УДК 620.91

ЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ

THE CENTRALIZED SYSTEM OF HEAT SUPPLY WITH THERMAL PUMPS

О. А. Степанов, П. А. Третьякова, Б. Г. Аксенов, А. Ф. Шаповал
O. A. Stepanov, P. A. Tretyakova, B. G. Aksenov, A. F. Shapoval

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: тепловой насос; энергосбережение; тепловые сети; система теплоснабжения
Key words: thermal pump; energy saving; thermal networks; system of heat supply

Выбор основных источников энергии при проектировании и создании энергоэффективных систем теплоснабжения жилых и общественных зданий является важной задачей, поскольку основной целью Федерального закона № 261 от 23.11.2009 является уменьшение объема используемых ресурсов, потребляемых на нужды теплоснабжения при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования.

В статье приводится анализ технико-экономической эффективности замены котельной теплонасосной установкой, использующей в качестве источника низкопотенциального тепла сбросную воду ТЭЦ.

Технико-экономические показатели применения системы теплоснабжения с применением теплонасосных установок (ТНУ) существенно зависят от расхода и стоимости электроэнергии, капитальных затрат на систему теплоснабжения. Затраты электроэнергии уменьшаются при снижении скорости теплоносителя в магистральном трубопроводе, а капитальные затраты в систему теплоснабжения возрастают, так как увеличивается диаметр трубопровода. Чистая дисконтированная прибыль зависит от следующих параметров

$$NPV = f(l_{mp}, d_{mp}, q_n), \quad (1)$$

где l_{mp} — длина трубопровода (удаленность потребителей), м; d_{mp} — диаметр трубопровода, м; q_n — тепловой нагрузки группы потребителей, Гкал/час.

Рассмотрим методики расчета некоторых показателей, которые включены в математическую модель (1).

Методика определение затрат электроэнергии на привод тепловых насосов.

Известно, что коэффициент трансформации ТНУ ($\mu_{тн}$) главным образом зависит от разности температур приемника и источника теплоты и лишь в небольшой степени от типа используемого рабочего агента. Зависимость $\mu_{тн}$ от Δt для выбранных нами фреонов можно выразить формулой [1]

$$\varphi_{тн} = 42{,}3 \cdot \Delta t^{-0{,}62}. \quad (2)$$

С другой стороны, коэффициент преобразования ТНУ представляет собой отношение выработанной тепловой энергии к затратам электроэнергии:

$$\varphi = \frac{Q_{пт}}{Ne} = 1 + \frac{(1 - X)Q_{тну}}{Ne}. \quad (3)$$

Из уравнений (2)–(3) получаем

$$Ne = \frac{Q_{тну}}{42{,}3 \cdot \Delta t^{-0{,}62}}, \text{ кВт.}$$

Методика определение затрат электроэнергии на транспорт теплоносителя.

Расчет годовой потребности в электрической энергии (кВтч/год) насосным агрегатом производится путем суммирования расходов электрической энергии на каждом режиме работы агрегата по формуле

$$W = \sum_{i=1}^{n} (N_i \cdot \tau_i), \text{ кВт ч.}$$

Мощность электродвигателя насоса определяется по формуле [3]

$$N = \frac{K_з \cdot G \cdot H \cdot \rho}{102 \cdot 3600 \cdot \eta_н \cdot \eta_{пер}}, \text{ кВт,}$$

где $K_з$ — коэфф. запаса мощности электродвигателя (при Q ≤ 100 м^3/ч, $K_з$ = 1,2 –1,3; при Q > 100 м^3/ч, $K_з$ = 1,1–1,15); G — производительность насоса, м^3/ч; H — полный напор с учетом высоты всасывания, м. вод. ст.; ρ — плотность жидкости, кг/м^3; $\eta_н$ — КПД насоса; $\eta_{пер}$ — КПД передачи, определяется из нижеприведенной таблицы.

Значение КПД передачи

Тип передачи	Значение КПД
Насадка на вал эл/двигателя	1,0
Ременная	0,94–0,98
Муфтовая	0,97–0,99
Редукторная	0,88–0,96

Расход сетевой воды определяется по

$$M = \frac{Q \cdot 10^6}{c \cdot (t_1 - t_2)}, \text{ кг/ч,}$$

где Q — тепловая нагрузка, Гкал/ч; c — теплоемкость воды, кДж/кгК; t_1 и t_2 — температуры сетевой воды в подающем и обратном трубопроводе тепловой сети, ^{0}С;

Сумарная тепловая нагрузка потребителей составит

$$Q = Q_{от} + Q_{гвс} + Q_{тр}, \text{ Гкал/час},$$

где $Q_{тр}$ — тепловые потери по трассе в магистральном трубопроводе.

