На правах рукописи

ЛИПОВКА
Алексей Юрьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ С ИЕРАРХИЧЕСКИМ ПРИНЦИПОМ ПОСТРОЕНИЯ

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2012

Работа выполнена на кафедре «Инженерные системы зданий и сооружений»
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
(г. Красноярск)

Научный руководитель:	доктор технических наук, доцент **Липовка Юрий Львович**
Официальные оппоненты:	**Степанов Сергей Григорьевич** доктор технических наук, ООО «Энерготехнологическая компания Сибтермо», заместитель генерального директора – технический директор
	Бестолченко Владимир Георгиевич кандидат технических наук, ООО «Технологии инженерных систем», директор
Ведущая организация:	**ФГБОУ ВПО Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск**

Защита состоится 23 мая 2012 года в $9^{\underline{30}}$ на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при Сибирском федеральном университете по адресу: г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан 23 апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Чупак Татьяна Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Структура тепловых сетей постоянно усложняется. Если в небольших населенных пунктах – это тупиковые двухтрубные сети, то в городах – это сложные разветвленные и закольцованные инженерные системы, выполненные, как правило, по принципу иерархического построения, предполагающему резервирование источников и магистралей системы теплоснабжения, сохраняя при этом тупиковые распределительные сети с различными схемами присоединения зданий, в том числе, и по открытой схеме, что ведет к дестабилизации гидравлических режимов. И таких, усложняющих расчеты факторов, множество. Гидравлический же расчет является основой всех тепловых и прочностных расчетов тепловых сетей, поскольку корректный выбор диаметров трубопроводов определяет далее разработку конструктивных решений компенсирующих устройств, опор трубопроводов и всех элементов системы теплоснабжения в целом. Таким образом, гидравлический расчет является основой и капиталовложений в тепловую сеть, и эксплуатационных энергетических затрат. Поэтому работы по совершенствованию методов расчета, качества алгоритмов и их программной реализации для проектирования надежных тепловых сетей и улучшения их технико-экономических характеристик актуальны.

Объект исследования – разветвленные закольцованные тепловые сети.

Предмет исследования – гидродинамические характеристики тепловых сетей со сложной иерархической структурой.

Цель работы – совершенствование методов расчета тепловых сетей для экономии энергетических ресурсов и стабилизации гидравлических режимов в тепловых сетях с иерархическим построением путем развития методов и средств компьютерного анализа гидравлической устойчивости инженерных трубопроводных систем.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи:**

− провести анализ методов расчета коэффициента гидравлического трения и на их основе создать уточненную методику;

− уточнить вычислительную схему расчета гидродинамических режимов тепловых сетей с иерархическим принципом построения;

− разработать программно-математический комплекс для расчета гидродинамических режимов тепловых сетей с иерархическим принципом построения и различными схемами присоединения потребителей;

− развить методику нахождения суммарной насосной характеристики с произвольным числом насосов различного типа, включенных в разных узлах, при переменной характеристике гидравлического сопротивления тепловой сети;

− обосновать целесообразность применения различных схем эквивалентирования тепловой сети.

При решении задач исследования были использованы следующие **методы**: Андрияшева–Кросса; контурных расходов и узловых давлений; методы

объектно-ориентированного программирования; современные методы обработки результатов компьютерных расчетов и экспериментальных исследований.

Научная новизна защищаемых в диссертации положений заключается в следующем:

1. Уточнен алгоритм вычисления коэффициента гидравлического трения на всем диапазоне изменений чисел Рейнольдса, эквивалентной шероховатости и диаметров труб, отличающийся от известных методов управляемой степенью точности, обладающий высокой скоростью расчета и использующий разработанный автором механизм кубической аппроксимации переходной области, обеспечивающий плавность и неразрывность функции λ при переходе от ламинарного к турбулентному режиму.

2. Создана компьютерная модель для исследования трубопроводных систем, отличающаяся применением экспресс-анализа и позволяющая уже на стадии предварительного расчета тепловых сетей с иерархическим принципом построения оценивать возможность возникновения нештатных режимов и оперативно изменять конфигурацию, либо параметры их регулирования.

3. В развитие метода увязочных расходов, найдена и обоснована методика эквивалентирования насосных установок и регуляторов расхода, корректирующая внутренние сопротивления активных элементов при обходе контура и вычислении невязки, и уменьшающая требуемое число итераций по сравнению с методикой, использующей внешние циклы.

4. Обоснована методика эквивалентирования активных элементов тепловой сети соответствующей системой узловых расходов, позволяющая значительно сократить время поверочного расчета тепловой сети с иерархическим построением.

Значение для теории. Предложенная методика расчета тепловых сетей с использованием теории графов и других современных методов математического и компьютерного моделирования является развитием теоретических основ разработки и проектирования энергосберегающих тепловых сетей, построенных по иерархическому принципу, и систем теплоснабжения в целом.

Практическая значимость работы и использование результатов работы. Разработанный компьютерно-математический комплекс выводит на экран монитора основные параметры всех элементов тепловой сети и одновременно графически анализирует их гидродинамические режимы, что позволяет быстро проводить многовариантные расчеты без необходимости многократного обращения к анализу табличных данных. Предложенная техника ввода экономит время на обучение работе в программе и позволяет уделять больше внимания процессу создания и редактирования расчетной схемы тепловой сети, что в совокупности способствует выбору оптимальных технических решений.

Создан инструмент для проведения энергетического обследования (энергоаудита) тепловых сетей.

Результаты экспериментальных исследований позволили создать современную методологию проведения лабораторных работ по теплоснабжению,

которую можно использовать в учебном процессе.

Результаты теоретических исследований использованы при написании учебного пособия, имеющего гриф Минобрнауки [14].

Достоверность полученных результатов подтверждена сопоставлением результатов расчета потокораспределения, полученных с помощью сформированной математической модели и созданной компьютерной программы с результатами, полученными в результате использования известных в мировой практике программ расчета тепловых сетей, а также удовлетворительным совпадением результатов компьютерного моделирования с экспериментальными результатами и натурными замерами.

Личный вклад автора состоит в постановке задач, разработке математической модели, алгоритмов и компьютерной программы расчета тепловых сетей, в проведении компьютерных, экспериментальных исследований и натурных замеров.

Апробация работы. Основные результаты исследований были представлены: на ежегодных научно-практических конференциях КГТУ–КрасГАСА–СФУ в 2000-2008 гг.; на V Всероссийской научно–практической конференции «Энергоэффективность: достижения и перспективы» г.Красноярск, 2004; VII, VIII, IX, X Всероссийских научно-практических конференциях «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» г.Красноярск, 2006–2009 гг.; научно–практических семинарах и публичных слушаниях 2000-2012 (г.Красноярск, г.Томск, г.Кодинск, р.п.Емельяново).

