ISSN 1814-1196 *http://journals.nstu.ru/vestnik*
Научный вестник НГТУ *Science Bulletin of the NSTU*
том 64, № 3, 2016, с. 131–145 *Vol. 64, No. 3, 2016, pp. 131–145*

ЭНЕРГЕТИКА POWER ENGINEERING

УДК 518.5:658.264

Исследование задач и методов многокритериальной оптимизации гидравлических режимов распределительных тепловых сетей*

Н.Н. НОВИЦКИЙ[1], А.В. ЛУЦЕНКО[2]

[1] *664033, РФ, Иркутск, Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник. E-mail: pipenet@isem.irk.ru*
[2] *664033, РФ, Иркутск, Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, инженер. E-mail: luc_alex@mail.ru*

Статья посвящена задачам оптимизации гидравлических режимов древовидных в однолинейном представлении распределительных тепловых сетей. Эти задачи возникают на этапе планирования режимов перед очередным отопительным сезоном. Приводятся модели управляемого потокораспределения в тепловых сетях, а также математические постановки задач оптимизации по критериям, вытекающим из стремления минимизации мест приложения управления, сокращения утечек и рисков аварий за счет снижения общего уровня давления в сети, в том числе постановки однокритериальных задач дискретной и непрерывной оптимизации, а также двухкритериальных задач с непрерывным и дискретным главным критерием. Излагаются методы решения всех поставленных задач. Для решения задачи оптимизации по непрерывному критерию используется метод бисекции, на каждом шаге которого используется разработанный в ИСЭМ СО РАН метод внутренних точек. Для решения задачи однокритериальной оптимизации по дискретному критерию оптимальности тестировались три метода: метод полного перебора, метод ветвлений и отсечений и метод ветвей и границ, на каждом шаге которых использовался метод внутренних точек. Показано, что наилучшим из протестированных методов дискретной оптимизации является метод ветвей и границ. Показано, что двухкритериальная задача с непрерывным главным критерием может быть сведена к задаче однокритериальной дискретной оптимизации с ограничением сверху на общий уровень давления в сети, вычисленный при решении задачи непрерывной оптимизации. Для решения основной двухкритериальной задачи на поиск минимального числа управлений с использованием возможностей понижения общего уровня давления в сети разработан метод, названный методом мажорирующей последовательности. Этот метод опирается на специальные свойства режимов распределительных тепловых сетей и обеспечивает удовлетворительное быстродействие по сравнению с другими возможными методами. На численных примерах иллюстрируется работоспособность предложенных методов, обеспечивающих отыскание глобального решения, а также их сопоставительная вычислительная эффективность.

* *Статья получена 09 августа 2016 г.*

Ключевые слова: гидравлические режимы, теплоснабжающие системы, распределительные тепловые сети, оптимизация гидравлических режимов, оптимизация гидравлических режимов теплоснабжающих систем, метод ветвей и границ, метод внутренних точек

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-131-145

ВВЕДЕНИЕ

Задачи оптимизации систем централизованного теплоснабжения возникают на разных интервалах заблаговременности принятия решений по управлению, поскольку способы управления варьируют в зависимости от запаса времени на их реализацию и продолжительности работы теплоснабжающей системы (ТСС) под воздействием этих управлений. С этой точки зрения можно выделить циклы долгосрочного, краткосрочного и оперативного управления.

Долгосрочное управление связано с изменением конфигурации трубопроводной сети, мест размещения источников, насосных станций и других сооружений, параметров оборудования. Этим задачам посвящено большое число работ [1–4]. Постановки задач и методы оптимального развития ТСС продолжают развиваться в связи с появлением новых технологий теплоснабжения, нового оборудования, рыночных критериев и т. д. [5].

В последнее время большое внимание уделяется задачам оперативного управления процессами отпуска и распределения тепла в ТСС [6–8].

Настоящая статья посвящена задаче, возникающей на этапе планирования гидравлических режимов ТСС (краткосрочного управления) при подготовке к отопительному сезону. На практике эта задача решается путем многовариантных расчетов режима [9–12]. При этом выбор способов организации режимов целиком возлагается на инженера, а качество и оптимальность принимаемых решений зависят как от его опыта и квалификации, так и от масштабов и сложности ТСС.

Автоматизации этих задач препятствует ряд факторов сложности, таких как большая размерность привлекаемых моделей потокораспределения, их нелинейность, дискретность части переменных, необходимость учета многочисленных ограничений на параметры режима и значения управлений, наличие нескольких критериев оптимальности и т. д. По этим причинам на данный момент отсутствуют пригодные для практического применения методики и программные комплексы для оптимизации режимов ТСС.

Этим определяется актуальность разработки и применения самостоятельных методов расчета допустимых и оптимальных режимов.

В ИСЭМ СО РАН разработан многоуровневый подход к оптимизации режимов ТСС [13], который сводится к выполнению следующих этапов: 1) декомпозиция гидравлически связанной ТСС на магистральные (МТС) и распределительные (РТС) тепловые сети; 2) определение пределов изменения параметров режима в точках разделения МТС и РТС, гарантирующих существование допустимых режимов РТС; 3) оптимизация режима МТС с учетом этих ограничений в точках подключения РТС; 4) оптимизация режимов РТС при значениях граничных условий на входе РТС, полученных в п. 3.

На уровень МТС выносится закольцованная (в однолинейном изображении) часть тепловых сетей, содержащая все источники тепла и насосные станции, а на уровень РТС – пассивные (без насосных станций) разветвленные сети до конечных потребителей.

