

Разработка методики и программы расчёта оптимального маршрута трубопроводной трассы системы теплоснабжения

Введение

Предотвращение хаотичного развития систем теплоснабжения и повышение их энергетической эффективности является важной научно-практической задачей энергетического и строительного комплексов, решение которой напрямую связано с цифровой трансформацией рассматриваемых систем. Основным препятствиями при этом является перевод существующей разрозненной информации в цифровую форму и её дальнейшее использование современными вычислительными системами. На сегодняшний момент нет единого подхода к решению задачи управления энергетическими системами городов или их отдельных микрорайонов. Каждая крупная энергоснабжающая или сбытовая отрасль разрабатывает собственные подходы в решении задачи цифровой трансформации своих объектов, что затрудняет их интеграцию в смежные отрасли. Существующие законы и нормативные акты намечают лишь основные направления деятельности в реализации программ энергосбережения. Применительно к системам теплоснабжения они могут сводиться к снижению капитальных и эксплуатационных затрат при строительстве новых или реконструкции существующих систем. Одним из основных вопросов при этом является выбор наиболее выгодного (оптимального) маршрута трубопроводной трассы между теплогенерирующим источником и абонентом тепловой сети.

Очевидно, что чем больше подключаемых потребителей, тем более разветвлённой должна быть тепловая сеть, а, следовательно, тем более трудоёмкими являются расчёты при проектировании. Этого можно избежать путём их автоматизации посредством различных программно-вы-

Чем больше подключаемых потребителей, тем более разветвлённой должна быть тепловая сеть, а, следовательно, тем более трудоёмкими являются расчёты при проектировании

числительных комплексов. В этом случае необходимо разработать методику расчёта оптимального маршрута трубопроводной трассы системы теплоснабжения и реализовать её в виде программного продукта. Для примера рассмотрим случай с ограниченным количеством исходных данных о конструируемой системе, что характерно для начальной стадии проектирования, когда требуется определиться с тем или иным вариантом трассы.

Поставленную задачу удобно решать с помощью методов системного анализа [1–3]. Для этого необходимо определиться с параметрами (критериями), относительно которых будет проводиться оптимизация, и решить, какими именно методами она будет проводиться. Ниже рассмотрим более подробно эти две подзадачи.

Критерии и методы оптимизации

В условиях ограниченности исходных данных на начальной стадии проектирования в качестве критериев оптимальности наиболее целесообразно применять укрупнённые характеристики, описывающие основные особенности проектируемой системы. В настоящее время принято выделять характеристики: время строительства, тепловые потери, надёжность, металлоёмкость и оборот теплоты. В качестве дополнительной характеристики, отражающей равномерность распределения температур у потребителя, можно применить дисперсию температуры у абонента.

Рецензия эксперта на статью получена 01.03.2021 [The expert review on the article received on Mart 1, 2021].

УДК 697.33:697.34. Научная специальность: 05.23.03.

Разработка методики и программы расчёта оптимального маршрута трубопроводной трассы системы теплоснабжения

А. А. Чуйкина, ассистент, кафедра теплогазоснабжения и нефтегазового дела, Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); **О. А. Сотникова**, д.т.н., профессор, заведующая кафедрой проектирования зданий и сооружений имени Н.В. Троицкого, ВГТУ

Предложена методика определения наиболее выгодного варианта трассировки тепловой сети, базирующейся на решении многокритериальной оптимизационной задачи с помощью системного анализа. Выявлены критерии оптимальности, отражающие конструктивные, эксплуатационные, экономические и другие факторы, влияющие на работу систем теплоснабжения. Разработана программа расчёта оптимального маршрута трубопроводной трассы, приведён пример работы программы. Разработанная программа и методика могут применяться при проектировании систем теплоснабжения на начальной стадии, при ограниченном количестве исходных данных и отсутствии конструктивного расчёта тепловой сети.

Ключевые слова: теплоснабжение, энергосбережение, тепловая сеть, многокритериальная оптимизация, программирование.

UDC 697.33:697.34. Scientific specialty number: 05.23.03.

