

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-97-103>

УДК 532.542/.551



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ТЕПЛОПРОВОДА ПУТЕМ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

М.В. Павлов[✉], Д.Ф. Карпов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия

Аннотация. На стадии проектирования инженерных сетей важным вопросом остается выбор диаметров трубопроводной системы с минимальными капитальными вложениями на транспортировку рабочей среды от источника до потребителей. Цель исследований – определить диаметр теплопровода, при котором достигается максимальная экономия денежных средств на транспортировку теплоносителя для заданных условий. На основе классических законов гидравлики и теплообмена с помощью программных вычислений получено расчетное уравнение, которое позволяет определять диаметр теплопровода при оптимальном соотношении денежных затрат на электрическую и тепловую энергию. Конечная формула учитывает такие важные эксплуатационные параметры, как расход теплоносителя, шероховатость трубопровода и местные гидравлические сопротивления, тарифы на тепловую и электрическую энергию и др. На примере магистрального участка трубопроводов системы централизованного теплоснабжения, расположенной в г. Вологде (Российская Федерация), получено программное решение предложенного в статье уравнения. Установлено, что при массовом расходе теплоносителя 32,9 т/ч оптимальный диаметр стального электросварного трубопровода составляет 76 × 3 мм. С учетом текущих тарифов на тепловую и электрическую энергию денежные затраты на транспортировку теплоносителя за отопительный период года составили 4912 руб. на 1 пог. м трубопровода. Для сравнения при диаметре трубопровода 57 × 3 мм удельные денежные затраты оказались равными 7887 руб., а при 89 × 3,5 мм – 5524 руб. Для рассматриваемого в статье случая получена зависимость между оптимальным диаметром трубопровода и массовым расходом теплоносителя.

Ключевые слова: оптимальный диаметр трубопровода, расход жидкости, теплопровод, теплоноситель, оптимизационная задача

Формат цитирования: Павлов М.В., Карпов Д.Ф. Определение оптимального диаметра теплопровода путем решения оптимизационной задачи // Природообустройство. 2025. № 1. С. 97-103. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-97-103>

Scientific article

DETERMINATION OF THE OPTIMAL DIAMETER OF THE HEAT PIPE BY SOLVING THE OPTIMIZATION PROBLEM

M.V. Pavlov[✉], D.F. Karpov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vologda State University", 15 Lenin St., Vologda, 160000, Russia

Abstract. At the design stage of engineering networks, an important issue remains the choice of diameters of the pipeline system with minimal capital investments for transporting the working medium from the source to consumers. The purpose of the study is to determine the diameter of the pipeline, which achieves maximum savings in money for the transportation of heat carrier for specified conditions. Based on the classical laws of hydraulics and heat transfer, a computational equation has been obtained using software calculations, which allows determining the diameter of a heat pipeline with an optimal ratio of monetary costs for electrical and thermal energy. The final formula takes into account such important operational parameters as heat carrier flow, pipeline roughness and local hydraulic resistances, tariffs for thermal and electrical energy, etc. Using the example of the main pipeline section of the district heating system located in the city of Vologda (Russian Federation), a software solution of the equation proposed in the article is obtained. It was found that with a mass flow rate of 32.9 t/h, the optimal diameter of the steel electric-welded pipeline is 76×3 mm. Taking into account the current tariffs for thermal and electric energy, the monetary costs of transporting the heat carrier for the heating period of the year amounted to 4912 rubles per 1 cubic meter of pipeline. For comparison, with a pipeline diameter of 57×3 mm, the unit cash

costs turned out to be 7887 rubles, and with 89×3.5 mm – 5524 rubles. For the case considered in the article, the dependence between the optimal diameter of the pipeline and the mass flow rate of the heat carrier is obtained.

Keywords: optimal diameter of pipeline, flow rate of liquid, heat pipeline, heat carrier, optimization task

Format of citation: Pavlov M.V., Karpov D.F. Determination of the optimal diameter of the heat pipeline by solving the optimization problem // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 97-103. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-97-103>

Введение. В основе проектирования инженерных сетей, по которым движется рабочая среда (водяной пар, горячая вода, природный газ и т.п.), лежит конструкторский гидравлический расчет трубопроводов, одной из целей которого является определение диаметров участков. От размера трубопровода зависят его проходное сечение и площадь боковой поверхности. В первом случае выбор диаметра трубопровода окажет влияние на скорость движения потока, и как следствие – на линейные и местные гидравлические потери напора (давления) на участке трубопровода. Во втором случае, если в качестве рабочей среды выступает теплоноситель, диаметр трубопровода будет напрямую определять величину тепловых потерь в окружающую среду. Ситуация усложняется еще и тем, что это два взаимоисключающих фактора: уменьшение диаметра трубопровода приведет не только к значительному росту гидравлических потерь напора (давления) на участке, но и к снижению тепловых потерь через его боковую поверхность.

