DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-28-37

***Чуйкина А.А., Лобода А.В., Сотникова О.А.**
Воронежский государственный технический университет
**E-mail: a.a.chuykina@mail.ru*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ ТРАССЫ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ

Аннотация. *Одной из основополагающих задач при проектировании систем теплоснабжения является выбор оптимальной трассы трубопровода. При этом аналитическое решение такой задачи практически невозможно в связи с наличием множества взаимозависящих факторов, влияющих на конечное решение. В статье рассматривается один из возможных методов определения ограниченного количества наиболее выгодных вариантов трассировки тепловой сети, базирующийся на решении многокритериальной оптимизационной задачи с помощью системного анализа. Предлагаемый метод позволяет получить ограниченное число выгодных вариантов трассировки при отсутствии необходимости проведения экспертного оценивания нескольких критериев оптимальности. В работе приводятся основные укрупненные параметры тепловой сети, позволяющие решать рассматриваемую оптимизационную задачу на начальном этапе проектирования систем теплоснабжения, при отсутствии полного конструктивного расчета рассматриваемых схем и с учетом качественных, и количественных показателей оптимизации. Для наглядности, результаты ограничения заведомо невыгодных вариантов трубопроводной трассы приводятся в графической форме. Предлагается при наличии большого количества критериев оптимальности геометрическую наглядность рассмотрений в плоскости заменить исследованием таблицы или матрицы характеристик. Суть этого исследования состоит в последовательном рассмотрении всевозможных пар строк из составленной матрицы.*

Ключевые слова: *тепловые сети, многокритериальная оптимизация, системный анализ, теплоснабжение, трубопроводы.*

Введение. Выбор оптимальной трассы трубопровода системы теплоснабжения является одной из основополагающих задач при проектировании рассматриваемых систем. Аналитическое решение данной задачи практически невозможно из-за влияния на него множества факторов, не зависящих напрямую друг от друга [1]. Например, не представляется возможным найти связь между параметрами качества теплоносителя у потребителя и временем строительства тепловой сети, причем как один, так и другой параметры могут являться определяющими при выборе трассы в зависимости от технического задания на проектирование. В этой связи, как отмечается в работах [2, 3] большое распространение получает метод выбора наиболее предпочтительного варианта, основывающийся на многокритериальном анализе. При этом, как отмечается в работах [3–6] большое значение приобретает этап выбора критериев (параметров) по которым будут оцениваться варианты трассировки. На начальном этапе проектирования, как указано в работе [7], наиболее удобно пользоваться укрупненными характеристиками систем теплоснабжения, определение которых не требует большого числа исходных данных.

Поскольку при проектировании тепловых сетей наблюдается значительный объем работы по инженерным вычислениям, традиционные методы выбора наиболее выгодного варианта трассировки, основывающиеся на профессиональном опыте проектировщика, являются трудоемкими и требуют значительных временных затрат. По этой причине, представляется актуальным разработка такой методики проектирования, которая основывались бы на автоматизированном методе, позволяющем сократить трудоемкость расчета, время на его проведение и его точность. Таким образом, целью данной работы, является предложение методики проектирования трассы тепловой сети, основывающейся на решении многокритериальной оптимизационной задачи. В соответствии с поставленной целью, необходимо решить следующие задачи:

1) определить перечень укрупненных параметров тепловой сети, отражающих ее качественные и количественные характеристики, для применения их в качестве критериев оптимальности;

2) исследовать существующие методики автоматизированного проектирования и выявить их недостатки;

3) предложить методику определения ограниченного количества наиболее выгодных вариантов трассировки тепловой сети, базирующуюся на решении многокритериальной оптимизационной задачи с помощью системного анализа.

В качестве примера, рассмотрим вариант проектирования оптимальной трубопроводной трассы тепловой сети на основании количественных характеристик, таких как тепловые потери и материалоемкость, и качественных характеристик – надежность системы и распределение температуры у потребителя.

Материалы и методы. Некоторые характеристики (параметры) тепловой сети. Для определения температуры в любой точке водяной тепловой сети, а, следовательно, и у абонента рекомендуется применять методику, приведенную в работах [8]. При этом считается, что потери теплоты по всей длине участка не изменяются. Согласно данным положениям, может быть записано уравнение теплового баланса при транспортировании теплоты

$$G \cdot c \cdot (T_1 - T_2) = q \cdot l \cdot (1+\beta) \quad (1)$$

где G – расход теплоносителя на рассматриваемом участке, кг/ч; c – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°С); T_1 и T_2 – температуры теплоносителя в начале и конце рассматриваемого участка, °С; q – удельные тепловые потери в трубопроводе, Вт/м; l – длина участка, м; β – поправочный коэффициент, учитывающий потери теплоты в местных сопротивлениях и определяемый по соотношению $\beta = l_э/l$ ($l_э = a/l$ – эквивалентная длина, м, где a – коэффициент, учитывающий долю падения давления в местных сопротивлениях по отношению к падению давления на трение).

