
Модели ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

©Терехов С. М., Немтинов В. А., Корнилов К. С., 2017

DOI: 10.18255/1818-1015-2018-2-217-231

УДК 004.942

Математическая модель подключения оптимального числа потенциальных потребителей тепла к тепловой сети

Терехов С. М., Немтинов В. А., Корнилов К. С.

получена 11 декабря 2017

Аннотация. В современном мире эффективное использование энергоносителей является крайне важным аспектом человеческой деятельности. В частности, системы теплоснабжения имеют значительное экономическое, экологическое и социальное значение как для потребителей тепла, так и для теплоснабжающих организаций. От эффективности функционирования систем теплоснабжения зависит экономическое состояние всех участников процесса теплоснабжения. От надежности функционирования систем зависят жизненно важные процессы, такие как работа больниц и промышленных предприятий. При такой тесной сетевой коммуникации критически важно безотказное и эффективное функционирование систем энергоснабжения. В данной статье рассмотрены пути повышения эффективности работы систем теплоснабжения. Представлена математическая модель для планирования работы систем теплоснабжения путем подключения оптимального множества новых потребителей тепла. Для отдельно взятого потенциального потребителя, каждый раз, когда возникает альтернативный вариант подключения этого потребителя к существующей тепловой сети, возможно выбрать единственное оптимальное решение. Это становится возможно за счет наложения ограничений и процедуры отбора вариантов из подмножества бинарных переменных, соответствующих альтернативам. Представлена процедура поиска оптимального числа потребителей для подключения к существующей тепловой сети, являющаяся обоснованием для увеличения числа существующих потребителей. Проведено тестирование и представлены результаты работы математической модели на примере тестовых тепловых сетей, сконфигурированных на основе ручного ввода основных условий и параметров работы. Определены направления дальнейших исследований по повышению эффективности систем теплоснабжения и интеграции представленной математической модели с современными программными комплексами.

Ключевые слова: системный подход, система теплоснабжения, оптимизация

Для цитирования: Терехов С. М., Немтинов В. А., Корнилов К. С., "Математическая модель подключения оптимального числа потенциальных потребителей тепла к тепловой сети", *Моделирование и анализ информационных систем*, **25:2** (2018), 217–231.

Об авторах:

Терехов Сергей Михайлович, orcid.org/0000-0002-4103-1167, аспирант,
Тамбовский государственный технический университет,
Советская ул., 106, г. Тамбов, 393000 Россия, e-mail: Stpodiumz3@gmail.com

Немтинов Владимир Алексеевич, orcid.org/0000-0003-2917-3610, д-р техн. наук, профессор,
Тамбовский государственный технический университет,
Советская ул., 106, г. Тамбов, 393000 Россия, e-mail: nemtinov@mail.gaps.tstu.ru

Корнилов Кирилл Сергеевич, orcid.org/0000-0003-1729-8360, младший научный сотрудник,
Тамбовский государственный технический университет,
Советская ул., 106, г. Тамбов, 393000 Россия, e-mail: i_sirotinka@rambler.ru

Введение

Существующие методики проектирования и расчета [1–2] систем теплоснабжения не позволяют с высокой степенью точности планировать работу тепловых сетей с минимальными издержками из-за большого количества неучтенных факторов для каждой отдельно взятой системы. Потребность в оптимизации работы таких систем обусловлена высокой стоимостью генерации тепла и прогнозируемым [3] ростом цен на энергоносители.

В связи с потребностью в оптимизации существующих тепловых сетей в данной работе рассматриваются вопросы выбора оптимального множества новых потребителей для подключения к существующей системе теплоснабжения при максимизации реализуемой тепловой энергии и минимизации затрат на реконструкцию тепловых сетей. С помощью представленной математической модели подключения оптимального числа потребителей, а также процедуры поиска оптимального числа потребителей, производится расчет состояния устойчивого функционирования системы с учетом технических требований к существующей системе.

1. Постановка задачи исследования

Задача исследования – выбор оптимального множества новых потребителей $opt(V_P)$ для подключения к существующей системе теплоснабжения при максимизации реализуемой тепловой энергии $max(PI_v)$ и минимизации затрат на реконструкцию сетей $min(C_r)$.

Задача состоит в определении подмножества потенциальных потребителей, которых необходимо подключить к существующей тепловой сети, для максимизации объема реализуемой энергии при определенных теплогидравлических возможностях тепловой сети, в соответствии со всеми требованиями [4] к качеству услуг, экологии, безопасности, предъявляемым к тепловым сетям.

Обоснованием для увеличения числа существующих потребителей, а значит, наращивания теплопроизводительности тепловой сети является сопоставление фактических и максимальных показателей функционирования тепловой сети. Индекс фактического u_{fact}^s и индекс потенциального u_{potn}^s использования ресурсов существующей системы теплоснабжения являются условными обобщенными показателями степени загруженности тепловой сети.

