

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения
Российской академии наук



На правах рукописи

МИХАЙЛОВСКИЙ ЕГОР АНАТОЛЬЕВИЧ

**Разработка и апробация технологии объектно-ориентированного
моделирования гидравлических цепей на примере задач
потокораспределения**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ.

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
Новицкий Николай Николаевич

Иркутск, 2018

Оглавление

Введение	4
1. Анализ состояния вопроса и постановка задач исследования.....	13
Анализ проблематики ТГЦ как сферы приложения ИТ	13
1.1. Анализ современного уровня ИТ и их применения для компьютерного моделирования ТПС	21
1.1.1. Обзор ПВК для моделирования ТПС	21
1.1.2. Обзор современных ИТ	30
1.2. Основные выводы и постановка задач исследования	38
2. Разработка и обоснование принципов ООМ ГЦ на примере задач потокораспределения	43
2.1. Основные положения концепции ООМ ГЦ.....	43
2.2. Объектно-ориентированные модели элементов ТПС	48
2.3. Обобщение методов расчета потокораспределения.....	58
2.3.1 Модифицированный метод узловых давлений.....	58
2.3.2 Модифицированный метод контурных расходов.....	63
2.4. Основные выводы	68
3. Механизмы реализации технологии ООМ ГЦ	69
3.1. Обоснование подхода к реализации технологии ООМ ГЦ.....	69
3.2. Технология программной реализации моделей ТПС и методов ТГЦ...	71
3.3. Технология совместного применения моделей ТПС и методов ТГЦ ...	85
3.4. Основные выводы	93
4. Практическое применение технологии ООМ ГЦ.....	94
4.1. Методика практического применения технологии ООМ ГЦ для разработки ПВК.....	94
4.2. Характеристика программного обеспечения для расчета режимов ТПС в Интернет.....	97
4.2.1. Принципы и архитектура ПВК	97
4.2.2. Инструменты для поддержки моделей элементов ТПС	101

4.2.3. Пользовательский интерфейс и функции ПВК	104
4.3. Тестирование и практическое применение разработанных моделей, методов и ПВК	117
4.4 Основные выводы	124
Заключение	125
Список литературы	127
Приложения	136
Приложение 1.....	136
Приложение 2.....	137
Приложение 3.....	138

Введение

Актуальность темы. Трубопроводные системы энергетики (ТПС) (тепло-, водо-, нефте-, газоснабжения и другие) представлены весьма широким спектром развивающихся во времени и пространстве объектов, которые различны по назначению, масштабам, принципам построения и условиям работы. Эффективное решение задач управления их развитием и функционированием имеет важное социально-экономическое значение и непосредственно связано с уровнем применения современных методов математического и компьютерного моделирования.

В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН в рамках развиваемого здесь научного направления – теории гидравлических цепей (ТГЦ) [1–3] разработан уникальный арсенал методов математического моделирования, расчета и оптимизации, которые потенциально применимы для ТПС различного типа и назначения. Как в ИСЭМ, так и во многих других организациях, разрабатывается программное обеспечение для компьютерного моделирования ТПС на базе методов ТГЦ или их модификаций. Эти разработки, как правило, направлены на решение определенного класса задач в конкретной области применения (проектирование, эксплуатация, управление ТПС, обучение и др.) и применительно к конкретным типам ТПС (тепло-, водо-, газоснабжения и др.). Эта ситуация иллюстрируется на рисунке 1, где жирными точками выделены классы задач, решаемые общими методами ТГЦ в разных целях и для ТПС разных типов.

При этом среди конечных программно-вычислительных комплексов (ПВК) наблюдается дублирование одних и тех же методов расчета, а при разработке ПВК нового назначения эти методы заново программируются и адаптируются с учетом прикладной специфики. При появлении новых методов также приходится

переделывать или заново разрабатывать ПВК. Если программных комплексов несколько, то требуется внесение изменений в каждое программное решение, что зачастую сопровождается ошибками и ростом затрат на их устранение. На разработку, отладку, развитие и сопровождение таких ПВК затрачивается много времени и сил, в особенности, если они реализованы как монолитные единицы, например, в структурном стиле программирования.

Типы систем	Сферы применения			
	Проектирование (1)	Эксплуатация (2)	Диспетчерское управление (3)	И т.д... (N)
1 Теплоснабжающие	ПВК 1-1	ПВК 1-2	ПВК 1-3	ПВК 1-N
2 Водоснабжающие	ПВК 2-1	ПВК 2-2	ПВК 2-3	ПВК 2-N
3 Газоснабжающие	ПВК 3-1	ПВК 3-2	ПВК 3-3	ПВК 3-N
M Другие системы	ПВК M-1	ПВК M-2	ПВК M-3	ПВК M-N

Рисунок 1. Традиционный подход к разработке ПВК в области моделирования ТПС.

Наиболее выпукло эти проблемы проявляются в задачах анализа, связанных с расчетами потокораспределения, и функционально присутствующих практически во всех ПВК для компьютерного моделирования ТПС (см. рисунок 1).

Этим определяется актуальность разработки и применения новой технологии компьютерного моделирования ТПС, обеспечивающей возможности многократного применения общих методов математического моделирования ТПС в разных ПВК, для разных типов ТПС, классов решаемых задач и сфер применения.

В диссертации применительно к задачам потокораспределения предлагается два взаимосвязанных пути обеспечения общности программных реализаций методов расчета:

1) переход на концепцию объектно-ориентированного моделирования (ООМ) гидравлических цепей [4], с целью отделения программных компонент, реализующих общие методы, от компонент, отвечающих за специфику ТПС;

2) развитие самих методов расчета с ориентацией на эту концепцию.

Предмет исследования. Предметом данной работы является проблема обеспечения общности методов математического моделирования ТПС различного типа и назначения в сфере конечных технологий их компьютерного моделирования на примере задач анализа как базового класса задач ТГЦ.

Объект исследования – гидравлическая цепь (ГЦ) с сосредоточенными параметрами, как математическая модель, обеспечивающая возможность описания установившихся изотермических режимов широкого спектра ТПС различного типа, назначения, структуры и конфигурации. Основными объектами апробации были выбраны системы водо- и газоснабжения, как типичные представители систем транспорта несжимаемой и сжимаемой среды.

Цель и задачи работы. Цель работы – разработка и апробация на примере задач потокораспределения технологии ООМ ГЦ как средства отделения программных реализаций общих методов ТГЦ от прикладной специфики ТПС.

Для достижения этой цели в работе ставились следующие задачи:

1. Разработка и обоснование основных положений концепции ООМ ГЦ.
2. Разработка и систематизация объектных моделей течения среды для основных элементов ТПС.
3. Разработка объектно-ориентированных моделей установившегося потокораспределения и обобщение методов его расчета на случаи нетрадиционных соотношений для законов течения рабочей среды.
4. Разработка принципов и механизмов реализации технологии ООМ ГЦ.
5. Реализация предложенной технологии в виде распределенного ПВК для расчета методами ТГЦ гидравлических режимов ТПС различного типа в сети Интернет.

Научная новизна. Впервые предпринята попытка обеспечения потенциальной общности методов ТГЦ в сфере конечных информационно-вычислительных технологий, что позволило получить следующие новые результаты.

1. Разработаны основные положения новой технологии – ООМ ГЦ, обеспечивающей возможность отделения программных реализаций общих методов ТГЦ от прикладной специфики ТПС.
2. Разработаны принципы реализации объектных моделей элементов ТПС, обеспечивающие возможности применения общих методов независимо от специфики привлекаемых соотношений для законов сопротивления трению.
3. Разработаны новые численные методы расчета установившегося изотермического потокораспределения (модифицированные методы узловых давлений и контурных расходов), одновременно удовлетворяющие требованиям вычислительной эффективности и универсальности. Последнее проявляется в отношении новых возможностей учета широкого спектра соотношений для законов течения жидкости или газа, включая традиционные, неявные по расходу и зависимые от давления.
4. Разработаны и апробированы основные механизмы технологии ООМ ГЦ. В том числе: компонентная архитектура; требования к свойствам, методам и событиям компонент, реализующих модели элементов и модели ГЦ; правила взаимодействия компонент и координации вычислительных процессов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость результатов работы определяется вкладом в ТГЦ и методологию программной реализации ее методов, проявляющимся в повышении степени универсальности как самих методов ТГЦ для расчета потокораспределения, так и систем компьютерного моделирования ТПС.

Разработанная технология ООМ ГЦ может быть положена в основу нового поколения программных реализаций методов ТПС. Ее практическое применение обеспечивает возможности:

- 1) многократного применения единожды реализованных методов в существующих или вновь создаваемых ПВК для компьютерного моделирования ТПС;
- 2) использования этих методов как в локальных, так и в распределенных ПВК;
- 3) развития и наращивания потенциала ПВК без перепрограммирования имеющегося;
- 4) сокращения затрат на разработку, отладку, развитие и сопровождение ПВК;
- 5) повышения оперативности внедрения методов моделирования ТПС и расширения сферы их практического применения для различных типов ТПС и в разных целях.

Разработанные модели и методы расчета потокораспределения обладают большей универсальностью и вычислительной эффективностью по сравнению с традиционными и могут быть использованы для ТПС тепло-, водо-, газоснабжения и др. в практике их проектирования, эксплуатации и диспетчерского управления, в исследовательских и обучающих целях – для анализа пропускной способности ТПС, проведения поверочных расчетов вариантов развития ТПС, анализа причин и степени нарушений в режимах, разработки и обоснования вариантов их нормализации и т.д.

Разработанная технология ООМ ГЦ, математические модели, методы и алгоритмы расчета потокораспределения применены при разработке ПВК «ИСИГР» (Интернет Система Гидравлических Расчетов), предназначенного для моделирования гидравлических режимов ТПС водо- и газоснабжения. Данный ПВК впервые в отечественной и зарубежной практике обеспечивает возможности

удаленного применения методов ТГЦ в любое время, в любом месте и любому числу пользователей при наличии подключения к Интернет и стандартного веб-обозревателя. ПВК имеет все необходимые средства пользовательского интерфейса для занесения и визуализации схемно-параметрической информации, выполнения и интерпретации результатов расчета, однако, не требует установки на компьютеры пользователей и наличия у них высокопроизводительных ресурсов [5,6]. ПВК «ИСИГР» зарегистрирован в государственном реестре программ для ЭВМ [7]. С 2013 г. находится в открытом доступе (51.isem.irk.ru) и к настоящему времени с его помощью выполнены десятки тысяч расчетов для схем реальных ТПС пользователями из десятков городов России и ближнего зарубежья.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Задачи и результаты исследований диссертации соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по следующим пунктам.

П.1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.

П.3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

П.4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

П.8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

Методическая база: теория гидравлических цепей, теория графов, теория матриц, численные методы решения систем уравнений, математический анализ, теория математического и компьютерного моделирования, технологии объектно-ориентированного программирования и др.

Положения, выносимые на защиту:

1. Основные положения и механизмы реализации технологии ООМ ГЦ.
2. Принципы реализации объектных моделей элементов ТПС как ГЦ с сосредоточенными параметрами.
3. Модификация и апробация методов узловых давлений и контурных расходов для расчета установившегося изотермического потокораспределения в ГЦ при произвольных законах течения по отдельным элементам, включая традиционные, неявные по расходу и зависимые от давления.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность основных выводов и результатов работы определяется использованием многократно проверенного практикой модельного и методического аппарата ТГЦ, проведением многочисленных вычислительных экспериментов и расчетов условных и реальных ТПС (в их сопоставлении с результатами, полученными другими методами и другими авторами), успешной практикой широкого практического применения разработанного методического и программного обеспечения.

Основное содержание и результаты работы докладывались и обсуждались на:

1) международных конференциях и семинарах: «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий» (Россия, г. Сочи 2010); «Информационные системы и технологии в энергетике и жилищно-коммунальной сфере» (Украина, г. Ялта 2011); «Современные научные достижения» (Чехия, г. Прага, 2014); «Компьютерные технологии в городском и региональном хозяйстве» (Украина, г. Харьков 2015); «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (г. Иркутск, 2015); «Энергетика в современном мире» (Россия, г. Чита, 2017);

2) всероссийских конференциях и семинарах: «Современные проблемы

радиоэлектроники и связи» (г. Иркутск, 2010); «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (г. Иркутск, 2010, 2011); «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем» (г. Ялта, 2010, г. Вышний Волочек, 2012, г. Белокуриха, 2014, г. Иркутск, 2016); «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление» (г. Иркутск, 2015); «Конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям» (г. Иркутск, 2017);

3) конференциях молодых ученых ИСЭМ СО РАН «Системные исследования в энергетике» (г. Иркутск, 2009, 2010, 2011, 2012).

Публикации. Результаты исследований по теме работы опубликованы в 26 печатных работах. В том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК при Министерстве образования и науки РФ [4,5,6,8,9], две в иностранных журналах [10, 11], 2 работы в коллективных монографиях [12,13], 13 работ в сборниках трудов международных [14–19] и всероссийских [20–26] конференций, 4 работы в сборниках трудов локальных семинаров [27–30]. Получено свидетельство о государственной регистрации программ на ЭВМ [7].

Личный вклад автора. Результаты, приведенные в положениях, выносимых на защиту, а также их программная реализация получены лично автором. Формулировки задач и направлений исследований, интерпретация их результатов, а также теоретические обобщения методов анализа ГЦ выполнялись совместно с руководителем.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 135 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (100 наименований) и приложения (на 7 страницах).

В первой главе, имеющей обзорно-постановочный характер, приведен анализ текущего состояния ТГЦ, обзор накопленных проблем при реализации математических методов моделирования ТПС различного типа и назначения.

Рассматриваются вопросы развития средств компьютерного моделирования ТПС, а также возможностей современных информационных технологий потенциально применимых для разработки нового поколения ПВК. Дана содержательная постановка целей и задач исследования.

Во второй главе формулируются требования к новым реализациям методов ТГЦ, рассматриваются возможности получаемые при разработке ПВК в новых условиях, предлагаются объектно-ориентированные модели элементов ТПС, определяются положения концепции ООМ, применительно к моделированию ТПС на примере задачи потокораспределения в ГЦ с сосредоточенными параметрами. Построена обобщенная модель потокораспределения, разработаны новые численные методы и алгоритмы его расчета.

В третьей главе приведено обоснование подхода к реализации технологии ООМ ГЦ, предлагается способ программной реализации моделей элементов ТПС и методов ТГЦ с вариантом их взаимодействия на примере задачи потокораспределения.

В четвертой главе предложена методика практического применения технологии ООМ ГЦ, приведена характеристика, принципы и архитектура распределенного ПВК, разработанного на базе этой технологии, а также программные средства информационной поддержки реализаций объектно-ориентированных элементов ГЦ для автономного и независимого использования. Демонстрируются возможности и результаты тестирования разработанного ПВК, алгоритмов, методов и моделей ТПС.

В заключении представлены основные результаты работы.

В приложениях представлены свидетельство государственной регистрации, справки о практическом применении ПВК и список основных сокращений.

1. Анализ состояния вопроса и постановка задач исследования

В данной главе приведен анализ текущего состояния ТГЦ, обзор накопленных проблем при реализации математических методов моделирования ТПС различного типа и назначения. Рассматриваются вопросы развития средств компьютерного моделирования ТПС, а также возможностей современных информационных технологий (ИТ) потенциально применимых для разработки нового поколения ПВК.

Анализ проблематики ТГЦ как сферы приложения ИТ

Проблематика ТГЦ. Теория гидравлических цепей [1–3] – относительно новое междотраслевое научное направление, сформулированное в начале 60-х годов прошлого века в Сибирском энергетическом институте СО РАН (ныне ИСЭМ СО РАН) В.Я. Хасилевым, получившее оформление и признание в 70-90 годах под руководством чл.-корр. РАН А.П. Меренкова и продолжающее интенсивно развиваться в настоящее время как в ИСЭМ, так и в других организациях.

Предметом теории являются общие методы математического моделирования, расчета и оптимизации, потенциально применимые для любых трубопроводных и гидравлических систем. Данное научное направление не имеет аналогов в стране и за рубежом, позволяет преодолеть ведомственную разобщенность исследований, обеспечивает основу системного подхода к наиболее важным методическим проблемам математического описания, расчета и оптимизации ТПС.

Термин «гидравлическая цепь» (ГЦ) [1] призван отразить равнозначность

математического и физического аспектов рассмотрения и изучения реальных объектов, а также органическую связь с теорией электрических цепей. Последняя существует уже 150 лет, начиная с основополагающих работ Ома (1827 г.) и Кирхгофа (1847 г.), Гельмгольца (1853 г.) и Максвелла (1873 г.). Для гидравлических систем общей физико-математической базы долгое время не было. Объяснялось это наличием существенной нелинейности зависимостей, используемых в ГЦ, что усложняло применение общих методов в условиях ручного счета. Ситуация изменилась с появлением вычислительной техники, бурным развитием ТПС и резким возрастанием сложности и важности задач их проектирования, развития и эксплуатации.

Можно выделить три основных класса задач, имеющих общее значение для ТПС различного типа и назначения: анализа, синтеза и управления. Они возникают практически на всех этапах жизненного цикла ТПС (при планировании развития, эксплуатации и диспетчерском управлении).

Методы решения этих классов задач проработаны в разной степени, на что влияют изменения запросов практики, а также расширение области приложения самой теории. К настоящему времени можно считать сложившимися следующие разделы ТГЦ.

Алгебра ГЦ – единый формализованный векторно-матричный язык, обеспечивающий компактность математического описания ТПС как многомерных объектов сетевой структуры, а также наглядность основных закономерностей, идей и методов расчета.

Модельный аппарат – математические модели потокораспределения в ГЦ с сосредоточенными, переменными и распределенными параметрами. Позволяет классифицировать все разнообразие возможных описаний ТПС и обоснованно применять как сами модели, так и расчетные методы.

Анализ ГЦ – методы решения прямых задач потокораспределения. Модельный аппарат и методы расчета потокораспределения являются

фундаментом теории, поскольку в том или ином виде присутствуют во всех перечисленных выше классах задач.

Идентификация ГЦ – сетевые подходы, математические модели и методы для восстановления адекватных моделей ТПС по результатам измерений или наблюдений за их функционированием. Их также можно классифицировать как обратные задачи потокораспределения, вследствие того, что искомые и задаваемые величины в исходных моделях здесь полностью или частично меняются ролями.

Синтез ГЦ – совокупность подходов и методов оптимизации структуры и параметров вновь создаваемых или развивающихся ТПС. Эти методы позволяют решать технико-экономические задачи выбора конфигурации систем, размещения мощностей и параметров основных элементов ТПС с учетом ограничений по надежности и др.

Уровень развития и применения методов расчета потокораспределения. Трубопроводные системы, как сложные и масштабные технические сооружения, отличаются своим назначением, масштабами, принципами построения и условиями функционирования. Здесь можно выделить: 1) технологические ТПС промышленных предприятий и крупных технологических установок, а также промысловые нефтегазосборные системы, системы поддержания пластового давления и др.; 2) коммунальные системы тепло-, водо-, газоснабжения населенных пунктов; 3) региональные и межрегиональные системы магистральных нефте- и газопроводов, групповые водопроводы; 4) большие системы типа Единых систем нефте- и газоснабжения, а также системы тепло- и водоснабжения крупных городов и агломераций. Такие системы сами стали объектом исследований, что потребовало разработки оригинальных методов анализа, оптимального синтеза и управления.

Компьютерные программы, реализующие методы потокораспределения для расчета режимов, широко применяются при проектировании, эксплуатации и

диспетчерском управлении ТПС.

При проектировании ТПС – они используются на этапе разработки схем развития с целью анализа: 1) пропускной способности системы на перспективные нагрузки; 2) функционирования системы в непроектных режимах (поверочные расчеты); 3) степени надежности снабжения потребителей после реализации проекта системы.

При эксплуатации ТПС – с целью: 1) анализа допустимости режима и уровня рационального снабжения; 2) выявления причин нарушения режима снабжения; 3) разработки оптимального зонирования или секционирования системы; 4) планирования графиков работы оборудования (насосных станций, резервуаров и др.); 5) определения оптимальных мест установки автоматически регулирующего оборудования и параметров его настройки; 6) оценки возможности подключения новых потребителей к системе; 7) анализа потенциальных последствий аварий и разработки сценария действий диспетчерских служб при этом; 8) определения резервов пропускной способности сетей и др.

При диспетчерском управлении ТПС эти методы применяются для моделирования результатов управляющих воздействий на систему в период ликвидации последствий аварий или ремонтно-восстановительных работ.

Задачи потокораспределения имеют не только самостоятельное значение, но и часто применяются при решении других задач, например при:

- имитационном моделировании динамики режимов ТПС (квазидинамический подход) [31,32];
- оптимизации параметров (метод многоконтурной оптимизации [33], методы эволюционного поиска [34]);
- планировании режимов (многовариантные наладочные расчеты [35,36]);
- идентификации параметров ТПС [37];

- определении начального приближения при расчете нестационарных режимов [37] и т.д.

С точки зрения физики протекающих процессов выделяют: изотермические и неизотермические (по признаку зависимости потокораспределения от температуры транспортируемой среды); установившиеся (стационарные) и неуставившиеся (нестационарные) режимы (по признаку степени изменчивости потокораспределения во времени); режимы потокораспределения однородной и неоднородной, сжимаемой или несжимаемой среды и т.д. В ТГЦ все эти случаи сводятся к трем типам математического описания потокораспределения в ТПС как ГЦ:

1) с сосредоточенными параметрами, когда все технические характеристики узлов и ветвей, а также граничные условия считаются константами, не зависящими от того или иного потокораспределения (такие цепи моделируют реальные системы как системы с изотермическим течением несжимаемой жидкости);

2) с переменными параметрами, когда хотя бы часть технических и гидравлических параметров или граничных условий задается в виде функций от искомых величин, так что их фактические значения являются переменными и зависят от потокораспределения;

3) с распределенными параметрами – в случае наиболее строгого описания совместного изменения гидравлических параметров элементов ГЦ распределенных по длине и/или во времени.

В период зарождения ТГЦ как самостоятельного научного направления уже существовал ряд инженерных методов расчета установившегося потокораспределения в многоконтурных ГЦ с сосредоточенными параметрами известных по фамилиям Андрияшева М.М., Лобачева В.Г., Кросса Х. [38–40]. С появлением ЭВМ эти методы по инерции переводились на машинный язык, а массовые расчеты быстро выявили их ограниченные возможности [1]. С развитием ТГЦ были систематически исследованы, с общих позиций метода Ньютона [41,42], вопросы решения систем нелинейных алгебраических

уравнений потокораспределения. В итоге были разработаны обобщенные методы контурных расходов (МКР) и узловых давлений (МД). Обзор аналогичных методов, постановок задачи потокораспределения (экстремальный, алгебраический) и другие аспекты расчета режимов ТПС приведены в [1], где сказано, что они не имеют убедительных преимуществ перед МД и МКР. То же касается и современных авторов, развивающих альтернативные решения задачи потокораспределения, например, на основе вариаций метода простой итерации [43–46]. Обзор зарубежных методов и постановок задач моделирования ТПС приведен в [47, 48]. Весьма оригинальным выглядит способ линеаризации модели потокораспределения и получившиеся новые методы хорд и секущих [49]. Отдельно стоит отметить разработки Иродова В.Ф. на базе метода эволюции для решения систем нелинейных уравнений [50,51].

Несмотря на наличие обобщенных МД и МКР продолжают попытки разработки новых методов расчета с целью учета специфических особенностей отраслевой принадлежности ТПС.

Например, одну из наиболее ранних исследований в области газотранспортных систем можно выделить работу Сухарева М.Г. [52], где дается матричная форма систем уравнений законов Кирхгофа на примере газосборных сетей, а также общее доказательство сходимости для нее метода простых итераций. В соавторстве со Ставровским Е.Р. монография [53] содержит уже общие исходные положения, математические модели, методы и алгоритмы для изучения и расчета магистральных газопроводов, газосборных и газораспределительных сетей. Там же говорится об успешном решении отдельных задач транспортировки газа при различных упрощающих предположениях, например использование стационарной изотермической модели потокораспределения.

С учетом предложенного Немудровым А.Г. и Черникиным В.И. способа моделирования компрессоров и компрессорных станций [54], в работах таких

известных авторов как Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д., Панкратов В.С., Дубинский А.В., Сиперштейн Б.И. и др. [55–57], решаются практические задачи на фоне преодоления трудностей применения общих методов ТГЦ при анализе и диспетчерском управлении в системах газоснабжения. В частности, утверждается, что моделирование режимов магистральных газопроводов с нетрадиционными зависимостями вызывает сложности применения единого сетевого метода, при этом классические методы потокораспределения ТГЦ в таких случаях вообще неприменимы. Такие же трудности наблюдаются у Ионина А.А. в отношении задачи подбора диаметров при проектировании сети газоснабжения, где режим работы пассивной её части моделируется отдельно от активных элементов [58]. В работе Левина А.А. [59] моделируются пароводяные тракты котлов и турбин, где также присутствуют особенности учета сжимаемости среды при решении задачи потокораспределения в ГЦ с переменными параметрами.

Алгоритмический способ решения задачи расчета допустимого режима работы магистральных газопроводов для системы с распределенными параметрами приводится у Сарданашвили С.А. [60]. В этой работе автор одним из первых применил объектно-ориентированный подход к моделированию ГЦ, где каждый элемент моделировался индивидуальным объектом, а их взаимозависимость позволяла выполнять расчеты по некоторому алгоритму. Тем не менее, анализ предложенных алгоритмов показал, что используемая итерационная формула аналогична той, которая применяется в «увязочном» МД (т.е. без учета взаимовлияния между узлами). При этом большая размерность и необходимость учета нелинейных ограничений (компрессорные станции) в задаче потокораспределения вызывает неустойчивость расчетного процесса и может привести к несоблюдению материального баланса в узлах системы, что требует декомпозиции расчетной схемы на подсистемы меньшей размерности. Расчет таких подсистем предлагается выполнять поочередно «на разных уровнях».

Другой пример приведен Л.Б. Корельштейном [61], где в процессе расчета потокораспределения методом глобального градиента, предложенным Тодини Е. [62], осуществляется переход от распределенных по длине параметров к сосредоточенным за счет усреднения, а в случае протяженных трубопроводов участки разбиваются на фрагменты, что упрощает вычисления, но ведет к увеличению размерности схемы.

Для этих и других случаев в ТГЦ была разработана универсальная методика вложенных циклов итераций [1], обеспечившая возможность расчета ГЦ с переменными и распределенными параметрами путем многократного применения методов расчета ГЦ с сосредоточенными параметрами. Эта техника оказалась весьма плодотворной и получила широкое применение в конкретных программных комплексах. Таким же образом решались вопросы расчета потокораспределения в тепловых сетях с регулирующими устройствами [63], учета неизотермичности, сжимаемости, неоднородности транспортируемой среды и др. факторов в газовых сетях [1], системах магистральных нефтепроводов [64], системах водоснабжения с нефиксированными нагрузками [65,66] и т.д.

К сожалению, эффективность методики вложенных циклов итераций не удовлетворяет многих исследователей, что вынуждает их разрабатывать собственные методы расчета. Такие методы, однако, сводятся либо к этой методике, либо предполагают увеличение размерности решаемой системы уравнений, например, относительно давлений и расходов одновременно [55].

Все это, в сочетании с повышенными требованиями к надежности и быстродействию расчетных методов и реализующих их компьютерных программ, делает весьма актуальным развитие методов математического моделирования для задач анализа функционирования ТПС.

Для оценки основных факторов, сдерживающих расширение сферы применения общих методов ТГЦ, необходимо проанализировать существующее

состояние имеющихся ПВК, а также потенциальных возможностей современных ИТ с целью их применения в сфере моделирования ТПС.

1.1. Анализ современного уровня ИТ и их применения для компьютерного моделирования ТПС

Приведем анализ имеющихся на рынке программного обеспечения ПВК, пригодных для практического применения. Рассмотрим также программные средства общего назначения на предмет их адаптации к области моделирования ТПС разного назначения. Выполним анализ эффективности применения наиболее распространенных ИТ разработки ПВК.

1.1.1. Обзор ПВК для моделирования ТПС

В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева с 1960-х годов в рамках теории ТГЦ разрабатывается модельный аппарат, методы расчета и оптимизации, применимые в принципе к любым типам ТПС (тепло-, водо-, газоснабжения и др.).

За это время в ИСЭМ сменилось 4 поколения программных реализаций этих методов: отдельные программы, реализующие тот или иной метод расчета; пакеты прикладных программ, оснащенные формализованными процедурами автоматизированной обработки и анализа входной и выходной информации; ПВК, позволяющие решать несколько сопряженных задач или одну задачу разными методами; диалоговые вычислительные системы, обеспечивающие возможность активной работы с исходными данными и оперативного управления процессом счета. Со сменой поколений расширялись не только потенциальные возможности программ, но и удобство их применения, чему способствовало развитие самих

ЭВМ: БЭСМ-2, БЭСМ-6, ЕС, ПК и языков программирования: машинный код, ФОРТРАН, АЛГОЛ и т.д.

Первая монография, упоминающая о разработке компьютерной программы для моделирования ТПС, была издана в 1978 году [63]. С развитием самой теории появлялись новые ПВК, расширяющие спектр направлений применения методов математического моделирования и оптимизации систем централизованного снабжения рассредоточенных потребителей воды, тепла, нефти и газа [67]. В ответ на вызовы времени и запросы практики последнее поколение программных реализаций методов ТГЦ ориентированы на применение в рамках новой информационно-вычислительной технологии, названной информационно-вычислительной средой «АНГАРА» [68].

Рынок программного обеспечения для компьютерного моделирования ТПС достаточно широк, поэтому для сравнения выбраны наиболее известные программные продукты только для трех типов систем (тепло-, водо-, газоснабжения).

Приведенное ниже сравнение (таблица 1.1-1.4) выполнялось по 4 критериям:

- объекты применения (типы ТПС);
- классы решаемых задач;
- пользовательские характеристики;
- сферы применения.

Таблица 1.1. Объекты применения программных комплексов разных разработчиков.

Программный пакет	Тип системы		
	Тепло-снабжение	Водо-снабжение	Газо-снабжение
АНГАРА, ИСЭМ СО РАН, Россия, Иркутск*	+	+	+
Zulu, Политерм, Россия, Санкт-Петербург (www.politerm.com)	+	+	+
CityCom, Поток, Россия, Москва (www.citycom.ru)	+	+	+
EPANET, США (www.sunrise-sys.com)	–	+	–
Bentley, США (www.bentley.com)	+	+	+
Mike Urban, Дания (www.mikepoweredbydhi.com)	–	+	–
Simone, Чехия (www.simone.eu)	–	–	+
Termis, Дания (www.schneider-electric.ru)	+	–	–
PipeFlow, Англия (www.pipeflow.com)	–	+	+

* Имеется унаследованное программное обеспечение (находящееся в процессе интеграции в комплекс) для моделирования систем поддержания пластового давления, газосборных и газораспределительных сетей, сетей паропроводов, систем магистральных нефтепроводов и др.

Таблица 1.2. Классы решаемых задач ПВК разных разработчиков.

Программный пакет	Классы задач							
	Потокораспределение	Неизотермическое потокораспределение	Расчет допустимых режимов	Расчет и локализация аварийных ситуаций	Расчет оптимальных режимов	Расчет динамики режимов	Идентификация	Анализ свойств (идентифицируемость, управляемость, Эксплуатационная надежность и др.)
АНГАРА, ИСЭМ СО РАН, Россия, Иркутск	+	+	+	+	+	*	*	*
Zulu, Политерм, Россия, Санкт-Петербург	+	+	–	+	–	–	–	–
CityCom, Поток, Россия, Москва	+	+	–	+	–	–	–	–
EPANET, США	+	–	–	–	–	–	–	–
Bentley, США	+	+	+	+	+	–	+	–
Mike Urban, Дания	+	+	–	–	–	+	–	–
Simone, Чехия	+	–	–	+	–	+	–	–
Termis, Дания	+	+	–	+	+	+	–	–
PipeFlow, Англия	+	+	–	–	+	–	–	–

* Имеется программное обеспечение для исследовательских целей. Планируется его доведение до уровня практической применимости.

Таблица 1.3. Сравнение сфер применения наиболее распространенных аналогов.

Программный пакет	Сфера применения		
	Проектирование	Эксплуатация	Диспетчерское управление
АНГАРА, ИСЭМ СО РАН, Россия, Иркутск	+	+	+
Zulu, Политерм, Россия, Санкт-Петербург	+	+	–
CityCom, Поток, Россия, Москва	+	+	*
EPANET, США	+	+	–
Bentley, США	+	+	+
Mike Urban, Дания	+	+	–
Simone, Чехия	+	+	–
Termis, Дания	–	+	+
PipeFlow, Англия	+	+	–

* Частично реализовано.

Таблица 1.4. Сравнение пользовательских характеристик наиболее распространенных аналогов.

Программный пакет	Классы задач									
	Совместимость с ГИС	Совместимость с СУБД	Открытость по данным	Открытость по функциям	Сетевой режим работы	Работа с ТПС разных типов	Создание представлений схемы с разной детализацией	Одновременное моделирование ТПС разных типов на едином плане	Поддержка многоуровневых иерархически связанных расчетных моделей	Русскоязычный интерфейс
АНГАРА, ИСЭМ СО РАН, Россия, Иркутск	*	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zulu, Политерм, Россия, Санкт-Петербург	+	–	–	+	+	+	–	+	–	+
CityCom, Поток, Россия, Москва	–	+	+	–	+	+	–	–	–	+
EPANET, США	–	–	+	**	–	–	–	–	–	–
Bentley, США	+	+	+	+	+	+	–	+	–	–
Mike Urban, Дания	+	+	+	+	+	+	–	+	–	+
Simone, Чехия	–	–	–	+	+	–	–	–	–	–
Termis, Дания	+	+	+	–	+	–	***	–	–	+
PipeFlow, Англия	–	+	–	–	–	+	+	–	–	–

* На уровне импорта–экспорта графических файлов.

