

## АЛГОРИТМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Соколов Дмитрий Витальевич

К.т.н., с.н.с., e-mail: sokolov\_dv@isem.irk.ru

Барахтенко Евгений Алексеевич

К.т.н., с.н.с., e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук  
664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130

**Аннотация.** Определение оптимальных параметров систем теплоснабжения предполагает поиск решения, обеспечивающего наилучшую пропускную способность сети, путем замены трубопроводов и установки (модернизации) насосных станций. В этом случае мы обычно решаем сложную задачу нелинейного программирования с дискретными и непрерывными переменными. В ИСЭМ СО РАН разработаны эффективные методы ее решения. Метод, основанный на динамическом программировании, был разработан для древовидной сети. Для кольцевых сетей существует метод многоконтурной оптимизации, основанный на принципе последовательного улучшения решения. Важная особенность этих методов заключается в том, что они позволяют в полной мере учитывать свойства сложных математических моделей, определяющих особенности применяемого оборудования, способы его установки и эксплуатации. В статье представлены результаты дальнейшего развития методов решения комплексной задачи определения оптимальных параметров систем теплоснабжения. Предложены модифицированный метод и алгоритмы определения оптимальных параметров систем теплоснабжения. Предложенные метод и алгоритмы, реализованные в программном комплексе СОСНА, применяются для решения задач оптимальной реконструкции систем теплоснабжения городов и населенных пунктов.

**Ключевые слова:** динамическое программирование, метод многоконтурной оптимизации, многоуровневое моделирование, оптимальные параметры системы теплоснабжения, иерархическая модель системы теплоснабжения, программное обеспечение

**Цитирование:** Соколов Д.В., Барахтенко Е.А. Алгоритмы нового поколения для определения оптимальных параметров систем теплоснабжения // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 66–78. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-06

**Введение.** Теплоснабжающие системы (ТСС) современных городов и промышленных центров представляют собой сложные по своей структуре и параметрам системы, снабжающие теплом множество потребителей, имеющие в своем составе разнообразное оборудование и работающие с несколькими источниками тепла различного типа. Для таких систем все актуальнее становится своевременное решение вопросов обеспечения

эффективной работоспособности ТСС, что обусловлено старением теплопроводов, оборудования и ежегодным ростом присоединенной нагрузки потребителей. Важное значение для обеспечения эффективной работоспособности ТСС имеет задача определения ее оптимальных параметров.

Определение оптимальных параметров ТСС сводится к задаче обеспечения необходимой пропускной способности этой системы. Общим подходом к решению этой задачи является ее сведение к задачам линейного программирования [4, 5, 9, 12]. Появление динамического программирования (ДП) [6] привело к значительному развитию методов решения задач, связанных с подбором оптимальных параметров [2, 5, 10]. Некоторые исследователи пытаются использовать комбинаторные методы для решения задачи оптимального проектирования трубопроводных систем [11]. В [7] авторы предлагают метод Дэвидона-Флетчера-Пауэлла, чтобы найти решение. Авторы [13] применяют обобщенный алгоритм приведенного градиента.

В настоящее время эвристические алгоритмы используются для разработки различных подходов к оптимальному проектированию трубопроводных систем [14, 15, 17]. Авторы [8] для решения задачи предлагают метод имитации отжига.

В России метод многоконтурной оптимизации (МКО) используется для определения оптимальных параметров кольцевых ТСС. Этот метод основан на принципе последовательного улучшения решения [3, 2], он получил дальнейшее развитие в [19, 21, 22]. Проектирование ТСС предполагает применение методов гидравлических и тепловых расчетов, которые рассмотрены в [16, 18, 20, 23].

Важная особенность перечисленных методов ДП и МКО состоит в том, что они позволяют:

- учесть все особенности используемого оборудования, способов его сооружения и эксплуатации;
- использовать сложные нелинейные математические модели;
- гибко настраивать вычислительную процедуру к конкретным особенностям моделируемой системы.

Решение задачи определения оптимальных параметров предполагает рассмотрение сетей реальных размеров и сложности, которая связана с их замкнутыми двухлинейными схемами, многокольцевой структурой, наличием множества теплоисточников, управляющих элементов (насосных и дроссельных станций, регуляторов, тепловых пунктов) и большим количеством трубопроводов. В результате расчет реальных сетей становится невыполнимым за приемлемое время.

Средством преодоления перечисленных трудностей является применение подходов, основанных на декомпозиции расчетных схем ТСС. Декомпозиция является частью методологии многоуровневого моделирования, которая предлагает при решении задач большой размерности перейти от исходной сложной задачи к иерархически связанному набору задач меньшей размерности и сложности. Эта методология успешно применяется при решении задач развития систем газоснабжения [1] и расчета теплогидравлических режимов в ТСС [24].