Напор, развиваемый насосом, определяется по

$$H = \Delta P \cdot 1{,}02 \cdot 10^{-4}.$$

Суммарные потери давления в трубопроводах на трение и в местных сопротивлениях, Па:

$$\Delta P = R \cdot l_{mp}.$$

Удельные потери давления на трение, Па/м [2]:

$$R = \lambda \frac{w^2}{d2g}.$$

Скорость воды в трубопроводе можно найти как

$$w = \frac{4M}{\pi \cdot d^2}, \text{ м/с},$$

где d — внутренний диаметр трубопровода, м; M — расход воды, кг/с.

Приведенная длина трубопровода:

$$l_{пр} = l + l_e.$$

При отсутствии данных о характере и количестве местных сопротивлений на трубопроводах тепловых сетей суммарную эквивалентную длину местных сопротивлений на участке трубопроводов допускается определять умножением длины трубопровода на поправочный коэффициент a_1 [2]. Тогда $l_e = l \cdot a_i$.

Общие средние потери теплоты трубопроводом в расчетный период Q_{mp}, Вт, рассчитываются по формуле

$$Q_{mp} = Q_u + Q_м + Q_y,$$

где Q_u — линейные тепловые потери по длине трассы через наружную поверхность трубопровода, Вт; $Q_м$ — местные потери теплоты в фасонных частях, опорных конструкциях, арматуре, фланцах и т. п., Вт; Q_y — потери теплоты, связанные с утечкой теплоносителя через неплотности фланцевых соединений трубопроводов и запорную арматуру, Вт.

Линейные тепловые потери трубопровода рассчитываются по формуле

$$Q_u = q_u \cdot l,$$

$$q_u = \frac{t_t - t_0}{N \cdot R_0},$$

где q_u — линейная плотность теплового потока, Вт/м; t_m, t_o — средние за расчетный период температуры теплоносителя в рассматриваемом трубопроводе и окружающей среды, °C; R_o — суммарное линейное термическое сопротивление рассматриваемого трубопровода, м·к/Вт; N — поправочный коэффициент, учитывающий способ прокладки трубопровода. Значение N принимается согласно [4].

Суммарное линейное термическое сопротивление трубопровода определяется по формуле

$$R_0 = R_w + R_c + R_u + R_н,$$

где $R_w, R_c, R_u, R_н$ — термические сопротивления: теплоотдачи от теплоносителя к внутренней поверхности трубопровода, теплопроводности стенки трубопровода и слоя изоляции, теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к окружающей среде, м·К/Вт.

Значения термических сопротивлений определяются по формулам

$$R_w = \frac{1}{\pi \cdot \alpha_w d},$$

$$R_c = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_c} \ln \frac{d_н}{d},$$

$$R_u = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_u} \ln \frac{d_u}{d_н},$$

$$R_н = \frac{1}{\pi \cdot \alpha_н \cdot d_3}, \quad (4)$$

где α_w и $\alpha_н$ — коэффициенты теплоотдачи от теплоносителя к внутренней поверхности трубопровода и от наружной поверхности теплоизоляции к окружающей среде соответственно, Вт/(м^{2}К); λ_c, λ_u — коэффициенты теплопроводности стенки трубопровода и изоляции соответственно, Вт/(м К); d, $d_в$ — внутренний и наружный диаметры трубопровода, м; d_u — наружный диаметр слоя изоляции, м; δ_u — толщина слоя изоляции, м.

Наружный диаметр слоя изоляции определяется по формуле

$$d_u = d_н + 2\delta_u.$$

При надземной прокладке и подземной канальной прокладке сопротивление $R_н$ определяется согласно выражению (4). Различие заключается лишь в величине коэффициента α_2, который выбирается согласно [5].

При подземной бесканальной прокладке тепло с поверхности покровнозащитного слоя передается непосредственно грунту, то есть $R_н = R_г$.

Значение $R_г$ определяется по известной формуле Форхгеймера [6]

$$R_г = \frac{1}{2\pi\lambda_г} \ln \left[\frac{2h}{d_u} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d_u}\right)^2 - 1} \right],$$

где $R_г$ — термическое сопротивление грунта, (м К)/Вт; $\lambda_г$ — теплопроводность грунта, Вт/(м К) [8]; d_3 — наружный диаметр изоляции, м; h — глубина заложения оси трубопровода, м.