Существуют различные подходы и основанные на них методы и методики определения оптимальных диаметров трубопроводов.

Гидравлический расчет трубопроводов может строиться на следующем физическом принципе [1]: при установившемся движении жидкости располагаемый перепад давлений должен полностью расходоваться на преодоление сопротивления движению. В теплоснабжении зарекомендовала себя другая классическая методика гидравлического расчета трубопроводов [2, 3], которая заключается в следующем: 1) предварительно задаются оптимальными удельными потерями давления на трение в главном магистральном кольце (не более 80 Па / м); 2) после определения суммарных гидравлических потерь давления в системе централизованного теплоснабжения внутренний диаметр трубопровода находят по формуле:

$$d_{\text{вн}} = \frac{74G^{0,38}}{R^{0,19}}, \text{ мм}, \quad (1)$$

где G – массовый расход теплоносителя на расчетном участке, т/ч; R – удельные потери давления на трение, Па/м.

При определении оптимального диаметра газопровода могут учитываться затраты электрической энергии на преодоление гидравлического сопротивления газопроводной системы, амортизационные отчисления и оборотные средства за ремонт и обслуживание [4].

В статье [5], при ссылке на формулу Ф.А. Шевелева для проектирования систем водоснабжения, предлагается осуществлять выбор диаметров трубопроводов с учетом рыночных методов определения эффективности инвестиций. При этом критерием для оценки должен служить приведенный или чистый дисконтированный доход ЧДД (NPV). Метод определения оптимального диаметра трубопровода для систем водоснабжения применительно к полиэтиленовым трубопроводам (ПЭТ) также должен учитывать затраты энергии на работу центробежного насоса [6].

В работе [7] предлагается определять диаметр магистрального паропровода следующим образом (приведены оригинальные обозначения физических величин в уравнении):

$$D_p = \sqrt{\frac{4D\vartheta}{\Pi c}}, \text{ м}, \quad (2)$$

где D – производительность котла, кг/с; ϑ – удельный объем водяного пара, м³/кг, который зависит от среднего давления в паропроводе; Π – число Пи; c – скорость подачи водяного пара, м/с.

Оптимальный диаметр трубопровода тепловой сети, исходя из суммарных энергетических затрат на транспортировку теплоносителя (включают в себя затраты электрической энергии на транспортировку теплоносителя по тепловым сетям и потери тепловой энергии через тепловую изоляцию), может быть рассчитан по эмпирической формуле (приведены оригинальные обозначения физических величин в уравнении) [8]:

$$d = 1,128\sqrt{Q}, \text{ м}, \quad (3)$$

где Q – объемный расход теплоносителя, м³/с.

Способ определения оптимальных диаметров трубопроводов для зависимых систем теплоснабжения, обеспечивающих минимум суммарных потерь энергии и равенство

запаздывания транспортировки теплоносителя по линиям между котельными и теплопередающими станциями, рассмотрен в работе [9]. С помощью компьютерных технологий производится выбор диаметров трубопроводов тепловой сети с минимумом стоимости 1 МДж суммарных потерь энергии в течение отопительного сезона.

Исходя из эксплуатационных энергетических затрат на топливо для нагрева теплоносителя и электрическую энергию для его транспортировки по системе трубопроводов, авторы в статье [10] предлагают следующую формулу для определения оптимального диаметра трубопровода (приведены оригинальные обозначения физических величин в уравнении):

$$d_{\text{опт}} = 6,25 \sqrt[3]{\frac{5,25 A_r G^3 (l + l_{\text{экв}})}{3600 \eta_n q_d \beta}}, \text{ м}, \quad (4)$$

где A_r – коэффициент, зависящий от эквивалентной шероховатости трубопровода, $\text{м}^{0,25}$; G – расход теплоносителя на участке, $\text{м}^3 / \text{ч}$; l – длина участка трубопровода, м; $l_{\text{экв}}$ – эквивалентная длина участка трубопровода, м; η_n – коэффициент полезного действия (КПД) сетевого насоса; q_d – плотность теплового потока через теплоизоляцию трубопровода, $\text{Вт} / \text{м}$; β – коэффициент, учитывающий тепловые потери от запорной арматуры.

