

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОБОСНОВАНИЯ МЕСТ РАССТАНОВКИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ УЗЛОВ УПРАВЛЕНИЯ В КРУПНЫХ СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ¹

З.И. Шалагинова

Приведена математическая модель теплогидравлических режимов теплоснабжающей системы во времени с учетом транспортного запаздывания, а также возмущающих и управляющих воздействий. Разработаны интегрированные за расчетный период времени показатели степени обеспеченности потребителей, полученные на основе имитационного моделирования теплогидравлических режимов. Предложен подход к решению задачи расстановки промежуточных ступеней регулирования, основанный на построении матриц путей от конечных потребителей в направлении, обратном течению теплоносителя.

Ключевые слова: система теплоснабжения, многоуровневое моделирование, промежуточная ступень управления, показатель режимной управляемости, синтез, методика, алгоритм, расчет, информационно-вычислительный комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

Сложность задач управления и актуальность автоматизации процессов управления в российских ТСС объясняются их особенностями — они сложились как сложные, многосвязные, пространственно разнесенные иерархические объекты, функционирующие в условиях переменности их структуры, параметров и режимов работы при многочисленных внешних и внутренних возмущениях.

Работа ТСС характеризуется рядом важных особенностей, которые необходимо учитывать при решении задач автоматизации и управления:

- непрерывность процесса производства и потребления тепла;
- разнородность присоединенной нагрузки — отопление, ГВС, вентиляция, технологические нужды;

- неравномерность потребления тепла;
- режимная взаимозависимость от источников, работающих на общие тепловые сети;
- быстрота изменения гидравлических режимов и большое временное запаздывание по тракту температур.

Принятые сокращения

- ГВС — горячее водоснабжение
- ИВК — информационно-вычислительный комплекс
- ИТ — источник тепла
- ИТП — индивидуальный тепловой пункт
- КРП — контрольно-распределительный пункт
- МТС — магистральная тепловая сеть
- РТС — распределительная тепловая сеть
- ТГР — теплогидравлический режим
- ТСС — теплоснабжающая система
- ЦТП — центральный тепловой пункт

Основная задача автоматизации ТСС заключается в повышении управляемости в целях обеспечения всех категорий потребителей требуемым количеством тепла заданного качества в каждый момент времени, при соблюдении технологических

¹ Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.4.3 «Научно-методические основы интеллектуализации процессов развития и функционирования трубопроводных систем энергетики» (ИСЭМ СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310437-4).



ограничений на параметры теплоносителя и минимальных затратах. В общем случае эти затраты определяются такими составляющими:

- суммарный расход трудовых и материальных ресурсов на производство, транспорт и распределение тепловой энергии;
- ущерб от нарушения теплоснабжения потребителей и от низкого качества тепловой энергии;
- ущерб от повреждения оборудования, обусловленного отклонением параметров режима от допустимых значений.

В настоящее время отсутствует достаточно эффективная и простая методика оценки ущерба по перечисленным составляющим, а в отдельных случаях ущерб принципиально не могут быть определены (например, потеря трудоспособности людей: простудные заболевания из-за пониженных температур воздуха в отапливаемых помещениях или ожоги вследствие превышения температуры воды ГВС выше допустимой). В связи с этим задаче автоматизации будем придавать более узкий смысл — обеспечение потребителей тепловой энергией при минимальных затратах на ее производство, транспорт и распределение при соблюдении заданных требований по надежности и качеству теплоснабжения. Качество тепловой энергии характеризуется давлением и температурой теплоносителя, отпускаемого потребителям.

Проблема управляемости в ТСС связана с недостаточным уровнем проектирования, эксплуатации и технической оснащенности, особенно систем транспорта и распределения тепловой энергии. В силу исторического развития ТСС, в их структуру, как правило, не закладывалась четкая иерархия построения, в связи с чем существующие ТСС обладают лишь частичной управляемостью, т. е. обеспечивают требуемые параметры у отдельных потребителей в нормальных условиях и становятся плохо управляемыми при их нарушении.

1. ТРЕБОВАНИЯ К СТРУКТУРЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Разработкой принципов построения ТСС у нас в России начали заниматься еще в 1930-х гг. Первые предложения по рациональному построению тепловых сетей были сделаны в рамках разработки схемы теплофикации г. Москвы, когда предполагалось сооружение общего кольца для тепловых сетей в целях двустороннего снабжения потребителей тепловой энергией [1]. Согласно существующей сегодня российской концепции построения автоматизированных систем теплоснабжения с учетом надежности и управляемости [2], крупные ТСС с несколькими ИТ и протяженными заколь-

цованными тепловыми сетями с большим числом присоединенных разнородных потребителей для согласованной работы всех звеньев системы должны иметь несколько ступеней регулирования:

- на источниках тепла (ТЭЦ или котельных);
- в промежуточных узлах тепловой сети — КРП или ЦТП;
- в абонентских теплопотребляющих установках или в ИТП [2, 3].

При организации многоступенчатого регулирования каждая ступень облегчает работу последующей. Естественно, что для успешной работы ТСС по такой схеме необходима избыточность параметров на вводе в каждую из перечисленных ступеней управления.

В последнее время много говорят о несовершенстве принятой в России структуры ТСС с наличием ЦТП [2] в связи с большими потерями тепла и воды в распределительных сетях и низкой эффективностью установленного оборудования. И как это часто бывает, появляются призывы сломать существующую систему и вместо этого в каждом доме построить собственный тепловой пункт [4–6]. Несомненно, что системы теплоснабжения с ИТП имеют определенные преимущества по сравнению с ЦТП — это более тонкая регулировка теплового режима систем отопления, сокращение тепловых потерь и утечек воды в системах ГВС. Под ЦТП не надо отводить дорогостоящие городские земли, в этих системах отсутствуют распределительные сети ГВС, в них может быть упрощен учет энергоресурсов. Однако эти преимущества наиболее полно должны проявить себя в новом строительстве, при условии, что оборудование будет полностью установлено, отлажено, выведено на режим и затем грамотно эксплуатироваться.