Для решения задачи определения оптимальных параметров ТСС необходимо разработать новый методический подход и выполнить развитие существующих методов и алгоритмов, которые позволят решать задачи реальной размерности при помощи

многоуровневой декомпозиции расчетной схемы ТСС и обеспечат получение работоспособного решения в двухлинейных тепловых сетях.

В настоящей статье представлены новые наиболее значимые результаты в развитии методического и программного обеспечения для определения оптимальных параметров сложных ТСС:

1) модифицированный метод МКО, позволяющий путем декомпозиции модели тепловой сети значительно снизить продолжительность итерационного вычислительного процесса;

2) методический подход к решению задачи определения оптимальных параметров ТСС, в котором на основе многоуровневого моделирования исходная задача сводится к связанному набору задач меньшей размерности и сложности;

3) программный комплекс нового поколения СОСНА, предназначенный для определения оптимальных параметров сложных ТСС.

**1. Постановка задачи определения оптимальных параметров.** Заданной является расчетная (проектная) схема ТСС, состоящая из  $m$  узлов и  $n$  ветвей и представляемая в виде ориентированного графа  $G_{DHS} = (J, I)$ , где  $J = J_C \cup J_S \cup J_B$  – множество вершин (узлов), включающее множество потребителей  $J_C$ , источников  $J_S$  и точек разветвления на схеме  $J_B$ ;  $I = I_N \cup I_E$  – множество дуг (ветвей), состоящее из множеств существующих  $I_E$  и новых (проектируемых)  $I_N$  ветвей;  $I_{PS} \subset I$  – ветви, на которых установлены или разрешаются насосные станции. Для всех ветвей заданными являются длины  $L_i$  ( $i \in I$ ).

В процессе решения задачи требуется минимизировать функцию общих затрат в ТСС, имеющую следующий вид:

$$F(\mathbf{d}, \mathbf{H}, \mathbf{x}, \mathbf{P}) = \sum_{i \in I} F_i^P(d_i) + \sum_{i \in I_{PS}} F_i^{PS}(H_i, x_i) + \sum_{i \in I} F_i^E(x_i, d_i) + \sum_{j \in J_C} F_j^C(P_j), \quad \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \quad \mathbf{P} \in \mathbf{R}^m, \quad (1)$$

где  $F_i^P$  – затраты на сооружение и эксплуатацию трубопровода;  $F_i^{PS}$  – затраты на сооружение и эксплуатацию насосной станции;  $F_i^E$  и  $F_j^C$  – затраты соответственно на электроэнергию, расходуемую на перекачку транспортируемой среды и на ее подачу потребителю;  $\mathbf{d}$  –  $n$ -мерный вектор диаметров трубопроводов;  $\mathbf{H}$  –  $n$ -мерный вектор напоров на насосных станциях;  $\mathbf{x}$  – вектор расходов транспортируемой среды на ветвях сети;  $\mathbf{P}$  – вектор давлений в узлах сети.

Модель потокораспределения в ТСС имеет следующий вид:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{G}, \quad \mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}, \quad \mathbf{G} \in \mathbf{R}^m, \quad (2)$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{H} = \mathbf{f}(\mathbf{s}, \mathbf{x}), \quad (3)$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица инцидентности расчетной схемы;  $\mathbf{G}$  – вектор узловых отборов и притоков транспортируемой среды;  $\mathbf{f}$  –  $n$ -мерная вектор-функция с элементами  $f_i(s_i(d_i), x_i) = s_i(d_i)x_i|x_i|$ ,  $i \in I$ , отражающими закон падения давления на ветви сети,  $s_i(d_i)$  – гидравлическое сопротивление трубопровода.

Система ограничений включает следующие составляющие:

$$P_j^{\min} \leq P_j \leq P_j^{\max}, j \in J; \quad (4)$$

$$d_i \in D, i \in I; \quad (5)$$

$$H_i \in H_s, i \in I_{PS}; \quad (6)$$

$$v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max}, i \in I; \quad (7)$$

где  $P_j^{\min}$  и  $P_j^{\max}$  – нижнее и верхнее ограничения на давление;  $D$  – множество диаметров стандартных трубопроводов;  $H_s$  – множество напоров доступных к установке насосных станций;  $v_i^{\min}$  и  $v_i^{\max}$  – нижнее и верхнее ограничения на скорость течения теплоносителя  $v_i$ , определяемой по формуле:

$$v_i = v_i(x_i, d_i) = \frac{4x_i}{3600\rho\pi d_i^2}, i \in I_p,$$

где  $\rho$  – плотность теплоносителя.

В результате решения задачи минимизации функции (1) при ограничениях (2) – (7) необходимо определить оптимальные параметры ТСС.