С одной стороны, все перечисленные способы определения оптимальных диаметров трубопроводов, в частности, для нужд централизованного теплоснабжения, учитывают как гидравлическую, так и тепловую составляющие при транспортировке теплоносителя. С другой стороны, в расчетных формулах отсутствуют такие важные параметры, как текущие тарифы на тепловую и электрическую энергию, температура теплоносителя и окружающей среды, зависимость их физических свойств от температуры и т.п. Авторы статьи понимают, что при учете не только главных, но и второстепенных факторов конечное уравнение станет громоздким, и как следствие – сложным для выполнения

гидравлических расчетов. С применением систем автоматизированного проектирования подобные расчеты реализуются за максимально короткий срок с получением результата, имеющего высокую точность. При этом вывод подобных уравнений также осуществляется с привлечением систем компьютерной алгебры.

Цель исследований: определить диаметр трубопровода, при котором достигается максимальная экономия денежных средств на транспортировку теплоносителя для заданных условий.

Материалы и методы исследований. Для решения оптимизационной задачи на рисунке 1 представлена расчетная схема теплопровода.

Горизонтальный теплопровод 1 круглого сечения (рис. 1), выполненный из теплопроводного материала (металла), имеет внутренний и наружный диаметры – соответственно $d_{\text{вн}}$ и $d_{\text{н}}$. При этом допустимо принять следующее геометрическое условие: $\frac{0,5(d_{\text{н}} - d_{\text{вн}})}{d_{\text{вн}}} \approx 0$, то есть $d_{\text{н}} \approx d_{\text{вн}}$. Геометрическая длина теплопровода 1 известна и равна l .

Теплоноситель 2, движущийся сплошным потоком по теплопроводу 1, имеет температуру τ и постоянный массовый расход G . Наружная поверхность теплопровода 1 имеет температуру t_c . При этом допустимо считать, что для стенки теплопровода 1 малой толщины с высоким коэффициентом теплопроводности λ справедливо следующее соотношение: $\frac{0,5(d_{\text{н}} - d_{\text{вн}})}{\lambda} \approx 0$, то есть $t_c \approx \tau$.

Между наружной поверхностью стенки теплопровода 1 и окружающей средой, имеющей температуру $t_{\text{н}}$, происходит конвективный теплообмен при стационарных условиях $t_c > t_{\text{н}}$.

Определение внутреннего диаметра $d_{\text{вн}}$ теплопровода 1 сводится к решению оптимизационной задачи. Если для заданных условий

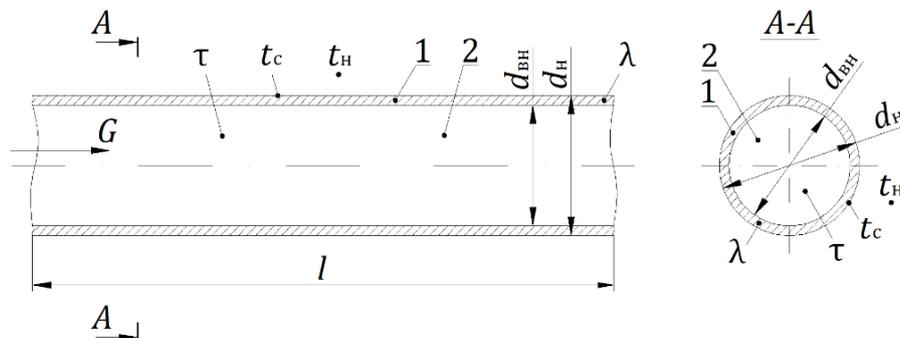


Рис. 1. Расчетная схема теплопровода круглого сечения:

1 – теплопровод; 2 – теплоноситель

Fig. 1. Design diagram of a circular heat pipeline:

1 – heat pipeline; 2 – heat carrier

выбрать теплопровод 1 с большим диаметром $d_{\text{вн}}$, то с увеличением площади поверхности теплообмена возрастут линейные потери тепловой энергии в окружающую среду, имеющую температуру $t_{\text{н}}$. В дальнейшем это скажется на увеличении требуемой толщины тепловой изоляции. С другой стороны, при заданном массовом расходе G скорость теплоносителя 2 должна закономерно уменьшиться, что приведет к снижению гидравлических потерь напора (давления) на участке теплопровода 1. Как следствие, сократятся затраты электрической энергии на работу насоса, предназначенного для транспортировки теплоносителя 2. Рассматривая обратный случай, то есть уменьшение внутреннего диаметра трубопровода $d_{\text{вн}}$, получим противоположный результат.