В данной статье рассматриваются задачи, относящиеся к пункту 4 данного подхода, которые также имеют и самостоятельное значение при разработке наладочных мероприятий для отдельно взятой РТС, либо ТСС, имеющей единственный источник и пассивные тепловые сети.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основные требования, предъявляемые к режимам РТС, связаны с их допустимостью и минимальной трудоемкостью на ее обеспечение. Последнее можно свести к требованию минимизации мест приложения управлений. Также целесообразно минимизировать потери теплоносителя (утечки, непроизводительные расходы и т. п.) и риски возникновения аварийных ситуаций за счет снижения общего уровня давления в сети.

Таким образом, задача является двухкритериальной и состоит в определении минимально необходимого числа управлений (дросселирующих устройств) на сети, а также их значений (на сети и у потребителей), обеспечивающих допустимость режима и снижение общего уровня давления в РТС.

Установившийся в РТС под воздействием параметров внешней среды и целенаправленных управлений режим должен удовлетворять системе уравнений – аналогов законов Кирхгофа и соотношений, отражающих законы течения среды (воды) по отдельным элементам сети. Такая система выступает в роли основных ограничений равенств и может быть представлена в виде [1, 14]

$$U(X)=\begin{pmatrix} U_1(x,Q) \\ U_2(P,y) \\ U_3(x,y,z) \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} Ax-Q \\ A^T P-y \\ y-f(x,z) \end{pmatrix}=0, \qquad (1)$$

где A – $m\times n$-матрица инциденций связного ориентированного графа (без петель) расчетной схемы ТСС с элементами $a_{i,j}=1(-1)$, когда узел (вершина графа) j начальный (конечный) для ветви (дуги графа) i и $a_{i,j}=0$, если ветвь i не инцидентна узлу j; n, m – число ветвей и узлов расчетной схемы; Q – m-мерный вектор узловых расходов с элементами $Q_j>0$ для притоков, $Q_j<0$ для отборов и $Q_j=0$ для простых узлов соединения; P – m-мерный вектор узловых давлений; x, y – n-мерные векторы расходов и перепадов давления на ветвях ГЦ; $f(x,z)$ – n-мерная вектор-функция с элементами $f_i(x_i,z_i)$, $i=\overline{1,n}$, отражающими гидравлические зависимости падения давления от расхода; z – вектор управлений; $X=\{R,z\}$ – вектор непрерывных (вещественных) переменных; $R=\{P,x,y,Q\}$ – вектор параметров режима; z – вектор управлений.

Основные элементы РТС – трубопроводные участки и потребители. Обозначим I_{PL} и I_C – множества индексов ветвей, моделирующих элементы первого и второго типов так, чтобы $I_{PL}\cap I_C=\varnothing$ и $I_{PL}\cup I_C=I$ – множество индексов всех ветвей РТС, $\|I\| = n$. В общем случае для РТС допустимо принять $f_i(x_i, z_i) = z_i s_i x_i | x_i |$, $i \in I$, где s_i – номинальное гидравлическое сопротивление (без управлений). Таким образом, $z_i \geq 1$, $i \in I$.

Часть параметров режима (R), зависящих от проявлений внешней среды, назовем граничными условиями (вектор G). Тогда $R=\{G, Y\}$, где Y – вектор неизвестных параметров режима. Традиционно граничные условия задаются в виде $G = (Q_1,..., Q_j , P_{j+1},..., P_m)^T$. С учетом того, что $\mathrm{rank}(A) = m - 1$, при заданных значениях z и G система $U(Y) = 0$ является замкнутой и имеет единственное решение [1]. Включение z в состав неизвестных доставляет необходимые степени свободы для поиска допустимых и оптимальных режимов. В роли граничных условий для РТС задаются давления в узлах сочленения РТС и МТС (в подающей и обратной линиях) и расходы во всех остальных узлах (например, на цели горячего водоснабжения потребителей).

Основные технические и технологические требования к допустимости и реализуемости режима сводятся к необходимости обеспечения условий $\underline{X} \leq X \leq \overline{X}$, где $\underline{X}$ и $\overline{X}$ – векторы нижних и верхних границ. Кроме того, требуется соблюдение технологически допустимых пределов изменения управляющих воздействий.

Таким образом, к системе ограничений-равенств (1) добавляется система ограничений-неравенств

$$\underline{X} \leq X \leq \overline{X}. \tag{2}$$

В общем случае $\underline{X} \leq \overline{X}$, причем компоненты векторов $\underline{X}, \overline{X}$ могут принимать и бесконечные значения для моделирования односторонних неравенств или их отсутствия, а случай $\underline{X} = \overline{X}$ означает фиксированное значение соответствующей компоненты X.

Введем в рассмотрение вектор булевых переменных δ, компоненты которого отвечают за наличие или отсутствие управления на i-й ветви расчетной схемы ($i \in I_{PL}$), а также неравенство $\underline{z}_i \leq z_i \leq \underline{z}_i + \delta_i\left(\overline{z}_i - \underline{z}_i\right)$, которое эквивалентно неравенству $\underline{z}_i \leq z_i \leq \overline{z}_i$ при $\delta_i = 1$ и превращается в требование $z_i = \underline{z}_i$ при $\delta_i = 0$. Тогда вместо (2) имеем

$$\underline{X} \leq X \leq \overline{X}(\delta). \tag{3}$$

В качестве критерия оптимальности по числу мест приложения управлений будет рассматриваться выражение $F_z = \sum\limits_{i \in I_{PL}} \delta_i$. В роли показателя общего уровня давления в сети будем использовать среднее давление по всем узлам $F_P = \sum\limits_{j=\overline{1,m}} P_j / m$ [13]. Таким образом, критерий F_z – дискретный, а F_P – непрерывный.