Необходимо также помнить, что ни одна страна в мире по масштабам централизованного теплоснабжения не может сравниться с Россией. Потребление тепловой энергии только в Москве превышает ее суммарное потребление в Нидерландах и Швеции, а потребление тепла в Санкт-Петербурге выше, чем в таких странах — законодателях моды в системах теплоснабжения — как Финляндия или Дания [7]. Большие масштабы и сложность российских современных ТСС определяют важную роль присутствия в них ЦТП, особенно при больших перепадах геодезических отметок.

Безусловно, энергосберегающая ТСС должна работать с применением ИТП. Однако это не значит, что ЦТП должны закрываться. Они выполняют функцию гидравлического стабилизатора и одновременно разделяют систему теплоснабжения на отдельные подсистемы. Из ЦТП в случае применения ИТП исключаются подогреватели ГВС.

При этом за ЦТП также может сохраниться двухтрубная прокладка, но РТС при этом могут работать на пониженных по сравнению с МТС значениях параметров (давлении и температуре теплоносителя). Это позволяет понизить во вторичном контуре потери тепла и теплоносителя вследствие утечек и гарантирует стабильную работу ИТП, исключая их жесткое взаимное влияние по гидравлическому тракту. Широкое внедрение средств автономного регулирования вносит непрерывные возмущения и требует сглаживания резких изменений параметров для МТС.

Возникает также вопрос — насколько велик выигрыш в сокращении расхода энергоресурсов, чтобы затевать коренную и очень дорогостоящую ломку сложившейся системы теплоснабжения. Очевидно, что в каждой конкретной системе теплоснабжения необходимо принимать индивидуальное решение с учетом всех технических и экономических факторов.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Усиление экономических и технологических связей, по мере развития ТСС, сделало чрезвычайно актуальным применение системного подхода к проектированию и управлению их функционированием, поскольку решения, принимаемые по каждому из звеньев в отдельности, не обязательно являются оптимальными для системы в целом. Часто такие решения не удовлетворяют требованиям надежности и управляемости, а иногда просто нереализуемы, особенно в развивающихся системах со сложившейся структурой, где ежегодное увеличение присоединенной нагрузки требует своевременного и обоснованного решения вопросов их реконструкции и расширения.

В настоящее время, учитывая постоянно растущие цены на тепловую энергию, активизируются работы по внедрению средств учета тепла и автономного регулирования его потребления. В свою очередь, обостряется проблема экономической ответственности за сверхнормативные тепловые потери в сетях, которые могут достигать 30 % от отпущенного количества тепла. Выдвигаются более жесткие требования к управлению ТСС, включая и способность оперативно оценивать динамику изменения нагрузок в течение суток, недели, сезонов года, умения рассчитывать и назначать соответствующие режимы работы системы в целом, прогнозировать аварийные ситуации и др. Эти проблемы особенно обостряются в новых экономических отношениях и требуют новых подходов и методов для их решения с максимальным учетом перечисленных факторов.

3. ПРЕДЛАГАЕМАЯ ОБЩАЯ СХЕМА КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОБОСНОВАНИЯ УРОВНЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Синтез режимной управляемости состоит в выборе решений по развитию системы, которые обеспечат реализацию наиболее выгодных режимов и облегчат их смену во времени. Создание АСУТП принципиально невозможно без детального предварительного моделирования этого процесса. Поэтому для принятия решений по рациональной автоматизации и оценки их реализуемости предлагается следующая методика.

Этап 1. Имитация работы существующей системы теплоснабжения в течение отопительного периода для оценивания степени управляемости ТСС.

Этап 2. Назначение вариантов повышения управляемости:

— по экспертным оценкам;

— с помощью решения задачи по выбору рациональных мест расстановки промежуточных ступеней регулирования.

Этап 3. Имитационное моделирование работы ТСС:

— по намеченным на этапе 2 вариантам автоматизации;

— с помощью методов оптимального централизованного управления;

Этап 4. Принятие решения по автоматизации. Рассмотрим эти этапы.

3.1. Имитация работы существующей системы теплоснабжения

Данный этап в течение отопительного периода (или любого другого) выполняется с помощью ИВК «АНГАРА-ТС» для расчета теплогидравлических режимов ТСС, разработанного в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН [8—11]. Он позволяет рассчитывать сети произвольной конфигурации (разветвленные, многоконтурные) и структуры (с любым числом и размещением насосных станций, источников, потребителей, регуляторов расхода и давления) с промежуточными ступенями регулирования, с различными схемами присоединения потребителей тепла и разнородными нагрузками (отопление, вентиляция, ГВС). В качестве потребителей выступают ИТП с присоединенными местными системами теплоснабжения или тепловой узел ввода в здание. Расчет производится во времени с учетом остывания по длине, транспортного запаздывания теплоносителя, при различных возмущениях на ИТ, насосных станциях, у потребителей и на участках тепловой сети [12, 13]. Под возмущением понимается изменение любого параметра системы,



переключение в сети (изменение топологии), воздействие автоматики, изменение отбора теплоносителя на ГВС в открытых системах, изменение метеоусловий и др., т. е. в качестве возмущений можно задавать как непредвиденные возмущения, так и сценарий управления.

Упомянутый ИВК снабжен развитым пользовательским интерфейсом, предельно упрощающим процессы занесения и отладки информации, выполнения вычислений и обладает высоким быстродействием, в среднем 20–50 с для многоконтурных сетей, содержащих порядка 25 тыс. ветвей расчетной схемы при расчете на компьютере с процессором Intel i5/3 ГГц, причем время собственно счета составляет 3–5 с; возможностью проведения одно- и многоуровневых расчетов при наличии в ТСС промежуточных узлов управления (ЦТП); возможностью решения задач большой размерности; повышенной надежностью благодаря детальному автоматизированному контролю корректности задания исходных данных и теоретически гарантированной сходимости вычислительного процесса, обеспечивающей получение решения с наперед заданной точностью, которая задается пользователем в диалоговом режиме; возможностью графической визуализации исходной информации и интерпретации результатов расчетов (автоматизированное построение, отображение, спецификация и вывод на печать пьезометрических и температурных графиков); графическим представлением расчетной схемы на фоне городской застройке с возможностью изменения состояний элементов системы; автоматическим определением нарушений в расчетном режиме и их визуализация на схемах; возможностью работы со схемами и данными в компьютерной сети.