Использование результатов работы. Результаты исследований использованы в создании проектов реконструкции кольцевых магистральных и квартальных тепловых сетей г.Красноярска, тепловых сетей и системы водоснабжения жилого массива «Емельяновский посад» р.п.Емельяново, тепловых сетей р.п. Курагино, кольцевой сети водоснабжения г.Нерюнгри, в выполнении Государственного контракта № 02-А-082/11 от 20.12.2011г. «Магистральные тепловые сети, г. Кодинск, Красноярский край».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 2 в рецензируемых журналах по списку ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, научных выводов и рекомендаций, списка литературы из 127 наименований и содержит 132 страницы текста, включая 33 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследований, выделены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первый раздел посвящен анализу проблем, возникающих при использовании известных методов расчета тепловых сетей.

Создание математической модели потокораспределения в тепловых сетях базируется на положениях механики жидкости в трубах.

Вопросам проектирования и реализации программных комплексов,

основанных на использовании сетевых законов и предназначенных для расчета гидравлических режимов сложных разветвленных тепловых сетей с целью повышения их гидравлической устойчивости посвящены работы В.Я. Хасилева, А.П. Меренкова, Б.М. Кагановича, О.А. Балышева, И.С. Квасова, М.Я. Панова, Н.Н. Новицкого, В.А. Стенникова, В.Р. Чупина, А.В. Алексеева, С.Ю. Баринова, В.В. Токарева, С.П. Епифанова, В.И. Зоркальцева, Е.Д. Балуева и других.

На основании анализа известных методов расчета гидравлических режимов тепловых сетей выявлены их преимущества и недостатки, выбраны наиболее приемлемые методы для исследований потокораспределения в пространственных закольцованных цепях.

Рассмотрены наиболее известные компьютерные программы гидравлического расчета ИСЭМ СО РАН ИВС Ангара, ИВЦ Поток ИГС CityCom, ООО Политерм ГИС Zulu, НТП Трубопровод Гидросистема, EPA EPANET, NCSS PASS, Piping Systems FluidFlow, PSE gPROMS, Sunrise PIPENET Vision, UKTN TNflow, PipeFlow Expert.

Проведенный анализ позволил конкретизировать цель и сформулировать задачи дальнейших исследований.

Во **втором разделе** представлены результаты математического моделирования тепловых сетей, учитывающих особенности иерархического принципа построения.

Для анализа поведения потоков теплоносителя в тепловых сетях сформирована математическая модель, учитывающая особенности расчета кольцевых сетей, спроектированных по принципу иерархического построения, и включающая первый сетевой закон потокораспределения (1) с условиями целостности системы (2), второй сетевой закон (3) и замыкающее уравнение – формулу Дарси–Вейсбаха (4).

$$\sum_{j} G_i = G_{nd_j}, \quad j = 1, \dots, m \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^{m} G_{nd_j} = 0, \quad j = 1, \dots, m \tag{2}$$

$$\sum_{c} \Delta P_i = 0, \quad c = 1, \dots, k \tag{3}$$

$$\Delta P_i = \left(\lambda_i \cdot \frac{l_i}{d_i} + \sum_{i} \xi\right) \cdot \frac{\omega_i^2}{2} \cdot \rho_i, \quad i = 1, \dots, n \tag{4}$$

где $\sum_j G_i$ – алгебраическая сумма расходов по всем участкам цепи, имеющим общий узел j; G_{nd_j} – расход в узле, задаваемый из условия целостности системы (2); $\sum_c \Delta P_i$ – суммарное изменение потерь давления ΔP_i для любого контура c из k контуров схемы; λ_i – коэффициент гидравлического трения на i участке; l_i, d_i, ω_i, ρ_i и $\sum_i \xi$ – длина, диаметр, скорость, плотность и сумма коэффициентов местных сопротивлений на i участке.

Математическая модель (1)–(4) дополнена уточненными зависимостями:

$$\lambda = f_{\lambda}(Re, k_{э}, d_{вн}) \quad (5)$$

$$Re = f_{Re}(\omega, d_{вн}, \nu) \quad (6)$$

$$\nu = f_{\nu}(t) \quad (7)$$

$$\rho = f_{\rho}(t, P) \quad (8)$$

Сетевая специфика модели опирается на основные положения теории графов и элементы комбинаторной топологии.

Выполненный сравнительный анализ существующих формул для нахождения λ однозначно позволил остановиться для дальнейших исследований на очень точном методе решения уравнения Кольбрука–Уайта, полученном Дидье Кламоном, при котором точность результата после двух итераций сопоставима с погрешностью компьютерного типа данных *double*.

В работе сформулирована методика вычисления коэффициента гидравлического трения λ на всем диапазоне изменений чисел Рейнольдса, эквивалентной шероховатости и диаметров труб. Предложенная уточненная кубическая аппроксимация обеспечивает плавность и неразрывность функции коэффициента гидравлического трения при переходе от ламинарного к турбулентному режиму (рис. 1).

Кинематическая вязкость ν вычисляется по формуле Пуазейля.

Плотность воды ρ вычисляется согласно МИ 2412-97.

Предложен общий подход к моделированию активных элементов применительно к итеративным методам гидравлического расчета. Активный элемент тепловой сети изменяет свои термогидравлические параметры в зависимости от характеристик сети в точке подключения. Математическое моделирование активного элемента сводится к разработке внутренней функции, которая корректирует собственные параметры элемента в процессе итеративной увязки общего гидравлического режима.

Рассмотрено математическое моделирование насосной установки, регулятора расхода и потребителя теплоты. Выполнены численные эксперименты по определению рабочей точки тепловой сети с переменным гидравлическим сопротивлением с двумя различными насосными установками, включенными параллельно (рис. 2) и последовательно (рис. 3).

Разработана и обоснована методика *упрощенного* эквивалентирования активных элементов тепловой сети соответствующей системой узловых расходов, позволяющая на порядок сократить время расчета тепловой сети с иерархическим построением для обеспечения расчетного потокораспределения. Для анализа фактического потокораспределения, гидравлической устойчивости и надежности системы теплоснабжения следует применять *полное* эквивалентирование.

Выполнен численный эксперимент: для модели №1 время счета при *полном* эквивалентировании составляет 0:01:51:167 (ч:м:с:мс), при *упрощенном* – 0:00:01:166; для модели №2 при *полном* эквивалентировании – 2:57:27:994, при *упрощенном* – 0:03:58:147, т. е. время расчета существенно сокращается. При этом следует отметить, что, если после предварительного расчета с *упрощенным* эквивалентированием на каждом абоненте и каждом регуляторе расхода будет положительный напор, результаты дальнейшего расчета при *полном* эквивалентировании будут идентичными. В случае же, если на некоторых абонентах (регуляторах расхода) располагаемый напор будет отрицательным, реальное потораспределение покажет расчет увязочным методом при *полном* эквивалентировании.