** Нет, но доступен исходный код программы.

*** Частично реализовано.

Стоит отдельно отметить опыт разработки и применения ПВК для тренировки и обучения диспетчерского персонала эксплуатирующих организаций. Как известно, магистральные системы транспорта нефти и газа имеют большую протяженность, удаленность объектов и органов управления от диспетчерских и обслуживающих пунктов, привязанность к добывающим предприятиям и конечным точкам потребления. Масштаб и сложность решаемых задач для этих систем предъявляют повышенные требования к квалификации диспетчерского персонала. В нефтегазовой, как и в любой другой, сфере наибольшую опасность представляют отказы технологического оборудования, аварии на участках трубопровода, что приводит к большим экономическим потерям и экологическим проблемам. В связи с этим, диспетчерский персонал систематически тренируется и отрабатывает оперативные действия по предотвращению таких аварий на учебно-тренировочных задачах, разрабатываемых на конкретную систему или район. Наибольшая эффективность тренировок достигается благодаря компьютерным тренажерным комплексам (Сарданашвили С.А.) [69].

В настоящее время набирает популярность разработка программ для моделирования ТПС в сети Интернет. Например, существуют простейшие программные калькуляторы для вычисления гидравлических параметров одной трубы водопровода по формуле Хазена-Вильямса [70], Дарси-Вейсбаха или А.Д. Альтшуля [71]. Для решения задачи потокораспределения в водопроводных сетях произвольной конфигурации предназначена веб-программа PLUMBING.WEB [72], однако, не имеющая современных возможностей интерактивного создания, редактирования и ввода исходных данных.

Обзор ПВК для моделирования ТПС показал множество частичных пересечений их возможностей, специально подобранных под конкретную сферу применения. Очевидно, что наиболее выгодным, с точки зрения экономии сил и средств, шагом по расширению сферы применения и адаптации на новые типы

ТПС было бы внедрение технических возможностей развития этих ПВК. Тем не менее, такими техническими возможностями обладают не все. Например, продукт «Zulu» фирмы «Политерм» использует собственный тип файлов хранения данных, что не позволяет свободно оперировать информацией и выполнять конвертацию из несогласованных форматов. Однако имеется доступ по функциональным возможностям: добавление новых функций, расширение состава компонентов, адаптация под разные цели пользователя, но только той части, которая касается ГИС.

Внутренние резервы программ, под общим названием «CityCom», наоборот, – невозможно задействовать ввиду отсутствия возможности их расширения, но применяемый формат хранения данных о схеме и параметрах моделируемого оборудования широко распространен, что не вызывает трудностей доступа к информации с помощью других программ.

Программа «EPANET» была разработана в результате объединения достижений в области расчета режимов систем водоснабжения с целью стандартизации перспективных разработок на ее основе за рубежом (1993 г.), чему способствует открытый исходный код. Возможности ИТ того времени не позволяли развивать и расширять программу без рекомпиляции и модификации ее кода. При этом, пользовательские характеристики графического интерфейса, на сегодня, являются морально устаревшими, что требует его глубокой модернизации. Существует вариант реализации «EPANET» в виде веб-приложения, но интерфейс позволяет задавать исходные данные только в текстовом виде, что на сегодня является крайне неудобным [73]. «Mike Urban» – разработан как надстройка для программы «ArcGIS», имеющей механизм внедрения расширений и открытый формат данных, но за моделирование ТПС отвечает адаптированный «EPANET» со всеми его недостатками.

«Bentley» – корпорация, специализирующаяся на проектировании инженерных решений в разных областях техники от постройки производственных

площадок и заводов до транспортной инфраструктуры, в том числе, для систем водо-, тепло- и газоснабжения. Программы, выпускаемые «Bentley», для моделирования ТПС обеспечивают взаимодействие с популярными ГИС на уровне форматов файлов и открытых программных функций, позволяющих расширять возможности конечных ПВК. Тем не менее, развивать ПВК этой фирмы на новые типы ТПС невозможно без повторного программирования тех же методов и моделей в процессе адаптации к специфике объекта приложения.

ПВК «Simone» дает возможность решать задачи анализа и оптимизации режимов применительно к системам газоснабжения низкого и высокого давления, моделировать переходные процессы системы в реальном времени. Последнее обеспечивается с помощью интеграции с технологическими средствами сбора данных телеметрии, параметров оборудования и биллинговых комплексов. Закрытый формат хранения данных и отсутствие общедоступных возможностей интеграции новых функций не позволяет развивать этот ПВК на новые задачи и расширять на новые типы ТПС.

Классический пример зарубежных программных комплексов для моделирования теплоснабжающих систем – «Termis» и его аналог для водоснабжения – «Aquis». Очевидно, что данные ПВК во многом сдублированы относительно своего графического интерфейса, его функций и компонентов, что накладывает дополнительные трудности дальнейшего развития и поддержки для разработчиков.

«PipeFlow» – один из представителей ПВК, предназначенный для анализа режимов произвольных типов систем общими методами. Этот комплекс, с одной стороны, не имеет предусмотренных механизмов расширения возможностей моделирования ТПС, например, добавления новых методов расчета, с другой, ограничен по максимально поддерживаемой размерности схемы в 1000 связей, что на современном этапе развития компьютерной техники очень мало.

Эти и другие проблемы были решены в ИСЭМ разработкой уникальной технологии настройки информационного окружения на любые типы ТПС неограниченной размерности и классы решаемых задач [68]. ИВС «АНГАРА» позволила отделить оболочку общего назначения от вычислительных блоков, что является первым шагом к отделению общих методов ТГЦ от специфики ТПС и их многократному использованию при однократной реализации.

Таким образом, основным сдерживающим фактором развития ПВК является отсутствие потенциальных возможностей расширения имеющихся в этих ПВК средств моделирования без участия разработчика или повторного программирования тех же методов и моделей. С одной стороны, расширение таких ключевых блоков как расчетный алгоритм метода и специфичных признаков контекста решаемой задачи вполне реализуемо на логическом уровне. С другой, интенсивное развитие ИТ дает новые и перспективные средства и технологии для разработки компьютерных программ, которые потенциально позволяют перейти с логического на программный уровень. Однако эти средства не используются.

Программные среды общего назначения для разработки ПВК. Геоинформационные системы (ГИС) стало популярным применять в качестве базовых программ для разработки ПВК и интеграции компонент. ГИС предназначены для сбора, хранения, анализа и графической интерпретации пространственных данных и связанной с ними информации. ГИС также автоматизируют различные операции (поиск, сравнение, редактирование и т.д.) и имеют возможность подключения пользовательских компонент через различные механизмы для адаптации к отраслевым задачам. Все же основная функция ГИС – информационная, а не прикладного моделирования, поэтому необходима существенная доработка в виде различных специфических особенностей. Например, в ГИС отсутствует принципиальная возможность формирования топологии расчетных схем и, вместе с ними, активных графических элементов,

представляющих схему сети, отдельно от элементов ландшафта. Более того, на фоне высокой начальной стоимости большинство функций ГИС остаются не востребованными, а стоимость конечных программ на их базе, соответственно, возрастает [74].

Системы автоматизированного проектирования (САПР), например, таких известных фирм как «Автокад» (США, см. www.autodesk.ru), «Нанокad» (Россия, см. www.nanocad.ru) также применяются для разработки ПВК на их основе. Развитые средства редактирования и управления графическими примитивами САПР в купе со средствами моделирования ТПС обеспечивают решение множества прикладных задач в области проектирования инженерных систем. Однако в таких ПВК наблюдаются аналогичные проблемы: отсутствие автоматического построения топологии схемы; функции и высокая детализация проектной части являются излишними для моделирования ТПС; настройка моделей на предметную область является самостоятельной задачей высокой трудоемкости и стоимости; покупка САПР только ради использования графического редактора для автоматизации подготовки проектных чертежей в конечном ПВК является экономически не выгодным.

«SCADA» (от англ. Supervisory Control And Data Acquisition) – направление программных пакетов, предназначенных для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления. Определяющим фактором применения таких пакетов для разработки ПВК является возможность настройки интерфейса диспетчера для работы с данными реальных измерений на схемах и графиках. Потенциально SCADA-системы позволяют подключать расчетно-аналитические модули анализа режимов, прогнозирования нагрузок и др., что составляет самостоятельную задачу. В качестве схемы сети предлагается ее принципиальный вариант (мнемосхемы отдельных сооружений, ситуационный план с основными сооружениями или узлами сети, где ведется управление),

обеспечивающий индикацию подключения технологического оборудования и его работу без привязки к местности.

Таким образом, программные среды общего назначения (с точки зрения областей возможного применения) для разработки ПВК не содержат средств моделирования ТПС, а предполагают выполнение самостоятельной трудоемкой работы по оснащению такими средствами. Рассмотрим наиболее известные ИТ, которые потенциально применимы для разработки ПВК универсального назначения.

1.1.2. Обзор современных ИТ

На сегодняшний день применение на практике разработанного методического потенциала ТГЦ невозможно без использования современных ИТ. С их помощью автоматизируются и ускоряются рутинные операции подготовки и анализа данных, управления расчетами, анализа из результатов, упрощаются процессы развития и внедрения методов, резко сокращается время принятия решения на основании результатов применения соответствующих приложений.

Стили программирования. Относительно недавно, расчет потокораспределения с помощью соответствующих методов и моделей выполнялся вручную, однако, применение ИТ позволило адаптировать эти методы и модели к вычислительным машинам, что привело к новому подходу – компьютерному моделированию объектов исследования. Этот переход был обеспечен благодаря языкам программирования и разработке алгоритмов с их помощью. Одним из популярных ранее и, в тоже время, самых простых стилей написания алгоритма программы был структурный стиль, описанный выше. Сегодня разработка программ и развитие ИТ происходит на базе языков программирования высокого уровня в стиле объектно-ориентированного программирования.

Объектно-ориентированное программирование (ООП) [75] – технология программирования, основанная на представлении программы в виде совокупности объектов, каждый из которых является экземпляром определенного класса, которые образуют иерархию наследования. ООП использует в качестве основных логических конструктивных элементов объекты, а не алгоритмы (или процедуры), что позволяет более эффективно справляться со сложностью разработки конечных программ.

Под объектом понимается некоторая программная сущность с набором собственных свойств (параметров) и методов. В зависимости от набора свойств и методов с помощью объекта можно описывать, например, различные модели из области гидравлики. Так, объект «транспортируемая среда» будет иметь свойства: вязкость, плотность, температура и давление. Внутренний метод будет отвечать за расчет плотности и вязкости по заданным давлению, температуре и некоторой запрограммированной формуле. Стил ООП опирается на следующие важные понятия, строго характеризующие правила работы с объектами их классами:

- наследование – позволяет описывать объекты с помощью классов, каждый из которых может дополнять другой (родительский) класс;
- полиморфизм – позволяет использовать объекты с одинаковым интерфейсом без информации о типе и внутренней структуре объекта, что дает возможность взаимодействовать программе с разными объектами одинаково;
- инкапсуляция – позволяет объединить данные (свойства) и методы, работающие с ними, в классе, что обеспечивает изменение реализации класса независимо от всей программы;
- абстракция – позволяет контролировать доступ программы к свойствам и методам объекта, скрывая внутренние детали реализации класса от всей программы, которая взаимодействует только с разрешенными методами и свойствами.

Как правило в литературе по объектно-ориентированным языкам уделяется внимание вопросам реализации, а не общим правилам и методикам проектирования исходя из особенностей предметной области. Однако языки ООП в широком смысле полезны тем, что обладают гибкостью, нехарактерной для структурных языков, что позволяет применять объектно-ориентированный стиль не только для реализации механизмов программ, но и для объектно-ориентированного представления предметной области.

ООМ. Технология ООП предоставляет универсальный инструмент объектного представления предметной области, но не дает рекомендаций о том, как разделить конкретную область и на какие объекты (сущности). Критерии детализации и состав объектов может быть разным и зависит от особенностей предметной области.

В области ИТ для разработки сложных и современных программ применяется концепция ООМ [76]. Применение ООМ предполагает выработку эмпирических правил в рамках конкретного случая и предметной области используемых для проектирования программы в виде совокупности объектов, объединяющих однотипные операции алгоритма программы, например, с целью исключения дублирования этих операций, повторного использования реализованных объектов, удобства программирования и т.д. Процесс проектирования программы сводится к построению ее модели в виде различных блок-схем, отражающих требуемые аспекты (свойства) поведения и этапы разработки конечной программы [77]. При этом, как правило, привлекаются различные программные инструменты направленные на облегчение процесса разработки и восприятия получаемых результатов. И чем сложнее будущая программа, тем актуальнее становится необходимость применения ООМ в процессе разработки. Поскольку современное проектирование программ, в большей степени, опирается на основные понятия ООП, то центральным методом

их разработки является декомпозиция на взаимосвязанные объекты с множественным наследованием классов [78].

Вместе с тем, создание, развитие и потребительские качества конечных программ взаимно обуславливаются необходимостью многократного использования реализованного программного кода. Объект, как основная единица структуризации и разработки программ, может быть реализован отдельно от основной программы. Далее приводится обзор наиболее распространенных способов разделения программы на составляющие и обеспечения их взаимодействия.

Способы реализации объектов. Рост сетевых коммуникаций аппаратного обеспечения открывает широкие возможности развития и распространения приложений. Для разработчиков, с одной стороны, упрощаются некоторые задачи поддержки и внедрения программ, с другой, ставятся принципиально новые задачи на базе постоянно развивающихся и сменяющих друг друга технологий. Для пользователей это реализация постоянно растущих потребностей к гибкости и функциональности приложений, качественному улучшению характеристик интерфейса взаимодействия на фоне требований к надежности программного обеспечения. Для обеих сторон это новая парадигма принципов взаимодействия программ и компонент, позволяющая говорить о следующем этапе развития ПО для моделирования ТПС. Данные возможности обеспечиваются благодаря решению двух проблем.

Исторически первой решалась проблема экономии оперативной памяти компьютеров программами, которые разделялись на отдельные файлы (модули и подпрограммы) для их независимого развития и многократного применения в других программах. Так появился способ DLL.

«DLL» (от англ. Dynamic-link library) – динамически подключаемая библиотека, идея применения которой заключалась в динамической загрузке исполняемой процедуры (некоторой части «DLL») в память компьютера по

требованию и последующей ее выгрузке для освобождения места для следующей процедуры. Рост технических возможностей компьютеров позволил от этого отказаться в пользу полной загрузки «DLL» в память компьютера. Теперь «DLL» применяется для разделения программ на дискретные модули для их многократного применения при однократной реализации. Развитие существующих и подключение новых «DLL» позволяет расширять возможности, не переделывая программу целиком. Однако отсутствие универсального способа вызова методов из библиотек и стандартизованного формата входных/выходных данных ограничивает выбор языков разработки приложений на базе готовых «DLL».

Вторая проблема заключалась в необходимости организации взаимодействия между разными программами и компонентами. Для этого в индустрии разработки программного обеспечения стали развивать различные способы межпроцессного взаимодействия (Interprocess Communications), алгоритмы которых, в основном, облачали в «DLL» для оперативного подключения. Так появились компоненты для сетевого доступа, двустороннего обмена данными и отслеживания изменений данных между потоками в одном и более процессах. Процессы могут быть запущены на одном или более компьютерах, связанных между собой сетью. Ниже приведены наиболее распространенные способы межпроцессного взаимодействия.

«Data Copy» – метод позволяет передавать данные от одного приложения другому посредством либо системного буфера обмена либо файлов произвольного типа в ОС. Одна программа пишет в память или файл передаваемые данные в согласованном формате, по окончании другая считывает это место. Недостаток: очень низкая гибкость механизма и высокая рутинная сложность применения.

«COM» (от англ. Component Object Model) [79,80] – технология взаимодействия приложений от компании «Microsoft» 1993 г., предназначенная

для создания программного обеспечения на основе взаимодействующих распределённых компонентов, каждый из которых может использоваться во многих программах одновременно. Следующим шагом развития «COM» стала технология «OLE» (от англ. Object Linking and Embedding), позволяющая внедрять одни объекты в другие. Позже OLE разделилась на, собственно, OLE – внедрение объектов и «ActiveX» («OLE Controls») – повторно используемые элементы пользовательского интерфейса. Однако «COM» применима только на ОС «Windows», что является существенным недостатком.

«D-Bus» (FreeDesktop.org) – набор компонент для реализации механизма взаимодействия между приложениями изначально разработанный под ОС «Linux», но имеются модификации под Windows, которые находятся на стадии разработки. Недостатком является необходимость установки дополнительных компонент в ОС для обеспечения работоспособности этого механизма, незавершенность реализаций под «Windows» и отсутствие поддержки со стороны популярных сред разработки программ.

Сетевые способы взаимодействия обобщены названием «RPC» (от англ. Remote Procedure Call) [79], основная задача которых – обеспечение передачи по сети вызовов функций вместе с их параметрами и возврат результатов их выполнения. Все технологии, реализующие RPC, включают в себя: адрес компьютера-приемника, номер программного порта, язык описания передаваемых данных и протокол обмена данными. Протокол обмена данными – это правила обмена информацией между программами в компьютерных сетях в виде последовательности команд в заданном формате с последующей ответной реакцией программы-получателя для программы-отправителя. Удаленное взаимодействие построено по принципу клиент-сервер.

Принцип «клиент-сервер» [81] – способ распределения выполняемых функций между программами и/или компонентами, которые выступают в качестве поставщиков услуг (сервера) и/или заказчиков услуг (клиенты). Клиенты

и серверы могут взаимодействовать, находясь как на одном, так и на разных компьютерах (компьютерная сеть).

Приложения могут быть организованы на двух- и трехзвенной модели взаимодействия клиента и сервера. Двухзвенная модель предполагает, например, размещение и обслуживание базы данных или расчетных компонент на сервере, а интерфейс для отображения результата работы с сервером на клиентах. Количество клиентов может быть не ограничено, при этом, выдача информации сервером выполняется только по запросу клиентов.

Рациональное разделение функций приложения на независимые блоки, каждый из которых может выполняться на отдельном компьютере, взаимодействуя друг с другом в согласованном формате, позволяет разделить двухзвенную модель на большее число звеньев. Например, в трехзвенной модели клиентские приложения используют один унифицированный источник данных в виде промежуточного аппаратно-программного звена, реализующего доступ к различным типам структурированной и не структурированной информации, контроль транзакций, администрирование и подключение программных компонент.

Наиболее распространенными способами реализации объектов для сетевого взаимодействия являются следующие.

«DCOM» (от англ. Distributed COM) [79] – вариант использования COM-серверов через компьютерную сеть по средством «PRC», главным конкурентом которого является другая известная технология – «CORBA» (описана ниже). ОС «Windows» автоматизирует процесс приема-передачи незаметно от разработчика, поэтому работа с «DCOM» аналогична «COM» за исключением необходимости авторизации на сервере в случае клиент-серверной передачи.

«CORBA» (от англ. Common Object Request Broker Architecture) [82] – одновременно развитая и неоправданно сложная, в силу разных причин, технология в отличии от остальных, хотя современные среды разработки также

автоматизируют процесс создания компонент. Применяется на «Windows» и Unix-подобных ОС.

Существуют и другие аналоги «DCOM» и «CORBA», например: «Internet Communications Engine» [83] – еще одна реализация RPC с поддержкой распространенных ОС, где также требуется установка дополнительного ПО; «Routix.RPC» [84], компоненты которой созданы в виде COM-серверов, передающие данные в формате «XML» с применением сжатия и шифрования; «XML.RPC» [85], «JSON.RPC» [86] – аналогичные решения отличающиеся форматом передачи данных.

Хранение параметров объектов. Каждая ТПС представляет собой уникальную систему, находящуюся в постоянном развитии, с разнообразным составом оборудования и его характеристиками, индивидуальным режимом эксплуатации и т.д. При моделировании элементов и ТПС в целом точность и количество исходных данных играют важнейшую роль и напрямую влияют на результаты численных расчетов. Каждый элемент ТПС может иметь десятки параметров, а исходная информация по всей ТПС может достигать существенных объемов, и чем больше элементов в ТПС, тем больше данных.

Поэтому, помимо возможностей обмена информацией между компонентами и программами, необходимым является постоянное и временное хранение данных. В связи с особенностями разработки, модернизации, применения и внедрения ПВК для моделирования ТПС хранимая информация, как правило, должна быть логически структурирована и записана в доступном формате. При этом, важным является не только оперативный доступ, но и возможность преобразования и развития структуры при совершенствовании средств моделирования. Для этого на практике применяются базы данных.

Базы данных (БД) [87] – предназначены для хранения и выдачи структурированной информации по требованию, при этом, каждый разработчик БД предоставляет свой собственный «API» (от англ. Application Programming

Interface – интерфейс прикладного программирования) для взаимодействия, учитывающий ее специфические особенности. Во избежание необходимости повторной адаптации программ при переходе на другую версию БД «Microsoft» и ряд других компаний создали стандартный «API» названный «ODBC» (от англ. Open Database Connectivity). «ODBC» стал промышленным стандартом и для него «Microsoft» разработала объектно-ориентированную оболочку на основе «COM», назвав «ADO» (от англ. ActiveX Data Objects) и его модификацию «ADO.NET» для пакета «.NET Framework».

1.2. Основные выводы и постановка задач исследования

Разработанные общие модели и методы ТГЦ потенциально применимы для ТПС произвольного типа и назначения, но существуют такие случаи законов течения среды по отдельным элементам сети, при которых эти методы и модели не применимы. Для таких случаев была разработана методика двойных циклов итераций, которая не отличается высокой вычислительной эффективностью. В связи с этим, не прекращаются попытки разработки новых методов расчета с учетом отраслевой специфики их применения. Такие методы, однако, сводятся либо к этой методике, либо предполагают увеличение размерности решаемой системы уравнений, например, относительно давлений и расходов одновременно.

На рынке программного обеспечения существует множество ПВК с разным набором возможностей и спецификой применения. С одной стороны, эти ПВК ориентированы на решение конкретного класса задач из области анализа, синтеза и управления, с другой, применительно к ТПС конкретного типа и назначения. Как отмечалось, среди таких ПВК наблюдается очевидное противоречие между потенциальной общностью методов расчета и непроизводительным дублированием работ по их программной реализации и адаптации к прикладной специфике применения. При этом адаптацию методов и внедрение новых

функций моделирования невозможно сделать без участия самого разработчика и перепрограммирования имеющихся компонент. Из опыта также известны недостатки такого подхода, это чрезвычайная трудоемкость, сложность развития и поддержки, что и наблюдается на практике.

Выполнен обзор современных ИТ потенциально применимых для обеспечения независимости методов расчета от специфики объекта приложения при их реализации с помощью конкретных решений и технологий («DLL», «COM», «D-Bus», «Клиент-сервер», «RPC», БД и др.). Эти технологии, в целом, позволяют решить данную проблему, но реализовать это в конечной программе до сих пор не удавалось в связи с отсутствием общей методики или принципа реализации методов ТГЦ. Проведенный обзор литературы показал, что несмотря на высокую актуальность универсализации программных реализаций методов ТГЦ до настоящего времени нет работ, специально посвященных проектированию этих реализации с целью обеспечения их общности в конечных ПВК. В области ИТ, как правило, разработка сложных программ осуществляется по концепции ООМ с целью облегчения этого процесса путем выработки принципа деления модели программы на объекты с учетом требований к конечному результату. В литературе подробно рассматривается общая идея подхода ООМ, но, к сожалению, на конкретных примерах разработки программ. Тогда как методика применения ООМ для произвольного случая вообще отсутствует. Это связано с принципиальными отличиями сфер возможного применения этого подхода. В области моделирования ТПС уже имеется опыт применения ООМ.

Например, в работе [88] приведено описание новых возможностей моделирования, полученные в результате применения объектно-ориентированного подхода в разработке расчетных программ. При этом, взамен структурной архитектуры с иерархически упорядоченными процедурами, глобальными и общедоступными данными предлагается принцип наследования

классов. В рамках этого принципа газотранспортная система представляется набором объектов, каждый из которых отвечает только за конкретный моделируемый элемент: труба, компрессор, привод, транспортируемая среда. Эти элементы являются базовыми и с их помощью можно формировать модель региональной, магистральной или распределительной газотранспортной системы. Такой подход позволяет исключить дублирование программных компонент, разделить трудозатраты программистов в соответствии с иерархией компонент, упростить создание новых возможностей с помощью базовых компонент, что, в конечном итоге, уменьшает затраты на разработку и развитие конечных ПВК.

Моделирование ТПС при таком подходе не всегда является эффективным, например, в случае расчета потокораспределения, где единая модель сети заменена совокупностью объектов с иерархической подчиненностью. Каждый объект такой системы располагает информацией только о себе и инцидентных ему элементах: труба содержит номера (имеет отношения) концевых узлов, а узлы – номера инцидентных связей. В соответствии с этим, процесс счета будет сводиться к последовательному взаимодействию объектов по линии наследования или отношения на предмет передачи расчетных параметров – расхода, давления и др. Несмотря на гибкость архитектуры и возможность распараллеливания вычислительных операций, такой процесс, фактически, будет повторять алгоритм «увязочного» МД [1] только на уровне объектного представления сети.

Другой пример использования ООМ для ТПС приведен в [89], где в основу структуризации объектов положена иерархия наследования классов, отвечающих за гидравлические зависимости различных элементов ТПС (участки трубопровода, тройники, отводы, повороты и др. местные сопротивления) транспортирующей однофазные и многофазные жидкости и газы. Центральным звеном этой иерархии является базовый модуль (DLL), обеспечивающий единообразие объектного представления элементов ТПС и расширение его состава путем наследования классов в процессе программирования новых возможностей

программ, разрабатываемых на научно-техническом предприятии «Трубопровод». В эту иерархию аналогичным образом встроен блок специальной задачи расчета гидравлического удара, где его классы структурированы по признаку одно-, двух- и мультивалентного подключения элемента в граф сети [90].

С точки зрения моделирования ГЦ главный критерий рационализации должен быть следующий – это обеспечение общности реализаций методов ТГЦ, многократность использования объектов их реализующих, возможность неограниченного развития этих объектов без перепрограммирования и рекомпиляции. Применение концепции ООМ для моделирования ГЦ должно опираться на физический объект – ТПС, как совокупность оборудования, каждое из которых имеет свое математическое описание, что вместе с законами баланса материи и энергии составляет, например, модель потокораспределения.

В качестве решения проблемы дублирования одновременно с сохранением потенциальных возможностей эффективной реализации методов расчета предлагается два взаимосвязанных пути: 1) переход на концепцию ООМ ГЦ с целью отделения программных компонент, реализующих общие методы, от компонент, отвечающих за специфику ТПС; 2) развитие самих методов расчета с ориентацией на эту концепцию.

Для подтверждения программной универсальности методов расчета применим их реализации при разработке ПВК в виде Веб-приложения работающего в сети Интернет. Разработка таких приложений (обладающих рядом преимуществ по отношению к традиционным ПВК) является инновационным и перспективным направлением расширения сферы приложения методов ТГЦ.

Задачи исследований. С учетом вышеизложенного, достижение поставленной цели в работе сводится к решению следующих задач исследования:

1. Разработка и обоснование основных положений концепции ООМ ГЦ.
2. Разработка и систематизация объектных моделей течения среды для основных элементов ТПС.

3. Разработка объектно-ориентированных моделей установившегося потокораспределения и обобщение методов его расчета на случаи нетрадиционных соотношений для законов течения рабочей среды.
4. Разработка принципов и механизмов реализации технологии ООМ ГЦ.
5. Реализация предложенной технологии в виде распределенного ПВК для расчета методами ТГЦ гидравлических режимов ТПС различного типа в сети Интернет.

2. Разработка и обоснование принципов ООМ ГЦ на примере задач потокораспределения

В данной главе формулируются требования к новым реализациям методов ТГЦ, рассматриваются возможности получаемые при разработке ПВК в новых условиях, предлагаются объектно-ориентированные модели элементов ТПС, определяются положения концепции ООМ, применительно к моделированию ТПС на примере задачи потокораспределения в ГЦ с сосредоточенными параметрами. Построена обобщенная модель потокораспределения, новые численные методы и алгоритмы его расчета.

2.1. Основные положения концепции ООМ ГЦ

Следуя поставленной цели, выделим наиболее важные требования, предъявляемые к новому поколению ПВК, реализующих методы ТГЦ:

- *развиваемость* – возможность внедрения более совершенных методов решения традиционных задач без перепрограммирования существующих ПВК на базе современных технологий и средств разработки. Кроме того, возможность выбора метода из набора аналогичных или их комбинацию для решения задачи. Также, это позволит использовать предпочитаемый или выбрать наиболее эффективный метод;
- *расширяемость* – возможность быстрой интеграции методов решения новых задач в существующие ПВК. Более того, наряду с этим неизбежно появиться возможность автоматизированной адаптации самих ПВК под новые задачи и внедряемые компоненты;
- *масштабируемость* – возможность применения существующих реализаций методов ТГЦ в составе различных ПВК потенциально обеспечивающих

адаптацию под новые типы систем;

- *языковая независимость* – возможность интеграции в ПВК отдельных программных единиц, разработанных разными специалистами на разных языках программирования;
- *сопровождаемость* – возможность покомпонентного обновления территориально удаленных ПВК без их переустановки, поддерживая парк внедренных комплексов в актуальном состоянии;
- *открытость* – возможность применения готовых компонент для создания новых или поддержки существующих ПВК.

Разработка программных систем и компонентов, удовлетворяющих этим свойствам, потенциально позволит:

- Автоматизировать процесс создания ПВК различного назначения и набора возможностей, обеспечивающих качественно новый уровень программного обеспечения для всевозможных нужд моделирования ТПС.
- Обеспечить динамическую сборку и настройку необходимого вычислительного окружения на базе имеющегося набора компонент под всевозможные типы и конфигурации ТПС.
- Построить вычислительные системы различного уровня и производительности, комбинируя доступные вычислительные ресурсы с гибкими средствами и методами моделирования ТПС.
- Предоставить пользователям передовые разработки в области компьютерного моделирования ТПС в кратчайшие сроки, тем самым актуализировать временной разрыв между разработкой и внедрением новых методов и моделей; разработчикам ускорить развитие и упростить поддержку имеющихся ПВК.

С учетом сказанного, покажем идею концепции ООМ ГЦ на примере задачи потокораспределения.

Традиционная модель установившегося изотермического потокораспределения в ГЦ включает законы Кирхгофа и замыкающие соотношения [1]

$$Ax = Q, \quad \overline{A}^T \overline{P} = y, \quad y = f(x), \quad (1.1)$$

где $\overline{A}$ – $(m \times n)$ -матрица инцидентий узлов и ветвей расчетной схемы с элементами $a_{ji} = 1(-1)$, если узел j является начальным (конечным) для ветви i и $a_{ji} = 0$, если ветвь i не инцидентна узлу j ; x, y – n -мерные векторы расходов и перепадов давления на ветвях расчетной схемы; A – $(m-1 \times n)$ -матрица инцидентий, образованная вычеркиванием из $\overline{A}$ линейно зависимой строки m ; $f(x)$ – n -мерная вектор-функция с элементами $f_i(x_i), i = \overline{1, n}$, отражающими законы падения давления от расхода (законы течения) на ветвях ГЦ; Q – m -мерный вектор узловых расходов с элементами $Q_j > 0$ для притока в узел j , $Q_j < 0$ для отбора в узле j и $Q_j = 0$, если узел j – простая точка соединения ветвей; $\overline{P} = \{P, P_m\}$ – m -мерный вектор узловых давлений.

Задача состоит в определении векторов x, y, P при заданных матрице $\overline{A}$, векторе Q , известном виде $f_i(x_i)$ для $i = \overline{1, n}$ и заданном давлении в одном из узлов (P_m).

Известны многочисленные методы и алгоритмы решения данной задачи, впрочем, как показано в монографии [1], базовыми являются два метода: контурных расходов и узловых давлений. Оба основаны на методе Ньютона, но с предварительным понижением порядка линеаризованных систем уравнений (1.1).

Так, классический метод узловых давлений (МД) [1] предполагает поиск решения (1.1) в пространстве узловых давлений и сводится к организации процесса

$$P^{k+1} = P^k + \Delta P^k,$$

на каждой k -й итерации которого поправка ΔP^k отыскивается из решения системы

$$A(f'_x)^{-1} A^T \Delta P^k = -u_1^k,$$

где $u_1^k = Ax^k - Q$; $x^k = \psi(y^k)$; $y^k = A^T P^k$; f'_x – диагональная матрица частных производных $\partial f_i / \partial x_i, i = \overline{1, n}$, в точке x^k ; ψ – вектор-функция, обратная к f с элементами $\psi_i(y_i)$.

Отсюда видно, что вычислительная схема МД не зависит от вида функций $f_i(x_i)$, к которым предъявляются только требования монотонного возрастания для обеспечения единственности решения задачи потокораспределения [1]. Однако особенности реализации МД связаны со спецификой вида $f_i(x_i)$ и соответственно $\partial f_i / \partial x_i$ и $\psi_i(y_i)$.

С учетом этого, очевидно, чтобы удовлетворить всем предъявляемым требованиям необходима абстракция объекта, реализующего модель сети, к объекту, связанному с законами течения среды по отдельным элементам ГЦ. Следуя такой логике, выделим реализацию модели потокораспределения в самостоятельный объект «Модель сети», а законы течения в объект «Модели элементов». Как сказано ранее, принцип ООП позволяет выразить предметную область в виде объектов взаимодействующих друг с другом по некоторой модели поведения, задаваемой контекстом решаемой задачи. Каждый объект должен быть самодостаточным и, в тоже время, обеспечивать функциональную связь с другими объектами. Для этого, в идейном понимании ООП, объекты должны иметь самостоятельные методы (void) и свойства.

В объекте «Модель сети» должны быть, например, такие свойства: параметры транспортируемой среды, топология сети, описывающая взаимосвязь элементов, притоки и отборы в узлах, и иметь методы решения определенной

задачи (например, потокораспределения и др.) для системы, объединяющей в общем случае разнотипные «Модели элементов».

