

ТЕПЛОПРОВОД «ТРУБА В ТРУБЕ» КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ВАРИАНТ ДВУХТРУБНОЙ ПРОКЛАДКИ

Докт. техн. наук БАЙРАШЕВСКИЙ Б. А., инж. БОРУШКО Н. П.

РУП «БЕЛТЭИ»

Двухтрубная прокладка – это испытанный вариант конструкции теплопровода, утвердившийся в XX ст. Современные прогрессивные тенденции, направленные на рациональное использование топливно-энергетических ресурсов, требуют применения новых технологий в системе теплоснабжения. Они рассматривались и публиковались в работах [1, 2] (в частности, это: авторское свидетельство по применению конструкции теплопровода с кольцевым каналом для подачи обратной сетевой воды [1]; теоретические разработки и предложения по стабилизации теплового и гидравлического режимов работы теплосети путем применения системы рециркуляции в традиционных прокладках или теплопроводах типа «труба в трубе» [2]; наконец, обоснование идеи создания конструкции теплопровода типа «труба в трубе» (БЕЛТЭИ) путем теоретического анализа некоторых особенностей его теплового расчета и конструктивных размеров).

Расчет конечных температур в теплопроводах типа «труба в трубе» основан на формуле среднелогарифмического температурного напора по всей его длине L . В отличие от традиционного метода [4, 5] в данном случае необходимо воспользоваться расчетной формулой [3], учитывающей влияние теплотерь q_l в окружающую среду. После соответствующих преобразований представим эту формулу в виде:

а) для встречных (Z) потоков

$$\frac{k_l(t_1'' - t_2') + q_l(1 + m_z^{-1}W_2^{-1})}{k_l(t_1' - t_2'') + q_l(1 + m_z^{-1}W_2^{-1})} = \exp(-m_z k_l L) = E_z; \quad (1)$$

б) для спутных (П) потоков

$$\frac{k_l(t_1'' - t_2'') + q_l(1 - m_n^{-1}W_2^{-1})}{k_l(t_1' - t_2') + q_l(1 - m_n^{-1}W_2^{-1})} = \exp(-m_n k_l L) = E_n, \quad (2)$$

где k_l – линейный коэффициент теплопередачи между двумя потоками рабочих тел, осредненный по длине L исследуемого теплопровода; $m_{n,z} = W_1^{-1} \pm W_2^{-1}$ – показатель соотношения водяных эквивалентов (W_1 и W_2) двух исследуемых потоков, движущихся относительно друг друга по схемам «Z» или «П»; t_1' , t_2' и t_1'' , t_2'' – температуры потоков на входе и выходе каждого из исследуемых каналов.

В случае двух встречных (Z) потоков расчетные формулы для конечных температур воды $t_1'' = t_{1z}''$ и $t_2'' = t_{2z}''$ в каналах теплопровода определим на основании уравнения (1) и уравнения теплового баланса

$$W_1(t'_1 - t''_1) = W_2(t''_2 - t'_2) + q_l L. \quad (3)$$

Таким образом:

$$t''_{1z} = \frac{t'_1(1 - W_1 W_2^{-1}) + q_l L W_2^{-1} - (1 - E_z^{-1})[t'_2 + q_l k_l^{-1}(W_1 - W_2)^{-1} W_2]}{E_z^{-1} - W_1 W_2^{-1}}; \quad (4)$$

$$t''_{2z} = t'_2 + [W_1(t'_1 - t''_{1z}) - q_l L] W_2^{-1}. \quad (5)$$

В случае $W_1 = W_2 = W$ неопределенность значений по расчетной формуле (4) можно раскрыть с помощью уравнений теплового баланса и теплопередачи на участке L

$$W_1(t'_1 - t''_1) = [k_l(t'_1 - t'_2) + q_l] L, \quad (6)$$

отсюда

$$t''_1 = (W t'_1 + k_l L t_2 - q_l L)(W + k_l L)^{-1}. \quad (7)$$

Для двух спутных (II) потоков формула расчета конечной температуры воды $t''_1 = t''_{1н}$ определяется на основании совместного решения уравнений (2) и (3), а конечная температура $t''_2 = t''_{2н}$ вычисляется на основании аналогичного уравнения теплового баланса (3), т. е.:

$$t''_{1н} = \frac{t'_1(E_{1н} + W_1 W_2^{-1}) - q_l L W_2^{-1} + (1 - E_{1н})[t'_2 + q_l k_l^{-1}(W_1 - W_2)^{-1} W_2]}{1 + W_1 W_2^{-1}}, \quad (8)$$