Пользуясь равенством (1), можно получить выражение для определения температуры теплоносителя в любой точке рассматриваемого участка трубопровода [7]

$$T_2 = T_1 - (q \cdot l \cdot (1+\beta))/(G \cdot c). \quad (2)$$

Практическое применение массива значений температуры теплоносителя у каждого потребителя в качестве критерия оптимальности затруднительно. По этой причине его предлагается заменить (например) показателем, характеризующим *равномерность распределения температур* у каждого потребителя теплоснабжаемого района. В качестве такого показателя может быть выбрана смещенная оценка *дисперсии* D (или среднего выборочного отклонения $\sigma = D^{1/2}$), которая определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(T_{1i}^{n} - \overline{T_1}\right)^2}\,, \quad (3)$$

где T_{1i} – температура теплоносителя у потребителя; $\overline{T_1}$ – выборочное среднее значение температуры теплоносителя, определяемое по формуле

$$\overline{T_1} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_{1i}^{n}\,. \quad (4)$$

Можно считать, что, чем меньше величина смещенной оценки дисперсии, тем равномернее распределяется температура.

Материальная характеристика тепловой сети, характеризующая материалоемкость системы, определяется по формуле [7, 8]:

$$M = \sum_{i=1}^{n} D_{вні} l_i\,, \quad (5)$$

где $D_{вні}$ – внутренний диаметр трубопровода на участке тепловой сети; l_i – длина участка тепловой сети; n – количество участков тепловой сети.

На начальной стадии проектирования, когда гидравлический расчет не проведен, данную величину можно определить с помощью заданного закона распределения тепловой нагрузки, без детального гидравлического расчета. Таким образом, материальная характеристика участка трубопровода с постоянным расходом может быть найдена по формуле

$$M = E \cdot G^{0,38} \cdot l, \quad (6)$$

где G – расход теплоносителя в магистрали, кг/с; E – критерий определяемый по формуле $E = A^{d}{}_{в}/R_л{}^{0,19}$; $R_л$ – удельное линейное падение давления, кг/(м^{2}м); $A^{в}{}_{d}$ – коэффициент отнесенный к диаметру трубопровода, зависящий от шероховатости трубы.

Аналогично дисперсии температуры, чем меньше величина материальной характеристики, тем выгоднее тот или иной вариант трассировки.

То же самое относится и к *годовым тепловым потерям*, которые на начальной стадии проектирования могут определяться по приближенной зависимости

$$Q_{т.п} = q \cdot M_{ус}, \quad (7)$$

где $M_{ус}$ – условная материальная характеристика теплосети, рассчитанная по наружной поверхности изоляции, м^2; q – удельные годовые теплопотери, отнесенные к 1 м^2 условной материальной характеристики теплосети, Гкал/(год·м^2)

$$M_{ус} = M + 0{,}15\,\Sigma l, \quad (8)$$

где Σl – суммарная длина трубопровода, м.

$$q = 3{,}6 \cdot \pi \cdot k \cdot (\tau_{ср} - t_0) \cdot (1+\beta) \cdot n \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

где k – коэффициент теплопередачи теплопровода с учетом толщины и материала изоляции, канала и вида грунта, отнесенный условно к наружной поверхности изоляции, Вт/(м^2·°С); $\tau_{ср}$ – среднегодовая температура теплоносителя, °С; t_0 – среднегодовая температура грунта или окружающей среды, °С; β – коэффициент местных тепловых потерь; n – число часов работы тепловой сети в год.

Надежность тепловой сети принято оценивать показателем надежности, который должен быть не ниже установленного уровня, чем он выше, тем надежнее система. Таким образом, этот очередной критерий оптимизации примет вид

$$R_{сист}(t)=\frac{Q(t)}{Q_0}=1-\sum_{j=1}^{j=l}\frac{\Delta Q_j}{Q_0}\frac{\omega_i}{\sum\omega_i}\left(1-e^{-\Sigma\omega_i t}\right), \quad (10)$$

где Q_0 – расчетный расход теплоты; ΔQj – недоподача теплоты; $Q(t)$ – математическое ожидание характеристики качества функционирования системы; t – время; ω_i – параметр потока отказов.

Как указывалось в работе [5], для удобства расчетов естественно свести поиск экстремума по каждому из критериев к единообразию: поскольку большинство введенных критериев (три первых из четырех) минимизируются, критерий надежности также удобно привести к виду, при котором производится поиск минимального значения. Наиболее простым вариантом является рассмотрение обратной величины, то есть величины $R^{об}_{сист}=1/R_{сист}$.

В то же время переход к величинам, обратным к минимизируемым, позволяет обсуждать задачу многокритериальной оптимизации с точки зрения желаемой максимизации всех таких величин. Идейно два таких подхода взаимозаменяемы, и речь может идти лишь об относительных удобствах одного из них. К таким удобствам можно отнести, например, желание обсуждать лишь ограниченные области изменения формальных параметров. Ниже, как и в работе [5], мы обсуждаем задачу одновременной максимизации нескольких параметров.

В качестве примера рассмотрим несколько (девять) вариантов трассировки двухтрубной централизованной сети теплоснабжения (рис. 1).