Исходя из введенных критериев возможны четыре постановки возникающих оптимизационных задач:

1) однокритериальная задача дискретной оптимизации –
$\min F_z$ при ограничениях (1) и (3); (4)

2) однокритериальная задача непрерывной оптимизации –

$\min F_P$ при ограничениях (1) и (3) и заданном векторе δ; (5)

3) двухкритериальная задача оптимизации с главным непрерывным критерием –

$\min F_z$ при ограничениях (1) и (3) и $F_P \le F_P^*$; (6)

4) двухкритериальная задача оптимизации с дискретным главным критерием –

$\min F_P$ при ограничениях (1) и (3) и $F_z \le F_z^*$; (7)

Здесь F_z^* – решение задачи (4), а F_P^* – решение задачи (5) на всем множестве допустимых мест приложения управлений. При формулировке двухкритериальных задач неявно применяется принцип лексикографического упорядочивания критериев, в соответствии с которым после оптимизации по основному критерию его значение фиксируется и выполняется оптимизация по второстепенному. Исходя из практических соображений наиболее целесообразной и одновременно наиболее сложной в решении будет последняя постановка (7). Во всех случаях заданы топология расчетной схемы (матрица A), граничные условия (вектор G), коэффициенты гидравлических характеристик ветвей (s_i), пределы допустимого изменения непрерывных неизвестных $\left(\underline{X}, \overline{X}\right)$.

2. РАСЧЕТ ДОПУСТИМОГО РЕЖИМА

Все рассматриваемые ниже методы решения задач (4)–(7) базируются на алгоритмах расчета допустимого режима РТС, под которым понимается вектор X, удовлетворяющий ограничениям (1) и (3) при фиксированном значении δ^* дискретных управлений δ. В общем случае решение может быть не единственно или отсутствовать. Для решения этой задачи предлагается использовать разработанный и развиваемый в ИСЭМ СО РАН метод внутренних точек [14, 16, 17]. Метод отличается хорошей сходимостью, простотой реализации (требует минимальных модификаций при переходе к оптимизационным постановкам), универсальностью в отношении учета как линейных, так и нелинейных ограничений (обеспечивает возможность идентификации факта их несовместности).

Суть метода состоит в организации итерационного процесса $X_{k+1} = X_k + \lambda_k \Delta X_k$, $k = 1, 2,...$ (где λ_k, ΔX_k – длина и направление шага), на каждой итерации которого отыскивается квадрат кратчайшего взвешенного расстояния $L_k^2 = \Delta X_k^T \Omega_k^{-1} \Delta X_k$ от текущей точки X_k, удовлетворяющей строгим неравенствам $\underline{X} \le X \le \overline{X}$, до точки, удовлетворяющей линеаризованным ограничениям равенствам $J_k \Delta X_k + \tilde{U}(X_k) = 0$, где $J_k = \partial \tilde{U} / \partial X$ – матрица Якоби в точке X_k.

Одно из основных отличий данного метода состоит в том, что при построении вспомогательной задачи не привлекаются неравенства, а сходимость последовательных приближений к решению обеспечивается благодаря оригинальному выбору весовых коэффициентов, например, как

$\sigma_i^k = \min\left\{\left(\underline{X}_i - X_i^k\right)^2, \left(\overline{X}_i - X_i^k\right)^2\right\}$, когда $\Omega_k = diag\left\{\sigma_1^k,...,\sigma_n^k\right\}$, в сочетании со специальной техникой определения λ_k. Особенности реализации применительно к трубопроводным системам, включая ТСС, приведены в работах [14, 15].

3. ОДНОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ДИСКРЕТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Во многих случаях решение задачи (4) сводится к установлению существования допустимого режима без управлений на участках сети (при $\delta = 0$, когда $F_z = 0$). Для случая, когда обеспечить допустимость режима без управлений на сети невозможно, исследовались 3 метода [19–21]: 1) метод полного перебора (МПП); 2) метод ветвлений и отсечений (МВО); 3) метод ветвей и границ (МВГ).

МПП сводится к следующим этапам: 1) определение всех возможных вариантов включения-выключения управлений; 2) расчет допустимого режима для каждого варианта; 3) выбор варианта, обеспечивающего допустимый режим и имеющего наименьшее значение функции F_z.

МВО относится к комбинаторным методам решения целочисленных задач. Сокращение рассматриваемых вариантов здесь достигается за счет отсечения заведомо недопустимых вариантов. В основу метода положено очевидное соображение: если какой-либо вариант ν^k (где k – индекс варианта), отвечающий конкретному значению δ^k вектора δ, не может обеспечить допустимый режим, то варианты, для которых

$$\delta_i \le \delta_i^k, \quad \forall i \in I, \tag{8}$$

также не смогут его обеспечить. Из оставшихся вариантов выбирается вариант с наименьшим значением критерия оптимальности. Полученный вариант является решением задачи (4).

Принципы дробления вариантов показаны на рис. 1. Здесь нулевому варианту ν^0 соответствует вектор δ^0 с элементами $\delta_i^0 = 1$, $i = 1, 2,..., n$. Каждый дочерний вариант ν^d отличается от родительского ν^P тем, что только для одного $i \in I_{PL}$ (на рис. 1 значение i указано в кружке) такого, что $\delta_i^p = 1$, принимается $\delta_i^d = 0$. Этим обеспечивается условие (8). Слева обозначены уровни. Номер уровня соответствует количеству запрещенных управлений.