$$t''_{2н} = t'_2 + [W_1(t'_1 - t''_{1н}) - q_l L] W_2^{-1}. \quad (9)$$

Теплопровод с одним кольцевым каналом представляет собой теплообменник («труба в трубе») [2] с противоточным движением теплоносителей. Прямая сетевая вода от энергоисточника с температурой $t_{1н}^{эН}$ и массой $G_{пн}$ подается по центральной трубе Ц. В зоне потребителя она имеет температуру $t_{пн}^{пот}$. Обратная сетевая вода массой G_o подается по смежному кольцевому каналу к1 и со стороны потребителя имеет температуру $t_{o}^{пот}$. В энергоисточнике она возвращается с температурой $t_{o}^{эН}$. В радиальном направлении теплопровода (независимо от соотношений $G_o = G_{пн}$ или $G_o \neq G_{пн}$) устанавливается тепловой баланс: $q_{пк1} = q_{к1} + q_l$, где $q_{к1}$ – поток теплоты, формирующий температурный уровень теплоносителя в канале к1. Как видно, исследуемый теплопровод с одним кольцевым каналом соответствует модели теплообменника с двумя встречными (Z) потоками $G_{пн}$ и G_o . В связи с этим при заданных начальных температурах $t'_1 = t_{пн}^{эН}$ и $t'_2 = t_{o}^{пот}$ расчет конечных температур $t''_1 = t''_{1z} = t_{пн}^{пот}$ в канале Ц и $t''_2 = t''_{2z} = t_{o}^{эН}$ в канале к1 выполняется по адекватным формулам (4), (7), (5).

Теплопровод с двумя кольцевыми каналами основан на более сложной модели процессов теплообмена между движущимися потоками. Со стороны энергоисточника прямая сетевая вода подается в канал Ц и имеет параметры G_n и $t_n^{\text{ЭН}}$. За счет отвода теплоты $q_{\text{цк1}}$ на участке L (в сторону смежного канала к1) она охлаждается и к потребителю доставляется с температурой $t_n^{\text{ПОТ}}$. От потребителя по каналу к1 в сторону энергоисточника подается избыток не востребованной (на данный период времени) рециркуляционной (G_n^p) массы воды с температурой $t_n^{\text{ПОТ}}$. Не исключено, что температура последней формируется после некоторого использования ее первоначального потенциала у потребителя с добавлением обратной сетевой воды. В энергоисточник рециркуляционный поток возвращается с температурой $t_n^{\text{ЭН}}$. Одновременно во втором кольцевом канале к2 формируется определенный температурный уровень обратной сетевой воды, поступающей от потребителя с температурой $t_o^{\text{ПОТ}}$ и доставляемой в энергоисточник с температурой $t_o^{\text{ЭН}}$. При этом часть теплоты от обратного потока в канале к2 в виде потерь q_l отводится в окружающую среду. Тепловой баланс в радиальном направлении такого теплопровода между каналами Ц, к1 и к1, к2 соответственно можно записать: $q_{\text{цк1}} = q_{\text{к1}} + q_{\text{к1к2}}$ и $q_{\text{к1к2}} = q_{\text{к2}} + q_l$. Здесь $q_{\text{к1}}$, $q_{\text{к2}}$ – тепловые потоки, формирующие температурные уровни воды в каналах к1 и к2; $q_{\text{к1к2}}$, q_l – радиальные отводы теплоты от канала к1 в сторону канала к2 и от канала к2 в окружающую среду. В целом по теплопроводу: $q_{\text{цк1}} = q_{\text{к1}} + q_{\text{к2}} + q_l$. Соотношения между массовыми потоками воды в каналах Ц, к1 и к2 выразим следующим образом: $G_n = G_o + G_n^p + \Delta G_{\text{отб}}$, где $\Delta G_{\text{отб}}$ – отбор горячей сетевой воды из системы теплоснабжения, включая утечки; причем $G_n^p = K_p G_n$ и $\Delta G_{\text{отб}} = K_{\text{отб}} G_n$, где K_p , $K_{\text{отб}}$ – коэффициенты рециркуляции и отбора. Соответственно поток сетевой воды по кольцевому каналу к2 равен: $G_o = G_n(1 - K_p - K_{\text{отб}})$.

Исследование модели теплопровода с двумя кольцевыми каналами усложняется неоднозначностью направлений (Z и П) потоков по смежным каналам Ц, к1 и к2. Если основываться на приведенных зависимостях (1)–(9), то здесь в «двойственном» положении оказывается рециркуляционный поток G_n^p , движущийся по каналу к1. По отношению к потоку G_n в канале Ц он является противоточным (Z) и, следовательно, подчиняется закономерностям среднелогарифмического температурного напора, определяемого формулой (1). В этом случае при заданных начальных температурах $t_1' = t_n^{\text{ЭН}}$ и $t_1'' = t_n^{\text{ПОТ}}$ значения конечных температур $t_1'' = t_{1z}'' = t_n^{\text{ПОТ}}$ (в канале Ц со стороны потребителя) и $t_2'' = t_{2z}'' = (t_p^{\text{ПК}})^{\text{ЭН}} \neq t_n^{\text{ЭН}}$ (в канале к1 со стороны энергоисточника) должны вычисляться по формулам (4), (5) при $q_l = q_{\text{к1к2}}$ и коэффициенте теплопередачи между потоками G_n и G_n^p , равном $k_l = k_{\text{цк1}}$. По отношению к потоку G_o , движущемуся по периферийному кольцевому каналу к2, тот же рециркуляционный поток G_n^p является спут-

ным (II) и, следовательно, аналогично подчиняется закономерностям среднелогарифмического температурного напора, определяемого формулой (2).