**2. Методы решения задачи определения оптимальных параметров теплоснабжающих систем.** В работе для решения задачи определения оптимальных параметров ТСС выбраны методы, разработанные в ИСЭМ СО РАН в рамках теории гидравлических цепей (ТГЦ). Это методы МКО, динамического программирования и расчета потокораспределения. Приведем описание перечисленных методов.

*Метод ДП.* Идея метода решения задачи определения оптимальных параметров ТСС на основе динамического программирования состоит в многошаговом процессе определения параметров элементов сети (участков и узлов) путем их последовательного подбора для каждого элемента сети при движении от потребителей к источнику. В разветвленных ТСС, имеющих в однолинейном рассмотрении конфигурацию в виде дерева, вектор расходов на ветвях  $\mathbf{x}$  однозначно определяется древовидной структурой и вектором узловых отборов и притоков теплоносителя  $\mathbf{G}$ . При древовидной конфигурации сети и фиксированных расходах на ее ветвях целевая функция (1) является аддитивной, что позволяет применять ДП для решения задачи определения оптимальных параметров разветвленных ТСС.

Расчет оптимальных параметров всей тепловой сети методом ДП выполняется в соответствии со следующими этапами.

*Этап 1.* Организация «прямого хода» метода ДП для определения условно-оптимальных решений на участках и в узлах сети. Расчет производится в направлении от потребителей к источнику (источникам) путем определения условно-оптимальных параметров.

*Этап 2.* Определение оптимального в целом для системы решения: а) определение варианта, соответствующего оптимальному решению; б) определение значения целевой функции, соответствующего оптимальному варианту.

*Этап 3.* Организация «обратного хода» метода ДП для определения составляющих затрат для найденного по системе решения.

На *этапе 1* вычислительного процесса ДП область поиска решения, образуемая между верхними ( $P_j^{\max}, j = \overline{1, m}$ ) и нижними ( $P_j^{\min}, j = \overline{1, m}$ ) ограничениями на давления в узлах сети, разбивается на  $n$  интервалов, каждый из которых соответствует определенному участку сети. Участки сети нумеруются таким образом, чтобы номер шага  $i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) процесса оптимизации соответствовал номеру  $i$  участка. С целью уменьшить количество рассматриваемых комбинаций диаметров  $d_i$  и напоров  $H_i$  область поиска решения для каждого участка сети разбивается на некоторое количество интервалов  $\mu$ , которое определяет точность получаемого решения задачи. Таким образом образуется  $\mu$  ячеек для участка и  $n\mu$  ячеек для всей сети.

Затраты на шаге  $i$  оптимизации в ячейке  $z$  вычисляются с помощью рекуррентного уравнения

$$Z_{iz}(P_{jz}) = \min_{\substack{d_{iz} \in D \\ H_{iz} \in H_S \\ k=1, \dots, \mu \\ P_{jz} = P_{j+1,k} + h_i(s_i(d_{iz}, x_i) - H_{iz})}} [Z_{iz}^{\text{sum}}(d_{iz}) + Z_{iz}^{\text{PS}}(H_{iz}) + Z_{i-1,k}(P_{j+1,k})], \quad (8)$$

где  $Z_{iz}$  – сумма затрат, состоящая из стоимости трубопровода, насосных станций и затрат предыдущих шагов;  $P_{jz}$  – давление в узле  $j$  ячейки  $z$ ;  $P_{j+1,k}$  – давление в узле  $j+1$  ячейки  $k$ ;  $d_{iz}$  и  $H_{iz}$  – диаметр трубопровода и напор насосной станции, которые «запомнятся» в ячейке  $z$ ;  $x_i$  – расход на ветви, определяемый древовидной конфигурацией сети;  $Z_{iz}^{\text{sum}}$  – суммарные затраты на трубопровод.

В результате в ячейке  $z$  запоминается комбинация с минимальной суммой затрат  $Z_{iz}(P_{jz})$  в соответствии с (8).

За  $n$  шагов работы алгоритма все ячейки области поиска решения последовательно заполняются для всей сети. В результате образуются непрерывные траектории пьезометрических графиков, отражающие изменение давления от источников к потребителям.