Объект «Модели элементов» должен отвечать за моделирование отдельно взятого элемента, например, трубопровода, который имеет такие свойства, как внутренний и наружный диаметр, класс прочности, стандарт изготовления, длина, тип покрытия и др. Такой объект также имеет собственные методы (void): расчет потери напора по заданному расходу $y(x)$, расход по заданной потере $\psi(y)$ и вычисление производной f'_x .

Если приобщить основные понятия ООП к сфере моделирования ГЦ, то получится следующее. Наследование – потенциально обеспечит возможность расширения реализаций методов ТГЦ на произвольные типы систем без повторного программирования реализованных программ. Полиморфизм – позволит обеспечить однотипное взаимодействие программ с разными методами для решения одной задачи. Инкапсуляция и абстракция дают перспективу развития компонентов моделей и методов независимо друг от друга.

Полиморфизм, как одно из свойств концепции ООП, позволит взаимодействовать объектам «Модель сети» и «Модели элементов» посредством их однотипных методов (void). При решении задачи потокораспределения внутренний метод объекта «Модель сети», согласно алгоритму, будет вызывать методы объекта «Модели элементов» с аргументами, чем и обеспечит получение результата расчета по каждому элементу и задачи в целом (рисунок 2.1).

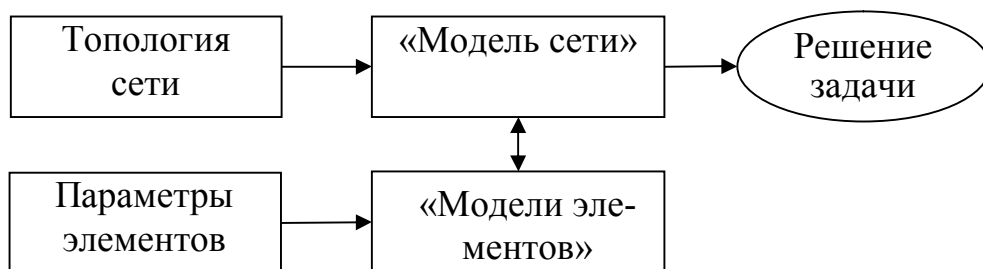


Рисунок 2.1. Взаимодействие объектов при решении задачи.

Таким образом, с помощью требуемого сочетания состава элементов и их свойств в объекте «Модели элементов» можно моделировать любой тип ТПС, используя независимые методы потокораспределения объекта «Модель сети».

Технология ООП дает возможность представлять предметную область в виде объектов, но никак не регламентирует правила этого процесса. ООМ задает эти правила, исходя из потребностей данной предметной области. Выделим основные положения концепции ООМ ГЦ:

- 1) отделение специфики ТПС от общих методов их моделирования;
- 2) объекты ПВК – реальные объекты (сеть, элементы), а не условные «сущности» программы;
- 3) во главу угла ставится эффективность (многократность) использования единожды реализованных методов и моделей в разных ПВК, а не удобство программирования конкретного ПВК;
- 4) ООП рассматривается как инструмент реализации концепции ООМ ГЦ, но не сводится к нему.

2.2 Объектно-ориентированные модели элементов ТПС

Причины разнообразия моделей элементов следующие: разные типы ТПС, где присутствуют специфичные элементы, предназначенные для работы в конкретной ТПС; разные типы элементов по назначению для выполнения определенной роли в ТПС; разнообразие конкретного оборудования в рамках назначения, что требует конкретной математической модели; разнообразие условий работы, влияющих на эти модели; разнообразие отраслевых стандартов (СНиП, СТО, ТУ), регламентирующих применение конкретных моделей в конкретной области.

Существует три основных типа моделей элементов: пассивные (участки трубопровода, местные сопротивления), активные (насосные агрегаты и насосные

станции) и регулирующие (запорно-регулирующая арматура, регуляторы). Рассмотрим каждый тип элементов на примере его классических представителей, где индекс ветви предварительно опустим.

Трубопровод. Традиционная модель участка трубопровода имеет вид [1]

$$f(x) = sx |x|, \quad (2.1)$$

где s – гидравлическое сопротивление ветви, x – массовый расход. Здесь мы имеем явные выражения $\partial f / \partial x = 2s |x|$, $\psi(y) = \sqrt{|y|/s} \cdot \text{sign}(y)$.

Эта модель является следствием известной формулы Дарси–Вейсбаха [91] для потери напора в трубопроводе $h = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}$, где $\lambda = \text{const}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, d, l – диаметр и длина трубопровода; g – ускорение свободного падения; $V = V(x)$ – скорость течения жидкости, $y = \rho gh$, ρ – плотность транспортируемой среды, $s = \lambda 8l / (\rho \pi^2 d^5)$ – сопротивление ветви, так как $V = 4|x| / (\pi d^2 \rho)$.

Когда $\lambda = \lambda(x) \neq \text{const}$ имеем нетрадиционный случай замыкающих соотношений неявных по расходу функций $\psi(y)$

$$f(x) = s(x) |x|, \quad (2.2)$$

где $s(x) = \lambda(x) 8l / (\rho \pi^2 d^5)$.

Здесь λ зависит от числа Рейнольдса $\text{Re}(V) = Vd / \nu$, где ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, который для изотермического течения полагается константой. Для вычисления λ , в свою очередь, имеется множество формул, отражающих назначение трубопровода, его тип, материал внутреннего покрытия, срок службы, режим течения среды (ламинарный, переходный, турбулентный) и т.п. В качестве примера в таблице 2.1 приведены некоторые распространенные в России и за рубежом формулы для коэффициента λ и его производных по скорости.

Таблица 2.1. Формулы и производные для коэффициента гидравлического сопротивления.

Наименование формулы	λ	λ'_v
Шифринсона [92,93]	$0,11 \left(\frac{k_e}{d} \right)^{0,25}$	0
Прандтля–Никурадзе [92, 94]	$\left(1,14 + 2 \lg \frac{d}{k_e} \right)^{-2}$	0
Кольбука–Уайта [91]	$\left[-2 \lg \left(\frac{k_e}{3,7d} + \frac{2,51}{\text{Re}(V) \sqrt{\lambda}} \right) \right]^{-2}$	$-\frac{10,04\lambda}{V \left[\left(\frac{k_e V}{3,7v} + \frac{2,51}{\sqrt{\lambda}} \right) \ln(10) + 5,02 \right]}$
Альтшуля [91]	$0,11 \left(\frac{k_e}{d} + \frac{68}{\text{Re}(V)} \right)^{0,25}$	$-1,87 \left(\frac{k_e}{d} + \frac{68v}{ V d} \right)^{-0,75} \frac{v}{d V V}$
Шевелева [95,96]	$A_1 \left(\frac{A_0}{d} + \frac{C}{Vd} \right)^w$	$-\frac{A_1 m C}{(A_0 V + C)^{1-m} d^m V^{1+m}}$

Обозначения: k_e – коэффициент эквивалентной шероховатости; A_0, A_1, C, w – коэффициенты, зависящие от материала трубы и режима течения.

Запорная арматура и местные сопротивления. Потеря напора на запорной арматуре и местных сопротивлениях определяется по явной формуле Вейсбаха [91]:

$$h = \frac{\zeta}{2g} V^2,$$

где в случае регулирующих элементов для определения коэффициента местного сопротивления ζ могут потребоваться аппроксимирующие зависимости. Например, для задвижки в работе предлагается следующая зависимость:

$$\zeta = a(1-r)^{-c} - b,$$

где r – степень прикрытия задвижки; a, b, c – коэффициенты, полученные путем аппроксимации (в том числе «кусочной») таблично заданной характеристики. На рисунке 2.2 приведено две линии функции, пересекающиеся в точке раздела обла-

стей аппроксимации. Исследования выполнялись в среде Maple, и для каждого типа задвижки вычислялся уникальный набор коэффициентов.

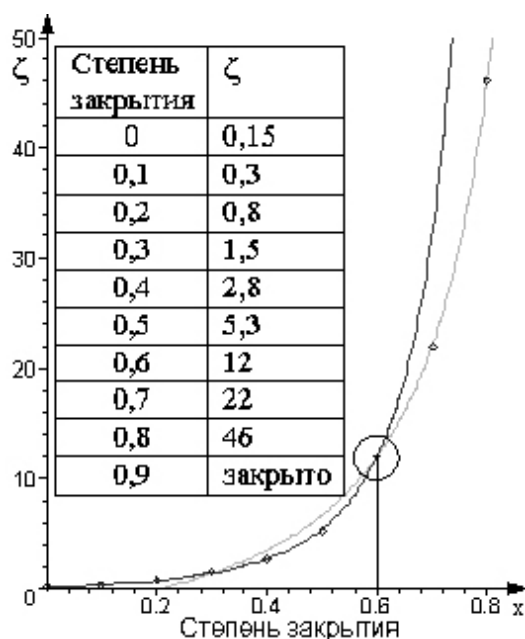


Рисунок 2.2. График аппроксимации таблично заданной функции изменения ζ .

Обобщая случаи наличия местных сопротивлений (включая регулируемые) на трубопроводе произвольного типа, для i -й пассивной ветви ГЦ можно записать, что

$$s(x) = \left(\lambda(x) + \zeta^\Sigma \frac{d}{l} \right) \frac{8l}{\rho \pi^2 d^5},$$

где ζ_i^Σ – сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Насосы. Традиционная модель активной ветви, т.е. насоса имеет вид $f(x) = sx|x| - Y$, где Y – величина напора, развиваемого насосом, а

$$\psi(y) = \sqrt{|y + Y|/s} \cdot \text{sign}(y + Y).$$

Гидравлические характеристики активных ветвей, в общем случае, задаются алгебраическими

полиномами вида $f(x) = a_0 + \sum_{q=1}^{\bar{q}} a_q |x|^{b_q} \cdot \text{sign}(x)$, когда $f'_x = \sum_{q=1}^{\bar{q}} b_q a_q |x|^{(b_q-1)}$.

Однако они могут отличаться разными показателями степеней b_q , числом $\bar{q}$ и составом слагаемых (при принудительном назначении $a_q = 0$ для некоторых q). Также может применяться «кусочная» аппроксимация одной характеристики различными полиномами.

Следующий случай – соотношения зависимые от давления, которые возникают при невозможности сведения гидравлических характеристик элементов ТПС к традиционному виду $y = f(x)$. Например, паспортная характеристика газоперекачивающего агрегата (ГПА) связывает не разность, а отношение давлений

(степень сжатия) $\varepsilon = p_H / p_K$ (p_H, p_K – величины давления до и после ГПА) с объемным расходом. Наиболее простой аналитический вид этой характеристики [54]

$$\varphi(p_H, p_K, x) = \beta_0 p_H |p_H| - p_K |p_K| - \beta_2 x |x| = 0, \quad (2.3)$$

где β_i – коэффициенты, полученные путем аппроксимации $\varepsilon^2(x)$ паспортной характеристики ГПА; x – производительность, отнесенная к условиям входа.

Также в литературе встречаются другие типы зависимостей $\varepsilon(x)$ или $\varepsilon^2(x)$ для ГПА, полученные при разных степенях аппроксимирующих полиномов. Например, в работе [55] предложена зависимость

$$\varphi(p_H, p_K, x) = \left(\beta_0 + \frac{\beta_1^2}{4\beta_2} \right) p_H |p_H| - p_K |p_K| - \beta_2 \left(x - \frac{\beta_1}{2\beta_2} p_H \right) \left| x - \frac{\beta_1}{2\beta_2} p_H \right| = 0. \quad (2.4)$$

В процессе исследования также рассматривались зависимости

$$\varphi(p_H, p_K, x) = \frac{p_K}{p_H} - \alpha_0 - \frac{\alpha_1}{p_H} x - \frac{\alpha_2}{p_H |p_H|} x |x| = 0, \quad (2.5)$$

$$\varphi(p_H, p_K, x) = \beta_0 p_H |p_H| - p_K |p_K| - \beta_1 |p_H| x - \beta_2 x |x| = 0, \quad (2.6)$$

где α_i – коэффициенты аппроксимирующих полиномов для $\varepsilon(x)$.

С целью обобщения рассмотренных случаев гидравлических характеристик (включая традиционные и неявные по расходу) введем в рассмотрение замыкающее соотношение следующего функционального вида

$$\varphi(p_H, p_K, x) = 0. \quad (2.7)$$

где φ – функция, зависящая от давления. Действительно, так как $y = p_H - p_K$, то вместо $y = f(x)$, имеем $p_H - p_K - f(x) = \varphi(p_H, p_K, x) = 0$.

Требования применимости моделей элементов. На рисунке 2.3а показаны примеры классических замыкающих соотношений $y = sx|x|$, $y = sx|x| - Y$ в координатах x, y . Как отмечалось, для гарантированного получения единственного решения задачи потокораспределения необходимо соблюдение требования монотонности замыкающих соотношений [1], которое можно распространить на

рассматриваемый случай (2.7), представив классические соотношения в координатах x, p_H и x, p_K (рисунок 2.3b, 2.3c).

Как видно из рисунка 2.3a требованию монотонного возрастания $y(x)$ эквивалентно одновременное соблюдение требований монотонного возрастания $p_H(x)$ (рисунок 2.3b) и монотонного убывания по $p_K(x)$ (рисунок 2.3c), что эквивалентно соблюдению условий

$$\frac{\partial x}{\partial p_H} > 0, \frac{\partial x}{\partial p_K} < 0$$

на всей области определения функций (2.7).

На рисунке 2.4 приведены графики зависимостей (2.3)–(2.6) для ГПА. Уравнение (2.5), в отличие от остальных, не удовлетворяет требованию монотонности. Уравнение (2.3) является более простым, но менее точным. Уравнение (2.4) имеет более сложную конструкцию для обеспечения монотонности, однако, и для уравнения (2.6) монотонность можно обеспечить путем введения фиктивной точки в начале характеристики.

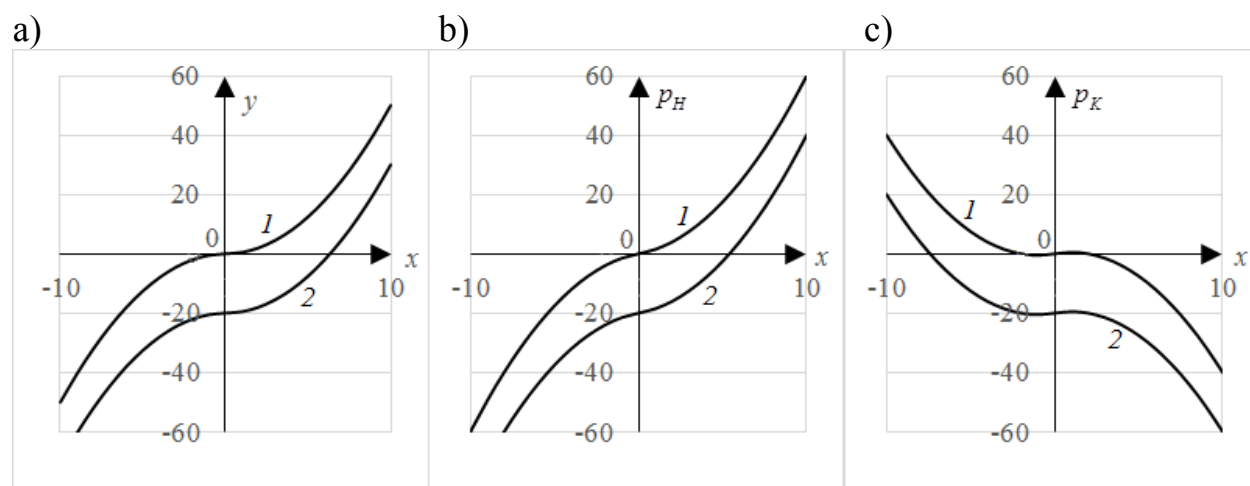


Рисунок 2.3. Графики традиционных замыкающих соотношений для пассивной (1) и активной (2) ветвей в координатах а) x, y ; б) x, p_H ; в) x, p_K .

Аппроксимация характеристик может быть выполнена различными способами, но важным аспектом применения этих соотношений является необходимость одновременного соблюдения условий монотонного убывания/возрастания и точности аппроксимации. При этом, особенность работы компрессорного (активного) оборудования при низком расходе не всегда удовлетворяет условиям монотонности в неустойчивых режимах («помпаж»).

Таким образом, уравнение (2.6) представляется наиболее приемлемым как по сложности, так и по точности.

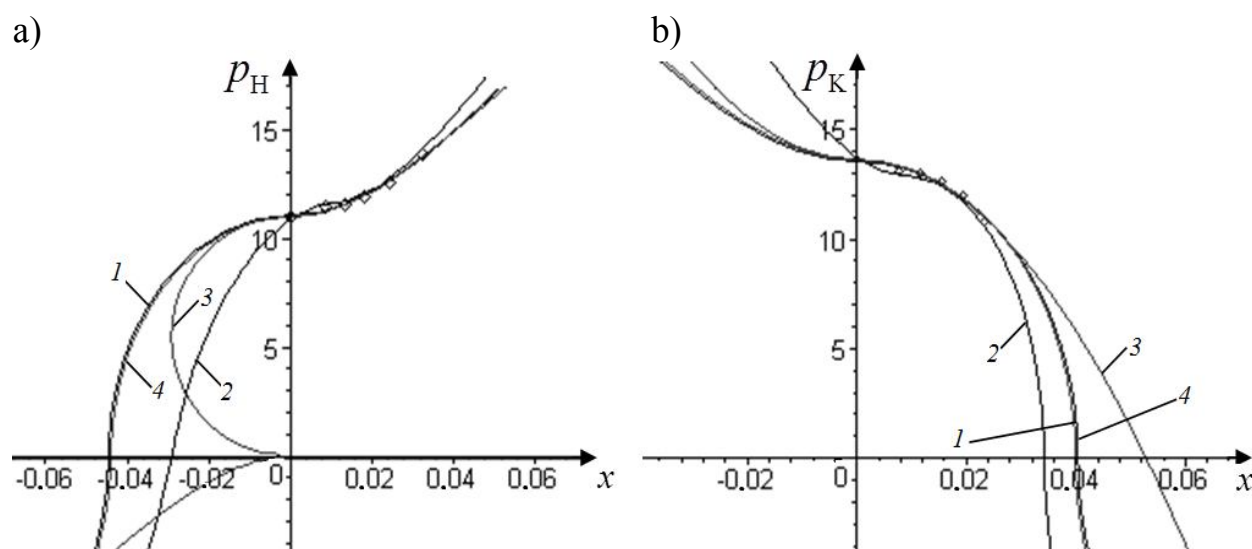


Рисунок 2.4. Зависимости давлений на входе (а) и выходе (б) газоперекачивающего аппарата от расхода жидкости, выраженные различными соотношениями: 1 – формулой (2.3); 2 – (2.4); 3 – (2.5); 4 – (2.6).

Методы объекта «Модели элементов». Согласно концепции ООМ ГЦ для решения задачи потокораспределения объект «Модели элементов» должен обеспечивать вычисление производной f'_x , y (потеря давления) по x (расход) и x по y . Как сказано ранее, это реализуемо с помощью внутренних методов объекта. Однако для случая соотношений зависящих от давления необходимо также предусмотреть методы вычисления x по p_H, p_K и производные $\partial x / \partial p_H, \partial x / \partial p_K$.

В принципе для случаев типа (2.2), (2.7) при расчете потокораспределения применима методика двойных циклов итераций [1]. В соответствии с этой методикой на внутреннем цикле итераций решается традиционная задача потокораспределения традиционными методами при фиксированных значениях параметров (s, Y) классических замыкающих соотношений, а на внешнем – значения этих параметров уточняются в зависимости от полученных значений расходов и давлений. Например, соотношение (2.3) можно свести к традиционному виду $y = sx|x| - Y$, обозначив $y = p_H|p_H| - p_K|p_K|$, $s = \beta_2$, $Y = (\beta_0 - 1)p_H|p_H|$. Таким образом эта методика является достаточно универсальной, но предполагает многократное возрастание вычислительных затрат для расчета потокораспределения по сравнению с традиционным случаем.

Теперь вычисление расхода x^k по заданному перепаду давлений y^k в случае неявных функций типа (2.2) может быть выполнено итерационно, например, с помощью методов простой итерации, где $x^{t+1} = \sqrt{|y^k|/s(x^t)} \cdot \text{sign}(y^k)$, или Ньютона, согласно которому $x^{t+1} = (x^t + u^t) / (f'_x)^t$, где k – индекс итерации расчета потокораспределения, t – индекс итерации отыскания x^k , $x^t := x^{k-1}$, $t = 0$, $u^t = y^k - f(x^t)$ – невязка.

Как известно, высокая скорость сходимости метода Ньютона имеет место при наличии «удачного» начального приближения. Сходимость метода простой итерации в данном случае, наоборот, выше вдали от решения. Поэтому оказался эффективным комбинированный метод, состоящий в однократном применении метода простой итерации перед применением метода Ньютона.

Рисунок 2.5 иллюстрирует процессы сходимости трех предложенных вариантов на примере трубопровода при $y^k = 5,3085$ м вод.ст., $d = 300$ мм, $l = 1000$ м; коэффициент λ определен по формуле Шевелева для новых стальных труб ($A_1 = 0,0159$; $A_0 = 1$; $C = 0,684$; $w = 0,226$), при начальном приближении $x^0 = 800$ л/с и

решении $x^k = 71$ л/с. Видно, что применение комбинированного метода дает ощутимый выигрыш, а само решение с приемлемой точностью ($u^t < 10^{-4}$ м вод.ст.) получено всего за три итерации.

Отметим, что для нахождения x_i^k по заданным давлениям в соотношениях (2.3)–(2.6) в работе получены конечные формулы, приведенные в таблице 2.2.

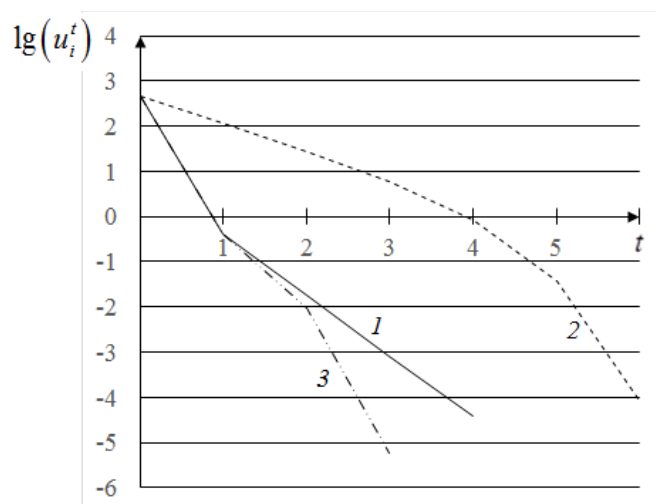


Рисунок 2.5. Иллюстрация процесса сходимости разных методов: 1 – простой итерации, 2 – Ньютона, 3 – комбинированного.

Таблица 2.2. Аналитический вид функций для расчета x по заданным p_H, p_K .

Используемое соотношение	Выражение для $x(p_H, p_K)$
(2.3)	$\sqrt{ a } \cdot \text{sign}(a)$, где $a = (\beta_0 p_H p_H - p_K p_K) / \beta_2$.
(2.4)	$\sqrt{ a / \beta_2 } \cdot \text{sign}(a / \beta_2) + b$, где $a = \left(\beta_0 + \frac{\beta_1^2}{4\beta_2} \right) p_H p_H - p_K p_K $, $b = \frac{\beta_1}{2\beta_2} p_H$.
(2.6)	$(-b - \sqrt{ D } \cdot \text{sign}(D)) / 2a$, где $a = -\beta_2$, $b = -\beta_1 p_H $, $c = \beta_0 p_H p_H - p_K p_K $, $D = b^2 - 4ac$.

Получение f'_x , в случае неявных функций $\psi(y)$, может быть выполнено следующим образом $f'_x = \frac{df}{dx} = (2s + s'_x x) |x|$, где $s'_x = \frac{ds}{dx} = \frac{ds}{d\lambda} \frac{dV}{dx} \frac{d\lambda}{dV}$, $\frac{ds}{d\lambda} = \frac{8l_i}{\rho \pi^2 d^5}$, $\frac{dV}{dx} = \frac{4}{\pi d^2 \rho}$. Такой подход для трубопровода произвольного типа и назначения требует лишь конкретизации λ'_v (см. таблицу 2.1), что позволяет избежать внеш-

него итерационного цикла, что резко сокращает вычислительные затраты [4] при неизменной вычислительной схеме методов расчета потокораспределения.

Свойства объекта «Модели элементов». В качестве исходной информации для обеспечения работы методов этого объекта выступают данные, полученные через свойства этого объекта. Несмотря на небольшое количество типов элементов каждый вид оборудования моделируется конкретным соотношением, которому требуется определенный набор параметров.

Участку трубопровода должны соответствовать параметры: длина участка, внутренний диаметр, тип материала стенок трубы, сумма коэффициентов местных сопротивлений. Запорной арматуре – условный диаметр и коэффициенты полинома аппроксимирующего паспортную характеристику работы устройства. Насосам и компрессорам – коэффициенты полинома аппроксимирующего паспортную характеристику напора-расхода (насосы) или степени сжатия (компрессора), КПД, границы рабочей зоны, скорость вращения и т.д.

Немаловажным качеством такого объекта являются свойства отвечающие за параметры транспортируемой среды. Здесь необходимы температура, вязкость и плотность, что влияет на число Рейнольдса и режим течения, а значит и на применяемые формулы расчета потерь напора (перепада давления) и коэффициента гидравлического сопротивления трению.

Таким образом, следуя основным положениям концепции ООМ ГЦ об отделении специфики ТПС от общих методов их моделирования, где во главу угла ставится многократность использования единожды реализованных методов и моделей в разных ПВК получены следующие результаты:

- 1) выработаны требования к замыкающим соотношениям обобщенного типа по монотонному возрастанию/убыванию, что гарантирует единственность решения задачи потокораспределения, в том числе, с учетом неявных по расходу и зависимых от давления соотношений;
- 2) в рамках перехода с традиционного пути разработки ПВК на новый, объ-

ектно-ориентированный стиль моделирования ТПС, разработан программный объект «Модели элементов» аккумулирующий в себе особенности моделирования отдельных элементов ТПС с возможностью многократного его применения в методах потокораспределения при однократной реализации.

2.3 Обобщение методов расчета потокораспределения

Здесь предлагаются новые модификации методов узловых давлений и контурных расходов, которые применимы для всех рассмотренных выше случаев замыкающих соотношений, сопоставимы по эффективности с классическими методами, а для традиционных соотношений совпадают с ними.

2.3.1 Модифицированный метод узловых давлений

Предлагаемый модифицированный метод узловых давлений (ММД) [10], представляет собой обобщение классического МД на случай соотношений (2.7). Как и МД, он обеспечивает поиск решения в пространстве только узловых давлений и базируется на следующей модификации исходной модели потокораспределения (1.1):

$$Ax = Q, \quad (3.1)$$

$$p_H = A_H^T P, \quad (3.2)$$

$$p_K = -A_K^T P, \quad (3.3)$$

$$\varphi(p_H, p_K, x) = 0. \quad (3.4)$$

где A_H, A_K – $(m-1 \times n)$ -матрицы инцидентий, фиксирующие отдельно начальные и конечные узлы ветвей так, что $A_H + A_K = A$; $\varphi(p_H, p_K, x)$ – вектор-функция с элементами $\varphi_i(p_{H,i}, p_{K,i}, x_i)$, $i = \overline{1, n}$, отражающими произвольные законы течения,

включая зависимые от давления; p_H, p_K – n -мерные векторы давлений, соответственно, в начале и конце ветвей ГЦ; P – m -мерный вектор узловых давлений; P_m для простоты изложения полагается равным нулю.

Пусть на k -й итерации имеется определенное значение P^k , которому можно поставить в соответствие значения $p_H^k = A_H^T P^k$, $p_K^k = -A_K^T P^k$, а также значение x^k , удовлетворяющее уравнению

$$\varphi(p_H^k, p_K^k, x^k) = 0.$$

Линеаризация системы уравнений (3.1)-(3.4) дает

$$A \Delta x^k = -u_1^k, \quad (3.5)$$

$$\Delta p_H^k = A_H^T \Delta P^k, \quad \Delta p_K^k = -A_K^T \Delta P^k, \quad (3.6)$$

$$\varphi'_{p_H} \Delta p_H^k + \varphi'_{p_K} \Delta p_K^k + \varphi'_x \Delta x^k = 0. \quad (3.7)$$

где $u_1^k = Ax^k - Q$ – невязка, а $\varphi'_{p_H} = \frac{\partial \varphi}{\partial p_H}$, $\varphi'_{p_K} = \frac{\partial \varphi}{\partial p_K}$, $\varphi'_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ – диагональные матрицы частных производных порядка n .

Выразим Δx^k из уравнения (3.7):

$$\Delta x^k = -(\varphi'_x)^{-1} (\varphi'_{p_H} \Delta p_H^k + \varphi'_{p_K} \Delta p_K^k).$$

С учетом соотношений (3.6) получим:

$$\Delta x^k = -(\varphi'_x)^{-1} (\varphi'_{p_H} A_H^T - \varphi'_{p_K} A_K^T) \Delta P^k. \quad (3.8)$$

Подстановка формулы (3.8) в равенство (3.5) дает следующее выражение:

$$A(\varphi'_x)^{-1} (\varphi'_{p_H} A_H^T - \varphi'_{p_K} A_K^T) \Delta P^k = u_1^k. \quad (3.9)$$

По правилам дифференцирования неявных функций,

$$(x'_{p_H})_i = \frac{\partial x_i}{(\partial p_H)_i} = - \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i} \right)^{-1} \frac{\partial \varphi_i}{(\partial p_H)_i};$$

$$(x'_{p_K})_i = \frac{\partial x_i}{(\partial p_K)_i} = - \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i} \right)^{-1} \frac{\partial \varphi_i}{(\partial p_K)_i}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Отсюда

$$x'_{P_H} = -(\varphi'_x)^{-1} \varphi'_{P_H} ; x'_{P_K} = -(\varphi'_x)^{-1} \varphi'_{P_K}$$

– диагональные матрицы соответствующих частных производных порядка n .

Тогда систему (3.9) можно представить в виде

$$\tilde{M} \Delta P^k = -u_1^k ,$$

где $\tilde{M} = Ax'_{P_H} A_H^T - Ax'_{P_K} A_K^T$ – модифицированная матрица Максвелла.

Покажем также, что введенная модель (3.1)-(3.4), а также рассмотренная модификация МД накрывают канонический случай замыкающего соотношения $y = f(x)$, когда

$$\varphi(p_H, p_K, x) = p_H - p_K - f(x) = 0 .$$

В этом случае

$$\varphi'_{P_H} = E_n , \varphi'_{P_K} = -E_n ,$$

где E_n – единичная матрица порядка n .

$$\text{При этом } (\varphi'_{P_H} A_H^T - \varphi'_{P_K} A_K^T) = (E_n A_H^T + E_n A_K^T) = A_H^T + A_K^T = A^T .$$

С учетом того, что $\varphi'_x = -f'_x$, вместо выражения (3.9) имеем равенство

$A(f'_x)^{-1} A^T \Delta P^k = -u_1^k$, что совпадает с основной формулой для расчета направления шага (ΔP^k) в классическом МД [1].

Алгоритмизация ММД. С учетом вышесказанного вычислительная схема ММД остается прежней – исходя из некоторого начального приближения по давлениям (P^k) вычисляется вектор расходов (x^k) , а за ним вектор невязок (u_1^k) . После чего формируется и решается система уравнений, а результаты решения (ΔP^k) используются при вычислении нового приближения к P^{k+1} .

Обозначим $\eta_i = (x'_{P_H})_i$, $\kappa_i = -(x'_{P_K})_i$, $i = \overline{1, n}$. Тогда диагональные элементы $\tilde{M}$ определяются по соотношению

$$\tilde{M}_{jj} = \sum_{i \in I_j^-} \eta_i + \sum_{i \in I_j^+} \kappa_i ,$$

где $I_j^-(I_j^+)$ – множество ветвей, исходящих из узла (заходящих в узел) j .

Внедиагональные элементы $\tilde{M}$ определяются следующим образом: если узлы j и t соединены единственной ветвью i , то $\tilde{M}_{jt} = -\kappa_i$, когда узел t является конечным для ветви i ; $\tilde{M}_{jt} = -\eta_i$, когда узел t является начальным для ветви i ; если узлы j и t не соединены, то $\tilde{M}_{jt} = 0$; если узлы j и t соединены параллельными ветвями, образующими множество I_{jt} , то

$$\tilde{M}_{jt} = -\sum_{i \in I_{jt}} \eta_i - \sum_{i \in I_{jt}} \kappa_i.$$

При соблюдении условий $(x'_{p_n})_i > 0$, $(x'_{p_k})_i < 0$, $i = \overline{1, n}$, вытекающих из сформулированных ранее требований к монотонности функций $\varphi_i(p_{n,i}, p_{k,i}, x_i)$, $i = \overline{1, n}$, имеем неравенства $\eta_i > 0$, $\kappa_i > 0$, $i = \overline{1, n}$.

Отсюда $\tilde{M}_{jt} > 0$ при $j = t$ и $\tilde{M}_{jt} \leq 0$ при $j \neq t$ для всех $j, t = \overline{1, m-1}$. При этом

$$M_{jj} \geq \sum_{t=1, t \neq j}^{m-1} |M_{jt}|, \quad j = \overline{1, m-1},$$

где строгое неравенство имеет место, когда узел j (или t) инцидентен ветви, имеющей другим концевым узлом узел m с заданным давлением.

Приведем сопоставление вычислительных схем ММД и МД (таблица 2.3). В приведенных алгоритмах подчеркнуты те составляющие выражений, которые зависят от специфики замыкающих соотношений. Таким образом, при объектно-ориентированном подходе компоненты, которые реализуют общий метод решения задачи потокораспределения, обращаются к компонентам, отвечающим за модели элементов. Это обращение дает возможность получать значения производных и расходов на ветвях с конкретными законами течения в точке текущего приближения.

