

УДК 621.577.42

Светлана Андреевна Банникова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Математическое моделирование теплопереноса в непроходных каналах тепловых сетей

Авторское резюме

Состояние вопроса. Высокие значения нормируемых тепловых потерь в тепловых сетях централизованных систем теплоснабжения говорят о высоком потенциале повышения их энергетической эффективности. Существующие математические модели работы тепловых сетей, описанные в исследованиях В.Ю. Половникова, Г.В. Кузнецова, Е.И. Тарасевича, не решают задачу оценки изменения состояния тепловых сетей с применением энергосберегающих мероприятий. Целью работы является определение допустимого тепловосприятия коллектора предлагаемого устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы на основе разработки и исследования математических моделей процессов теплообмена в сети теплоснабжения.

Материалы и методы. Для поиска допустимых режимов работы предложенного устройства выбран метод математического моделирования, способный адекватно определять изменения в работе тепловой сети. При моделировании процессов теплообмена в тепловой сети использована описательная математическая модель с распределенными параметрами, основанная на дифференциальных уравнениях в частных производных и реализованная с помощью метода конечных элементов.

Результаты. Предложено устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Разработаны математические модели процессов теплопереноса в тепловых сетях подземной канальной прокладки в непроходных каналах в традиционном исполнении с применением теплоотражающего экрана и при совместной работе сети с устройством по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. На основе сравнения результатов расчета было определено допустимое тепловосприятие коллектора устройства по утилизации тепловых потерь, равное 90 % от первоначальных тепловых потерь. Математические модели верифицированы путем сравнения полученных результатов с экспериментальными данными с погрешностью менее 6 %.

Выводы. Разработанные математические модели позволяют исследовать влияние тепловосприятия коллектора устройства и теплоотражающего экрана на режим работы тепловой сети и могут быть использованы при определении геометрических параметров коллектора устройства.

Ключевые слова: математическая модель тепловой сети, теплоперенос, непроходные каналы тепловых сетей, эффективность теплоотражающего экрана, тепловые потери

Svetlana Andreevna Bannikova

Ivanovo State Power Engineering University, Senior lecturer of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Mathematical simulation of heat transfer in nonaccessible channels of heat supply system network

Abstract

Background. High values of standard heat losses in the heating networks of central heat supply systems indicate an opportunity to increase their energy efficiency. Currently available mathematical models of heat networks are described in the scientific studies of Polovnikov V.Yu., Kuznetsov G.V., Tarasevich E.I. But they do not solve the problem of assessing changes of the thermal networks state when energy-saving measures are used. The purpose of the study is to determine the permissible heat perception of the device collector for utilization of heat losses in the heating main channel. The study is based on the development and research of mathematical models of heat exchange processes in the heat supply network.

Materials and methods. A mathematical modeling method is chosen to search for acceptable operating modes of this device. The method can help to determine properly changes in the operation of the heat network. A descriptive mathematical model with distributed parameters based on differential equations with partial derivatives is used in modeling heat transfer processes in the heat network. The model is implemented using the finite element method.

Results. The authors propose a device for the utilization of heat losses in the heating channel. The authors have developed mathematical models of heat transfer processes in heat networks of underground trench laying in nonaccessible channels in a traditional design with the use of a heat-reflecting screen and combined action of the network and the device for the utilization of heat losses in the heat channel. Based on the comparison of the calculation results, the permissible heat perception value of the device collector for the utilization of heat losses has been determined. It equals to 90 % of the initial thermal losses. Mathematical models have been verified by comparing the results obtained and the experimental data with an error of less than 6 %.

Conclusions. The developed mathematical models allow us to study the influence of heat perception of the device collector and the heat-reflecting screen on the operating mode of the heat network. It can be used to determine the geometric parameters of the collector of the device.

Key words: mathematical model of the heat network, heat transfer, nonaccessible channel of heat network, efficiency of the heat-reflecting screen, heat losses

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.1.012-021

Состояние вопроса. К большим энергетическим потерям в тепловых сетях в России приводят как высокие значения нормируемых линейных тепловых потерь, так и неудовлетворительное состояние сетей. Одним из возможных путей модернизации систем теплоснабжения является реконструкция тепловых сетей на основе инновационных, высокоэффективных технологий и оборудования, способных свести к минимуму энергетические потери.

При прогнозировании состояния теплового режима работы сетей теплоснабжения прибегают к математическому моделированию. Вопросам моделирования тепловых сетей посвящены работы В.Ю. Половникова [1], Г.В. Кузнецова [2], Е.И. Тарасевича [3]. Данные исследования проводились в целях анализа штатного и аварийного режимов работы двухтрубных тепловых сетей с подземной канальной прокладкой трубопроводов.