*Метод МКО.* Определение оптимальных параметров кольцевых ТСС осуществляется с помощью метода многоконтурной оптимизации. В основе метода лежит принцип последовательного улучшения решений. При этом в рассматриваемой задаче выделяют две подзадачи:

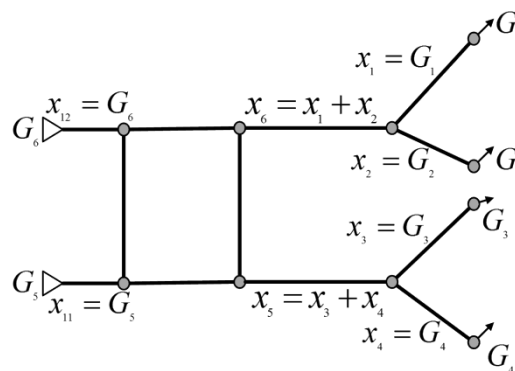
1. Определение оптимальных параметров (векторов диаметров  $\mathbf{d}$ , напоров  $\mathbf{H}$  и давлений  $\mathbf{P}$ ) методом ДП для вектора фиксированных расходов  $\mathbf{x}$ .
2. Расчет потокораспределения в сети (векторов расходов  $\mathbf{x}$  и давлений  $\mathbf{P}$ ) при фиксированных векторах диаметров  $\mathbf{d}$  и напоров  $\mathbf{H}$ .

Идея метода МКО состоит в организации итерационного вычислительного процесса последовательного улучшения параметров ТСС, в ходе которого попеременно решаются перечисленные подзадачи. Критерием остановки вычислительного процесса является прекращение уменьшения целевой функции.

Метод ДП позволяет находить решение только для сетей, имеющих разветвленную (древовидную) конфигурацию. Для обеспечения возможности применения этого метода схема кольцевой сети «разрезается» в точках схода потоков. В результате схема сети

трансформируется в дерево, для которого корректно может быть выполнена оптимизация методом ДП.

**3. Модифицированный метод многоконтурной оптимизации.** Реальные крупные ТСС городов и населенных пунктов, как правило, состоят из сетей, имеющих как кольцевую часть, так и древовидные (тупиковые) ответвления. На рис. 1 представлена схема сети, обладающая такой конфигурацией. В соответствии с постановкой задачи определения оптимальных параметров ТСС проектные узловые отборы и притоки являются заданными, что однозначно определяет расходы на ветвях, принадлежащих тупиковым ответвлениям. При решении задачи определения оптимальных параметров методом МКО динамическое программирование на каждой итерации вычислительного процесса МКО в тупиковых ответвлениях подбирает одни и те же условно-оптимальные параметры. Это свойство приводит к идее о том, что в тупиковых ответвлениях условно-оптимальные варианты могут быть определены один раз и многократно использованы в итерационном процессе МКО при определении параметров кольцевой части сети. Для решения задачи определения оптимальных параметров ТСС разработан модифицированный метод МКО, учитывающий эту особенность вычислительного процесса.



**Рис. 1.** Схема теплоснабжающей системы с кольцевой частью и тупиковыми ответвлениями

**Алгоритм 1** (Алгоритм модифицированного метода МКО)

1. Формирование множества  $J_L$  узлов на схеме, в которых есть инцидентные участки, принадлежащие как кольцевой части сети, так и тупиковым ответвлениям.
2. Расчет начального потокораспределения в кольцевой части сети и в тупиковых ответвлениях.
3. Выполнение «прямого хода» метода ДП для определения условно-оптимальных вариантов параметров всех тупиковых ответвлений.
4. Перенос давлений и стоимостей условно-оптимальных вариантов, полученных на уровне тупиковых ответвлений, на уровень кольцевых сетей для всех узлов  $j \in J_L$ .
5. Выполнение «прямого хода» метода ДП для определения условно-оптимальных вариантов параметров кольцевой части сети, при этом в узлах  $j \in J_L$  «увязываются» давления и затраты кольцевой части и тупиковых ответвлений.
6. Выбор в источнике с наибольшей производительностью варианта, соответствующего решению с наименьшей стоимостью затрат.

7. Выполнение «обратного хода» метода ДП для восстановления параметров и составляющих затрат кольцевой и тупиковых частей сети.
8. Расчет потокораспределения в кольцевой части сети и в тупиковых ответвлениях.
9. Если критерии завершения вычислительного процесса не достигнуты, то выполняется переход к шагу 5.

На шаге 5 алгоритма для применения метода ДП кольцевая часть сети трансформируется в дерево в соответствии с изложенными ранее принципами МКО.

Условно-оптимальные решения, полученные в узлах присоединения тупиковых ответвлений к кольцевой части сети, «стыкуются» с результатами кольцевой части во время вычислительного процесса МКО. При этом используется следующий принцип. Если узел  $j$  является начальным как для участков кольцевой части, так и для участков тупиковых ответвлений, то в ячейках этого узла происходит «увязка» давлений и суммирование затрат. Обозначим  $J^{(i)}$  множество узлов, давления в которых необходимо «увязать» в узле  $j$  на шаге  $i$  вычислительного процесса. «Увязка» давлений осуществляется в соответствии с выражением

$$P_{jz}^* = \max_{k \in J^{(i)}} P_{kz}, \quad z = 1, \dots, \mu,$$

где  $P_{jz}^*$  – значение давления, которое запомнится в узле  $j$  ячейки  $z$ .