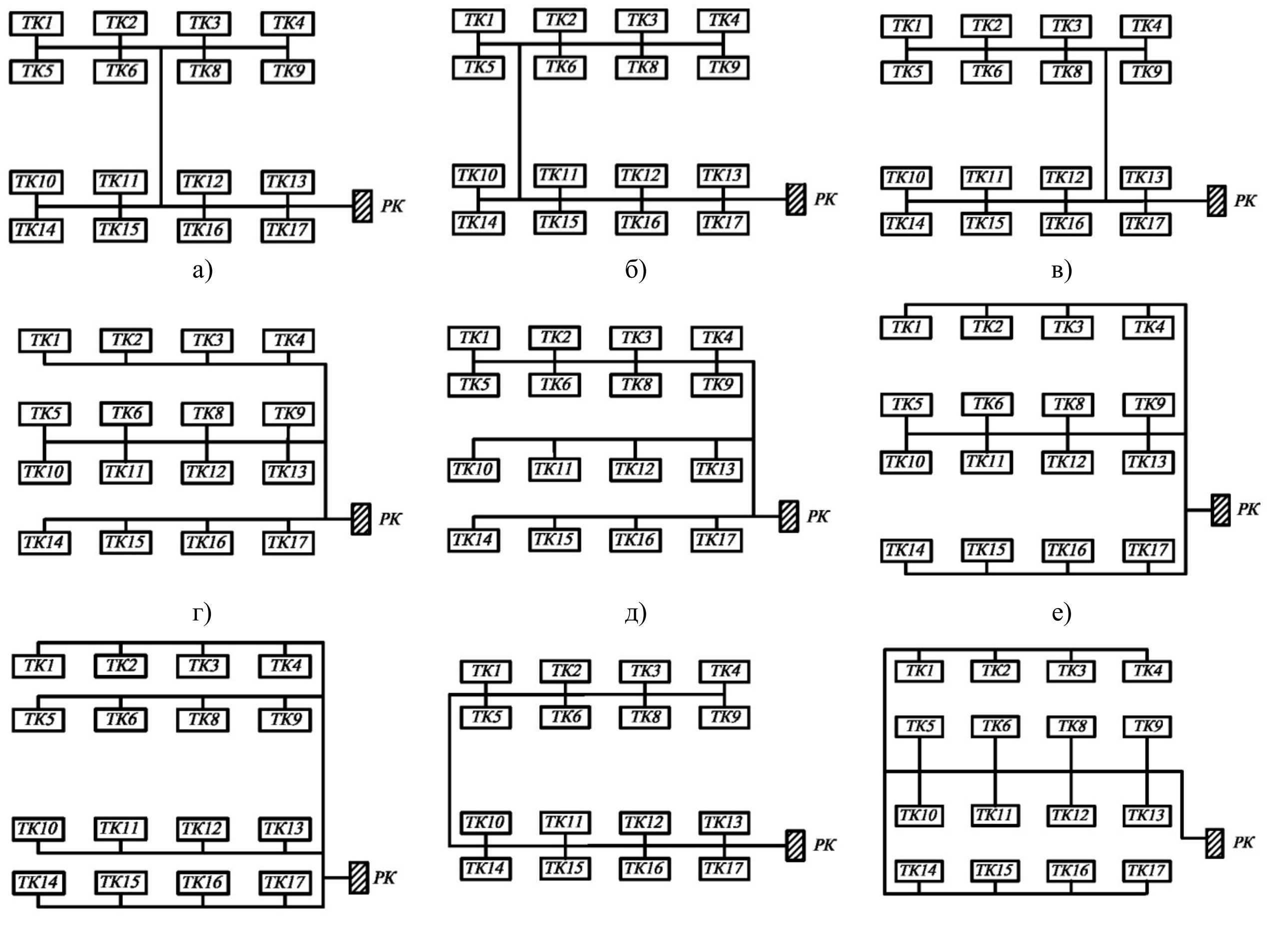

Рис. 1. Схемы рассматриваемых трассировок трубопроводов системы теплоснабжения

Исходные данные: источником теплоснабжения является районная котельная; прокладка трубопроводов бесканальная; расчетная тепловая нагрузка каждой тепловой камеры (ТК) – 25 Гкал/ч; удельное линейное падение давления – 50 Па/м; коэффициент теплопередачи – 1; среднегодовая температура теплоносителя – 60 °С; среднегодовая температура грунта – 5 °С; коэффициент местных тепловых потерь – 0,3; число часов работы тепловой сети в год – 196 час; температуры теплоносителя в начале рассматриваемого участка – 150 °С; поправочный коэффициент, учитывающий потери теплоты в местных сопротивлениях – 1,1; теплоемкость теплоносителя – 4185 Дж/(кг·°С); коэффициент $A^d_в$ – 0,0723; расчетный расход теплоты – 465 МВт; время t – 0,56.

В таблице представлены значения четырех параметров, упомянутых выше: *дисперсии температуры у потребителя, материальной характеристики, тепловых потерь и показателей надежности* тепловых сетей для вариантов трассировки, представленных на рисунке 1. Так же для удобства приведены значения величин, отнесенных к их максимальному значению.

Таблица 1

Параметры оптимизации трассы тепловой сети

№ п/п	Схема	σ	M	Q	$R_{сист}$	$R^{об}_{сист}$	Величины, отнесенные к максимальному значению	σ	M	Q	$R_{сист}$	$R^{об}_{сист}$
1	1а	3,45	498	4855	0,87	1,149		0,546	0,587	0,640	0,956	1,046
2	1б	5,32	532	5067	0,70	1,428		0,843	0,627	0,668	0,769	1,300
3	1в	4,74	486	4780	0,90	1,111		0,751	0,573	0,630	0,989	1,011
4	1г	4,49	644	6767	0,72	1,388		0,711	0,759	0,893	0,791	1,264
5	1д	4,15	625	6460	0,69	1,449		0,657	0,737	0,852	0,758	1,319
6	1е	4,83	701	6854	0,72	1,388		0,765	0,826	0,904	0,791	1,264
7	1ж	4,82	732	7252	0,91	1,098		0,763	0,863	0,957	1,000	1,000
8	1з	4,44	606	5673	0,61	1,639		0,703	0,714	0,748	0,670	1,492
9	1и	6,31	848	7576	0,65	1,538		1,000	1,000	1,000	0,714	1,400