Development of methods and programs for calculating the optimal route alignment pipeline heating system

A. A. Chuykina, assistant, the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business, Voronezh State Technical University (VSTU); **O. A. Sotnikova**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Design of Buildings and Structures named after N.V. Troitsky, VSTU

A method for determining the most advantageous option for tracing a heat network based on solving a multi-criteria optimization problem using system analysis is proposed. The optimality criteria reflecting the design, operational, economic and other factors affecting the operation of heat supply systems are identified. A program for calculating the optimal route of a pipeline route has been developed, and an example of how the program works is given. The developed program and methodology can be used in the design of heat supply systems at the initial stage, with a limited amount of initial data and no constructive calculation of the heat network.

Key words: heat supply, energy saving, heat network, multi-criteria optimization, programming.

Время строительства может быть определено по формуле [1, 4]:

$$T_{\text{стр}} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \left(\frac{\theta_{kj} V_{kj}}{N_{kj}} \right), \quad (1)$$

где θ_{kj} — трудовые затраты на единицу строительных работ, чел.ч; V_{kj} — объём работ; N_{kj} — состав исполнителей, чел.

Ввиду ограниченности исходных данных на начальном этапе проектирования тепловые потери рассматриваемой сети в год [2] можно оценить по формуле:

$$q_{\text{т.п}} = q M_{\text{ус}}, \quad (2)$$

где q — удельные годовые тепловые потери, отнесённые к 1 м² условной материальной характеристики теплосети, Гкал/(год·м²); $M_{\text{ус}}$ — условная материальная характеристика теплосети, рассчитанная по наружной поверхности изоляции, м².

В качестве критерия надёжности может служить показатель, определяемый по формуле [1]:

$$R_{\text{сист}}(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} = 1 - \sum_{j=1}^{j=l} \left\{ \frac{\Delta Q_j}{Q_0} \frac{\omega_i}{\sum (\omega_i)} \left[1 - e^{-\sum (\omega_i t)} \right] \right\}, \quad (3)$$

где Q_0 — расчётный расход теплоты, МВт; ΔQ_j — недоподача теплоты, МВт; $Q(t)$ — математическое ожидание характеристики качества функционирования системы; τ — время, год; ω_i — параметр потока отказов, год⁻¹.

Для оценки металлоёмкости в практике принято пользоваться материальной характеристикой тепловой сети, которая представляет собой произведение диаметра трубопровода на его длину. При отсутствии данных диаметр трубопровода можно определить по формуле:

$$D = \frac{A_d^B G^{0,38}}{R_{\text{л}}^{0,19}}, \quad (4)$$

где G — расход теплоносителя (для данной формулы теплоноситель — вода), кг/с; $R_{\text{л}}$ — удельные потери давления, кг/(м²·м); A_d^B — поправочный коэффициент.

Таким образом, зависимость для определения материальной характеристики сети примет вид:

$$M = \sum_{i=1}^n (M_i) = \frac{A_d^B}{R_{\text{л}}^{0,19}} l_i, \quad (5)$$

где l_i — длина рассматриваемого участка, м. Фактический оборот тепла позволяет оценить степень разветвлённости тепловой сети [1, 2, 5]:

$$Z_{\Phi} = \sum Z_{\Phi i} = \sum (Q_{\text{pi}} l_i), \quad (6)$$

где Q_{pi} — расчётная тепловая нагрузка, Гкал/ч. Оценка равномерности распределения температур у потребителя может быть проведена с помощью смещённой