В этом случае при заданных начальных температурах $t_1' = t_n^{\text{пот}}$ и $t_2' = t_o^{\text{пот}}$ значения конечных температур $t_1'' = t_{1n}'' = (t_p^{\text{рк2}})^{\text{эН}} \neq t_n^{\text{рЭН}}$ (в канале к1 со стороны энергоисточника) и $t_2'' = t_{2n}'' = t_o^{\text{эН}}$ (в канале к2 также со стороны энергоисточника) должны вычисляться по формулам (8), (9) при коэффициенте теплопередачи между потоками G_n^p и G_o , равном $k_l = k_{\text{к1к2}}$. Очевидно, что упомянутая «двойственность» расчетных значений температур $t_1'' = t_{1n}'' = (t_p^{\text{рк2}})^{\text{эН}} \neq (t_p^{\text{рц}})^{\text{эН}} \neq t_{2z}'' \neq t_n^{\text{рЭН}}$ в выходном сечении канала к1 сказывается также и на неоднозначности расчетных температур $t_o^{\text{эН}}$ в выходном сечении канала к2. Согласно формуле (9), расчетное значение $t_o^{\text{эН}} = t_{2n}'' = f(t_{1n}'')$ всецело зависит от принимаемой в ней величины t_{1n}'' : либо $t_{1n}'' = (t_p^{\text{рк2}})^{\text{эН}} \neq t_n^{\text{рЭН}}$, либо $t_{1n}'' = t_{2z}'' = (t_p^{\text{рц}})^{\text{эН}} \neq t_n^{\text{рЭН}}$ и т. д. Исключить такую неопределенность (двойственность) в решении поставленной задачи можно двумя путями:

- либо в порядке альтернативы разработать новый метод расчета не двух, как это нам известно, а трех смежных теплообменивающихся потоков, что представляет собой самостоятельный раздел исследования;

- либо «приспособить» уже зарекомендовавший себя метод расчета двух смежных потоков к трем, как этого требует исследуемая модель теплопровода, и попытаться определить зависимость $t_{1n}'' = t_n^{\text{рЭН}} = f\left[(t_p^{\text{рц}})^{\text{эН}}, (t_p^{\text{рк2}})^{\text{эН}}\right]$.

Основываясь на втором пути решения поставленной задачи, функцию $t_n^{\text{рЭН}} = f\left[(t_p^{\text{рц}})^{\text{эН}}, (t_p^{\text{рк2}})^{\text{эН}}\right]$ определим как среднелиннейную величину $t_n^{\text{рЭН}}$ между значениями $(t_p^{\text{рц}})^{\text{эН}}$ и $(t_p^{\text{рк2}})^{\text{эН}}$ по кольцевому сечению канала к1, выразив это следующим образом:

$$t_n^{\text{рЭН}} = F_k^{-1} 2\pi \int_{r_1}^{r_2} t_n^p r dr, \quad (10)$$

где F_k , $r_1 = 0,5d_1$ и $r_2 = 0,5d_2$ – сечение, внутренний и наружный радиусы кольцевого канала к1.

Пренебрегая размерами пограничных слоев на стенках канала, профиль температур по его ширине представим в виде линейной зависимости: $t_n^p = ar + b$. Граничные условия: на границе $r_1 = 0,5d_1$ $t_n^p = (t_p^{\text{рц}})^{\text{эН}}$, а на границе $r_2 = 0,5d_2$ $t_n^p = (t_p^{\text{рк2}})^{\text{эН}}$. В результате соответствующего решения на основании (10) определяем

$$t_n^{\text{рЭН}} = (t_p^{\text{рц}})^{\text{эН}} + \left[(t_p^{\text{рк2}})^{\text{эН}} - (t_p^{\text{рц}})^{\text{эН}} \right] \frac{2d_2^2 - d_1^2(d_2 + d_1)}{3d_1^2(d_2^2 + d_1^2)}. \quad (11)$$

Из анализа особенностей режима работы канала к1 и механизма теплообмена по сечению исследуемого теплопровода можно считать, что вариант исключения неоднозначности температуры потока $t_{п}^p$ путем вычисления ее по (11) достаточно приемлемым на данном этапе исследования. В соответствии с этим в формуле теплового баланса (9) неоднозначность расчетной температуры обратной сетевой воды $t_o^{эп} = t_{2п}^n = f(t_{1п}^n)$ также исключается путем использования той же формулы (11).

Расчет экономии удельных денежных затрат $\Delta Z_{уд}$, руб/(м·ч), в сравнении с нормой на составляющую теплоэнергии при ее транспорте в сетях можно определить следующим образом:

$$\Delta Z_{уд} = (q_t^n - q_t) \Pi_q, \quad (12)$$

где q_t^n , q_t – нормативное и отчетное значения удельных теплопотерь в сети, Вт/м; Π_q – рыночная стоимость теряемой теплоэнергии, руб/(Вт·ч).