Исходя из вышеизложенных рассуждений формула для определения денежных затрат на транспортировку теплоносителя 2 по горизонтальному теплопроводу 1 с учетом гидравлической и тепловой составляющих будет иметь следующий вид (рис. 1):

$$\mathcal{Z} \approx k_3 \frac{\gamma V \Delta h}{\eta} \Delta z T_{\text{э}} + \pi \alpha d_{\text{вн}} (\tau - t_{\text{н}}) l \Delta z T_{\text{т}}, \text{ руб.},$$

$$d_{\text{н}} \approx d_{\text{вн}}, t_{\text{с}} \approx \tau, \quad (5)$$

где k_3 – коэффициент запаса мощности, учитывающий случайные перегрузки электродвигателя насоса; γ – удельный вес теплоносителя 2, Н/м^3 ; V – объемный расход теплоносителя 2 на участке теплопровода 1, $\text{м}^3/\text{с}$; Δh – гидравлические потери напора на участке теплопровода 1, м вод.ст. ; η – коэффициент полезного действия (КПД) насоса; Δz – продолжительность эксплуатации теплопровода 1, с; $T_{\text{э}}$ – тариф на электрическую энергию, $\text{руб}/\text{Дж}$; α – коэффициент конвективного теплообмена между наружной поверхностью теплопровода 1 и окружающей средой, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр теплопровода 1, м; τ – температура теплоносителя 2, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{н}}$ – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; l – геометрическая длина теплопровода 1, м; $T_{\text{т}}$ – тариф на тепловую энергию, $\text{руб}/\text{Дж}$; $d_{\text{н}}$ – наружный диаметр теплопровода 1, м; $t_{\text{с}}$ – температура наружной поверхности теплопровода 1, $^{\circ}\text{C}$.

После математических преобразований уравнение (5) примет вид:

$$\mathcal{Z} \approx \frac{0,88 k_3 G^3}{\pi^2 \rho_{\text{ж}}^2 \eta d_{\text{вн}}^5} \left(\frac{k_3}{d_{\text{вн}}} + \frac{17 \pi \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}} d_{\text{вн}}}{G} \right)^{0,25} (1 + \alpha_{\text{м.с}}) l \Delta z T_{\text{э}} +$$

$$+ 0,46 \pi \left(\frac{g \beta_{\text{в}}}{v_{\text{в}}^2} \right)^{0,25} (\tau - t_{\text{н}})^{1,25} d_{\text{вн}}^{1,75} l \Delta z T_{\text{т}}, \text{ руб.}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность теплоносителя 2, $\text{кг}/\text{м}^3$; G – массовый расход теплоносителя 2 на участке теплопровода 1, $\text{кг}/\text{с}$; k_3 – эквивалентный коэффициент шероховатости теплопровода 1, м; $v_{\text{ж}}$ – кинематическая вязкость теплоносителя 2, $\text{м}^2/\text{с}$; $\alpha_{\text{м.с}}$ – доля местных гидравлических сопротивлений на участке теплопровода 1 относительно линейных гидравлических потерь напора; $\beta_{\text{в}}$ – температурный коэффициент объемного расширения окружающей среды, $1/\text{К}$; $v_{\text{в}}$ – кинематическая вязкость окружающей среды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Как следует из уравнения (6), искомая величина \mathcal{Z} при заданных геометрических, гидравлических и тепловых условиях является функцией одной переменной – внутреннего диаметра $d_{\text{вн}}$. Для нахождения экстремума функции $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}(d_{\text{вн}})$ (минимума или максимума) найдем ее первую производную и приравняем полученный результат к нулю, то есть $\frac{d\mathcal{Z}}{d(d_{\text{вн}})} = 0$:

$$2,53 \left(\frac{g \beta_{\text{в}}}{v_{\text{в}}^2} \right)^{0,25} (\tau - t_{\text{н}})^{1,25} d_{\text{вн}}^{0,75} T_{\text{т}} =$$

$$= \left[\frac{0,45 \left(\frac{k_3}{d_{\text{вн}}} + \frac{53,4 \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}} d_{\text{вн}}}{G} \right)^{0,25}}{\eta \rho_{\text{ж}}^2 d_{\text{вн}}^6} + \right.$$

$$\left. + \frac{0,022 \left(\frac{k_3}{d_{\text{вн}}^2} - \frac{53,4 \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}}}{G} \right)}{\eta \rho_{\text{ж}}^2 d_{\text{вн}}^5 \left(\frac{k_3}{d_{\text{вн}}} + \frac{53,4 \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}} d_{\text{вн}}}{G} \right)^{0,75}} \right] \times$$

$$\times k_3 G^3 (1 + \alpha_{\text{м.с}}) T_{\text{э}}. \quad (7)$$

Итоговое уравнение (7) записано в неявном виде, так как переменная величина $d_{\text{вн}}$ присутствует как в левой, так и в правой частях выражения.

