетики / Ю.Н. Руденко, И.А. Ушаков. – М.: Наука. – 252 с.

81. **Рутковская Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.

82. **Рыжиков Ю.И.** Имитационное моделирование: теория и технологии / Ю.И. Рыжиков. – М.: Альтекс-А, 2004. – 384 с.

83. **Рябинин Н.А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем / Н.А. Рябинин. – СПб.:Политехника, 2000. – 248 с.

84. **Саати Т.** Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

85. **Седлуха С.П.** Методика затрат энергии на подачу воды при оборудовании насосной станции регулируемыми и нерегулируемыми насосами / С.П. Седлуха // Вода и экология №3, 2001. – С 71-77.

86. **Седлуха С.П.** Оптимизация систем подачи и распределения воды / С.П. Седлуха, А.Г. Чекаев, В.Н. Трубара. – Алма-Ата, 1982. – 68 с.

87. **Селиванов А.С.** Имитационное моделирование работы кольцевых водопроводных сетей при возможности возникновения аварийных ситуаций на различных ее участках / А.С. Селиванов // Материалы 56 научной студенческой конференции ПетрГУ. – Петрозаводск, 2004. – С. 122-123.

88. **Селиванов А.С.** Информационно – техническая база данных по вопросам надежности водопроводных сетей / Р.И. Аюкаев, Л.В. Максимова, А.С. Селиванов // Вода и экология, № 4, 2004. – С. 10-20.

89. **Селиванов А.С.** Имитационное моделирование работы кольцевых водопроводных сетей с учетом аварийных ситуаций на различных ее участках / Р.И. Аюкаев, Л.В. Максимова, А.С. Селиванов // Вода и экология, № 4, 2004. – С. 3-9.

90. **Селиванов А.С.** Использование методологии «мягких вычислений» при оптимизации водопроводных сетей / А.С. Селиванов // Материалы 57 научной студенческой конференции ПетрГУ, посвященной 65-летию

Петрозаводского государственного университета. – Петрозаводск, 2005. – С. 127-129.

91. **Селиванов А.С.** Математическое моделирование водопроводных сетей как цепей с регулируемыми параметрами / А.С. Селиванов, Р.И. Аюкаев / / Вода и экология № 4, 2005. – С. 43-47.

92. **Селиванов А.С.** К вопросу о повышении качества экспертных оценок в экологии / А.С. Селиванов // Экология человека: концепция факторов риска, экологической безопасности и управления рисками: сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза, 2006. – С. 132-134.

93. **Селиванов А.С.** Имитационное моделирование систем подачи и распределения воды при решении задач анализа и диагностики / А.С. Селиванов // Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2006. – С. 201-205.

94. **Семенова И.В.** Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семенова. – М.: Физматлит, 2002. – 336 с.

95. **Семухин М.В.** Идентификация состояния системы газодобычи в нечетких условиях / М.В. Семухин, Н.Л. Шушуков // Межвузовский тематический сборник "Применение математических методов и ЭВМ в геологии и разработке нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири". – Тюмень: ТюмГУ, 1979, вып. 70. – С. 70-73.

96. **Сидельников Ю.В.** Разработка методов повышения качества экспертных оценок / Ю.В. Сидельников // Автореферат кандидата технических наук. – М., 1987. – 26 с.

97. **Сомов М.А.** Влияние материала труб на интенсивность отказов трубопроводов систем водоснабжения / М.А. Сомов // Водоснабжение и санитарная техника, №4, 1999. – С. 36-38.

98. **Сумароков С.В.** Математическое моделирование систем водоснабжения / С.В. Сумароков. – Новосибирск: Наука, 1983. – 168 с.

99. **Сурин А.А.** Выбор схем водоснабжения. – Л., 1927. – 132 с.

100. **Сурис М.А.** К вопросу об эффективности электрохимической защиты трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии / М.А. Сурис // Городское хозяйство и экология. Изв. Жилищно-коммунальной академии. 1995. №4. – С. 66 -72.

101. **Сурис М.А.** Защита трубопроводов тепловых сетей от внешней коррозии / М.А. Сурис, В.М. Липовских. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 216 с.

102. **Тихонов А.Н.** Вводные лекции по прикладной математике / А.Н. Тихонов, Д.П. Костомаров. – М.: Наука, 1984. – 192 с.

103. **Точилов В.И.** О целесообразности увязки колец при расчете водопроводной сети / В.И. Точилов // Строительство и архитектура, 1980, №10. – С. 15-21.

