



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.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск, 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского Отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель: доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
Новицкий Николай Николаевич

Официальные оппоненты: **Сарданашвили Сергей Александрович**,
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», кафедра проектирования и эксплуатации газонефтепроводов, заведующий кафедрой

Дектерев Александр Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физических основ энергетических технологий, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт экономики и организации управления в газовой промышленности», г. Москва.

Защита состоится «20» декабря 2018 г. в 09:00 на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского Отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, малый конференц-зал (3-й этаж, к. 355).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2018-5/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н., профессор



А.М. Клер

Общая характеристика работы

Актуальность. 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) 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.

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



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

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 на примере задачи потокораспределения предлагается два взаимосвязанных пути обеспечения общности программных реализаций методов ТГЦ:

- 1) переход на концепцию объектно-ориентированного моделирования (ООМ) гидравлических цепей (ГЦ), с целью отделения программных компонент, реализующих общие методы, от компонент, отвечающих за специфику ТПС [1];
- 2) развитие самих методов расчета с ориентацией на эту концепцию [2,3].

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

Объект исследования – 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 зависящие 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 ТГЦ. Ее практическое применение обеспечивает возможности:

- 1) многократного применения реализованных методов в существующих или вновь создаваемых ПВК для компьютерного моделирования ТПС;
- 2) использования этих методов в локальных и распределенных ПВК;
- 3) развития потенциала ПВК без его перепрограммирования;
- 4) сокращения затрат на разработку, 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 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 для 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 [4,5]. ПВК «ИСИГР» зарегистрирован в государственном реестре программ для ЭВМ [6]. С 2013 г. находится в открытом доступе (см. 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: ТГЦ, 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 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 «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 [1,2,4,5,7], две в иностранных журналах [8,9], 2 работы в коллективных монографиях [3,10], 13 работ в сборниках трудов международных [11–16] и всероссийских [17–23] конференций, 4 работы в сборниках трудов локальных семинаров [24–27]. Получено свидетельство о государственной регистрации программ на ЭВМ [6].

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).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 (ИТ) потенциально применимых для разработки нового поколения ПВК. Дана содержательная постановка целей и задач исследования.

В литературе, посвященной моделированию ТПС, уделяется много внимания задаче расчета установившегося изотермического потокораспределения. Исторически, первые методы расчета потокораспределения в многоконтурных ТПС были разработаны Андрияшевым М.М., Лобачевым В.Г.,

Кроссом Х. С появлением ЭВМ эти методы по инерции переводились на машинный язык, а массовые практические расчеты быстро выявили их ограниченные возможности. ТГЦ – относительно новое межотраслевое 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. С развитием ТГЦ были систематически исследованы вопросы решения систем нелинейных алгебраических уравнений потокораспределения, что привело к разработке обобщенных методов контурных расходов (МКР) и узловых давлений (МД).

Также в литературе встречаются работы, где решаются практические задачи на фоне преодоления трудностей применения общих методов ТГЦ при анализе, проектировании и диспетчерском управлении ТПС, транспортирующих сжимаемую среду. Этими вопросами занимались: Немудров А.Г., Черников В.И., Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д., Панкратов В.С., Дубинский А.В., Сиперштейн Б.И. Ионин А.А., Корельштейн Л.Б., Левин А.А., Сарданашвили С.А. и др. Рассматривались проблемы моделирования магистральных газопроводов, пароводяных трактов энергетических установок, ТПС технологического назначения и др., где утверждалось, что классические методы ТГЦ для расчета потокораспределения в таких случаях неприменимы. Для этих и других случаев в ТГЦ была разработана универсальная методика вложенных циклов итераций. Однако эффективности данной методики было не достаточно и потому упомянутые авторы занимались разработкой собственных методов, которые сводятся либо к этой методике, либо предполагают увеличение размерности решаемой системы уравнений относительно давлений и расходов одновременно.

К настоящему времени существует множество ПВК с разным набором возможностей и спецификой применения: «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)» и др. 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. 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 возможностей моделирования невозможно осуществить 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.

Использование программных сред общего назначения (с точки зрения

областей возможного применения) таких как геоинформационные системы, системы автоматизированного проектирования и SCADA-системы для разработки ПВК не является лучшим решением. Это связано с необходимостью выполнения самостоятельной и трудоемкой работы по оснащению их средствами моделирования ТПС, их широкие средства управления графической моделью реального объекта зачастую остаются не востребованными, а их высокая начальная стоимость увеличивает конечную цену ПВК и т.д.

В сфере ИТ существуют способы реализации расширяемых приложений, что потенциально дает возможность однократной разработки методов и моделей и последующем их развитии без перепрограммирования и существенных трудозатрат. Современный подход к разработке большинства программ основан на объектно-ориентированном программировании (ООП) и его базовых принципах: наследование, полиморфизм, инкапсуляция и абстракция. Технология ООП предоставляет универсальный инструмент объектного представления предметной области, но не дает рекомендаций о том, как разделить конкретную область и на какие объекты (сущности). В области ИТ для разработки сложных программ применяется концепция ООМ, опирающаяся на ООП, где центральной методикой разработки ПВК выступает его декомпозиция на функциональные объекты. В литературе подробно рассматриваются идеи подхода ООМ, но, к сожалению, на конкретных примерах разработки программ, тогда как методика применения ООМ для произвольного случая отсутствует. Это связано с принципиальными отличиями сфер возможного применения этого подхода. Применение концепции ООМ для моделирования ТПС должно опираться на физический объект моделирования – ТПС, как совокупность оборудования, каждое из которых имеет свою математическую модель, что вместе с законами баланса материи и энергии составляет, например, модель потокораспределения в ГЦ.