Обозначим  $I^{(i)}$  множество всех исходящих из узла  $j$  участков, затраты по которым необходимо учесть на шаге  $i$  вычислительного процесса. Суммирование затрат происходит в соответствии с выражением

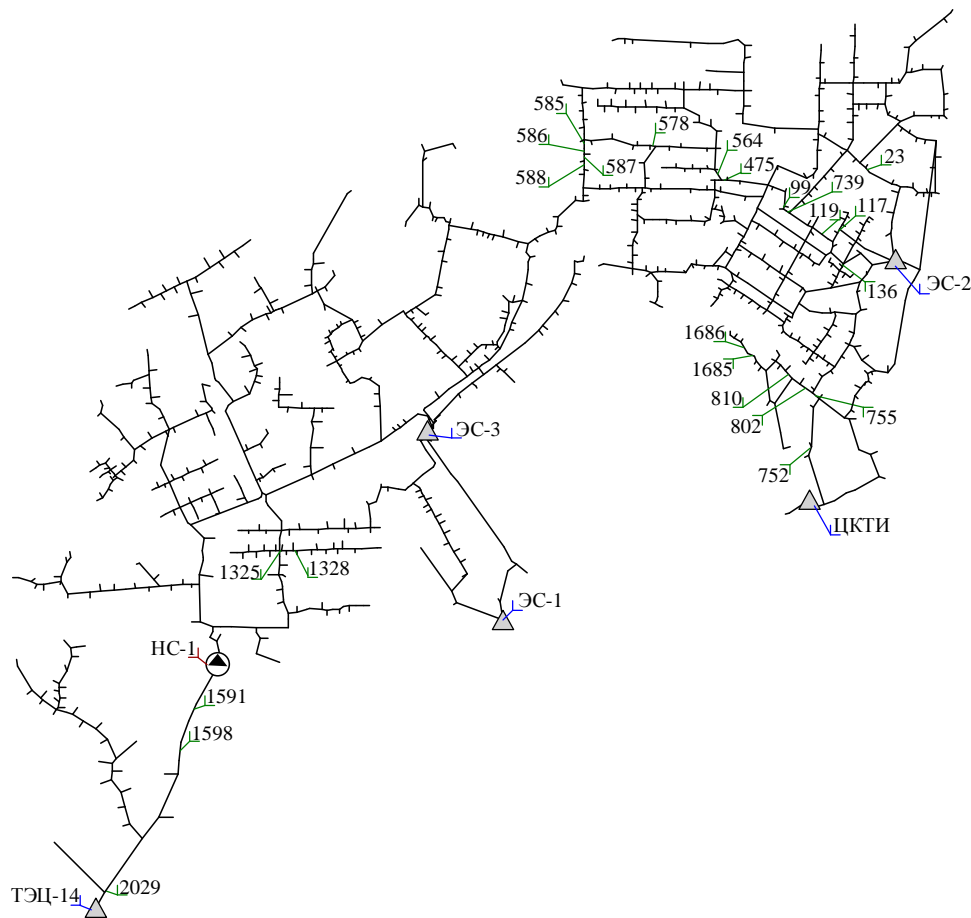
$$Z_{iz}^* = \sum_{r \in I^{(i)}} Z_{rz}, \quad z = 1, \dots, \mu,$$

где  $Z_{iz}^*$  – сумма затрат, которая запомнится на шаге  $i$  вычислительного процесса в ячейке  $z$ .

Основная особенность предложенного алгоритма состоит в том, что для тупиковых ответвлений «прямой ход» ДП выполняется только один раз, а во время итерационного процесса МКО определение параметров выполняется только для кольцевой части сети. При этом решения кольцевой части и тупиковых ответвлений «увязываются» в соответствии с указанными ранее принципами.

**4. Результаты практического применения.** Предложенные методы и алгоритмы, реализованные в программном комплексе СОСНА, применяются на практике для решения задач оптимальной реконструкции ТСС городов и населенных пунктов. Одной из рассчитанных систем является модель ТСС Центрального и Адмиралтейского районов Санкт-Петербурга, которая в укрупненном виде представлена на рис. 2. Отпуск тепла осуществляется от пяти централизованных теплоисточников по магистральным и распределительным двухтрубным тепловым сетям. Двухлинейная модель тепловой сети ТСС Центрального и Адмиралтейского районов Санкт-Петербурга содержит 3238 участков и 3186 узлов подающей и обратной магистралей. В результате применения разработанного авторами методического подхода исходная задача сведена к иерархически связанному набору подзадач определения оптимальных параметров многоконтурных и разветвленных сетей меньшей размерности и сложности. Кольцевые части подающей и обратной магистралей, полученные при многоуровневой декомпозиции модели сети, содержат по 537 участков. Определение оптимальных параметров каждой из этих кольцевых частей

представляет собой подзадачу, размерность которой составляет только 16.6% от исходной задачи.