В условиях производства величина удельных теплопотерь q_t в сетях является результатом суммарного воздействия на нее двух основных факторов: абсолютных теплопотерь через изоляцию $Q_{из}$ и потерь с утечками сетевой воды $Q_{ут}$. Принимая во внимание виртуальную протяженность [7]

теплосети L , имеем: $q_l = \frac{Q_{из}}{L}$, $q_{ут} = \frac{Q_{ут}}{L}$ и $q_t = q_l + q_{ут}$. Величину теплопотерь с утечками вычисляем на основании расходов подпиточной сетевой воды

$$Q_{ут} = cG_{yt} [0,5(t_{п} - t_o) - t_{доб}]. \quad (13)$$

Введя понятие относительной плотности теплосети в виде коэффициента $\beta_{yt} = q_{yt} (q_{yt} + q_l)^{-1}$, отчетное значение удельных теплопотерь q_t выразим в зависимости от потерь через изоляцию, т. е. $q_t = q_l (1 - \beta_{yt})^{-1}$. Тогда расчетная формула (12) принимает вид, позволяющий оценить суммарную (отчетную) величину теплопотерь с одновременным представлением о состоянии плотности теплосети:

$$\Delta Z_{уд} = [q_t^n - q_l (1 - \beta_{yt})^{-1}] \Pi_q. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что экономия денежных затрат $\Delta Z_{уд}$ во многом зависит от количества теряемой теплоты q_l через теплоизоляцию теплопровода и установленной нормы теплопотерь q_t^n . На пути нормальной тенденции к снижению теплопотерь стоят противодействующие факторы, и прежде всего стоимость (капзатраты) материалов и работ по созданию теплопровода новой конструкции. Следовательно, оценку перспективности [8] альтернативного вида прокладки теплопровода необходимо выполнять с позиций чистой дисконтированной прибыли NPV , руб/м, основанной

на упомянутой экономии денежных средств за весь планируемый период T_n , лет, службы:

$$NPV = \sum_{i=1}^{T_n} \left[\Delta Z_{уд}^{из} \tau_n (1+r)^{-T_i} \right] - K_{уд}, \quad (15)$$

где $\Delta Z_{уд}^{из}$ – экономия денежных затрат, руб/(м·ч), за счет повышения эффективности теплоизоляции в альтернативном варианте конструкции теплопровода, вычисляемая по формуле (14) при $\beta_{yr} = 0$; τ_n – число часов использования теплопровода в году, ч/год; $K_{уд}$ – единовременные удельные капзатраты на изготовление и прокладку теплопровода, руб/м; r – желаемая норма прибыльности (банковский процент увеличения денежного вклада) в долях от единицы; T_i – текущий год в диапазоне полного (планируемого) срока службы теплопровода от 1-го до последнего T_n , лет.

В целях упрощения формулы (15) положим, что комплекс $\Delta Z_{уд}^{из} \tau_n$ (т. е. экономия годовых денежных затрат, руб/(м·год)) в течение всего периода службы теплопровода T_n , лет, постоянен. Тогда, вынося его за знак Σ и рассматривая оставшуюся сумму как геометрическую прогрессию со знаменателем $(1+r)^{-1}$, выражение (15) с учетом (14) при $\beta_{yr} = 0$ и соответственно при $q_t^H = q_i^H$ представим в развернутом виде

$$NPV = (q_i^H - q_l) \Pi_q \tau_n r^{-1} \left[1 - (1+r)^{-T_n} \right] - K_{уд}, \quad (16)$$

где q_i^H – нормативная плотность теплопотерь, регламентируемая СНиП по отношению к теплопроводу, подлежащему замене новой конструкцией.

Срок окупаемости $T_{ок}$, лет, затрат на реализацию нового теплопровода выразим зависимостью

$$T_{ок} = K_{уд} \left[(q_i^H - q_l) \Pi_q \tau_n \right]^{-1}. \quad (17)$$

Расчетные формулы (16) и (17) позволяют определять степень перспективности альтернативной конструкции исследуемого теплопровода и выполнять соответствующий анализ при введении ряда условий. Например, приравнивая показатель $NPV = 0$, на основании (16) и (17) устанавливаем взаимосвязь между значениями $T_{ок}$, T_n и r :

$$T_n = -\ln(1 - r T_{ок}) \ln^{-1}(1+r) = T_{по}. \quad (18)$$

При любых двух заданных значениях аргументов в (18), отвечающих условиям реальной возможности, расчетная величина третьего определяет условия, при которых вклад денежных средств не обеспечивает желаемой прибыли инвестору, так как $NPV = 0$. Например, при заданных значениях аргументов $T_{ок}$ и r расчетная величина третьего, т. е. $T_n = T_{по}$ согласно формуле (18), представляет собой расчетно-аналитический период работы

теплопровода (в годах) с момента его пуска, в течение которого он лишь «возместит» затраты инвестора.