Для повышения энергетической эффективности тепловых сетей систем теплоснабжения промышленных предприятий рассматривается устройство для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, описанное в [4]. Основными элементами устройства являются коллектор и теплоотражающий экран, расположенные в канале теплотрассы, и тепловой насос. Принципиальная схема устройства показана на рис. 1. Коллектор предназначен для сбора тепловой энергии, теряющейся с трубопроводов тепловой сети, и передачи ее в тепловой насос, повышающий потенциал данной энергии до требуемых пара-

метров. При этом теплоотражающий экран служит для ограничения отбора тепловой энергии от сети и, следовательно, сохранения теплового режима ее работы.

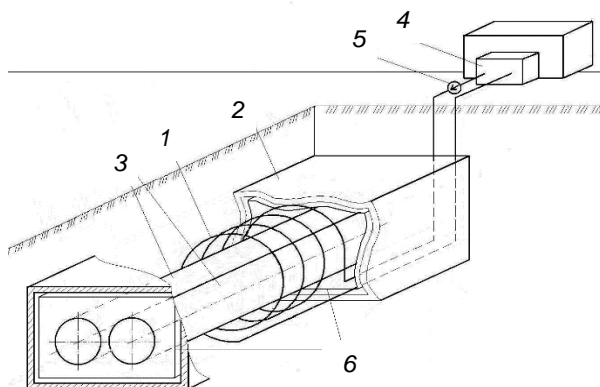


Рис. 1. Принципиальная схема устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы: 1 – коллектор; 2 – канал теплотрассы; 3 – трубопроводы тепловой сети; 4 – испаритель теплового насоса; 5 – циркуляционный насос; 6 – теплоотражающий экран

Материалы и методы. Для оценки влияния различных энергосберегающих мероприятий на параметры работы тепловых сетей выбран метод математического моделирования.

Целью работы является определение допустимого тепловосприятия коллектора устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы на основе разработки и исследования математических моделей процессов теплообмена в сети теплоснабжения в традиционном исполнении с применением теплоотражающего экрана и при совместной работе сети с

устройством по утилизации тепловых потерь.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- составить дифференциальные уравнения, описывающие процесс теплообмена в тепловой сети;
- сформулировать граничные условия;
- разработать и реализовать численные модели для исследования сложного радиационно-конвективного теплообмена в тепловых сетях системы теплоснабжения;
- верифицировать разработанную математическую модель;
- выбрать место расположения теплоотражающего экрана;
- исследовать влияние работы устройства по утилизации тепловых потерь на тепловой режим работы однотрубной и двухтрубной тепловой сети с канальной подземной прокладкой в непроходных каналах.

Математическое моделирование позволит определить поля температур в твердых элементах сети теплоснабжения (стальном трубопроводе, изоляции, стенках канала), а также поля температур и скоростей воздуха в канале теплотрассы.

Построение математических моделей процессов теплообмена производится в следующих вариантах тепловой сети:

- без дополнительных элементов;
- с теплоотражающим экраном;
- с теплоотражающим экраном и коллектором устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

В воздушной среде канала теплотрассы рассматривается радиационно-конвективный теплообмен, в твердых телах – перенос теплоты теплопроводностью.

При составлении системы дифференциальных уравнений приняты следующие допущения:

- температура воздуха в канале и в элементах исследуемой системы по длине теплотрассы постоянна;
- стенки коллектора и трубопроводов гладкие и жесткие;
- скорость воздуха на поверхности трубопроводов и коллектора равна нулю;
- вязкость и средняя удельная теплоемкость воздуха не зависят от температуры;
- теплофизические свойства материалов изоляции не зависят от влажности;

- осевое течение воздуха в канале вдоль теплопровода отсутствует;

- температура теплоносителя в трубе постоянна;

- окружающая среда в виде грунта однородная и имеет постоянные теплофизические свойства;

- воздух в канале несжимаемый и прозрачный;

- степень черноты поверхностей не зависит от температуры;

- степень черноты и поглощательная способность не зависят от длины волны;

- термическое сопротивление стальной трубы и наружной оболочки тепловой изоляции пренебрежимо мало.

Необходимо отметить, что при естественной конвекции, наблюдаемой в воздушной среде канала теплотрассы, основная движущая сила обусловлена наличием поля температур, приводящим к изменению плотности воздуха, что влечет за собой появление выталкивающей силы, образующейся из-за сил гравитации. При этом поле температур связано с течением жидкости, поэтому уравнения движения, энергии и неразрывности связаны между собой через изменение плотности и, соответственно, решать эти уравнения необходимо совместно. Это, несомненно, усложняет исследование и значительно увеличивает трудоемкость дальнейших численных расчетов. В связи с этим при изучении естественной конвекции прибегают к различным допущениям, упрощающим дальнейшие расчеты и не приводящим к значимым искажениям в понимании физики процесса. В [5] установлено, что если скорость движения жидкости мала по сравнению со скоростью звука, то возникающие в результате движения жидкости изменения давления настолько малы, что вызываемым ими изменением плотности (и других термодинамических параметров) можно пренебречь. Кроме того, чтобы в уравнениях движения неравномерно нагретой жидкости условно можно было считать плотность постоянной, необходимо, чтобы имеющиеся в жидкости разности температур были достаточно малы. В этом случае речь идет об абсолютных значениях разностей температур, а не о градиенте температуры. Разности температур воздуха в канале в нашем исследовании являются малыми, поэтому воздух принят несжимаемым. Это

существенно упрощает основные уравнения естественной конвекции. Однако изменение плотности в уравнениях необходимо учесть. Для этого принято допущение Буссинеска, согласно которому разность плотностей, вызывающую возникновение течения в результате взаимодействия гравитационной объемной силы и градиента гидростатического давления, можно приближенно представить как влияние одной лишь температуры.