Коэффициент теплопроводности грунта $\lambda_{гр}$ зависит от его структуры и влажности, значение изменяется в достаточно широких пределах: от 1 для песков до 3 для глинистых грунтов в насыщенном влагой состоянии.

Для двухтрубной бесканальной прокладки добавочно учитывается условное термическое сопротивление грунта, учитывающее снижение теплоотдачи от трубопроводов за счет более сильного прогрева слоя грунта между трубопроводами. Это сопротивление определяется по формуле

$$R_{доп} = \frac{1}{2\pi\lambda_г} \ln \left[\frac{2h}{d_u} + \sqrt{\left(\frac{2h}{b}\right)^2 + 1} \right],$$

где b — горизонтальное расстояние между осями труб, м; h — глубина заложения оси трубопровода от поверхности земли, м. Для типовых конструкций прокладки $b \approx 1{,}5\ d_3$.

Местные тепловые потери Qм рассчитываются по формуле

$$Q_м = \beta \cdot Q_u,$$

где β — коэффициент, учитывающий дополнительные местные потери теплоты через опорные конструкции, арматуру, фланцевые соединения и т. д. Значения коэффициента β согласно [7] находятся в пределах от 0,1 до 0,3.

Потери теплоты, связанные с утечкой теплоносителя, рассчитываются по формуле

$$Q_y = \frac{a \cdot c \cdot V_m \cdot \rho_m \cdot (t_{cpm} - t_{cpn})}{3{,}6},$$

где a — доля утечек теплоносителя, принимаемая в соответствии с [2]; V_m — объем теплоносителя в трубопроводе, м^3; c — объемная теплоемкость теплоносителя, кДж/кгК; t_{cpm} — средняя температура теплоносителя за расчетный период, ^{0}С; t_{cpn} — средняя температура питающей воды за расчетный период, ^{0}С.

Объем воды в тепловой сети определяется по формуле

$$V_m = 3{,}14 \cdot l \cdot d^2 / 4,$$

где l — длина рассматриваемого участка тепловой сети, м;

Капиталовложения в теплонасосную станцию.

Капитальные вложения предприятия — это затраты на строительно-монтажные работы при возведении зданий и сооружений; приобретение, монтаж и наладку машин и оборудования; проектно-изыскательные работы; подготовку и переподготовку кадров и др.

$$KB_{тнс} = C_{тн} + C_{мр} + C_{сист.отоп.} + C_{м.тр.},$$

где $C_{тн}$ — стоимость теплового насоса; $C_{мр}$ — стоимость монтажа ЦТП системы теплоснабжения с тепловым насосом; $C_{м.тр.}$ — стоимость прокладки магистрального трубопровода, руб.; $C_{сист.отоп.}$ — общие капиталовложения в систему транспорта источника низкопотенциального тепла от ТЭЦ и капиталовложения в ЦТП

$$C_{сист.отоп.} = C_{тр} + C_{авт} + C_{бак},$$

где $C_{тр}$ — капиталовложения в магистральный трубопровод; $C_{авт}$ — стоимость системы автоматизации теплового пункта; $C_{бак}$ — стоимость бака-аккумулятора.

$$C_{тр} = Ц_{тр} \cdot l,$$

где $Ц_{тр}$ — стоимость одного метра трубы выбранного диаметра, руб.

Экономия в результате замены котельной теплонасосной станцией.

Рассчитаем издержки производства тепловой энергии теплонасосной установки:

$$И = И_{с} + И_{зп} + И_{а} + И_{р} + И_{в} + И_{пр},$$

где $И_{с}$ — годовые издержки по оплате сырья, материалов, комплектующих и других основных предметов труда в производственном процессе (для теплонасосной установки затраты на электроэнергию); $И_{зп}$ — годовые издержки по заработной плате основного промышленно-производственного персонала, включая дополнительную заработную плату и отчисления на социальные нужды; $И_{а}$ — годовые амортизационные отчисления на реновацию основных производственных фондов; $И_{р}$ — годовые затраты на ремонт основных производственных фондов; $И_{в}$ — годовые издержки на приобретение вспомогательных материалов для производства (например, воды); $И_{пр}$ — прочие годовые издержки (непроизводственного характера).