Таблица 2.3. Этапы одной итерации работы алгоритмов МД и ММД.

№	Шаг	Формула по алгоритму	
		МД	ММД
1	Задано некоторое приближение к решению по давлениям $\bar{P}^k$	—	—
2	Вычисление вектора расходов (x^k) из	$\bar{A}^T \bar{P}^k - \underline{f}(x^k) = 0$	$\underline{\varphi}(\bar{P}^k, x^k) = 0$
3	Вычисление вектора невязок	$u_1^k = Ax^k - Q$, если $\ u_1^k\ < \sigma^*$, то расчет закончен.	
4	Вычисление направления шага	$A(\underline{f}'_x)^{-1} A^T \Delta P^k = -u_1^k$	$[Ax'_{P_H} A_H^T - Ax'_{P_K} A_K^T] \Delta P^k = -u_1^k$
5	Вычисление нового приближения	$P^{k+1} = P^k + \Delta P^k$	$P^{k+1} = P^k + \delta^k \Delta P^k$

*) Обозначение: σ – заданная точность соблюдения небалансов расходов в узлах. Подчеркнуты те составляющие алгоритма, где требуется обращение за расчетом к объекту «Модели элементов».

Компоненты диагональных матриц x'_{PH} , x'_{PK} , которые необходимы для расчета направления шага по ММД, могут быть получены на основе аналитических выражений для

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i}, \frac{\partial \varphi_i}{(\partial p_H)_i}, \frac{\partial \varphi_i}{(\partial p_K)_i}.$$

Примеры таких выражений для разных типов замыкающих соотношений (традиционных, неявных по расходу и зависимых от давления) представлены в таблице 2.4, где индекс ветви опущен.

Классический МД основан на итерационной формуле $P^{k+1} = P^k + \Delta P^k$, которая не предполагает регулировку длины шага. При этом процесс сходимости часто имеет пилообразную форму и не всегда позволяет найти решение за приемлемое число итераций. В связи с этим были проведены исследования методов регулировки длины шага δ^k в соотношении $P^{k+1} = P^k + \delta^k \Delta P^k$. В случае строго выпуклой функции невязки $\|u^k(\delta^k)\|_2^2$ оказалось эффективным применение дли-

ны шага, определенной как $\delta^k = \|u^{k-1}\|_2^2 \left(\|u^{k-1}\|_2^2 + \|u^k(1)\|_2^2 \right)^{-1}$, где $\|u^k\|_2^2$ – квадрат евклидовой нормы вектора невязок. В общем случае более надежным для поиска длины шага оказалось применение метода золотого сечения.

Таблица 2.4. Примеры функции φ и ее производные.

Вариант функции φ	$\frac{\partial \varphi}{\partial p_H}$	$\frac{\partial \varphi}{\partial p_K}$	$\frac{\partial \varphi}{\partial x}$
Классический тип замыкающих соотношений			
$p_H - p_K - sx x + Y$	1	-1	$-2s x $
Тип, неявно заданный по расходу			
$p_H - p_K - s(x)x x $	1	-1	$-(2s + s'_x x) x $
$ p_H p_H - p_K p_K - s(x)x x $	$2 p_H $	$-2 p_K $	$-(2s + s'_x x) x $
Тип, зависимый от давления (на примере ГПА)			
Формула (2.3)	$2\beta_0 p_H $	$-2 p_K $	$-2\beta_2 x $
Формула (2.4)	$2 p_H \left(\beta_0 + \frac{\beta_1^2}{4\beta_2} \right) - \beta_1 \left x - \frac{\beta_1 p_H}{2\beta_2} \right $	$-2 p_K $	$-2\beta_2 \left x - \frac{\beta_1 p_H}{2\beta_2} \right $
Формула (2.6)	$2\beta_0 p_H - \beta_1 x$	$-2 p_K $	$-\beta_1 p_H - 2\beta_2 x $

2.3.2 Модифицированный метод контурных расходов

Предлагаемый модифицированный метод контурных расходов (ММКР) [13], представляет собой обобщение классического МКР на случай соотношений (2.7). Обоснование функциональной возможности понижения порядка модели (3.1)-(3.4) к пространству контурных расходов сводится к следующим этапам.

1. Исключение векторов p_H, p_K на основе (3.2), (3.3)

$$Ax = Q, \quad (3.10)$$

$$\varphi(A_H^T P - A_K^T P, x) = \varphi(P, x) = 0. \quad (3.11)$$

2. Декомпозиция векторов и матриц модели (3.10), (3.11) по признаку принадлежности ветвям-хордам (х) и ветвям остоного дерева (д) расчетной схемы ГЦ.

$$A_X x_X + A_D x_D = Q, \quad (3.12)$$

$$\varphi_X(P, x_X) = 0, \quad (3.13)$$

$$\varphi_D(P, x_D) = 0. \quad (3.14)$$

3. Исключение вектора x_D , выраженного из (3.12) как

$$x_D = A_D^{-1}(Q - A_X x_X), \quad (3.15)$$

с последующей подстановкой в (3.14), что дает модель

$$\varphi_X(P, x_X) = 0, \quad (3.16)$$

$$\varphi_D(P, x_D) = \varphi_D(P, A_D^{-1}(Q - A_X x_X)) = \phi_D(P, x_X) = 0. \quad (3.17)$$

4. Исключение вектора P , выраженного из (3.17) как

$$P = \psi_D(x_X), \quad (3.18)$$

где $\psi(x_X)$ – неявная $(m-1)$ -мерная функция, с последующей подстановкой в (3.16), что дает систему s уравнений относительно s неизвестных компонент вектора x_X

$$\varphi_X(P, x_X) = \varphi_X(\psi_D(x_X), x_X) = \phi_X(x_X) = 0. \quad (3.19)$$

Для обоснования метода численного решения системы уравнений (3.1)-(3.4)

ММКР введем следующие обозначения для уравнений модели (3.1)-(3.4)

$$u_1(x) = Ax - Q = 0, \quad (3.20)$$

$$u_2(p_H, P) = p_H - A_H^T P = 0, \quad (3.21)$$

$$u_3(p_K, P) = p_K + A_K^T P = 0, \quad (3.22)$$

$$\varphi(p_H, p_K, x) = 0. \quad (3.23)$$

Пусть имеется k -е приближение к решению, такое, что $u_1^k = 0$, $u_2^k = 0$, $u_3^k = 0$, $\varphi_D^k = 0$. Линеаризация уравнений (3.20)–(3.23) в точке этого приближения дает

$$A \Delta x^k = 0, \quad (3.24)$$

$$\Delta p_H^k - A_H^T \Delta P^k = 0, \quad (3.25)$$

$$\Delta p_K^k + A_K^T \Delta P^k = 0, \quad (3.26)$$

$$\varphi'_{P_H} \Delta p_H^k - \varphi'_{P_K} \Delta p_K^k + \varphi'_x \Delta x^k = -\varphi^k. \quad (3.27)$$

где $\varphi^k = \varphi(p_H^k, p_K^k, x^k)$, а $\varphi'_{P_H} = \frac{\partial \varphi}{\partial p_H}$, $\varphi'_{P_K} = -\frac{\partial \varphi}{\partial p_K}$, $\varphi'_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ – диагональные матрицы частных производных порядка n .

Понижение порядка линеаризованной модели (3.24)-(3.27) к пространству контурных расходов предполагает следующие операции.

1. Исключение векторов $\Delta p_H^k, \Delta p_K^k$ на основе (3.25), (3.26) дает

$$A \Delta x^k = 0, \quad (3.28)$$

$$\Phi^k \Delta P^k + \varphi'_x \Delta x^k = -\varphi^k. \quad (3.29)$$

где

$$\Phi^k = [\varphi'_{P_H} A_H^T + \varphi'_{P_K} A_K^T]. \quad (3.30)$$

2. Декомпозиция векторов и матриц модели (3.28), (3.29) дает

$$A_X \Delta x_X^k + A_D \Delta x_D^k = 0, \quad (3.31)$$

$$\Phi_X^k \Delta P^k + (\varphi'_x)_X \Delta x_X^k = -\varphi_X^k, \quad (3.32)$$

$$\Phi_D^k \Delta P^k + (\varphi'_x)_D \Delta x_D^k = 0. \quad (3.33)$$

3. Исключение вектора Δx_D^k . Из (3.31) имеем [1]

$$\Delta x_D^k = -A_D^{-1} A_X \Delta x_X^k = B_D^T \Delta x_X^k. \quad (3.34)$$

Отсюда, вместо (3.33), получим

$$\Phi_D^k \Delta P^k + (\varphi'_x)_D B_D^T \Delta x_X^k = 0. \quad (3.35)$$

4. Исключение вектора ΔP^k . Выразим ΔP^k из (3.35)

$$\Delta P^k = -(\Phi_D^k)^{-1} (\varphi'_x)_D B_D^T \Delta x_X^k. \quad (3.36)$$

Подстановка этого выражения в (3.32) дает искомую линеаризованную контурную модель

$$[(\varphi'_x)_x - \Phi_x^k (\Phi_d^k)^{-1} (\varphi'_x)_d B_d^T] \Delta x_x^k = -\varphi_x^k. \quad (3.37)$$

Покажем также, что в случае канонических замыкающих соотношений вида

$$\varphi(p_H, p_K, x) = p_H - p_K - f(x) = 0, \quad (3.38)$$

когда $\varphi'_{p_H} = E_n$, $\varphi'_{p_K} = -E_n$ и $\varphi'_x = \frac{\partial f}{\partial x} = f'_x$, – ММКР совпадает с традиционным МКР.

Как видно из соотношения (3.30), структура ненулевых элементов матрицы Φ^k совпадает со структурой A^T . Соответственно структура матриц Φ_x^k , Φ_d^k совпадает со структурой A_x^T , A_d^T . Соответственно: $\Phi_x^k = A_x^T$, $\Phi_d^k = A_d^T$, $-\Phi_x^k (\Phi_d^k)^{-1} = B_d$, так как $B_d = -A_x^T (A_d^T)^{-1}$ [1]. Отсюда, вместо (3.37), получим $[(f'_x)_x + B_d (f'_x)_d B_d^T] \Delta x_x^k = -\varphi_x^k$ или $(Bf'_x B^T) \Delta x_x^k = -\varphi_x^k$, так как $B = \begin{bmatrix} E_c & B_d \end{bmatrix}$ и

$$Bf'_x B^T = \begin{bmatrix} E_c & B_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (f'_x)_x & 0 \\ 0 & (f'_x)_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_c \\ B_d^T \end{bmatrix} = (f'_x)_x + B_d (f'_x)_d B_d^T.$$

Покажем, также, что в случае (3.38) $\varphi_x^k = Bf(x^k)$. Так как $p_H = A_H^T P$, $p_K = -A_K^T P$, то $\varphi(p_H, p_K, x) = p_H - p_K - f(x) = (A_H^T + A_K^T)P - f(x) = A^T P - f(x) = 0$.

При этом $\varphi_d^k = f_d(x_d^k) - A_d^T P^k$ и $\varphi_x^k = f_x(x_x^k) - A_x^T P^k$. Так как $\varphi_d^k = 0$, то $f_d(x_d^k) - A_d^T P^k = 0 \Rightarrow P^k = (A_d^T)^{-1} f_d(x_d^k)$.

Отсюда $\varphi_x^k = f_x(x_x^k) - A_x^T (A_d^T)^{-1} f_d(x_d^k) = f_x(x_x^k) + B_d f_d(x_d^k) = Bf(x^k)$.

Таким образом, в случае традиционных соотношений (3.38) система (3.37) в предлагаемом методе совпадает с системой $(Bf'_x B^T) \Delta x_x^k = -Bf(x^k)$, решаемой на каждой k -й итерации в классическом МКР.

Алгоритмизация ММКР. В таблице 2.5 приведен алгоритм одной итерации ММКР в сопоставлении с МКР. Примеры производных, применяемых при составлении системы уравнений в алгоритме ММКР, рассмотрены в таблице 2.4.

Таблица 2.5. Алгоритмы классического и модифицированного МКР.

№	Шаг	Формула по алгоритму	
		МКР	ММКР
1	Имеется некоторое приближение x_X^k , при котором	$u_1^k = Ax^k - Q = 0$, где P^k удовлетворяет $\underline{\varphi_D}(P^k, x_D^k) = 0$	
2	Вычисление вектора невязок	$\varphi_X^k = B \underline{f(x^k)}$, если $\ \varphi_X^k\ < \sigma$ * – расчет закончен.	$\varphi_X^k = \underline{\varphi_X}(P^k, x_X^k)$, где P^k удовлетворяет $\underline{\varphi_D}(P^k, x_D^k) = 0$, если $\ \varphi_X^k\ < \sigma$ – расчет закончен.
3	Решение системы уравнений	$(B \underline{f'_x} B^T) \Delta x_X^k = -\varphi_X^k$	$[(\underline{\varphi'_x})_X - \Phi_X^k (\Phi_D^k)^{-1} (\underline{\varphi'_x})_D B_D^T] \Delta x_X^k = -\varphi_X^k$
4	Вычисление нового приближения	$x^{k+1} = x^k + B^T \Delta x_X^k$	

*) Обозначения: σ – заданная точность соблюдения небалансов перепадов давлений в контурах. Подчеркнуты те составляющие алгоритма, где требуется обращение за расчетом к объекту «Модели элементов».

2.4 Основные выводы

1. Разработаны основные положения концепции ООМ ГЦ, обеспечивающей возможность отделения программных реализаций общих методов ТГЦ от прикладной специфики ТПС в конечных ПВК.
2. Разработан объект «Модели элементов» аккумулирующий специфику моделирования законов течения среды по отдельным элементам ТПС и предоставляющий программный интерфейс (внутренние методы и свойства) для применения этого объекта в методах потокораспределения.
3. Выработаны требования к замыкающим соотношениям по монотонному возрастанию/убыванию, что гарантирует единственность решения задачи потокораспределения.
4. Разработана новая модель установившегося изотермического потокораспределения, которая является более общей и позволяет одинаково учитывать традиционные и нетрадиционные случаи законов течения среды.
5. Разработаны новые численные методы расчета установившегося изотермического потокораспределения (ММД и ММКР), одновременно удовлетворяющие требованиям вычислительной эффективности и универсальности в отношении новых возможностей учета широкого спектра соотношений для законов течения жидкости или газа, включая традиционные, неявные по расходу и зависимые от давления.

3. Механизмы реализации технологии ООМ ГЦ

В данной главе приведено обоснование подхода к реализации технологии ООМ ГЦ, предлагается способ программной реализации моделей ТПС и методов ТГЦ с вариантом их взаимодействия на примере задачи потокораспределения.

3.1. Обоснование подхода к реализации технологии ООМ ГЦ

При разработке нового ПВК неизбежно возникает проблема выбора ключевых ИТ для программной реализации основных компонент, разделенных по некоторому принципу, где имеют место правила и архитектура их взаимодействия. Одновременно возникает проблема комплексного развития конечного ПВК с минимальными затратами в будущем, а также расширению возможностей моделирования объекта приложения разными разработчиками. С развитием ИТ претерпевают изменение и концепции разработки ПВК, появляются новые возможности программной реализации методов моделирования ТПС, что, в конечном итоге, позволяет качественно улучшить создаваемые ПВК. Однако уровень применения этих ИТ в разработке ПВК должен ограничиваться целесообразностью поставленных задач. Например, применение технологии ООМ для моделирования ТПС демонстрирует возможность отделения частной специфики объекта от общих, независимых методов расчета потокораспределения. Такая концепция применима не только для задач моделирования режимов.

Современный ПВК для моделирования ТПС, как правило, должен иметь как минимум три составляющие части:

1) графический интерфейс пользователя – предоставляет удобные и эффективные средства внесения исходной информации о моделируемом объекте,

вывода, анализа и интерпретации результатов расчета;

2) расчетные компоненты – обеспечивает решение задач;

3) поставщики данных – совокупность компонент, предназначенных для чтения, преобразования и передачи данных разных форматов в общее хранилище оперативной информации, которое доступно всем компонентам ПВК, а также обратного преобразования в указанный формат постоянного хранения.

Все части могут развиваться независимо друг от друга, где улучшение их характеристик может осуществляться разными специалистами. При этом, каждая часть может быть «монолитной», т.е. реализованной в едином файле. Однако развитие в таком ключе не всегда эффективно. Увеличение сложности и объема работ по развитию каждой из частей неминуемо превысит рамки обозримости проекта и его понимания для разработчика, что потребует привлечения новых подходов к развитию ПВК и пересмотру его архитектуры в целом. Решением этой проблемы, как сказано в обзоре литературы, является грамотное проектирование ПВК по концепции ООМ, что означает разделение ПВК на некоторые компоненты, каждый из которых можно развивать независимо и с меньшими трудозатратами. Состав компонентов графического интерфейса ПВК можно разделить на три группы:

- 1) графический редактор – компонент для редактирования параметров моделируемого объекта;
- 2) визуализатор – компонент отображения схемы и параметров моделируемого объекта;
- 3) модули расширения – программно-подключаемые компоненты, расширяющие возможности графического интерфейса;

Расчетные компоненты, в свою очередь, можно разделить на группы по назначению:

1) обеспечение решения задачи общими методами независимо от специфики моделируемого объекта;

2) особенности моделирования элементов ТПС, которые не зависят от методов расчета и контекста решаемой задачи;

3) организацию взаимодействия общих методов и моделей элементов в зависимости от условий расчета.

Потенциальные возможности развития и эффективность конечного ПВК напрямую зависит от одной или сразу нескольких ИТ для реализации компонент. Например, известную проблему разработки компонент на разных языках программирования невозможно решить без заранее согласованного способа их взаимодействия между собой на уровне управления и данных. При этом, использование одной технологии может быть уместно, например, в случае разработки локального ПВК, а для разработки распределенного ПВК может потребоваться иное решение. Таким образом, применение универсального подхода к разработке ПВК, как правило, требует привлечения сразу нескольких ИТ. Поэтому, разработка ПВК по концепции ООМ ГЦ потенциально обеспечит возможность соответствия требованиям, изложенным выше: развитие, расширение, языковая независимость и т.д.

3.2. Технология программной реализации моделей ТПС и методов ТГЦ

Реализация технологии ООМ применительно к ТПС сводится к декомпозиции модели ГЦ на объекты исходя из особенностей предметной области, где целью служит удовлетворение требованиям, предъявляемым к новым реализациям методов ТГЦ. На рисунке 3.1 показаны объекты «Модель сети» и «Модели элементов» с их внутренними методами (void), свойствами (property) и событиями. События приводят к выполнению связанных операций:

- 1) запрос параметров и производных из объекта «Модели элементов» – выполняется на каждой итерации для каждой связи схемы ГЦ;
- 2) расчет начального приближения – выполняется однократно после параметризации объектов расчета;
- 3) решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) – выполняется на каждой итерации и при вычислении начального приближения.



Рисунок 3.1. Применение технологии ООМ ГЦ путем разделения на объекты по физическому смыслу.

События применимы, например, для параллельного расчета параметров связей сразу на нескольких вычислительных устройствах, что эффективнее (в случае очень больших схем ГЦ), чем последовательный расчет. Отдельно стоят вопросы реализации механизма расширения этих объектов и возможности применения унаследованного ПО.

Посредством собственных методов, реализованных в объектах, можно орга-

низовать как обмен данными между ними, так и передачу управления, например, через программный указатель на загруженный и инициализированный объект. Переменная инициализируемого экземпляра объекта «Модели элементов» после параметризации передается в «Модель сети», – посредством этой переменной выполняется последующий обмен данными. Эта переменная может быть инициализирована любым объектом, реализующим «Модели элементов», что позволяет обособить (абстрагировать) взаимодействующие объекты на уровне конкретных реализаций.

Отметим несколько технических преимуществ такого подхода. Во-первых, однократная параметризация объекта «Модели элементов» позволяет сократить количество передаваемых данных между этими объектами в процессе поиска решения. Дело в том, что алгоритм метода расчета потокораспределения многократно обращается к объекту «Модели элементов» для расчета параметров элементов. При этом, вызов его методов осуществляется вместе с передачей аргументов и чем их меньше, тем экономичнее эта операция. Здесь достаточно передавать только два значения для получения третьего – x_i , $p_{n,i}$, $p_{k,i}$ в случае модифицированных методов и одного значения – x_i или y_i в традиционном варианте.

Во-вторых, в объект «Модель сети» не загружаются параметры элементов, т.е. обеспечивается полная абстракция к специфике моделируемых элементов на уровне исходных данных.

В-третьих, переменная инициализируемого экземпляра объекта «Модели элементов» после параметризации передается в «Модель сети», – посредством этой переменной выполняется последующий обмен данными. Эта переменная может быть инициализирована любой реализацией объекта «Модели элементов», где соблюдены/согласованы имена методов (void) и свойств, что позволяет обособить (абстрагировать) взаимодействующие объекты на уровне конкретных

реализаций.

В четвертых, появляется возможность отказа от соблюдения правила наследования между классами объектов, когда создание нового класса обязывает программиста сохранять родительский класс (и его компонент) в течении всего жизненного цикла программы. Отказ от наследования позволяет физически изолировать объекты друг от друга при сохранении их функционального взаимодействия и внутреннего устройства, которое может быть произвольным. Под функциональным взаимодействием с объектом понимается вызов его методов, результат которых будет зависеть только от входных аргументов.

В итоге, такие объекты становится возможно развивать и отлаживать отдельно друг от друга и даже замена реализации одного из объектов не потребует рекомпиляции другого объекта.

Расширение объекта «Модели элементов» на новые типы элементов без перепрограммирования его компонента и наследования класса возможно, например, следующим образом. Поскольку взаимодействие этого объекта с «Моделью сети» подчиняется правилу полиморфизма, то в качестве объекта «Модели элементов» может выступать любая его реализация и даже несколько таких реализаций. Тогда здесь возможны два пути: 1) либо объект «Модель сети» должен иметь возможность переключаться с одной реализации объекта «Модели элементов» на другую в процессе поиска решения, что, однако, приведет к необходимости программирования такого механизма в каждом методе расчета; 2) либо организовать этот механизм в самом объекте «Модели элементов», что является более предпочтительным. Для обоих вариантов потребуется создать новый объект «Модели элементов» (реализацию) и соблюсти те же правила взаимодействия с «Моделью сети». В первом варианте объект «Модель сети» должен содержать массив отметок, указывающий принадлежность того или иного типа элемента к базовому или новому объекту. Во-втором, – за эти отметки должен отвечать базовый объект «Модели элементов» и обеспечивать: 1) переадресацию к новому объекту, если

указываемый в запросе элемент ему принадлежит; 2) расчет параметров, если элемент принадлежит базовому объекту.

Важным аспектом механизма расширения является согласованность индексов связей между базовым и новым объектом. Индексы связей в расчетном методе объекта «Модель сети» должны полностью соответствовать индексам элементов в массиве объекта «Модели элементов». Такой массив элементов назовем условным, под которым будем понимать некоторую реализацию хранения параметров разнотипных элементов в программных массивах с прямым доступом по общему индексу элемента. Условный массив заполняется исходными данными при параметризации объекта «Модели элементов» и сохраняется на время решения задачи. Этот массив также может содержать указатели на переменную инициализации нового объекта. Для взаимодействия с ним потребуется только указатель и индекс элемента в условном массиве нового объекта.

Алгоритм работы по расширению базового объекта следующий. Объявляется новая переменная и инициализируется новым объектом расширения. В процессе параметризации свойств нового объекта необходимо сохранять эту переменную вместе с индексом элемента в соответствующих ячейках условного массива базового объекта. Таким образом, этот массив должен содержать либо требуемые для расчета параметры, либо указатели (и индексы) на новый объект. Новый объект инициализируется однократно, а указатель на его переменную передается многократно, что позволяет согласовать индексы условных массивов между базовым и новым объектом. На рисунке 3.2 условно показан пример согласованности массивов расчетных объектов с учетом нескольких объектов расширения.

Такой подход реализует достаточно простой, но эффективный способ неограниченного расширения базового объекта «Модели элементов». При этом, фактически обеспечивается принцип наследования класса базового объекта, что, однако, не лишает возможности его исключения из расчетного процесса. Объек-

тов (компонентов) расширения может быть несколько, например, для учета особенностей элементов разных типов ТПС. Более того, если в новых объектах запрограммировать аналогичный механизм расширения, то появится возможность массового расширения уже новых объектов, в том числе, с помощью других технологий, например, для интерпретируемых языков или унаследованного ПО.

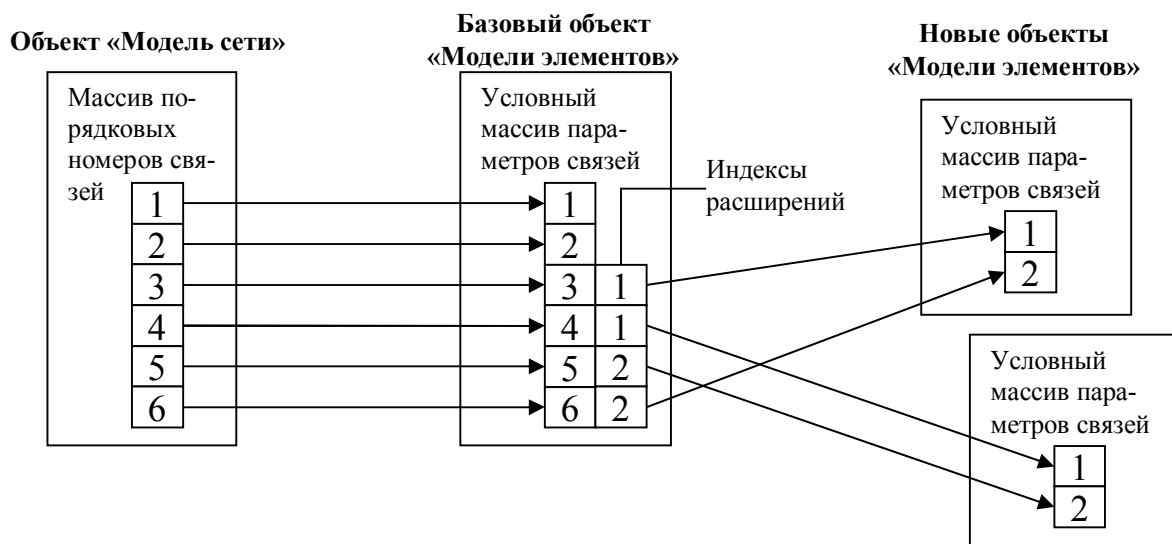


Рисунок 3.2. Согласование условных массивов в расчетных объектах с учетом расширений, где стрелки означают соответствие индекса между их массивами.

Кроме того, необходимо чтобы компоненты обладали рациональной степенью универсальности и автономности, а их взаимодействие обеспечивалось простыми, гибкими и легко внедряемыми средствами. Технология разработки должна учитывать наличие удобных средств реализации и преемственность существующего опыта создания программ. Также необходимо учесть наличие унаследованного ПО, переработка которого на кроссплатформенную основу потребует значительных временных затрат, что не желательно. В области применения ПВК для моделирования ТПС наиболее распространенной ОС является «Windows», что заведомо определяет платформу для внедрения. Для этого каждый компонент целесообразно наделить универсальным программным интерфейсом, упрощающим разноязыковое взаимодействие программных

реализаций (C, Basic, Fortran, JavaScript, PHP, и др.) как существующих разработок, так и новых.

С учетом сказанного, представляется рациональным применение технологии COM, обеспечивающей двухстороннее взаимодействие программ и компонент по управлению и данным на уровне совместимости интерфейсов, в том числе, это позволяет разрабатывать промежуточные программы для унаследованного ПО. Такой «переходник» реализует механизм COM-интерфейса и обеспечивает обращение к унаследованному ПО.

Основным понятием, которым оперирует технология COM, является COM-интерфейс компонента, который должен иметь уникальный идентификатор «GUID» и имя, состоящее из его названия и класса. «GUID» позволяет различать компоненты, зарегистрированные под одинаковыми именами. Обращение к методам и свойствам компонента выполняется посредством среды разработки (например, как к «ADODB») по имени или «GUID». Использование «GUID» или имени предполагает предварительную регистрацию их в реестре ОС «Windows». Регистрация может быть выполнена двумя способами. Например, вручную, описав алгоритм добавления «GUID», имени и абсолютного пути к исполняемому файлу в реестр, а также с помощью стандартной утилиты «regsvr32.exe» или «RegAsm.exe» из комплекта «.Net Framework» в зависимости от реализации. Эта технология позволяет организовать следующие режимы работы компонента:

- «in-process server» – позволяет загружать отдельный экземпляр компонента при каждой новой инициализации его объекта;
- «out-of-process server» – позволяет однократно загружать компонент при инициализации его объекта так, что последующие инициализации не будут приводить к повторной загрузке компонента, что, однако, требует его регистрации в специальной виртуальной таблице ROT (Running Object Table) при запуске.

Первый режим применяется для программирования компонент в виде «DLL», тогда как второй – в виде «EXE»-файлов. Последний режим дает возможность вызывать открытые функции уже запущенных программ из других без перезапуска. Например, отдельная программа «Поставщик данных» может предоставлять данные неограниченному числу обратившимся к нему программ по СОМ-интерфейсу. При этом, запуск, инициализацию и подключение к источникам данных «Поставщик данных» выполняет однократно, т.е. без перезапуска, что экономит время.

Существует также вариант разработки компонент с расширением «OCX», которые являются модификацией обычных библиотек «DLL» и предназначены для работы в качестве расширений обычных возможностей элементов управления на веб-страницах сайтов. Однако данный подход не прижился в связи с проблемами обеспечения электронной безопасности при посещении таких сайтов. «DLL»-файлы могут быть загружены в режиме:

- «Раннего связывания» – компонент копируется в память при загрузке и стирается по завершению работы программы. При компиляции программы компилятор может проверить наличие вызываемых методов и свойств в загружаемом компоненте. Преимущество: все требуемые компоненты загружаются в память один раз, что ускоряет первое обращение к ним. Недостатки: загруженные компоненты, на которые уже затрачено время на загрузку, могут быть вообще не использованы.

- «Позднего связывания» – Компилятор не может проверить наличие используемых имен функций и свойств компонента, а делает это по факту обращения к ним. Достоинства: в процессе работы приложения копируются в память только требуемые компоненты, что потенциально сокращает время запуска основного программного блока. Недостатки: не всегда уместно использовать данный режим, особенно если требуется быстрый отклик приложения и его частей, так как используемые компоненты требуют время на

загрузку в память и подключение к ним. Компилятор не может проверить связь с компонентами, а, значит, вероятность ошибки на этапе разработки приложения выше.

Тогда с целью организации взаимодействия двух и более объектов целесообразно использовать комбинированный вариант раннего и позднего связывания. С одной стороны, объекты «Модель сети» и «Модели элементов» должны загружаться вместе с ПВК по «раннему связыванию», что ускоряет отклик компонент для функций расчета. С другой, – инициализированный объект «Модели элементов» будет передаваться в объект «Модель сети» как обычная переменная, обращение к которой будет происходить через механизм «позднего связывания».

На примере алгоритма 3.1 показано обращение к зарегистрированному СОМ-объекту. К сожалению, этот набор команд и их состав сильно зависит от языка программирования, однако, порядок и общий смысл выполняемых действий является общим. Данный алгоритм выполняет загрузку СОМ-объекта и вызов его метода $\{x\}$ с аргументом $\{y\}$. На этом примере покажем, что именно представляет из себя указатель на загруженный объект «Модели элементов», с помощью которого осуществляется взаимодействие расчетных объектов (рассмотрено выше), но реализованного с применением технологии СОМ. Команда на третьей строке осуществляет загрузку СОМ-объекта, указанного в строке 2. Переменная `pointer` является инициализированной переменной или указателем на загруженный СОМ-объект, через которую выполняется вызов методов и свойств объекта на строке 4. Если СОМ-объект инициализировать и параметризовать подобным образом и указатель на него передать как аргумент в другой объект, то принимающему объекту не потребуется повторно осуществлять уже сделанные операции.

Такой подход нужен для того, чтобы исключить выполнение команды загрузки на строке 3 объекта «Метод расчета», а выполнять ее в объекте «Модель

сети» для загрузки и параметризации объекта «Модели элементов».

- 1) using System.Reflection; //включение спец. команд
- 2) Type id = Type.GetTypeFromProgID("Object.COM"); //преобразование имени объекта
- 3) object pointer = Activator.CreateInstance(id); //загрузка объекта
- 4) id.InvokeMember("x", BindingFlags.InvokeMethod, null, pointer, y); //вызов метода

Алгоритм 3.1. Исходный код на языке C# (2010 г.).

С точки зрения надежности функционирования ПВК объекты «Модель сети» и «Модели элементов» должны быть реализованы как DLL и функционировать в режиме «in-process server». Данный режим позволит обеспечить устойчивое функционирование всего ПВК в случае непредвиденной ошибки в расчетных компонентах. Например, при параллельном решении сразу нескольких задач, где задействованы эти объекты, аварийное завершение одного из процессов расчета не повлияет на работу остальных.

Итак, под реализацией «Моделей элементов» понимается программный компонент, методами которого являются: $f(x_k)$ – расчет потери давления для конкретного элемента, $f'_{x,k}$, η_i^k , κ_i^k – вычисление производной, $f(y_k)$ – расчет расхода по заданной потере, решение уравнения $\varphi(p_H^k, p_K^k, x^k) = 0$ относительно одной (запрашиваемой) переменной по заданным двум другим и др.

На рисунке 3.3 приведена диаграмма классов объекта «Модели элементов», среди которых присутствуют внутренние классы типов элементов: TRump – класс насосных агрегатов с коэффициентами полинома характеристики; TRipe – класс, описывающий параметры участка трубопровода с коэффициентами местных сопротивлений; TValve – класс запорной арматуры. Класс TLink отвечает за учет неподдерживаемого типа элементов, где требуется только один параметр – указатель на инициализированную переменную объекта расширения. Основные свойства объекта отвечают за выбор формулы расчета потери напора (перепада

давления) на участке трубопровода и метода обратного вычисления расхода для неявных формул вместе со значением начального приближения, ограничением на число итераций и приемлемой точностью расчета, а также за параметры транспортируемой среды (плотность, температура, вязкость). Описание интерфейса объекта приведено в приложении.