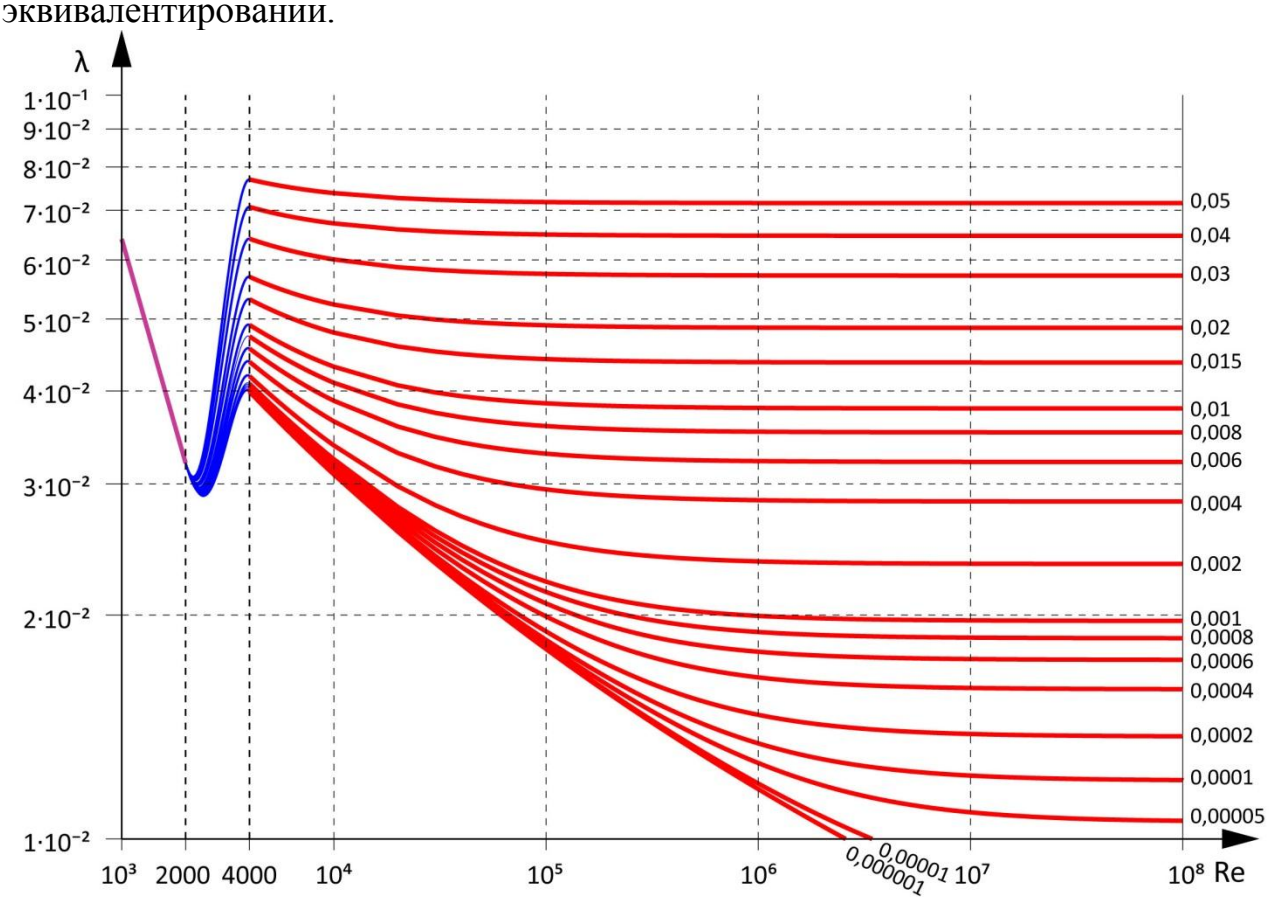

Рисунок 1 – Иллюстрация программного построения коэффициента гидравлического трения λ

Формирование работоспособной тепловой сети с допустимыми параметрами давлений и расходов следует производить *упрощенным* методом до тех пор, пока на всех абонентах (регуляторах расхода) не будет обеспечен положительный располагаемый напор. Расчет абонентов (регуляторов расхода) с *полным* эквивалентированием оправдан только в случае экспертизы потокораспределения при существующих условиях, когда мероприятия по наладке невозможны.

При упрощенном подходе к расчету гидравлических систем работоспособность определяется отсутствием проблемных узлов и участков в математической модели, т.е. отсутствием отрицательных перепадов у

потребителей и на регуляторах расхода, отсутствием отрицательных узловых давлений. Упрощенный подход позволяет многократно увеличить количество численных экспериментов в единицу времени по разработке мероприятий наладки и развития системы теплоснабжения и проверке альтернативных вариантов трассировки тепловых сетей.