В МВГ сокращение рассматриваемых вариантов достигается за счет отсечения как заведомо недопустимых, так и неперспективных вариантов. Алгоритм состоит из следующих шагов: 1) установить рекорд, равный $n + 1$, добавить в стек вариантов вариант ν^0; 2) взять из стека последний вариант для рассмотрения с удалением его из стека; 3) если F_z для рассматриваемого варианта меньше рекорда, проверить вариант на допустимость режима, иначе переход на пункт 5; 4) если допустимый режим существует, обновить рекорд и запомнить рассматриваемый вариант, иначе переход на пункт 6; 5) если у рассматриваемого варианта есть дочерние в соответствии с деревом перебора (рис. 1), добавить их в стек вариантов в порядке убывания номера ветви с отключаемым управлением; 6) если стек вариантов не пуст, то переход на пункт 2; 7) вариант, доставляющий рекорд $F_z^* < n+1$, является решением задачи (4), иначе решения не существует.

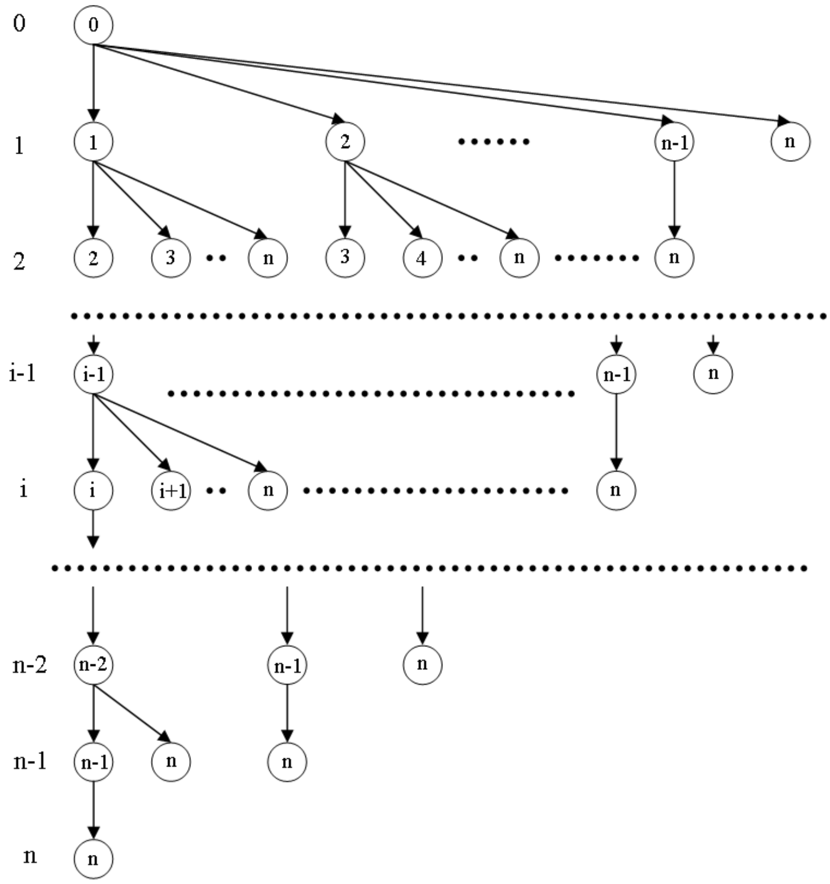

Рис. 1. Дерево перебора вариантов

Стек вариантов просматривается по правилу «первым зашел – последним вышел». Принцип пополнения стека (п. 5 алгоритма) гарантирует, что каждый раз после того, как в стек добавили все дочерние варианты очередного варианта, в роли очередного претендента на рассмотрение (п. 2 алгоритма) берется вариант с наилучшим обещанием среди всех нерассмотренных вариантов. Под обещанием здесь понимается максимальный уровень, на который можно опуститься по дереву перебора вариантов от данного варианта.

4. ОДНОКРИТЕРИАЛЬНАЯ НЕПРЕРЫВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Решение задачи (5) можно организовать путем последовательного сокращения начального интервала $\left[\underline{F}_P^0, \overline{F}_P^0\right]$, где $\underline{F}_P^0 = 0$, $\overline{F}_P^0$ – значение F_P для какого-либо допустимого режима, заведомо содержащего оптимальное целевой функции F_P.

На каждом r-м шаге такой процедуры методом внутренних точек отыскивается допустимое решение системы ограничений (1) и (2), расширенной за счет введения дополнительного равенства $F_P(X) = \varphi$ и неравенства $\underline{F}_P^r \le \varphi \le \overline{F}_P^r$, где φ – дополнительная фиктивная переменная, $\underline{F}_P^r$ и $\overline{F}_P^r$ – нижняя и верхняя оценки минимума F_P, изменяющиеся в соответствии с принципом сокращения интервала неопределенности методом деления пополам [13].

5. ДВУХКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ С ГЛАВНЫМ НЕПРЕРЫВНЫМ КРИТЕРИЕМ

Задачу (6) можно решить последовательным применением приведенных выше методов однокритериальной оптимизации на основе следующей двухэтапной процедуры: 1) решить задачу (5) на минимум критерия F_p; 2) решить задачу (4) на минимум критерия F_z при ограничениях (1) и (3), расширенных за счет дополнительного равенства $F_P(X) = \varphi$ и неравенства $\varphi \le F_P^* + \Delta F_P$, где F_P^* – решение задачи (5), ΔF_P – уступка по критерию F_P, задаваемая специалистом, проводящим расчеты.

6. ДВУХКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ С ДИСКРЕТНЫМ ГЛАВНЫМ КРИТЕРИЕМ

Решение однокритериальной задачи (4) на минимум F_z в общем случае не единственно. Поэтому рассматриваемая здесь задача (7) состоит в отыскании глобального решения задачи (5) на всем множестве решений задачи (4). При этом формально требуется C_{n2}^{n1} раз решить задачу (5), где $n1 = F_z^*$ – значение целевой функции задачи (4), $n2 = \|I_{PL}\|$, что достаточно трудоемко.

Однако, если в процессе решения задачи (4) в рамках МВГ организовать перебор вариантов так, чтобы среди всех вариантов, имеющих одинаковое значение критерия F_z, варианты, имеющие меньшее значение $F_P^k = \min\left\{F_P \mid \delta^k\right\}$, рассматривались раньше, то первый же вариант, доставляющий решение δ^* задачи (4), будет оптимальным с точки зрения задачи (7). Достичь такого ранжирования вариантов можно на основе топологических свойств РТС как разветвленных (древовидных) в однолинейном изображении сетей. Эти свойства проявляются в том, что направления потоков заранее известны, а чем дальше находится управление вверх по потоку от точки присоединения обратного трубопровода РТС к МТС (точка a) и ближе к точке присоединения подающего трубопровода РТС к МТС (точка b), тем сильнее его влияние на понижение давления в сети. Таким образом, если перенумеровать ветви так, чтобы на любом простом маршруте на схеме РТС от точки a до точки b номера ветвей строго возрастали, МВГ будет отключать управления в порядке возрастания влияния на понижение давления в РТС. Для этого сначала нумеруются ветви обратного трубопровода в порядке удаления от точки a, затем нумеруются ветви-потребители, в последнюю очередь нумеруются ветви подающего трубопровода в порядке приближения к точке b. Пример такой перенумерации приведен на рис. 2.

Назовем метод, основанный на применении МВГ с предварительным упорядочением номеров ветвей по этим правилам, методом мажорирующей последовательности (ММП).

Метод состоит из следующих этапов.

1. Перенумеровать ветви РТС указанным способом.
2. Решить задачу (4) при помощи МВГ.
3. На найденном решении δ^* решить задачу (5).

Найденное решение будет решением задачи (7).

7. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для тестирования приведенных алгоритмов использовалась условная РТС, содержащая 26 трубопроводных участков и 7 потребителей. Ее схема в двухлинейном представлении изображена на рис. 2.

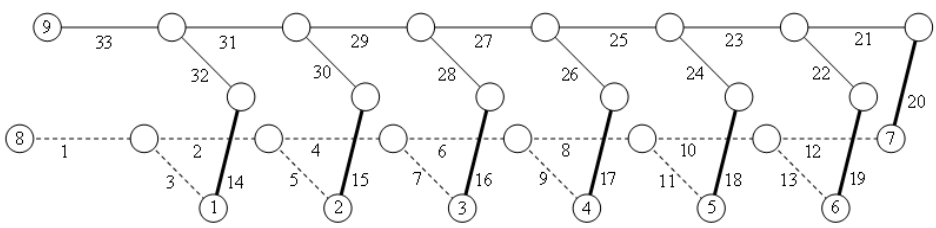

Рис. 2. Расчетная схема РТС

На рис. 2. сплошной линией обозначен подающий трубопровод, пунктирной – обратный, жирной – потребители. Узлы 1–7 соответствуют соединению потребителей с обратным трубопроводом. Из этих узлов осуществляется отбор на ГВС. Узлы 8 и 9 соответствуют точке присоединения РТС к МТС. Давление в узле 8 равно 10 м вод. ст., в узле 9 – 55 м вод. ст. Сопротивления всех ветвей как подающего трубопровода, так и обратного приняты одинаковыми и равны 0,01.

Горячее водоснабжение (ГВС) потребителей подключено по открытой схеме. Потребители имеют различную нагрузку и расположены на разных высотах, что требует наличия управлений на трубопроводных участках сети. Расходы теплоносителя (т/ч), нагрузки ГВС (т/ч), минимальные давления в обратном трубопроводе (м) и минимальные располагаемые напоры (м) указаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры потребителей

Ветвь (узел)	Расход теплоносителя на отопление	Узловой отбор	Минимальное давление в узле	Минимальный располагаемый напор
14 (1)	1,5	0,2	10	15
15 (2)	1,7	0,13	10	15
16 (3)	1,4	0,15	20	15

Окончание табл. 1

Ветвь (узел)	Расход теплоносителя на отопление	Узловой отбор	Минимальное давление в узле	Минимальный располагаемый напор
17 (4)	1,8	0,1	10	25
18 (5)	1,3	0,15	10	15
19 (6)	1,1	0,09	35	15
20 (7)	1,2	0,08	35	15

Поиск решения задачи (4) производился описанными методами дискретной оптимизации (МПП, МВО, МВГ), которые нашли одно и то же количество управлений, однако за разное количество шагов (поисков допустимого режима), что отражено в табл. 2. Количество решений задачи (4) равно восьми.

Таблица 2

Быстродействие методов дискретной оптимизации

Алгоритм	Количество шагов	Количество управлений
МПП	2^{26}	2
МВО	67 195	2
МВГ	35	2

Как видно из табл. 2, даже если исключить из рассмотрения все заведомо недопустимые варианты, количество шагов все равно остается недопустимо большим. Из всех предложенных методов только МВГ дает относительно приемлемое быстродействие.

После решения задачи (4) производился поиск решения задачи (7) при значении F_z^*, равном количеству управлений в найденном решении задачи (4). Для решения задачи (7) МПП понадобилось 325 оптимизационных расчетов, а ММП – всего один. В результате поисков обоими методами был найден один и тот же режим. На обратном трубопроводе (ветви 7 и 10) были установлены дросселирующие шайбы. Найденный вектор давлений приведен в табл. 3.

