НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ, 2017, №4

ISSN 2073-8129 (Print) ISSN 2587-8786 (Online) http://no.ysn.ru

УДК 517.958:536.12

Оценка влияния лучистой составляющей на сложный теплообмен между сетевым трубопроводом и водопроводом при совместной прокладке

А.В. Степанов[*], Г.Н. Егорова[**]

[*]*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия*
[**]*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия*
e-mail: a.v.stepanov@iptpn.ysn.ru

Аннотация. *Рассматривается математическая модель совместной прокладки сетей водопровода и квартальных тепловых сетей. Целью статьи является исследование влияния излучения на процесс сложного теплообмена, происходящего в кожухе теплоизоляции между элементами конструкции. Приведены результаты математического моделирования тепловых потерь с учетом лучистой составляющей. При расчете тепловых потоков, которые теряет трубопровод при транспортировке теплоносителя через тепловую изоляцию, обычно учитывается процесс передачи теплоты путем теплопроводности и конвекции. Лучистой составляющей при этом в большинстве случаев пренебрегают. Особенно заметно влияние теплопередачи путем лучеиспускания и конвекции при использовании теплоизоляционных изделий с крупными порами, воздушными прослойками. Рассматривается наземная конфигурация трубопровода и водопровода, уложенного в общую тепловую изоляцию, изготовленную из минеральной ваты. При совместной прокладке трубопроводов происходит сложный лучистый теплообмен, который состоит для любого, одного из этих трубопроводов из излучения отраженного от другого трубопровода и собственного излучения. Рассчитывается нестационарное температурное поле конструкции, состоящей из двух параллельно уложенных трубопроводов с разными диаметрами, лежащих в общей теплоизоляционной конструкции, изготовленной из минеральной ваты. Элементы конструкции обмениваются теплом между собой и окружающей средой посредством конвекции и излучения.*

Ключевые слова: математическая модель, сложный теплообмен, тепловые потери, коэффициент излучения, температурное поле, общий тепловой поток.

Evaluation of the Radiation Coefficient Effect in Total Heat Transfer between Network Pipeline and Water Pipes in Joint Installation

A.V. Stepanov[*], G.N. Egorova[**]

[*]*Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia*
[**]*North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia*
e-mail: a.v.stepanov@iptpn.ysn.ru

Abstract. *This paper considers a mathematical model of joint laying of water pipeline networks and district heat networks. The purpose of the work is to study the effect of radiation on the process of complex heat exchange taking place in the housing insulation between structural elements. The results of mathematical simulation of the heat loss taking into account the radiant component are given. When calculating the heat flows which are lost in the pipeline through thermal insulation at transporting the coolant, the heat transfer process is usually considered by means of conduction and convection. The radiant component is neglected in most cases. The influence of heat transfer by radiation and convection is particularly noticeable using thermal insulation products with large pores and air gaps. A ground configuration of a pipe line and water pipe*

СТЕПАНОВ Анатолий Викторович – д.т.н., г.н.с.; ЕГОРОВА Гульнара Николаевна – ст. преподаватель.

line laid in a joint thermal insulation made of mineral wool is considered. When laying joint pipelines, complex radiative heat transfer occurs. It consists, for each one of these pipelines, of radiation reflected from the other pipeline and self-radiation. A non-stationary temperature field of the structure, consisting of two parallel stacked pipes with different diameters lying in a joint insulating structure made of mineral wool, is calculated. The construction elements exchange heat with each other and the environment by convection and radiation.

Key words: mathematical model, total heat transfer, heat losses, radiation coefficient, non-steady temperature field, total heat flux.

Введение

Системы теплоснабжения – важнейшие структурные составляющие топливно-энергетического комплекса Российской Федерации, которые обеспечивают тепловой энергией население и хозяйственный комплекс. Теплоснабжение в условиях Крайнего Севера является самым энергоемким и самым расточительным сектором экономики. Не вызывает сомнений актуальность проблемы тепловой защиты зданий и сооружений, направленной на экономичное и рациональное использование топлива, тепловой и электрической энергии.