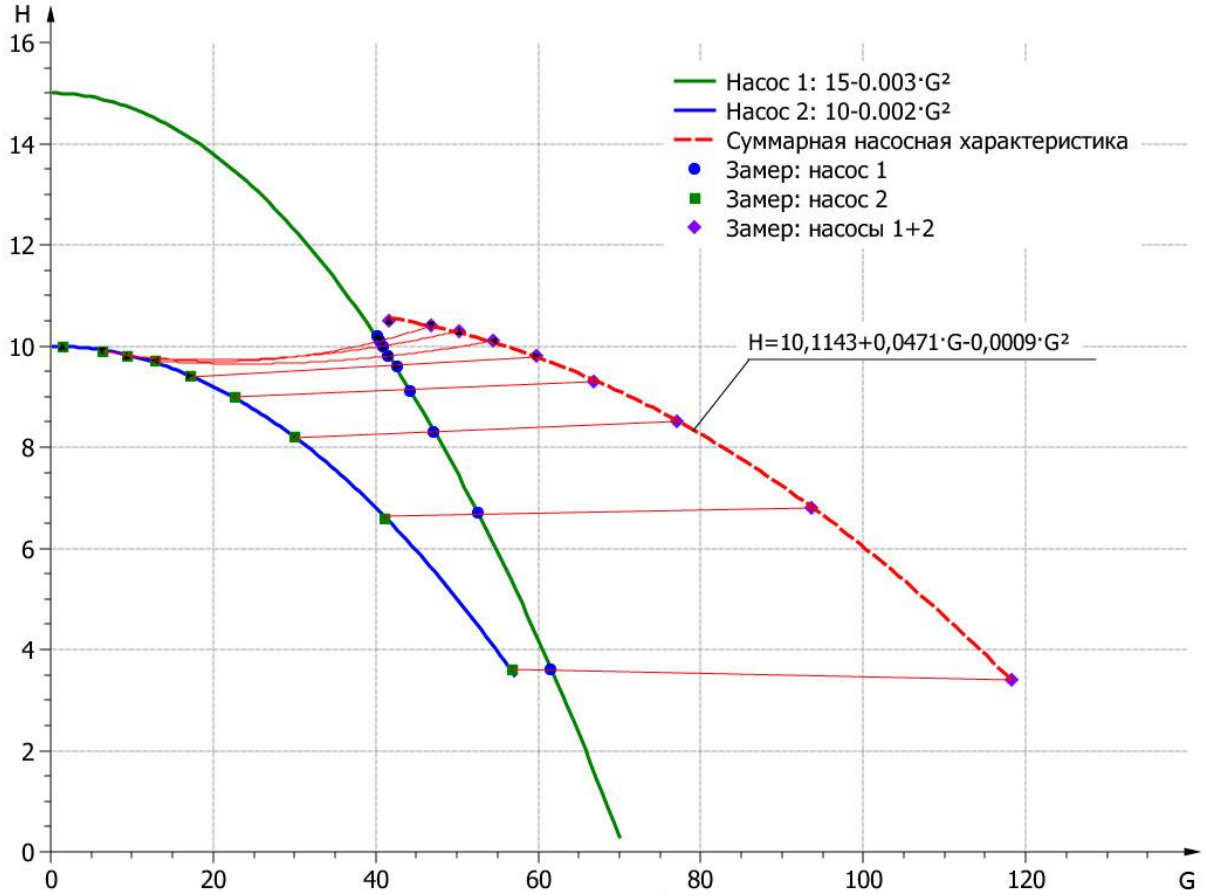

Рисунок 2 – Результаты численного эксперимента по моделированию параллельной работы двух насосов различных типов

Предложено понятие «сверхориентированного» графа на основе комбинации теории графов и комбинаторной топологии. Научно обоснована целесообразность его применения для эквивалентирования тепловых сетей с активными элементами. Введено понятие матрицы «сверхинциденций» для его представления и хранения.

Задача расчета потокораспределения в теплосетях сводится к определению расходов теплоносителя на каждом расчетном участке G_i и давлений в каждом узле P_J. Перед вычислением расчетных расходов сетевой воды G_i выполняется вычисление температурного графика тепловой сети. Температурный график тепловой сети распределяется по дереву сети с учетом смесительных установок. В результате вычисляется температурный перепад у каждого потребителя, зная который, можно вычислить расход сетевой воды на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение.

Обоснована методика гидравлического расчета, обеспечивающая единство ввода, хранения и представления исходных и расчетных данных.

Третий раздел диссертации посвящен разработке компьютерно-математического комплекса (КМК), созданного для расчета гидравлических режимов систем теплоснабжения с иерархическим принципом построения в среде программирования Visual C++.

Особенностью программы является возможность формировать тепловые сети с иерархическим принципом построения произвольной конфигурации и сложности из простейших элементов – таких, как разветвитель потоков, участок трубопровода, насосная установка, постоянное и переменное гидравлические сопротивления, узловой расход. При этом регуляторы расхода (перепада давления) моделируются переменным гидравлическим сопротивлением. Комбинация насосов, регуляторов расхода и сопротивлений открывает возможности формализации всех видов и способов регулирования тепловой нагрузки.

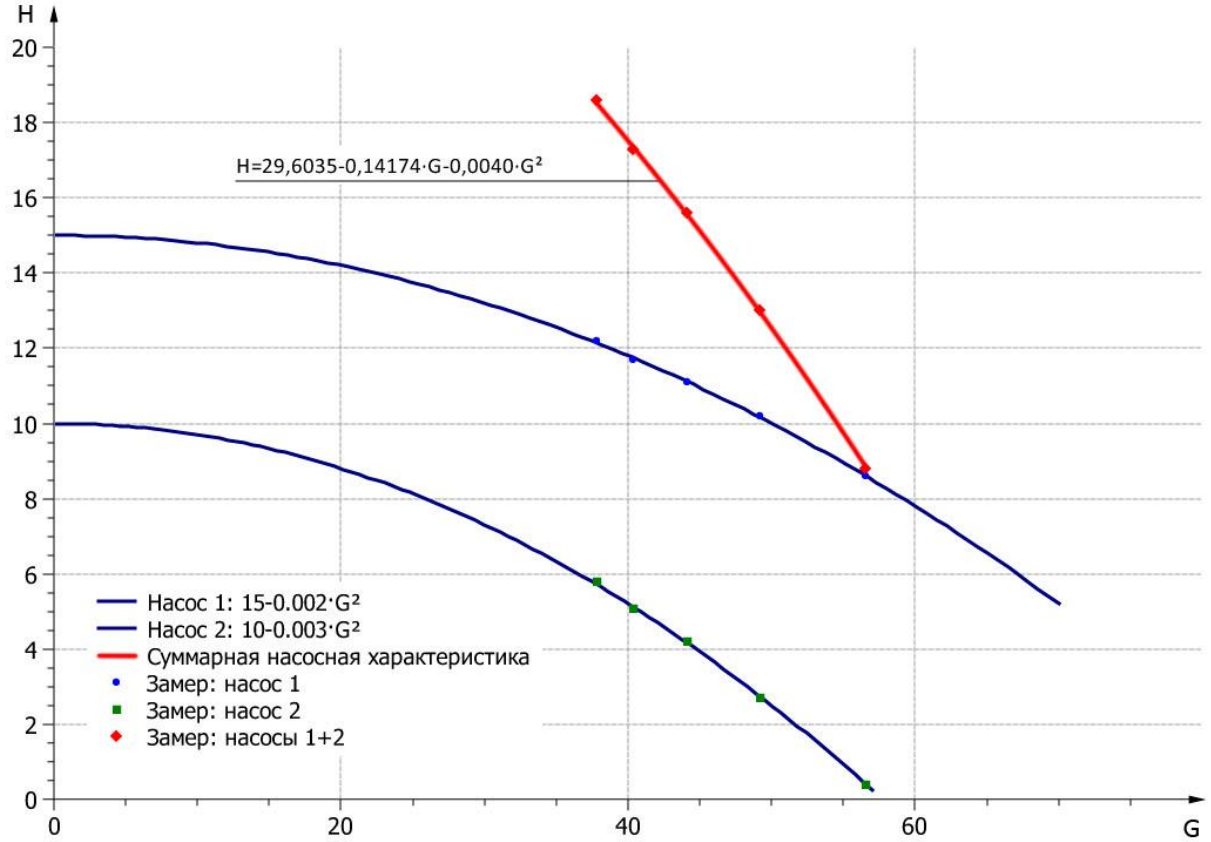

Рисунок 3 – Результаты численного эксперимента по моделированию последовательной работы двух насосов различных типов

Каждый функциональный элемент тепловой сети представлен отдельным классом, формализующим его специфику. Гидравлическая сеть произвольной сложности эквивалентируется набором простейших элементов. Для представления тепловой сети с иерархическим принципом построения созданы дополнительные классы-надстройки со специфическими функциями, упрощающими работу с системой.