Рассмотрим решение уравнения (7) на примере магистрального участка трубопроводов системы централизованного теплоснабжения, расположенной в г. Вологде (Российская Федерация).

Исходные данные для выполнения расчета:

1. Параметры теплопровода. С целью определения удельных денежных затрат на транспортировку теплоносителя (на 1 пог.м) условно примем геометрическую длину теплопровода: $l = 1$ м. В соответствии с СП 124.13330.2012 «Тепловые сети» эквивалентная шероховатость внутренней поверхности нового стального электросварного трубопровода для водяных тепловых сетей – $k_3 = 0,5$ мм. В системах централизованного теплоснабжения доля местных гидравлических потерь напора обычно принимается равной $\alpha_{\text{м.с}} = 0,3$.

2. Параметры теплоносителя. В качестве теплоносителя используется горячая вода. Средняя за отопительный период температура сетевой воды в подающем теплопроводе согласно отопительно-бытовому температурному графику ($130^{\circ}\text{C}/70^{\circ}\text{C}$) составляет: $\tau = 72,3^{\circ}\text{C}$. Расчетный массовый расход теплоносителя – $G = 32,9$ т/ч. Плотность и кинематическая вязкость воды, соответственно, $\rho_{\text{ж}} = 976,53$ $\text{кг}/\text{м}^3$ и $v_{\text{ж}} = 0,403 \cdot 10^{-6}$ $\text{м}^2/\text{с}$.

3. Параметры окружающей среды. Средняя за отопительный период температура наружного воздуха для условий г. Вологды согласно данным СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» составляет: $t_n = -4,0^\circ\text{C}$. Кинематическая вязкость и температурный коэффициент объемного расширения воздуха, соответственно, $\nu_v = 13,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ и $\beta_v = 3,715 \cdot 10^{-3} / \text{К}$.

4. Параметры эксплуатации. Продолжительность отопительного сезона для г. Вологды, по данным СП 131.13330.2020 «Строительная климатология», $\Delta z = 226$ сут. КПД сетевого насоса марки К45/55 в его рабочей точке $\eta = 59,2\%$. Коэффициент запаса мощности $k_3 = 1,25$. Тарифы на тепловую и электрическую энергию (I квартал 2024 г.), соответственно, $T_{тэ} = 2182,80 \text{ руб} / \text{Гкал}$ и $T_{ээ} = 5,85 \text{ руб} / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$.

По результатам программных вычислений внутренний диаметр теплопровода составил: $d_{вн} \approx 68,3 \text{ мм}$. В соответствии с ГОСТ 10704-91 принимаем стальной электросварной трубопровод с ближайшим большим размером: $d_n \times \delta = 76 \times 3 \text{ мм}$ ($d_v = 70 \text{ мм}$).

На рисунке 2 представлен график зависимости денежных затрат на транспортировку теплоносителя по горизонтальному трубопроводу (на 1 пог.м) от выбранного диаметра теплопровода.

Как следует из данных рисунка 2, диаметр теплопровода $d_v = 70 \text{ мм}$ проходит через точку минимума функции $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}(d_v)$ (графическое подтверждение точки минимума). Как показали результаты программных вычислений,

$\frac{d^2 \mathcal{Z}}{d(d_{вн})^2} > 0$, что является аналитическим подтверждением точки минимума. Уменьшение внутреннего диаметра теплопровода $d_{вн}$ и, как следствие, площади проходного сечения приведет к значительному росту скорости потока $w \sim \frac{1}{d_{вн}^2}$

и гидравлическим потерям напора $\Delta h \sim w^2$. До точки минимума $d_v = 70 \text{ мм}$ график функции $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}(d_{вн})$ представляет собой гиперболу с высокой скоростью падения, так как согласно уравнению (6), $\mathcal{Z} \sim \frac{1}{d_{вн}^5}$. Напротив, после координаты $d_v = 70 \text{ мм}$ начинается медленный подъем линии $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}(d_v)$, что означает постепенное увеличение и впоследствии преобладание относительных денежных затрат $\delta \mathcal{Z}_{тэ}$, связанных с тепловыми потерями, над величиной $\mathcal{Z}_{ээ}$. Для сравнения: при $d_v = 32 \text{ мм}$ – $\delta \mathcal{Z}_{тэ} = 1,8\%$ и $\delta \mathcal{Z}_{ээ} = 98,2\%$; при $d_v = 70 \text{ мм}$ – $\delta \mathcal{Z}_{тэ} = 78,0\%$ и $\delta \mathcal{Z}_{ээ} = 22,0\%$; при $d_v = 125 \text{ мм}$ – $\delta \mathcal{Z}_{тэ} = 99,5\%$ и $\delta \mathcal{Z}_{ээ} = 0,5\%$. Здесь имеет смысл указать примерное соотношение тарифов на электрическую и тепловую энергию $T_{тэ} : T_{ээ} \approx 1 : 3$, что говорит о преобладающем влиянии гидравлических потерь напора на величину итоговых денежных затрат \mathcal{Z} над тепловыми потерями через стенку магистрального трубопровода.