Таблица 3

Давления у потребителей в решении задачи (6)

Потребитель	Давление в подающем трубопроводе	Давление в обратном трубопроводе
1	53,98	10,85
2	53,25	11,46
3	52,80	20,03
4	52,49	12,10
5	52,38	12,19
6	52,33	35,01
7	52,33	35,01

На рис. 3, приведена иллюстрация поиска решения задачи (7) с помощью ММП. По горизонтали отложен номер шага алгоритма. Линией *1* обозначено значение критерия F_z, линией *2* – F_P^k. Разрывы в *2* обозначают отсутствие допустимого режима.

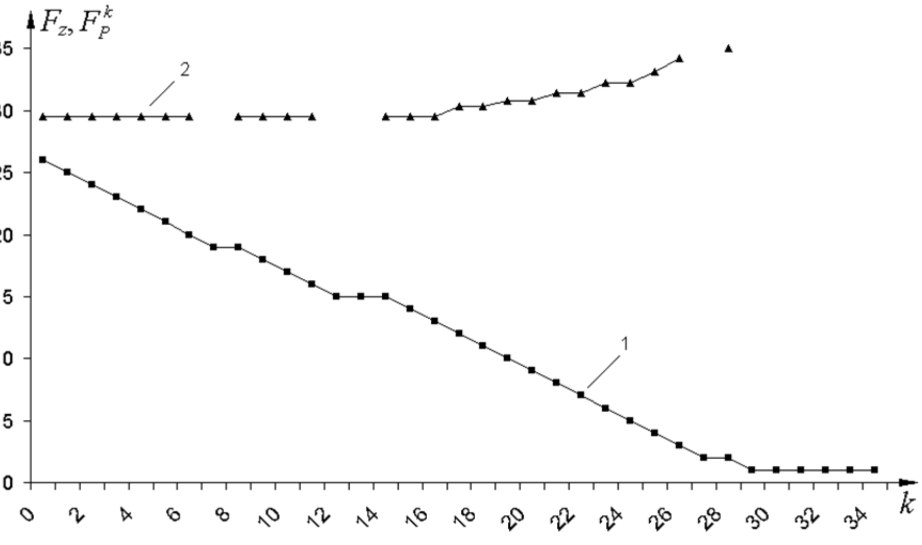

Рис. 3. Ход поиска решения ММП (оси, номера графиков)

На шагах 0–26 варианты рассматривались в следующем порядке: на нулевом шаге рассматривался вариант со всеми разрешенными управлениями, затем производились попытки запрещения управлений на ветвях 1–13 и 21–33 по одному за шаг. На каждом шаге в случае, если управление удавалось запретить, во всех вариантах, рассматриваемых далее, это управление было запрещено, если не удавалось – разрешено. На шаге 27 был рассмотрен вариант с включенными управлениями на ветвях 7 и 11, на шаге 28–7 и 10. После этого на шагах 29–34 были рассмотрены варианты, в которых разрешалось только одно управление на ветвях 1–6.

Линия *1* показывает монотонное снижение значения критерия F_z в ходе поиска решения, линия *2* иллюстрирует мажорирующий по F_P^k порядок рассмотрения вариантов.

В табл. 4 приведены значения критериев оптимальности для решений задач (4)–(7), откуда видна роль выбора того или иного критерия в роли единственного или главного.

Таблица 4

Критерий оптимальности	Задача (4)	Задача (5)	Задача (6)	Задача (7)
F_P	40,77	29,57	29,57	35,07
F_z	2	10	9	2

ВЫВОДЫ

Сформулирована задача планирования гидравлических режимов разветвленных распределительных тепловых сетей как двухкритериальная задача оптимизации.

Предложены четыре возможные математические постановки дискретных, непрерывных и смешанных задач одно- и многокритериальной оптимизации режимов РТС.

Предложены методы решения всех сформулированных задач, базирующиеся на применении разработанного в ИСЭМ СО РАН метода внутренних точек в сочетании со специальными методами генерирования и отбраковки вариантов, порождаемых дискретностью части переменных.

Для решения основной двухкритериальной задачи на поиск минимального числа управлений с использованием возможностей понижения общего уровня давления в сети разработан метод, опирающийся на специальные свойства режимов в РТС и обеспечивающий удовлетворительное быстродействие по сравнению с другими возможными методами.

Рассмотренные методы реализованы в виде пакета исследовательских программ. Приведены результаты их применения для численных расчетов, иллюстрирующие их работоспособность, сопоставительную эффективность и обоснованность основных выводов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Меренков А.П., Хасилев В.Я.* Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985. – 278 с.

2. *Сеннова Е.В., Сидлер В.Г.* Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. – Новосибирск: Наука, 1987. – 219 с.

3. *Юфа А.И., Носулько Д.Р.* Комплексная оптимизация теплоснабжения. – Киев: Техника, 1988. – 135 с.

4. *Haikarainen C., Pettersson F., Saxén H.* An MILP model for distributed energy system optimization // Chemical Engineering Transactions. – 2013. – Vol. 35. – P. 295–300.

5. Review of optimization models for the design of polygeneration systems in district heating and cooling networks / J. Ortiga, J.C. Bruno, A. Coronas, I.E. Grossman // 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE-17) / ed. by V. Pleşu, Ş. Agachi. – Amsterdam: Elsevier, 2007.

6. Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system / X.S. Jiang, Z.X. Jing, Y.Z. Li, Q.H. Wu, W.H. Tang // Energy. – 2014. – Vol. 64. – P. 375–388.