Расчет каждой составляющей.

Топливная статья издержек определяется из условия, что на энергопредприятиях используется один вид топлива и только в период максимума нагрузки осуществляется переход на резервное топливо

$$И_{с} = Ц_{то} \cdot B_{о}^{год},$$

где $Ц_{то}$ — цена за единицу электроэнергии, руб/кВт час; $B_{о}^{год}$ — годовая потребность в электроэнергии, кВт.

$$B_{о}^{год} = Э_{тну} \cdot n + W,$$

где $Э_{тнv}$ — потребность привода компрессора теплового насоса в электроэнергии, кВт · час/год; W — годовая потребность в электрической энергии (кВт · час/год) насосной станции транспорта ИНПТ от ТЭЦ.

Издержки по оплате труда

$$И_{зп} = Ф_{зп}(1 + P_{осн})Ч,$$

где $Ф_{зп}$ — фонд заработной платы (без премий, выплачиваемых за счет прибыли); $P_{осн}$ — коэффициент, учитывающий отчисления на социальные нужды (0,3); $Ч$ — средняя списочная численность основного производственно-промышленного персонала (без административно-управленческих кадров).

Амортизационная составляющая издержек производства определяется по нормам амортизации $N_{ам}$ для каждого вида основных производственных фондов $Ф_{осн}$:

$$И_а = Ф_{осн} \cdot N_{ам}.$$

Годовые затраты на ремонт основных производственных фондов $И_р$ определяются следующим образом:

$$И_р = 0{,}3 \cdot И_а,$$

где 0,3 — норматив отчислений в ремонтный фонд по i-тому виду производственного оборудования.

Затраты на вспомогательные материалы рассчитываются по формуле

$$И_в = \sum (Ц^i_{ви} \cdot M^i_{ви}),$$

где $Ц^i_{ви}$ — цена за единицу вспомогательного материала i-того вида; $M^i_{ви}$ — годовая потребность в i-том вспомогательном материале.

Прочие расходы рассчитываются в процентах от расходов:

$$И_{пр} = (И_с + И_{зп} + И_а + И_р + И_в + И_{пр})K_{пр},$$

где $K_{пр}$ — коэффициент прочих затрат.

Себестоимость производства тепловой энергии рассчитывается с помощью тепловых насосов

$$C_{тну} = И / Q^{тну}_m,$$

где $Q^{тну}_{тэ}$ — тепловая энергия, вырабатываемая теплонасосной станцией в год.

Экономия составит

$$Э = (Сб_{1МВт\cdot ч\ ист} - Сб_{1МВт\cdot ч\ тну})Q_{МВт\cdot ч\ тну}(1 - Н_{ст}) + И_а.$$

Определение чистого дисконтированного (приведенного) дохода.

Поскольку инвестиции в развитие материально-технической базы в энергетике зачастую осуществляются одномоментно, то расчет NPV производится но формуле

$$NPV = \sum_{t=1}^{T} R_t \cdot a^t - R,$$

где R_t — размер чистых денежных поступлений от инвестиционных вложений; a^t — коэффициент дисконтирования, рассчитываемый в виде

$$a^t = \frac{1-(1+q)^{-T}}{q},$$

где K — размер единовременных инвестиций; q — ставка рефинансирования Центрального Банка РФ (15 %)

Анализ предлагаемой модели проведен на основе расчетного эксперимента.

В среде Excel составлена компьютерная модель расчета чистого дисконтированного дохода, и методом ортогонального центрального композиционного планирования определено математическое описание зависимости (1) в виде уравнения

y = b0 + b1·x1 + b2·x2 + b3·x3 + b12·x1·x2 + b13·x1·x3 + b23·x2·x3 +b11·x12 + b22·x22 + b33·x32.

С помощью разработанной методики проведена технико-экономическая оценка применения тепловых насосов НТ-3000, использующих сбросное тепло ТЭЦ в городе Тюмени. В результате получена следующая зависимость:

$$y = -57953586 + 477314 \cdot d - 1080373 \cdot l + 1482485 \cdot \mathrm{q} + 9829 \cdot \mathrm{dl} + 31028 \cdot \mathrm{dq} - 410045 \cdot \mathrm{lq} -$$
$$- 1303 \cdot \mathrm{d}^2 - 118871 \cdot \mathrm{l}^2 - 196220 \cdot \mathrm{q}^2$$

При нагрузке потребителей 5 Гкал/час и удаленности от ТЭЦ в 7 км оптимальный диаметр трубопровода от ТЭЦ составляет 380 мм, при этом NPV при замене существующего источника (котельной) составляет 38 091 тыс. руб. (рисунок).