Ниже приведена математическая модель ТГР теплоснабжающей системы во времени [12–15].

$$A^{(\tau)}x^{(\tau)} = Q^{(\tau)}, \quad (1)$$

$$\bar{A}^{T(\tau)}\bar{P}^{(\tau)} = S^{(\tau)}X^{(\tau)}x^{(\tau)} - H^{(\tau)}, \quad (2)$$

$$\bar{A}_1^{(\tau)}X^{(\tau)}t_1^{(\tau)} + \bar{A}_2^{(\tau)}X^{(\tau)}t_2^{(\tau)} = \theta^{(\tau)}, \quad (3)$$

$$t_1^{(\tau)} = \bar{A}^{T(\tau)}T^{(\tau)}, \quad (4)$$

$$t_2^{(\tau)} = F(x^{(\tau)}, t_1^{(\tau)}, t_0^{(\tau)}, \alpha^{(\tau)}), \quad (5)$$

$$\tau^{(v,j)} = \tau_B + R^{(v,j)}\Delta\tau^{(\tau)}, \quad v \in V, j \in J, \tau \in \Omega, \quad (6)$$

$$\Delta\tau_i^{(\tau)} = f(x_i^{(\tau)}) = (l_i\pi d_i^2)/(4x_i^{(\tau)}), \quad i \in I_1, \quad (7)$$

где \bar{A} и A — матрицы инцидентности узлов и участков: полная и для линейно независимых узлов размерностями $m \times n$ и $(m - 1) \times n$ соответственно,

m и n — число узлов и участков расчетной схемы. \bar{A}_1, \bar{A}_2 — матрицы ориентации участков размерностью $m \times n$, фиксирующие отдельно начальные и конечные узлы; S, X — диагональные матрицы порядка n , составленные из значений сопротивлений s_i и модулей расходов $|x_i|$ на участках; \bar{P} — полный вектор узловых давлений размерностью m ; x, H — n -мерные векторы расходов и действующих напоров на ветвях; θ, Q — m -мерные векторы узловых расходов тепла и теплоносителя; t_1, t_2 — n -мерные векторы температур в начальных и конечных узлах участков соответственно; T — m -мерный вектор узловых температур для смешанных в узлах потоков; J — множество узлов; I — множество участков схемы $I = I_1 \cup I_2 \cup I_3$; I_1, I_2, I_3 — подмножества участков сети, потребителей, и источников; α, t_0 — n -мерные векторы теплофизических характеристик и температур окружающей среды; c — удельная теплоемкость теплоносителя; Δt — n -мерный вектор разности температур на входе и выходе потребителя или источника тепла; $\Delta\tau$ — n -мерный вектор времени транспорта теплоносителя по участкам; τ — дискретное время наступления события, связанного с достижением температурным фронтом конечного узла участка сети: $\tau \in \Omega, \Omega = \Omega_T \cup \Omega_V, \Omega$ — дискретное множество упорядоченных по времени событий; Ω_T, Ω_V — подмножества времен исполнения возмущений гидравлических и тепловых параметров, причем $\Omega_T = \Omega_T(\tau_{B,T}, \tau_{B,G})$; $\tau_B, \tau_{B,T}, \tau_{B,G}$ — моменты времени возмущения параметров: любого, теплового и гидравлического; V — подмножество узлов, являющихся источниками возмущения; $R^{(v,j)}$ — $(n_j \times n)$ -матрица всех возможных путей, ведущих по направлению движения теплоносителя из узла v — источника возмущения к узлу j ; n_j — число таких путей; элементы матрицы:

$$r_{kj} = \begin{cases} 0, & \text{если участок } i \text{ не принадлежит } k\text{-му пути,} \\ & \text{ведущему из узла } v \text{ в узел } j; \\ 1, & \text{если участок } i \text{ принадлежит } k\text{-му пути} \\ & \text{из узла } v \text{ в узел } j; \end{cases}$$

$\tau^{(v,j)}$ — вектор промежутков времени, необходимых для прохождения теплоносителем пути от узла v до узла j ; размерность вектора равна числу путей n_j ; F — n -мерная вектор-функция аналитических зависимостей, отражающих изменение температуры теплоносителя на участках.

Функция F теплофизических характеристик участка в уравнении (5) принимает различный вид в зависимости от того, какому элементу ТСС она соответствует: сетевому трубопроводному участку, потребителю или источнику. Так, для i -й ветви трубопроводного участка, $i \in I_1$:

$$t_{2,i} = t_{0,i} + (t_{1,i} - t_{0,i}) \exp\left(-\frac{\pi d_i l_i k_i}{c x_i}\right), \quad (8)$$

где k_i — коэффициент теплопередачи, d_i и l_i — внутренний диаметр и длина участка трубопровода; c — теплоемкость теплоносителя; $t_{0,i}$ — температура окружающей среды.

Для участка-потребителя (ИТП с присоединенными местными системами теплотребления) или ЦТП, $i \in I_2$, значение функции F вычисляется с помощью математической модели ТГР тепловых пунктов, которая является составной частью общего комплекса и представляет собой систему из 50-ти уравнений, описывающих процессы потоко-распределения, теплопередачи и теплового баланса в местных системах отопления, ГВС и вентиляции. Модель представлена в работе [14] и в данной статье не приводится в силу ограниченности объема статьи. Расчет ТГР теплового пункта производится с учетом аккумулирующей способности зданий, различных схем присоединения систем отопления и подогревателей ГВС в закрытых системах, калориферов для систем вентиляции (с рециркуляцией и без нее).

Индекс τ означает, что уравнения (1)–(7) справедливы на момент времени τ . Учитывая практическую безынерционность системы по гидравлическому тракту и значительные временные запаздывания по тракту температур, представляется правомерным применение квазидинамического подхода для решения рассматриваемой задачи.

Сделаем необходимые пояснения к модели (1)–(7):

— учитывая, что для решения практических задач нет необходимости рассматривать температурное поле по длине участков и достаточно знания температур по узлам сети, время τ в данной модели связано с топологией, и поэтому $\Delta\tau$ дискретизируется не на равные промежутки, а на время транспорта теплоносителя до узла сети;

— зависимость от времени означает, что все величины могут быть в любой момент изменены (возмущены) по закону, заданному исследователем; сказанное относится в полной мере и к изменению структуры матрицы $A^{(\tau)}$. Следовательно, можно моделировать все типы возмущающих воздействий, в том числе и переключения в сети (изменение топологии).