Такой подход находит всё большее применение, например, в области моделирования газотранспортных систем (Сарданашвили С.А.), когда ТПС представляется набором объектов и компонент, каждый из которых отвечает только за конкретный моделируемый элемент: труба, компрессор, привод и т.д., каждый из которых обеспечивает взаимодействие только с инцидентными ему объектами, а их совокупность формирует единую взаимосвязанную модель ТПС. С помощью этих базовых объектов можно формировать модель региональной, магистральной или распределительной газотранспортной системы, что позволяет исключить дублирование программных компонент. Другой пример (Корельштейн Л.Б.) использования ООМ для ТПС демонстрирует структуризацию объектов на базе иерархии 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, что также позволяет упростить развитие конечных ПВК.

В целом, для реализации объектов по концепции ООМ ГЦ применимы технологии: 1) DLL – 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, а также дает возможность разделения программы на более мелкие составляющие (компоненты) и последующего их применения, в том числе, в других программах; 2) D-Bus, COM, DCOM, вариации Remote Procedure Call (RPC) (Routix.RPC, JSON.RPC, XML.RPC и т.д.), CORBA и др. – обеспечивают взаимодействие компонент в различных системных условиях; 3) архитектура «клиент-сервер» – позволяет развивать распределенные части ПВК независимо друг от друга; 4) базы данных, ADO, ADO.NET – обеспечивают структуризацию, хранение и выдачу информации, например, в виде параметров по элементам ТПС.

Во второй главе «Разработка и обоснование принципов ООМ ГЦ на примере задач потокораспределения» формулируются требования к новым реализациям методов ТГЦ, рассматриваются возможности, получаемые при разработке ПВК в новых условиях, предлагаются объектно-ориентированные модели элементов ТПС, вводятся и обосновываются основные 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.

К числу наиболее важных требований к новому поколению ПВК, реализующих методы ТГЦ, в диссертации предъявляются следующие: 1) развиваемость – возможность использования более совершенных методов решения традиционных задач без репрограммирования существующих ПВК; 2) расширяемость – возможность быстрой интеграции методов решения новых задач в существующие ПВК; 3) масштабируемость – возможность применения существующих реализаций методов ТГЦ в других ПВК для их адаптации под новые типы ТПС; 4) языковая независимость – возможность использования отдельных компонент в ПВК, разработанных разными специалистами на разных языках программирования; 5) сопровождаемость – возможность замены одного компонента ПВК без recompilation другого; 6) открытость – возможность применения однотипных компонент для создания новых или поддержки существующих ПВК.

Предлагаемая в работе концепция ООМ ГЦ дает возможность удовлетворить этим требованиям путем отделения общих методов ТГЦ для расчета потокораспределения от специфики соотношений, описывающих законы течения среды по отдельным элементам в разные объекты.

Традиционная модель установившегося изотермического потокораспределения в ГЦ имеет вид

$$Ax = Q, \bar{A}^T \bar{P} = y, y = f(x), \quad (1)$$

где \bar{A} – $(m \times n)$ -матрица инцидентностей 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 ; матрица A получена из \bar{A} вычеркиванием строки m ; x, y – n -мерные векторы расходов и перепадов давления на ветвях

расчетной схемы; $f(x)$ – n -мерная вектор-функция с элементами $f_i(x_i)$, $i = \overline{1, n}$, отражающими зависимость 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 – соединяет ветви; $\overline{P} = \{P, P_m\}$; P – $(m-1)$ -мерный вектор узловых давлений.

Задача гидравлического расчета 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 P_m .

Известны многочисленные методы и алгоритмы решения данной задачи, однако в ТГЦ базовыми являются МД и МКР. Оба основаны на методе Ньютона, но с предварительным понижением порядка линеаризованной системы уравнений (1).

Базовый МД предполагает поиск решения (1) в пространстве узловых давлений и сводится к организации процесса $P^{k+1} = P^k + \Delta P^k$, на k -й итерации которого поправка ΔP^k отыскивается путем решения системы уравнений $A(f'_x)^{-1} A^T \Delta P^k = -u_1^k$, где $u_1^k = Ax^k - Q$; $x^k = \psi(y^k)$; $y^k = \overline{A}^T \overline{P}^k$; 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 $\psi_i(y_i)$.

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

Абстрагировать модель (1) от замыкающих соотношений на уровне их реализаций возможно, например, с помощью программных объектов. Выделим метод расчета потокораспределения в самостоятельный объект «Модель сети», а законы течения в объект «Модели элементов». В понимании ООП, свойствами объекта «Модель сети» будут: количество участков, топология их соединения и граничные условия, характеризующие режим работы ГЦ (расходы, давления). Внутренние методы этого объекта должны обеспечивать расчет потокораспределения общими методами ТГЦ по заданным свойствам расчетных объектов. Свойствами объекта «Модели элементов» будут служить параметры моделируемого оборудования (внутренний диаметр, материал изготовления, длина, тип покрытия и др.), а внутренние методы отвечать за расчет отдельно взятого i -элемента: $f_i(x_i)$, $\psi_i(y_i)$, $\partial f_i / \partial x_i$. Тогда весь процесс расчета потокораспределения будет сводиться к параметризации свойств объектов «Модель сети» и «Модели элементов» с помощью исходной информации по ГЦ и взаимодействию этих объектов в контексте решаемой задачи (рисунок 2). В результате, метод расчета не будет зависеть от особенностей моделирования элементов ТПС, взаимодействие с которыми будет ограничено обменом исходными данными и результатами вычислений. Такой объектно-ориентированный подход позволит моделировать любой