104. **Угинчус А.А.** Гидравлика и гидравлические машины / А.А. Учингус. – Харьков, 1970. – 348 с.

105. **Украинец Н.А.** Исследования влияния поврежденности сетей и неравномерности водопотребления на возможность бесперебойного водоснабжения / Н.А. Украинец // Автореферат кандидата технических наук. – М., 1982. – 24 с.

106. **Флейшман Б.С.** Основы системологии / Б.С. Флейшман. – М.: Радио и связь, 1982. – 368 с.

107. **Форрестер Дж.** Индустриальная динамика / Дж. Форрестер. – М.: Мир, 1971. – 340 с.

108. **Форсайт Дж.** Машинные методы математических вычислений / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер. – М.: Мир, 1980. – 177 с.

109. **Хасилев В.Я.** Элементы теории гидравлических цепей / В.Я. Хасилев // Автореферат диссертации доктора технических наук. – Новосибирск, 1966. – 98 с.

110. **Хоружий П.Д.** Расчет гидравлического взаимодействия водопроводных сооружений / П.Д. Хоружий. – Львов: Издательство при Львовском государственном университете, 1984. – 152 с.

111. **Храменков С.В.** Оптимизация восстановления водоотводящих сетей / С.В. Храменков, В.А Орлов, В.А. Харькин. – М.: Стройиздат, 2002. – 160 с.

112. **Ху Т.** Целочисленное программирование и потоки в сетях / Т. Ху. – М.: Мир, 1974. – 519 с.

113. **Чернецкий В.И.** Математическое моделирование стохастических систем / В.И. Чернецкий. – Петрозаводск: Издательство Петрозаводского университета, 1994. – 488 с.

114. **Чугаев Р.Р.** Гидравлика / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 670 с.

115. **Чуклеев С.Н.** К вопросу о разрешимости нечетких уравнений / С.Н. Чуклеев // Модели выбора альтернатив в нечеткой среде. – Рига: РПИ, 1984. – С. 95-96.

116. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1970. – 418 с.

117. **Шестаков В.М.** Динамика подземных вод / В.М. Шестаков. – М.: Издательство Московского университета, 1978. – 368 с.

118. **Щербаков В. И.** Моделирование процесса коррозионного зарастания металлических трубопроводов городских систем водоснабжения / В.И. Щербаков // Проблемы использования водных ресурсов и экология гидросферы: Сб. материалов IV Межд. науч.-практич. конф. – Пенза, 2001. – С. 51-54.

119. **Щербаков В.И.** Анализ, техническая диагностика и реновация систем подачи и распределения воды на основе принципов энергетического эквивалентирования / В.И. Щербаков // Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. – Нижний Новгород, 2002. – 43 с.

120. **Эгильский И.С.** Автоматизированные системы управления технологическими процессами подачи и распределения воды / И.С. Эгильский. – Л.: Стройиздат, 1988. – 216 с.

121. **Эйкофф П.** Современные методы идентификации систем / П. Эйкофф. – М.: Мир, 1983. – 400 с.

122. **Dubois D.** Fuzzy sets and systems: Theory and applications / D. Dubois, H. Prade. – New York: Acad. Press, 1980. – 394 p.

123. **Dubois D.** Systems of linear fuzzy constraints / D. Dubois, H. Prade // Fuzzy Sets and Systems, v.3, N1, 1980. – P. 37-48.

124. **Godfrey K.R.** Identifiability of model parameters / K.R. Godfrey, J.J. Distefano // Identif. and Syst. Parameter Estimat. 1985. Proc. 7th IFAC/IFORS Symp., v.1", 1985. – Oxford. – P. 89-114.

125. **Jensen R. A.** Dynamic Programming Algorithm for Cluster Analysis / R.A. Jensen // OpenRes, №6, 1969. – P. 45-64.

126. **Savic D.A.** Gas Congestion Influence on Pipeline System Curve / D.A. Savic, G.A. Walters. – Miskolc, Hungary, 2002. – 92 p.

127. **Schwandt H. A.** Simmetric iterative interval method for system of nonlinearquations / H.A. Schwandt // Computing, N2, 1984. – P. 153-164.

128. **Zadeh L.A.** What is Soft Computer? // Soft Computing, N1, 1997. – P. 1-10.

129. **Zimmermann H.J.** Quantifying vagueness in decision models / H.J. Zimmermann, P. Zysno // European Journal of Operational Reseach, N22, 1985. – P. 148-158.