Объект «Модель сети» должен содержать несколько реализаций метода расчета потокораспределения. Для этого достаточно выделить методы расчета в независимые объекты и обеспечить их полиморфное однообразие по свойствам, входным параметрам и возвращаемому результату. Исходя из постановки задачи потокораспределения, входными параметрами объекта «Метод расчета» являются заданные давления и расходы в узлах, топология расчетной схемы и параметры элементов. На рисунке 3.4а приведена диаграмма классов объекта «Метод расчета», где P – давления, Q – нагрузки, j_n, j_k – начальные и конечные номера узлов, x, h – расходы и перепады давлений (напоров) на ветвях. Описание интерфейса объекта приведено в приложении.

Методы расчета потокораспределения требуют задания начального приближения и чем оно удачнее (ближе к решению), тем меньше потребуется итераций поиска решения, что, в конечном итоге, сокращает общее время счета. Количество способов его вычисления настолько велико, что задача вычисления начального приближения сама является предметом исследования. Чтобы исключить дублирование этих способов среди методов расчета выделим их в отдельный объект «Начальное приближение» (рисунок 3.4b). Свойства данного объекта и требуемые входные параметры аналогичны объекту «Метод расчета», но расширены выбором способов расчета. Этому объекту также требуется указатель на инициализированный объект «Модели элементов».

На каждой итерации метода расчета потокораспределения решается СЛАУ, от эффективности решения которой напрямую зависит качество конечных ПВК. Существует множество методов решения СЛАУ, отличающихся удобством их

программной реализации и возможностью учета специфики в задачах потокораспределения, что также является отдельным направлением исследований. Выделение этих методов решения в отдельный объект позволит не только сократить количество дублирующих блоков среди методов расчета потокораспределения, но и расширить их выбор. Данный объект может одновременно применяться как в методах расчета потокораспределения, так и при вычислении начального приближения. На рисунке 3.4с приведена диаграмма классов объекта «Решение СЛАУ», где реализован метод Гаусса-Жордана и Холецкого с учетом разреженности [97], класс LDLT-разложения для симметричных матриц (класс LSM, Linear Sparse Matrix). Для применения алгоритма учета разреженности СЛАУ требуются дополнительные методы данного объекта, такие как добавление нового элемента, запрос первого и переход к следующему элементу в строке матрицы. Матрица коэффициентов СЛАУ с учетом разреженности представляет собой два одномерных массива (на рисунке 3.4с это М-структура), где первый содержит индексы ненулевых строк и столбцов, второй – данные в соответствии с этим индексами. Описание интерфейса объекта приведено в приложении.

Как показывает практика наиболее компактным способом записи топологии расчетной схемы, являются два одномерных массива с номерами начальных и конечных узлов. Эти номера возможно поставить в соответствие номерам строк и столбцов в матрице коэффициентов СЛАУ. Для этого в объекте «Решение СЛАУ» предусмотрен метод преобразования в М-структуру на основе информации о топологии схемы.

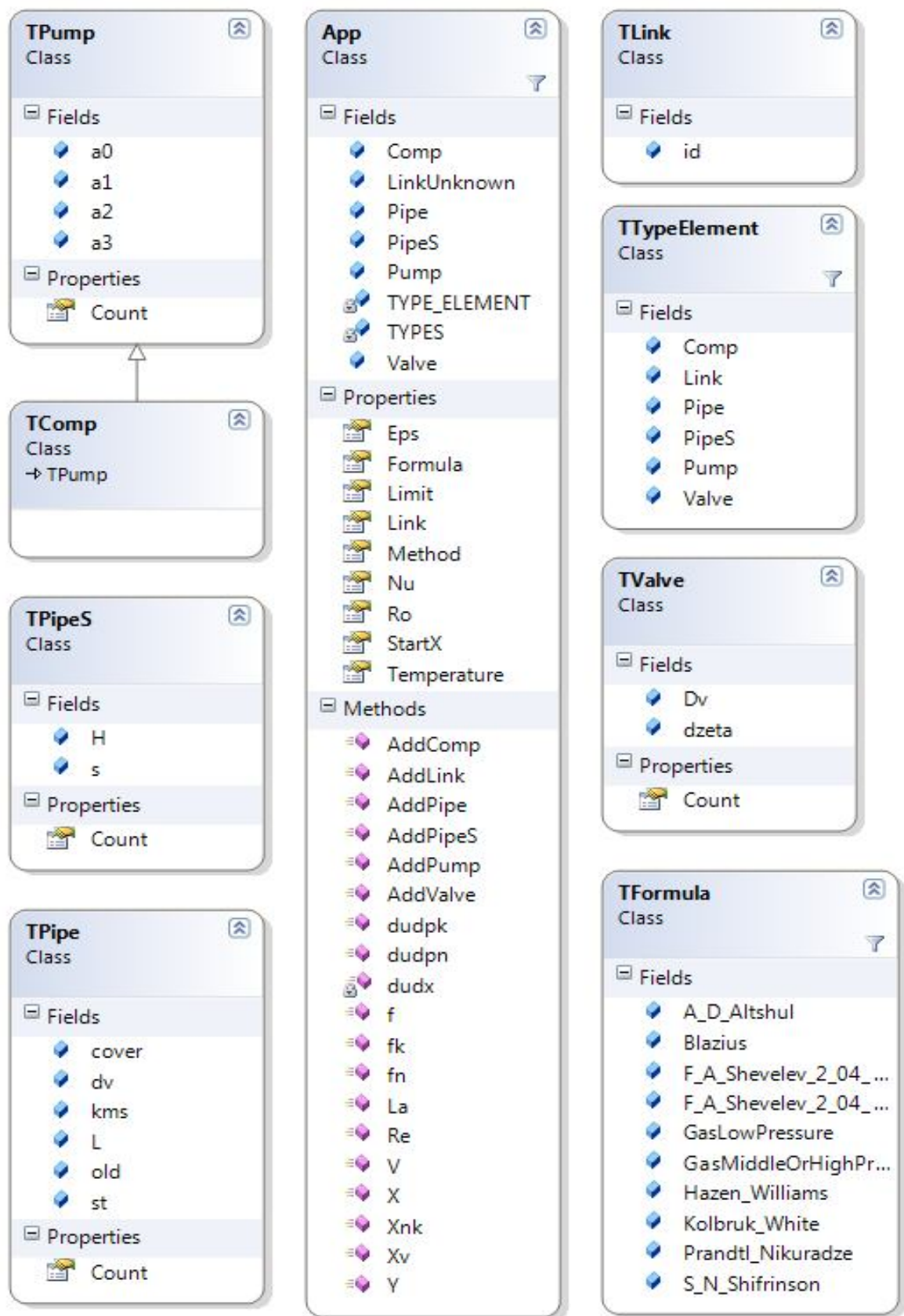
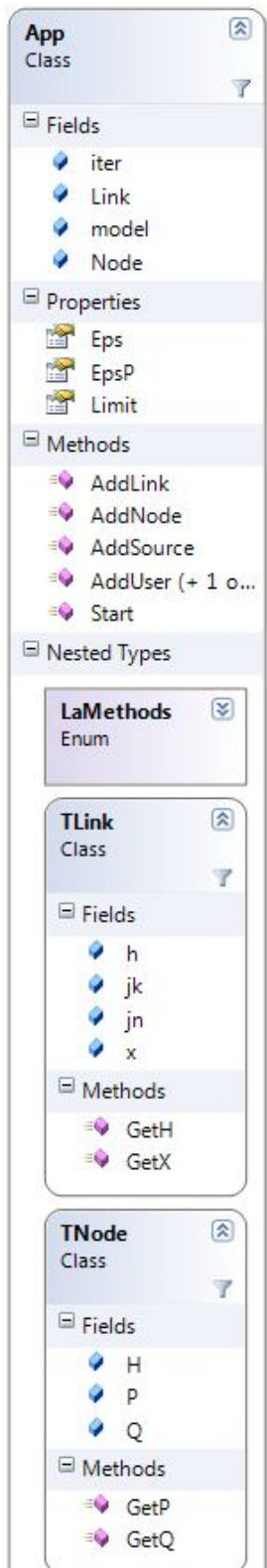
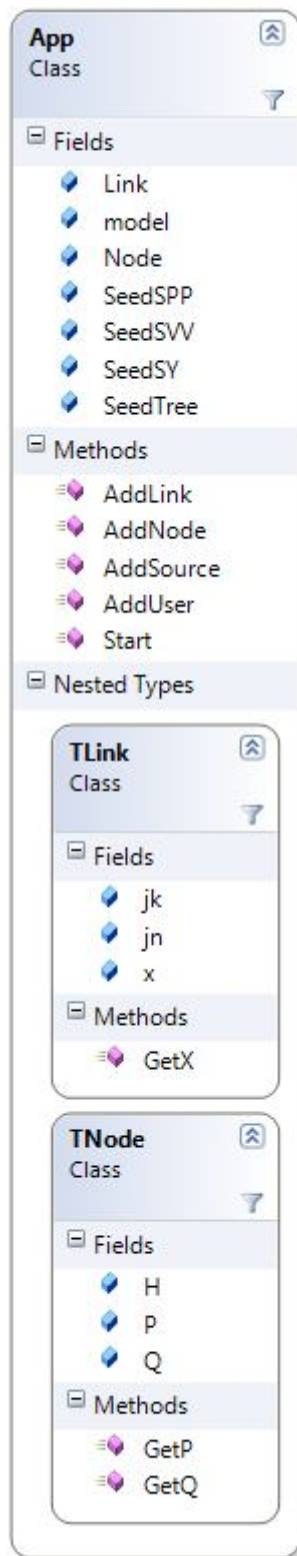


Рисунок 3.3. Диаграмма классов объекта «Модели элементов».

a)



b)



c)



Рисунок 3.4. Диаграмма классов объектов: а) «Метод расчета», б) «Начальное приближение», в) «Решение СЛАУ».

3.3. Технология совместного применения моделей ТПС и методов ТГЦ

Объект «Модель сети» обеспечивает загрузку, параметризацию и контроль над объектами «Модели элементов», «Метод расчета», «Начальное приближение» и «Решение СЛАУ». При этом, состав этих объектов может включать множество объектов «Метод расчета», неограниченное число расширений для «Модели элементов» или взамен его, различные реализации объектов «Начальное приближение» и «Решение СЛАУ» (рисунок 3.5).

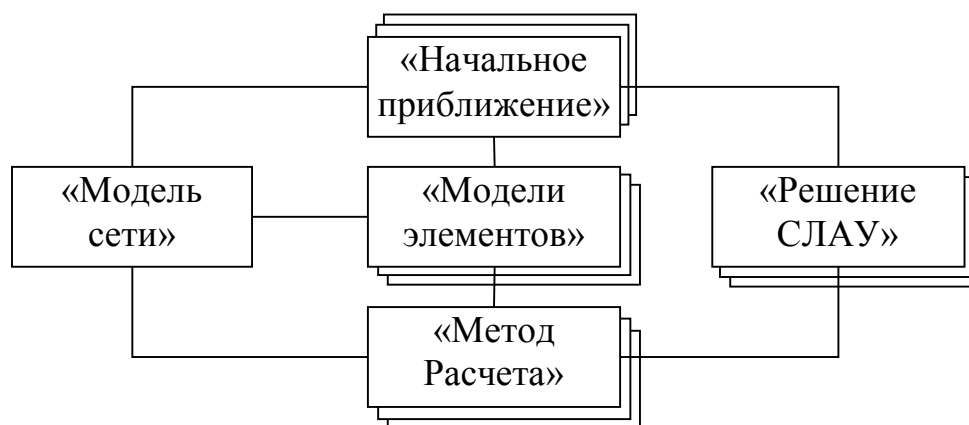


Рисунок 3.5. Состав и взаимосвязи между расчетными объектами.

Таким образом, целевое назначение этого состава не ограничено только задачами расчета потокораспределения, а ориентированно на применение готовых расчетных объектов при решении разных задач (анализ, синтез, управление) из области проектирования, эксплуатации и управления. Для этого объект «Модель сети» должен иметь промежуточный алгоритм, определяющий состав, последовательность загрузки и обмена данными между расчетными объектами в контексте решаемой задачи. Такой алгоритм должен варьировать и подбирать наиболее оптимальный состав на базе избыточного набора отлаженных объектов, согласованных между собой в едином стиле, что позволит детализировать

процесс формирования требуемого ПВК для конкретной задачи в автоматическом режиме.

Процессу параметризации расчетных объектов предшествует операция приема исходных данных о схеме ТПС в формате, задекларированном в классе TSave объекта «Модель сети» (алгоритм 4.1). Этот класс содержит дополнительные классы: TMethod – описание параметров для объекта «Метод расчета»; TTypeSystem – отвечает за описание типа системы, поступившей на расчет схемы; TSettings – обобщает настройки по расчетной схеме; TTemplate – описывает параметры транспортируемой ГЦ рабочей среды (рисунок 3.6).

```
{
  "TypeSystem": 1,
  "idscheme": "765b9707-08a8-4bb4-856f-66d90ca05bcb",
  "link": [
    {"id":2, "firstnodeIndex":0, "lastnodeIndex":1, "id":2, "type":6,
      "Params": ["0","true","false","100","1","0","0","0"],
      "ParamNames": ["L", "state", "old", "dv", "standart", "cover", "th", "ms"]},
    {"id":5, "firstnodeIndex":1, "lastnodeIndex":2, "id":5, "type":2,
      "Params": ["0,15014", "True", "0", "1"],
      "ParamNames": ["dzeta", "state", "dv", "type"]},
    {"id":7, "firstnodeIndex":2, "lastnodeIndex":3, "id":7, "type":1,
      "Params": ["true", "80,89", "0", "-0,000836", "0"],
      "ParamNames": ["state", "c0", "c1", "c2", "c3"]}
  ],
  "node": [
    {"id":1, "type":4, "Params":["0", "0"], "ParamNames": ["P", "z"]},
    {"id":3, "type":3, "Params":["0"], "ParamNames": ["z"]},
    {"id":6, "type":3, "Params":["0"], "ParamNames": ["z"]},
    {"id":8, "type":5, "Params":["0", "0"], "ParamNames":["Q", "z"]}
  ],
  "idFormulaModel": 1,
  "method": {"id": 1, "precision": 0.01, "iteration": 20}
}
```

Алгоритм 4.1. Кодировка исходных данных расчетной схемы ТПС в формате JSON.

Данная кодировка содержит блоки связей (link), узлов (node), настройки для метода (method), номер типа ТПС (TypeSystem), уникальный номер файла

(idscheme) и номер методики или формулы для моделирования участка трубопровода (idFormulaModel), где 1,2 – формулы Шевелева, 3 – Кольбрук-Уайт и т.д. Блок связей содержит описание каждой связи, где имеются значения параметров (Params) и их названия (ParamNames), место в топологии (firstnodeIndex, lastnodeIndex) и тип элемента (type), который принимает значения: 1 – активный элемент с коэффициентами полинома (c_0, c_1, c_2, c_3); 2 – задвижка с коэффициентом сопротивления ($dzeta$), диаметром (dv) и типом гидравлической характеристики (type); 6 – участок трубопровода с длиной (L), диаметром (dv), стандартом изготовления (standart) и тд. Каждый элемент имеет уникальный номер (id) и отметку (state) о состоянии, что влияет на его учет в расчетном процессе. Аналогично в блоке узлов: 3 – узел соединения имеющий только отметку земли (z), 4 – узел источник с заданным давлением (P), 5 – узел потребитель с заданной нагрузкой (Q).

За описание и хранение параметров элементов ГЦ и граничных условий в объекте «Модель сети» отвечает класс TBaseElement, имеющий переменные для указания общей информации об элементах: номер, тип, список параметров и их значений. Этот класс наследуют классы TNode и TLink, которые объявляют переменные, специфичные для узлов и связей (имеет дополнительные переменные для индексов начальных jn и конечных jk узлов).

Класс TCalcResult декларирует состав данных, достаточных для вывода результатов расчета из объекта «Модель сети».

Покажем основные этапы координации работы объектов на примере автоматической сборки ПВК для решения задачи потокораспределения. Сборка осуществляется по мере ввода данных в расчетные объекты, первое обращение к которым должно вызывать загрузку их компонентов, что и показано на соответствующей диаграмме последовательности (рисунок 3.7):

1) вызывающая программа обращается к методу WaterDC объекта «Модель сети», где через входной параметр передает данные по расчетной схеме в формате

JSON класса TSave, тем самым запускает алгоритм их анализа на предмет наличия ошибок, соответствия значений разрешенным диапазонам и т.д.;

2) на основании результатов анализа исходных данных выбирается предпочтительный метод расчета и способ задания начального приближения;

3) инициализация и параметризация объекта «Модели элементов» и его расширений;

4) в случае отсутствия ошибок объект «Модель сети» передает инициализированную переменную объекта «Модели элементов» в объект «Начальное приближение» (в переменную model) вместе с данными о топологии ГЦ и граничных условиях (нагрузки, давления), после чего отдает команду на расчет (Start);

5) в процессе расчета объект «Начальное приближение» обращается к объекту «Модели элементов» при формировании системы уравнений, и к объекту «Решение СЛАУ» за ее решением;

6) полученный результат расчета, данные о топологии ГЦ, граничные условия и указатель на «Модели элементов» передаются в инициализированный объект «Метод расчета», после чего следует команда на запуск итерационного процесса решения задачи потокораспределения;

7) на каждой итерации метода расчета происходит обращение к объекту «Модели элементов» для вычисления параметров элементов по индексу для составления системы уравнений, решение которой обеспечивает объект «Решение СЛАУ»;

8) после завершения процесса расчета объект «Модель сети», используя результат расчета объекта «Метод расчета», формирует набор данных для передачи запрашивающей программе через вызов метода GetWaterDC.

В данном случае, допустимо разработать компоненты с поддержкой COM-интерфейса только для объектов «Модель сети» и «Модели элементов»,

поскольку остальные объекты не взаимодействуют с другими программами и расширениями.

Применение готовых компонент в других ПВК потенциально возможно через интерфейс COM или прямой доступ (точка входа) к DLL-файлу (состав процедур и свойств объектов приведен на соответствующих диаграммах классов). Не смотря на это, данная разработка является примером обеспечения применимости расчетных объектов и расширения их состава путем включения новых объектов и замыкающих соотношений без перепрограммирования. Более того, данная архитектура не является завершенным проектом, а может быть положена в основу создания более совершенного ПВК в более широком смысле, когда в каждом расчетном объекте будут предусмотрены всевозможные варианты взаимодействия, необходимые процедуры и свойства для многих других математических методов моделирования и оптимизации ТПС, не рассмотренных в настоящей работе. Описание интерфейса объекта приведено в приложении.

Алгоритмы 4.2, 4.3 демонстрируют операции, необходимые для настройки и совместного применения расчетных объектов на разных языках программирования (C#, JavaScript) и разными способами. Эти операции, фактически, соответствуют тем, которые выполняются в методах WaterDC, Start и GetWaterDC (ввод данных, расчет, вывод результата) объекта «Модель сети», но только без этапа переработки JSON-данных.

```
var model = new Model.App();//загрузка объекта «Модели элементов»
for (int i = 0; i < 3; i++) model.AddPipe(1, 0, 100, 100, 0, false);//добавление элемента
model.SetFormula(1);           //выбор формулы
model.SetMethod(1);            //выбор метода

var j1 = new int[] { 0, 0, 1 }; //начальные индексы узлов
var j2 = new int[] { 1, 2, 2 }; //конечные индексы узлов
var H = new int[] { 0 };        //индексы узлов с заданным давлением/напором
var p = new double[] { 1, 0, 0 }; //давления
var q = new double[] { 0, 1, 1 }; //отборы

double[] x;
```

```

var s = new Seed.App();    //загрузка объекта «Начальные приближения»
s.model = model;          //передача указателя на объект «Модели элементов»
s.Seed(s.Seed.SY, j1,j2,q, out x, ref p, H); //расчет давлений (массив p) и расходов (массив x)

var md = new MD.App();    //загрузка объекта «Метод расчета» (МД)
md.LoadLink(j1, j2);      //ввод топологии
md.LoadNode(H, p, q);     //ввод граничных условий
md.Limit = 20;            //ограничение количества итераций
md.Eps = 0,01;            //максимальная невязка по I закону Кирхгофа
md.EpsP = 0,01;          //максимальная невязка по II закону Кирхгофа
md.model = model;         //передача указателя на объект «Модели элементов»
if (!md.Start()) Message(md.error); else Message("Расчет закончен!");

```

Алгоритм 4.2. Исходный код алгоритма параметризации и применения расчетных объектов на языке C# (Visual Studio 2010).

```

var model = new ActiveXObject("CModel.App");
var md = new ActiveXObject("CMD.App");
var s = new ActiveXObject("CSeed.App");

model.SetFormula(1);      //выбор формулы
model.SetMethod(1);       //выбор метода
var j1 = [0, 0, 1];       //индексы начальных узлов
var j2 = [1, 2, 2];       // индексы конечных узлов
for (i=0;i<j1.length;i++) {
    md.AddLink(j1[i], j2[i]); //Ввод топологии
    s.AddLink(j1[i], j2[i]);  //Ввод топологии
    model.AddPipe(1, 0, 100, 1000, 0, false); //Вводы параметров связей
}
s.model = model;
s.AddSource(1); //добавление узла источника
s.AddUser(1);   //добавление узла отбора
s.AddUser(2);   //добавление узла отбора
s.Start(2);     //выполнение расчета

md.AddSource(1); //добавление узла источника
md.AddUser(1,s.Node.GetP(1)); //добавление узла отбора
md.AddUser(2,s.Node.GetP(2)); //добавление узла отбора
md.Limit = 20;    //ограничение количества итераций
md.Eps = 0,01;   //максимальная невязка по I закону Кирхгофа
md.EpsP = 0,01;  //максимальная невязка по II закону Кирхгофа
md.model = model; //передача указателя на объект «Модели элементов»
if (!md.Start()) WScript.echo (md.error); else WScript.echo ("Расчет закончен!");

```

Алгоритм 4.3. Исходный код алгоритма параметризации и применения расчетных объектов на языке JavaScript.

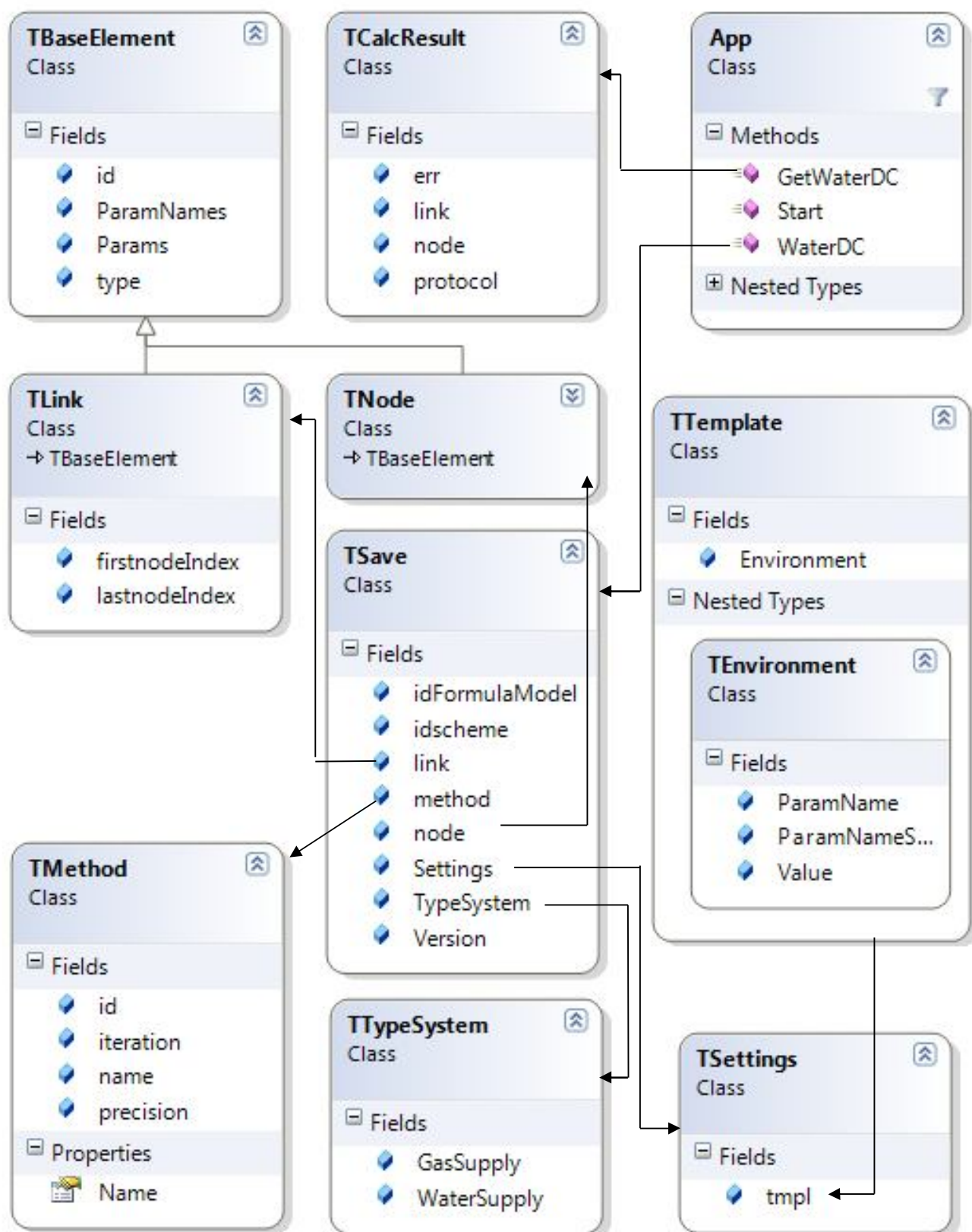


Рисунок 3.6. Диаграмма классов объекта «Модель сети».

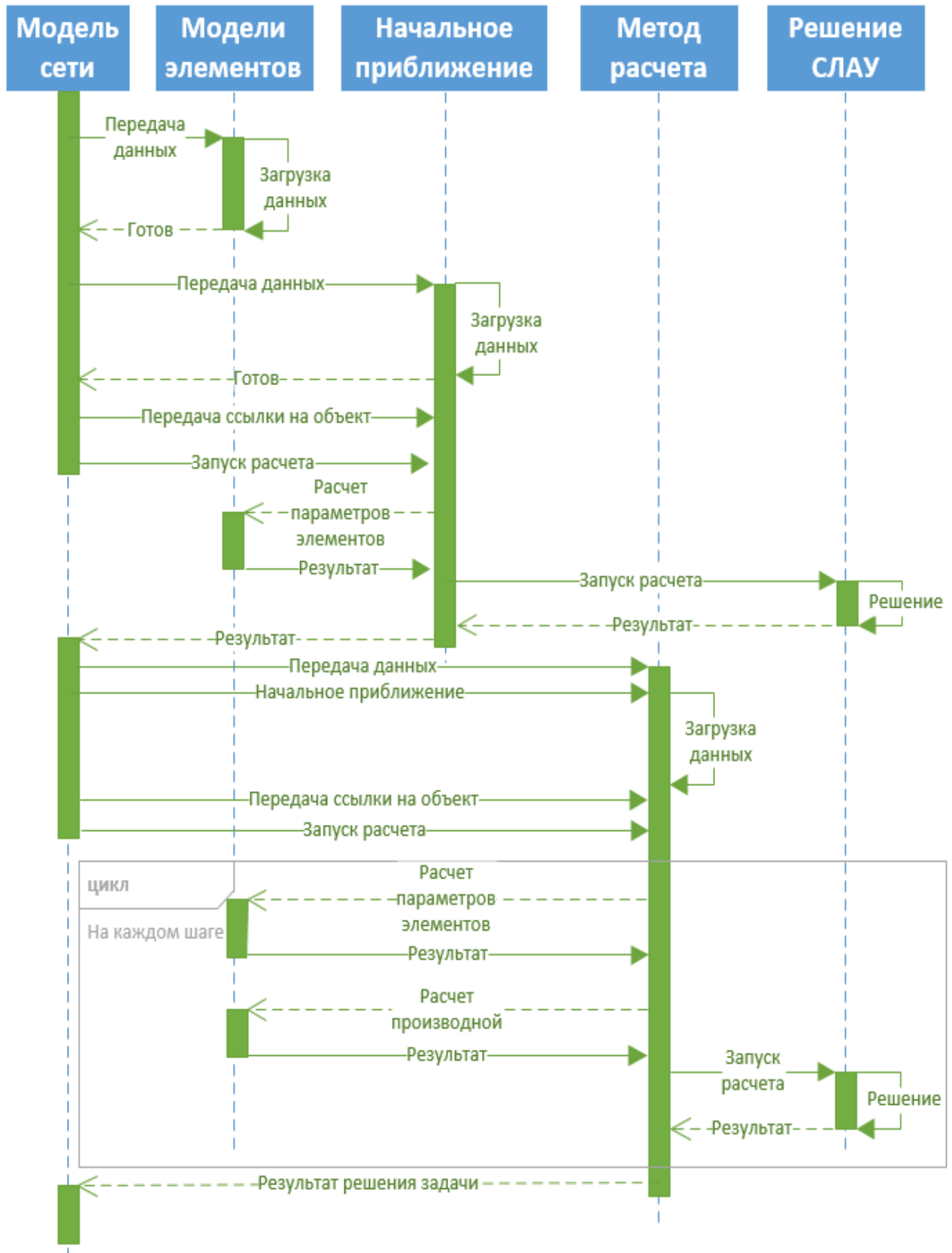


Рисунок 3.7. Диаграмма последовательности применения объектов в расчетном процессе.

3.4. Основные выводы

1. Предложена технология программной реализации основных вычислительных объектов по концепции ООМ ГЦ, а также их компонент, удовлетворяющих требованиям развиваемости, расширяемости, масштабируемости, языковой независимости, сопровождаемости и открытости в конечных ПВК.
2. Предложена концепция механизма автоматической сборки ПВК, которая декларирует потенциальный состав расчетных объектов и этапы их взаимодействия.
3. Разработана технология совместного применения моделей элементов ТПС и методов ТГЦ, обеспечивающая взаимодействие расчетных объектов в контексте решаемой задачи.

4. Практическое применение технологии ООМ ГЦ

В данной главе предлагается методика практического применения технологии ООМ ГЦ. Приводятся принципы построения и общая характеристика распределенного ПВК, разработанного на базе этой технологии, а также программных средств информационной поддержки объектно-ориентированных моделей элементов ТПС. Демонстрируются результаты тестирования и возможности разработанного ПВК, моделей, алгоритмов и методов моделирования ТПС.

4.1. Методика практического применения технологии ООМ ГЦ для разработки ПВК

Предлагаемая здесь методика предназначена для применения технологии ООМ ГЦ, позволяющей отделить программные реализации общих методов ТГЦ от прикладной специфики предметной области или задачи в сфере реальных ИТ. Методы расчета и оптимизации, разработанные в ТГЦ, применимы в области анализа, синтеза и управления функционированием ТПС различного типа и назначения на протяжении всего их жизненного цикла. Эта методика имеет общее значение (справедлива не только для задач потокораспределения) и преследует следующую цель – возможность многократного использования единожды реализованного общего метода решения какой-либо конкретной задачи в разных ПВК и для разных типов ТПС, и наоборот, – возможность использования альтернативных методов решений одной и той же задачи в конкретном ПВК.

Разработка ПВК на базе технологии ООМ ГЦ требует поэтапных действий: 1) анализ задачи; 2) структуризация задачи; 3) объектное представление; 4) совместное применение; 5) расширение «Моделей элементов». Методика не акцентирует внимание на применении конкретного языка программирования для

разработки расчетных объектов, однако, непосредственно оговаривает использование для этого технологии СОМ или его аналога.

Этап I. Анализ задачи. Целью этого этапа является определение потенциальной возможности отделения прикладной специфики ТПС от общего метода расчета. Эта возможность определяется по двум взаимосвязанным направлениям: 1) математическое – когда необходимо оценить принципиальную возможность выразить частные зависимости из общей вычислительной схемы метода решения задачи; 2) алгоритмическое – когда программирование частных зависимостей возможно выполнить отдельно от этой вычислительной схемы. Вычислительная схема метода расчета – это набор математических и/или логических операций общего вида, призванного упростить процесс программирования этого метода. Такая схема может быть разделена на два вида операций: 1) общие, по отношению ко всему методу расчета; 2) частные, относящиеся к зависимым от специфики соотношениям. Запрограммировать схему необходимо так, чтобы общие и частные операции были реализованы в разных блоках или классах.

Этап II. Структуризация задачи. Класс, отвечающий за общие операции метода расчета, должен включать исходную информацию, например, о топологии ГЦ и граничных условиях. Класс, связанный с вычислениями частных соотношений, должен аналогично учитывать исходную информацию, т.е. упорядочено хранить различные коэффициенты и константы требуемые им. Для этого исходная информация должна находиться в массивах, которые должны быть согласованы между собой. Например, индекс ветви в топологии ГЦ должен соответствовать индексу массива, где хранятся данные именно этой ветви. Массивы, с точки зрения программирования, имеют строгую типизацию и не могут хранить данные для разнотипных соотношений. В связи с этим, чтобы обеспечить структуризацию исходной информации необходимо предусмотреть: 1) либо хранение данных в разных массивах по каждому типу соотношений, что

потребуется, однако, привлечения промежуточного адресного массива для хранения индексов ко всем массивам данных; 2) либо общий объектный массив, где каждый тип соотношений характеризуется индивидуальным классом, каждый из которых будет конкретизировать состав переменных определенного типа.