Если по результатам анализа $u_{fact}^s \geq u_{potn}^s$ – тепловая сеть перегружена или работает на пределе своих технических возможностей, при $u_{fact}^s < u_{potn}^s$ существует возможность увеличить теплопроизводительность тепловой сети, а значит, подключить потенциальных потребителей тепла:

$$u_{potn}^s(R(x)) = (Q_{max}^s, opt(V_P)) | \xi_{sum}^s, RI_i, C_r; \quad (1)$$

$$u_{fact}^s(R(x)) = (Q_{fact}^s, ct) | \xi_{sum}^s, RI_i, C_r. \quad (2)$$

Если $u_{potn}^s(R(x)) > u_{fact}^s(R(x))$, тогда постановка подзадачи определения опти-

мального множества потенциальных потребителей в общем виде будет выглядеть так:

$$opt(V_p) = (Q_{max}^s, opt(V_p), R(x)) | \xi_{sum}^s, RI_i, C_r; \quad (3)$$

где Q_{max}^s , $opt(V_p)$ – критерии оптимальности поставленной задачи, $R(x)$ – режим устойчивого функционирования системы, RI_i^n , $n := (0, 1)$, $i \in I$ – исправность резервируемого i -элемента системы, C_r – экономические ограничения в общем виде, ξ_{sum}^s – совокупность интервальных факторов, влияющих на функционирование системы теплоснабжения.

Режим ($R(x)$) функционирования системы теплоснабжения представляет собой определенный набор параметров работы (Flx, \dots, Fkx), изменение которых зависит от изменения интервальных факторов ξ_n^s .

Структура внешних и внутренних интервальных факторов, влияющих на процесс теплоснабжения: $\xi_{sum}^s = (\xi_{11}^s, \xi_{12}^s, \xi_2^s, \xi_3^s, \xi_4^s, \xi_5^s)$, где ξ_{11}^s – вектор тепловой нагрузки на отопление в момент времени t ; ξ_{12}^s – вектор тепловой нагрузки на горячее водоснабжение в момент времени t ; ξ_2^s – вектор расхода сетевой воды в системе в момент времени t ; ξ_3^s – вектор температуры внешней среды в момент времени t ; ξ_4^s – вектор неисправностей n -элемента системы S в момент времени t ; ξ_5^s – вектор неисправностей в i -узле.

2. Математическая модель системы

Представим математическую модель подключения оптимального числа потребителей, основанную на графовом представлении системы теплоснабжения, в которой узлы и дуги графа соответствуют некоторым элементами или группам элементов сети теплоснабжения. Рисунок 1 иллюстрирует пример графового представления схемы сети теплоснабжения. Каждый узел (обычно это тепловая камера или тепловой пункт) тепловой сети представлен на графе в виде пары узлов: один с положительным индексом ассоциируется с питающей линией, второй парный узел имеет отрицательный индекс и ассоциируется с обратным трубопроводом. Графовая модель системы позволяет идентифицировать источник тепла, потребителей тепла и промежуточные узлы тепловой сети.

Ориентация дуг графа соответствует направлениям движения теплоносителя в питающей и возвратной линии тепловой сети. Существующие связи отмечены сплошными дугами, потенциальные связи с потенциальными потребителями отмечены на графе пунктирными линиями.

Компоновка элементов существующей тепловой сети связана с начальной конфигурацией из одного или нескольких источников тепла и подключенным к этим источникам тепла множеством потребителей тепла.

Дано: ориентированный граф $G = (V, A)$, где V – множество узлов, A – множество ребер графа. Множество узлов включает в себя узлы v с положительным индексом $v > 0$, принадлежащие питающей линии теплосети, узлы с отрицательным индексом $-v$, принадлежащие обратной линии теплосети. Множество V раскладывается на ряд соответствующих подмножеств:

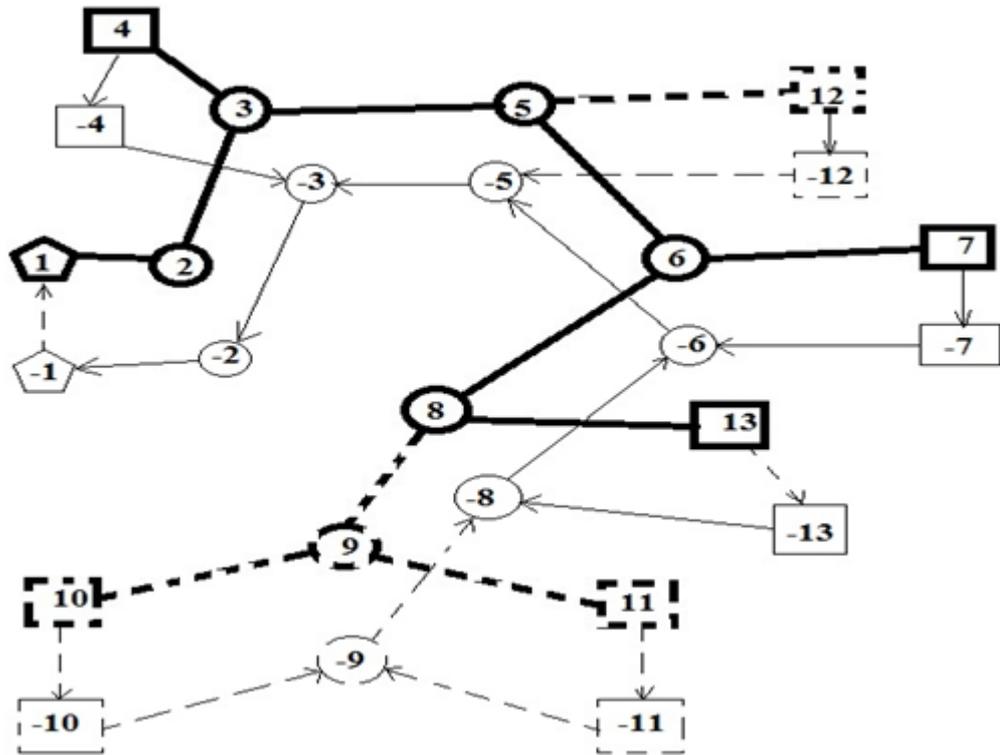


Рис. 1. Графовое представление типовой тепловой сети

Fig. 1. Graph representation of a typical heat network

V_I – множество источников тепла;