Сложность ТСС и протекающих в них процессов, иерархия структуры построения, а также различные принципы регулирования отпуска нагрузки в сетях разного уровня обуславливают целесообразность применения для моделирования ТГР систем теплоснабжения развиваемого в ИСЭМ СО РАН подхода — многоуровневого моделирования [8–10, 12], которое базируется на методах эквивалентирования и декомпозиции как расчетных схем, так и задач.

Технология многоуровневого моделирования ТСС, применяемая для решения данной задачи, обеспечивает возможности:

- уменьшения размерности расчетных задач;
- обзорности результатов расчетов;
- согласования результатов решения задач, требующих разной степени подробности моделей;
- преодоления разобщенности информационных и математических моделей при решении задач управления ТСС на разных ведомственных, территориальных, организационных и временных уровнях;
- потенциальной применимости технологий параллельных вычислений, что, в свою очередь, позволяет выполнять расчеты ТСС большой размерности за меньшее время.

Различные приемы упрощения и понижения размерности расчетных схем достаточно часто применяются при моделировании ТСС. Большая часть публикаций на эту тему имеет абстрактный теоретический характер в отрыве от конкретных объектов приложения [16, 17]. Другая часть работ посвящена конкретным задачам, где способы упрощения рассматриваются попутно и ориентированы на специальные свойства: систем [18, 19]; задач проектирования и реконструкции [18, 19, 21], оперативного управления [19]); привлекаемых моделей (стационарных [18, 19, 21, 22], динамических [20, 23–25] и др.). Автору неизвестны работы, специально посвященные многоуровневому моделированию ТСС как комплексному подходу для анализа и управления режимами.

В связи с достаточной сложностью моделирования теплогидравлических режимов ТСС введем упрощающие предположения:

- сопротивления участков сети считаются не зависящими от температуры теплоносителя, что позволяет пользоваться моделями с сосредоточенными параметрами и рассчитывать гидравлический режим независимо от теплового;
- скоротечность гидравлических процессов порождает безынерционность реакции сети на гидравлические воздействия, что позволяет гидравлические режимы рассчитывать без временной составляющей;
- тепловые пункты (и обслуживаемые ими здания — потребители), представляющие собой сис-



темы с происходящими внутри них сложными гидравлическими и тепловыми процессами, в общей математической модели будем представлять участками с эквивалентными характеристиками (сопротивлениями, разностью температур на входе и выходе и временем транспорта теплоносителя через тепловой пункт или потребителя). Значения характеристик вычисляются с помощью математической модели ТГР теплового пункта [14].

Принятые допущения позволяют рассчитывать гидравлический режим независимо от теплового и применить декомпозицию ТСС на тепловые сети и тепловые пункты (или потребителей в случае ИТП). Таким образом, задача моделирования ТГР с промежуточными узлами управления сводится к расчету ТГР тепловой сети, которая, в свою очередь, состоит из двух подзадач — теплового и гидравлического расчета; расчета ТГР теплового пункта (ЦТП или ИТП с присоединенным зданием) и последующей их увязки.

Отсюда с очевидностью вытекает квазидинамический способ решения задачи (1)—(7) — задачи теплогидравлического расчета.

1. Рассчитывается в качестве исходного гидравлический режим (потокораспределение) (1), (2) и соответствующее ему стационарное температурное поле (3)—(5), которое будет оставаться таковым до момента возмущения τ_v .

2. В момент воздействия τ_v в зависимости от типа возмущения (тепловое или гидравлическое) производятся два вида операций:

а) если воздействие тепловое (изменение температуры на ИТ или ЦТП), то вычисляется по формуле (7) вектор $\Delta\tau$, соответствующий режиму п. 1; строятся матрицы $R^{(v,j)}$ и определяется по выражению (6) вектор промежутков времени $\tau^{(v,j)}$, необходимых для прохождения теплоносителем пути от узла v до узла j ; формируется ранжированная в порядке возрастания по времени последовательность исполнения событий по достижению температурным фронтом конечных узлов участков; затем последовательно для моментов времени из выражения (6) выполняются операции теплового расчета (3)—(5), которые продолжаются до тех пор, пока процесс не установится или пока не наступит новое возмущение;

б) если возмущение гидравлическое (изменение действующих напоров, расходов в узлах, топологии сети и пр.), то рассчитывается гидравлический режим, соответствующий этим изменениям по уравнениям (1) и (2); по формуле (7) для данного режима вычисляется новый вектор времен транспорта теплоносителя по участкам $\Delta\tau$ и далее выполняются действия, описанные в п. а).

В системе теплоснабжения теплогидравлические режимы регулируются с помощью регуляторов

расхода, давления и температуры, изменением напоров насосов, температуры или (и) расхода теплоносителя на выходе из ИТ или промежуточной ступени регулирования. При этом независимыми параметрами (управляющими) будут расходы и температуры теплоносителя на выходе из источников тепла и промежуточной ступени регулирования, напоры насосов на источниках, подкачивающих и перекачивающих подстанциях, уставки регуляторов. Давления, температуры и расходы теплоносителя в остальных узлах системы являются зависимыми параметрами.

Центральное регулирование отпуска тепла от ИТ может осуществляться тремя способами: качественное (изменением температур при постоянном расходе теплоносителя), количественное (изменением расходов при постоянной температуре теплоносителя) и комбинированное (изменением температур и расходов теплоносителя). Как правило, существующие системы работают по качественному графику. Внедрение средств автономного регулирования позволяет перейти к количественному и комбинированному регулированию.

При имитации работы системы по графику центрального качественного регулирования в неавтоматизированных системах нужно задать в качестве исходных данных сценарий произведенного за рассматриваемый период регулирования: изменение во времени температуры теплоносителя на выходе ИТ (при наличии нескольких ИТ для каждого из них). Информация о моментах регулирования и значениях температур берется из журналов диспетчеров, которые ведутся на предприятиях тепловых сетей (либо на ИТ). Кроме температур, в них фиксируются давления на насосных станциях и ИТ в течение всего отопительного сезона. Для систем с промежуточными ступенями регулирования необходимо задать моменты исполнения возмущений, места их приложения и новые значения параметров. При выполнении расчетов на предстоящий период сценарий задаются по температурному графику [26].