тип ТПС, оперируя только составом замыкающих соотношений в объекте «Модели элементов», используя независимые методы потокораспределения объекта «Модель сети», что и составляет суть ООМ ГЦ. Выделим основные положения этой концепции:

1) отделение специфики ТПС от общих методов их моделирования;
2) объекты ПВК – реальные объекты (сеть, элементы), а не условные «сущности» программы;

3) основными критериями являются эффективность (многократность) использования 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.

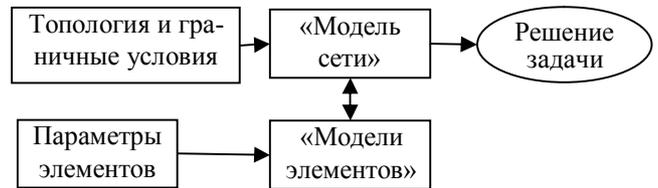


Рисунок 2. Взаимодействие объектов при решении задачи.

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 оборудования в рамках назначения, что требует конкретной математической модели; различные условия работы, влияющие на вид этих моделей; большое количество отраслевых стандартов (СНиП, СТО, ТУ), регламентирующих применение конкретных моделей в каждой области.

В диссертации все основные виды замыкающих соотношений (законов течения) сводятся к трем типам: традиционные; неявные по расходу; зависимые от давления. Рассмотрим каждый тип на примере его классических представителей. Далее формулы приводятся без индекса элементов.

Традиционная модель потери давления на участке трубопровода (турбулентный режим) имеет вид $f(x) = s|x|x - Y$, где s, Y – гидравлическое сопротивление ветви и действующий напор, соответственно, рассматриваются как заданные коэффициенты, причем $Y > 0$ для активных ветвей (моделирующих насосы или насосные станции) и $Y = 0$ для пассивных ветвей (моделирующих трубопроводные участки). Здесь имеем явные выражения $\partial f / \partial x = 2s|x|$, $\psi(y) = \sqrt{|y + Y|/s} \cdot \text{sign}(y + Y)$. Это соотношение является следствием известной формулы Дарси-Вейсбаха для потери напора в трубопроводе $h = \lambda l V^2 / (2dg)$, где λ, d, l – коэффициент гидравлического сопротивления трению, внутренний диаметр и длина трубопровода, (м); g – ускорение свободного падения, (м/с²); $V = V(x)$ – скорость течения жидкости, (м/с); x – массовый расход, (кг/с); $y = \rho gh$; ρ – плотность транспортируемой среды, (кг/м³); $s = \lambda 8l / (\rho \pi^2 d^5)$ – гидравлическое сопротивление ветви, так как $V = 4x / (\pi d^2 \rho)$.

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

$$f(x) = s(x) |x| x, \quad (2)$$

где $s(x) = \lambda(x) 8l / (\rho \pi^2 d^5)$ – сопротивление ветви, а с наличием местных сопротивлений (включая регулируемые) на трубопроводе произвольного типа, для i -й пассивной ветви ГЦ можно записать $s(x) = 8l(\lambda(x) + \zeta^\Sigma d / l) / (\rho \pi^2 d^5)$; ζ^Σ – сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ зависит от числа Рейнольдса $Re(V) = Vd / \nu$, где ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, который для изотермического течения полагается равным константе. 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.

Ранее случаи типа (2) относились к классу ГЦ с переменными параметрами, для которых при расчете потокораспределения применима методика двойных циклов итераций. Согласно этой методике, $s(x)$ пересчитывается на внешнем цикле, а на внутреннем применяются базовые МД или МКР при фиксированных значениях s .

Следующий случай – соотношения зависящие от давления, которые возникают при невозможности сведения гидравлических характеристик элементов ТПС к традиционному виду $y = f(x)$. Например, характеристика газоперекачивающего агрегата (ГПА) связывает не разность, а отношение давлений (степень сжатия) $\varepsilon = p_H / p_K$ (где p_H, p_K – величины давления до и после ГПА) с объемным расходом. Наиболее простой аналитический вид этой характеристики

$$\varphi(p_H, p_K, x) = \beta_0 p_H |p_H| - p_K |p_K| - \beta_2 x |x| = 0, \quad (3)$$

и более сложный

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

где β_i – коэффициенты, полученные путем аппроксимации паспортной характеристики ГПА при ε^2 , $t = \overline{0..2}$; x – производительность, отнесенная к условиям входа.

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

$$\varphi(p_H, p_K, x) = 0, \quad (5)$$

где p_H, p_K – n -мерные векторы давлений, соответственно, в начале и конце ветвей ГЦ. Так как $y = p_H - p_K$, то вместо $y = f(x)$ имеем

$$p_H - p_K - f(x) = \varphi(p_H, p_K, x) = 0. \quad (6)$$

Для получения единственного решения задачи потокораспределения необходимо соблюдение требования монотонности замыкающих соотношений, что эквивалентно условиям

$$\partial x / \partial p_H > 0, \quad \partial x / \partial p_K < 0 \quad (7)$$

на всей области определения функций (5).