Согласно уравнению (7) оптимальный внутренний диаметр теплопровода $d_{вн}$ зависит от многих факторов (температура и физические свойства теплоносителя и окружающей среды,

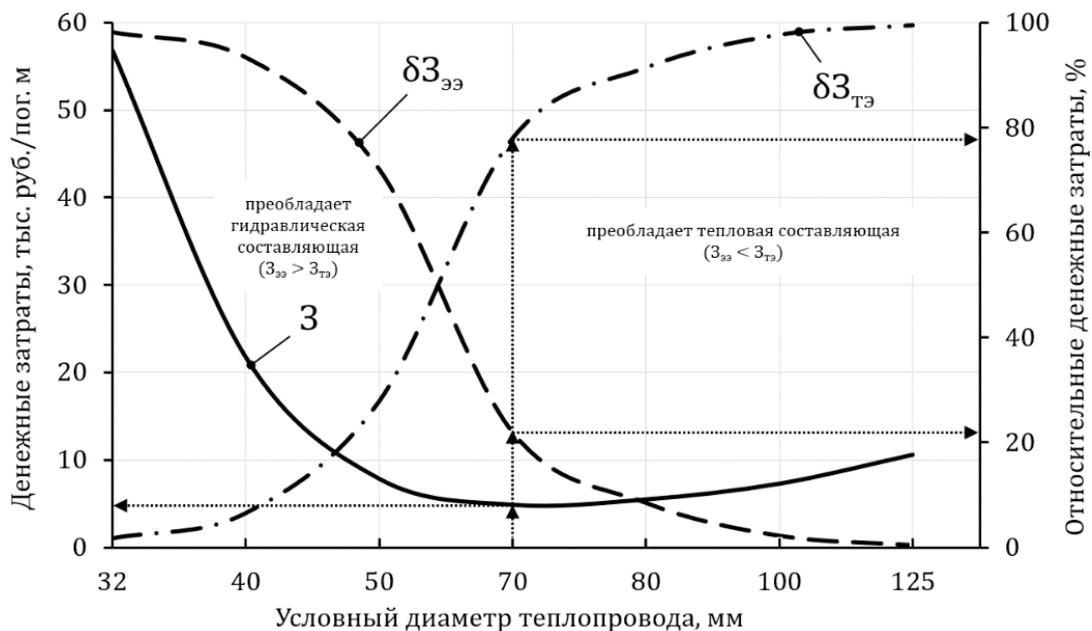


Рис. 2. Изменение денежных затрат на транспортировку теплоносителя в зависимости от диаметра теплопровода

Fig. 2. Change in cash costs for transportation of heat carrier depending on the diameter of the heat pipeline

шероховатость внутренней поверхности стенки трубопровода и т.п.). Тем не менее основным параметром, определяющим размер трубопровода, является массовый G (или объемный V) расход теплоносителя. На рисунке 3 представлен график для определения оптимального внутреннего диаметра теплопровода $d_{\text{вн}}$ при известном массовом расходе теплоносителя G .

Уравнение, соответствующее линии тренда на рисунке 3, является полиномом третьей степени, который имеет вид:

$$d_{\text{вн}} = aG^3 + bG^2 + cG + d, \text{ мм}, R^2 = 0,9866, \quad (8)$$

где $a = 2,087995 \cdot 10^{-4}$, $b = -0,041454$, $c = 3,128319$, $d = 5,435112$ – параметры уравнения; G – массовый расход теплоносителя, т/ч.