7. *Михайленко И.М.* Оптимальное управление системами центрального теплоснабжения. – СПб.: Стройиздат, 2003. – 240 с.

8. *Вороновский Г.К.* Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях. – Харьков: Харьков, 2002. – 239 с.

9. *Boysen H., Thorsen J.E.* Hydraulic balance in a district heating system // EuroHeat & Power. – 2007. – N 4.

10. Информационно-вычислительный комплекс для расчета и анализа режимов теплоснабжающих систем / В.В. Токарев, Н.Н. Новицкий, З.И. Шалагинова, С.Ю. Баринова // Гидравлические цепи. Развитие теории и приложения / под ред. А.З. Гамма. – Новосибирск: Наука, 2000. – С. 138–154.

11. Справочник по наладке и эксплуатации тепловых сетей / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Е.В. Хиж, А.И. Манюк, В.К. Ильин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1982. – 215 с.

12. *Токарев В.В., Шалагинова З.И.* Разработка методики многоуровневого наладочного теплогидравлического расчета систем теплоснабжения и ее реализация в составе ИВК «АНГАРА-ТС» // Трубопроводные системы энергетики: методические и прикладные проблемы математического моделирования / отв. ред.: Н.Н. Новицкий, А.Д. Тевяшев. – Новосибирск: Наука, 2015. – С. 110–127.

13. *Луценко А.В., Новицкий Н.Н.* Математические модели и алгоритмы оптимизации режимов тепловых сетей // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – Вып. 64: Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы. – С. 396–405.

14. *Новицкий Н.Н., Дикин И.И.* Расчет допустимых режимов работы трубопроводных сетей методом внутренних точек // Известия РАН. Энергетика. – 2003. – № 5. – С. 104–115.

15. *Луценко А.В.* Исследование задач и алгоритмизация методов расчета допустимых гидравлических режимов тепловых сетей // Системные исследования в энергетике: труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – Иркутск, 2012. – Вып. 42. – С. 39–48.

16. *Дикин И.И., Зоркальцев В.И.* Итеративное решение задач математического программирования (методы внутренних точек). – Новосибирск: Наука, 1980. – 144 с.

17. *Tsuchiya T.* Affine scaling algorithm // Interior point methods of mathematical programming / ed. by T. Terlaky. – Dordrecht, Netherlands; Boston: Kluwer Academic Publ., 1996. – P. 35–82.

18. *Дикин И.И.* Определение допустимых и оптимальных решений методом внутренних точек. – Новосибирск: Наука, 1998. – 110 с.

19. *Хохлюк В.И.* Параллельные алгоритмы целочисленной оптимизации. – М.: Радио и связь, 1987. – 138 с.

20. *Land A.H., Doig A.G.* An automatic method of solving discrete programming problems // Econometrica. – 1960. – Vol. 28. – P. 497–520.

21. *Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю.* Дискретное программирование. – М.: Наука, 1969. – 368 с.

Новицкий Николай Николаевич, доктор технических наук, главный исследователь лаборатории трубопроводных и гидравлических систем. 1) Институт систем энергетики им, Л,А, Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН); 2) Сколковский институт науки и технологии, ЦНИО «Энергетические системы», Основное направление исследований – теория и методы математического и компьютерного моделирования трубопроводных и гидравлических систем, Имеет более 100 публикаций, в том числе более 15 персональных и коллективных монографий, E-mail: pipenet@isem,irk,ru

Луценко Александр Викторович, инженер лаборатории трубопроводных и гидравлических систем. 1) Институт систем энергетики им, Л,А, Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН); 2) Сколковский институт науки и технологии, ЦНИО «Энергетические системы», Основное направление исследований – оптимизация гидравлиеских режимов теплоснабжающих систем, Имеет 10 публикаций, E-mail: luc_alex@mail,ru

Study objectives and methods of multiobjective optimization of hydraulic modes of heat distribution systems[*]

N.N. NOVITSKY[1], *A.V. LUTSENKO*[2]

[1] *Energy Systems Institute. LA Melentyeva Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS) Russia, Irkutsk, 130 Lermontov Street, 664033; The Skolkovo Institute of Science and Technology, TSNIO "Energy Systems" Russia, Moscow, Innovation Center "Skolkovo", 3 Nobel Street 143026, D. Sc. (Eng.), chief research worker. E-mail: pipenet@isem.irk.ru*
[2] *Energy Systems Institute. LA Melentyeva Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS) Russia, Irkutsk, 130 Lermontov Street, 664033; The Skolkovo Institute of Science and Technology, TSNIO "Energy Systems" Russia, Moscow, Innovation Center "Skolkovo", 3 Nobel Street, 143026, engineer. E-mail: luc_alex@mail.ru*

The article is devoted to optimization problems of hydraulic modes of distribution heat networks which appear at the stage of mode planning before the heating season. The task of scheduling hydraulic modes of heating network distribution is formulated as a problem of two-criterion optimization. A model of a controlled flow distribution in the heat networks and mathematical formulation of optimization problems are given. The statement of one-criterion problems of discrete and continuous optimization and two-criterion problems with continuous and discrete main criterion are also given. We present the proposed methods for solving all tasks. They are based on the method of interior points developed by ESI SB RAS. To account for the discrete nature of the tasks the exhaustion method, the ramification and pruning method and the branch and bound method are used. To solve the problem in the search for a minimum level of pressure in the network with a minimum number of controls a method based on the special properties of the heat distribution network modes and provides a satisfactory speed of response compared to other possible methods. Numerical examples illustrate the performance of the proposed methods to ensure finding a global solution, as well as their comparative computational efficiency.