Таким образом, разность плотностей можно представить в виде

$$\rho_a - \rho = \rho\beta(T - T_a), \quad (1)$$

где ρ_a , T_a – плотность и температура окружающей среды; ρ , T – плотность и температура жидкости в данной точке потока; β – коэффициент объемного расширения среды.

При этом в уравнении неразрывности изменением плотности можно пренебречь. Т.е. в условиях решаемой задачи несжимаемой жидкости переменность плотности учитывается только при вычислении объемной силы [6].

Объемная сила равна

$$G = g\rho\beta(T - T_a), \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

С учетом принятых допущений задача сводится к двумерной постановке. Основные определяющие уравнения для нахождения полей скорости и температуры в процессе теплообмена в прямоугольной декартовой системе координат с учетом принятых допущений приведены ниже.

Поле скоростей в воздушном пространстве канала теплотрассы определяется системой уравнений движения и неразрывности

$$\rho \left(u_y \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right); \quad (3)$$

$$\rho \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = \quad (4)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) + g\rho\beta(t - t_a);$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = 0, \quad (5)$$

где u – скорость движения жидкости, м/с; p – давление жидкости, Па; μ – динамическая вязкость, Па·с.

Температурное поле в воздушном пространстве канала теплотрассы определяется решением уравнения энергии для жидкости:

$$\rho C_p \left(u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (6)$$

где C_p – средняя удельная изобарная теплоемкость, Дж/кг·К; λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/м·К.

Температурное поле в твердых элементах тепловой сети определяется решением уравнения энергии для твердого тела:

$$\lambda_w \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (7)$$

где λ_w – коэффициент теплопроводности твердого тела, Вт/м·К.

Математические модели процессов теплообмена в описанных выше вариантах тепловой сети имеют в своей основе идентичные уравнения движения (3), (4), неразрывности (5) и переноса энергии (6), (7), но разный набор элементов с соответствующими граничными условиями. В состав тепловой сети без дополнительных элементов входит трубопровод и канал. Тепловая сеть с теплоотражающим экраном состоит из трубопровода, теплоотражающего экрана и канала. Тепловая сеть с теплоотражающим экраном и коллектором устройства включает в себя трубопровод, теплоотражающий экран, канал и коллектор.

Зададим для уравнений (3)–(7) граничные условия, предполагающие сопряжение по тепловым потокам и температурам (рис. 2).

Ниже приведен перечень граничных условий для всех моделей:

- Γ_1 – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у внутренней поверхности трубопроводов, через которую подводится теплота;

- Γ_2 – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у поверхности изолированного трубопровода;

- Γ_3 – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у поверхности теплоотражающего экрана;

- Γ_4 – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у внутренней поверхности канала;

- Γ_5 – граничные условия 4-го рода, описывающие теплообмен у внешней стороны канала, у границы контакта внешней границы канала с прилегающим грунтом;

• Γ_6 – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у внешней поверхности коллектора;

• Γ_7 – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у внутренней поверхности коллектора, через которую отводится теплота.

Таким образом, первая математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети без дополнительных элементов (M_1), имеет границы $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_4, \Gamma_5$. Вторая математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети с теплоотражающим экраном (M_2), имеет границы $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$. Третья математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети при ее совместной работе с устройством по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы (M_3), имеет границы $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6, \Gamma_7$.

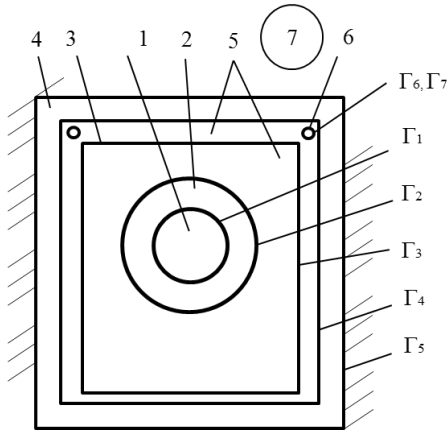


Рис. 2. Схема граничных условий: 1 – теплоноситель; 2 – изолированный трубопровод; 3 – теплоотражающий экран; 4 – канал; 5 – воздух канала теплотрассы; 6 – коллектор; 7 – окружающая среда

Граничные условия 3-го рода, описывающие процесс теплоотдачи на поверхности твердых тел при взаимодействии с воздухом канала теплотрассы с учетом теплообмена излучением ($\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6$), в общем случае имеют вид

$$-\lambda_w \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha_b (T_w - T_{\text{возд}}) + \varepsilon_w (e_b(T) - G), \quad (8)$$

где T_w – температура стенки, °С; $T_{\text{возд}}$ – температура воздуха в канале, °С; α_b – коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху в канале, Вт/м²·К; ε_w – степень черноты стенки; $e_b(T)$ – плотность потока собственного излучения абсолютно черного тела, Вт/м²; G – суммарная поверхностная плот-

ность потока излучения, падающего на поверхность, Вт/м².