При количественном регулировании задается сценарий изменения расходов на выходах ИТ, ЦТП и (или) ИТП с указанием времени их исполнения. При комбинированном регулировании в сценарий возмущения включаются изменения температур и расходов.

В принципе, таким образом можно смоделировать любые виды регулирования, управления или внешнего возмущения, а именно:

- изменение отбора теплоносителя ГВС по часам суток в открытых системах;
- изменение гидравлического сопротивления на любом из участков сети или на некоторой их совокупности (при закрытии-открытии регулирующей арматуры);

— изменение уставок регуляторов (значение параметра, который должен поддерживать регулятор);

— переключения в сети, т. е. изменение топологии — исключение или добавление одного или нескольких участков в любой момент времени (послеаварийные режимы);

— изменение напоров насосных станций;

— воздействия автоматики;

— изменение метеоусловий и др.

После формирования сценария возмущений выполняется динамический теплогидравлический расчет с помощью ИВК «АНГАРА-ТС», т. е. осуществляется ретроспективный анализ работы системы за истекший период. Результаты расчета позволят получить интегрированные за период времени показатели:

— по количеству недополученной потребителями теплоты;

— по избыточному количеству теплоты, отпущенной потребителям;

— по суммарным (сверхнормативным) потерям тепла в сети.

Было бы неправильно для оценки обеспеченности потребителей пользоваться средней за расчетный период обеспеченной нагрузкой. Она может оказаться близкой к требуемой, в то время как в отдельные моменты времени потребитель недополучал требуемое количество тепла, а в другие был «перетоплен». Поэтому будем пользоваться показателями степени обеспеченности в каждый момент времени с последующим вычислением интегральных показателей.

Качество теплоснабжения отдельного i -го потребителя можно оценить по степени отклонения количества полученной им теплоты θ_i от требуемого значения θ_i^* [27—29]. Степень обеспеченности i -го потребителя в момент времени τ можно выразить характеристикой:

$$\Omega_i^{\text{д}}(\tau) = (\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau))\vartheta, \quad i \in I_2, \quad (9)$$

где ϑ — весовой коэффициент; $\vartheta = 1$, если $(\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau)) > 0$, т. е. потребитель ощущает дефицит теплоты; $\vartheta = 0$, если $(\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau)) \leq 0$, т. е. потребитель обеспечен тепловой энергией в нужном количестве или находится в состоянии «перетопа».

Суммарный дефицит тепла i -го потребителя за расчетный период T при k -м сценарии регулирования можно определить соотношением

$$\Psi_i^{\text{д}(k)} = \int_0^T \Omega_i^{\text{д}(k)}(\tau) d\tau, \quad i \in I_2, \quad (10)$$

Суммарный дефицит тепла для всех потребителей при k -м сценарии регулирования

$$D^{(k)} = \sum_{i \in I_2} \Psi_i^{\text{д}(k)}. \quad (11)$$

Средний дефицит за расчетный период T при k -м сценарии

$$\Psi_{i_{\text{ср}}}^{\text{д}(k)} = \frac{1}{T} \int_0^T \Omega_i^{\text{д}(k)}(\tau) d\tau, \quad i \in I_2. \quad (12)$$

Повторив расчеты N раз для различных сценариев внешних возмущений при заданных правилах управления, можно вычислить среднеожидаемый дефицит i -го потребителя:

$$M[\Psi_{i_{\text{ср}}}^{\text{д}}] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Psi_{i_{\text{ср}}}^{\text{д}(k)}, \quad i \in I_2, \quad (13)$$

Дисперсия:

$$\sigma_i^2 \approx \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left[\left(\Psi_{i_{\text{ср}}}^{\text{д}(k)} \right) - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\Psi_{i_{\text{ср}}}^{\text{д}(k)} \right) \right) \right]^2, \quad i \in I_2. \quad (14)$$

Аналогично формулам (9)—(14) вычисляются интегрированные за расчетный период времени показатели избыточного количества тепловой энергии, отпущенной потребителям.

Избыточное количество тепла, отпущенного i -му потребителю в момент времени τ :

$$\Omega_i^{\text{п}}(\tau) = (\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau))\vartheta, \quad i \in I_2, \quad (15)$$

где $\vartheta = 1$, если $(\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau)) < 0$, т. е. потребитель «перетоплен», $\vartheta = 0$, если $(\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau)) \geq 0$, т. е. потребитель обеспечен требуемым количеством теплоты или ощущает дефицит.

Суммарное избыточное количество теплоты, отпущенное i -му потребителю за расчетный период T при k -м сценарии регулирования:

$$\Psi_i^{\text{п}(k)} = \int_0^T \Omega_i^{\text{п}(k)}(\tau) d\tau, \quad i \in I_2. \quad (16)$$

Суммарное избыточное количество теплоты для всех потребителей при k -м сценарии регулирования:

$$\Pi^{(k)} = \sum_{i \in I_2} \Psi_i^{\text{п}(k)}. \quad (17)$$

Средний избыток тепла за расчетный период T при k -м сценарии:

$$\Psi_{i_{\text{cp}}}^{n(k)} = \frac{1}{T} \int_0^T \Omega_i^{n(k)}(\tau) d\tau, \quad i \in I_2. \quad (18)$$

Средний ожидаемый избыток тепла i -го потребителя:

$$M[\Psi_{i_{\text{cp}}}^n] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Psi_{i_{\text{cp}}}^{n(k)}, \quad i \in I_2. \quad (19)$$

Дисперсия:

$$\sigma_i^2 \approx \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left[\left(\Psi_{i_{\text{cp}}}^{n(k)} \right) - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\Psi_{i_{\text{cp}}}^{n(k)} \right) \right) \right]^2, \quad i \in I_2. \quad (20)$$

Обозначив θ_i^H — нормативные потери тепла на участке, а θ_i^Φ — потери, полученные расчетным путем (причем в расчете учитывается способ прокладки, состояние и тип изоляции, в том числе и влажность), получим значения превышения потерь тепла на участках теплосети над нормативными:

$$\Omega_i^{\text{пот}}(\tau) = (\theta_i^\Phi(\tau) - \theta_i^H(\tau))\vartheta, \quad i \in I_1, \quad (21)$$

где $\vartheta = 1$, если $\theta_i^\Phi(\tau) - \theta_i^H(\tau) > 0$, т. е. состояние изоляции не обеспечивает нормативные потери, $\vartheta = 0$, если $\theta_i^\Phi(\tau) - \theta_i^H(\tau) \leq 0$, т. е. потери в сети не превышают нормативные.