Keywords: Hydraulic mode, heat supply system, heat distribution network, optimization, optimization of hydraulic modes, optimization of hydraulic modes of heat supply systems, branch and bound method, interior points method

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-131-145

REFERENCES

1. Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskikh tsepei* [The theory of hydraulic circuits]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 278 p.

2. Sennova E.V., Sidler V.G. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya razvivayushchikhsya teplosnabzhayushchikh sistem* [Mathematical modeling and optimization of developing heat supply systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 219 p.

3. Yufa A.I., Nosul'ko D.R. *Kompleksnaya optimizatsiya teplosnabzheniya* [Integrated heat supply optimization]. Kiev, Tekhnika Publ., 1988. 135 p.

4. Haikarainen C., Pettersson F., Saxén H. An MILP model for distributed energy system optimization. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, vol. 35, pp. 295–300.

5. Ortiga J., Bruno J.C., Coronas A., Grossman I.E. Review of optimization models for the design of polygeneration systems in district heating and cooling networks. *17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE-17)*. Ed. by V. Pleşu, Ş. Agachi. Amsterdam, Elsevier, 2007.

6. Jiang X.S., Jing Z.X., Li Y.Z., Wu Q.H., Tang W.H. Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system. *Energy*, 2014, vol. 64, pp. 375–388.

7. Mikhailenko I.M. *Optimal'noe upravlenie sistemami tsentral'nogo teplosnabzheniya* [Optimal control of central heat supply systems]. St. Petersburg, Stroiizdat Publ., 2003. 240 p.

[*] *Received 09 August 2016.*

8. Voronovskii G.K. *Usovershenstvovanie praktiki operativnogo upravleniya krupnymi teplofikatsionnymi sistemami v novykh ekonomicheskikh usloviyakh*. Khar'kov, Khar'kov Publ., 2002. 239 p.

9. Boysen H., Thorsen J.E. Hydraulic balance in a district heating system. *EuroHeat & Power*, 2007, no. 4.

10. Tokarev V.V., Novitskiy N.N., Shalaginova Z.I., Barinova S.Yu. Informatsionno-vychislitel'nyi kompleks dlya rascheta i analiza rezhimov teplosnabzhayushchikh sistem [Information and computer system for the calculation and analysis of heat supply systems modes]. *Gidravlicheskie tsepi. Razvitie teorii i prilozheniya* [Hydraulic circuit. Development of the theory and application]. Ed. by A.Z. Gamm. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000, pp. 138–154.

11. Manyuk V.I., Kaplinskii Ya.I., Khizh E.B., Manyuk A.I., Il'in V.K. *Spravochnik po naladke i ekspluatatsii teplovykh setei* [Guide to setting up and operation of heat networks]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1982. 215 p.

12. Tokarev V.V., Shalaginova Z.I. Razrabotka metodiki mnogourovnevogo naladochnogo teplogidravlicheskogo rascheta sistem teplosnabzheniya i ee realizatsiya v sostave IVK "ANGARA-TS" [Development of the method of calculation of thermal-hydraulic multi-level adjustment of heating systems and its implementation as part of ICS "ANGARA-TS"]. *Truboprovodnye sistemy energetiki: metodicheskie i prikladnye problemy matematicheskogo modelirovaniya* [Pipeline systems of energetic. Methodological and applied problems of mathematical modeling]. Ed. by N.N. Novitskii, A.D. Tevyashev. Novosibirsk, Nauka Publ., 2015, pp. 110–127.

13. Lutsenko A.V., Novitskiy N.N. Matematicheskie modeli i algoritmy optimizatsii rezhimov teplovykh setei [Mathematical models and algorithms for optimization of modes of heat supply systems]. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki* [Methodical research questions the reliability of large-scale energetics systems]. Irkutsk, ESI SB RAS Publ., 2014, vol. 64. *Nadezhnost' sistem energetiki: dostizheniya, problemy, perspektivy* [The reliability of energy systems: achievements, problems and prospects], pp. 396–405.

14. Novitskiy N.N., Dikin I.I. Raschet dopustimykh rezhimov raboty truboprovodnykh setei metodom vnutrennikh tochek [Calculation of feasible pipeline network operating conditions by the interior-point method]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2003, no. 5, pp. 104–115.

15. Lutsenko A.V. Issledovanie zadach i algoritmizatsiya metodov rascheta dopustimykh gidravlicheskikh rezhimov teplovykh setei [Research objectives and algorithmization of methods of calculating allowable hydraulic modes of heat supply systems]. *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN* [System Research in the energy sector: proceedings of young scientists ESI SB RAS]. Irkutsk, 2012, vol. 42, pp. 39–48.

16. Dikin I.I., Zorkal'tsev V.I. *Iterativnoe reshenie zadach matematicheskogo programmirovaniya (metody vnutrennikh tochek)* [Iterative solutions to mathematical programming problems (interior-point methods)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 144 p.

17. Tsuchiya T. Affine scaling algorithm. *Interior point methods of mathematical programming*. Ed. by T. Terlaky. Dordrecht, Netherlands, Boston, Kluwer Academic Publ., 1996, pp. 35–82.

18. Dikin I.I. *Opredelenie dopustimykh i optimal'nykh reshenii metodom vnutrennikh tochek* [Determination of feasible and optimal solutions by the interior-point method]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1998. 110 p.

19. Khokhlyuk V.I. *Parallel'nye algoritmy tselochislennoi optimizatsii* [Parallel algorithms for integer optimization]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987. 138 p.

20. Land A.H., Doig A.G. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica*, 1960, vol. 28, pp. 497–520.

21. Korbut A.A., Finkelstein Yu.Yu. *Diskretnoe programmirovanie* [Discrete programming]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 368 p.