Граничные условия 3-го рода, описывающие процесс теплоотдачи на внутренней поверхности трубопроводов и коллектора (Γ_1, Γ_7), в общем случае имеют вид

$$-\lambda_w \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha_{\text{тн}} (T_w - T_{\text{тн}}), \quad (9)$$

где $T_{\text{тн}}$ – температура теплоносителя, °С; $\alpha_{\text{тн}}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки к теплоносителю, Вт/м²·К.

Граничное условие 4-го рода, описывающее условие теплообмена между наружной поверхностью канала и грунтом, имеет вид

$$-\lambda_{\text{бет}} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = -\lambda_{\text{гр}} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right), \quad (10)$$

где $\lambda_{\text{бет}}$ – коэффициент теплопроводности железобетона, Вт/м·К; $\lambda_{\text{гр}}$ – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/м·К.

Для расчета теплообмена излучением использовались следующие математические соотношения, определяющие эффективный и результирующий тепловые потоки излучения с поверхности твердых тел:

$$J = \rho_d G + \varepsilon_w e_b(T); \quad (11)$$

$$q_{\text{рез}} = (1 - \rho_d) G - \varepsilon_w e_b(T), \quad (12)$$

где J – эффективный тепловой поток излучения, Вт/м²; ρ_d – коэффициент диффузного отражения.

Зависимость плотности потока собственного излучения абсолютно черного тела от температуры определяется по уравнению Стефана-Больцмана:

$$e_b(T) = \int_0^{\infty} e(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (13)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²·К⁴.

Суммарная поверхностная плотность потока излучения падающего на поверхность равна

$$G = G_m + G_{\text{amb}} + G_{\text{ext}}, \quad (14)$$

где G_m – падающее излучение с других поверхностей системы, Вт/м²; G_{ext} – падающее излучение с внешних источников, Вт/м²; G_{amb} – плотность потока излучения окружающей среды, Вт/м².

Все поверхности рассматриваемых систем являются диффузно серыми, т.е. могут диффузно излучать и диффузно отражать падающее излучение. Интенсив-

ность излучения таких поверхностей одинакова по всем направлениям. При этом зависимость излучательных и поглощательных свойств поверхностей от длины волны не учитывается. Это условие справедливо, поскольку в работе рассмотрен достаточно ограниченный спектральный диапазон, в пределах которого изменением коэффициентов излучения и отражения можно пренебречь.

Граничное условие диффузно-излучающей и отражающей поверхности при моделировании теплообмена излучением с поверхности на поверхность в прозрачной среде задано на наружных поверхностях трубопровода и коллектора, на внутренней поверхности канала теплотрассы, на всех поверхностях теплоотражающих экранов. При этом эффективный и результирующий радиационные тепловые потоки рассчитываются с учетом отсутствия внешних источников излучения и излучения окружающей среды по уравнениям:

$$J = (1 - \varepsilon_w) G_m + \varepsilon_w e_b(T); \quad (15)$$

$$-nq_{pez} = \varepsilon_w (G_m - e_b(T)). \quad (16)$$

Адекватность математической модели и обоснованность принятых допущений были проверены сопоставлением результатов численного расчета с данными экспериментального исследования, в ходе которого фиксировались значения теплового потока на наружной поверхности канала физической модели сети теплоснабжения.

Экспериментальное исследование проводилось на трех конфигурациях экспериментальной установки: без экрана (ЭУ №1); оснащенной одним теплоотражающим экраном (ЭУ №2); оснащенной двумя теплоотражающими экранами, расположенными вокруг трубопровода (ЭУ №3). Описание и результаты натурного эксперимента приведены в [4].

Математическая модель процессов переноса тепловой энергии в сети теплоснабжения канальной прокладки в непроходных каналах реализована в специализированном программном комплексе, основанном на методе конечных элементов. Граничные условия были определены экспериментально и не изменялись в ходе проведения расчетов. Схема расчетной области экспериментальной установки (ЭУ №2) с указанием основных размеров показана на рис. 3. Физические характеристики материалов экспериментальной

установки приведены в табл. 1¹. Экспериментальные и расчетные значения тепловых потоков представлены в табл. 2.