В памяти компьютера тепловая сеть хранится в форме динамического графа на указателях. Особенностью программы является то, что вершинами

графа являются все элементы тепловой сети, включая участки трубопровода, тогда как безвесовыми ребрами являются связи между элементами – указатели. Такое представление позволило унифицировать топологические методы, в то же время на экране пользователь видит все тот же привычный граф: вершины в качестве точечных элементов и ребра в качестве участков тепловой сети.

Хранение самого графа в памяти компьютера опирается на основные положения комбинаторной топологии. Элементы тепловой сети хранятся в отдельных связных списках, соответствующих различным типам элементов (узлы, участки, насосы и т.д.). Связи между отдельными элементами различных списков описывают отдельные графы тепловой сети. Этот подход позволяет моделировать произвольное количество независимых гидравлических систем в пределах одного файла.

Принятый в работе комбинаторно-топологический подход к представлению графа позволяет легко реализовывать обход графа «в глубину» и «в ширину».

Разработаны модифицированные версии функции построения дерева сети, которые позволяют принудительно задавать критерий остановки (например, строить дерево только до потребителей), а также позволяют строить особые формы дерева, которые допускают множественное вхождение определенных элементов в одно и то же дерево. В качестве примера, можно привести функцию для распределения заданной температуры по графу тепловой сети. В этом случае дерево строится от источника теплоты в двух направлениях – по подающей магистрали и по обратной; построение в каждом направлении завершается потребителем теплоты так, что каждый потребитель входит в дерево два раза. При обходе этого дерева с целью распределения температур до потребителя доходят два значения температур – в подающей магистрали и в обратной, что определяет температурный график конкретного потребителя, на основе которого уже вычисляются расчетные расходы теплоносителя.

Автором разработан и реализован алгоритм автоматического нахождения системы независимых контуров. В результате за один глубокий обход графа автоматически находится вся система независимых контуров, требуемая для дальнейших вычислений увязочным методом.

Используемые для ввода и вывода данных единицы измерения можно изменять в любой момент простым выбором из выпадающего списка на панели инструментов.

Особенностью программы, отличающей её от аналогов, является то, что рядом с каждым элементом тепловой сети всегда выводится его режимная характеристика, состав информации которой зависит от типа элемента и включает основные исходные и расчетные данные.

КМК JA_Net позволяет найти оптимальную тепловую нагрузку второго иерархического уровня, что, по существу, обеспечивает экономически целесообразный выбор мощности центрального теплового пункта, являющегося точкой разделения резервируемого (первого) и нерезервируемого (второго) уровней. Пример выдачи расчета гидравлического режима тепловых сетей с

резервированием источников и магистралей представлен на рис. 4.

Обработка результатов расчетов позволяет прогнозировать поведение гидравлических систем и, как следствие, корректно подбирать оборудование.

Усовершенствованная методика расчета тепловых сетей и построения на ее основе схем резервирования источников энергии и магистралей позволяет оценить возможности маневрирования в нештатных ситуациях.

В программе отдельные этапы гидравлического расчета выделены в соответствующие им функции. Это позволяет свободно компоновать вычислительный конвейер на макро-уровне для решения всевозможных задач гидродинамики и адаптировать его для различных схем эквивалентирования. Разработаны отдельные вычислительные конвейеры, применяющие методики *упрощенного* и *полного* эквивалентирования тепловой сети.

Проведено сравнение времени сходимости алгоритма обобщенного метода контурных расходов при различных сочетаниях абсолютных величин нагрузок на абонентах и регуляторах расхода.

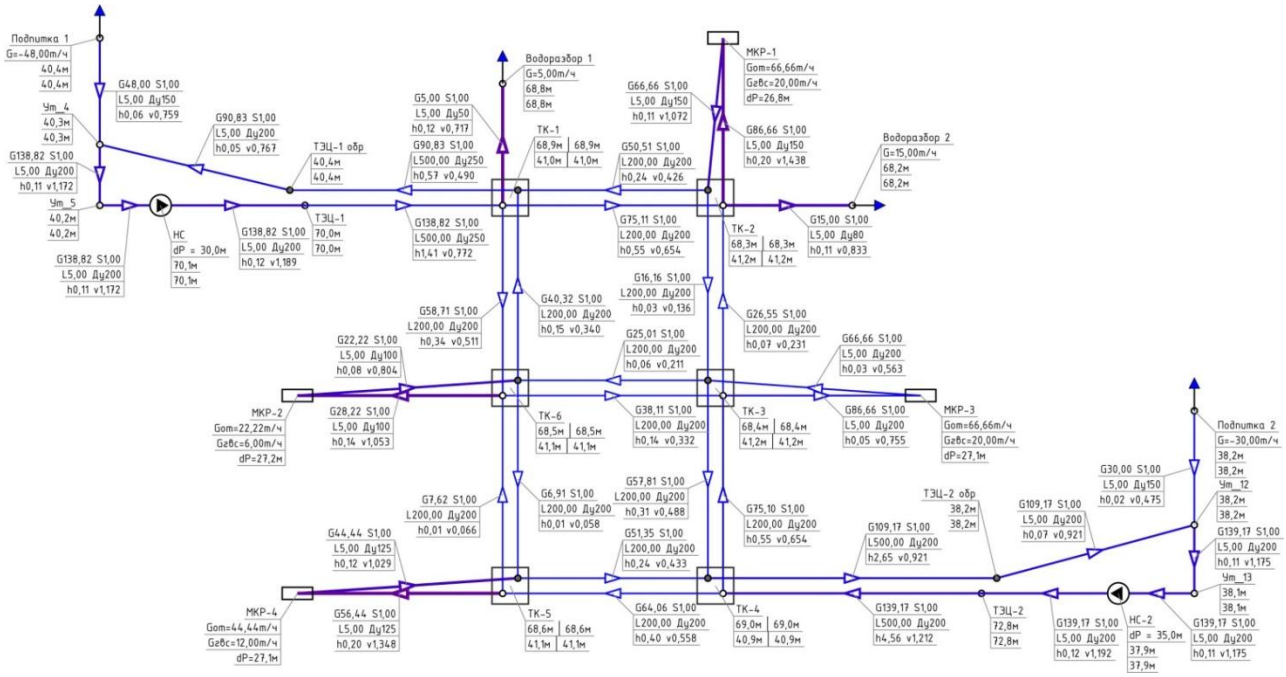

Рисунок 4 — Гидравлический режим тепловых сетей с резервированием источников и магистралей (пример выдачи)

Компьютерные расчеты, выполненные с нулевыми расходами, имитирующими отключение абонентов, показали, что расчет производится значительно дольше, чем при ненулевых расходах; повышение же сопротивления на головных участках трубопроводной сети ведет к уменьшению расчетного времени, что позволило предположить следующее:

– увеличение разницы нагрузок на абонентах и регуляторах расхода в разветвленной гидравлической кольцевой сети ведет к увеличению времени расчета системы;

– увеличение сопротивления отдельных головных участков разветвленной

кольцевой гидравлической сети частично нивелирует разницу нагрузок на абонентах и регуляторах расхода и ведет к уменьшению времени расчета.