V_S – множество узлов существующих потребителей тепла;

V_P – множество узлов потенциальных потребителей тепла;

V_T – множество узлов тепловых камер, $V_T = V_{TE} \cup V_{TP}$,

где V_{TE} – подмножество существующих узлов-тепловых камер;

V_{TP} – подмножество потенциальных узлов-тепловых камер;

V_E – множество всех существующих узлов теплосети, включая потребителей тепла,

$V_E = V_S \cup V_{TE}$.

Множество дуг A в свою очередь раскладываем на пять подмножеств:

$A = A_R \cup A_S \cup A_F \cup A_P \cup A_I$.

Множество $A_F = A_{FE} \cup A_{FP}$ включает все линии подающего трубопровода, как существующие – подмножество A_{FE} , так и потенциальные – подмножество A_{FP} .

Множество $A_R = A_{RE} \cup A_{RP}$ включает все линии обратного трубопровода, как существующие A_{RE} , так и потенциальные A_{RP} .

Аналогично A_S – множество существующих концевых линий теплообмена, A_P – множество потенциальных концевых линий теплообмена, A_I – множество линий трубопровода на источниках тепла.

Спрос на тепло каждого отдельного потребителя $v \in (V_S \cup V_P)$ рассчитываем

в виде требуемого теплового потока μ_e теплоносителя, соответствующего дуге расчетного потребителя $e = (v, -v) \in (A_S \cup A_P)$.

Общая дуга линии подачи тепла обозначается как $e = (i, j) \in A_F$, а соответствующая дуга линии обратного трубопровода обозначается как $r(e) = (-j, -i) \in A_R$. Дуги, соединяющие потребителей $(v, -v)$, $v \in (V_S \cup V_P)$. Дуги в пунктах теплоснабжения представлены как $(-v, v)$, $v \in V_I$. Для каждой дуги, относящейся к линии трубопровода $e = (i, j) \in (A_F \cup A_R)$, определяем обычную ориентацию от узла i до узла j , где $i < j$.

Экономические параметры математической модели: прибыль будущих периодов от подключения потенциальных потребителей к сети теплоснабжения, затраты на монтаж и наладку тепловых сетей для подключения потенциальных потребителей. Для каждой дуги, связывающей теплообменник с потенциальными потребителями ($e = (v, -v) \in A_P$), параметр R_e означает чистую прибыль от подключения этой дуги к тепловой сети. Параметр чистой прибыли означает разность между доходом будущих периодов (выбирается расчетный временной горизонт T , обычно 10 лет и более) от реализованной тепловой энергии подключенным потенциальным потребителям и затратами на техническое подключение расчетных потребителей. Более того, для каждой потенциальной линии трубопровода (дуги $e = (i, j) \in A_{FP}$) затраты C_e составляют общую стоимость монтажа и эксплуатации этой линии, включая: материалы, топливо, монтаж, пуско-наладочные работы, обслуживание, оплату труда. Для упрощения математической модели будем ассоциировать стоимость прокладки питающей линии тепловой сети со стоимостью прокладки смежной обратной линии тепловой сети.

Физические характеристики тепловой сети описываются несколькими параметрами. Давление на каждом из функционирующих узлов теплосети должно быть выше минимально установленного значения P^{min} , тогда как на каждом из узлов источника тепла $v \in V_I$ давление теплоносителя не должно превышать максимально предельное значение давления для подающей линии P_v^{max} . Каждая дуга, ассоциированная с трубопроводом $e = (i, j) \in (A_F \cup A_R)$, ограничена предельно максимальной тепловой нагрузкой μ_e^{max} , зависящей от диаметра трубы и заданной максимальной скорости теплоносителя. Для каждой дуги, ассоциированной с потребителем, $e = (v, -v) \in (A_E \cup A_P)$, уровень снижения давления должен быть выше предельно минимального значения ΔP^{min} .

Задача исследования заключается в нахождении подмножества потенциальных потребителей тепла, которые могут быть присоединены к существующей системе теплоснабжения в соответствии с принципами максимизации чистой прибыли и в рамках технических возможностей системы теплоснабжения обеспечивать тепло потребителей в соответствии с предъявляемыми требованиями к объему предоставляемой тепловой энергии. Как было сказано, системы теплоснабжения проектируются с учетом возможности функционирования системы в пиковых нагрузках. Будем использовать бинарные переменные x_e , $e = (v, -v) \in A_P$, обозначающие состояние отдельного потребителя или множества потребителей, x_e принимает значение 1, если потребитель $v \in V_P$ подключен к сети, и 0 в ином случае. Бинарные переменные y_e , $e = (i, j) \in A_{FP}$ обозначают состояние функционирования отдельной питающей линии тепловой сети, y_e принимает значение 1, если выбранная линия трубопрово-