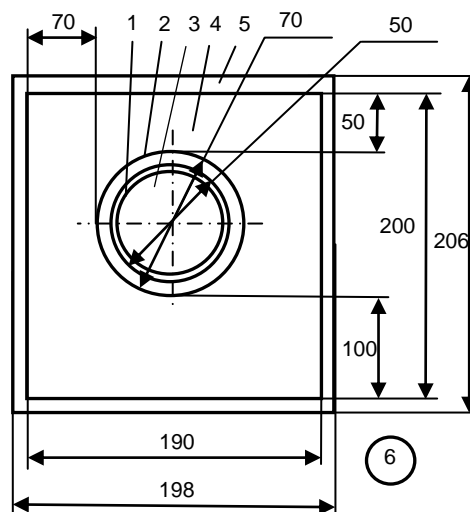


Рис. 3. Схема расчетной области экспериментальной установки с одним экраном: 1 – трубопровод; 2 – теплоотражающий экран; 3 – теплоноситель; 4 – воздух канала теплотрассы; 5 – канал; 6 – окружающая среда

На рис. 4 показаны поле температур и поле скоростей в элементах физической модели однотрубной тепловой сети (ЭУ №1). Анализ этих показателей показывает, что полученное температурное поле и поле скоростей являются достаточно типичными, при этом теплый воздух от трубопровода поступает к верхней стенке канала и, остывая вдоль боковых стенок, движется вниз. Исследование показало, что установка теплоотражающих экранов при геометрических и теплофизических характеристиках данной физической модели тепловой сети позволяет повысить температуру на поверхности трубопровода, значительно уменьшить радиационный тепловой поток и сократить линейные тепловые потери сети теплоснабжения на 57,9 % при установке одного экрана и на 70 % при установке двойного экрана. При этом наблюдается снижение температуры и подвижности воздуха в канале.

Относительная погрешность результатов моделирования, по сравнению с экспериментальными данными, не превышает 5,4 %, что свидетельствует об адекватности принятых при построении математических моделей допущений.

¹ Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1231 с.

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов экспериментальной установки

Наименование элемента системы	Технические характеристики				
	материал	плотность, кг/м ³	теплопроводность, Вт/м·К	теплоемкость, Дж/кг·К	степень черноты ²
Трубопровод	Полипропилен	990	0,19	1930	0,9
Теплоотражающий экран	Алюминий	2670	204	920	0,15
Канал	Оргстекло	1100	0,196	1800	0,92

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные значения тепловых потоков

Конфигурация экспериментальной установки	Метод исследования	Плотность теплового потока, Вт/м ²			Среднее значение плотности теплового потока, Вт/м ²	Относительная погрешность численного расчета, %
		верхняя поверхность канала	боковая поверхность канала	нижняя поверхность канала		
Экспериментальная установка №1 (ЭУ №1)	Эксперимент	189,7	97,0	60,1	110,95	0,02
	Численный расчет	191,3	96,5	59,4	110,93	
Экспериментальная установка №2 (ЭУ №2)	Эксперимент	92,4	45,6	13,9	49,375	5,32
	Численный расчет	93,4	41,6	10,4	46,75	
Экспериментальная установка №3 (ЭУ №3)	Эксперимент	62,6	29,2	12,1	33,275	1,50
	Численный расчет	61,2	31,8	6,3	32,775	