На основании изложенного материала разработано программное средство (файл «2Т4К, 4524 КБ»), позволяющее производить расчеты технико-экономических характеристик трех видов прокладки: двухтрубной ПИ-тр, состоящей из ПИ-труб, одиночного теплопровода 1К/Теп с одним кольцевым каналом и одиночного теплопровода 2К/Теп с двумя кольцевыми каналами. Данные, приведенные в табл. 1, 2, представляют собой выкопировки из упомянутого файла по 10 режимам работы трех видов прокладки. В отличие от прокладки ПИ-труб из стали рассмотрены варианты применения полиэтиленовых труб в качестве комплектующих составляющих в теплопроводах 1К/Теп и 2К/Теп. Из учета цен, принятых при выполнении приведенного примера, использование полиэтиленовых труб приводит к удешевлению стоимости теплопровода. В частности, согласно данным (табл. 2), стоимость теплопровода при комплектации по варианту 3 меньше, чем по варианту 2, и соответственно по варианту 2 меньше, чем по варианту 1. В связи с этим наибольший интерес вызывают следующие варианты комплектации теплопроводов: ПИ-тр – по варианту 1; 2К/Теп – по варианту 2; 2К/Теп – по варианту 3.

В табл. 1 даны нагрузки потребителя, температуры и скорости сетевой воды в каналах исследуемых теплопроводов. Определены расчетные и нормативные значения теплопотерь. В порядке примера рассмотрим результаты расчетов работы теплопроводов по режиму 7. Требуется внимания тот факт, что абсолютные и (соответственно при одинаковых нагрузках) относительные теплопотери в теплопроводах с кольцевыми каналами 1К/Теп и 2К/Теп значительно ниже, чем в прокладке из ПИ-труб: ΔQ_{TL} , кВт, = 248,6:126,7:94,8, что соответствует соотношениям 1,0:0,51:0,38. В основном это объясняется тем, что (при размерах труб, приведенных в данном примере) наружные поверхности теплопроводов с кольцевыми каналами почти на 21 % меньше, чем наружные поверхности в прокладке из ПИ-труб. Соотношение этих поверхностей составляет $2 \cdot 400/630/630 = 1,0:0,787:0,787$. При этом температурные и скоростные (т. е. массовые потоки) в теплопроводах ПИ-тр и 2К/Теп почти соизмеримы, т. е. W_n^{cp} , м/с, = 1,0:1,84:1,04. В отличие от этого в теплопроводе 1К/Теп повышение нагрузки (до уровня нагрузки $Q_{потр} = 10787$ кВт в теплопроводе ПИ-тр) достигается путем совместного или раздельного увеличения массового расхода теплоносителя и его температуры. В результате тенденция к снижению теплопотерь в конструкции теплопровода 1К/Теп сопровождается существенным ростом сопротивления (т. е. скорости воды в канале), что не наблюдается в теплопроводе типа 2К/Теп.

Данные, приведенные в табл. 1, позволяют утверждать, что в плане эффективности теплового и гидравлического режимов на первом месте стоит теплопровод 2К/Теп, затем следуют ПИ-тр и 1К/Теп.

