

УДК 697.34

МОДЕЛЬ ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

© С.Г. Культяев, Э.М. Малая

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение; проектирование сетей теплоснабжения; метод термозкономической оптимизации; методика подбора диаметров.

Предлагается метод термозкономической оптимизации, позволяющий усовершенствовать проектные гидравлические расчеты тепловых сетей. Представлены результаты расчетов для сети централизованного теплоснабжения поселка городского типа. Расчеты показывают, что диаметр трубы, толщина изоляции и время работы системы являются основными параметрами для оптимального проектирования сетей теплоснабжения.

Централизованное теплоснабжение (ЦТ) является важным источником энергии для страны и может обеспечивать экономически эффективное и экологически благоприятное энергоснабжение городов [1–6].

Системы ЦТ по сравнению с децентрализованными системами обладают потенциалом высокой энергетической эффективности и являются более «экологически чистыми».

Система трубопроводов, по которым горячая вода (теплоноситель) распределяется между абонентами, является одной из основных частей системы централизованного теплоснабжения. Эти трубопроводы должны быть тщательно спроектированы и подобраны так, чтобы обеспечить минимальные затраты не только во время строительства, но и во время эксплуатации.

Существует распространенная методика подбора диаметров распределительных тепловых сетей, в которой учитываются только скорость движения теплоносителя и падение давления по длине трубопровода и в местных сопротивлениях. Определение размеров труб сети централизованного теплоснабжения играет важную роль по экономическим соображениям. Если выбран диаметр трубопровода больше, чем требуется, то инвестиционные затраты и затраты на распределение тепловой энергии за счет увеличения площади наружной поверхности будут высокими. Для уменьшения потерь тепловой энергии можно, конечно, использовать теплоизоляцию, однако стоимость инвестиций в обустройство теплоизоляции трубопровода будет также высока. В противном случае если выбранный диаметр трубопровода меньше, то возрастут затраты, связанные с перекачкой теплоносителя и поддержания его необходимой скорости в сети, иначе при снижении скорости возрастут тепловые потери.

Таким образом, при проектировании тепловых сетей должны быть учтены все вышесказанные аспекты. При постоянно растущей потребности в тепловой энергии и стоимости топливных ресурсов должны быть пересмотрены обычные методы, используемые при проектных изысканиях.

Поэтому мы предлагаем производить проектный подбор параметров тепловых сетей (а именно диаметры

трубопроводов и толщины тепловой изоляции) с точки зрения термозкономического расчета.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА

1. Эксергетические потери, связанные с потерями давления. Эксергетические потери на единичном участке трубопровода из-за потери давления определяются по формуле:

$$E_{des} = \frac{T_o}{T_{cp}} \cdot \frac{m_w}{\rho_w} \cdot \frac{\Delta P}{\eta_{nac}}, \quad (1)$$

где T_o – температура окружающей среды, °C; T_{cp} – средняя температура воды на участке трубы, °C; $\frac{m_w}{\rho_w}$ –

расход теплоносителя на данном участке трубопровода, т/ч; η_{nac} – к. п. д. циркуляционного насоса, обеспечивающего необходимую скорость на данном участке трубы; ΔP – общая потеря давления на участке трубопровода, Па, определяемая по формуле:

$$\Delta P = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \cdot \rho \frac{v^2}{2},$$

где λ – коэффициент потерь давления на трение по длине и рассчитывается в зависимости от числа Рейнольдса и эквивалентной шероховатости трубы. Для существующих труб значение эквивалентной шероховатости труб принимается равным 0,15 мм; $\sum \xi$ – сумма коэффициентов местных потерь в арматуре трубопроводов.

2. Эксергетические потери, связанные с потерями тепла на участке. Предполагая, что температура на наружной поверхности трубы (T_o) является постоянной и коэффициенты теплопроводности трубы и

изоляционного покрытия (λ_{mp} и $\lambda_{изол}$) не зависят от температуры, изменение температуры теплоносителя при движении внутри трубы описывается уравнением:

$$T_k - T_o = (T_n - T_o) \cdot e^{-AB},$$

где T_n и T_k – температура жидкости в начале и конце расчетного участка трубы.