Суммарное превышение потерь тепла над нормативными на i -м участке за расчетный период T при k -м сценарии регулирования:

$$\Psi_i^{\text{пот}(k)} = \int_0^T \Omega_i^{\text{пот}(k)}(\tau) d\tau, \quad i \in I_1. \quad (22)$$

Суммарное превышение потерь для всех участков сети при k -м сценарии:

$$L^{(k)} = \sum_1^n \Psi_i^{\text{пот}(k)}, \quad i \in I_1. \quad (23)$$

Отметим, что при вычислениях по формулам (21)—(23) попутно можно определить наиболее неблагоприятные участки, которые нужно в первую очередь перекладывать, что имеет большое значение на практике при ограниченных финансовых средствах.

3.2. Синтез режимной управляемости сети теплоснабжения

После проведения имитационных расчетов работы системы за истекший период и получения значений показателей (9)—(20) можно перейти к решению вопроса размещения дополнительных узлов регулирования. Нормальный режим функционирования систем теплоснабжения определяется как расчетный режим функционирования при нормальных условиях, когда обеспечиваются значения заданных параметров режима работы в установленных пределах. Система управляема, если она способна реализовать все расчетные режимы. Синтез режимной управляемости состоит в выборе решений по развитию системы, которые обеспечат реализацию наиболее выгодных режимов и облегчат их смену во времени.

Варианты повышения степени управляемости исследуемой ТСС (расстановка КРП, ЦТП и ИТП с соответствующим набором регулирующих органов) можно назначить как по экспертным оценкам специалистов, хорошо знающих систему и имеющих большой опыт эксплуатации, так и с помощью решения задачи расстановки промежуточных ступеней регулирования, которую можно решить, применяя изложенный далее подход.

Сначала выполняется анализ существующего состояния ТСС и режимов при сложившихся условиях эксплуатации. Выявляются «узкие места», нарушения режима и количественно оценивается имеющийся уровень снабжения потребителей. Для этого выполняются расчеты по воспроизведению теплогидравлических режимов ТСС при существующей схеме их эксплуатации и параметрах на ИТ и ЦТП, которые поддерживались в прошедшем отопительном и летнем периодах.

При проектировании новых и реконструкции действующих ТСС, а также при разработке эксплуатационных режимов рассматриваются все основные гидравлические режимы. В том числе [30]: расчетный — по расчетным расходам сетевой воды в отопительный период; летний — при максимальной нагрузке ГВС в неотапливаемый период; статический — при отсутствии циркуляции теплоносителя в тепловой сети; некоторые наиболее вероятные аварийные режимы. Для открытых ТСС: зимний — при максимальном отборе воды на ГВС из обратного трубопровода; переходный (осенне-весенний) — при максимальном отборе воды на ГВС из подающего трубопровода.

Для оценки управляемости в любом из перечисленных режимов необходимо задать сценарий регулирования в рассматриваемом периоде и рассчитать ТГР по модели (1)—(8). Для анализа дефицитных режимов в условиях ограничения мощности ИТ или ограничения сетевой воды на ЦТП (вследствие аварийной ситуации) и послеаварий-

ных режимов, сопровождающихся целенаправленными переключениями переключателей в сети (изменение топологии), расчеты необходимо производить на период ремонтно-восстановительных работ при новой конфигурации сети. При этом система должна обеспечивать резервную норму подачи тепловой энергии потребителям в соответствии со справочно-нормативными документами [30, 31]:

$$\varphi\theta^P \leq \theta \leq \theta^P,$$

где θ^P и θ — количество теплоты, отпущенное на абонентский ввод потребителя в расчетном и текущем режимах; φ — допустимое снижение подачи теплоты потребителю в аварийном или дефицитном режиме. Для потребителей первой категории $\varphi = 1$.

Вычислив значения дефицитов и «перетоков» для всех потребителей системы по уравнениям (9)–(20) параллельно с расчетами по модели (1)–(8), проранжируем потребителей в рамках каждой распределительной сети по признаку их обеспеченности требуемым количеством тепла за расчетный период.

Далее будем работать с каждой распределительной сетью отдельно. Все узлы разветвления схемы сети можно рассматривать как обобщенные потребители, предшествующие по потоку определенным группам реальных потребителей. Учитывая свойство иерархической подчиненности потребителей в указанном смысле, можно наметить места установки дополнительных узлов регулирования (КРП, ЦТП) для минимизации дефицита («перетопа») у реальных потребителей нижележащих уровней. Алгоритм состоит в построении путей от потребителей в направлении, обратном течению теплоносителя, полученного из расчета потоко-распределения (см. рисунок).

Значения дефицита и «перетопа» потребителя присваивается подводящему участку. В узле связи участков, принадлежащих путям от различных потребителей (назовем его узел z), делается проверка обеспеченности теплом для всех ответвлений и суммирование дефицитов (и «перетоков» раздельно) $D_{z\Sigma}^{(k)}$ ($\Pi_{z\Sigma}^{(k)}$), вычисленных по уравнениям (10), (12), (16), (18).

Затем вычисляется средний суммарный дефицит (и «перетоп») всех потребителей, связанных с данным узлом z за расчетный период:

$$D_{z\text{cp}}^{(k)} = \frac{1}{T} D_{z\Sigma}^{(k)}, \quad \Pi_{z\text{cp}}^{(k)} = \frac{1}{T} \Pi_{z\Sigma}^{(k)}.$$

Для узлов, соединяющих несколько неблагополучных ответвлений (три и более) вычисляется требуемая тепловая нагрузка в узле. Установка ЦТП намечается, если $D_{z\text{cp}}^{(k)}$ составляет более 10 %

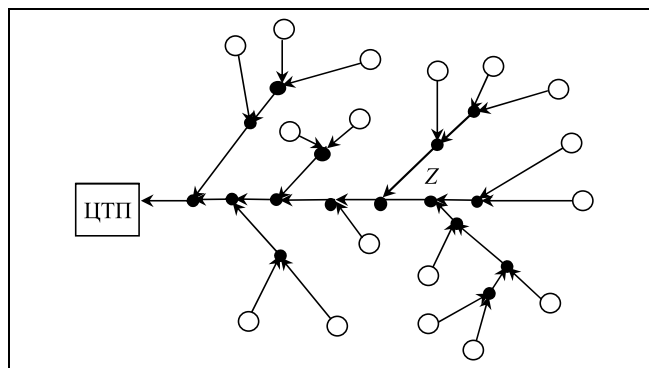


Схема алгоритма расстановки промежуточных ступеней управления

от требуемой нагрузки, и эта нагрузка лежит в пределах от 2 до 10 МВт, что составляет оптимальную нагрузку ЦТП.