Модернизирован алгоритм определения сопротивлений регуляторов расхода в первом приближении с целью ускорения расчета систем со значительными отличиями нагрузок абонентов.

Тепловые сети, формализуемые с использованием теории графов гидравлическими цепями, состоят как из пассивных элементов (трубопроводы, узлы сети), так и из активных (насосы, регуляторы).

Предложена схема хранения сверхориентированного графа матрицей сверхсмежности со ссылками на номера начальной и конечной вершин и на номера участков для начальной и конечной вершин, что позволило эквивалентировать различные схемы подключения распределительных тепловых сетей к магистральным сетям.

Созданный компьютерно-математический комплекс позволяет моделировать тепловые сети с иерархическим принципом построения и разрабатывать мероприятия по повышению их гидравлической устойчивости и надежности, изучать поведение их гидродинамических режимов в штатных и нештатных ситуациях.

В **четвертом разделе** приведены результаты экспериментальных исследований режимов работы тепловых сетей на лабораторных стендах.

В дополнение к вычислительным экспериментам проведены и исследования на экспериментально-лабораторной установке в ауд. А-148 СФУ и состоящей из двух стендов: первый – для физического моделирования режимов работы закрытой системы теплоснабжения с зависимым и независимым подключением потребителей (общий вид показан на рис. 5); второй – для открытой зависимой (рис. 6).

Замеры общего расхода в системе регистрировались электронным теплосчетчиком ТЭМ-104-К; расходы в отдельных ветвях схемы – расходомерами «Карат-РС»; давления – манометрами; перепады давлений – дифференциальным манометром Wilo DDA 6.

Экспериментальные исследования позволили детально изучить принципы функционирования отдельных элементов и систем инженерного обеспечения зданий и сооружений в целом и сравнить с результатами, полученными расчетным путем.

Циркуляционный контур имеет в своем составе основные типы циркуляционных насосов: стандартные насосы с постоянным числом оборотов; энергосберегающие электронные насосы класса энергоэффективности «В»; высокоэффективные насосы типа Stratos класса энергоэффективности «А». Смонтированные в контуре приборы измерения и учета позволяют исследовать различные режимы одиночной и одновременной работы насосов.

Для сопоставления возможностей программно-математического комплекса изучена способность насоса со встроенным частотным преобразователем поддерживать постоянный перепад давления при переменном расходе в режиме работы $\Delta P = const$ и уменьшающийся перепад давления при уменьшающемся расходе в режиме работы $\Delta P = var$.

На разработанном компьютерно-математическом комплексе создана эквивалентная модель закрытого стенда (рис. 5).

Выполнено сопоставление результатов компьютерного моделирования и экспериментальных замеров для 3-х серий экспериментов при поочередном отключении: одного, двух и трех абонентов.

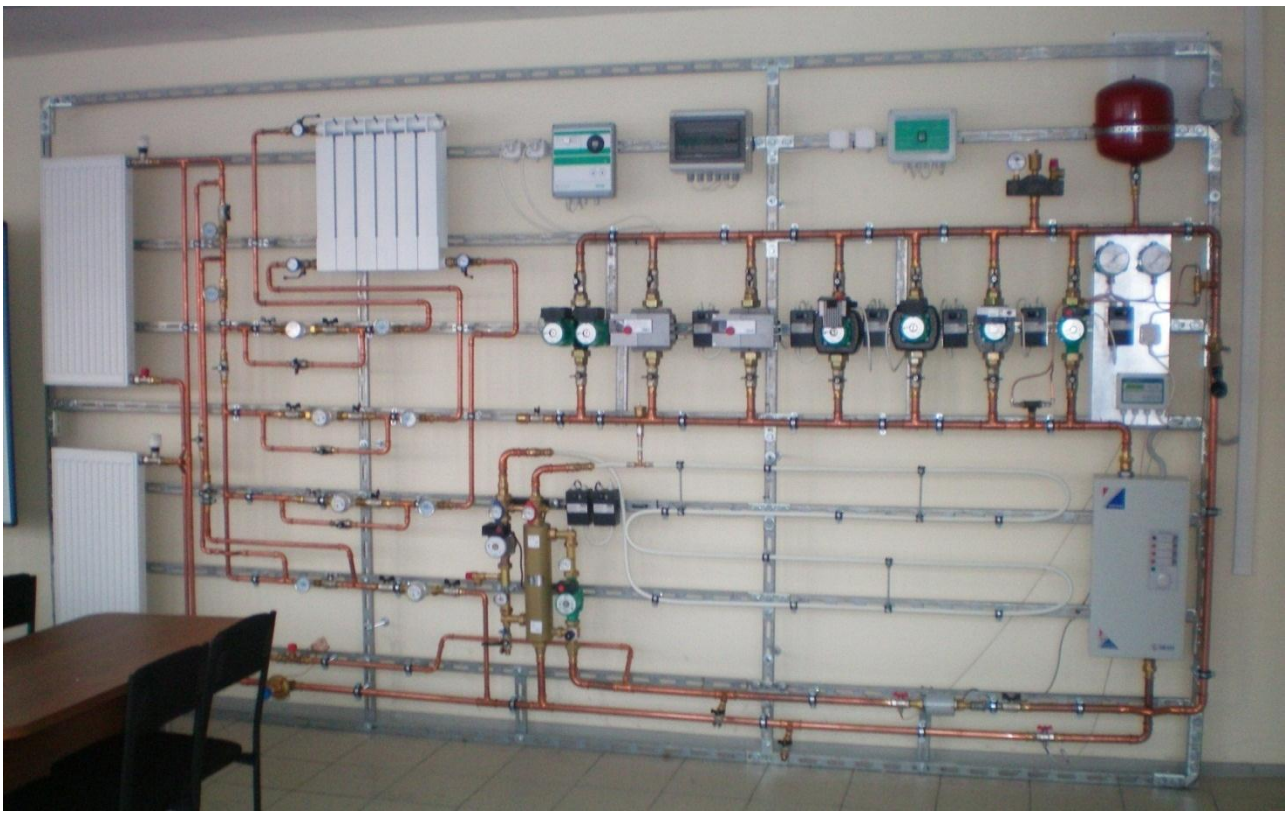

Рисунок 5 – Стенд для экспериментальной проверки гидравлических режимов закрытой независимой системы теплоснабжения

Анализ графиков показал удовлетворительную (с относительной погрешностью до 5%) сходимость результатов численного моделирования с результатами замеров на экспериментальном стенде.