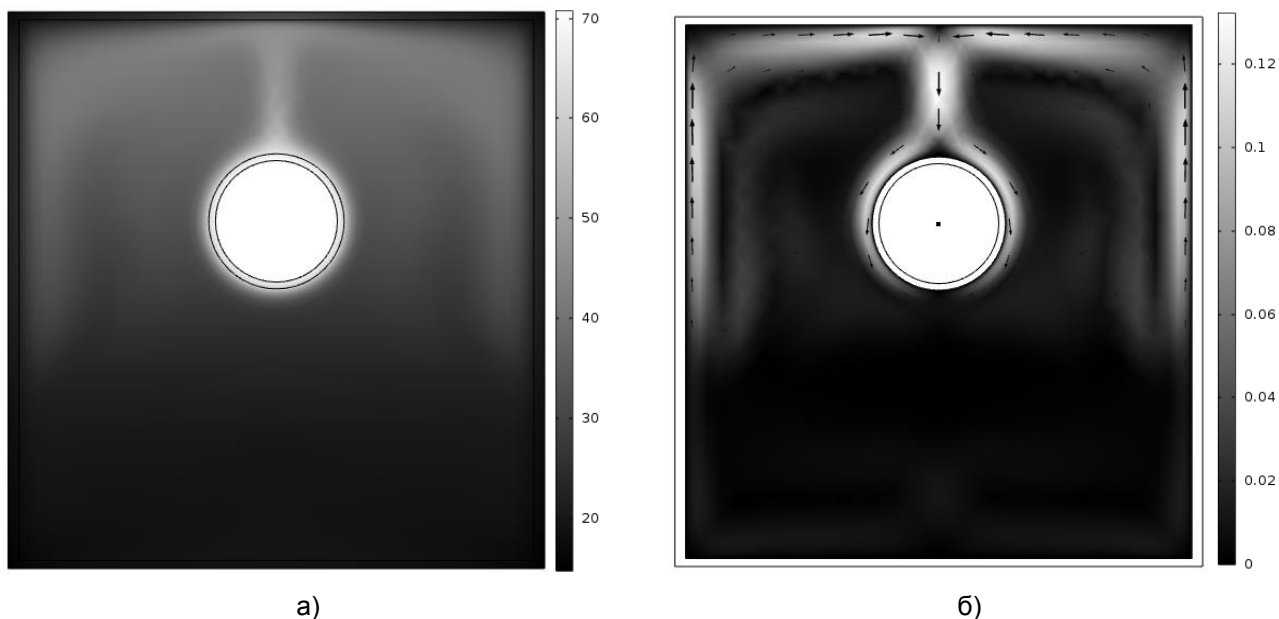


Рис. 4. Температурное поле, °С, (а) и поле скоростей, м/с, (б) экспериментальной установки №1

В целях определения максимально возможного тепловосприятия коллектора устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы необходимо решить следующие задачи: выбор места

расположения теплоотражающего экрана и исследование влияния работы устройства по утилизации тепловых потерь на тепловой режим работы однотрубной и двухтрубной тепловой сети с канальной подземной прокладкой в непроходных каналах.

Поскольку трубопровод тепловой сети рассматривается только как источник теп-

² Излучательные свойства твердых материалов: справочник / под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.

ловой энергии, то в случае двухтрубной тепловой сети взаимным влиянием прямого и обратного трубопровода, ввиду его незначимости для настоящего исследования, допустимо пренебречь. Таким образом, разработанные математические модели можно экстраполировать на двухтрубную тепловую сеть.

Исследование однотрубной и двухтрубной тепловой сети с подземной канальной прокладкой трубопровода в непроходном канале, диаметром трубопроводов 200 мм и глубиной залегания трубопровода 1,5 м проведено методом численного моделирования для температурных графиков работы системы теплоснабжения 150/70 и 95/70. Расчеты велись для температур теплоносителя, соответствующих расчетной температуре воздуха. При этом температура окружающего грунта во всех вариантах численного анализа принималась равной средней температуре грунта за отопительный период для условий г. Иваново.

Основные теплофизические характеристики материалов тепловой сети приведены в табл. 3³.

Для анализа влияния отбора энергии коллектором устройства на тепловой режим работы сети теплоснабжения был произведен ряд численных расчетов при наличии теплоотражающего экрана и коллектора.

При выборе места расположения коллектора и конфигурации теплоотражающего экрана необходимо учесть деформацию трубопровода, вызванную его линейным удлинением с ростом температуры

теплоносителя в течение отопительного периода. С учетом данных особенностей было решено располагать экран у внутренней стенки канала, что позволяет трубопроводу свободно деформироваться, не нарушая целостности экрана. При этом коллектор целесообразно разместить в зазоре между экраном и стенкой канала. Также необходимо отметить, что величина тепловосприятости коллектора рассматривается в работе относительно одного метра длины трубопроводов тепловой сети.

Результаты. На основании результатов математического моделирования процессов теплообмена в рассматриваемых системах (M_1 , M_2 , M_3) были построены зависимости, показанные на рис. 5 и 6, отражающие влияние тепловосприятости коллектора, отнесенного к одному метру длины трубопроводов, на величины линейной плотности теплового потока с поверхности трубопроводов и линейных потерь с поверхности канала в грунт для двух систем: без теплоотражающего экрана (черные линии) и с теплоотражающим экраном (серые линии).

Полученные зависимости показывают, что отбор теплоты коллектором из канала теплотрассы в размере первоначальных тепловых потерь для данной тепловой сети вызывает увеличение линейной плотности теплового потока с поверхности трубопроводов в среднем на 10–14 %.

Для ограничения отбора теплоты в устройстве предусмотрен теплоотражающий экран, способный сократить радиационную составляющую теплового потока с поверхности трубопроводов.

Таблица 3. Теплофизические характеристики элементов тепловой сети

Наименование элемента системы	Технические характеристики				
	Материал	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплоемкость, Дж/кг·К	Степень черноты ⁴
Трубопровод, коллектор	Сталь	7800	44,5	450	0,96
Теплоотражающий экран	Алюминий	2700	204	920	0,15
Тепловая изоляция	Пенополиуретан (с полиэтиленовой оболочкой)	70	0,035	1470	0,8
Канал	Железобетон	2300	1,8	880	0,9

³ Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1231 с.

⁴ Излучательные свойства твердых материалов: справочник / под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.