Этап III. Объектное представление. Классы, отвечающие за общие и частные операции метода расчета, реализуют объекты «Модель сети» и «Модели элементов» соответственно. Объект «Модель сети» должен обеспечивать выполнение алгоритма метода расчета, реализованного в виде его метода (void), а также ввод исходных данных и вывод результатов расчета через его свойства или дополнительные методы (void). Метод расчета также может быть реализован как отдельный объект «Метод расчета», что позволяет отделить алгоритмы переработки и анализа исходных данных, преобразования результатов расчета в требуемый формат в объект «Модель сети». Этим обеспечивается абстракция расчетного метода от источника исходных данных.

Объект «Модели элементов» должен свойства и методы для ввода исходных данных и расчета параметров элементов, требуемых объекту «Метод расчета». Индекс моделируемого элемента в объекте «Модели элементов» задается отдельно, как свойство этого объекта.

Этап IV. Совместное применение. Взаимодействие между объектами «Метод расчета» и «Модели элементов» по управлению и данным должно обеспечиваться объектом «Модель сети». Этот объект должен выполнять роли: источника данных; программы загрузки, контроля и параметризации расчетных объектов; связующей программы между этими объектами и ПК. Объект «Метод расчета» должен иметь возможность обращаться к загруженному и параметризованному объекту «Модели элементов» для последующего взаимодействия путем вызова его методов расчета параметров по элементам ГЦ.

Этап V. Расширение «Моделей элементов». Для реализации механизма расширения в объекте «Модели элементов» применяется принцип plug-in или

модулей, основанный на технологии СОМ или аналогах. В этом объекте необходимо реализовать: 1) либо расширить адресный массив с целью учета принадлежности элемента к объекту расширения (модулю); 2) либо ввести дополнительный класс, описывающий индекс элемента в объекте-модуле и ссылки на него. Все запросы на расчет параметров элемента, который принадлежит модулю, передавать этому модулю.

Модули расширения могут быть реализованы как объекты, полностью копирующие вход-выход объекта «Модели элементов», который не будет зависеть от особенностей их реализации. Загрузка объекта «Модели элементов» с расширениями осуществляется в объекте «Модель сети» путем последовательной переработки исходных данных и параметризации основного объекта и его модулей.

4.2. Характеристика программного обеспечения для расчета режимов ТПС в Интернет

4.2.1. Принципы и архитектура ПВК

Архитектура ПВК является базовым каркасом их проектирования и разработки, от которого зависят перспективы развития потенциальных возможностей ПВК. Технология СОМ позволяет использовать разработанные здесь компоненты в различных ПВК, ориентированных, в том числе, на клиент-серверную архитектуру, что открывает следующие возможности:

- выполнение вычислений на сервере (пользователям не требуется иметь высокопроизводительные компьютеры);
- сокращение затрат времени на сопровождение;

- решение проблемы авторизации использования ПВК (не требуется аппаратных ключей);
- многопользовательский режим работы ПВК;
- обеспечение пользователей наличием последней версии ПВК;
- отсутствие необходимости установки ПВК на рабочее место;
- развитие клиентской и серверной частей независимо друг от друга.
- внедрение современных средств бесшовного масштабирования производительности системы со стороны серверной части (облачные технологии), а также адаптацию под трехзвенный вариант этой архитектуры.

Для реализации идеи клиент-серверного приложения в рамках диссертации разработан ПВК «ИСИГР» (Интернет Система для Гидравлических Расчетов) [5,7,16,17], свидетельство приведено в приложении. ПВК «ИСИГР» представляет собой конечную реализацию изложенной технологии и предназначен для моделирования режимов многоконтурных трубопроводных систем водо- и газоснабжения в сети Интернет путем удаленного применения современных методов ТГЦ.

ПВК позволяет выполнять расчет потокораспределения в ТПС произвольной структуры (с произвольным числом и размещением источников, перекачивающих насосных станций, резервуаров, узлов потребления и др. элементов) и конфигурации (многоконтурной, древовидной, смешанной) с фиксированными и нефиксированными нагрузками в условиях задания давления в одном или нескольких узлах.

Ввиду высокого быстродействия разработанных методов и алгоритмов ПВК позволяет проводить многовариантные расчеты (десятки расчетов, каждый из которых занимает секунды) гидравлических режимов ТПС средней размерности (сотни узлов расчетной схемы) за один сеанс работы в любое время, любому числу пользователей и в любом месте при наличии доступа в Интернет.

Программа имеет возможность переключения между языками: русский и английский. ПВК может быть полезен специалистам проектных и эксплуатационных организаций, научным и исследовательским учреждениям, инженерам, аспирантам и студентам.

Архитектура ПВК. Комплекс основан на клиент-серверной архитектуре и состоит из интерфейса, веб-сервера, блока контроля, библиотеки расчетных модулей (БРМ) и базы данных характеристик типового оборудования (рисунок 4.1). Принцип построения приложения, известный как «Насыщенное интернет-приложение» (Rich Internet Application), подразумевает наличие у программы двух частей – клиентской и серверной, которые должны находиться на разных компьютерах и взаимодействовать друг с другом по сети. Для взаимодействия этих частей в глобальной сети применяется специальная программа – веб-сервер, находящаяся на удаленном компьютере разработчика – сервере. Веб-сервер [81,87], в данном случае применяется Apache (см. www.apache.org), работает под управлением ОС Windows. Запуск ПВК выполняется путем удаленного запроса пользователя к веб-серверу на предмет загрузки клиентской части для последующего взаимодействия с серверной частью.

Веб-серверам для обработки получаемых от пользователей данных и формирования ответа требуется средство автоматизации, состоящее из языка описания действий и его интерпретатора. В данном случае применяется PHP (см. www.php.net). Правила взаимодействия клиентской и серверной частей ПВК описаны в блоке связи (PHP-сценарий), а в качестве технологии обмена данными между звеньями служит JSON-RPC, где передаваемая информация является наиболее компактной без применения функций сжатия/архивации, что немало важно в сети Интернет с ограниченным каналом передачи данных. Язык JSON является наиболее простым для передачи форматированной информации в клиент-серверном приложении и хранения, по сравнению с XML и SOAP (Simple Object Access Protocol).

Серверная часть ПВК выполняет анализ исходных данных и расчет для клиентской части, а также обеспечивает доступ к БДО. Поступившие на расчет данные через веб-сервер передаются блоку контроля, обеспечивающему запуск БРМ и, после ожидания, возврат результата расчета в обратном порядке. Архитектура вычислительного ядра организована так, что «Модель сети» полностью обеспечивает координацию, контроль и обработку событий процесса расчета. Так, при расчете схемы сети динамически формируется конкретный ПВК для заданных условий расчета.

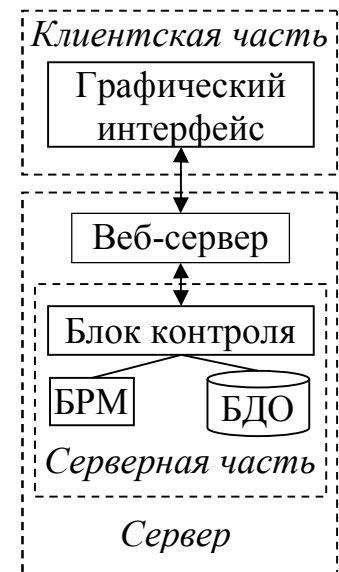


Рис. 4.1. Составные части ПВК.

В рамках этой архитектуры имеется возможность внедрения интерпретатора скриптовых языков (например, Lua, Python), что позволит расширять онтологию вычислительного ядра без применения технологии СОМ, что однако не всегда эффективно.

Благодаря однократному программированию объекта «Модели элементов» по технологии ООМ ГЦ удалось реализовать несколько независимых методов решения задачи потокораспределения, выступающих в качестве внутренних методов «Модели сети». Получившаяся в результате этого БРМ в «ИСИГР» содержит: МД [1], МКР [63], метод простой итерации (МПИ) [43–45], хордовый метод узловых давлений (МДХ) [49], ММД [10], ММКР [13].

Внедрены все представленные в работе формулы расчета коэффициента гидравлического сопротивления трению на участках трубопровода (таблица 2.1).

Процесс работы БРМ и этапы получения решения описаны выше (глава 3), где номера этапов полностью совпадают с номерами на рисунке 4.2.

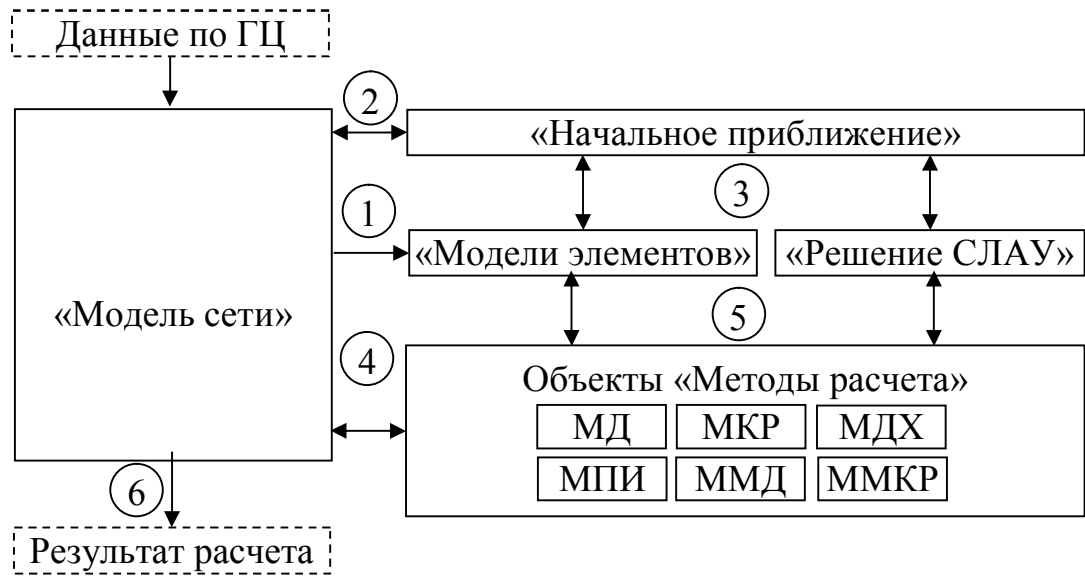


Рисунок 4.2. Общая схема работы БРМ. Цифры - номер этапа, стрелки указывают направление информационных потоков.

Для расчета потерь давления на участке трубопровода системы водоснабжения пользователи ПВК могут выбрать формулу Дарси-Вейсбаха либо Хазена-Вильямса (Hazen-Williams)[98] $V = 0,849 \cdot CR^{0,63} i^{0,54} l$, где $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$ – коэффициент Шези; $R = d / 4$ – гидравлический радиус, м; $i = h / l$ – гидравлический уклон, м вод.ст. Потеря давления в запорной арматуре вычисляется по формуле Дарси, а напор насосного агрегата по многочлену, который аппроксимирует его напорную характеристику. Расчет перепада давления в трубопроводе системы газоснабжения выполняется по формулам для низкого, среднего и высокого давления [99].

4.2.2. Инструменты для поддержки моделей элементов ТПС

Информационная обеспеченность моделей элементов ТПС позволяет наиболее точно подбирать параметры оборудования при их параметризации. Подробные характеристики выпускаемого оборудования можно встретить в инженерных справочниках, специализированной литературе, ГОСТах и

документации заводов изготовителей. Малодоступность этой информации, не структурированность и несоответствие общим стилистическим требованиям усложняет поиск и выбор параметров оборудования для моделирования ТПС различного типа и назначения. Это проблема решена свободным тиражированием БД собственного оборудования производителей, однако, распространением обобщенных БД специализированного оборудования занимаются сторонние фирмы, причем на коммерческой основе (например, EWSDB – база данных оборудования, изделий и материалов в формате Microsoft SQL Server от компании Intergraph). Однако оборудование в этих БД не всегда обеспечено параметрами, необходимыми для задач моделирования.

Соответственно поэтому была создана собственная БД оборудования (БДО) (рисунок 4.3), которая включает отдельную от «ИСИГР» программу-редактор с графическим интерфейсом пользователя (рисунок 4.4) и программный модуль для подключения БДО к «ИСИГР».

В зависимости от моделируемого типа системы для модели трубопровода уточняются доступные стандарты, а некоторые помечены, как рекомендуемые справочниками. Некоторые стандарты частично перекрывают своим сортаментом сортамент других стандартов, и для предотвращения дублирования записей в базе данных используется промежуточная таблица соответствия, где указано, что одно и то же наименование может удовлетворять разным ГОСТ. Не все стандарты регламентируют классы выпускаемых труб. Поэтому используется принцип ранжирования по условным диаметрам. Толщины стенок и наружные диаметры труб необходимы для однозначного уточнения внутреннего диаметра. Набор материалов покрытий внутренней поверхности труб соответствует выбранному стандарту и типу системы, а толщины покрытий разнятся от условного диаметра и обусловлены справочниками, но ничто не мешает выбрать любую. В базе содержатся 20 ГОСТов (стальные сварные, горяче- и холоднокатаные, чугунные, стеклянные, асбестоцементные, железобетонные и др.), включающих описание

Применение БДО возможно при помощи соответствующих прикладных программ. Такие программы зачастую монолитно встроены в программные комплексы, что ограничивает их использование в других приложениях. С учетом возможностей существующих «автоматизированных справочников» была разработана программа упрощающая процесс использования, редактирования и организации информации в БДО (рисунок 4.4). Редактор оснащен СОМ-интерфейсом для его применения в составе разных ПВК.

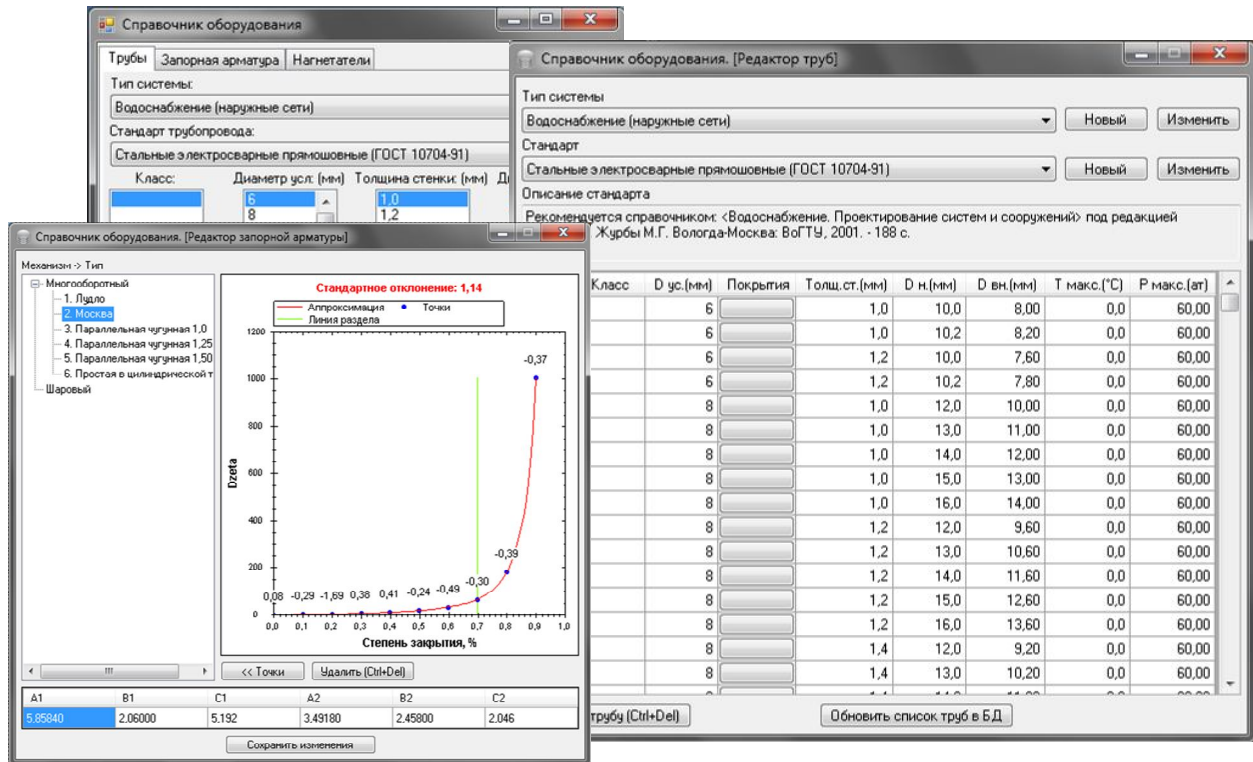


Рисунок 4.4. Внешний вид редактора БДО ТПС.

4.2.3. Пользовательский интерфейс и функции ПВК

Клиентская часть – это пользовательский графический интерфейс (рисунок 4.5), использующий для функционирования стандартный веб-обозреватель (Web-Browser, программа просмотра Web-страниц Интернета) ОС Windows. Интерфейс реализован с использованием Microsoft Silverlight [100] – специального программного компонента, предназначенного для создания программ, работающих в среде веб-обозревателя. Этот интерфейс обеспечивает современные возможности создания, редактирования, визуализации схем, интерпретации исходных данных и результатов расчета в графическом, табличном, цветовом, анимационном и символьном виде. Клиентская часть является самодостаточной программой, организованной в виде одностраничного приложения (англ. single page application, SPA).

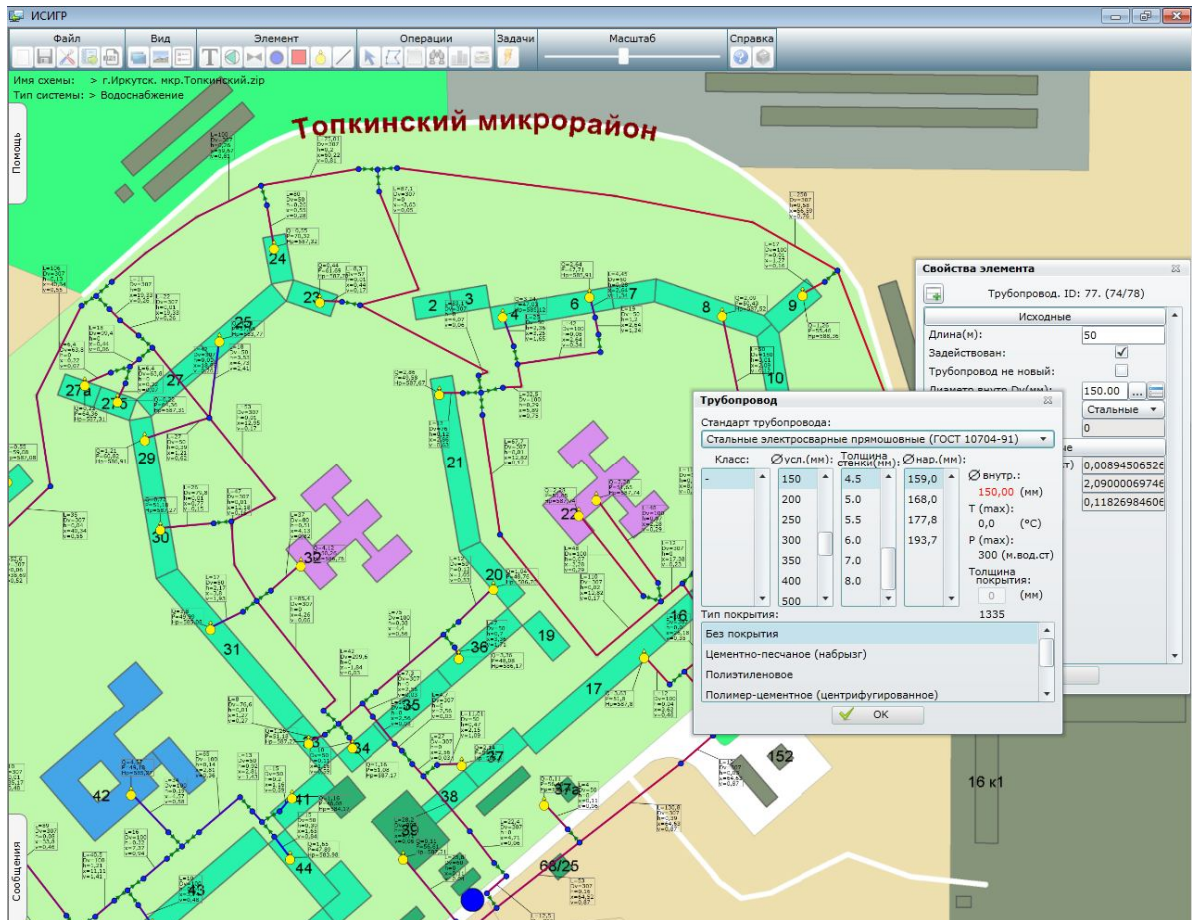


Рисунок. 4.5. Внешний вид интерфейса пользователя ПВК «ИСИГР».

Существуют альтернативные технологии реализации веб-интерфейсов, например, Flash (см. www.adobe.com), Scalable Vector Graphics (SVG), HTML5, Unity (см. unity3d.com), которые не были применены по разным причинам: Flash – предназначен для создания анимации и слабо подходит для разработки бизнес-приложений; SVG – имеет слишком медленный интерпретатор, что не позволяет оперировать визуализированными примитивами более 200 шт. за раз; HTML5 – не имеет, до сих пор, уверенной и единообразной поддержки среди всех веб-обозревателей, что требует постоянной поддержки реализованных приложений; Unity – предназначен для разработки приложений, работающих с трехмерной графикой, что для «ИСИГР» излишне.

Графический интерфейс ПВК имеет главное меню пользователя, с пунктами (рисунок 4.6):

- Новый проект – позволяет выбрать тип моделируемой трубопроводной системы.
- Загрузить пример – позволяет выбрать уже созданный проект, демонстрирующий возможности программы.
- Открыть проект – позволяет открыть сохраненный ранее пользовательский файл проекта с локального диска.
- Руководство пользователя – открывает страницу руководства пользователя.

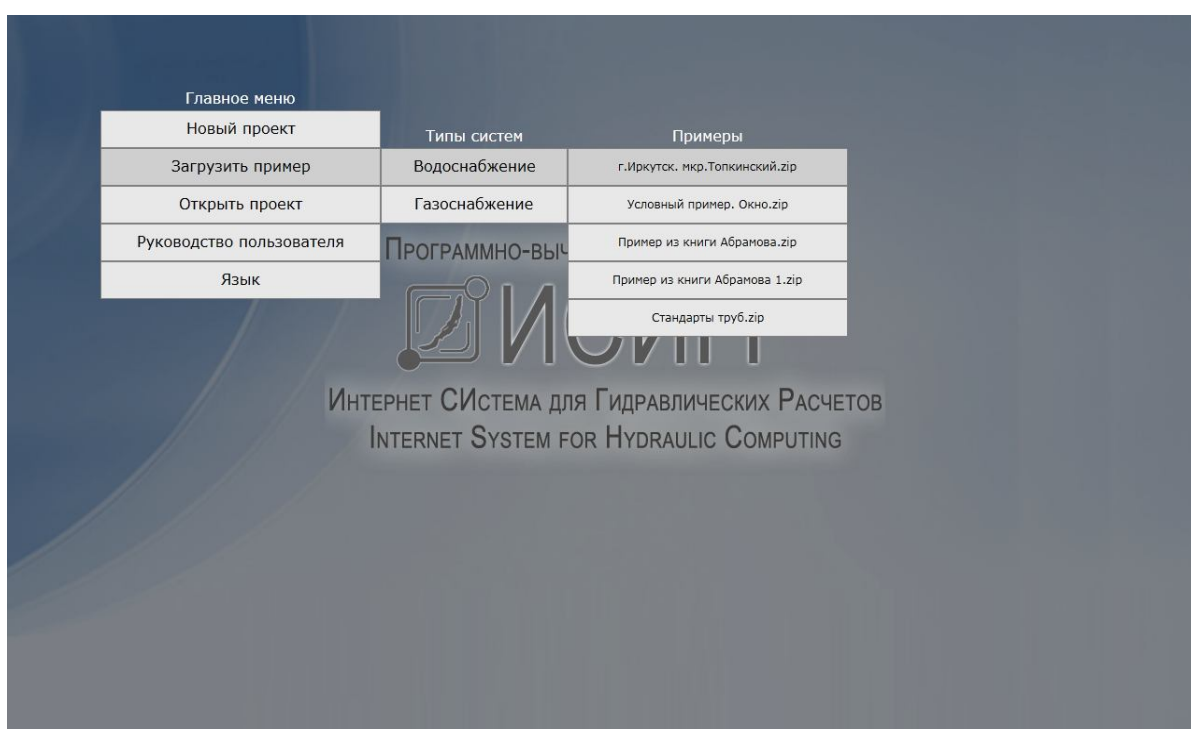


Рисунок. 4.6. Главное меню пользователя ПВК.

Состав элементов. Типы элементов, входящих в состав схем, разделены на две группы «Узлы» (1. Источник, 2. потребитель, 3. соединительный) и «Связи» (4. участок, 5. насосная станция, 6. задвижка). Каждому типу элементов соответствует своя пиктограмма (рисунок 4.7) распространенного графического формата, что дает возможность применять графические редакторы для замены изображений на принятые в конкретной предметной области.

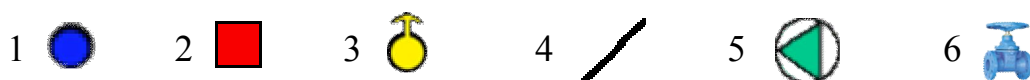


Рисунок. 4.7. Пиктограммы используемых элементов схемы.

Основная панель пользователя представляет собой комбинацию панели инструментов и главного меню пользователя (рисунок 4.8) и содержит кнопки быстрого вызова часто употребляемых функций.



1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32

Рисунок 4.8. Основная панель пользователя ПВК «ИСИГР».

Ниже представлен список кнопок (слева направо) основной панели пользователя.

1. «Новый проект» – переход в главное меню.
2. «Сохранить» – сохранение проекта в локальный файл.
3. «Настройки» – меню настроек программы.
4. «Сохранение данных в HTML» – сохранение в отдельный html-файл данных элементов схемы.
5. «Сохранение схемы в JPEG» – сохранение в отдельный JPEG-файл графического изображения всей схемы.
6. «Сохранение схемы в BMP» – сохранение в отдельный BMP-файл графического изображения всей схемы.
7. «Мастер слоев» – меню управления блокировкой слоев.
8. «Мастер карт» – меню управления набором графических изображений и их отображением.
9. «Подписи» – управление отображением исходных данных и результатов расчета рядом с элементами на схеме.
10. «Текст» – включение режима создания произвольной надписи на схеме.

11. «НА» – включение режима создания активной связи типа «Нагнетатель».
12. «Задвижка» – включение режима создания связи типа «Регулирующий элемент».
13. «Соединение» – включение режима создания узла типа «Соединительный».
14. «Источник» – включение режима создания узла типа «Источник».
15. «Потребитель» – включение режима создания узла типа «Потребитель».
16. «Участок» – включение режима создания пассивной связи типа «Трубопровод».
17. «Курсор» – включение режима взаимодействия с элементами схемы (режим по-умолчанию).
18. «Перегиб» – включение режима изменения геометрии пассивной связи типа «Трубопровод».
19. «Режим выделения» – переключение между режимами выделения элементов.
20. «Поиск» – открытие окна для поиска элементов по заданным критериям.
21. «Пьезометр» – запуск построения пьезометрического графика и его отображение.
22. «Мастер статистики» – отображение окна с числовыми данными о количестве элементов схемы.
23. «Отмена последней операции [Ctrl+Z]» – позволяет отменить последнюю выполненную операцию редактирования.
24. «Повтор отмененной операции [Ctrl+Y]» – позволяет вернуть отменную операцию редактирования.
25. «Отображение направления потоков» – позволяет включить/выключить отображение потоков на схеме ТПС.
26. «Копирование [Ctrl+C]» – позволяет скопировать в буфер обмена выделенный фрагмент схемы ТПС.

27. «Вставка [Ctrl+V]» – позволяет создать скопированный фрагмент на схеме ТПС.
28. «Задача потокораспределения» – открытие диалогового окна для отправки схемы и данных на сервер для решения задачи потокораспределения.
29. «Задача потокораспределения с нефиксированными нагрузками» – открытие диалогового окна для отправки схемы и данных на сервер для решения задачи потокораспределения с нефиксированными нагрузками.
30. «Масштаб» – ползунок для регулировки масштаба схемы.
31. «Руководство пользователя» – открытие окна с руководством пользователя.
32. «О программе» – открытие окна информации об изготовителе программы.

Проекты схем. ПВК оснащен возможностью сохранения и загрузки схем ТПС в виде файлов-проектов. Проекты схем имеют формат JSON, что позволяет их хранить в обычных текстовых файлах на пользовательском компьютере. Также, ПВК позволяет загружать проекты расположенные на удаленном сервере, целью которых является демонстрация возможностей программы и предоставление примеров для быстрого старта ПВК (рисунок 4.6).

Функции создания и редактирования схем и данных. Рисование узлов и связей между ними выполняется с помощью соответствующих кнопок на главной панели. При этом, чтобы нарисовать связь необходим хотя бы один узел, а конечный узел требуемого типа может быть добавлен на пустом месте по завершению рисования связи. Ниже представлены особенности создания конкретного типа связей:

- "Нагнетатели (Насосные агрегаты, компрессоры)" – необходимо соблюдение ориентации связи, где начальный узел указывается первым при рисовании такой связи;

- "Запорная арматура" – рисуется между двумя узлами с произвольной ориентацией.
- "Участок" – рисуется между двумя узлами с произвольной ориентацией с возможностью добавления промежуточных узлов поворота (перегиба), количество которых не ограничено, до тех пор пока зажата кнопка «SHIFT».

На рисунке 4.9 показан пример демонстрирующий внешний вид элементов и схемы.

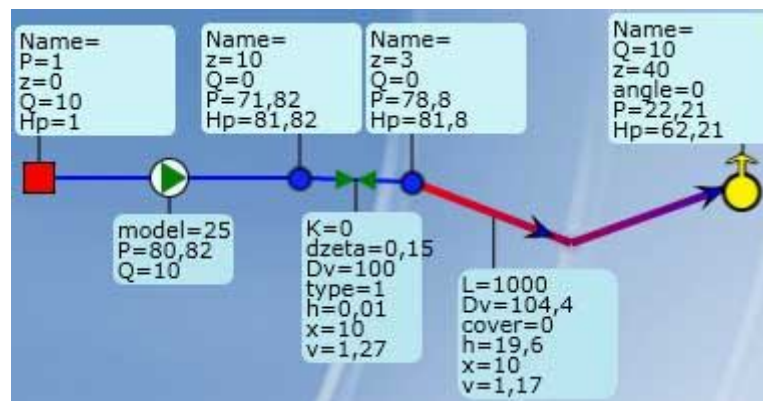


Рисунок 4.9. Внешний вид схемы и подписей к элементам.

Также доступны функции:

- вставки (врезки) узла в связь типа «Участок» в любом ее месте, например, между начальным и конечным узлами, между окончательным узлом и перегибом связи или вместо перегиба. При этом, визуальная тень добавления узла будет принимать координаты ближайшей линии трубопровода или его перегибов, т.е. «прилипать», для уменьшения необходимой точности постановки указателя мыши;
- перемещения элементов и группы выделенных элементов;
- переключения связей между узлами с помощью кнопки «Ctrl», при этом, не допускается указание узла в качестве начального и конечного одновременно;
- масштабирования схемы с помощью ролика мыши.

Режимы выделения элементов поддерживаются три:

- *индивидуальное*;
- *групповое*, при котором выделение происходит с помощью прямоугольной области, охватывающей выделяемые элементы. Допускается добавление/удаление элемента из группы;
- режим *трассы* позволяет выбирать только узлы, а связи будут добавляться в группу по результату поиска кратчайшего пути между двумя последними выделенными узлами.

Навигация по схеме имеет два режима перехода к нужной позиции:

- *ручной* – применяется для ручного перемещения пользователем области отображения схемы в любой момент редактирования схемы;
- *автоматический* – позволяет переместить область отображения к искомому элементу (применяется в процессе поиска расположения элемента).

Параметризация элементов схемы осуществляется с помощью индивидуального окна свойств (рисунок 4.10), представляющего перечень данных по выбранному элементу схемы в едином стиле отображения для всех типов элементов. Параметры элементов разделены на группы, например, исходные, расчетные и т.д.

Окно свойств позволяет задавать некоторые параметры элементов несколькими способами. Например, задание диаметра для связи типа «Участок» выполняется тремя способами:

- ручной ввод значения диаметра;
- вызов БДО и выбор требуемых значений (рисунок 4.11);
- вызов списка ранее выбранных диаметров, что сокращает их повторный поиск в БДО (рисунок 4.12).

Трубопровод. ID: 77. (74/78)

Исходные

Длина(м): 50

Задействован: ☒

Трубопровод не новый: ☐

Диаметр внутр. Dv(мм): 150.00

Стандарт: 1

Класс:

Диаметр условный: 150

Толщина стенки(мм): 4.5

Диаметр наружный(мм): 159.0

Температура макс. Tmax(°C): 0.0

Давление макс., Pmax: (м.вод.ст) 300

Номер: 516

Покрытие, тип: 0

Покрытие, размер(мм): 0

Расчетные

Потеря давления, h (м.вод.ст): 0,00894507495

Расход, q: (кг/с): 2,09000177295

Скорость, v: 0,11826990692

OK Заккрыть

Рисунок 4.10. Окно свойств элемента «Участок».

Трубопровод

Стандарт трубопровода: Стальные электросварные прямошовные (ГОСТ 10704-91)

Класс	Ø усл.(мм)	Толщина стенки(мм)	Ø нар.(мм)
300	300	5.0	325.0
350	350	5.5	355.6
400	400	6.0	
500	500	7.0	
600	600	8.0	
700	700	9.0	
800	800	10.0	

Ø внутр.: 315.00 (мм)

T (max): 0.0 (°C)

P (max): 300 (м.вод.ст)

Толщина покрытия: 0 (мм)

Тип покрытия: 593

Без покрытия

Цементно-песчаное (набрызг)

Полиэтиленовое

Цементно-песчаное (центрифугированное)

OK

Рисунок 4.11. Окно выбора диаметра элемента «Участок» из БДО.