да используется оптимально, в ином случае – 0. Для отражения гидравлического режима функционирования системы будем использовать переменные узлового давления P_v , $v \in V$, переменные потерь давления в трубах ΔP_e , переменные потока теплоносителя в трубах m'_e , $e \in A$. В результате получаем математическую модель функционирования системы согласно указанным параметрам работы:

$$f(R_x^s) = \sum_{e \in V_P V_e} (Q_e^{V_P V_e}, P_v, m'_e, x_e, m'_e, y_e, \Delta P_e x_e), \quad (4)$$

$$f(R_e, C_e) = \max \sum_{e \in A_P} R_e x_e - \min \sum_{e \in A_{FP} C_e y_e}, \quad (5)$$

$$f(R_e) = \max \sum_{e \in A_P} (R_e x_e + R_{ep}), \quad (6)$$

$$f(C_e) = \min \sum_{e \in A_{FP}} (akC_e y_e + bC_e y_e + cC_e y_e + dC_e y_e), \quad (7)$$

$$C_e^{V_P V_e} \leq \Delta C_e^{max} \forall v \in V, \quad (8)$$

$$m'_e = \mu_e \forall e \in A_S, \quad (9)$$

$$m'_e = \mu_e x_e \forall e \in A_P, \quad (10)$$

$$m'_e \leq \mu_e^{max} x_e \forall e \in A_{FE}, \quad (11)$$

$$m'_e \leq \mu_e^{max} y_e \forall e \in A_{FP}, \quad (12)$$

$$m'_{r(e)} = m'_e \forall e \in A_F, \quad (13)$$

$$\sum_{e=(i,v) \in E} m'_e - \sum_{e=(v,j) \in E} m'_e = 0 \forall v \in V, \quad (14)$$

$$P_v \leq P_v^{max} \forall v \in V_I, \quad (15)$$

$$P_v \geq P^{min} \forall v \in V, \quad (16)$$

$$\Delta P_e \leq \Delta P^{max} \forall e \in A_I, \quad (17)$$

$$\Delta P_e \geq \Delta P^{min} \forall e \in A_S, \quad (18)$$

$$\Delta P_e \geq \Delta P^{min} x_e \forall e \in A_P, \quad (19)$$

$$\Delta P_e = f_L(m'_e) \forall e \in A_F \cup A_R, \quad (20)$$

$$m'_e \geq 0 \forall e \in A_F \cup A_R, \quad (21)$$

$$P_v \geq 0 \forall v \in V, \quad (22)$$

$$\Delta P_e \geq 0 \forall e \in A, \quad (23)$$

$$Q_e^{V_P V_E} \leq 0,85 \cdot Q_e^{max} \forall v \in V, \quad (24)$$

$$Q_e^{V_P} \geq 0 \forall e \in A, \quad (25)$$

$$Q_e^{V_e} \geq 0 \forall e \in A, \quad (26)$$

$$Q_e^{V_P} \leq Q_e^{max} \forall e \in A, \quad (27)$$

$$Q_e^{V_e} \leq Q_e^{max} \forall e \in A, \quad (28)$$

$$x_e \in (0, 1) \forall e \in A_P, \quad (29)$$

$$y_e \in (0, 1) \forall e \in A_{FP}. \quad (30)$$

Целевая функция (5) максимизации чистой прибыли при оптимальной работе системы определяется как разность между чистой прибылью от выручки будущих периодов и стоимостью технического присоединения потенциальных потребителей к тепловой сети.

Ограничения данной математической модели подключения оптимального числа потребителей могут быть сгруппированы в четыре категории. В первой категории ограничения (9) и (10) определяют расход m'_e в р-узлах, относящихся к потребителям: существующим потребителям, узловые расходы которых определены расчетным тепловым спросом этих потребителей. Вместе с тем $x_e = 1$ для потенциальных потребителей только в том случае, когда эти потенциальные потребители уже подключены к существующей тепловой сети. Неравенства (11), (12) определяют верхнюю границу теплового потока сети. Там, где верхняя граница теплового потока равна нулю, – потенциальная линия тепловой сети не используется, $y_e = 0$. Тепловой поток обратного трубопровода $r(e)$ принимает значение (13) эквивалентно значению питающей линии на рассматриваемом участке.

Вторая категория ограничений относится к узлам тепловой сети и отражает связь источников тепла с потребителями по трубопроводу и другим элементам, относящимся к рассматриваемым участкам тепловой сети. Уравнение (14) иллюстрирует баланс входящего и исходящего потоков каждого рассматриваемого узла

тепловой камеры. Нижняя граница давления в узлах тепловых камер установлена в (16), в то время как верхние границы давления на i -узлах источников тепла установлены неравенством (15).

Третья категория ограничений относится к потерям давления на участках трубопровода тепловой сети. Максимально установленное значение потерь давления теплоносителя на источнике теплоснабжения содержится в (17), наряду с минимально допустимыми потерями давления концевых существующих (18) и потенциальных потребителей (19). Линеаризованная зависимость между расходом и давлением в системе отражена в равенстве (20). Важно отметить, что существуют различные нормы потерь давления для различных типов и профилей трубопровода, соответственно разные профили труб в дальнейшем развитии математической модели должны быть описаны, например, средствами выбора контрольных точек $b_0 \dots b_n$ и аппроксимации функции потери давления в системе теплоснабжения по большому количеству контрольных точек для более точных результатов.