**Рис. 2.** Схема теплоснабжающей системы Центрального и Адмиралтейского районов Санкт-Петербурга

На схеме (рис. 2) отмечены участки сети с недостаточной пропускной способностью, для которых требуется увеличение диаметров трубопроводов. Для этих участков были определены следующие оптимальные параметры: диаметры трубопроводов, расходы теплоносителя, удельные падения давлений и скорости течения теплоносителя.

До реконструкции ТСС в ней работала насосная станция НС-1 (см. рис. 2) с действующими насосами на подающей и обратной магистралях сети. Рекомендации по реконструкции участков ТСС, полученные в результате выполненных расчетов, обеспечили достаточную пропускную способность сети и позволили получить решение без работающего на подающей линии насоса.

Реализованные в программном комплексе СОСНА алгоритмы, использующие многоуровневую декомпозицию модели тепловой сети, обеспечили получение решения задачи за 6 с. Алгоритм, применявшийся ранее в ИСЭМ СО РАН для решения задач определения оптимальных параметров ТСС, нашел решение задачи за 175 с. Результаты расчетов, полученные с помощью этих алгоритмов программных комплексов предыдущей и новой версий, приведены в табл. 1. В ней представлены значения приведенных затрат в ТСС и капиталовложений, необходимых для реконструкции тепловой сети. Значения целевой функции приведенных суммарных затрат в систему для программного комплекса предыдущей и новой версий совпадают. Таким образом, проведенные расчеты показали, что



предлагаемые в статье методы и алгоритмы позволяют получать результаты, аналогичные результатам, получаемым при помощи традиционных методов. При этом время решения задачи существенно меньше.

**Таблица 1.** Затраты и капиталовложения в тепловую сеть

| Магистраль                  | Приведенные затраты,<br>млн. руб./год | Капиталовложения,<br>млн. руб. |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <b>МКО</b>                  |                                       |                                |
| Обратная                    | 793,36                                | 637,55                         |
| Подающая                    | 859,51                                | 637,55                         |
| Итого                       | 1652,86                               | 1275,09                        |
| <b>Модифицированный МКО</b> |                                       |                                |
| Обратная                    | 793,36                                | 637,55                         |
| Подающая                    | 859,51                                | 637,55                         |
| Итого                       | 1652,86                               | 1275,09                        |

**Заключение.** В статье представлены результаты дальнейшего развития методов для решения сложной задачи определения оптимальных параметров ТСС. Предложен модифицированный метод МКО, позволяющий эффективно решать задачи оптимизации кольцевых систем за счет декомпозиции их моделей на кольцевую часть и тупиковые ответвления. Разработан методический подход к решению задачи определения оптимальных параметров ТСС на основе многоуровневого моделирования, который позволяет перейти от исходной сложной задачи к иерархически связанному множеству подзадач, каждая из которых обладает меньшей размерностью и сложностью в сравнении с исходной задачей. Предложенные методические разработки реализованы в программном комплексе СОСНА. Этот программный комплекс может применяться в научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организациях, занимающихся вопросами развития и реконструкции теплоснабжающих систем.

Разработанное методическое и программное обеспечение позволяет решать практические задачи определения оптимальных параметров многоконтурных ТСС большой (реальной) размерности и применяется при решении практических задач оптимального их развития и реконструкции.

*Исследование выполнено в ИСЭМ СО РАН при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01209).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Илькевич Н.И., Меренков А.П. Многоуровневое моделирование и согласование задач развития систем газоснабжения // Методы управления физико-техническими системами энергетики в новых условиях. Новосибирск: Наука. 1995. С. 41–45.
2. Меренков А. П., Хасилев В. Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука. 1985. 280 с.
3. Сумароков С.В. Метод решения многоэкстремальной сетевой задачи // Экономика и мат. методы. 1976. Т.12. №5. С. 1016–1018.
4. Alperovits E., Shamir U. Design of optimal water distribution systems, Water Resour. Res., vol. 13. 1977. Pp. 885–900.