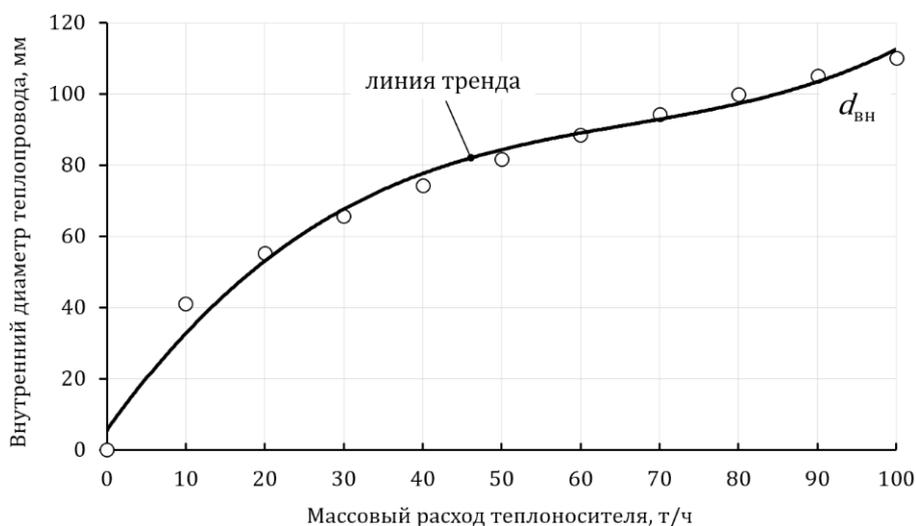


Рис. 3. Зависимость внутреннего диаметра теплопровода от массового расхода теплоносителя
Fig. 3. Dependence of the internal diameter of the heat pipeline on the mass flow rate of the heat carrier

Выводы

Предложенный программный метод определения оптимального диаметра теплопровода позволяет учитывать большое количество факторов: расход теплоносителя; среднюю температуру теплоносителя и окружающей среды за расчетный период; текущие тарифы на тепловую и электрическую энергию и др. При ключевом исходном параметре – массовом расходе теплоносителя $G = 32,9$ т/ч – выбран размер трубопровода $d_{\text{н}} \times \delta = 76 \times 3$ мм ($d_{\text{вн}} = 70$ мм). В этом случае денежные затраты на транспортировку теплоносителя (с энергетической точки зрения) за отопительный период года оказались минимальными

В соответствии с данными рисунка 3 среднее квадратическое отклонение значений оптимального внутреннего диаметра теплопровода $d_{\text{вн}}$, полученных по уравнению (8), от результатов программных вычислений (○) по формуле (7) при объеме выборки $n = 11$ составило: $S_0 = 3,768$ мм.

Для массового расхода теплоносителя $G = 32,9$ т/ч расчетный внутренний диаметр теплопровода по уравнению (8) составил: $d_{\text{вн}} \approx 70,9$ мм. Уравнение (8) является частным решением, так как значения входящих в него параметров напрямую зависят от предварительно заданных геометрических, гидравлических и тепловых условий.

и составили 4912 руб. на 1 пог.м трубопровода (в долевом соотношении на тепловую энергию пришлось 78,0%, на электрическую – 22,0%). Для сравнения: при $d_{\text{вн}} = 50$ мм денежные затраты оказались равными 7887 руб. на 1 пог.м трубопровода (тепловая и электрическая энергия – соответственно 27,9 и 72,1%), при $d_{\text{вн}} = 80$ мм – 5524 руб. на 1 пог.м трубопровода (соответственно 91,5 и 8,5%).

Уравнение (7) является универсальным и может применяться для заданных условий при проектировании инженерных сетей, в которых рабочей средой выступает теплоноситель (водяной пар или горячая вода).

Список использованных источников

1. Богословский В.Н. Отопление. Учебник / В.Н. Богословский, А.Н. Сканави. М.: Стройиздат, 1991. 735 с.
2. Козин В.Е. Теплоснабжение: учебник / В.Е. Козин, Т.А. Левина, А.П. Марков, И.Б. Пронина, В.А. Слемзин. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.

References

1. Bogoslovskij V.N., Skanavi A.N. Heating. Textbook. Moscow: Stroyizdat, 1991. 735 p.
2. Kozin V.E. Heat supply. Textbook / Levina T.A., Markov A.P., Pronina I.B., Slemzin V.A. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 408 p.

3. Ионин А.А. Теплоснабжение. Учебник / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая. М.: Стройиздат, 1982. 336 с.

4. Голованчиков А.Б. Сравнительный расчет оптимального диаметра трубопровода для природного газа, нефти и полимерного раствора / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, Т.А. Дулькин // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2020. № 1 (30). С. 47-51.

5. Кузьмин В.В. К определению экономически оптимального диаметра трубопровода в современных условиях // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 1 (63). С. 38-40.