Коэффициенты A , B рассчитываются как:

$$A = \left(\frac{2\pi}{\frac{1}{r_i h_i} + \frac{1}{\lambda_{mp}} \ln\left(\frac{r_1}{r_i}\right) + \frac{1}{\lambda_{изол}} \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right) + \frac{1}{r_0 h_t}} \right),$$

$$B = \left(\frac{L}{m_w \cdot C_p} \right);$$

h_i – коэффициент конвективной теплоотдачи внутри труб, рассчитываемый по формуле:

$$h_i = \frac{\lambda_{ia} \cdot 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}}{D},$$

h_t – суммарный коэффициент теплопередачи вокруг трубы, который равен сумме радиационного h_{rad} и конвективного $h_{конв}$ коэффициентов теплообмена:

$$h_t = h_{rad} + h_{конв},$$

где

$$h_{rad} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{нов}^4 - T_o^4)}{T_{нов} - T_o};$$

$$h_{конв} = 11,58 \cdot \left(\frac{1}{d} \right)^{0,2} \left(\frac{2}{t_{нов} + t_o} \right)^{0,181} (t_{нов} - t_o)^{0,266} (1 + 0,7935 \cdot v_\delta)^{0,5},$$

ε – степень черноты покрытия материала изоляции трубы; $T_{нов}$ – абсолютная температура на поверхности изоляционной конструкции, °C; v_δ – скорость воздуха, омывающего внешнюю поверхность изоляционной конструкции, м/с.

Тогда для участка трубопровода значение эксергии можно найти по уравнению:

$$E_{lose} = m_w \left(\int_{T_o}^{T_n} C_p(T) dT - T_o \int_{T_o}^{T_n} \frac{C_p(T)}{T} dT \right), \quad (2)$$

где C_p получается из выражения:

$$C_p = 12,345 - 0,088T + 3,581 \cdot 10^{-4} T^2 - 6,527 \cdot 10^{-7} T^3 + 4,555 \cdot 10^{-10} T^4.$$

Таким образом, потери эксергии между началом (E_n) и концом (E_k) участка трубы за счет потерь тепла в атмосферу могут быть рассчитаны как:

$$\Delta E = E_n - E_k.$$

ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА

Ежегодные капитальные затраты включая капитальные операционные и эксплуатационные затраты, за исключением затрат на топливо, для k -го участка трубопровода определяются следующим выражением:

$$Z = (CRF + \sigma_k) I_k + \gamma_k t (E_e)_k + R_k,$$

где CRF – норма дисконтирования:

$$CRF = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}},$$

σ_k, γ_k – коэффициенты, составляющие эксплуатационные и технические части затрат I_k ; t – ежегодное время работы установки при номинальной мощности, ч; I_k – общие затраты на монтаж участка трубопровода, тыс. руб.; R_k – прочие затраты, тыс. руб.

Таким образом, для любого k -го участка тепловой сети суммарные капитальные затраты, включающие операционные и эксплуатационные составляющие (без учета топлива), можно записать в виде:

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k}{k}.$$

Ежегодные капитальные затраты, включая капитальные операционные и эксплуатационные затраты и затраты на топливо для одного участка трубы, описываются уравнением:

$$(\dot{C}_T)_k = \dot{Z}_k + [c_{des}(\dot{E}_{des}) + c_e(\dot{E}_{lose})]_k. \quad (3)$$

Целью термoeкономической оптимизации является снижение капитальных затрат. Поэтому уравнение (3) используется в качестве целевой функции. Затраты можно свести к минимуму, решая уравнение (3) либо аналитически, либо численными методами. В качестве основных переменных выступают диаметр трубы и толщина тепловой изоляции.

Для каждого сегмента трубы общие затраты на монтаж I_k будут складываться из затрат на покупку самих труб, затрат на теплоизоляцию, арматуру и покровный слой. Затраты на материал труб определяются формулой:

$$I_{mp} = (1,308032 + 0,54011M + 1,4933 \cdot 10^{-5} M^2) L_{mp} X_{mp}.$$

Затраты на тепловую изоляцию опишутся выражением:

$$I_{из} = (11,15648 + 299,308e_{из} - 471,83e_{из}^2) A_{из} X_{из},$$

где M – материальная характеристика трубопровода;
 $e_{из}$ – толщина изоляции, м; $A_{из}$ – площадь поверхности изоляции, м².

ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ВСЕЙ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ

Применяя уравнение (3) для всей системы, состоящей из k элементов, целевую функцию можно записать в виде:

$$(\dot{C}_T)_{c_{ит}} = \sum_{k=1}^k (\dot{Z}_k + [c_{des}(\dot{E}_{des}) + c_e(\dot{E}_{lose})]_k). \quad (4)$$

Когда заданы мощность проектируемой системы теплоснабжения и место расположения трубопроводов,

подбираемыми величинами при проектировании являются диаметр трубопроводов и толщина тепловой изоляции. И в этом случае диаметр труб и толщина их теплоизоляции подбираются таким образом, чтобы целевая функция (3) для каждого участка имела бы оптимальные значения. Для получения этих оптимальных значений находится производная целевой функции по данным переменным. В результате операции получают $2 \times k$ нелинейных уравнений для $2 \times k$ неизвестных. Система нелинейных уравнений может быть решена с помощью обычных математических методов. Нелинейность в этой системе уравнений вызывается наличием параллельных расчетов как тепловых потерь трубопровода, так и потерь давления, поэтому система $2 \times k$ нелинейных уравнений с $2 \times k$ неизвестными должна быть решена одновременно. По этой причине аналитическое решение для данной системы уравнений не может быть применено. Поэтому данная задача решается на компьютере итерационным методом Ньютона.

Предпроектный расчет был произведен для системы централизованного теплоснабжения поселка городского типа Саратовской области (рис. 1).

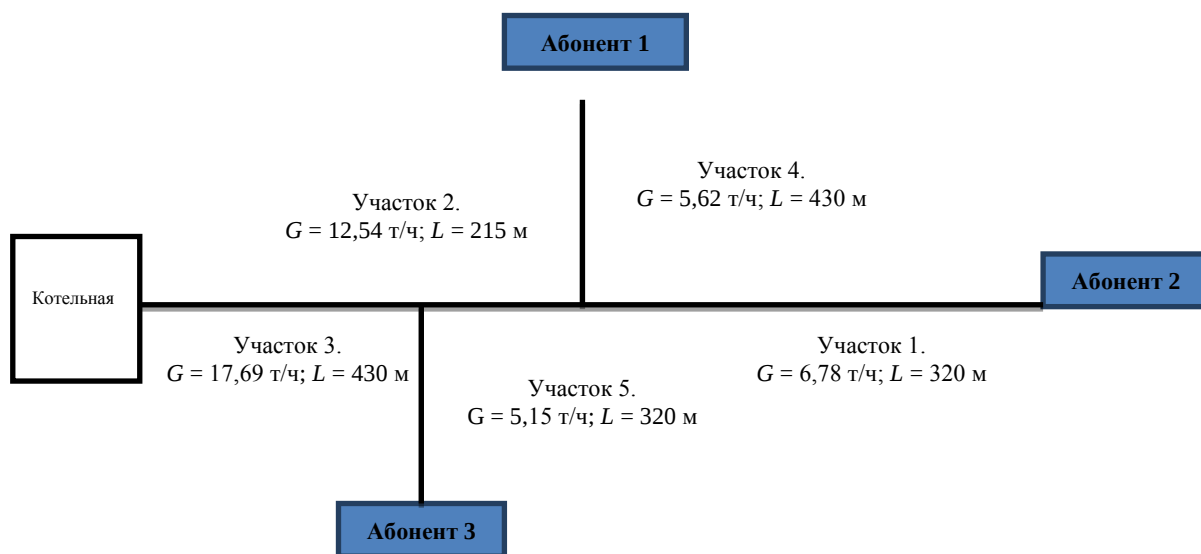


Рис. 1. Схема системы централизованного теплоснабжения поселка городского типа Саратовской области

Таблица 1

Результаты расчетов по классической методике подбора оптимального диаметра трубопроводов тепловых сетей

Участок/Параметр	1	2	3	4	5	Итого
d , м	0,133	0,219	0,219	0,133	0,127	
v , м/с	1,46	1,06	1,5	1,22	1,25	
ΔP , Па	58770	12082	48456	56753	47585	
$\dot{Z}$, тыс. руб.	1765	1970	3935	2470	1765	11905
$\dot{C}_{des}$, тыс. руб.	690	260	1485	560	430	3425
$\dot{C}_e$, тыс. руб.	1670	1410	2830	2250	1615	9775
$\dot{C}_T$, тыс. руб.	4125	3640	8250	5280	3810	25105