Согласно концепции ООМ ГЦ для решения задач потокораспределения объект «Модели элементов» должен обеспечивать вычисление f'_x , y по x и x по y . Как отмечалось, это реализуется с помощью внутренних методов объекта. Однако для соотношений, зависящих от давления, необходимо также предусмотреть методы вычисления x по p_H, p_K и производных $\partial x / \partial p_H, \partial x / \partial p_K$.

Поиск расхода x_i^k по заданному перепаду давлений y_i^k из $\psi_i(y_i)$ в случае неявных функций может быть выполнен итерационно, например, с помощью методов простой итерации или Ньютона.

Получение f'_x в этом случае выполняется $\partial f / \partial x = (2s + s'_x x) |x|$, где $s'_x = ds / dx = ds / d\lambda \cdot dV / dx \cdot d\lambda / dV$, $ds / d\lambda = 8l / (\rho \pi^2 d^5)$, $dV / dx = 4 / (\pi d^2 \rho)$. Таким образом, получение f'_x для трубопровода произвольного типа и назначения требует лишь конкретизации λ'_V (приведено в работе) и позволяет избежать внешнего итерационного цикла, что сокращает вычислительные затраты при неизменной вычислительной схеме МД и МКР [1].

Для нахождения x_i^k по заданным давлениям в соотношениях (3), (4) применимы конечные формулы, приведенные в работе.

Обобщение методов расчета потокораспределения. Модифицированный метод узловых давлений (ММД) [2] обобщает МД для соотношений (5) и обеспечивает поиск решения в пространстве только узловых давлений на базе следующей модификации исходной модели потокораспределения (1)

$$Ax = Q, p_H = \bar{A}_H^T \bar{P}, p_K = -\bar{A}_K^T \bar{P}, \varphi(p_H, p_K, x) = 0, \quad (8)$$

где \bar{A}_H, \bar{A}_K – матрицы инцидентности, фиксирующие отдельно начальные и конечные узлы ветвей так, что $\bar{A}_H + \bar{A}_K = \bar{A}$ и $A_H + A_K = A$; $\varphi(\bar{p}_H, \bar{p}_K, x)$ – вектор-функция с компонентами $\varphi_i(p_{H,i}, p_{K,i}, x_i)$, $i = \overline{1, n}$, отражающими произвольные законы течения.

Пусть на k -й итерации имеется определенное значение $\bar{P}^k = \{P^k, P_m\}$, которому можно поставить в соответствие значения $p_H^k = \bar{A}_H^T \bar{P}^k$, $p_K^k = -\bar{A}_K^T \bar{P}^k$, а также значение x^k , удовлетворяющее уравнению $\varphi(p_H^k, p_K^k, x^k) = 0$.

Линеаризация уравнений (8) дает

$$A \Delta x^k = -u_1^k, \quad (9)$$

$$\Delta p_H^k = \bar{A}_H^T \Delta \bar{P}^k, \quad \Delta p_K^k = -\bar{A}_K^T \Delta \bar{P}^k, \quad (10)$$

$$\varphi'_{P_H} \Delta p_H^k + \varphi'_{P_K} \Delta p_K^k + \varphi'_x \Delta x^k = 0, \quad (11)$$

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

Выразим Δx^k из (11): $\Delta x^k = -(\varphi'_x)^{-1} (\varphi'_{P_H} \Delta p_H^k + \varphi'_{P_K} \Delta p_K^k)$. С учетом (10), а также того, что $\Delta P_m = 0$ получим

$$\Delta x^k = -(\varphi'_x)^{-1} (\varphi'_{P_H} A_H^T - \varphi'_{P_K} A_K^T) \Delta P^k. \quad (12)$$

Подстановка (12) в (9) дает

$$A(\varphi'_x)^{-1}(\varphi'_{P_H} A_H^T - \varphi'_{P_K} A_K^T) \Delta P^k = u_1^k. \quad (13)$$

По правилам дифференцирования неявных функций

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

Отсюда $x'_{P_H} = -(\varphi'_x)^{-1} \varphi'_{P_H}$, $x'_{P_K} = -(\varphi'_x)^{-1} \varphi'_{P_K}$ – диагональные матрицы частных производных порядка n . Тогда систему (13) 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.

Введенная модель (8) включает (6) как частный случай. В случае использования традиционных замыкающих соотношений ММД совпадает с базовым МД. Приведем сопоставление вычислительных схем МД и ММД (таблица 1), где подчеркнуты выражения, зависящие от специфики замыкающих соотношений. Примеры выражений для x'_{P_H} , x'_{P_K} по всем типам соотношений представлены в работе.

Таблица 1. Этапы одной итерации работы алгоритмов МД и его модифицированного аналога.

№	Шаг	Формула по алгоритму	
		базовому	Модифицированному
1	Задано некоторое приближение к решению по давлениям (P^k)	–	–
2	Вычисление вектора расходов (x^k) из	$\bar{A}^T \bar{P}^k - \underline{f}(x^k) = 0$	$\underline{\varphi}(P^k, x^k) = 0$
3	Вычисление вектора невязок	$u_1^k = Ax^k - Q$, если $\ u_1^k\ < \sigma_1$, 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_1 – заданная точность соблюдения небалансов расходов в узлах.