Основная часть. Постановка формализованной задачи многокритериальной оптимизации. Решение задачи оптимизации трассы тепловой сети по нескольким критериям (параметрам) предпочтения можно осуществлять с помощью нескольких подходов, наибольшее распространение из которых получил метод нелинейного программирования [1, 2, 3, 4]. В общем виде задача многокритериальной оптимизации записывается в виде

$$min_{(x\in R)}F_1(x), \ldots, min_{(x\in R)}F_n(x), \tag{11}$$

$$R=\{x|g_i(x)\geq 0,\ i=1,k\}, \tag{12}$$

При решении задачи (11) – (12) важное значение имеет качественная информация о множестве частных критериев [3]. Среди методов использующих данную информацию выделяют: 1) метод лексикографического упорядочения критериев; 2) метод выделения главного критерия; 3) метод последовательных уступок; 4) метод свертывания векторного критерия; 5) метод «идеальной» точки.

В работе [3] отмечается, что для первого метода оптимизация по k-тому параметру производится после получения минимальных значений предыдущих параметров (k-i), в связи с чем, зачастую уже после оптимизации по первому или второму критерию, решение вырождается в точку, а учет оставшихся критериев не производится. Для второго метода осуществляется минимизация наиболее важного параметра, а оставшиеся не должны превышать пороговой величины, которая вычисляется с помощью специального метода, что может привести к появлению дополнительных ошибок. Третий метод является усовершенствованным лексикографическим методом, в котором на каждом шаге преобразования вводят уступку, которая характеризует допустимое отношение, какого–либо параметра от минимального значения. Данные методы характеризуются наличием подавляющего (более важного) критерия, который зачастую трудно определить или же его и вовсе не существует.

Для пятого метода характерно наличие дополнительной информации, так называемой идеальной точки, при этом решения осуществляют по обобщенному критерию по признакам однокритериальной задачи, с условием максимального приближения к идеальному решению [1]. Однако, в связи с особенностями рассматриваемого объекта исследования (тепловой сети), задать идеальный вариант трассы, обоснованной с практической точки зрения, не представляется возможным, по этой причине его применение не целесообразно.

Отмеченные трудности применения приведенных выше методов способствовали большему распространению метода свертывания векторного критерия [2, 5]. Данный метод учитывает важность частных параметров за счет построения скалярной функции S, которая является обобщенным критерием векторного критерия $F(x)$

$$min_{(x\in R)}S(p, F(x)), \tag{13}$$

где $p = (p_1, \ldots, p_n)$ – вектор весов частных критериев [2, 5].

Обобщенный критерий может быть свернут в функцию различного вида. В работах [1, 5] приводятся аддитивный, мультипликативный, обобщенный логический, обобщенный среднестепенной критерии. Наибольшее распространение получил аддитивный критерий

$$S_{\Sigma}(p,\ F(x)=\Sigma^{n}{}_{i=1}(p_iF_{i,}(x)), \qquad (14)$$

который и будет рассматриваться в данной работе.

Далее следует отметить, что определение веса каждого критерия представляет собой отдельную задачу [8–15], в которой, как правило, определяется численное значение веса критерия, даются точные численные значения, либо сравниваются друг с другом по важности отдельные параметры. При этом разные методы определения весов дают разные значения, а величина весов остается постоянной на всей области допустимых решений R.

Назначение веса критерия, как правило, осуществляется экспертом, который может не точно задать значения этой величины. В данном случае, как отмечается в работе [3], вес можно считать не контролируемым фактором, а, следовательно, использовать принцип гарантированного результата, тогда модель (13) при аддитивном критерии оптимальность примет вид

$$min_{(x\in R)}\{max_{p\in Rpi}\Sigma^{n}{}_{i=1}(p_iF_{i,}(x))\}, \qquad (15)$$

Если область допустимых решений R_{pi} остается постоянной, вес p_i является функцией от x, а задача многокритериальной, оптимизация принимает вид

$$min_{(x\in R)}\{S(p(x),F(x))\}, \qquad (16)$$

поскольку

$$p(x) = argmax_{(x\in R)}\{S(p,F(x))\}, \qquad (17)$$

Постановка задач. В рамках многокритериальной оптимизации, связанной с нахождением наилучшего варианта сети, мы обсуждаем следующую формализованную задачу:

Задача 1. Из множества точек (векторов), расположенных в положительном октанте n-мерного пространства требуется выбрать точку (или точки) с наибольшей суммой

$$S = x_1{\cdot}p_1 + \ldots + x_n{\cdot}p_n, \qquad (18)$$

где $x_1, \ldots, x_n$ – координаты отдельной точки (значения различных критериев); $p_1, \ldots, p_n$ – координаты весового вектора (или вектора предпочтений).

Весовой вектор обычно считается фиксированным. В то же время, его координаты могут изменяться в силу различных причин, и тогда возникает еще одна задача.

Задача 2. Описать формулами (или наглядным образом) возможные изменения оптимальной точки из заданного множества (облака) при изменениях весового вектора.

Отметим, что используя компьютерные технологии, можно организовать достаточно быстрый перебор огромных объемов информации (включающих сотни и тысячи вариантов типа различных трассировок). Это возможно, в том числе, и в задачах многокритериальной оптимизации. Желательно, тем не менее, иметь возможность сужения до разумных величин начального множества вариантов и, тем самым, исследования оптимизационных задач на более обозримых множествах, содержащих не тысячи, а, например, один или несколько десятков различных вариантов.