5. Appleyard J.R. Optimal design of distribution networks // *Build. Serv. Eng.*, vol. 45. 1978. Pp. 191–204.
6. Bellman R.E. *Dynamic programming*. Princeton, NJ: Princeton University Press. 1957.
7. Chiplunkar A., Mehndiratta S., Khanna P. Looped water distribution system optimization for single loading // *J. Env. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 112. 1986. Pp. 264–279.
8. Cunha M., Sousa J. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach // *J. Water Res. Plan. Manage. Div. Soc. Civ. Eng.*, vol. 125. 1999. Pp. 215–221.
9. Eiger G., Shamir U., Ben-Tal A. Optimal design of water distribution networks // *Water Resour. Res.*, vol. 30. 1994. Pp. 2637–2646.
10. Garbai L., Mobnâr L. Optimization of urban public utility networks by discrete dynamic programming // *Colloq. math. societatic Janos Bolyai.*, vol. 12. 1974. Pp. 373–390.
11. Gessler J. Optimization of pipe networks // *Proc. of the Ninth International symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control*, Lexington: University of Kentucky, 1982.
12. Goulter I. Systems analysis in water distribution system design: from theory to practice // *J. Water. Res. Plan. Manage. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol.118. 1992. Pp. 238–248.
13. Lansey K., Mays L. Water distribution system design under uncertainties // *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 115. 1989. Pp. 1401–1418.
14. McClymont K., Keedwell E., Savic D. An analysis of the interface between evolutionary algorithm operators and problem features for water resources problems. A case study in water distribution network design // *Environ Modell Softw*, vol. 69. 2015. Pp. 414–424.
15. Nicklow J. W., Reed P. M., Savic D., Dessalegne T., Harrell L., Chan-Hilton A., Karamouz M., Minsker B., Ostfeld A., Singh A., Zechman E. State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management // *J. Water Res. Plan. Man.*, vol. 136. 2010. Pp. 412–432.
16. Novitskii N. Calculation of the flow distribution in hydraulic circuits based on their linearization by nodal models of secants and chords // *Therm. Eng.*, vol. 60. 2013. Pp. 1051–1060.
17. Savic D., Walters G., Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks // *J. Water Resour. Plann. Manag.*, vol. 123. 1997. Pp. 67–77.
18. Shamir U., Howard C.D.D. Water distribution network analysis // *J. Hydraul. Div. ASCE*, vol. 94. 1968. Pp. 219–234.
19. Sokolov D., Stennikov V., Oshchepkova T., Barakhtenko E. The new generation of the software system used for the schematic-parametric optimization of multiple-circuit heat supply systems // *Therm. Eng.*, vol. 59. 2012. Pp. 337–343.
20. Martin D.W., Peters G. The application of Newton’s method to network analysis by digital computers // *IWES J.*, vol. 17. 1963. Pp. 115–129.
21. Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Oshchepkova T. Problems of modeling and optimization of heat supply systems: new methods and software for optimization of heat supply system parameters // *Sustaining power resources through energy optimization and engineering premier reference source*. USA: IGI Global. 2016. Pp. 76–101.
22. Stennikov V., Barakhtenko E., and Sokolov D. Use of multilevel modeling for determining optimal parameters of heat supply systems // *Therm. Eng.*, vol. 64. 2017. Pp. 518–525.

23. Todini E., Pilati S. A gradient method for the solution of looped pipe networks // Computer applications in water supply. vol. 1. 1988. Pp. 1–20.
  24. Tokarev V., Shalaginova Z. Technique of multilevel adjustment calculation of the heat-hydraulic mode of the major heat supply systems with the intermediate control stages // Therm. Eng., vol. 63. no 1. 2016. Pp. 68–77.
- 

**UDK 004.942**

**DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR DETERMINATION OF OPTIMAL  
PARAMETERS OF HEAT SUPPLY SYSTEMS**

**Dmitry V. Sokolov**

PhD., Senior Researcher, e-mail: sokolov\_dv@isem.irk.ru

**Evgeny A. Barakhtenko**

PhD., Senior Researcher, e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

**Abstract.** Determining the optimal parameters of heat supply systems involves finding a solution that provides the best network capacity by replacing pipelines and installing (upgrading) pumping stations. In this case, we usually solve the complex problem of nonlinear programming with discrete and continuous variables. The ESI SB RAS has developed effective methods for its solution. A method based on dynamic programming was developed for a tree-like network. For ring networks, there is a multi-loop optimization method based on the principle of sequential improvement of the solution. An important feature of these methods is that they allow you to fully take into account the properties of complex mathematical models that determine the features of the equipment used, methods of its installation and operation. The paper presents the results of the further development of algorithms for solving the complex problem of determining the optimal parameters of heat supply systems. A modified method and algorithms for determining the optimal parameters of heating systems are proposed. The proposed method and algorithms implemented in the SOSNA software. SOSNA is used to solve problems of optimal reconstruction of heat supply systems of cities.