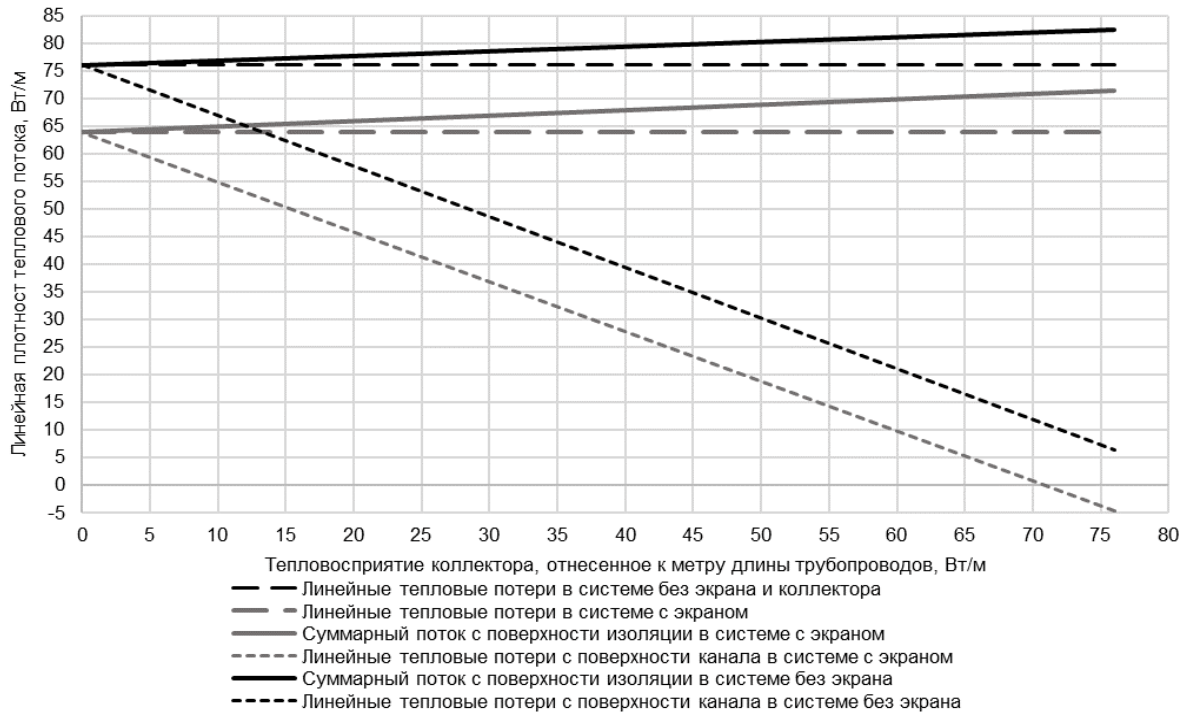


Рис. 5. Влияние тепловосприятости коллектора на тепловой поток с поверхности изоляции и с поверхности канала в однотрубной тепловой сети $d = 200$ мм при расчетной температуре наружного воздуха

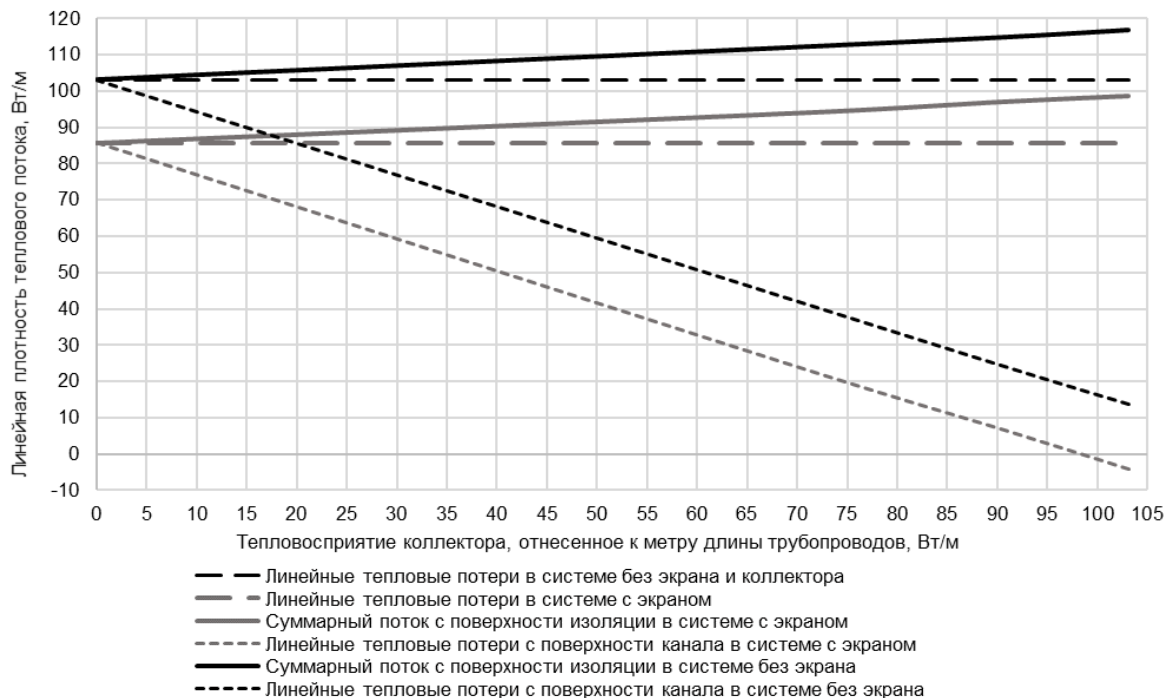


Рис. 6. Влияние тепловосприятости коллектора на тепловой поток с поверхности изоляции и с поверхности канала в двухтрубной тепловой сети $d = 200$ мм при расчетной температуре наружного воздуха

Анализ работы теплоотражающего экрана в условиях тепловой сети без коллектора показал, что при установке теплоотражающего экрана у внутренней поверхности канала теплотрассы во всех вариантах расчета его эффективность варьируется в диапазоне от 16,8 до 18,8 %.