Таблица 2

Результаты расчетов с применением предлагаемого метода подбора оптимального диаметра трубопроводов тепловых сетей

Участок/Параметр	1	2	3	4	5а	5б	Итого
d , м	0,133	0,219	0,219	0,133	0,114	0,108	
v , м/с	1,46	1,06	1,5	1,22	1,4	1,7	
ΔP , Па	58770	12082	48456	56753	53125	23159	
L , м	320	215	430	430	273	47	
$\dot{Z}$, тыс. руб.	1765	1970	3935	2470	1500	190	11830
$\dot{C}_{des}$, тыс. руб.	690	260	1485	560	270	190	3455
$\dot{C}_e$, тыс. руб.	1670	1410	2830	2250	1370	175	9705
$\dot{C}_T$, тыс. руб.	4125	3640	8250	5280	3300	575	24990

В табл. 1 показаны результаты расчетов по классической методике подбора оптимального диаметра трубопроводов тепловых сетей по рис. 1. Как видно из расчетов, участки под номерами 1, 2, 3 являются магистральными участками с суммарными потерями давления на них 119,3 кПа. Гидравлическая невязка участков 1 и 4 составляет 3,43 %, что допускается существующими нормами, однако невязка участков 2 и 5 составляет 32,84 %. При стандартной постановке задачи предлагалось оснастить участок дросселирующей шайбой. Мы же предлагаем для подбора диаметров участка 5 и гидравлической увязки воспользоваться термoeкономическим методом (табл. 2).

В табл. 2 приведены аналогичные результаты с применением предлагаемого метода гидравлического расчета.

При балансировке системы расчетный диаметр трубы не совпал со стандартным значением, поэтому участок был разделен на две пропорциональные части с использованием ближайших большего и меньшего значения стандартных диаметров.

Как видно из расчетов, уменьшение диаметра привело к снижению капитальных затрат, уменьшению стоимости потерь тепла за счет уменьшения теплопотерь, однако у нас не возросли затраты на перекачку теплоносителя. Общая стоимость затрат внедрения проекта по предлагаемому методу расчета уменьшилась на 115 тыс. руб. Следовательно, применение разработанной модели термoeкономической оптимизации тепловых сетей при их проектировании является малозатратным, простым и быстро окупающимся мероприятием, направленным на экономию тепловой энергии и реализацию программы по энергосбережению.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ионин А.А.* Надежность систем тепловых сетей. М.: Стройиздат, 1989. 268 с.
2. *Малая Э.М., Спиринов А.В.* Снижение надежности систем централизованного теплоснабжения при несоблюдении температурного графика // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. № 1. С. 199-203.
3. *Сеннова Е.В., Смирнов А.В., Ионин А.А. [и др.]* Надежность систем энергетики и их оборудования: справочное издание: в 4 т. Новосибирск: Наука, 2000. Т. 4. Надежность систем теплоснабжения. 351 с.
4. СНиП 41-02-2003. Тепловые сети. Нормы проектирования. Взамен СНиП 2.04.07-86; введ. 2003-09-01. М.: Госстрой России, 2003. 77 с.
5. *Соколов Е.Я.* Теплофикация и тепловые сети. 2-е изд., стереотип. М.: МЭИ, 2001. 465 с.
6. *Шаргут Я., Петелла Р.* Эксергия / пер. с польск.; под ред. В.М. Бродянского. М.: Энергия, 1968. 280 с.
7. *Янтовский Е.И.* Потоки энергии и эксергии. М.: Наука, 1988. 144 с.

Поступила в редакцию 2 ноября 2012 г.

Kultyayev S.G., Malaya E.M. THERMO-ECONOMIC MODEL OF OPTIMIZATION OF DISTRICT HEATING NETWORK

The thermo-economic optimization method which improved design hydraulic heating networks calculations is proposed. The results for the district heating network townships are presented. The calculations show that the diameter of the pipe, insulation thickness and work time of heating network are key parameters for the optimal heating networks design.

Key words: centralized heat supply; heating network design; method of thermo-economic optimization; methodology of diameters selection.