Таблица 1

Показатели режимов работы сопоставляемых теплопроводов

Типоразмеры ПИ-тр		Типоразмеры 1К/Теп, мм				Типоразмеры 2К/Теп, мм						
273,0-5,0/400,0-5,0 273,0-5,0/400,0-5,0		273,0-5,0/457,2-6,3/630,0-6,7				273,0-5,0/323,9-5,6/457,2-6,3/630,0-6,0						
Обозн.	Разм.	Тип Т/П	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_{порт}$	кВт	ПИ-тр	10787	10787	10787	12740	12740	12740	10787	10787	10787	10787
		1К/Теп	10787	10787	4212	12740	12740	4915	10787	4212	4212	448
		2К/Теп	10787	10410	10410	12740	12740	12308	10787	10410	10410	10410
$\Delta Q_{тЛ}$	кВт	ПИ-тр	248,6	248,6	248,6	310,8	310,8	310,8	248,6	248,6	248,6	248,6
		1К/Теп	144,5	144,5	136,4	160,5	160,5	172,2	126,7	136,4	137,1	160,6
		2К/Теп	94,8	94,8	94,8	121,9	121,8	121,8	94,8	94,8	94,8	94,8
$t_{п}^{вх}$	°С	ПИ-тр	90,4	90,4	90,4	110,5	110,5	110,5	90,4	90,4	90,4	90,4
		1К/Теп	110,0	110,0	90,0	110,0	110,0	110,0	90,0	90,0	90,0	90,0
		2К/Теп	90,0	90,0	90,0	110,0	110,0	110,0	90,0	90,0	90,0	90,0
$t_{п}^{вых}$	°С	ПИ-тр	89,6	89,6	89,6	109,5	109,5	109,5	89,6	89,6	89,6	89,6
		1К/Теп	73,5	73,5	59,3	81,8	81,8	72,9	66,7	59,3	59,3	42,1
		2К/Теп	87,7	87,7	87,7	107,3	107,3	107,3	87,7	87,7	87,7	87,7
$t_{о}^{вх}$	°С	ПИ-тр	40,2	40,2	40,2	50,2	50,2	50,2	40,2	40,2	40,2	40,2
		1К/Теп	40,0	40,0	40,0	50,0	50,0	50,0	40,0	40,0	40,0	40,0
		2К/Теп	40,0	40,0	40,0	50,0	50,0	50,0	40,0	40,0	40,0	40,0
$t_{о}^{вых}$	°С	ПИ-тр	39,8	39,8	39,8	49,8	49,8	49,8	39,8	39,8	39,8	39,8
		1К/Теп	76,0	76,0	70,1	77,8	77,8	86,3	63,0	70,1	70,1	87,2
		2К/Теп	40,8	40,8	40,8	50,9	51,0	50,9	40,8	40,8	40,8	40,8
$W_{п}^{ср}$	м/с	ПИ-тр	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		1К/Теп	1,48	1,48	0,99	1,84	1,84	0,99	1,84	0,99	0,99	0,99
		2К/Теп	1,04	1,00	1,00	1,03	1,03	1,00	1,04	1,00	1,00	1,00
$W_{кл}^{ср}$	м/с	ПИ-тр	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1К/Теп	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2К/Теп	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14
$W_{о}^{ср}$	м/с	ПИ-тр	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
		1К/Теп	0,81	0,81	0,55	1,01	1,01	0,55	1,02	0,55	0,55	0,55
		2К/Теп	0,71	0,69	0,69	0,71	0,71	0,68	0,71	0,69	0,69	0,69
$q_{т}^{ср}$	Вт/м	ПИ-тр	49,7	49,7	49,7	62,2	62,2	62,2	49,7	49,7	49,7	49,7
		1К/Теп	28,9	28,9	27,3	32,1	32,1	34,4	25,3	27,3	27,4	32,1
		2К/Теп	19,0	19,0	19,0	24,4	24,4	24,4	19,0	19,0	19,0	19,0
$q_{теп}^{н}$	Вт/м	ПИ-тр	138,7	138,7	138,7	166,1	166,1	166,1	138,7	138,7	138,7	138,7
		1К/Теп	80,3	80,3	76,6	91,8	91,8	95,9	71,5	76,6	76,6	85,9
		2К/Теп	49,3	49,3	49,3	70,1	70,1	70,1	49,3	49,3	49,3	49,3
$q_{теп}^{н} K_1$	Вт/м	ПИ-тр	111,0	111,0	111,0	132,9	132,9	132,9	111,0	111,0	111,0	111,0
		1К/Теп	64,3	64,3	61,3	73,4	73,4	76,7	57,2	61,3	61,3	68,7
		2К/Теп	39,4	39,4	39,4	56,1	56,1	56,1	39,4	39,4	39,4	39,4
$q^{н} K_1 K_2$	Вт/м	ПИ-тр	80,1	80,1	80,1	95,9	95,9	95,9	80,1	80,1	80,1	80,1
		1К/Теп	53,3	53,3	50,8	60,9	60,9	63,7	47,5	50,8	50,8	57,0
		2К/Теп	32,7	32,7	32,7	46,5	46,5	46,5	32,7	32,7	32,7	32,7