Четвертая группа ограничений (21), (22), (23) включает в себя множество нижних оценок для непрерывных переменных расхода теплоносителя и давления в трубопроводе. Присвоение бинарных переменных указывается в (29), (30).

Представленная выше математическая модель подключения оптимального числа потребителей имеет общий вид и не позволяет решать прикладные задачи проверки возможности подключения потенциальных потребителей к тепловой сети. Это связано с неполнотой математической модели системы. Так, например, направление потока теплоносителя вдоль подающей и обратной линии трубопровода определено неявно. Для определения направления потока в распределительных и магистральных сетях используются соответствующие бинарные переменные. Кроме того, переменные давления и переменные расхода для существующих узлов тепловой сети должны быть дублированы для подающей и обратной линий соответственно, чтобы учесть направление потока и потери давления в рассматриваемом направлении.

Некоторые практические требования, предъявляемые к системе теплоснабжения, могут быть включены в представленную математическую модель подключения оптимального числа потребителей введением ограничений. Введены ограничения, обусловленные потребностью в ограничении максимальной величины давления теплоносителя на отдельных участках тепловой сети аналогично с (15), (17) для подмножества узлов и дуг графовой модели тепловой сети. Для учета стоимости передачи теплоносителя, учета минимальных значений расхода и давления теплоносителя добавляем в целевую функцию представленной математической модели предельные ограничения и стоимостные величины, подходящие для отдельно взятого примера тепловой сети.

Экономические параметры также должны быть учтены путем добавления ограничений на совокупные затраты на реализацию проекта подключения потенциального потребителя. Объем совокупных затрат может сильно различаться для отдельных потенциальных потребителей (например, частного сектора или промышленного предприятия) и зависит от согласования объема финансирования с потенциальным потребителем.

Стоимость подключения отдельного узла формируется следующим образом (31):

$$C_{e(n)}^V = k \cdot (C_{e(n)}^a + C_{e(n)}^b) + C_{e(n)}^c + C_{e(n)}^d, \quad (31)$$

где $C_{e(n)}^a$ – усредненная стоимость одного метра прямой и обратной линий трубопровода, включая запорную арматуру и т.д.; $C_{e(n)}^b$ – средняя стоимость прокладки 1 погонного метра теплотрассы в отдельно взятой местности; k^* – длина линии теплотрассы до потребителя (м); $C_{e(n)}^c$ – совокупные затраты на обвод инфраструктурных и коммуникационных элементов, восстановление дорожного покрытия и т.д.; $C_{e(n)}^d$ – совокупные затраты на модернизацию источников тепла.

Для решения данной задачи использован алгоритм перебора для сужения множества допустимых решений для каждого потенциального потребителя, с целью создания оптимального сценария подключения. Для решения подобных задач широко используется метод ветвей и границ [6], поэтому далее будет использован именно этот метод. Отдельно решается подзадача трассировки от источников тепла к потребителям [7].

Диапазоны значений решения по верхней границе (32) и эвристического решения (33) вычисляются следующим образом:

$$f(U) = (U - Z)/Z \cdot 100, \quad (32)$$

$$f(H) = (H - Z)/Z \cdot 100, \quad (33)$$

где U – экстремальное значение по верхней границе диапазона допустимых решений, H – экстремальное значение эвристического решения, Z – значение оптимального решения задачи.

3. Результаты проверки математической модели

Для анализа представленной математической модели подключения оптимального числа потребителей на различных тепловых сетях сгенерируем набор из 100 тепловых сетей различных характеристик и конфигураций. Будем использовать 5 классов тепловых сетей, характеризующихся различной величиной, в частности количеством ассоциированных с существующими потребителями узлов V_E . Рассмотрим тепловые сети с показателем $|V_E| \in (100, 200, 300, 400, 500)$. Для каждого класса тепловой сети рассмотрим 4 различных варианта количественного состава потенциальных потребителей $|V_P|$, определенных пропорционально $|V_E|$ и описанных в виде: $|V_P| = |V_E|/2$; $|V_P| = |V_E|$; $|V_P| = |V_E| + |V_E|/2$; $|V_P| = 2 * |V_E|$. Для каждой пары $|V_P|$ и $|V_E|$ рассмотрим 5 различных состояний функционирования, которым соответствует некоторый набор параметров функционирования.

Для $|V_E|$ присваиваем коэффициент, соответствующий окружности с диаметром D (км) тепловой сети, обеспечивающей потребности группы существующих потребителей, относящихся к $|V_E|$. Будем считать, что $D = 5$, если $|V_E| \leq 200$, иначе $D = 10$. Каждому узлу в пределах окружности с диаметром D присваивается случайная координата. Дугам, соединяющим узлы и обозначающим линии трубопровода, присваиваются веса, равные евклидовому расстоянию между узлами, замыкающими

эти дуги. Узел с наименьшим значением координаты по оси абсцисс принимается за источник тепла. Так можно получить сгенерированное дерево, обозначающее тепловую сеть с одним источником тепла, а узлы – ветви этого дерева будут обозначать существующих потребителей тепла.