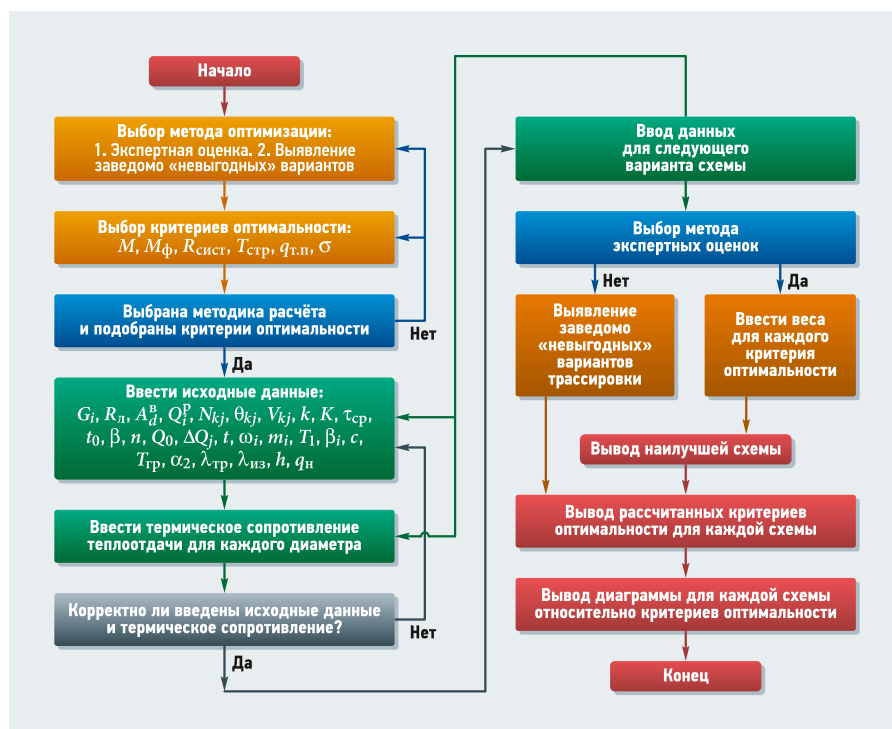


Рис. 1. Блок-схема программы расчёта оптимальной трассировки тепловой сети

оценки дисперсии, которая определяется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{ii}^n - \bar{T}_1)^2}, \quad (7)$$

где T_{ii}^n — температура теплоносителя у потребителя; $\bar{T}_1$ — выборочное среднее значение температуры теплоносителя, определяемое по формуле:

$$\bar{T}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{ii}^n). \quad (8)$$

Наиболее распространённый метод решения транспортной задачи [1, 6–8], к которой относится рассматриваемый вопрос, базируется на решении функции:

$$S = \sum_{k=1}^n (x_k p_k), \quad (9)$$

где x_k — параметр оптимальности; p_k — вес параметра.

В качестве параметра оптимизации необходимо применить рассмотренные выше критерии (1), (2), (3), (5), (6) и (7). Основной вопрос в решении функции (9) заключается в определении веса параметра, что принято осуществлять с помощью экспертных оценок. Как отмечается в работе [3], наиболее целесообразным методом определения веса является метод, базирующийся на поиске относительных частот преобразованных рангов, записываемых в виде:

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^m (A_{ij})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{ij})}, \quad (10)$$

где A_{ij} — ранг критерия после преобразования.

Основным недостатком в приведённом методе оптимизации является субъективный выбор экспертами веса критериев, при этом неверный выбор может привести к ошибочному решению. Этого можно избежать путём применения метода, ограничивающего заведомо невыгодные варианты трассировки. При этом выбирается не один оптимальный вариант, а группа вариантов. Таким образом «отсекаются» те варианты трассы, которые будут невыгодными при любых значениях весов.

Смысл этого метода состоит в последовательном рассмотрении пар трассировок. Если все параметры оптимизации в одном из двух вариантов содержат величины, строго большие соответствующих величин во втором варианте, то первую строку можно исключить из поиска оптимальных вариантов.

Программа расчёта оптимального маршрута трубопроводной трассы

Для реализации вышеприведённой методики определения наиболее выгодного варианта трассировки тепловой сети необходимо разработать программу расчёта. Поскольку решение поставленной задачи предполагает большой объём вычислений, использование программы позволит сократить временные и трудовые затраты при проектировании.

Реализация программной части работы выполнялась на высокоуровневом свободном объектно-ориентированном языке программирования Python [9, 10].

Блок-схема предлагаемой программы приводится ниже на рис. 1.

Разработанная программа расчёта позволяет осуществить выбор наиболее выгодного варианта трассировки с учётом укрупнённых критериев материалёмкости, надёжности, тепловых потерь времени строительства и равномерности распределения температуры у потребителя.

На первом этапе расчёта необходимо выбрать метод и критерии оптимизации. Далее необходимо ввести исходные данные для расчёта, после чего выполняется проверка корректности введённой информации (рис. 2), и программа проводит расчёт согласно методике, приведённый выше. Затем вводятся данные по второй схеме и так далее для всех рассматриваемых вариантов трассировки.