**Keywords:** dynamic programming, multi-loop optimization method, multi-level modeling, optimal parameters of the heat supply system, hierarchical model of the heat supply system, software

**References**

1. Ilkevich N., Merenkov A. Mnogourovnevoe modelirovanie i soglasovanie zadach razvitiya sistem gazosnabzheniya [Multilevel modeling and coordination of tasks for the development of gas supply systems] // Metody upravleniya fiziko-tekhnicheskimi sistemami energetiki v novykh usloviyakh [Methods for control of physical-technical energy systems under new conditions]. Novosibirsk. Nauka = Science. 1995. Pp. 41–45. (in Russian)

2. Merenkov A., Khasilev V. *Teoriya gidravlicheskih tsepei* [The Theory of Hydraulic Circuits. Moscow], Moscow. Nauka = Science. 1985. 280 p. (in Russian)
3. Sumarokov S. *Metod resheniya mnogoekstremal'noi setevoi zadachi* [A method of solving the multiextremal network problem] // *Ekonomika i matematicheskie metody = Economy and math. methods.* 1976. vol. 12. Pp. 1016–1018. (in Russian)
4. Alperovits E., Shamir U. Design of optimal water distribution systems, *Water Resour. Res.*, vol. 13. 1977. Pp. 885–900.
5. Appleyard J.R. Optimal design of distribution networks // *Build. Serv. Eng.*, vol. 45. 1978. Pp. 191–204.
6. Bellman R.E. *Dynamic programming.* Princeton, NJ: Princeton University Press. 1957.
7. Chiplunkar A., Mehndiratta S., Khanna P. Looped water distribution system optimization for single loading // *J. Env. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 112. 1986. Pp. 264–279.
8. Cunha M., Sousa J. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach // *J. Water Res. Plan. Manage. Div. Soc. Civ. Eng.*, vol. 125. 1999. Pp. 215–221.
9. Eiger G., Shamir U., Ben-Tal A. Optimal design of water distribution networks // *Water Resour. Res.*, vol. 30. 1994. Pp. 2637–2646.
10. Garbai L., Mohnâr L. Optimization of urban public utility networks by discrete dynamic programming // *Colloq. math. societatis Janos Bolyai.*, vol. 12. 1974. Pp. 373–390.
11. Gessler J. Optimization of pipe networks // *Proc. of the Ninth International symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control*, Lexington: University of Kentucky, 1982.
12. Goulter I. Systems analysis in water distribution system design: from theory to practice // *J. Water. Res. Plan. Manage. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol.118. 1992. Pp. 238–248.
13. Lansey K., Mays L. Water distribution system design under uncertainties // *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 115. 1989. Pp. 1401–1418.
14. McClymont K., Keedwell E., Savic D. An analysis of the interface between evolutionary algorithm operators and problem features for water resources problems. A case study in water distribution network design // *Environ Modell Softw*, vol. 69. 2015. Pp. 414–424.
15. Nicklow J. W., Reed P. M., Savic D., Dessalegne T., Harrell L., Chan-Hilton A., Karamouz M., Minsker B., Ostfeld A., Singh A., Zechman E. State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management // *J. Water Res. Plan. Man.*, vol. 136. 2010. Pp. 412–432.
16. Novitskii N. Calculation of the flow distribution in hydraulic circuits based on their linearization by nodal models of secants and chords // *Therm. Eng.*, vol. 60. 2013. Pp. 1051–1060.
17. Savic D., Walters G., Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks // *J. Water Resour. Plann. Manag.*, vol. 123. 1997. Pp. 67–77.
18. Shamir U., Howard C.D.D. Water distribution network analysis // *J. Hydraul. Div. ASCE*, vol. 94. 1968. Pp. 219–234.
19. Sokolov D., Stennikov V., Oshchepkova T., Barakhtenko E. The new generation of the software system used for the schematic-parametric optimization of multiple-circuit heat supply systems // *Therm. Eng.*, vol. 59. 2012. Pp. 337–343.
20. Martin D.W., Peters G. The application of Newton's method to network analysis by digital computers // *IWES J.*, vol. 17. 1963. Pp. 115–129.

21. Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Oshchepkova T. Problems of modeling and optimization of heat supply systems: new methods and software for optimization of heat supply system parameters // Sustaining power resources through energy optimization and engineering premier reference source. USA: IGI Global. 2016. Pp. 76–101.
22. Stennikov V., Barakhtenko E., and Sokolov D. Use of multilevel modeling for determining optimal parameters of heat supply systems // Therm. Eng., vol. 64. 2017. Pp. 518–525.
23. Todini E., Pilati S. A gradient method for the solution of looped pipe networks // Computer applications in water supply. vol. 1. 1988. Pp. 1–20.
24. Tokarev V., Shalaginova Z. Technique of multilevel adjustment calculation of the heat-hydraulic mode of the major heat supply systems with the intermediate control stages // Therm. Eng., vol. 63. no 1. 2016. Pp. 68–77.