Некоторые приемы упрощения задачи и изучения условий оптимальности. Ниже предлагаются некоторые несложные идеи такого сужения, а также выделения областей в пространстве весовых параметров, в которых оптимальными оказываются те или иные варианты из начального множества.

*Замечание о «внутренних прямоугольниках»***.** Пусть в облаке точек имеется две интересующие нас точки $A(x_1, \ldots, x_n)$ и $B(y_1, \ldots, y_n)$, и имеется неравенство $x_1 < y_1, \ldots, x_n < y_n$.

Ясно тогда, что каков бы ни был весовой вектор $p=(p_1, \ldots, p_n)$ с положительными координатами, для каждой отдельной i-ой координаты в обсуждаемом n-мерном пространстве выполняется неравенство $x_ip_i < y_ip_i$. Но тогда и интересующие нас суммы связаны неравенством

$$S(A) < S(B). \qquad (19)$$

Это означает, что точка A имеет меньшее значение суммарного критерия, чем точка B, а потому (при поиске максимума суммы (18)) точка A не может быть оптимальной в заданном облаке точек. Подчеркнем, что это утверждение остается верным при любых весах.

Наглядная трактовка этого замечания является вполне прозрачной на плоскости (в случае оптимизации по двум критериям): имея произвольную точку $A(x_1, x_2)$ можно связать с ней прямоугольник, образованный проекциями этой точки на оси и отрезками самих осей (см. Рис. 2)

Точки, попадающие во внутренний прямоугольник, порожденный точкой A, не могут претендовать на оптимальность ни при каких весовых векторах.

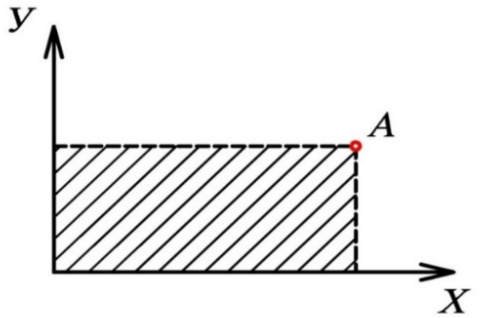

Рис. 2. Внутренний прямоугольник, порождаемый точкой первого квадрата

Аналогично, в случае числа критериев, по которым проводится оптимизация, превышающего 2, можно рассматривать многомерные внутренние параллелепипеды соответствующей размерности, отвечающие отдельным точкам из числа обсуждаемых. Внутренние точки из таких параллелепипедов не могут быть оптимальными (ни при каких весовых векторах), если вершина параллелепипеда (все координаты которой положительны) принадлежит обсуждаемому облаку заданных точек. Здесь геометрическую наглядность рассмотрений в плоскости можно заменить исследованием таблицы или матрицы характеристик. Пример обработки приведенной выше таблицы мы рассмотрим в конце статьи.

Как следствие, получаем простой наглядный способ существенного уменьшения количества точек, обсуждаемых на предмет возможной оптимальности (см. Рис. 3).

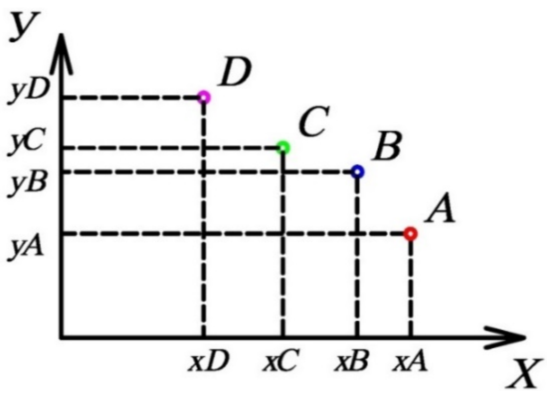

Рис. 3. Внутренние прямоугольники, порождаемые несколькими точками, выводят из обсуждений оптимальности точки, лежащие в объединении этих квадратов

Рисунок 3 показывает малое граничное множество точек, которые можно оставить для нахождения оптимальной точки. Отметим, что это «граничное» множество не зависит от весового вектора.

Сравнение двух точек в плоскости. Пусть имеется две точки (два варианта) в плоскости двух критериев. На вопрос о преимуществе одной из них перед другой при изменяющемся наборе весов имеется достаточно простой наглядный ответ. Чтобы его сформулировать, уточним, что веса мы понимаем не в традиционной вероятностной нормировке (при которой $\Sigma_i p_i=1$), а в евклидовой, так что $\Sigma_i p_i^2=1$. При такой нормировке значение суммы (18) равно длине проекции обсуждаемой точки (вектора) A на весовой вектор p. Тогда из двух точек A и B, расположенных в первом квадрате и удовлетворяющих перекрестному условию

$$x_A < x_B,\ y_A > y_B \tag{20}$$

на координаты, большее значение суммы (18) имеет точка с более длинной проекцией на весовой вектор. Как следствие, перпендикуляр к отрезку AB (или его продолжению), проведенный из начала координат, представляет собой компромиссное положение весового вектора, при котором обе точки A и B имеют одинаковое значение суммы (18).

Отклонение этого вектора в одну или в другую сторону от перпендикулярного к AB положения отдает приоритет в значении суммы (18) соответствующей точке (рис. 4).