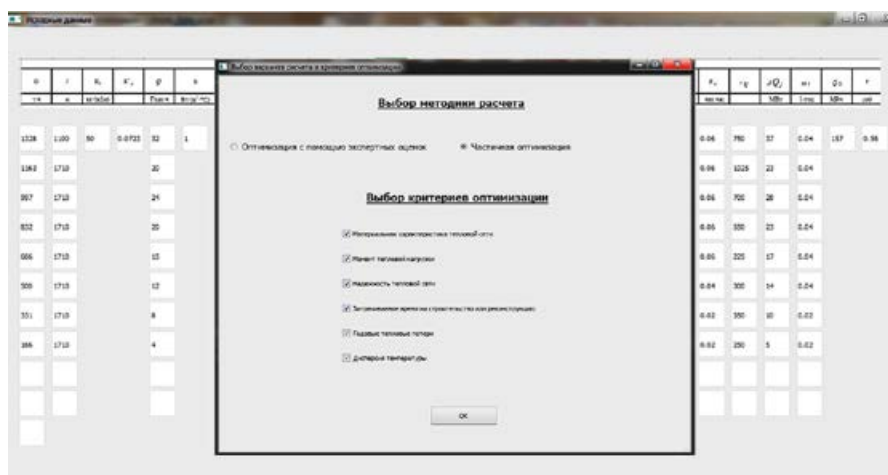


Рис. 2. Выбор методики оптимизации и ввод исходных данных

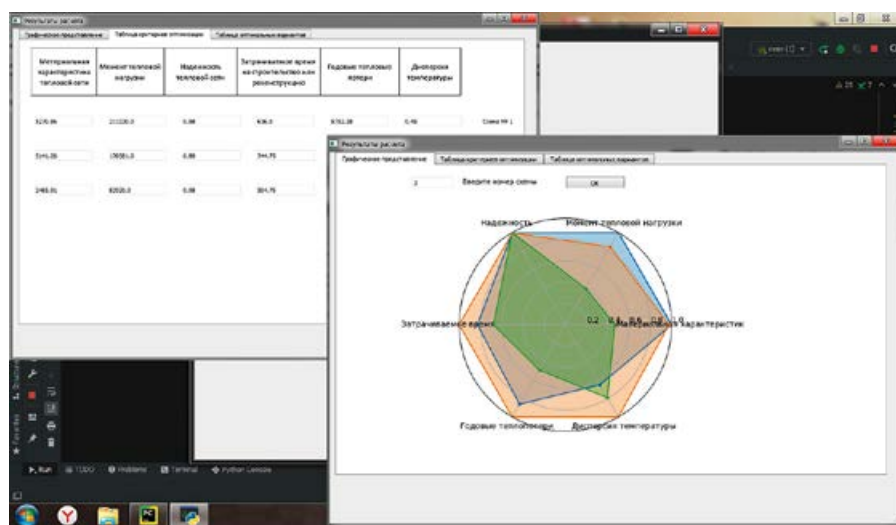


Рис. 3. Вывод расчётных данных программы оптимизации

При выборе метода оптимизации с экспертными оценками на следующем этапе задаются веса каждого критерия и затем выводится конечная информация, содержащая рассчитанные критерии, наиболее выгодный вариант трассировки, и лепестковая диаграмма для каждой схемы теплоснабжения (рис. 3).

Выводы

Предложенная методика расчёта наиболее выгодного варианта трассировки тепловой сети отличается от существующих возможностью комбинированного оценивания рассматриваемых маршрутов не только с помощью экспертных оценок, но и с помощью метода ограниченной опти-

мизации, позволяющей выделить ряд заведомо невыгодных вариантов, причём без привлечения экспертов, что в свою очередь снижает субъективность получаемого решения.

Разработанная программа расчёта позволяет получить как графическое выражение результатов расчёта оптимального маршрута, так и табличное, что облегчает анализ полученных данных. Также имеется возможность определения оптимального маршрута, как с использованием метода экспертных оценок, так и метода исключения заведомо невыгодных вариантов в отдельности.