Подобная функция реализована для других типов элементов:

- регулирующие элементы (запорная арматура) – ввод степени закрытия с помощью укрупненных показателей («Открыто», «Прикрыто», «Закрыто»), выбор типа механизма (шаровая, параллельная, чугунная и т.д.), ввод значения диаметра проходного сечения (рисунок 4.13);
- для активных элементов (насосные агрегаты, компрессоры), где при выборе типа нагнетателя («Центробежный», «Осевой» и т.д.), серии и марки автоматически принимаются коэффициенты аппроксимации рабочей характеристики агрегата (рисунок 4.14);
- для активных элементов произвольного типа, где достаточно ввести значения рабочих точек, к которым автоматически применится метод наименьших квадратов для аппроксимации (рисунок 4.15).

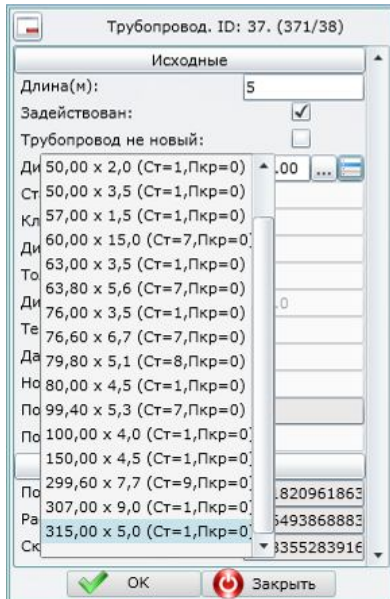


Рисунок 4.12. Список диаметров для элемента «Участок».

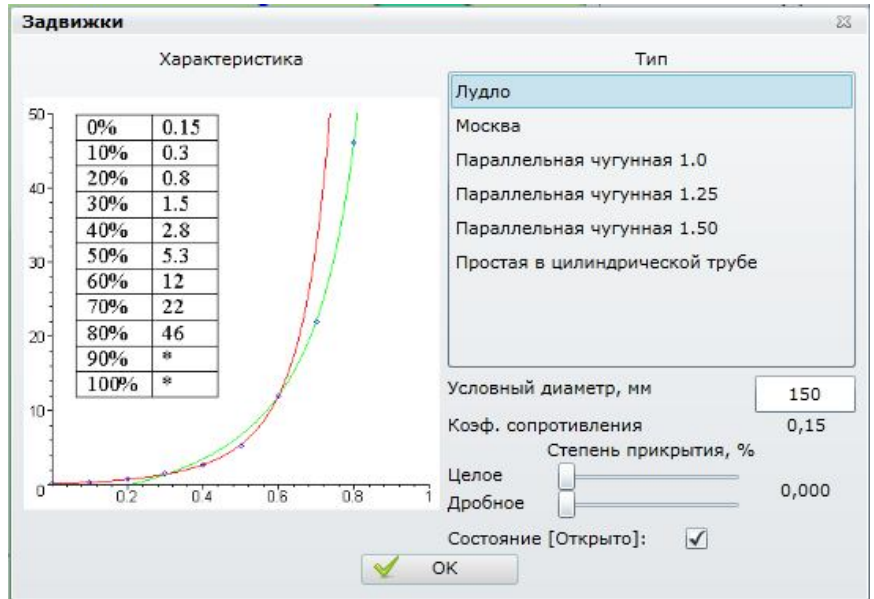


Рисунок 4.13. Окно выбора характеристики запорной арматуры из БДО.

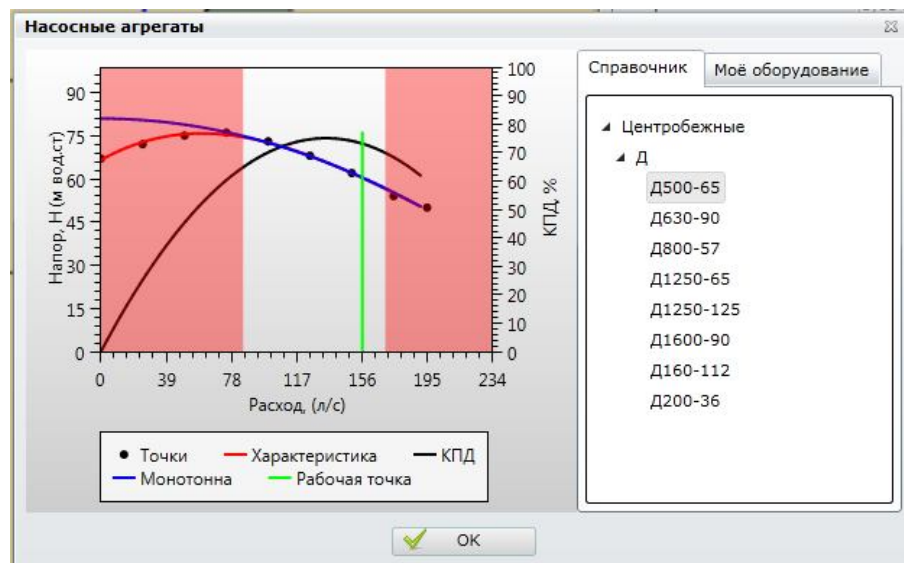


Рисунок 4.14. Окно выбора характеристики активного оборудования из БДО.

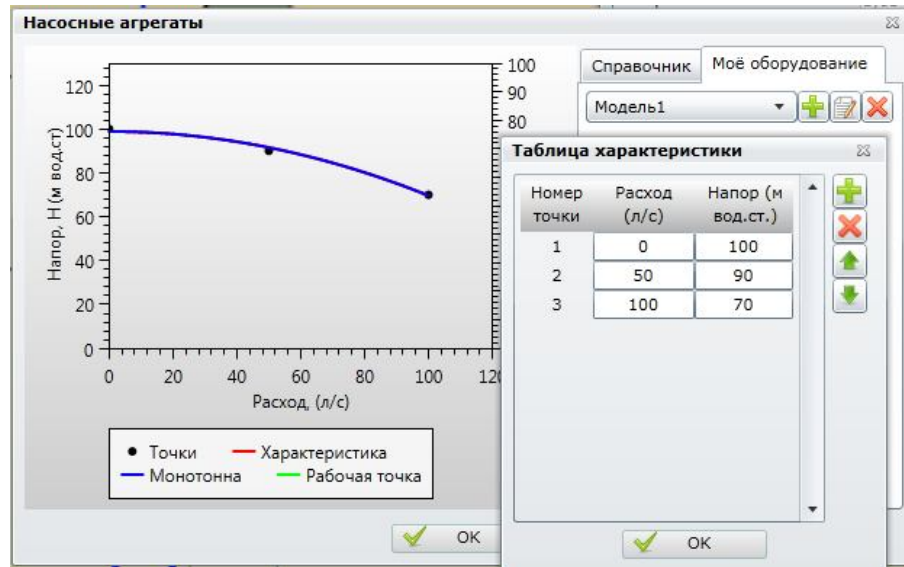


Рисунок 4.15. Окно ввода произвольной характеристики активного оборудования.

Выполнение расчета. Одна из основных функций ПВК – выполнение расчета на удаленном сервере. Данная операция проходит в диалоговом режиме (рисунок 4.16), предлагая пользователю перед расчетом выбрать параметры расчета, такие как: используемый метод, точность вычисления по давлению и расходу в узлах, ограничение на количество итераций метода расчета, используемая методика (формула) гидравлического расчета элемента «трубопровод». После чего нажать кнопку «Выполнить». При этом, происходит сбор и преобразование данных в требуемый для серверной части формат (JSON) и отправка на сервер. По окончании работы результаты расчета вернутся обратно интерфейсу для интерпретации.

Если введенные данные элементов схемы некорректны или их не достаточно, то будет выведен список недостающих параметров (рисунок 4.17). Среди преимуществ стоит отметить возможность автоматической навигации к местоположению каждого элемента на схеме указанного в данном списке. Данный подход повышает оперативность внесения изменений и решения вопроса отсутствия данных визуально, наблюдая проблемный элемент на схеме.

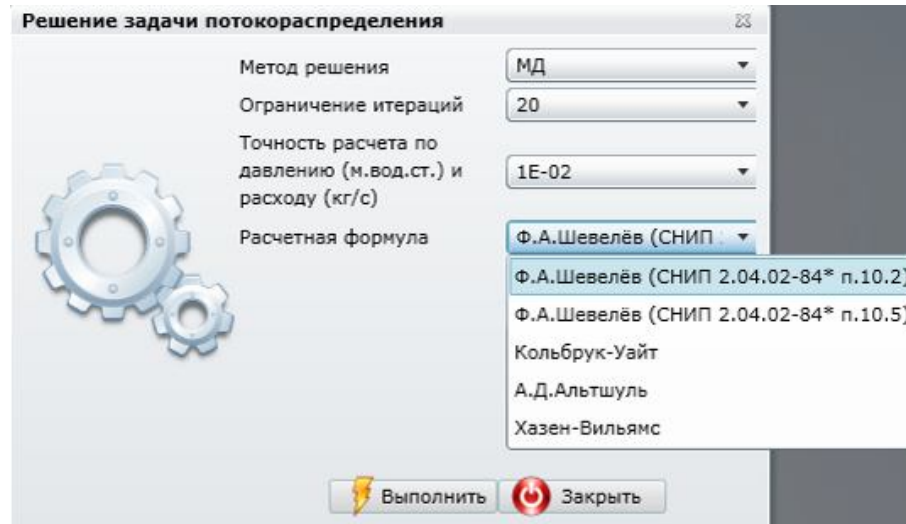


Рисунок 4.16. Окно выбора параметров расчета.

Нехватка данных для расчета

id	Элемент	Имя параметра	Параметр	Значение	Свойства
20	Участок	Длина(м):	L	0	...
22	Участок	Длина(м):	L	0	...
30	Участок	Длина(м):	L	0	...

Заккрыть

Рисунок 4.17. Окно списка элементов с недостающими данными.

Интерпретирующие функции ПВК. Интерфейс пользователя ПВК позволяет интерпретировать исходные данные и результаты расчета в виде:

- Индивидуального окна свойств (рисунок 4.10).
- Подписей к элементам на схеме (рисунок 4.9).
- Цветовой раскраски и отображения направления потока стрелками для элемента «Участок» (рисунок 4.9).
- Пьезометрического графика.

Пьезометрический график (рисунок 4.18) предназначен для визуализации установившегося гидравлического режима по участкам в виде графика. Пьезометр в составе ПВК может работать в двух режимах:

- Ручной, когда график строиться по имеющемуся набору выделенных

элементов составляющим последовательную линию трубопровода.

- Автоматический, когда известны только начальный и конечный узлы предполагаемой линии трубопровода, при этом, выполняется поиск кратчайшего пути между ними. Если путь найден, то строится пьезометр.



Рисунок 4.18. Пример окна с пьезометрическим графиком.

Настройка подписей выполняется в окне «Настройки» (рисунок. 4.19), позволяющее изменить набор отображаемых параметров на схеме по каждому типу элементов и указать точность округления их значений.

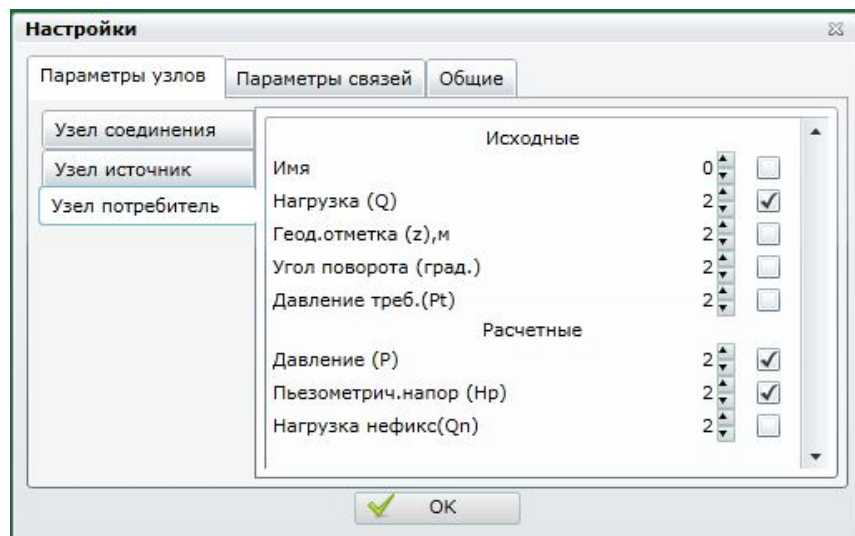


Рисунок 4.19. Окно настроек. Вкладка параметров узлов.

Имеется возможность выбора используемых единиц измерения для расхода (кг/сек, кг/час, м³/сек, м³/час) и давления (м вод.ст., ат, атм, Па, кПа, МПа). Здесь же осуществляется выбор цвета окраски связи типа «Участок» относительно задаваемого параметра.

4.3. Тестирование и практическое применение разработанных моделей, методов и ПВК

Цель тестирования – оценка возможностей предлагаемых в работе методов поиска решения задачи потокораспределения по следующим критериям:

- работоспособность (подтверждение сходимости с разных начальных приближений, в том числе, очень далеких от решения);
- универсальность (сравнение ММД и ММКР с методикой двойных циклов итераций на предмет возможности учета разных типов соотношений);
- эффективность:
 - сравнение сходимости ММД и ММКР с методикой двойных циклов итераций;
 - учет регулировки шага для ММД (увеличение эффективности);
 - оценка влияния размера расчетных схем, которые искусственно сгенерированы, что позволяет учесть множество особенностей (топологические, параметрические, технологические, гидравлические и т.д.), на сходимость ММД и ММКР.

Тестовая схема. Схема фрагмента газотранспортной системы [55] (рисунок 4.20) содержит 9 узлов, 4 ГПА и 6 трубопроводных участков. Все ГПА описаны соотношением (2.3) (значения коэффициентов приведены в таблице 4.1), поскольку соотношение (2.4) невозможно свести к виду (2.1) обычными методами. Участки трубопровода моделируются соотношением $|p_H|p_H - |p_K|p_K = sx|x|$. От-

боры в узлах (млн.м³/сут.): $Q_1=19,1$; $Q_4=14,8$; $Q_5=0,632$; $Q_6=0,32$. Фиксированное давление $P_9=33,778$ ат. Сопротивления участков газопровода: $s_1=0,349$; $s_2=1,332$; $s_4=0,436$; $s_5=4,757$; $s_6=0,253$; $s_{10}=0,006$.

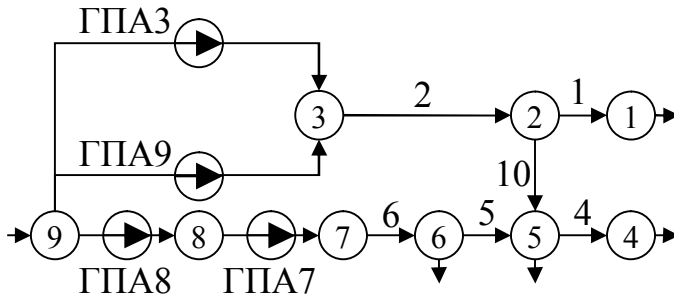


Рисунок 4.20. Схема газотранспортной системы.

Таблица 4.1. Коэффициенты характеристик ГПА.

Элемент	β_0	β_2
ГПА 3	1,537	0,085
ГПА 7	1,318	0,105
ГПА 8	1,338	0,13
ГПА 9	1,537	0,085

Начальное приближение к значениям векторов расходов: $x^0=\{19,1; 39,1; 29,1; 14,8; -4,56; -4,24; -4,24; -4,24; 10; 20\}$, причем здесь $x_x^0=\{x_9^0, x_{10}^0\}=\{10; 20\}$. Начальное приближение к значениям вектора давлений: $P=\{-24,03; -21,22; 39,83; 50,05; 50,99; 50,01; 49,96; 41,51\}$. Результаты расчета: $x=\{19,1; 21,6; 10,8; 14,8; 12,93; 13,25; 13,25; 13,25; 10,8; 2,5\}$; $P=\{31,55; 33,51; 41,76; 32,05; 33,50; 43,80; 44,30; 38,77\}$. Видно, что начальное приближение весьма далекое от решения. В нем есть противоположные по направлению значения потоков, а также отрицательные давления, которых нет в решении.

Для получения начального приближения P^0 в ММД, эквивалентного начальному приближению x^0 для ММКР, предлагается следующая методика. Пусть задано произвольное значение x_x^0 . Тогда из уравнения (3.15) можно получить x_d^0 , а из (3.14) P^0 . Первая операция сводится к отысканию расходов на ветвях дерева путем их обхода, начиная с висячих, с известными притоками (отборами) в концевых узлах, по направлению к корню дерева. Последняя операция – к обходу ветвей дерева, начиная от корня с заданным давлением для отыскания давлений в конечных узлах инцидентных ветвей, по направлению к висячим вет-

вям дерева. Полученное P^0 может быть принято в роли начального приближения для ММД и в роли эквивалентного x_X^0 в ММКР.

На рисунке 4.21 приведена иллюстрация процессов сходимости ММКР и ММД, где величина невязки взята: для ММД по максимальному небалансу расходов в узлах $\delta_1 = \log\left(\max_{1 \leq j \leq m-1} |u_{1,j}|\right)$, ММКР по максимальному небалансу перепадов давлений в контурах $\delta_2 = \log\left(\max_{1 \leq r \leq c} |\phi_{X,r}^k|\right)$. Оба метода показали уверенную сходимость. ММД потребовалось 6 итераций, при этом применялась регулировка длины шага, а ММКР потребовалось всего 4, без какой-либо регулировки.

На этом же рисунке представлен результат расчета, выполненный с помощью классических МД и МКР для указанных условий с применением методики двойных циклов итераций [1], согласно которой соотношение (2.3) потребовалось свести к виду (2.1) так $y = \beta_2 x |x| - Y$, где $y = p_H |p_H| - p_K |p_K|$, $Y = \beta_0 p_H |p_H| - p_H |p_H|$, в отличие от ММД и ММКР, для которых такое преобразование не требуется. Более того, данная методика не применима в случае уравнения (2.4), из-за невозможности его сведения к традиционному виду обычными средствами.

Тем не менее, расчет по методике двойных циклов итераций выполнялся следующим образом: 1) имеется некоторое начальное приближение по x^k или P^k ; 2) преобразуем (2.3) к традиционному виду по методике из раздела 2.2; 3) выполняем расчет традиционными МКР или МД; 4) если выполнена хотя бы одна итерация на этапе 3, то переход к этапу 2. В терминах данной методики этап 3 является внутренним циклом, а все остальное относится к внешнему циклу.

Как показал расчет, применение этой методики также позволяет решить задачу за конечное число итераций. Однако число этих итераций (внутренних) в сумме больше примерно в 2 раза по сравнению с ММД и ММКР.

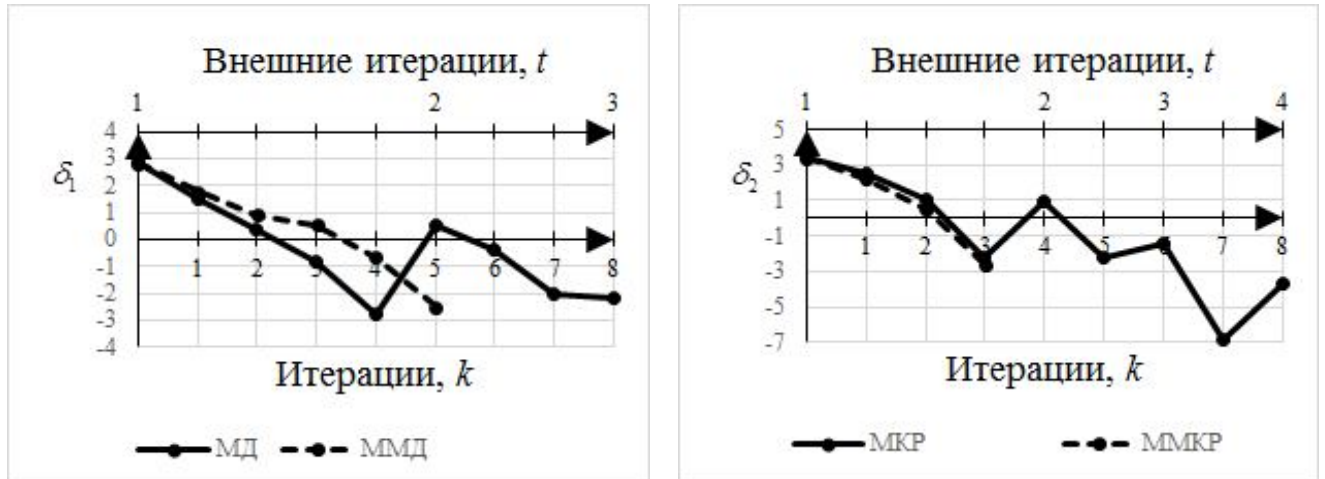


Рисунок 4.21. График сходимости ММД и ММКР в сопоставлении с методикой двойных циклов итераций.

Стоит отметить, что вычислительные затраты зависят не только от числа итераций, но также от затрат на каждую итерацию, которые связаны с конкретной конфигурацией ГЦ. В ММД количество решаемых уравнений равно $m-1$, а в ММКР – s . Отношение m/s для разных схем ГЦ может варьировать в весьма широких пределах.

Тестирование ММД для разных начальных приближений по давлениям проводилось путем их генерации с помощью датчика случайных равномерно распределенных чисел в диапазоне $-100-100$. Таких генераций выполнялось $w=100$ и для каждой из них применялся ММД с учетом регулировки шага и без нее. Точность решения проверялась по $\|u^k\| < 0,01$ и $\|\Delta P^k\| < 0,01$. На рисунке 4.22 отражены результаты такого тестирования в форме процента расчетов, в которых задача была решена за конкретное число итераций k .

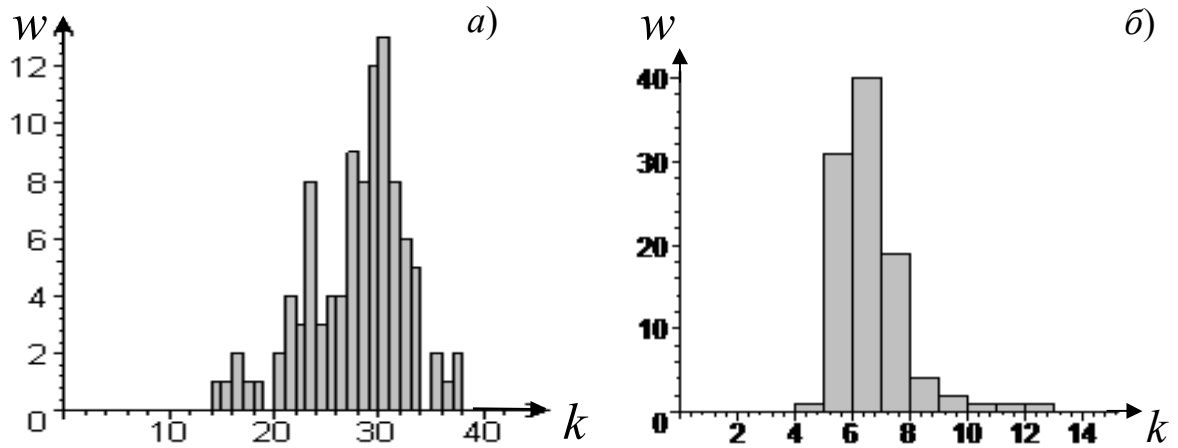


Рисунок. 4.22. Количество расчетных условий w %, при которых задача решена за k итераций: а) без регулировки шага, б) с регулировкой шага.

Тестирование на сгенерированных условиях. В таблице 4.2 приведены результаты вычислительных экспериментов для сгенерированных схем газопроводных сетей следующим образом. За основу взята схема на рисунке 4.20, но с наращиванием ее размерности от 5 до 30 раз, а место стыковки новых фрагментов выбраны крайние узлы (в базовой схеме №1 и №4), заданный расход которых присваивается новым узлам, находящимся в конце генерируемой схемы. Заданная точность небаланса в методах расчета задана выше. Решение СЛАУ выполняется методом Гаусса-Жордана.

Таблица 4.2. Число итераций (время) расчета.

Метод	Количество узлов (контуров) схемы					
	40 (10)	80 (20)	120 (30)	160 (40)	200 (50)	240 (60)
	Количество итераций (время, сек)					
ММД	10 (0,06)	12 (0,21)	10 (0,68)	9 (0,95)	13 (2,23)	10 (3,52)
ММКР	8 (0,05)	7 (0,15)	8 (0,25)	9 (0,58)	8 (0,89)	9 (3,24)

Видно, что с ростом размерности схемы резко растет время счета, однако, отсутствует значительное влияние количества узлов (контуров) расчетных схем на количество итераций для каждого метода. На рисунке 4.24 приведена графиче-

ская интерпретация таблицы 4.2, включая вычисленное время счета по следующей эмпирической формуле $t = 2 \cdot 10^{-6} N^{2,7}$, где t – время счета, N – число узлов схемы. Измерение времени счета выполнялось программным путем с помощью соответствующих диагностических процедур. Впрочем, методика генерации схем не позволяет охватить абсолютно все особенности моделируемых ТПС, в том числе, реальных.

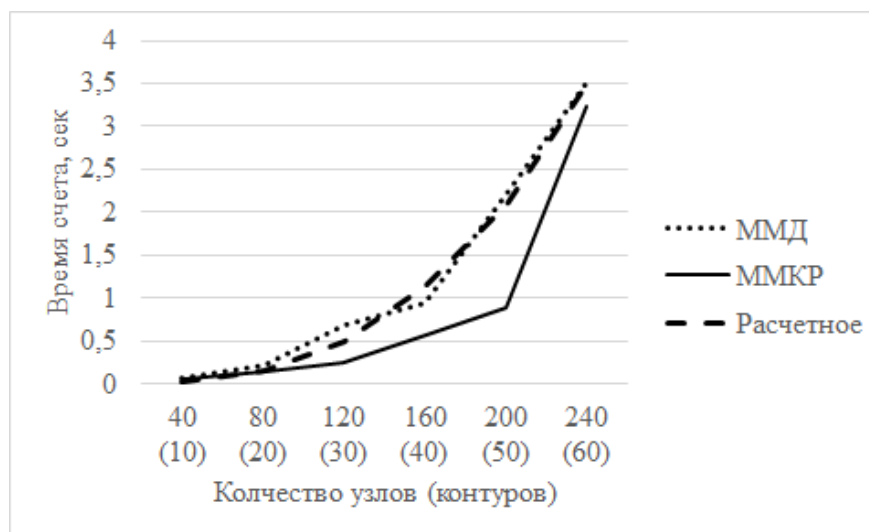


Рисунок 4.24. График сходимости ММД и ММКР.

Примеры практической апробации методики и инструментальных средств. ПВК «ИСИГР» проходит опытную эксплуатацию в открытом доступе сети Интернет с 2013 г. К середине 2018 г. на нем выполнены десятки тысяч расчетов схем реальных сетей и их фрагментов в количестве более 600 уникальных файлов-проектов (рисунок 4.25) сотнями пользователей (рисунок 4.26) из десятков городов России и ближнего зарубежья (рисунок 4.27). Анализ этих данных позволяет сделать вывод о значительной и растущей востребованности данной разработки несмотря на то, что специальная работа по ее продвижению не проводилась. В приложениях имеются справки о практическом применении ПВК.

Благодаря внедренным вычислительным возможностям ПВК «ИСИГР» позволяет выполнять расчет для схем размерностью до 1000 узлов, что соотносится с

численностью жителей населенного пункта или района города порядка нескольких десятков тыс. человек. Время, затрачиваемое на расчет занимает не более 3 сек., причем общее время ожидания результата с учетом затрат на передачу данных в сети Интернет не более 5 сек.

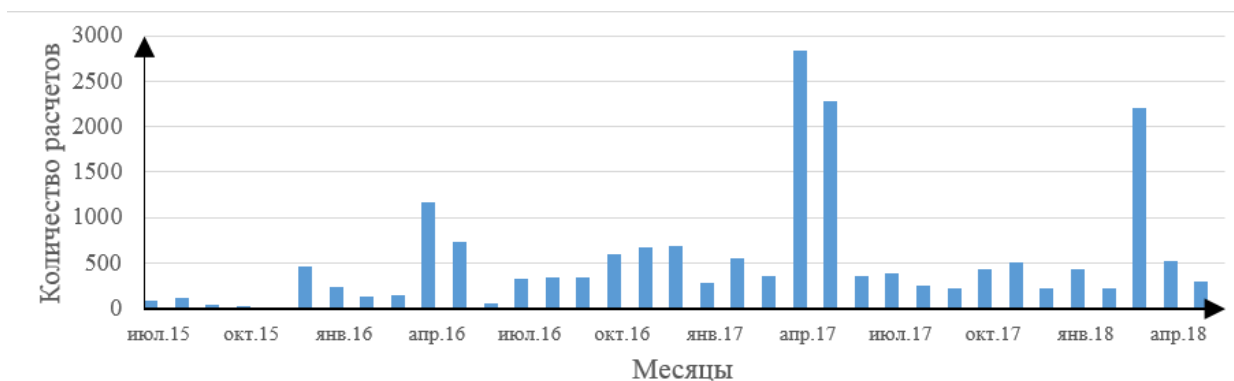


Рисунок 4.25. График количества расчетов на ПВК «ИСИГР».

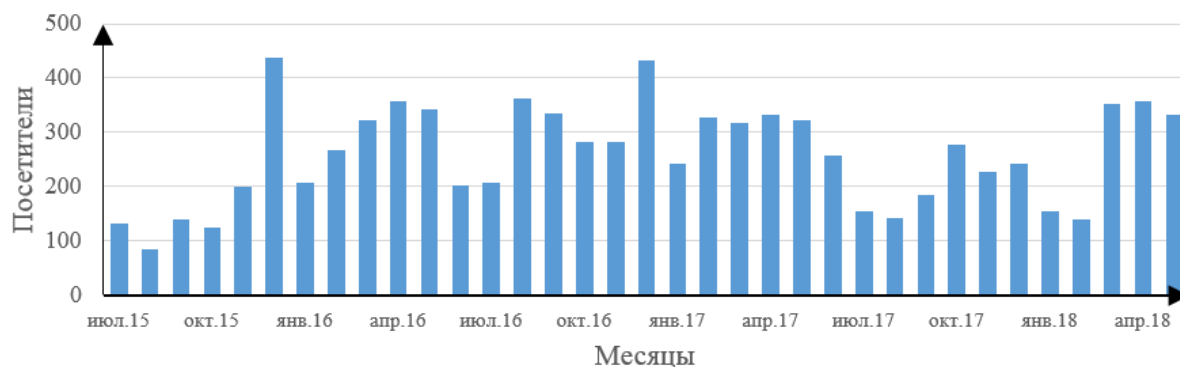


Рисунок 4.26. График изменения количества пользователей ПВК «ИСИГР».

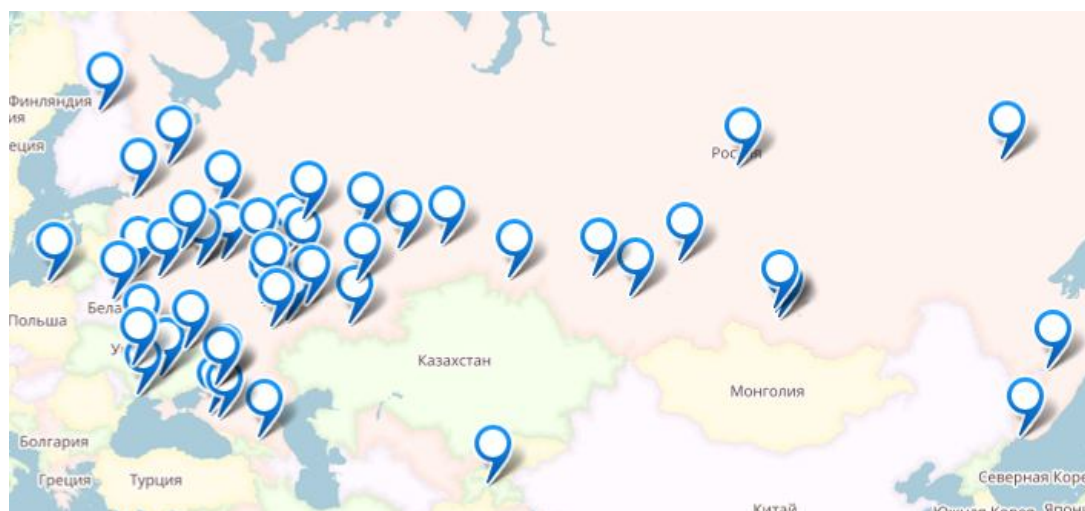


Рисунок 4.27. География применения ПВК «ИСИГР».

4.4 Основные выводы

1. Разработана общая методика практического применения технологии ООМ ГЦ, которая дает возможность многократного использования единожды реализованного общего метода решения какой-либо конкретной задачи в разных ПВК и для разных типов ТПС, и наоборот, – возможность использования альтернативных методов решений одной и той же задачи в конкретном ПВК.
2. На базе предложенных моделей, методов и технологии ООМ ГЦ разработан ПВК «ИСИГР», впервые обеспечивающий возможность практического применения методов моделирования гидравлических режимов ТПС водо- и газоснабжения в любое время, в любом месте и любому числу пользователей в сети Интернет. ПВК основан на клиент-серверной архитектуре и современных веб-технологиях, имеет интуитивно понятный интерфейс пользователя, работающий в стандартном веб-обозревателе (Web-Browser), и БД характеристик типового оборудования с инструментами ее поддержки.
3. На множестве условных и автоматически сгенерированных схем ТПС выполнено тестирование ММД и ММКР, подтверждающее одновременно их работоспособность, более высокую эффективность, по сравнению с традиционной методикой двойных циклов итераций, и большую универсальность в отношении видов замыкающих соотношений.
4. ПВК имеет практическое применение в десятках городов России и ближнего зарубежья у сотен пользователей Интернета, которые выполнили на нем десятки тысяч расчетов схем реальных ТПС и их фрагментов.