Результаты численных расчетов совместной работы сети, экрана и коллектора (рис. 5, 6) показали, что применение теплоотражающего экрана, расположенного у внутренней поверхности канала теплотрассы между коллектором и трубопроводами, при прежней величине тепловос-

приятия коллектора, равной первоначальным линейным тепловым потерям, дает принципиально иной результат. В этом случае линейная плотность теплового потока с поверхности трубопроводов становится на 4 % меньше первоначального значения, что говорит о сохранении теплового режима работы сети. При этом тепловая энергия в объеме 4 % от первоначальных потерь, необходимая для достижения требуемого тепловосприятия коллектора, компенсируется энергией окружающего грунта. Однако такой режим совместной работы сети и предлагаемого устройства недопустим, поскольку он неизбежно вызовет охлаждение и, возможно, промерзание грунта в месте расположения устройства.

Таким образом, тепловосприятие коллектора, которое будет допустимым с точки зрения сохранности теплового режима сети и в то же время достаточным для работы устройства по утилизации тепловых потерь, определяется нулевым отбором энергии из окружающего грунта. По результатам анализа математического моделирования допустимое тепловосприятие коллектора находится в диапазоне от 90 до 95 % первоначальных тепловых потерь.

Выводы. Предложенные математические модели позволяют определять тепловые потоки в сети теплоснабжения и оценивать влияние на работу тепловой сети теплоотражающего экрана и устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

Полученные результаты математического моделирования показали, что 90 % от первоначальных тепловых потерь сети теплоснабжения допустимо утилизировать с помощью предлагаемого устройства. Кроме того, результаты моделирования могут быть использованы при определении геометрических параметров и режима работы коллектора устройства по утилизации.

Список литературы

1. **Половников В.Ю.** Математическое моделирование тепловых режимов систем транспортировки тепла // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2012. – № 2. – С. 118–122.

2. **Кузнецов Г.В., Половников В.Ю.** Численный анализ влияния радиационного теплообмена на тепловые режимы и тепловые потери теплопроводов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2011. – № 5–6. – С. 12–20.

3. **Тарасевич Е.И.** Численное моделирование теплообмена для двухтрубных тепловых сетей при подземной канальной и бесканальной прокладке // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–22. – С. 4880–4885.

4. **Банникова С.А., Захаров В.М., Козлова М.В.** Экспериментальное определение тепловых потерь сети теплоснабжения для их использования в устройстве утилизации // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 1. – С. 5–11.

5. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теоретическая физика: учеб. пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

6. **Джалурия И.** Естественная конвекция: Тепло- и массообмен. – М.: Мир, 1983. – 400 с.

Reference

1. Polovnikov, V.Yu. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh rezhimov sistem transportirovki tepla [Mathematical modeling of heat regimes of heat transportation systems]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii*, 2012, no. 2, pp. 118–122.

2. Kuznetsov, G.V., Polovnikov, V.Yu. Chislennyy analiz vliyaniya radiatsionnogo teploobmena na teplovye rezhimy i teplovye poteri teploprovodov [Numerical analysis of the effect of radiative heat transfer on heat regimes and heat losses of heat pipelines]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2011, no. 5–6, pp. 12–20.

3. Tarasevich, E.I. Chislennoe modelirovanie teploobmena dlya dvukhtрубnykh teplovykh setey pri podzemnoy kanal'noy i beskanal'noy prokladke [Numerical simulation of heat transfer for two-pipe heat networks with underground channel and channel-free laying]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2015, no. 2–22, pp. 4880–4885.

4. Bannikova, S.A., Zakharov, V.M., Kozlova, M.V. Eksperimental'noe opredelenie teplovykh poter' seti teplosnabzheniya dlya ikh ispol'zovaniya v ustroystve utilizatsii [Experimental study of heat losses of the heat supply network to use in the utilization device]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 1, pp. 5–11.

5. Landau, L.D., Lifshits, E.M. *Teoreticheskaya fizika: v 10 t., t. VI. Gidrodinamika* [Theoretical physics: in 10 vol., vol. VI. Hydrodynamics]. Moscow: Nauka, 1986. 736 p.

6. Dzhaliuriya, Y. *Estestvennaya konveksiya: Teplo i massoobmen* [Natural convection: Heat and mass transfer]. Moscow: Mir, 1983. 400 p.