Таблица 2

Удельные стоимости вариантов комплектации теплопроводов ($C_{1,2,3}$, тыс. руб / м) из учета цен на образующие их трубы и полиуретан. Экономия удельных денежных затрат на компенсацию теплопотерь $\Delta Z_{уд}^{из}$, руб / (м·ч), в сравнении с нормой. Оценка дисконтированной прибыли при замене теплопроводов из ПИ-труб теплопроводом типа «труба в трубе»												
Теплопроводы	T_n	ПИ-тр	Вар. 1	T_n	1К/Теп	Вар. 1	Вар. 2	T_n	2К/Теп	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
	29,0	П	Сталь	28,0	Ц	Сталь	П-этил	31,0	Ц	Сталь	П-этил	П-этил
	лет	О	Сталь	лет	К/к1	Сталь	Сталь	лет	К/к1	Сталь	Сталь	П-этил
	$K_{пн}$	—	—	$K_{к1}$	—	—	—	$K_{к2}$	К/к2	Сталь	Сталь	Сталь
1,2	Тр-об	П-этил	1,2	Тр-об	П-этил	П-этил	1,2	Тр-об	П-этил	П-этил	П-этил	
Обозн.	$r_{ст}$	$r_{пу}$	$r_{пз}$	$C_{ст}$	$C_{пу}$	$C_{пз}$	C_q	τ_n	r			
Велич.	7852,9	80,0	940,0	0,860	6,450	2,846	0,1	7000,0	0,1			
Разм.	кг/м ³	кг/м ³	кг/м ³	тыс. руб/кг	тыс. руб/кг	тыс. руб/кг	тыс. руб/кВт·ч	ч/год	—			
Затраты на внедрение теплопровода новой конструкции (тыс.руб/м): верхняя строка – без учета ($C_{1,2,3}$) и нижняя – с учетом / ($K_{уд} = C_{1,2,3} \cdot K_{ш, к1, к2}$) стоимости монтажа и прокладки												
Обозн.	Разм.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ПИ-тр	Вар. 1	тыс. руб/м	152,9	152,9	152,9	152,9	152,9	152,9	152,9	152,9	152,9	152,9
			183,5	183,5	183,5	183,5	183,5	183,5	183,5	183,5	183,5	183,5
1К/Теп	Вар. 1	тыс. руб/м	193,2	193,2	193,2	193,2	193,2	193,2	193,2	193,2	193,2	193,2
			231,8	231,8	231,8	231,8	231,8	231,8	231,8	231,8	231,8	231,8
	Вар. 2	тыс. руб/м	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0
			211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2
2К/Теп	Вар. 1	тыс. руб/м	228,0	228,0	228,0	228,0	228,0	228,0	228,0	228,0	228,0	228,0
			273,7	273,7	273,7	273,7	273,7	273,7	273,7	273,7	273,7	273,7
	Вар. 2	тыс. руб/м	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9
			253,1	253,1	253,1	253,1	253,1	253,1	253,1	253,1	253,1	253,1
	Вар. 3	тыс. руб/м	188,0	188,0	188,0	188,0	188,0	188,0	188,0	188,0	188,0	188,0
			225,6	225,6	225,6	225,6	225,6	225,6	225,6	225,6	225,6	225,6
Экономия удельных денежных затрат, руб/(м·ч), на транспорт теплоэнергии в сравнении с нормой потерь через изоляцию теплопровода из ПИ-тр: $\Delta Z_{уд}^{из} = [q^a K_1 K_2]_{ПИ-тр} - q_7^a C_q$												
ПИ-тр	$\Delta Z_{уд}^{из}$	руб/(м·ч)	3,04	3,04	3,04	3,38	3,38	3,38	3,04	3,04	3,04	3,04
1К/Теп		руб/(м·ч)	5,12	5,12	5,28	6,38	6,38	6,15	5,47	5,28	5,27	4,80
2К/Теп		руб/(м·ч)	6,11	6,11	6,11	7,15	7,16	7,16	6,11	6,11	6,11	6,11
Дисконтированная прибыль NPV , тыс. руб/м, за весь период T_n лет, эксплуатации теплопровода												
ПИ-тр	Вар. 1	тыс. руб/м	16	16	16	38	38	38	16	16	16	16
1К/Теп	Вар. 1	тыс. руб/м	102	102	112	184	184	169	125	112	111	81
	Вар. 2	тыс. руб/м	122	122	133	205	205	189	145	133	132	101
2К/Теп	Вар. 1	тыс. руб/м	132	132	132	201	201	201	132	132	132	132
	Вар. 2	тыс. руб/м	153	153	153	222	222	222	153	153	153	153
	Вар. 3	тыс. руб/м	180	180	180	249	249	249	180	180	180	180
Срок окупаемости $T_{ок}$ затраченных средств на изготовление и прокладку теплопровода												
ПИ-тр	Вар. 1	лет	8,6	8,6	8,6	7,8	7,8	7,8	8,6	8,6	8,6	8,6
1К/Теп	Вар. 1	лет	6,5	6,5	6,3	5,2	5,2	5,4	6,0	6,3	6,3	6,9
	Вар. 2	лет	5,9	5,9	5,7	4,7	4,7	4,9	5,5	5,7	5,7	6,3
2К/Теп	Вар. 1	лет	6,4	6,4	6,4	5,5	5,5	5,5	6,4	6,4	6,4	6,4
	Вар. 2	лет	5,9	5,9	5,9	5,1	5,1	5,1	5,9	5,9	5,9	5,9
	Вар. 3	лет	5,3	5,3	5,3	4,5	4,5	4,5	5,3	5,3	5,3	5,3
Расчетно-аналитический (минимальный T_n^0) период эксплуатации теплопровода при $NPV = 0$												
ПИ-тр	Вар. 1	лет	20,9	20,9	20,9	15,7	15,7	15,7	20,9	20,9	20,9	20,9
1К/Теп	Вар. 1	лет	10,9	10,9	10,3	7,7	7,7	8,1	9,7	10,3	10,4	12,3
	Вар. 2	лет	9,3	9,3	8,9	6,7	6,7	7,1	8,4	8,9	8,9	10,4
2К/Теп	Вар. 1	лет	10,7	10,7	10,7	8,3	8,3	8,3	10,7	10,7	10,7	10,7
	Вар. 2	лет	9,4	9,4	9,4	7,4	7,4	7,4	9,4	9,4	9,4	9,4
	Вар. 3	лет	7,9	7,9	7,9	6,3	6,3	6,3	7,9	7,9	7,9	7,9

В табл. 2 приведены показатели экономической эффективности, дисконтированной прибыли и сроки окупаемости исследуемых теплопроводов. Расчеты выполнялись по формулам (14)...(18). Удельная стоимость 1 п. м теплопровода вычислялась, исходя из размеров, плотностей и стоимостей комплектующих его материалов труб, т. е. как произведение удельной стоимости массы, из которой выполнена труба (сталь, полиуретан, полиэтилен), на массу ее отрезка длиной 1 м. Ориентировочные значения капитальных затрат на реализацию 1 п. м теплопровода с учетом стоимости изготовления труб устанавливались путем введения дополнительных коэффициентов $K_{\text{ПИ}}$, $K_{\text{К1}}$ и $K_{\text{К2}}$, используемых в качестве множителей к суммарной стоимости комплектующих материалов. Тогда согласно тем же вариантам комплектации и в том же режиме 7:

- удельные затраты на внедрение исследуемых теплопроводов ПИ-тр, 1К/Теп и 2К/Теп соответственно равны

$$C_{1,2,3}, \text{ тыс. руб/м,} = 183,5:211,2 :225,6 = 1,0:1,15:1,23;$$

- экономия удельных денежных затрат за счет снижения теплопотерь в сравнении с нормой, установленной для ПИ-труб, составляет: $\Delta Z_{\text{уд}}^{\text{нз}}$, руб/(м·ч), = 3,04:5,47:6,11 = 1,0:1,80:2,01;

- дисконтированная прибыль за весь расчётный период эксплуатации теплопроводов составляет: NPV , тыс. руб/м, = 16:145:180 = 1,0: 9,06:11,25;

- сроки окупаемости затраченных средств на изготовление и прокладку теплопроводов: $T_{\text{ок}}$, лет, = 8,6:5,5:5,3 = 1,0:0,65:0,62.

- расчетно-аналитические периоды работы теплопроводов с момента пуска, в течение которого они лишь «возмещают» затраты инвестора:

$$T_{\text{п}}^{\circ}, \text{ лет,} = 20,9:8,4:7,9 = 1,0:0,4:0,38.$$

Данные, приведенные в табл. 2, позволяют утверждать, что перспективность теплопровода типа 2К/Теп определяется его технико-экономической эффективностью в целом. Здесь на первом месте стоит теплопровод 2К/Теп, затем следуют теплопроводы 1К/Теп и ПИ-тр. Остается неразрешенным вопрос, касающийся конструктивных разработок исследуемых теплопроводов. В этом отношении на первом месте, по-видимому, следует считать теплопровод ПИ-тр, затем 1К/Теп и 2К/Теп. Конкурентоспособность теплопровода типа 1К/Теп определяется повышенной скоростью теплоносителя, что требует увеличения затрат на его транспортирование.

Предлагаемое вниманию программное средство «2Т4К» позволяет достаточно аргументированно выбрать оптимальную конструкцию теплопровода применительно к конкретным размерам теплосети и режимам ее работы, как это показано на основании примерных данных в табл. 1, 2. Много-разовые расчеты и сопоставления полученных результатов позволяют утверждать, что теплопроводы с кольцевыми каналами имеют широкие возможности оптимизации их конструкций при одновременном повы-

пении технико-экономических показателей системы теплоснабжения в целом.

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод расчета конечных температур с учетом теплопотерь в окружающую среду на участке теплообменника, выполненного по принципу «труба в трубе» с одним и двумя кольцевыми каналами. Данный метод расчета положен в основу разработки и исследования режимов работы теплопроводов адекватной конструкции.

2. Перспективность технического решения планируемых разработок подтверждается результатами исследования и расчетов, выполненных с помощью разработанного программного средства на компьютере.

3. Величина теплопотерь (при сопоставимых условиях) в теплопроводах с кольцевыми каналами на 50 % меньше, чем в прокладке из ПИ-труб.

4. Низкие значения теплопотерь в теплопроводах с кольцевыми каналами позволяют установить в них высокий температурный уровень теплоносителя и тем самым обеспечить снижение расхода электроэнергии на его транспорт.

5. Удельные денежные затраты на транспорт теплоэнергии в теплопроводе с кольцевыми каналами типа 2К/Теп значительно меньше, чем в теплопроводе из ПИ-труб.

6. Конкурентоспособность теплопровода типа 1К/Теп достигается повышенной скоростью теплоносителя, что требует увеличения затрат на его транспортирование.

7. Экономия удельных денежных затрат и дисконтированная прибыль от реализации теплопроводов с кольцевыми каналами значительно выше, а сроки окупаемости затраченных средств ниже в сравнении с теплопроводами из ПИ-труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1583703 А. СССР. Теплопровод / Ю. А. Зыбин, А. А. Демчишин. – 1990.
2. Байрашевский Б. А. Стабилизация теплового и гидравлического режимов работы теплосетей // Промышленная безопасность. – 2002. – № 7.
3. Байрашевский Б. А., Борушко Н. П. Влияние теплопотерь в окружающую среду на температурный режим работы теплообменников // Изв. НАН Беларуси. Сер. ФТН. – 2002. – № 2.
4. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973.
5. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1969.
6. Байрашевский Б. А. Оценка теплопотерь и эффективности работы теплосетей // Изв. НАН Беларуси. Сер. ФТН. – 2004. – № 4.
7. Липсиц И. В., Косов В. В. Инвестиционный проект // Методы подготовки и анализа: Учеб.-справ. пособие. – М., 1996.

Поступила 24.06.2005