Далее генерируются p -узлы, обозначающие группы потенциальных потребителей, располагающиеся рядом с дугами существующей тепловой сети. p -узлы соединяются с существующей тепловой сетью через потенциальные p -дуги в точке ближайшей к существующей тепловой сети. Если ближайшей к p -узлу является r -дуга, то p -узел подключается к потенциальной r -дуге, образуя форму ветви дерева. Каждый существующий и потенциальный потребитель ассоциирован со случайно сгенерированным объемом теплопотребления PI_e , равным по среднему значению 75 кВт за месяц. Отметим, что такое значение составляет примерно 60 % от типичного теплопотребления. Требуемый расход теплоносителя вдоль дуг существующих потребителей вычисляется при помощи отношений:

$$\mu_e = PI_e / (\Delta T \cdot c_p), \quad (34)$$

где $\Delta T = 27$ К, $c_p = 4,18$.

Расход теплоносителя на p -дугах, ассоциированных с потенциальными потребителями, эквивалентен требуемому расходу теплоносителя в конечных p -узлах, ассоциированных с потенциальными потребителями. Диаметр труб (см), требуемый для подключения существующих и потенциальных потребителей, округляется до следующих существующих стандартных значений диаметра трубопровода (25, 32, 40, 50, 65, 80, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600). Когда диаметры и длины трубопровода известны, можно посчитать их стоимость и определить коэффициенты K_1 , K_2 , используемые в уравнении расчета потерь давления вдоль рассматриваемого трубопровода.

Результаты моделирования представлены в таблицах [1–2], описаны сценарии с различными значениями V_P и V_E , где

- пара $|V_P|/|V_E|$ – отношение числа p -узлов, ассоциированных с потенциальными потребителями, к числу всех существующих узлов тепловой сети;
- $|V_s|$ – среднее число существующих s -узлов, ассоциированных с существующими потребителями тепла;
- $con.V_p$ – число (шт.) подключенных потребителей тепла;
- $V_{s(pow)}$ – среднее значение требуемой теплопроизводительности для обеспечения существующих потребителей (кВт);
- $V_{p(pow)}$ – среднее значение требуемой теплопроизводительности для обеспечения потенциальных потребителей (кВт);
- $con.V_{p(\%)}$ – среднее значение подключенных потенциальных потребителей тепла;
- $con.V_{p(pow)}$ – среднее значение общей теплопроизводительности (кВт) для обеспечения подключенных потенциальных потребителей тепла;
- $f(U)$ и $f(H)$ – диапазоны значений решений по верхней границе и эвристических решений соответственно;
- $B\&C$ – среднее значение – количество $B\&C$ узлов.

Предложены различные сценарии, рассчитанные для разных объемов выработки

ваемого тепла и максимального числа потенциальных узлов, которые могут быть подключены к существующей системе теплоснабжения.

Компьютерное тестирование проведено при помощи программного продукта IBM Ilog Cplex для решения моделей частично-целочисленного линейного программирования методом ветвей и границ [6].

Таблица 1. Результаты выполнения первого сценария
 Table 1. The results of the first scenario

$ V_P / V_E $	$ V_s $	$V_{s(pow)}$, кВт	$V_{p(pow)}$, кВт	con. V_p	con. $V_p(\%)$	con. $V_{p(pow)}$, кВт	con. $V_{p(pow)}$ (%)	$f(U)$ (%)	$f(H)$ (%)	B & C узлы
50/100	22,00	1561	3436	35	69,20	3041	88,52	0,24	0,00	0,0
100/100	21,00	1621	7553	66	66,00	6243	82,65	0,73	-0,31	19,8
150/100	23,60	1750	11671	104	69,20	10077	86,34	0,10	-0,06	4,2
200/100	22,20	1578	15918	136	68,10	13487	84,72	0,16	-0,25	17,6
100/200	44,40	3381	7513	71	71,40	6740	89,71	0,19	0,00	0,0
200/200	43,00	3689	14926	144	71,90	13380	89,65	0,16	-0,04	6,2
300/200	43,20	3281	22941	204	68,07	19816	86,38	0,17	-0,03	28,2
400/200	45,80	3149	24995	236	58,90	20108	80,45	0,14	-0,43	69,0
150/300	65,20	4828	11011	113	75,07	10107	91,79	0,02	0,00	0,0
300/300	65,20	4994	22622	215	71,73	20140	89,03	0,22	-0,21	23,2
450/300	66,00	5099	33736	331	73,47	30508	90,43	0,07	-0,10	28,6
600/300	64,00	3707	35707	356	59,40	28817	80,70	0,18	-0,19	81,6
200/400	98,20	6985	14854	149	74,40	13504	90,91	0,09	-0,07	3,6
400/400	86,40	6188	29583	293	73,30	26848	90,76	0,18	-0,06	13,6
600/400	91,40	6855	45611	444	74,03	41122	90,16	0,09	-0,21	58,6
800/400	87,00	5323	47398	512	63,95	40040	84,48	0,10	-0,18	375,8
250/500	109,60	7885	18841	187	74,88	17265	91,64	0,08	-0,01	0,4
500/500	107,00	8284	38324	376	75,24	35023	91,39	0,08	-0,07	39,2
750/500	108,80	8562	56134	551	73,44	50649	90,23	0,04	-0,08	35,0
1000/500	109,60	6582	60132	629	62,92	50658	84,24	0,06	-0,10	327,6

Первый сценарий представлен исходя из логики максимальной теплопроизводительности системы (Таблица 1) для обслуживания всех потенциальных потребителей без ограничений на максимальное число подключаемых участков трубопровода. Также из результатов первого комплекса тестов наблюдаются малые интервалы допустимых решений по эвристической шкале и шкале верхней границы значений.