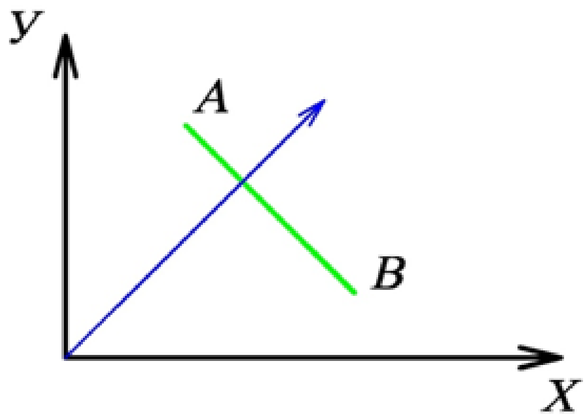

Рис. 4. Перпендикуляр к отрезку AB из начала координат делит первый квадрат на области доминирования двух точек A и B в смысле большего значения суммы (18)

Как следствие из этого простого соображения получаем следующий способ выделения в плоскости (в случае оптимизации по двум критериям) областей, обеспечивающих оптимальность точек, попадающих в них, в зависимости от расположения весового вектора.

Уточним, что, обсуждая большое, но конечное облако точек в (первом квадрате) плоскости, мы удаляем из обсуждения значительную их часть по соображениям внутренних прямоугольников. Конкретные обсуждения теперь касаются лишь граничных точек облака, являющихся вершинами некоторой выпуклой ломаной и удовлетворяющих в каждом звене ломаной перекрестному условию (20). Для такой ломаной нужно провести перпендикуляр к ее каждому звену из начала координат. Этими перпендикулярами весь первый квадрат разбивается на угловые сектора в количестве, равном количеству вершин ломаной (т.е. количеству граничных точек облака). В каждом из секторов попадание весового вектора в конкретный k-сектор (при нумерации слева направо) означает, что оптимальной для данного набора координат весового вектора будет именно k -ая «граничная» точка при упорядочении x1< x2< …< xk < …. <xn.

На рис. 5 показано такое разбиение первого квадрата в плоскости на секторы, отвечающие четырем отдельным граничным точкам большого исходного облака.

Уточним, что ломаная, образованная четверкой точек, содержит три звена. Соответственно к этим звеньям проведены три перпендикуляра. Они разбивают первый октант на 4 сектора. В целом для n точек возникает (n-1)-звенная ломаная, а (n-1) перпендикуляров разбивают первую четверть на n угловых секторов.

Интересно отметить также, что отдельная точка может не попасть в порождаемый ею оптимальный сектор, как это происходит на рис. 5 с точками A1 и A2.

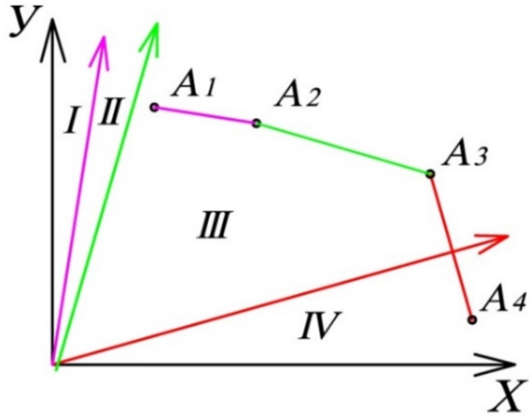

Рис. 5. Области оптимальности, соответствующие четырем точкам

Пример исследования Таблицы.

Допустим, что (как в этом примере) каждый из (четырех) обсуждаемых параметров нужно минимизировать. Для уменьшения количества вариантов, рассматриваемых по существу, предлагается матричное обобщение замечания о внутренних прямоугольниках.

Таблица 2

Выбор ограниченного числа вариантов трассировки при матричном обобщении

№ п/п	σ	M	Q	$R^{об}_{сист}$	№ п/п	σ	M	Q	$R^{об}_{сист}$
1	0,546	0,587	0,640	1,046	1	0,546	0,587	0,640	1,046
2	0,843	0,627	0,668	1,300	-	-	-	-	-
3	0,751	0,573	0,630	1,011	3	0,751	0,573	0,630	1,011
4	0,711	0,759	0,893	1,264	-	-	-	-	-
5	0,657	0,737	0,852	1,319	-	-	-	-	-
6	0,765	0,826	0,904	1,264	-	-	-	-	-
7	0,763	0,863	0,957	1,000	7	0,763	0,863	0,957	1,000
8	0,703	0,714	0,748	1,492	-	-	-	-	-
9	1,000	1,000	1,000	1,400	-	-	-	-	-

Смысл этого обобщения (с учетом минимизации, а не максимизации) состоит в последовательном рассмотрении всевозможных пар строк из приведенной матрицы. Если *все* четыре позиции в одной (первой) из двух таких строк содержат величины, строго большие соответствующих величин второй строки из рассматриваемой пары (первая строка мажорирует вторую, является для нее мажорантой), то первую строку можно исключить из поиска оптимальных вариантов.

Результаты и выводы.

1. Несложно убедиться, что каждая из строк с номерами 4, 5, 8 и 9 является мажорантой по отношению к строке с номером 1 нашей таблицы. Аналогично строки 2 и 6 являются мажорантами строки 3. Других мажорирований в таблице нет. В частности, не имеет мажорант (а потому остается в списке претендентов на оптимальность) 7-я строка таблицы.

Это означает, что вместо 9 предложенных вариантов достаточно рассматривать задачу оптимизации на множестве из 3-х вариантов (приведенных в исправленной таблице). Для такого усеченного набора вариантов задача весовой оптимизации существенно упрощается.