Если в РТС имеются только единицы неблагополучных потребителей, а основная масса получает требуемое тепло, то рациональнее установить ИТП и осуществлять местное регулирование.

Таким образом, намечается несколько различных вариантов автоматизации, которые следует проверить на обеспечение режимной управляемости и сравнить по затратам и окупаемости.

3.3. Имитация работы сети теплоснабжения

После расстановки промежуточных ступеней регулирования осуществляется имитация работы ТСС по намеченным в п. 3.2 вариантам автоматизации. Для имитации многоступенчатого регулирования ТСС была разработана избыточная схема обобщенного теплового пункта, в которой заложены различные схемы присоединения теплотехнического оборудования, а также обозначены места установки регулирующих арматуры. Универсальная математическая модель теплогидравлических режимов тепловых пунктов, разработанная в ИСЭМ СО РАН [14], позволяет моделировать работу как ЦТП, так и ИТП. В данной статье модель не приводится в силу ограниченности объема статьи. В случае ЦТП под тепловым пунктом понимается узел регулирования и присоединенные к нему трубопроводы РТС до вводов в здания (для учета тепловых потерь в разводящих сетях). В случае ИТП — узел регулирования с присоединенными местными системами отопления, вентиляции и ГВС. В зависимости от назначения теплового пункта (ЦТП или ИТП) в нем может присутствовать тот или иной набор теплотехнического оборудования и регулирующих органов.

Имитация работы ТСС при многоступенчатом регулировании проводится аналогично описанному выше принципу с применением многоуров-



невого моделирования [32, 33]. Сравнение намеченных вариантов автоматизации по показателям (18)–(20) позволит выбрать наиболее рациональный вариант автоматизации тепловых сетей. Можно дополнить выбор вариантов сравнением по затратам на автоматизацию и срокам окупаемости. Выбор рациональной схемы автоматизации должен дополняться разработкой методов оптимального централизованного управления, что служит предметом отдельного рассмотрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение надежности, экономичности и качества работы современных сетей теплоснабжения требуют комплекса мероприятий, связанных как с внедрением технических средств измерения, регулирования и учета отпуска и потребления тепловой энергии, так и с разработкой методов и математических моделей для анализа и повышения режимной управляемости.

Анализ режимной управляемости требует привлечения математических моделей, позволяющих имитировать работу сетей теплоснабжения во времени в соответствии с заданным сценарием возмущающих и управляющих воздействий. Предложенная математическая модель для расчета теплогидравлических режимов во времени основана на многоуровневом подходе, позволяющем имитировать режимы крупных сетей с промежуточными ступенями управления, проводить расчеты сетей большой размерности за меньшее время.

Для количественной оценки режимной управляемости предложены интегральные за расчетный период показатели обеспеченности потребителей тепловой энергией, основанные на разработанной в ИСЭМ СО РАН динамической модели для расчета теплогидравлических режимов сетей теплоснабжения.

Разработанные интегральные показатели степени обеспеченности потребителей, позволяют принять решение о размещении дополнительных узлов управления для повышения режимной управляемости. Разработана общая схема количественного обоснования уровня автоматизации сетей теплоснабжения и алгоритм определения мест дополнительных узлов регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов Н.К. Городские теплофикационные системы. — М.: Энергия, 1974. — 253 с.
2. Чистович С.А., Аверьянов В.К., Темпель Ю.Я., Быков С.И. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления. — Л.: Стройиздат, 1987. — 248 с.
3. Чистович С.А., Громов Н.К. Принципы рационального построения тепловых сетей и управления режимами их работы. — Киев, 1982.
4. Давыдов А.Н. Экономическая эффективность ликвидации ЦТП // Новости теплоснабжения. — 2004. — № 12.
5. Дубсон М.И. Методы и способы контроля за техническим состоянием и эксплуатацией тепловых сетей и эффективной работой ИТП на опыте предприятия «Ригас Силтумс» // Новости теплоснабжения. — 2008. — № 4.
6. Ливчак В.И. Установка ИТП в зданиях вместо замены изношенного оборудования в ЦТП и перекладки сетей горячего водоснабжения // Энергосбережение. — 2008. — № 1. — С. 36–40.
7. Башмаков И.А. Повышение энергоэффективности в системах теплоснабжения. Часть 1. Проблемы российских систем теплоснабжения // Энергосбережение. — 2010. — № 2. — С. 46–51.
8. Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И., Алексеев А.В. Опыт разработки и применения информационно-вычислительных комплексов для расчета и организации режимов работы крупных систем теплоснабжения // Тр. междунар. науч. конф. «Энергетика и рыночная экономика», Улан-Батор, 2005. — С. 323–329.
9. Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И., Алексеев А.В. Принципы реализации и направления развития ПВК для расчета режимов теплоснабжающих систем / Информационные и математические технологии в науке, технике и образовании // Тр. X Байкальской Всерос. конф., Иркутск, ИСЭМ СО РАН, 2005. — Часть II. — С. 285–294.
10. Токарев В.В., Шалагинова З.И. Разработка методики многоуровневого наладочного теплогидравлического расчета систем теплоснабжения и ее реализация в составе ИВК «АНГАРА-ТС» / Математическое моделирование трубопроводных систем энергетики: Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем». — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. — С. 300–314.
11. Токарев В.В., Шалагинова З.И. Опыт применения информационно-вычислительного комплекса «АНГАРА-ТС» для организации режимов и разработки наладочных мероприятий теплоснабжающих систем крупных городов // Вестник ИРГТУ. — 2011. — № 12 (59). — Раздел «Энергетика». — С. 240–248.
12. Шалагинова З.И. Методы теплогидравлического анализа режимов крупных теплоснабжающих систем // Теплоэнергетика. — 2009. — № 12. — С. 44–49.
13. Алексеев А.В., Гребнева О.А., Новицкий Н.Н. и др. Математические модели и методы для оценки и реализации потенциала энергосбережения при управлении режимами теплоснабжающих систем / Исследования и разработки Сибирского отделения Российской академии наук в области энергоэффективных технологий. — Новосибирск: Научно-исследовательский институт молекулярной биологии и биофизики, 2009. — С. 38–49.
14. Шалагинова З.И. Математическая модель для расчета теплогидравлических режимов тепловых пунктов теплоснабжающих систем // Теплоэнергетика. — 2016. — № 3. — С. 69–80.
15. Шалагинова З.И. Разработка и применение методов расчета теплогидравлических режимов в системах теплоснабжения с многоступенчатым регулированием: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Иркутск: Сиб. энергетический ин-т, 1995. — 24 с.
16. Sakalkar V., Hajel P. Multilevel decomposition based nondeterministic design optimization for structural systems // Advances in Engineering Software. — 2011. — Vol. 42, iss. 1–2. — P. 1–11. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.10.002>.
17. Lu J., Han J., Hu Y., Zhang G. Multilevel decision-making: A survey // Information Sciences. — 2016. — Vol. 346. — P. 463–487. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2016.01.084>.