Всё это позволяет значительно сократить трудоёмкость и время выбора оптимального варианта трассы при проектировании систем централизованного теплоснабжения. ●



1. Melkumov V.N., Tulskeya 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. Vol. 1258. Pp. 3–10.
2. Loboda A.V., Chuykina A.A. About the alignment design of heat supply systems on the basis of system analysis. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020. No. 3. Pp. 35–45.
3. Мелькумов В.Н., Кузнецов И.С., Кобелев В.Н. Выбор математической модели трасс тепловых сетей // *Научный вестник ВГАСУ. Серия: Строительство и архитектура*, 2011. № 2. С. 31–36.
4. Авдолимов Е.М. Реконструкция водяных тепловых сетей. — М.: Стройиздат, 1990. 304 с.
5. Папушкин В.Н. Радиус теплоснабжения. Хорошо забытое старое // *Новости теплоснабжения*, 2010. № 9. С. 44–49.
6. Сачивка В.Д. Модели и методы выбора оптимального способа прокладки подземных инженерных коммуникаций в условиях городской застройки // *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2011. № 12. С. 359–360.
7. Гвишиани Д.М., Емельянова С.В. Многокритериальные задачи принятия решений. — М.: Машиностроение, 1978. 192 с.
8. Ногин В.Д. Принятие решений при многих критериях. — СПб.: Изд-во «ЮТАС», 2007. 104 с.
9. Доусон М. Программируем на Python / Пер. с англ. — СПб.: Питер, 2014. 416 с.
10. Лутц М. Изучаем Python, 4-е изд. / Пер. с англ. — СПб.: СимволПлюс, 2011. 1280 с.

References — see page 78.

Development of methods and programs for calculating the optimal route alignment pipeline heating system. Pp. 46–48.

A. A. Chuykina, assistant, the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business, Voronezh State Technical University (VSTU); **O. A. Sotnikova**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Design of Buildings and Structures named after N.V. Troitsky, VSTU

1. V.N. Mel'kumov, S.G. Tulskaia, A.A. Chuykina, V.Yu. Dubanin. Solving the multi-criteria optimization problem of heat energy transport. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol. 1258. Pp. 3–10.
2. A.V. Loboda, A.A. Chuykina. About the alignment design of heat supply systems on the basis of system analysis. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020. No. 3. Pp. 35–45.
3. V.N. Mel'kumov, I.S. Kuznecov, V.N. Kobelev. *Vybor matematicheskoi modeli trass teplovykh setej* [Choice of a mathematical model of heating network routes]. *Nauchnyj vestnik VGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Series: Building and architecture]. 2011. No. 2. Pp. 31–36. [In Russian]
4. E.M. Avdolinov. *Rekonstrukcija vodnykh teplovykh setej* [Reconstruction of water heating networks]. Moscow. *Stroizdat* [Publishing House of literature on the construction and architecture ("Stroizdat" Publishers)]. 1990. 304 p. [In Russian]
5. V.N. Papushkin. *Radius teplosnabzhenija. Horosho zabytoe staroe* [Radius of heat supply. Well forgotten old]. *Novosti teplosnabzhenija* ["Heat supply news" Magazine]. 2010. No. 9. Pp. 44–49. [In Russian]
6. V.D. Sachivka. *Modeli i metody vybora optimal'nogo sposoba prokladki podzemnykh inzhenernykh kommunikacij v usloviyakh gorodskoi zastrojki* [Models and methods for choosing the optimal method for laying underground utilities in urban areas]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Information and analytical bulletin of the mining industry]. 2011. No. 12. Pp. 359–360. [In Russian]
7. D.M. Gvishiani, S.V. Emel'janova. *Mnogokriterial'nye zadachi prinjatija reshenij* [Multi-criteria decision-making tasks]. Moscow. *Mashinostroenie* ["Engineering Industry" Publishers]. 1978. 192 p. [In Russian]
8. V.D. Nogin. *Prinjatie reshenij pri mnogih kriterijah* [Decision making under many criteria]. St. Petersburg. *Izd-vo "JuTAS"* ["Jutas" Publishers]. 2007. 104 p. [In Russian]
9. M. Douson. *Programmiruem na Python* [We program in Python]. Transl. from English. St. Petersburg. *Piter* ["Petersburg" Publishers]. 2014. 416 p. [In Russian]
10. M. Lutz. *Izuchaem Python* [Learning Python]. 4th edition. Transl. from English. St. Petersburg. *SimvolPlus* ["SymbolPlus" Publishers]. 2011. 1280 p. [In Russian]