Заключение

Анализ существующего положения в области математического моделирования, методов расчета и программного обеспечения показал, что несмотря на наличие универсальных методов расчета и оптимизации, применимых для ТПС произвольного типа и назначения, наблюдается очевидное противоречие между их потенциальной общностью и повторному программированию с целью их адаптации к прикладной специфике ТПС.

В диссертации разработана и апробирована на примере задач потокораспределения технология ООМ ГЦ как средства отделения программных реализаций общих методов ТГЦ от прикладной специфики ТПС. В том числе, получены следующие результаты.

1. Разработаны основные положения и принципы реализации концепции ООМ ГЦ, решающей проблему непроизводительного дублирования реализаций методов ТГЦ при разработке ПВК на примере задачи потокораспределения.

2. Систематизированы модели изотермического установившегося течения рабочей среды для основных элементов ТПС, предложены их функциональное обобщение и условия применимости в сетевых моделях потокораспределения. Предложенная классификация этих моделей, а также правила их объектного представления покрывают все известные случаи законов сопротивления трению, включая традиционные, неявные по расходу и зависимые от давления.

3. Разработана новая объектно-ориентированная модель установившегося изотермического потокораспределения в ТПС, а также новые методы его расчета (ММД и ММКР), одновременно удовлетворяющие требованиям вычислительной эффективности и универсальности в отношении новых возможностей учета широкого спектра соотношений для законов течения жидкости или газа.

4. Разработаны принципы и механизмы программной реализации технологии ООМ ГЦ, включая механизмы взаимодействия объектов, отвечающих за общие методы ТГЦ и специфику ТПС, которые обеспечивают новый уровень требований по развиваемости, расширяемости, масштабируемости, языковой независимости, сопровождаемости и открытости.

5. Предложена методика практического применения технологии ООМ ГЦ при проектировании и развитии ПВК, направленная на обеспечение возможности многократного использования единожды реализованного общего метода решения какой-либо конкретной задачи в разных ПВК и для разных типов ТПС, и наоборот, – возможность использования альтернативных методов решений одной и той же задачи в конкретном ПВК.

6. На базе предложенных моделей, методов и технологии ООМ ГЦ разработан ПВК «ИСИГР», впервые обеспечивающий возможность практического применения методов моделирования гидравлических режимов ТПС водо- и газоснабжения в любое время, в любом месте и любому числу пользователей в сети Интернет.

7. На множестве условных и автоматически сгенерированных схем ТПС выполнено тестирование ММД и ММКР, подтверждающее одновременно их работоспособность, более высокую эффективность, по сравнению с традиционной методикой двойных циклов итераций, и большую универсальность в отношении видов замыкающих соотношений.

Список литературы

1. **Меренков А.П., Хасилев В.Я.** Теория гидравлических цепей. – М: Наука, 1985. – 278 с.
2. **Математическое** моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте-, газоснабжения / А.П. Меренков, Е.В. Сеннова, С.В. Сумароков и др. – Новосибирск: Наука, 1992. – 407 с.
3. **Трубопроводные** системы энергетики. Развитие теории и методов математического моделирования и оптимизации / Аверьянов В.К., Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г. и др. – Новосибирск: Наука, 2008. – 312 с.
4. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Объектно-ориентированное моделирование гидравлических цепей // Вестник ИРГТУ, 2012. – № 7. – С. 170–176.
5. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Программно-вычислительный комплекс «ИСИГР» для применения методов теории гидравлических цепей в сети Интернет // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 3(64). – С. 30–43. ISBN 1814-1196. DOI 10.17212/1814-1196-2016-3-30-43.
6. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Инновационный программный комплекс «ИСИГР» для моделирования режимов работы систем водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника, 2017. – № 12. – С. 45–49.
7. **Свидетельство** № 2013619400 Российская Федерация. Программно-вычислительный комплекс «ИСИГР» 1.0: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Заявители и правообладатели: Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской Академии Наук. – Зарегистр. 03.10.2013. – 1 с.
8. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Модифицированный метод узловых давлений для расчета потокораспределения в гидравлических цепях при нетрадиционных замыкающих соотношениях // Научно-технические ведомости СПбПУ, 2015. – Т. 2. – № 218 – 179 с.
9. **Новицкий Н.Н., Шалагинова З.И., Михайловский Е.А.** Объектно-ориентированные модели элементов тепловых пунктов теплоснабжающих систем // Вестник ИРГТУ, 2017. – № 9. – С. 157–171.
10. **Egor M. Mikhailovsky, Nikolai N. Novitsky.** A modified nodal pressure method for calculating flow distribution in hydraulic circuits for the case of unconventional closing relations // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. Production and hosting by Elsevier B.V.– Vol. 1, Issue 2, 2015. – pp. 120–128.
11. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Применение объектно-ориентированного моделирования для программной реализации методов тео-

- рии гидравлических цепей // Коммунальное хозяйство городов. Серия: технические науки и архитектура. – Вып. 103. – Харьков – 2012. – С. 520–526.
12. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Численное решение задач потокораспределения в гидравлических цепях с сосредоточенными параметрами при произвольных замыкающих соотношениях // Трубопроводные системы энергетики: Математическое и компьютерное моделирование (под ред. Н.Н. Новицкого). – Новосибирск: Наука, 2014. – С. 34–45.
 13. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Модифицированный метод контурных расходов для расчета потокораспределения в гидравлических цепях при зависимых от давления законах течения // Трубопроводные системы энергетики: Математические и компьютерные технологии интеллектуализации (под ред. Н.Н. Новицкого). Новосибирск: Наука, 2017. – С. 51–59.
 14. **Новицкий Н.Н., Алексеев А.В., Михайловский Е.А.** Универсальная технология компьютерного моделирования трубопроводных систем на базе современных методов теории гидравлических цепей // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: материалы междунар. науч.-практ. конф. (под ред. С.У. Увайсова). – М.: МИЭМ, 2010. – 624 с. – С. 255–257.
 15. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Тезисы доклада «Объектно-ориентированные методы расчета потокораспределения в трубопроводных системах энергетики» // Materiály X mezinárodní vědecko – praktická conference «Moderní vymoženosti vědy – 2014». – Díl 38. Technické vědy.: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – 112 stran. – S. 75–77.
 16. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Программный комплекс для удаленного моделирования режимов работы трубопроводных систем энергетического и коммунального назначения // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Иркутск, 21–25 апреля 2015 г.): в 2 т. / под общ. ред. В.В. Федчишина. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. – Т. 2. – 422 с. – С. 375–380.
 17. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Программно-вычислительный комплекс «ИСИГР» для применения методов теории гидравлических цепей в сети Интернет // Матер. междунар. науч.-практ. интернет-конф. «Компьютерные технологии в городском и региональном хозяйстве» (Харьков, 23–28 ноября 2015 г.). – Харьков: ХНУМГ им. О.М. Бекетова, 2015. – С. 9–10.
 18. **Шалагинова З.И., Михайловский Е.А.** Объектно-ориентированное моделирование тепловых пунктов при расчетах теплогидравлических режимов систем теплоснабжения // Матер. междунар. науч.-практ. интернет-конф. «Компьютерные технологии в городском и региональном хозяйстве» (Харьков, 23–28 ноября 2015 г.). – Харьков: ХНУМГ им. О.М. Бекетова, 2015. – С. 86–87.

19. **Михайловский Е.А., Новицкий Н.Н.** Опыт реализации и применения объектно-ориентированного моделирования трубопроводных систем коммунального назначения // Энергетика в современном мире // VIII Междунар. заочная науч.-практ. конф.: сб. ст. Забайкал. гос.ун-т; [отв. ред. Н.С. Кузнецова]. – Чита: ЗабГУ, 2017. – С. 108–114. ISBN 978-5-9293-2060-6.
20. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Дистанционное моделирование трубопроводных систем с использованием интернет-технологий // Современные проблемы радиоэлектроники и связи: материалы IX Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Иркутск, 26 мая, 2010 г.) / под ред. А.И. Агарышева, Е.М. Фискина. –Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2010. –280 с. –С. 171–175.
21. **Алексеев А.В., Михайловский Е.А., Новицкий Н.Н.** Опыт разработки и применения информационно-вычислительной среды «Ангара» для интеграции методов теории гидравлических цепей // Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем // Труды XII Всеросс. научн. семин. с междунар. участ. – Ялта, Украина, 20–26 сентября 2010 г. [Электронный ресурс], ISBN 978-5-93908-088-0. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010 – 534 с. – С. 421–436.
22. **Новицкий Н.Н., Алексеев А.В., Михайловский Е.А.** Архитектура и принципы разработки нового поколения программных реализаций методов теории гидравлических цепей // Труды XV Байкальской Всероссийской конференции «Информационных и математические технологии в науке и управлении». – Часть III. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. – 278 с. – С. 126 – 131.
23. **Новицкий Н.Н., Алексеев А.В., Михайловский Е.А.** Опыт разработки и направления развития интегрированной технологии компьютерного моделирования трубопроводных системы различного назначения // Труды XVI Байкальской Всероссийской конференции «Информационных и математические технологии в науке и управлении». – Часть I. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. – 252 с. – С. 98 – 107.
24. **Алексеев А.В., Михайловский Е.А., Новицкий Н.Н., Токарев В.В.** Универсальные информационно-вычислительные технологии для компьютерного моделирования трубопроводных и гидравлических систем // Сб. ст. всеросс. конф. «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление», 1–3 сентября 2015 г., Иркутск, Россия. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – 591 с. – С. 399–407.
25. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Интернет система для гидравлических расчетов трубопроводных сетей методами теории гидравлических цепей / Труды XV Всеросс. научн. семин. «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем». Иркутск, 5–11 сентября 2016 г. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2016. – С. 382–394.

26. **Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А.** Интернет-технология для тестирования и практического применения современных методов моделирования гидравлических цепей / Материалы XVIII Всеросс. конф. мол. уч. по математическому моделированию. г. Иркутск, Россия, 21–25 августа 2017 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. – 112 с.
27. **Михайловский Е.А.** Разработка и апробация базовых механизмов объектно-ориентированного моделирования гидравлических цепей // Системные исследования в энергетике. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009. – (Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, вып. 39). – С. 188–197.
28. **Михайловский Е.А.** Компьютерное моделирование гидравлических цепей на основе объектного представления их элементов // Системные исследования в энергетике. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. – (Тр. мол. уч. – ИСЭМ СО РАН, вып. 40). – С. 74–83.
29. **Михайловский Е.А.** Разработка и программная реализация механизмов объектно-ориентированного моделирования трубопроводных систем в сети интернет // Системные исследования в энергетике. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. – (Тр. мол. уч. ИСЭМ СО РАН, вып. 41). – С. 39–45.
30. **Михайловский Е.А.** Объектно-ориентированное моделирование потокораспределения в гидравлических цепях при неявных замыкающих соотношениях // Системные исследования в энергетике. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2012. – (Тр. мол. уч. ИСЭМ СО РАН, вып. 42). – С. 55–62.
31. **Giustolisi O., Berardi L., Laucelli D.** Generalizing WDN simulation models to variable tank levels // Journal of Hydroinformatics, IWA-IAHR, UK, 2011.
32. **Todini E.** Extending the global gradient algorithm to unsteady flow extended period simulations of water distribution systems // Journal of Hydroinformatics, 2010. – 13 (2). – P. 167–180.
33. **Сумароков С.В.** Метод решения многоэкстремальной сетевой задачи // Экономика и мат. методы, 1976. – Т. 12. – № 5. – С. 1016–1018.
34. **Darian N.R.** Multi-objective optimisation of water distribution systems design using metaheuristics: dis. dr. of phil. University of Stellenbosch, 2011. – 370 p.
35. **Токарев В.В., Шалагинова З.И.** Методика многоуровневого наладочного расчета теплогидравлического режима крупных систем теплоснабжения с промежуточными ступенями управления // Теплоэнергетика, 2016. – № 1. – С. 71–80.
36. **Новицкий Н.Н., Шалагинова З.И., Токарев В.В., Гребнева. О.А.** Технология разработки эксплуатационных режимов крупных систем теплоснабжения на базе методов многоуровневого теплогидравлического моделирования // Энергетика. Известия академии наук, 2018. – № 1. – С. 12–24.
37. **Новицкий Н.Н.** Оценивание параметров гидравлических цепей. – Новосибирск: Наука, 1998. – 214 с.

38. **Андряшев М.М.** Техника расчета водопроводной сети. – М.: Сов. законодательство, 1932. – 62 с.
39. **Лобачев В.Г.** Новый метод увязки колец при расчете водопроводных сетей // Санитарная техника. – 1934. – № 2. – С. 8–12.
40. **Cross H.** Analysis of flow in network of conduits or conductors // Urbana Illinois: Eng. Exp. Station of Univ. of Illinois, 1936, November. – Bull. № 286. – 29 p.
41. **Хасилев В.Я.** Линейные и линеаризованные преобразования схем гидравлических цепей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1964. – № 2. – С. 231–243.
42. **Хасилев В.Я.** Элементы теории гидравлических цепей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1964. – № 1. – С. 69–88.
43. **Баранчикова Н.И., Епифанов С.П., Зоркальцев В.И.** Неканоническая задача потокораспределения с заданными напорами и отборами в узлах // Вода и экология. Проблемы и решения. – 2014. – № 2. – С. 31–38.
44. **Файзуллин Р.Т.** О решении нелинейных алгебраических систем гидравлики // Сибирский журнал индустриальной математики, 1999. – Т. 2. – №. 2. – С. 176–184.
45. **Krope J., Dobersek D., Goricanec D.** Flow pressure analysis of pipe networks with linear theory method // WSEAS/IASME International Conference on Fluid Mechanics, 2006. – P. 59–62.
46. **Wood D.J., Charles C.O.A.** Hydraulic network analysis using linear theory // Journal of the Hydraulics Division. ASCE, 1972. – V. 98. – № HY7.
47. **Rakesh K.G.** Analysis and Control of Flows in Pressurized Hydraulic Networks: dis. dr. University of Liège, Belgium, 2006. – 196 p.
48. **Todini E.** A unifying view on the different looped pipe network analysis algorithms / In Powell R. and Hindi K.S. (eds). Computing and Control for the water Industry. Research Studies Press Ltd, 1999. – P. 63–80.
49. **Новицкий Н.Н.** Расчет потокораспределения в гидравлических цепях на базе их линеаризации узловыми моделями секущих и хорд // Известия академии наук. Энергетика, 2013. – № 6. – С. 56–69.
50. **Иродов В.Ф., Казин А.Н.** Эволюционное программирование и его применение для расчета стационарных и нестационарных течений в трубопроводных сетях // 16 Jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike. – Београд, 1984. – № ВП-3. – С. 373–380.
51. **Иродов В.Ф., Казин А.Н., Максименков В.П.** Эволюционные алгоритмы потокораспределения в инженерных сетях // Мат. методы механики жидкости и газа. – Днепропетровск: ДГУ, 1981. – С. 130–135.
52. **Сухарев М.Г.** Об одном методе расчета газосборных сетей на вычислительных машинах. – Изв. вузов. Нефть и газ, 1965. – № 6. – С. 48–52.
53. **Сухарев М.Г., Ставорский Е.Р.** Расчеты систем транспорта газа с помощью вычислительных машин. – М.: Недра, 1971. – 206 с.

54. **Немудров А.Г., Черникин В.И.** Расчет режимов работы газопроводов методом определения оптимальных характеристик турбоагнетателей // Газовая промышленность, 1966. – № 3. – С. 31–34.
55. **Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д.** Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. Харьков: Вища школа, 1980. – 144 с.
56. **Панкратов В.С., Дубинский А.В., Сиперштейн Б.И.** Информационно-вычислительные системы в диспетчерском управлении газопроводами. – Л.: Недра, 1988. – 246 с.
57. **Чионов А.М., Казак К.А., Кулик В.С. и др.** Моделирование систем трубопроводов в стационарном режиме // Журнал нефтегазового строительства, 2014. – № 2. – С. 54–59.
58. **Ионин А. А.** Газоснабжение: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1989. – 439 с.: ил. – ISBN 5–274–00006–1.
59. **Левин А.А., Таиров Э.А., Чистяков В.Ф.** Расчет потокораспределения в энергоустановках как гидравлических цепях с регулируемыми параметрами // Трубопроводные системы энергетики: математическое моделирование и оптимизация (под. ред. Н.Н. Новицкого). Новосибирск: Наука, 2010. – С. 115–124.
60. **Сарданашвили С.А.** Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. – 577 с.
61. **Корельштейн Л.Б., Пашенкова Е.С.** Опыт использования методов глобального градиента и декомпозиции при расчете установившегося неизотермического течения жидкостей и газов в трубопроводах // Трубопроводные системы энергетики: математическое моделирование и оптимизация (под. ред. Н.Н. Новицкого). Новосибирск: Наука, 2010. – С. 103–115.
62. **Todini E.** Un metodo del gradiente per la verifica delle reti idrauliche // Bollettino degli Ingegneri della Toscana. – 1979. – № 11. С. 11–14.
63. **Методы и алгоритмы** расчета тепловых сетей / Хасилев В.Я., Меренков А.П., Каганович Б.М. и др. (под общ. ред. В.Я. Хасилева и А.П. Меренкова). – М.: Энергия, 1978. – 176 с.
64. **Морев А.А., Новицкий Н.Н.** Комплекс программ для гидравлического расчета и исследования особенностей функционирования систем многониточных нефтепроводов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1981. – № 8. – С. 18–20.
65. **Сумароков Е.В.** Математическое моделирование систем водоснабжения. – Новосибирск: Наука, 1983. – 167 с.
66. **Расчет** послеаварийных гидравлических режимов / В.Г. Сидлер, С.В. Сумароков, В.Р. Чупин и др. // Водоснабжение и санитарная техника, 1989. – № 2. – С. 4–5.

67. **Математическое** моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения / А.П. Меренков, Е.В. Сеннова, С.В. Сумароков и др. – Новосибирск: Наука, 1992. – 407 с.
68. **Алексеев А.В., Новицкий Н.Н., Токарев В.В.** и др. Принципы разработки и программная реализация информационно-вычислительной среды для компьютерного моделирования трубопроводных и гидравлических систем // Трубопроводные системы энергетики. Методы математического моделирования и оптимизации (под. ред. Н.Н. Новицкого). – Ново-сибирск: Наука, 2007. – С. 221–229.
69. **Сарданашвили С.А.** Особенности архитектуры компьютерных тренажерных комплексов для диспетчерских служб трубопроводного транспорта // Трубопроводные системы энергетики: модели, приложения, информационные технологии (под ред. М.Г. Сухарева). – Москва: ГУП Изд. «Нефть и газ», 2000. – С. 275–286.
70. **CalcTool:** Flow in pressurized pipe calculator [Электронный ресурс]. 2016. URL: http://www.calctool.org/CALC/eng/civil/hazen-williams_p (дата обращения: 01.01.2017).
71. **Гидравлический расчет** трубопровода | Калькулятор [Электронный ресурс], 2016. URL: <http://allcalc.ru/node/498> (дата обращения: 01.01.2017).
72. **Гидравлический расчет** наружной водопроводной сети [Электронный ресурс], 2018. URL: <https://viv.vogu35.ru/cgi-bin/special/plumbing.web/plumbing.pl> (дата обращения: 08.03.2018).
73. **Гидравлический расчет** наружной водопроводной сети (epanet.js) [Электронный ресурс], 2017. URL: <http://epanet.de/js/> (дата обращения: 01.01.2017).
74. **Ексаев А.П., Шумяцкий М.Г., Задачин В.М.** Опыт разработки и внедрения ИГС «CITYCOM» для компьютерного моделирования и оптимизации трубопроводных и гидравлических систем // Трубопроводные системы энергетики: Методические и прикладные проблемы математического моделирования (под ред. Новицкого Н.Н. и Тевяшева А.Д.). –Новосибирск: Наука, 2015. – С. 429–438.
75. **Буч Г.** Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. – 2-е изд. / Пер. с англ. – М.: «Издательство Бином», СПб: «Невский диалект», 1998. – 560 с., ил.
76. **Рамбо Дж., Блаха М.** UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка. –2-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 544 с.: ил. – ISBN 5-469-00814-2.
77. **Интеграция информационных технологий** в системных исследованиях энергетики / Л.В. Массель [и др.]; отв. ред. Н.И. Воропай; Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. – Новосибирск: Наука, 2003. – 320 с.

78. **Болдырев Е.А.** Моделирование и разработка расширяемого программного комплекса для исследований проблемы энергетической безопасности: дис. канд. техн. наук. ИСЭМ СО РАН. – Иркутск, 2002. – 152 с.
79. **Рофейл Э., Шохауд Я.** «COM и COM+» 2000 г.
80. **Роджерсон Д.** Основы COM. 2-е изд., 2000. – 228 с. ISBN: 5-7502-0145-7.
81. **Visual C++ и MFC.** Энциклопедия пользователя: Пер. с англ./ Юджин Олафсен, Кенн Скрайбнер, К. Дэвид Уайт и др. – К.: Издательство «Диасофт», 2000. – 720 с.
82. **Henning M., Vinoski S.** Advanced CORBA Programming with C++. Addison-Wesley Professional, 1999. – 1120 pp.
83. **ZeroC** – Network Your Software [Электронный ресурс], 2016. – URL: <http://zeroc.com> (дата обращения: 1.1.2016).
84. **Routix.net** [Электронный ресурс], 2016. URL: <http://ru.routix.net> (дата обращения: 1.1.2016).
85. **XML.RPC** [Электронный ресурс], 2016. – URL: <http://www.xmlrpc.com> (дата обращения: 1.1.2016).
86. **JSON.RPC** [Электронный ресурс], 2016. – URL: <http://www.jsonrpc.org> (дата обращения: 1.1.2016).
87. **Пол Нильсен.** SQL Server, 2005. Библия пользователя, 2008. – ISBN: 978-5-8459-1314-2, 0-7645-4256-7.
88. **Сарданашвили С.А.** Объектно-ориентированная технология информационно-алгоритмического представления газотранспортных систем в задачах моделирования и оптимизации // Трубопроводные системы энергетики: модели, приложения, информационные технологии (под ред. М.Г. Сухарева). – Москва: ГУП Изд. «Нефть и газ», 2000. – С. 265–275.
89. **Юдовина Е.Ф., Пашенкова Е.С.** Программный комплекс «Гидросистема» и его использование для гидравлических расчетов трубопроводных систем // Трубопроводные системы энергетики: Методические и прикладные проблемы математического моделирования (под ред. Н.Н. Новицкого и А.Д. Тевяшева). Новосибирск: Наука, 2015. – С. 438–446.
90. **Юдовина Е.Ф., Лисин С.Ю., Тарасевич В.В.** и др. Реализация расчета гидравлического удара в рамках программного комплекса «Гидросистема» // Трубопроводные системы энергетики: Математические и компьютерные технологии интеллектуализации (под ред. Н.Н. Новицкого). – Новосибирск: Наука, 2017. – С. 353–360.
91. **Альтшуль А.Д.** Гидравлические сопротивления. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
92. **СНиП 2.04.07-86*.** Тепловые сети. Москва, Госстрой России, 1994. – 56 с.
93. **Шифринсон Б.Л.** Основной расчет тепловых сетей. Теория и методы расчета. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1940. – 188 с.

94. **Манюк В.И., Каплинский Я.И., Хиж Э.Б. и др.** Справочник «Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей». – 3-е изд. – М.: Стройиздат, 1988. – 432 с.
95. **Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84*.** Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Издание официальное. – М.: Изд. Министерства регионального развития Российской Федерации, 2012.
96. **Шевелев Ф.А.** Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справ. пособие. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: ООО «Бастет», 2007. – 336 с.
97. **Писсанецки С.** Технология разреженных матриц: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 410 с.
98. **Williams G.S., Hazen A.** Hydraulic Tables. – New York: John Wiley and Sons, 1905. – 63 с.
99. **СНиП 2.04.08-87*.** Газоснабжение. Москва, Госстрой России, 1995.– 91 с.
100. **Мак-Дональд М.** Silverlight 5 с примерами на C# для профессионалов, 4-е изд.: Пер. с англ. – М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2013. – 848 с. ISBN 97885584599178443.

Приложения

Приложение 1.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013619400

Программно-вычислительный комплекс «ИСИГР» 1.0.

Правообладатели: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (RU), Новицкий Николай Николаевич (RU), Михайловский Егор Анатольевич (RU)*

Авторы: *Новицкий Николай Николаевич (RU), Михайловский Егор Анатольевич (RU)*



Заявка № 2013617333

Дата поступления 07 августа 2013 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 октября 2013 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

Приложение 2.



СПРАВКА

о практическом применении результатов диссертационной работы

МИХАЙЛОВСКОГО Егора Анатольевича

Дана Михайловскому Е.А., как разработчику программно-вычислительного комплекса «ИСИГР». Эта программа применена в деятельности ТОО «Мастерская Инженерных Проектов» для моделирования режима потокораспределения при проектировании объектов:

1. системы водоснабжения 2-х жилых микрорайонов, находящихся в Республике Казахстан, Карагандинская область;
2. водовода протяженностью 26км., диаметром 1000мм., с подкачивающей насосной станцией находящийся в Республике Казахстан, Карагандинская область;
3. группового водовода, предназначенного для водоснабжения 5 населенных пунктов в Мангистауской области, Республика Казахстан, протяженностью около 210км., диаметром 710мм., и 900мм., и 2 насосные станции;

что позволило существенно сократить время выполнения работ.

Особо полезными функциями программы оказались:

1. построение пьезометрического графика, помогающего анализировать гидравлический режим работы проектируемого объекта, например, с целью выявления оптимального расположения насосных станций или диаметра трубопровода;
2. пакетное изменение параметров элементов, позволяющее оперативно вносить исправления в исходные данные, что сокращает трудозатраты на редактирование схемы.

Так же хочется отметить оперативную работу Разработчика при возникновении вопросов или пожеланий по работе с программой.

Директор



Лиханова И.В.

Дата: «01» июня 2018 г.

ЖШС «Мастерская Инженерных Проектов»
100000 Караганды қ. Волочаевская көш., 3у., 42п.
Тел.: +7 701 523 68 14 / +7 700 976 61 55
E-mail: Lihanova_irina@mail.ru

ТОО «Мастерская Инженерных Проектов»
100000 г.Караганда, ул. Волочаевская д.3, кв.42
Тел.: +7 701 523 68 14 / +7 700 976 61 55
E-mail: Lihanova_irina@mail.ru

Приложение 3.

Таблица П.3.1. Описание интерфейса объекта «Модели элементов».

Название	Входной параметр (тип и название)	Описание параметра	Назначение и выход- ной параметр
Методы параметризации			
AddComp	double a0,a1,a2,a3	Коэф. аппроксимации характеристики агрегата	Добавление параметров компрессора
AddPipe	byte st, cover; double dv,L,th; bool old; double kms	Номер стандарта (1-20), тип внутреннего покрытия (1-4); Диаметр, длина, толщина покрытия; Старый участок; Сумма коэф. местных сопротивлений	Добавление параметров участка трубопровода
AddPipeS	double s, H	Сопротивление ветви, действующий напор	Добавление параметров произвольного пассивного или активного элемента
AddPump	double a0,a1,a2,a3	Коэф. аппроксимации характеристики агрегата	Добавление параметров насоса
AddValve	double dv, dzeta	Диаметр, коэф. сопротивления	Добавление параметров задвижки
AddLink	object id	Указатель на объект расширения	Добавление элемента, принадлежащего объекту расширения
Методы расчета			
dudpk	double x, pn, pk	Расход, давление в начале и конце связи	Расчет производной $\partial\varphi/\partial p_k$, double
dudpn	double x, pn, pk	Расход, давление в начале и конце связи	Расчет производной $\partial\varphi/\partial p_n$, double
dudx	double x, pn	Расход, давление в начале связи	Расчет производной $\partial\varphi/\partial x$, double
fn	double x, pn, pk	Расход, давление в начале и конце связи	Расчет производной x'_{pn} , double
fk	double x, pn, pk	Расход, давление в начале и конце связи	Расчет производной x'_{pk} , double
La	double x	Расход	Расчет λ
V	double x	Расход	Расчет скорости
Xv	double v	Скорость	Расчет расхода
Xnk	double pn, pk	Давление в начале и конце связи	Расчет расхода
X	double y	Перепад напора	Расчет расхода
Y	double x	Расход	Расчет перепада напора
f	double x	Расход	Расчет производной

Свойства			
Eps	double		Точность расчета расхода из неявных соотношений
Formula	byte	(1-12) описано выше	Указание номера формулы/методики моделирования пассивных связей
Method	byte	(1-метод просто итерации, 2-методы Ньютона, 3-комбинированный)	Указание номера метода расчета расхода из неявных соотношений
Limit	byte		Указание ограничения на количество итераций
Link	int	(0-n)	Указание индекса связи, относительно которой выполняется расчет
StartX	double	-	Начальное приближение для итерационного вычисления расхода
Nu, Ro, Temperature	double	-	Указание вязкости, плотности и температуры транспортируемой среды

Таблица П.3.2. Описание интерфейса объекта «Метод расчета».

Название	Входной параметр (тип и название)	Описание параметра	Назначение и выходной параметр
Методы параметризации			
AddLink	int jn,jk	Индексы начального и конечного узлов	Добавление связи
AddNode	double P	Начальное приближение по давлению или напору	Добавление узла соединения
AddSource	double P	Заданное давление или напор	Добавление узла источника
AddUser	double Q, P	Отбор, начальное приближение по давлению или напору,	Добавление узла потребления
Методы расчета			
Start	-	-	Выполнение расчета
Методы вывода результатов			
GetX	int i	Индекс ветви, (0-n)	Вывод значения расхода по заданной ветви
GetP, GetQ	int j	Индекс узла, (0-m)	Вывод значения давления и отбора по

			заданному узлу
Свойства			
Link	-	(0-n)	Массив параметров связей с полями: h-потеря давления (double), x-расход (double).
Node	-	(0-m)	Массив параметров узлов с полями: P-давление, Q-расход, H-индексы узлов с заданным давлением
model	object	-	Указатель на объект «Модели элементов»
iter	byte	-	Количество выполненных итераций
Limit	byte		Указание ограничения на количество итераций
Eps, EpsP	double	-	Величина невязки по I и II законам Кирхгофа

Таблица П.3.3. Описание интерфейса объекта «Начальное приближение».

Название	Входной параметр (тип и название)	Описание параметра	Назначение и выходной параметр
Методы параметризации			
AddLink	int jn,jk	Индексы начального и конечного узлов	Добавление связи
AddNode	-	-	Добавление узла соединения
AddSource	double P	Давление или напор	Добавление узла источника
AddUser	double Q	Отбор	Добавление узла потребления
Методы расчета			
Start	byte SeedKey	Номер метода расчета (0-3)	Выполнение расчета
Методы вывода результатов			
GetX	int i	Индекс ветви, (0-n)	Вывод значения расхода по заданной ветви
GetP, GetQ	int j	Индекс узла, (0-m)	Вывод значения давления и отбора по заданному узлу
Свойства			
Link	-	(0-n)	Массив параметров связей с полями: x-расход (double).
Node	-	(0-m)	Массив параметров узлов с полями: P-давление, Q-

			расход
model	object	-	Указатель на объект «Модели элементов»
SeedSPP, SeedSVV, SeedSY, SeedTree	byte	-	Константы для параметра SeedKey в методе Start

Таблица П.3.4. Описание интерфейса объекта «Решение СЛАУ».

Название	Входной параметр (тип и название)	Описание параметра	Назначение и выходной параметр
Методы параметризации			
Add, Insert	int row, col, double value	Индекс строки, столбца, значение	Добавление/вставка значения в структуру разреженной матрицы
First, Set	int row	Индекс строки	Переход к первому элементу строки, переход к заданной строке
Clear, Next	-	-	Очистка значений матрицы, переход к следующему элементу строки матрицы
LSM	int m	Количество узлов (m)	Инициализация разреженной матрицы
StcToSSM	int[] jn, jk; byte[] pf	Индексы начальных и конечных узлов (1-n); массив с отметками !=0 вычеркнутых узлов (с заданным давлением/напором)	Настройка разреженной матрицы по топологии схемы сети
Методы расчета			
Pivote	ref double[,] a; ref double[] b	Матрица коэфф.; правая часть уравнений	Решение СЛАУ методом Гаусса-Жордана, bool, результат в ref double[] b
Solve	-	-	Решение СЛАУ методом LDL-разложения с разреженной матрицей, double[]
Свойства			
smt	LSM	-	Переменная разреженной матрицы
B	double[]	-	Правая часть уравнений

Таблица П.3.5. Описание интерфейса объекта «Модель сети».

Название	Входной параметр (тип и название)	Описание параметра	Назначение и выходной параметр
Методы параметризации			
WaterDC	string save	Исходные данные по расчетной схеме сети в формате JSON класса TSave	Ввод исходных данных
Методы расчета			
Start	-	-	Расчет потокораспределения, bool
GetWaterDC	string	-	Выдача результата расчета в формате JSON класса TCalcResult

Список основных сокращений

ТПС – трубопроводная система;

ТГЦ – теория гидравлических цепей;

ГЦ – гидравлическая цепь;

ООМ – объектно-ориентированное моделирование;

ПВК – программно-вычислительный комплекс;

ООП – объектно-ориентированное программирование;

ПО – программное обеспечение;

БД – база данных;

БДО – база данных характеристик типового оборудования;

ИТ – информационные технологии;

ГИС – геоинформационные системы;

ММКР – модифицированный метод контурных расходов;

ММД – модифицированный метод узловых давлений;

СЛАУ – систем линейных алгебраических уравнений;