18. Lazzaretto A., Toffolo A., Morandin M., von Spakovsky M.R. Criteria for the decomposition of energy systems in local/global optimizations // *Energy*. — 2010. — Vol. 35, iss. 2. — P. 1157–1163. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.009>.
19. Nardo A.D., Cavallo A., Natale M.D., et al. Dynamic Control of Water Distribution System Based on Network Partitioning // *Procedia Engineering*. — 2016. — Vol. 154. — P. 1275–1282. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.460>.
20. Schweiger G., Larsson P.-O., Magnusson F., et al. District heating and cooling systems — Framework for Modelica-based simulation and dynamic optimization // *Energy*. — 2017. — Vol. 137. — P. 566–578. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.115>.
21. Vesterlund M., Dahl J. A method for the simulation and optimization of district heating systems with meshed networks // *Energy Conversion and Management*. — 2015. — Vol. 89. — P. 555–567. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.002>.
22. Guelpa E., Toro C., Sciacovelli A., et al. Optimal operation of large district heating networks through fast fluid-dynamic simulation // *Energy*. — 2016. — Vol. 102. — P. 586–595. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.058>.
23. Vesterlund M., Toffolo A., Dahl J. Optimization of multi-source complex district heating network, a case study // *Energy*. — 2017. — Vol. 126. — P. 53–63. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.018>.
24. Guelpa E., Sciacovelli A., Verda V. Thermo-fluid dynamic model of large district heating networks for the analysis of primary energy savings // *Energy*. — 2017. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.177>.
25. Gilani B.S., Bachmann M., Kriegel M. Evaluation of the temperature regimes of multi-level thermal networks in urban areas through exergy analysis // *Energy Procedia*. — Sept. 2017. — Vol. 122. — P. 385–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.424>.
26. Шалагинова З.И. Задачи и методы расчета температурных графиков отпуска тепла на основе теплогидравлического моделирования систем теплоснабжения // *Теплоэнергетика*. — 2004. — № 7. — С. 41–49.
27. Шалагинова З.И. Проблемы обеспечения режимной управляемости современных теплоснабжающих систем и возможные подходы к их решению // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. — Надежность систем энергетики: экономические и информационные аспекты*. — СПб., 1997. — Вып. 49. — С. 504–512.
28. Шалагинова З.И. Методы анализа режимной управляемости и их применение для оценки качества функционирования теплоснабжающих систем // *Теплоэнергетика*. — 2012. — № 5. — С. 63.
29. Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г., Тевяшев А.Д. и др. Трубопроводные системы энергетики: Методические и прикладные проблемы математического моделирования. — Новосибирск, 2015. — 476 с.
30. СП 124.13330.2012. Свод правил. Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02–2003 / утв. Приказом Минрегиона РФ от 30.06.2012, № 280.
31. СП 60.13330.2012. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование». Актуализированная редакция СНиП 41-01–2003.
32. Новицкий Н.Н., Шалагинова З.И., Токарев В.В., Гребнева О.А. Технология разработки эксплуатационных режимов крупных систем теплоснабжения на базе методов многоуровневого теплогидравлического моделирования // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. — 2018. — № 1. — С. 12–24.
33. Шалагинова З.И., Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Гребнева О.А. Многоуровневое моделирование теплогидравлических режимов больших систем теплоснабжения // *Сб. статей Всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление»*, 1–3 сентября 2015 г., Иркутск, Россия. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. — С. 389–398.

Статья представлена к публикации членом редколлегии И.Б. Ядыкиным.

Шалагинова Зоя Ивановна — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, shalaginova@isem.irk.ru.

Новая книга

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Магнитоградиентные измерительные системы и комплексы: моногр. в 2 т. — Т. 1: Принципы измерений и структура магнитоградиентных комплексов. — 149 с. — Т. 2: Обработка информации и применение магнитоградиентных комплексов. — 134 с. — М.: ИПУ РАН, 2018.

Представлены направления исследований в двух аспектах — инженерном и информационном. В первом томе рассмотрены основные принципы магнитоградиентных измерений и особенности их технической реализации. Рассмотрены основные варианты структуры магнитоградиентных измерительных систем. Дан анализ технических характеристик и особенностей магниточувствительных датчиков и возможностей их применения в составе измерительных систем. Приведена обобщенная модель процесса измерений параметров магнитоградиентного поля. Второй том посвящен аспектам вычислительной обработки данных при магнитоградиентных измерениях. Особое внимание уделено алгоритмам калибровки измерительных систем и комплексов, установленных на подвижных носителях. Рассмотрены основные принципы и алгоритмы решения задачи магнитоградиентного обнаружения. Приведены примеры применения магнитоградиентных комплексов.

Для широкого круга специалистов в области измерений магнитного поля, разработчиков технических средств, алгоритмов и программ вычислительной обработки измерений, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.