Классический МД основан на итерационной формуле, которая не предполагает регулировку длины шага. При этом процесс сходимости часто не является монотонным и не всегда позволяет найти решение за приемлемое число итераций. В связи с этим оказалось эффективным и надежным для поиска длины шага (δ^k) применение метода золотого сечения.

Модифицированный метод контурных расходов (ММКР) обобщает МКР для соотношений (5) и обеспечивает поиск решения в пространстве только контурных расходов. Функциональное понижение порядка модели (8) к пространству контурных расходов сводится к следующим этапам [3].

1. Исключение векторов p_H, p_K из (8)

$$Ax = Q, \quad (14)$$

$$\varphi(\bar{A}_H^T \bar{P} - \bar{A}_K^T \bar{P}, x) = \varphi(P, x) = 0, \quad (15)$$

так как $P_m = const$.

2. Декомпозиция векторов и матриц модели (14), (15) по признаку принадлежности ветвям-хордам (x) и ветвям остовного дерева (d) расчетной схемы ГЦ.

$$A_X x_X + A_D x_D = Q, \quad (16)$$

$$\varphi_X(P, x_X) = 0, \quad (17)$$

$$\varphi_D(P, x_D) = 0. \quad (18)$$

3. Исключение вектора x_D , выраженного из (16) $x_D = A_D^{-1}(Q - A_X x_X)$, что с последующей подстановкой в (18) дает

$$\varphi_X(P, x_X) = 0, \quad (19)$$

$$\varphi_D(P, x_D) = \varphi_D(P, A_D^{-1}(Q - A_X x_X)) = \phi_D(P, x_X) = 0. \quad (20)$$

4. Исключение вектора P , выраженного из (20) как $P = \psi_D(x_X)$, где $\psi(x_X)$ – неявная $(m-1)$ -мерная функция, с последующей подстановкой в (19) дает систему s уравнений относительно s неизвестных компонент вектора x_X ,

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

Введем следующие обозначения:

$$u_1(x) = Ax - Q = 0, \quad (21)$$

$$u_2(p_H, \bar{P}) = p_H - \bar{A}_H^T \bar{P} = 0, \quad (22)$$

$$u_3(p_K, \bar{P}) = p_K + \bar{A}_K^T \bar{P} = 0, \quad (23)$$

$$\varphi(p_H, p_K, x) = 0. \quad (24)$$

Пусть имеется k -е приближение к решению такое, что $u_1^k = 0$, $u_2^k = 0$, $u_3^k = 0$, $\varphi^k = 0$. Линеаризация уравнений (21)–(24) в точке этого приближения дает

$$A \Delta x^k = 0, \quad (25)$$

$$\Delta p_H^k - A_H^T \Delta P^k = 0, \quad (26)$$

$$\Delta p_K^k + A_K^T \Delta P^k = 0, \quad (27)$$

$$\varphi'_{P_H} \Delta p_H^k - \varphi'_{P_K} \Delta p_K^k + \varphi'_x \Delta x^k = -\varphi^k, \quad (28)$$

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

Понижение порядка линеаризованной модели (25)–(28) к пространству контурных расходов сводится к следующим операциям.

1. Исключение векторов $\Delta p_H^k, \Delta p_K^k$ на основе (26), (27) дает

$$A \Delta x^k = 0, \quad \Phi^k \Delta P^k + \varphi'_x \Delta x^k = -\varphi^k, \quad (29)$$

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

2. Декомпозиция векторов и матриц модели (29) дает

$$A_X \Delta x_X^k + A_D \Delta x_D^k = 0, \quad (30)$$

$$\Phi_X^k \Delta P^k + (\varphi'_x)_X \Delta x_X^k = -\varphi_X^k, \quad (31)$$

$$\Phi_D^k \Delta P^k + (\varphi'_x)_D \Delta x_D^k = 0. \quad (32)$$

3. Исключение вектора Δx_D^k . Из (30) имеем $\Delta x_D^k = -A_D^{-1} A_X \Delta x_X^k = B_D^T \Delta x_X^k$. Тогда вме-

сто (32) получим

$$\Phi_{\text{д}}^k \Delta P^k + (\varphi'_x)_{\text{д}} B_{\text{д}}^T \Delta x_{\text{х}}^k = 0. \quad (33)$$

4. Выразим ΔP^k из (33) $\Delta P^k = -(\Phi_{\text{д}}^k)^{-1} (\varphi'_x)_{\text{д}} B_{\text{д}}^T \Delta x_{\text{х}}^k$. Подстановка этого выражения в (31) дает искомую линеаризованную контурную модель $[(\varphi'_x)_{\text{х}} - \Phi_{\text{х}}^k (\Phi_{\text{д}}^k)^{-1} (\varphi'_x)_{\text{д}} B_{\text{д}}^T] \Delta x_{\text{х}}^k = -\varphi_{\text{х}}^k$.

В случае использования традиционных замыкающих соотношений ММКР полностью совпадает с базовым МКР. В таблице 2 приведен алгоритм одной итерации ММКР в сопоставлении с МКР. Примеры производных, применяемых при составлении системы уравнений в алгоритме ММКР, рассмотрены в работе.

Таблица 2. Алгоритмы классического и модифицированного МКР.