На рис. 7 приведен общий график с результатами всех 3-х серий экспериментов. Красной пунктирной линией показана результирующая насосная характеристика источника в целом, включая насосные установки, участки подводящих патрубков и котельное оборудование. Построенный аппроксимационный полином имеет следующий вид:

$$H = 4{,}061594 + 1{,}220872 \cdot G - 0{,}928224 \cdot G^2, \qquad (9)$$

где H — напор; G — расход.

Предложенная методика позволяет детально изучать потокораспределение посредством численного моделирования тепловых сетей с иерархическим принципом построения с одновременной калибровкой по натурным замерам давлений и расходов.

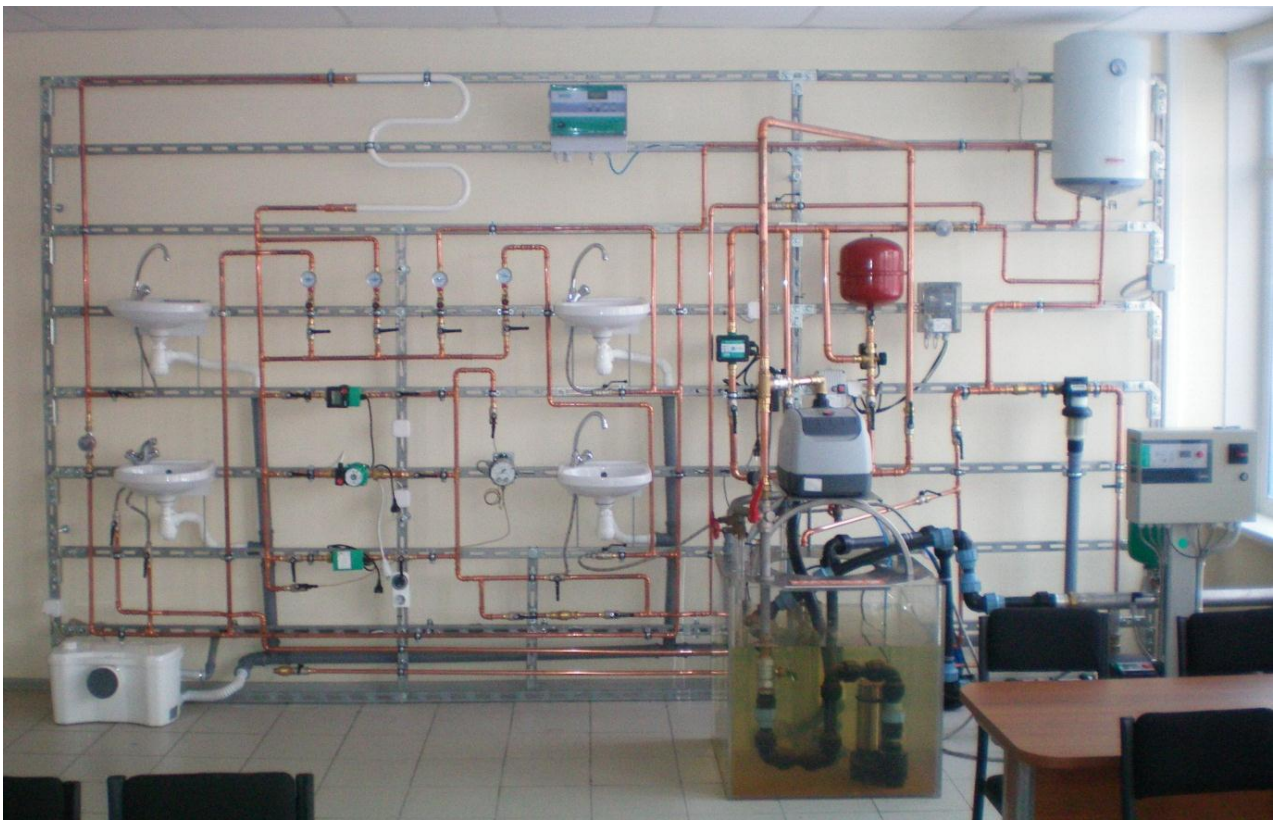

Рисунок 6 – Стенд для экспериментальной проверки гидравлических режимов открытой зависимой системы теплоснабжения

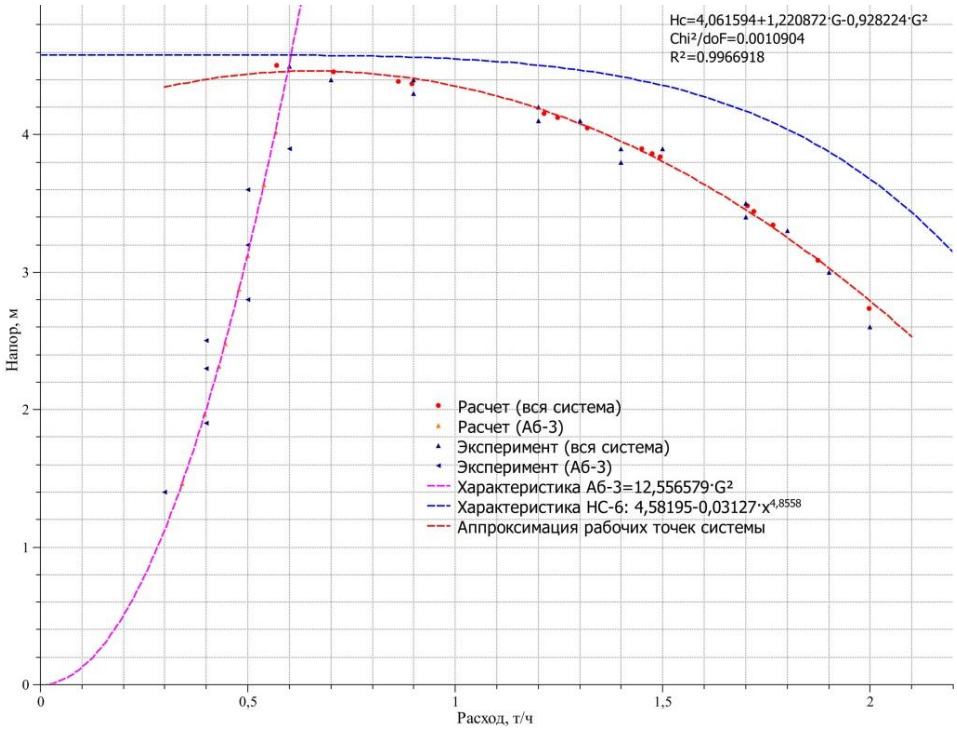

Рисунок 7 – Экспериментальная проверка результатов моделирования закрытой системы с четырьмя потребителями

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе математического моделирования, экспериментальных исследований и натурных замеров решена задача совершенствования методов расчета тепловых сетей с целью улучшения их технико-экономических характеристик и получены новые научно-практические результаты, в том числе:

1. Вычисление коэффициента гидравлического трения λ на всем диапазоне изменений чисел Рейнольдса, эквивалентной шероховатости и диаметров труб с учетом предложенной уточненной кубической аппроксимации обеспечивает точность, сопоставимую с погрешностью типа данных *double*, сохраняя в то же время высокую скорость расчета, плавность и неразрывность функции при переходе от ламинарного к турбулентному режиму.