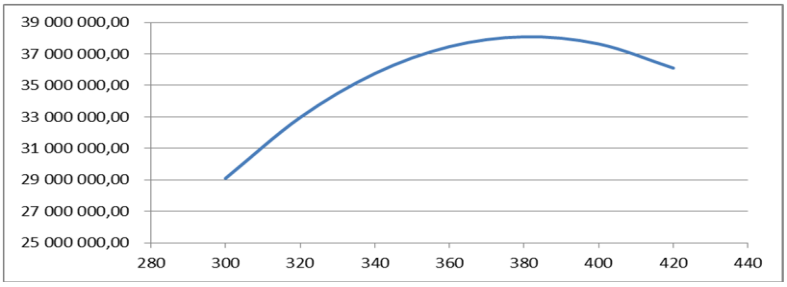

Рисунок. ***Зависимости*** $NPV = f(l_{mp}, d_{mp}, q_n)$

Таким образом, в качестве показателя эффективности при замене котельной теплонасосной установкой, использующей в качестве источника низкопотенциального тепла сбросную воду ТЭЦ, предложено использовать чистую дисконтированную прибыль.

Рассмотрена методика определения затрат электроэнергии на привод тепловых насосов, затрат электроэнергии на транспорт теплоносителя, капиталовложений, экономии денежного и чистого дисконтированного (приведенного) доходов в результате замены котельной теплонасосной станцией.

Разработана математическая модель определения зависимости чистой дисконтированной прибыли в результате внедрения тепловых насосов в централизованное теплоснабжение на базе ТЭЦ города Тюмени в зависимости от удаленности потребителей, тепловой нагрузки и диаметра трубопровода.

Приведены примеры применения указанных показателей для потребителя с заданной тепловой нагрузкой, удаленного на заданное расстояние. Определен оптимальный диаметр трубопровода.

Список литературы

1. Третьякова П. А. Анализ использования тепловых насосов в радиаторной системе отопления / Сборник материалов XI научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей ТюмГАСУ, Тюмень, 2011. – С. 50-54.
2. СНиП 41-02-2003. Тепловые сети [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.politerm.com/zuluthermo/doc/SP_124_13330_2012.pdf
3. Михалев М. А. Гидравлический расчет напорных трубопроводов // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 6 (32). – С. 20-28.
4. СНиП 2.04.11-88. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1998. – 86 с.
5. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях. РД 34.09.255-97. – М.: СПО ОРГРЭС, 1998. – 102 с.
6. Слепченок В. С., Рондель А. Н., Шаповалов Н. Н. Влияние различных эксплуатационных факторов на тепловые потери в бесканальных подземных трубопроводах тепловой сети // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 6. – С. 78-82.
7. СНиП 2.04.11-88. «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» / Госстрой России. – М.: 1998. – 94 с.
8. СНиП II-3-79.Строительная теплотехника. – М.: ГП ЦПП, 1996.
9. Третьякова П. А. Современные подходы к модернизации централизованного теплоснабжения на основе внедрения теплонасосных установок // Омский научный вестник. – 2014. – № 2 (130). – С. 178-182.

Сведения об авторах

Степанов Олег Андреевич, *д. т. н., профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Тюменский индустриальный университет, тел. 8(3452)430269*

Третьякова Полина Александровна, *ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Тюменский индустриальный университет, тел. 89129297081, e-mail: polina_tret@mail.ru*

Шаповал Анатолий Филиппович, *д. т. н., профессор, г. н. с., Тюменский индустриальный университет, тел. 8(3452)430269*

Аксенов Борис Гаврилович, *д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Математика», Тюменский индустриальный университет, тел. 8(3452)430269*

Information about the authors

Stepanov O. A., *Doctor of Engineering, professor, head of the chair «Industrial heat-and-power engineering», Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)430269*

Tretyakov P. A.*, assistant of the chair «Industrial Industrial heat-and-power engineering», Industrial University of Tyumen, phone: 89129297081, e-mail: polina_tret@mail.ru*

Shapoval A. F., *Doctor of Engineering, professor, chief researcher, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)430269*

Aksenov B. G., *Doctor of Engineering, professor, head of the chair «Mathematics», Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)430269*