Для повышения соответствия представленной математической модели реальным тепловым сетям, приводится второй комплекс тестов, который включает в себя несколько дополнительных ограничений:

- лимит теплопроизводительности оборудования снижен до 85% от максимального;
- сумма затрат C_e на подключение, реконструкцию, модернизацию, обслуживание сетей, в частности линии $e = (i, j) \in A_{FP}$, для подключения потенциальных потребителей составляет $\Delta C_e^{max} \leq 1,075 \sum_{e \in A_{FP}} C_e C_f$.

Таблица 2. Результаты выполнения второго сценария
 Table 2. The results of the second scenario

$ V_P / V_E $	$ V_s $	$V_{s(pow)}$, кВт	$V_{p(pow)}$, кВт	con. V_p	con. $V_p(\%)$	con. $V_{p(pow)}$, кВт	con. $V_{p(pow)}$ (%)	$f(U)$ (%)	$f(H)$ (%)	В & С уз- лы
250/500	109,60	7885	18841	56	22,40	8528	45,26	0,04	-0,15	810,0
500/500	107,00	8284	38324	47	9,40	8965	23,39	0,04	-0,47	1501,0
750/500	108,80	8562	56134	46	6,08	9271	16,52	0,02	-0,37	1664,0
1000/500	109,60	6585	60132	38	3,80	7090	11,79	0,05	-0,39	2453,0

Отметим, что величина V_E может быть равной 0, то есть тепловая сеть еще не имеет подключенных потребителей тепла и проектируется с нуля. Для каждого рассматриваемого сценария определено такое оптимальное множество подключаемых потребителей, чтобы любое изменение при подключении потребителей неизбежно вызывало увеличение минимизируемого критерия себестоимости или уменьшение максимизируемого критерия выручки от реализации тепла.

На рис. 2 проиллюстрирован пример сравнения результатов расчета распределенной системы теплоснабжения города с населением около 32 тысяч человек, рассчитанной в результате вывода из эксплуатации централизованной системы теплоснабжения. Рассматриваемая система состоит из 5 газовых котельных общей мощностью 89,8 мВт. При расчете использовались одинаковые исходные данные о потребителях, котельных и расположении. Потребителям первой категории присваивается статус V_e для отдельных подсистем. Остальным потребителям присваивается V_p .

Таблица 3. Сравнение результатов инженерного расчета (расчет) и результатов расчета с помощью представленной математической модели (ММ)
 Table 3. Comparison of engineering calculation results and calculation results with the help of the presented mathematical model

№	Мощность, мВт	V_e	V_p	Con V_p , расчет	Con V_p , ММ	Con $V_{p(pow)}$, расчет, мВт	Con $V_{p(pow)}$, ММ, мВт	Conr, %
К №1	19,8	0	250	202	196	17,2	16,82	-2,2
К №2	26	11	350	305	331	22,78	24,1	+5,5
К №3	5	11	12	12	12	2,66	2,66	0
К №4	8	0	100	77	79	6,59	6,79	+3
К №5	5	0	50	44	46	3,76	4,16	+0,2
К №6	26	0	300	262	237	22,32	18,12	-18,8

Расчет выполнен без учета функции стоимости подключения потенциального потребителя из-за отсутствия способов быстрой оценки стоимости подключения. Con $V_{p(pow)}$ – максимальная нагрузка на систему теплоснабжения (отопление и горячее водоснабжение), Conr, % – расхождение расчетов подключаемой максимальной нагрузки, полученной с помощью ММ, с инженерными расчетами.



Рис. 2. Расположение расчетных котельных в черте города

Fig. 2. Location of settlement boiler houses in the city

Использование представленной математической модели в текущем виде позволяет проводить последовательный расчет подключения потенциальных потребителей в заданном порядке. Видно, что результаты решений по количеству подключенных потенциальных потребителей коррелируют с результатами расчетных значений в диапазоне от -18,8 до +5,5 процентов, не превышают лимиты тепловых нагрузок. Для небольшой системы, как котельная 3, видно полное совпадение результатов.

4. Заключение

В результате комплекса вычислений получены следующие результаты. Для каждого из рассматриваемых вариантов систем существует такое оптимальное множество потребителей для подключения к тепловой сети, чтобы соответствовать заданным данной математической моделью критериям для каждого потенциального потребителя. Количество потенциальных потребителей, подключенных к тепловой сети, снижено от максимально планированных значений за счет снижения максимальной нагрузки $Q^{max} \leq 85\%$ на источник теплоснабжения. Большое количество В & С узлов – точек экстремума положительно влияет на точность эвристического решения. Из результатов комплекса тестов наблюдаются малые интервалы допустимых решений по эвристической шкале и шкале верхней границы значений.

Сравнение полученного решения с существующими решениями показало высокую степень достоверности результатов. Для оптимизации подключения потребителей в подобных распределенных системах необходимы данные о стоимости подключения. Алгоритм трассировки как инструмент оценки стоимости подключения и прокладываемого пути предложен в [7].