№	Шаг	Формула по алгоритму	
		базовому	модифицированному
1	Имеется некоторое приближение по x^k , при котором	$u_1^k = Ax^k - Q = 0$	
2	Вычисление вектора невязок	$\varphi_{\text{х}}^k = B f(x^k)$,	$\varphi_{\text{х}}^k = \varphi_{\text{х}}(P^k, x_{\text{х}}^k)$, где P^k удовлетворяет $\varphi_{\text{д}}(P^k, x_{\text{д}}^k) = 0$,
		если $\ \varphi_{\text{х}}^k\ < \sigma_2$ – расчет закончен.	
3	Решение системы уравнений	$(B f'_x B^T) \Delta x_{\text{х}}^k = -\varphi_{\text{х}}^k$	$[(\varphi'_x)_{\text{х}} - \Phi_{\text{х}}^k (\Phi_{\text{д}}^k)^{-1} (\varphi'_x)_{\text{д}} B_{\text{д}}^T] \Delta x_{\text{х}}^k = -\varphi_{\text{х}}^k$
4	Вычисление нового приближения	$x^{k+1} = x^k + B^T \Delta x_{\text{х}}^k$	

Обозначения: σ_2 – заданная точность соблюдения небалансов перепадов давлений в контурах.

В третьей главе «Механизмы реализации технологии ООМ ГЦ» 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.

Современный ПВК для моделирования ТПС 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 – обеспечивают 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.

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) организация взаимодействия общих методов и моделей элементов ТПС в зависимости от условий расчета.

Разработка компонент независимо друг от друга в рамках единой архитектуры потребует меньших трудозатрат, позволит использовать наиболее подходящие ИТ и языки программирования в каждом конкретном случае, в отличие от разработки по традиционному пути, когда ПВК реализуется одним специалистом в «монолитном» виде. Поэтому, разработка ПВК по концепции ООМ ГЦ потенциально обеспечит его соответствие требованиям, изложенным выше: развитие, расширение, языковая независимость и т.д.

Технология реализации методов ТГЦ сводится к их программированию в виде программных объектов, имеющих внутренние методы, свойства и события (рисунок 3). События применимы, например, для параллельного расчета параметров связей сразу на нескольких вычислительных устройствах, что эффективнее (в случае очень больших схем ТПС), чем последовательный расчет.

Посредством внутренних методов, реализованных в объектах, можно организовать как обмен данными между объектами, 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. Данный процесс должен быть выполнен отдельной программой, ответственной за управление и контроль над расчетными объектами, что позволяет обособить их (абстрагировать) на уровне конкретных реализаций.

Отметим несколько технических преимуществ такого подхода: 1) однократная параметризация объекта «Модели элементов» позволяет сократить количество передаваемых данных (аргументов методов) между объектами в процессе поиска решения; 2) в объект «Модель сети» не загружаются параметры элементов, т.е. обеспечивается полная абстракция к специфике моделируемых элементов на уровне исходных данных; 3) позволяет обособить (абстрагировать) объекты на уровне конкретных реализаций при условии согласования их методов и свойств.

Расширение объекта «Модели элементов» на новые типы элементов без перепрограммирования его компонента возможно следующим алгоритмическим образом. Необходимо реализовать еще один (новый) объект «Модели элементов», либо через наследование классов старого объекта «Модели элементов», либо без наследования, но по технологии СОМ. Новый объект должен реализовывать те же правила взаимодействия с объектом «Модель сети». В старом объекте «Модели элементов» предусмотрен массив отметок, определяющий принадлежность типа элемента к старому или новому объекту и, на основании этих отметок, реализован следующий алгоритм: 1) выполнение расчета, если элемент принадлежит старому объекту; 2) переадресация выполнения расчета к новому объекту, если указываемый в запросе элемент ему принадлежит. Взаимодействие старого и нового объектов «Модели элементов» также построено на указателях, задаваемых в

соответствии с массивом отметок. Важным аспектом механизма расширения является согласованность индексов элементов между старым и новым объектом. Так реализуется достаточно простой, но эффективный способ неограниченного расширения объекта «Модели элементов».



Рисунок 3. Применение технологии ООМ ГЦ путем разделения на объекты по физическому смыслу.

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. В области применения ПК для моделирования ТПС наиболее распространенной операционной системой (ОС) является «Windows», что заведомо определяет платформу для внедрения. Для этого каждый компонент целесообразно наделять универсальным программным интерфейсом, упрощающим разноязыковое взаимодействие реализаций (С, Basic, Fortran, JavaScript, PHP, и др.) как существующих разработок, так и новых.

С учетом сказанного представляется рациональным применение технологии СОМ («Component Object Model»), обеспечивающей двустороннее взаимодействие программ и компонент по управлению и данным на уровне совместимости интерфейсов в разных языках программирования, в том числе, позволяет разрабатывать промежуточные программы для унаследованного программного обеспечения.

Технология СОМ предполагает, что вызов объекта обеспечивается встроенным в ОС инструментом: 1) на этапе поиска пути к компоненту через реестр ОС по имени объекта, используемого в качестве аргумента, или уникальному номеру «GUID»; 2) на этапе обращения к методам и свойствам объекта по единому независимому от языка разработки механизму. Большинство современных сред разработки программ позволяют генерировать шаблон для создания компонента с СОМ-интерфейсом, что резко упрощает процесс программирования и отладки. К реализованным СОМ-компонентам (например, в

виде DLL-файла) применимы понятия «раннего» и «позднего» связывания для оптимизации функционирования ПВК.