Рассматривая линейную функцию от четырех весов

$$S = p_1 \cdot \sigma + p_2 \cdot M + p_3 \cdot Q + p_4 \cdot R$$

при фиксированных весах, легко ответить на вопрос об оптимальном варианте трассы из трех оставшихся. Несложно также определить области 4-мерного пространства весов, гарантирующего оптимальность того или иного из этих вариантов.

Если, например, веса четырех параметров p_1, p_2, p_3, p_4 имеют соотношение 1:1:1:1, то минимальное значение суммы S достигается на первом варианте. Для набора весов, пропорциональных 1:2:3:10, оптимальным является второй вариант. Третий вариант будет оптимальным при четвертом весе, значительно превосходящем первые три.

2. Выбранные критерии оптимальности позволяют учитывать надежность проектируемой сети, равномерность распределения температуры у потребителей, материалоемкость сети и ее возможные тепловые потери.

3. Разобранный метод оптимизации позволяет определить ограниченный набор вариантов трассы теплой сети, то есть отбросить заведомо невыгодные, без применения весовых значений критериев оптимальности. Это позволяет сократить время выбора наиболее выгодного решения и трудоемкость расчетов при определении веса определенного критерия, например, путем экспертных оценок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mel'kumov V.N., Chujkin S.V., Papshickij A.M., Sklyarov K.A. Modelling of structure of engineering networks in territorial planning of the city // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2015. № 4. С. 33–40.

2. Melkumov V.N., Kuznetsov I.S., Kobelev V.N. Choosing a mathematical model of heat supply network route // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2012. № 1 (13). С. 17–23.

3. Дилигенский Н.В., Немченко В.И., Посашков М.В. Методы системного анализа для многокритериального оценивания и повышения энергетической эффективности объектов и систем децентрализованного теплоснабжения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4. С. 949–956.

4. Андреев А.М., Штуца И.М. Подход к многокритериальной оптимизации на основе генетического алгоритма // Интеллектуальные системы в производстве. 2008. № 2 (12). С. 16–21.

5. Гвишиани Д.М., Емельянова С.В. Многокритериальные задачи принятия решений. М.: Машиностроение. 1978. 191 с.

6. Батищев Д.И., Шапошников Д.Е. Многокритериальный выбор с четом индивидуальных предпочтений. Н.Новгород: ИПФ РАН. 1994. 92 с.

7. Loboda A.V., Chuikina A.A. About the alignment design of heat supply systems on the basis of system analysis // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. № 3 (47). С. 35–45.

8. Melkumov V.N., Tulskaya S.G., Chuykina A.A., Dubanin V.Yu. Solving the multi-criteria optimization problem of heat energy transport // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Т. 1258. С. 3–10.

9. Чуйкина А.А. Укрупненные параметры тепловой сети при выборе оптимальной трассы трубопроводов // Наука и образование – 2019. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Мурманск. 2020. С. 323–331.

10. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 2001. 472 с.

11. Чуйкина А.А., Бохан А.Р., Благовестная Е.О., Панин А.В. Многокритериальная оценка при выборе оптимальной трассы тепловой сети // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2020. №4 (21). С. 23–27.

12. Bürkner P., Schwabe R., Holling H. Optimal designs for the generalized partial credit model // British Journal of Mathematical and Statistical Psychology. Vol. 72, Issue 2, May 2019. Pp. 271–293.

13. Sasaki Y. Rationalizability in multicriteria games // International Journal of Game Theory. Vol. 48, Issue 2, 1 June 2019. Pp. 673–685.

14. Deng T., Fu J., Zheng Q., Wu J., Pi Y. Performance-Based Wind-Resistant Optimization Design for Tall Building Structures // Journal of Structural Engineering (United States). Vol. 145, Issue 10, 1 October 2019, Номер статьи 04019103.

15. Chen D.D., Lin Y.C. A Particle Swarm Optimization-Based Multi-level Processing Parameters Optimization Method for Controlling Microstructures of an Aged Superalloy During Isothermal Forging // Metals and Materials International. Vol. 25, Issue 5, 6 September 2019, Pp. 1246–1257.

16. Tkachuk A., Pilipaka L., Azizova A. Optimization of city water supply networks on their structural and functional analysis base // International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol.. 7. Issue 3. Pp. 680–685.

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

18. Stennikov V., Mednikova E., Postnikov I., Penkovskii A. Optimization of the effective heat supply radius for the district heating systems // Environmental and Climate Technologies. 2019. Vol. 23. Issue 2. С. 207–221.

Информация об авторах
Чуйкина Анастасия Александровна, ассистент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела. E-mail: a.a.chuykina@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Лобода Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и механики. E-mail: lobvgasu@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Сотникова Ольга Анатольевна, доктор технических наук, заведующая кафедрой проектирования зданий и сооружений им. Н.В. Троицкого. E-mail: hundred@vgasu.vrn.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Поступила 26.01.2021 г.