Перспективным путем применения представленной математической модели выбора оптимального множества новых потребителей для подключения к существующей тепловой сети является интеграция с существующими ГИС-решениями с открытым исходным кодом. Создание новых инструментов, подобных программному комплексу Zulu [8] для систем теплоснабжения, позволит значительно повысить эффективность при проектировании и принятии решений, в том числе при нетипичных постановках задач проектирования систем теплоснабжения.

Список литературы / References

- [1] Беляйкина И.В. и др., *Водяные тепловые сети*, Справочное пособие по проектированию, Энергоатомиздат, М., 1988, 375 с.; [Belyaykina I.V. et al., *Vodyanie teplovye seti*, Spravochnoe posobie po proektirovaniu, Energoatomizdat, M., 1988, 375 pp., (in Russian).]
- [2] *РД 10 ВЭП – 2006 «Методические основы разработки схем теплоснабжения поселений и промышленных узлов РФ»*, в развитие СНиП 41-02-2003 «Тепловые сети», Объединение ВНИПИЭнергопром, М., 2006, 61 с.; [*RD 10 VJeP – 2006 «Metodicheskie osnovy razrabotki shem teplosnabzhenija poselenij i promyshlennyh uzlov RF»*, v razvitie SNiP 41-02-2003 «Teplovye seti», Obedinenie VNIPIEnergoprom, M., 2006, 61 pp., (in Russian).]
- [3] *Прогноз розничных цен на электроэнергию в субъектах Российской Федерации на период до 2020 года*, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Институт проблем ценообразования и регулирования естественных

- монополий, М., 2015, 31 с.; [*Prognoz roznych cen na elektroenergiyu v subjektah Rossiyskoy Federacii na period do 2020 goda*, Vysshaya shkola ekonomiki, Institut problem cenoobrazovaniya i regulirovaniya estestvennyh monopoliy, М., 2015, 31 pp., (in Russian).]
- [4] *Строительные нормы и правила Российской Федерации, СНиП 41-02-2003 «Тепловые сети»*, Государственный комитет РФ по строительству и жилищно-коммунальному комплексу, М., 2003, 36 с.; [*Stroitelnye normy i pravila Rossiyskoy Federacii, SNiP 41-02-2003 «Teplovye seti»*, Gosudarstvennyy komitet RF po stroitelstvu i zhilishhno-kommunalnomu kompleksu, М., 2003, 36 pp., (in Russian).]
- [5] Nemtinov V. A. et al., “Use of Geographic Information Systems for Assessment of Groundwater Quality in Industrial Hubs”, *14th Geoconference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing*, Bulgaria, 17–26 June, 2014, **1**, 911–916.
- [6] Mitchell J. E., “Branch-and-Cut Algorithms for Combinatorial Optimization Problems”, *Handbook of Applied Optimization*, Oxford University Press, Oxford, 2002, 65–77.
- [7] Терехов С. М. и др., “Особенности решения задач оптимизации с помощью алгоритма поиска кратчайшего пути”, *Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн*, Международ. науч. конф., Тамбов, 2017; [Terehov S.M. et al., “Osobennosti resheniya zadach optimizacii s pomoshhju algoritma poiska kratchajshogo puti”, *Virtualnoe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyy dizayn*, Mezhdunarod. nauch. konf., Tambov, 2017, (in Russian).]
- [8] *ZuluThermo*, ГеоИнфоГрад, Научно-внедренческий центр МФТИ, <http://www.geoinfograd.ru/zulu.htm#thermo>.

Terekhov S. M., Nemtinov V. A., Kornilov K. S., "Model of the Connecting Optimal Number of Heat Consumers", *Modeling and Analysis of Information Systems*, **25:2** (2018), 217–231.

DOI: 10.18255/1818-1015-2018-2-217-231

Abstract. In the modern world, the efficient use of energy is an extremely important aspect of human activity. In particular, heat supply systems have significant economic, environmental and social importance for both heat consumers and heat supply organizations. The economic status of all participants in the heat supply process depends on the efficiency of the functioning of the heat supply systems. The reliability of the functioning of systems depends on vital processes such as the work of hospitals and industrial enterprises. With such a close network communication, reliable and efficient operation of power supply systems is critical. In this article, ways to improve the efficiency of heat supply systems are considered. A mathematical model for improved planning of heat supply systems by connecting the optimal set of new heat consumers is presented. For each single customer, when there is an alternative option for connecting this consumer to the existing heat network, it is possible to choose the only optimal solution. This becomes possible due to the restrictions and the procedure for selecting variants from a subset of binary variables corresponding to alternatives. The procedure for finding the optimal number of consumers for connection to the existing heat network is presented, which is the rationale for increasing the number of existing consumers of the heat network. The testing was carried out and the results of the mathematical model by an example of test heat networks are presented. Directions of further study of increasing the efficiency of heat supply systems and integrating the presented mathematical model with modern software complexes are determined.

Keywords: system approach, heat supply system, optimisation

On the authors:

Sergey M. Terekhov, orcid.org/0000-0002-4103-1167, graduate student, Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya st. Tambov, 393000, Russia, e-mail: Stpodiumz3@gmail.com

Vladimir A. Nemtinov, orcid.org/0000-0003-2917-3610, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya st. 106, Tambov, 393000, Russia, e-mail: nemtinov@mail.gaps.tstu.ru

Kirill S. Kornilov, orcid.org/0000-0003-1729-8360, graduate student, Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya st. 106, Tambov, 393000, Russia, e-mail: i_sirostinka@rambler.ru