Технология совместного применения моделей элементов ТПС и методов ТГЦ. С целью дальнейшего исключения дублирования среди конечных ПВК и неограниченного расширения арсенала методов расчета объекта «Модель сети» достаточно выделить эти методы в самостоятельные объекты и обеспечить их полиморфное однообразие по свойствам, входным параметрам и возвращаемому результату. Аналогичным образом целесообразно выделить способы поиска начального приближения в объект «Начальное приближение», а методы решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) в объект «Решение СЛАУ».

Объект «Модель сети» обеспечивает выбор оптимального состава, загрузку, параметризацию и контроль над объектами: «Метод расчета», «Начальное приближение», «Решение СЛАУ» и «Модели элементов» с расширениями. Таким образом, целевое назначение этого состава не ограничено только задачей расчета потокораспределения, а ориентированно на применение готовых расчетных объектов при решении разных задач. В работе приводятся диаграммы классов всех разработанных объектов, описание программных интерфейсов их компонент и примеры использования на разных языках программирования.

Последовательность этапов работы объекта «Модель сети» при выполнении расчетной операции: 1) прием и анализ исходных данных по расчетной схеме на наличие ошибок; 2) назначение предпочтительного объекта «Метод расчета» и «Начальное приближение»; 3) параметризация объекта «Модели элементов» и его расширений; 4) передача указателя на объект «Модели элементов» в объект «Начальное приближение» вместе с данными о топологии ГЦ, граничных условиях (нагрузки, давления) и командой на расчет; 5) в процессе расчета объект «Начальное приближение» обращается к объекту «Модели элементов» при формировании СЛАУ, и к объекту «Решение СЛАУ» за ее решением; 6) полученный результат и требуемые данные передаются в объект «Метод расчета»; 7) на каждой итерации метода расчета происходит обращение к объекту «Модели элементов» для вычисления параметров элементов по их порядковому номеру для составления СЛАУ, решение которой обеспечивает объект «Решение СЛАУ»; 8) выдача результата расчета запрашивающей программе.

В четвертой главе «Практическое применение технологии ООМ ГЦ» 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.

Методика описывает применение технологии ООМ ГЦ, предназначенной для отделения программных реализаций общих методов ТГЦ от прикладной специфики предметной области или задачи в сфере ИТ. Методы расчета и оптимизации, разработанные в ТГЦ, применимы в области анализа, синтеза и

управления функционированием ТПС различного типа и назначения. Эта методика имеет общее значение (справедлива не только для задач потокораспределения) и преследует следующую цель – возможность многократного использования реализованного общего метода решения какой-либо задачи в разных ПВК и для разных типов ТПС, и наоборот, – возможность использования альтернативных методов решений одной и той же задачи в 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 ее аналога.

На базе предложенных моделей, методов и технологии ООМ ГЦ разработан ПВК «ИСИГР» (Интернет СИстема для Гидравлических Расчетов), 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. Он может быть полезен проектным и эксплуатационным организациям, научным и исследовательским учреждениям, инженерам, аспирантам и студентам. ПВК имеет интуитивно понятный интерфейс пользователя, современные способы создания и редактирования схемы сети и данных, что сокращает время на обучение и применение.

ПВК основан на клиент-серверной архитектуре и состоит из графического интерфейса, веб-сервера, библиотеки расчетных модулей, базы данных типового оборудования, блока взаимодействия клиентской и серверной частей. Данная архитектура 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 Интернет применяется программа – веб-сервер, установленная на компьютере разработчика – сервере. Такой подход открывает следующие возможности: выполнение вычислений на сервере (пользователям не требуется иметь высокопроизводительные компьютеры); сокращение затрат времени на сопровождение ПВК; отсутствует необходимость в аппаратных ключах; 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 серверной части ПВК (облачные технологии).

Клиентская часть отвечает за пользовательский графический интерфейс, реализованный на Microsoft Silverlight – специальной программной среде, обеспечивающей работу ПВК в веб-обозревателе (Web-browser) (рисунок 4). Компоненты ПВК реализованы на языке С# при использовании .Net Framework.

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, при задании давления в одном или нескольких узлах.

База данных оборудования предназначена для параметризации элементов расчетных схем через интерфейс ПВК. В ней содержится описание сортаментов труб (около 6000 позиций из 20 ГОСТов), характеристик запорной арматуры, насосов и местных сопротивлений.

Пользователи комплекса также имеют возможность добавления параметров оборудования в ее состав. В работе предложены инструменты редактирования этой БД.

Тестирование и практическое применение разработанных моделей, методов и ПВК выполнялось с целью оценки возможностей предлагаемых в работе методов поиска решения задачи потокораспределения по следующим критериям:

- работоспособность (подтверждение сходимости из 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.

Результаты тестирования ММД и ММКР подтвердили их одновременную работоспособность, когда методы сходятся при любом начальном приближении, более высокую эффективность по сравнению с традиционной методикой двойных циклов итераций, и большую универсальность в отношении видов замыкающих соотношений. Тестирование новых методов на сгенерированных схемах ТПС показало отсутствие значительного влияния их размера на количество итераций расчетного процесса. Поиск решения для всех рассмотренных схем ТПС обеспечивался в среднем за 8-12 итераций. Однако общее время счета зависит от размерности и конкретной конфигурации ТПС. Например, ММД размерность системы решаемых уравнений равна $m-1$, а в ММКР – c . Отношение m/c для разных схем ТПС может варьировать в весьма широких пределах.