***Chuykina A.A., Loboda A.V., Sotnikova O. A.**
Voronezh State Technical University
**E-mail: a.a.chuykina@mail.ru*

DESIGN OF THE OPTIMAL PIPELINE ROUTE OF THE HEAT NETWORK

***Abstract.** The choice of the optimal pipeline route is one of the fundamental tasks in the design of heat supply systems, the analytical solution of which is almost impossible due to the presence of many interdependent factors affecting the final solution. The article considers one of the possible methods for determining a limited number of the most profitable options for tracing a heat network, based on solving a multi-criteria optimization problem using system analysis. The proposed method provides a limited number of profitable tracing options in the absence of the need for expert evaluation of several optimality criteria. The paper presents the main enlarged parameters of the heat network that allow to solve the optimization problem under consideration at the initial stage of designing heat supply systems, in the absence of a complete constructive calculation of the schemes under consideration and taking into account qualitative and quantitative optimization indicators. The results of limiting the obviously unprofitable options of the pipeline route are presented in graphic form for clarity. It is proposed that in the presence of a large number of optimality criteria, the geometric visibility of the considerations in the plane should be replaced by the study of a table or matrix of characteristics. The essence of this study consists in the sequential consideration of all possible pairs of rows from the compiled matrix.*
***Keywords:** heat networks, multi-criteria optimization, system analysis, heat supply, pipelines.*

REFERENCES

1. Mel'kumov V.N., Chujkin S.V., Papshickij A.M., Sklyarov K.A. Modelling of structure of engineering networks in territorial planning of the city. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2015. Issue 4. Pp. 33–40.
2. Melkumov V.N., Kuznetsov I.S., Kobelev V.N. Choosing a mathematical model of heat supply network route. Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2012. Issue 1. Pp. 17–23.
3. Diligensky N. V., Nemchenko V. I., Pososhkov M. V. Methods of system analysis for multi-criteria evaluation and improvement of energy efficiency of objects and systems of decentralized heat supply [Metody sistemnogo analiza dlya mnogokriterial'nogo ocenivaniya i povysheniya energeticheskoj effektivnosti ob"ektov i sistem decentralizovannogo teplosnabzheniya]. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2011. Vol. 13. Issue 4. Pp. 949–956. (rus)
4. Andreev A.M., Shtutsa I. M. Approach to multi-criteria optimization based on a genetic algorithm [Podhod k mnogokriterial'noj optimizacii na osnove geneticheskogo algoritma]. Intelligent systems in production. 2008. No. 2 (12). pp. 16–21. (rus)
5. Gvishiani D.M., Emelyanova S.V. Multicriteria problems of decision-making [Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenij]. Moscow: Mashinostroenie. 1978. 191 p. (rus)
6. Batishchev D.I., Shaposhnikov D.E. Multicriteria choice taking into account individual preferences [Mnogokriterial'nyj vybor s chetom individual'nyh predpochtenij]. N. Novgorod: IPF RAS. 1994. 92 p. (rus)
7. Loboda A.V., Chuikina A.A. About the alignment design of heat supply systems on the basis of

system analysis. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. Issue 3 (47). Pp. 35–45.

8. Melkumov V.N., Tulskaya S.G., Chuykina A.A., Dubanin V.Yu. Solving the multi-criteria optimization problem of heat energy transport. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Issue. 1258. Pp. 3–10.

9. Chuykina A. Integrated thermal parameters of the network when choosing the optimal route for the pipeline [Ukrupnennye parametry teplovoj seti pri vybore optimal'noj trassy truboprovodov]. Science and education – 2019. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Murmansk. 2020. Pp. 323–331. (rus)

10. Sokolov, E.Ya. Heat supply and heat networks [Teplofikatsiya i teplovye seti]. M.: MEI. 2001, 472 p. (rus)

11. Chuikina A. A., Bohan A. R., Blagovestnaya E. O., Panin A.V. Multi-criteria assessment when choosing the optimal route of the thermal network [Mnogokriterial'naya ocenka pri vybore optimal'noj trassy teplovoj seti]. Urban planning. Infrastructure. Communications. 2020. Issue. 4 (21). Pp. 23–27. (rus)

12. Bürkner P., Schwabe R., Holling H. Optimal designs for the generalized partial credit model // British Journal of Mathematical and Statistical Psychology. Vol. 72, Issue 2, May 2019. Pp. 271–293.

13. Sasaki Y. Rationalizability in multicriteria games. International Journal of Game Theory. Vol. 48, Issue 2, 1 June 2019. Pp. 673–685.

14. Deng T., Fu J., Zheng Q., Wu J., Pi Y. Performance-Based Wind-Resistant Optimization Design for Tall Building Structures. Journal of Structural Engineering (United States). Vol. 145, Issue 10, 1 October 2019, 04019103.

15. Chen D.D., Lin Y.C. A Particle Swarm Optimization-Based Multi-level Processing Parameters Optimization Method for Controlling Microstructures of an Aged Superalloy During Isothermal Forging. Metals and Materials International. Vol. 25, Issue 5, 6 September 2019, Pp. 1246–1257.

16. Tkachuk A., Pilipaka L., Azizova A. Optimization of city water supply networks on their structural and functional analysis base. International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. Issue 3. Pp. 680–685.

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

18. Stennikov V., Mednikova E., Postnikov I., Penkovskii A. Optimization of the effective heat supply radius for the district heating systems. Environmental and Climate Technologies. 2019. Vol. 23. Issue 2. Pp. 207–221.

Information about the authors
Chuykina, Anastasia A. Assistant. E-mail: a.a.chuykina@mail.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya Str., 84.

Loboda, Alexander V. DSc, Professor. E-mail: lobvgasu@yandex.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya Str., 84.

Sotnikova Olga A. DSc, Head of the Department of Design of Buildings and Structures named after N. V. Troitsky. E-mail: hundred@vgasu.vrn.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya Str., 84.

Received 26.01.2021

Для цитирования:
Чуйкина А.А., Лобода А.В., Сотникова О.А. Проектирование оптимальной трубопроводной трассы тепловой сети // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 27–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-28-37

For citation:
Chuykina A.A., Loboda A.V., Sotnikova O.A. Design of the optimal pipeline route of the heat network. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 28–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-2-28-37