2. Вычислительная схема, учитывающая функциональные зависимости термодинамических характеристик рабочей жидкости от температуры, давления, и функции, описывающие поведение насосных подстанций, более точно моделирует гидродинамические режимы тепловых сетей с иерархическим принципом построения.

3. Созданный программно-математический комплекс для расчета тепловых сетей с иерархическим принципом построения позволит детальнее изучить сложные процессы потокораспределения в инженерных трубопроводных системах, а его гибкая архитектура допускает расширение области применения данного продукта на другие объекты и рабочие жидкости.

4. Разработанная методика выбора схем присоединения потребителей к разветвленным закольцованным тепловым сетям позволит с достаточной степенью точности в полуавтоматизированном режиме выдавать технические условия на включение зданий и сооружений в систему централизованного теплоснабжения.

5. Уточнена методика нахождения суммарной насосной характеристики при совместной работе произвольного числа насосов различного типа, в том числе, работающих в различных точках сети.

6. Обоснована целесообразность применения предложенной методики эквивалентирования активных элементов тепловой сети соответствующей системой узловых расходов для проведения поверочного расчета, позволяющая моделировать различные схемы подключения потребителей теплоты и их режимные характеристики.

Таким образом, создан общий подход к построению и исследованию математических моделей тепловых сетей с иерархическим принципом построением и усовершенствована методика их расчета.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

Статьи в ведущих рецензируемых журналах по перечню ВАК:

1. Липовка Ю.Л., Панфилов В.И., **Липовка А.Ю.**, Тучин А.В. Математическое моделирование потокораспределения на тепловых пунктах // Энергосбережение и водоподготовка. 2008. № 3. С. 65–67.

2. **Липовка А.Ю.**, Липовка Ю.Л., Шульженко А.В., Катанаев К.Ю. Критерии оценки качества очистки внутренних поверхностей трубопроводов и нагревательных приборов от отложений // Энергосбережение и водоподготовка. 2011. № 6. С. 33–36.

Публикации в журналах, сборниках трудов и конференций:

3. Липовка Ю.Л., **Липовка А.Ю.** Аппроксимация трехмерных краевых задач теплоснабжения на основе теории комбинаторной геометрии. // Совершенствование системы управления качеством подготовки специалистов: материалы Всероссийской научно-методической конференции с международным участием: В 2 ч. Ч. 2. Красноярск: КГТУ, 2001. С. 21–23.

4. Липовка Ю.Л., **Липовка А.Ю.** Использование теории комбинаторной геометрии для создания математической модели на микроуровне элементов теплоснабжения // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: тезисы докл. и материалы конференции. Вып. VII. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. С. 93–101.

5. Липовка Ю.Л., **Липовка А.Ю.** Автоматизация функционального проектирования элементов теплоснабжения. Вестник Ассоциации выпускников КГТУ. Вып. 6. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. С. 57–67.

6. Липовка Ю.Л., **Липовка А.Ю.** Симплициальное разбиение трехмерной области при автоматизации функционального проектирования // Научно-технические проблемы современного гидромашиностроения и методы их решения: материалы международной конференции. Санкт-Петербург. 2001.

7. Липовка Ю.Л., **Липовка А.Ю.** Возможные подходы к парадоксу бесконечной скорости распространения теплоты // Проблемы архитектуры и строительства: XX научно-техн. конф. Красноярск: КрасГАСА, 2002. С. 2.

8. Липовка Ю.Л., **Липовка А.Ю.** Анализ методов расчета потокораспределения в теплогидравлических цепях с регулируемыми параметрами // Проблемы архитектуры и строительства: XX научно-техн. конф. Красноярск: КрасГАСА, 2002. С. 2.

9. Липовка Ю.Л., **Липовка А.Ю.** Метод Лобачевского-Греффе в анализе потокораспределения // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: материалы конференции 23-24 апреля 2003 г. Вып. IX. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. С. 125–128.

10. Липовка Ю.Л., **Липовка А.Ю.** Анализ сходимости процесса математического моделирования методом Галеркина совместно с конечно-элементной аппроксимацией с помощью симплекс-элементов // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: материалы конференции 23-24 апреля 2003 г. Вып. IX. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. С. 128–134.

11. **Липовка А.Ю.**, Липовка Ю.Л. Представление реальных систем теплоснабжения при автоматизации функционального проектирования // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: материалы конференции 22-23 апреля 2004 г. Вып. X. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. С. 99–110.

12. Липовка Ю.Л., **Липовка А.Ю.**, Петренко С.А. Применение теории графов для эквивалентирования и создания имитационных моделей тепловых сетей // Проблемы строительства и архитектуры: сб. материалов 24 науч.-техн. конф. Красноярск, КрасГАСА, 2006. С.171–173.

13. Липовка Ю.Л., **Липовка А.Ю.**, Антонов А.В. Математическое моделирование пространственных гидравлических цепей с использованием базисных понятий коммутативной алгебры // Проблемы строительства и архитектуры: сб. материалов 25 научн.-техн. конф. Красноярск, СФУ, 2007. С.182–186.

14. Липовка Ю.Л., **Липовка А.Ю.**, Кулагин В.А. Термовлажностные и низкотемпературные теплотехнологические процессы и установки: учебное пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т; политехн. ин-т, 2007. 147 с.

15. Липовка Ю.Л., Панфилов В.И., Тучин А.В., **Липовка А.Ю.**, Плахотников С.М. Особенности функционального проектирования одно- и двухтрубных систем отопления // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск: МВДЦ Сибирь, 2008. С. 75–77.

16. Липовка Ю.Л., Панфилов В.И., Плахотников С.М., **Липовка А.Ю.**, Тучин А.В. Формализация проектирования автоматизированных вводов тепловых сетей в здания // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск: МВДЦ Сибирь, 2008. С. 77–79.

17. Липовка Ю.Л., Панфилов В.И., **Липовка А.Ю.**, Тучин А.В., Плахотников С.М. Математическое моделирование теплогидравлических цепей // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск: МВДЦ Сибирь, 2008. С. 79–82.

18. **Липовка А.Ю.**, Тучин А.В., Плахотников С.М., Липовка Е.Р. Моделирование инженерных систем зданий // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: материалы X Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск: МВДЦ Сибирь, 2009. С. 277–278.