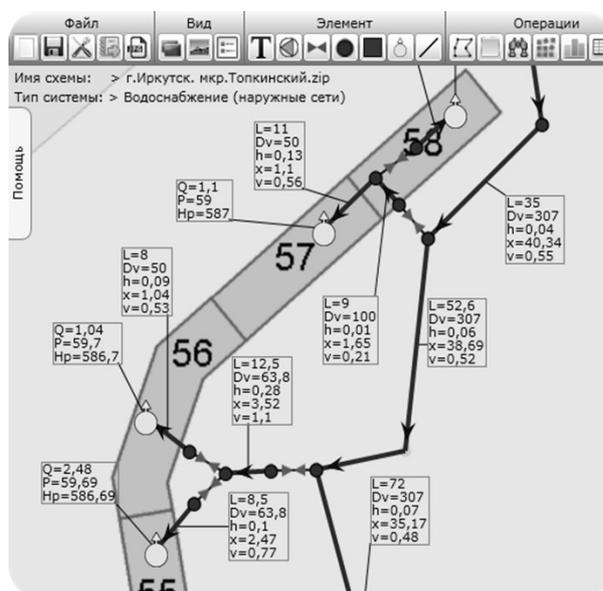


Рисунок 4. Иллюстрация примера схемы.

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 сотнями пользователей из десятков городов России и ближнего зарубежья (рисунок 5). 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 итоге, вычислительные возможности ПВК позволяют выполнять расчет для схем размерностью до 1000 узлов, что соотносится с численностью жителей населенного пункта или района города порядка нескольких десятков тыс. человек. Общее время, затрачиваемое на расчет и передачу данных через Интернет, занимает не более 5 сек.



Рисунок 5. География применения ПВК «ИСИГР».

Основные результаты работы

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 потенциальной общностью этих методов и непроизводительным дублированием работ по их программной реализации и адаптации к прикладной специфике применения.

В диссертации разработана и апробирована на примере задач потокораспределения технология ООМ ГЦ как средство 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 зависящие 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.

Основное содержание работы опубликовано в следующих работах.

1. Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А. Объектно-ориентированное моделирование гидравлических цепей // Вестник ИРГТУ – №7, 2012 – С. 170–176.
2. Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А. Модифицированный метод узловых давлений для расчета потокораспределения в гидравлических цепях при нетрадиционных замыкающих соотношениях // Научно-технические ведомости СПбПУ. – 2 (218) 2015. – 179 с.
3. 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.
4. 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.
 5. 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.
 6. 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 СО РАН; зарегистр. 03.10.2013. – 1 с.
 7. Новицкий Н.Н., Шалагинова З.И., Михайловский Е.А. Объектно-ориентированные модели элементов тепловых пунктов теплоснабжающих систем // Вестник ИРГТУ – №9, 2017 – С. 157–171.
 8. 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.
 9. Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А. Применение объектно-ориентированного моделирования для программной реализации методов теории гидравлических цепей. // Коммунальное хозяйство городов. Серия: технические науки и архитектура. Вып. 103. Харьков – 2012. – С. 520–526. ISSN 0869-1231. п. Кореиз, г. Ялта, АР Крым, Украина, 1-6 октября 2011 г.
 10. 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 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 ИРННТУ, 2015. – Т. 2. – 422 с. – С. 375–380.

14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А. Дистанционное моделирование трубопроводных систем с использованием интернет-технологий. – С. 171–175. // 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.
18. 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 Всерос. 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.
19. Новицкий Н.Н., Алексеев А.В., Михайловский Е.А. Архитектура и принципы разработки нового поколения программных реализаций методов теории гидравлических цепей // Информационных и математические технологии в науке и управлении / 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.
20. Новицкий Н.Н., Алексеев А.В., Михайловский Е.А. Опыт разработки и направления развития интегрированной технологии компьютерного моделирования трубопроводных системы различного назначения // Информационные и математические технологии в науке и управлении / Труды XVI Байкальской Всероссийской конференции «Информационных и математические техноло-

- гии в науке и управлении». Часть I. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. – 252 с. – С. 98 – 107.
21. Алексеев А.В., Михайловский Е.А., Новицкий Н.Н., Токарев В.В. Универсальные информационно-вычислительные технологии для компьютерного моделирования трубопроводных и гидравлических систем // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление // Сб. статей всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление», 1-3 сентября 2015 г., Иркутск, России. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – 591 с. – С. 399–407.
 22. 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.
 23. Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А. Интернет-технология для тестирования и практического применения современных методов моделирования гидравлических цепей / Материалы XVIII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию. г. Иркутск, Россия, 21–25 августа 2017 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. – 112 с.
 24. 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.
 25. Михайловский Е.А. Компьютерное моделирование гидравлических цепей на основе объектного представления их элементов // Системные исследования в энергетике. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. – (Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, вып. 40). – С. 74–83.
 26. 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. – (Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, вып. 41). – С. 39–45.
 27. Михайловский Е.А. Объектно-ориентированное моделирование потокораспределения в гидравлических цепях при неявных замыкающих соотношениях // Системные исследования в энергетике. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2012. – (Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, вып. 42). С. 55–62.

Отпечатано в ИСЭМ СО РАН

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Заказ №140, тираж 100 экз.