

Ella M. Malaya,
ScD, assistant professor;
Saratov State Technical University

Svyatoslav G. Kulnyaev,
post-graduate;
Saratov State Technical University

The Modern Model of Optimization Thermal Networks Design [Ella M. Malaya,
Svyatoslav G. Kulnyaev]

Keywords: *thermal energy, heating, exergy, energy efficiency, etc*

Annotation: *This article presents a comparison of the existing design methods centralized heating networks. The paper proposes a mathematical model of optimization parameters thermal energy network effect. This model gives the energy efficiency of thermal energy production.*

Централизованное теплоснабжение является важным источником тепловой энергии для страны и может обеспечивать экономически эффективное и экологически благоприятное энергоснабжение городов.

Централизованное теплоснабжение (ЦТ) основывается на "фундаментальной идее" максимального использования местного тепла и источников топлива, которые при обычных условиях не были бы использованы.

Системы ЦТ обладают потенциалом высокой энергетической эффективности, и это может принести нашей стране значительные экологические и экономические выгоды.

Система трубопроводов, по которым горячая вода (теплоноситель) распределяется между абонентами, является одной из основных частей системы централизованного теплоснабжения и должна быть тщательно спроектирована и подобрана таким образом, чтобы обеспечить минимальные затраты не только во время строительства, но и во время ее работы.

Существует распространённая 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 будут высоки. 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 все выше сказанные аспекты должны быть учтены. При постоянно растущей потребности в тепловой энергии и стоимости топливных ресурсов, обычные методы, используемые при проектных изысканиях, должны быть пересмотрены.

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 в единичном сегменте трубопровода из-за потери давления определяются по формуле

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

где T_o - температура окружающей среды, °С;

T_{cp} - средней температурой воды на участке трубы, °С;

$\frac{m_w}{\rho_w}$ - расход теплоносителя на данном участке трубопровода, т/ч;

$\eta_{нас}$ - к.п.д. циркуляционного насоса, обеспечивающего необходимую скорость на данном участке трубы;

ΔP - общая потеря давления на участке трубопровода, Па, определяемая по формуле:

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

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 ($\lambda_{тр}$

и $\lambda_{\text{изол}}$) не зависит от температуры, изменение температуры теплоносителя при движении внутри трубы опишется уравнением

$$T_{\kappa} - T_o = (T_n - T_o) \cdot e^{-A \cdot B}$$

где T_n и T_{κ} – температура жидкости в начале и конце расчетного участка трубы;

Коэффициенты А, В рассчитываются как:

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

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

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 $h_{\text{рад}}$ и конвективного $h_{\text{конв}}$ коэффициентов теплообмена:

$$h_t = h_{\text{рад}} + h_{\text{конв}}$$

где

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

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

ε - степень черноты покрытия материала изоляции трубы;

$T_{\text{нов}}$ - абсолютная температура на поверхности изоляционной конструкции, °С;

$v_{\text{в}}$ - скорость воздуха, омывающего внешнюю поверхность изоляционной конструкции, м/с.

Тогда для одного участка трубопровода значение эксергии можно найти по уравнению

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

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 -того 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, час;

I_k - общие затраты на монтаж участка трубопровода, тыс руб;

R_k - прочие затраты, тыс. руб.

Таким образом, для любого k -того 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, описывается уравнением

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

Целью термоэкономической 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 определится формулой:

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

Затраты на тепловую изоляцию опишется выражением:

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

где M – материальная характеристика трубопровода,

e_{uz} - толщина изоляции, м;

A_{uz} - 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

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

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 подбирается таким образом, чтобы целевая функция (3) для каждого участка имела бы оптимальных значений. Для получения этих оптимальных значений, находится производная целевой функции по данным переменным. В результате операции получают 2хк нелинейных уравнения для 2хк 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 2хк нелинейных уравнения с 2хк 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.

Применение разработанной модели термоэкономической оптимизации тепловых сетей при их проектирования является малозатратным, простым и быстро

окупающимся мероприятием, направленным на экономию тепловой энергии и реализацию программы по энергосбережению.

Reference:

1. Shargut Y., Petella R. *Exergy / Per. Pol., ed. V.M. Brodyansky. - Moscow: Energiya, 1968. 280 p.*
2. Yantovsky E.I. *Energy and exergy flows. - Moscow: Nauka, 1988. – 144 p.*
3. Sokolov E.Y. *District heating and heat networks // M.: Publishing MEI, 2001. - 472 p.*