6. Наумов В.А. Особенности определения оптимального диаметра при проектировании систем водоснабжения с полиэтиленовыми трубами / В.А. Наумов, А.В. Шторк // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 4 (57). С. 176-183. DOI: 10.54734/20722958_2023_4_176.

7. Kotlyarov V.S., Nussupbekov B.R., Ospanova D.A., Stoev M., Khan M.A., Karagaeva M.B. Determination of the diameter of the main steam pipelines of the supply pipelines of the Heat electric generation with a capacity of 325 MW // Bulletin of the Karaganda University. 2017. № 3 (87). Pp. 54-59. DOI: 10.31489/2017Phys3/54-59.

8. Теребилов С.В. Выбор диаметра трубопровода тепловой сети для водяных систем теплоснабжения / С.В. Теребилов, Цуканова Н.С., Петренко А.В., Седышева М.Н. // Актуальные вопросы энергетики: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Омск: ОмГТУ, 2018. С. 136-139.

9. Андреев С.Ю. Выбор оптимальных диаметров трубопроводов в задаче управления системой теплоснабжения с учетом транспортного запаздывания теплоносителя // Вестник Национального технического университета. Харьковский политехнический институт. 2005. № 46. С. 9-12.

10. Соломин И.Н. Метод определения оптимальных диаметров участков тепловой сети / И.Н. Соломин, А.З. Даминов, С.А. Еремин, Р.А. Садыков И.А., Сафин А.И. Фаизов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 4 (22). С. 234-239.

3. Ionin A.A. Heat supply. Textbook / Hlybov B.M., Bratenkov V.N., Terletskaia E.N. Moscow: Strojizdat, 1982. 336 p.

4. Golovanchikov A.B., Prohorenko N.A., Duljkin T.A. Comparative calculation of the optimal diameter of the pipeline for natural gas, oil and polymer solution // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. 2020. № 1 (30). P. 47-51.

5. Kuzjmin V.V. To the determination of the economically optimal diameter of the pipeline in modern conditions // Energy saving and water treatment. 2010. № 1 (63). P. 38-40.

6. Naumov V.A., Shtork A.V. Features of determining the optimal diameter in the design of water supply systems with polyethylene pipes // Regional Architecture and Construction. 2023. № 4 (57). P. 176-183. DOI: 10.54734/20722958_2023_4_176.

7. Kotlyarov V.S., Nussupbekov B.R., Ospanova D.A., Stoev M., Khan M.A., Karagaeva M.B. Determination of the diameter of the main steam pipelines of the supply pipelines of the Heat electric generation with a capacity of 325 MW // Bulletin of the Karaganda University. 2017. № 3 (87). P. 54-59. DOI: 10.31489/2017Phys3/54-59.

8. Terebilov S.V., Cukanova N.S., Petrenko A.V., Sedysheva M.N. Choice of the diameter of the heating network pipeline for water heat supply systems // Actual issues of energy: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. Omsk: OmSTU, 2018. P. 136-139.

9. Andreev S.Yu. Choice of the optimal diameters of pipelines in the problem of controlling the system of heat supply taking into account the transport delay of the heat carrier // Bulletin of the National Technical University, Kharkov Polytechnic Institute. 2005. № 46. P. 9-12.

10. Solomin I.N., Daminov A.Z., Eremin S.A., Sadykov R.A., Safin I.A., Faizov A.I. Method of determining optimal diameters of heat network sections // Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2012. № 4 (22). P. 234-239.

Об авторах

Михаил Васильевич Павлов, канд. техн. наук, доцент; Author ID SCOPUS: 57204361039; WoS ResearcherID: AAN-5773-2021; ORCID: 0000-0002-8687-3296; RSCI ID: 564419; SPIN-код: 6544-7267; pavlovmv@vogu35.ru

Денис Федорович Карпов, соискатель, старший преподаватель; Author ID SCOPUS: 57210325021; WoS ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN-код: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Павлов М.В., Карпов Д.Ф. провели теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых выполнили обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interest

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 13.02.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 19.12.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 19.12.2024

About the authors

Mikhail V. Pavlov, CSc (Eng), associate professor; Author ID SCOPUS: 57204361039; WoS ResearcherID: AAN-5773-2021; ORCID: 0000-0002-8687-3296; RSCI ID: 564419; SPIN-code: 6544-7267; pavlovmv@vogu35.ru

Denis F. Karpov, the applicant, senior lecturer; Author ID SCOPUS: 57210325021; WoS ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN-code: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

Pavlov M.V., Karpov D.F. conducted theoretical and experimental studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, have copyright on the article and are responsible for plagiarism.