Численное моделирование тепловых режимов теплопроводов именно в условиях Крайнего Севера является актуальной задачей при разработке энергосберегающих систем передачи тепловой энергии. Для строительства в жестких условиях Крайнего Севера очень важно учитывать природно-климатические условия, характеризующие тот или иной район. Якутск является одним из северных городов, находящихся в наиболее суровых климатических условиях. Наличие вечной мерзлоты, большие перепады температур –71…38 °С, резкие суточные колебания температур 25–37 °С, высокая интенсивность светового облучения 851,3–928,1 Вт/м^2, сильные ветра до 50 м/с и другие факторы играют огромную роль для долговечности эксплуатации строительных материалов [1, 2]. Климатические условия, которые были учтены при составлении нормативов, касающихся расчета тепловых потерь при транспортировке теплоносителя, относятся к условиям Центральной и Западной России и к стандартным схемам прокладки трубопроводов, что не согласуется с природными условиями Якутии. При расчете тепловых потоков, которые теряет трубопровод при транспортировке теплоносителя через тепловую изоляцию, обычно учитывается процесс передачи теплоты путем теплопроводности и конвекции. Лучистой составляющей при этом в большинстве случаев пренебрегают. В отличие от других видов тепловое инфракрасное излучение определяется тепловым состоянием тела – его температурой. Особенно заметно влияние теплопередачи путем лучеиспускания и конвекции при использовании теплоизоляционных изделий с крупными порами, воздушными прослойками [3, 4]. Между элементами конструкции, расположенными в пространстве как угодно при любых температурах выше абсолютного нуля, существует непрерывный лучистый теплообмен. Величина теплообмена излучением в большой степени зависит от величины и разницы температур тел, которые обмениваются теплом, а также от их взаимного расположения [5, 6].

Целью данной работы являются математическое моделирование процесса теплообмена в общей тепловой изоляции водопровода, уложенного вместе с обратным трубопроводом сетевой воды, и численный анализ тепловых потерь с учетом лучистой составляющей.

Постановка задачи исследования

Рассматривается наземная конфигурация трубопровода и водопровода, уложенных в общую тепловую изоляцию, изготовленную из минеральной ваты. При совместной прокладке трубопроводов происходит сложный лучистый теплообмен. Прокладка этих трубопроводов производится на одном уровне, расстояние между ними равно 0,1125 м. Пространство внутри кожуха тепловой изоляции заполнено воздухом.

С помощью программы Comsol Multiphysics рассчитываем нестационарное температурное поле конструкции, состоящей из двух параллельно уложенных трубопроводов с разными диаметрами, лежащих в общей теплоизоляционной конструкции, изготовленной из минеральной ваты. Элементы конструкции обмениваются теплом между собой и окружающей средой посредством конвекции и излучения. Радиус трубопровода сетевой воды R_1=0,0285 м, коэффициент теплопередачи материала трубопровода k_1=0,105 Вт/(м·К), коэффициент черноты трубопровода ε=0,8, температура теплоносителя T_1=323 К, плотность стали из которого изготовлен трубопровод ρ_1=7700 кг/м^3. Радиус водопровода R_2=0,054 м, коэффициент теплопередачи k_2=0,162 Вт/(м·К), температура воды в водопроводе T_2=278 К. Температура внутри кожуха теплоизоляционной конструкции $T_{вн}$=291 К, толщина изоляции δ=0,04 м, коэффициент черноты материала изоляции $\varepsilon_{вн}$=0,92, коэффициент теплопередачи изоляции из минеральной ваты k_3=0,046 Вт/(м·К), температура окружающей среды $T_{ср}$=233 К [7–9].

Описание метода решения задачи и математической модели объекта исследования

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных Comsol Multiphysics использует метод конечных элементов [10, 11]. Уравнение, описывающее нестационарную задачу теплопроводности в цилиндрической системе координат,

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\mathrm{k}\frac{\partial T}{\partial t}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(r\mathrm{k}\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (1)$$

С краевыми условиями

$$T_i\,|_{\tau=0}=T_0, \quad (2)$$

$$k_r\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha_w\left(T_{ср}-T_{вн}\right), \quad (3)$$

$$k_r\frac{\partial T}{\partial r}=\alpha_0\left(T_{вн}-T_3\right), \quad (4)$$

$$k_{r,1}\frac{\partial T_1}{\partial r}\,|_{r=R_1}=k_{r,2}\frac{\partial T_2}{\partial r}\,|_{r=R_2}\,. \quad (5)$$

Внешняя поверхность обменивается теплом с окружающей средой посредством конвекции и излучения. Тепловой поток в этом случае задается уравнением

$$q=-n\left(-k\Delta T\right)=k\left(T_{ср}-T\right)+\varepsilon\delta\left(T_{ср}^4-T^4\right). \quad (6)$$

Коэффициенты излучения для верхней и нижней частей тепловой изоляции в месте полости имеют равную величину и определяются разницей между поступающим и отраженным излучением:

$$\alpha_{из}=\frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{F_1}{F_3}\left(\frac{1}{C_2}-\frac{1}{C_0}\right)}\cdot\frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_{вн}}{100}\right)^4}{T_1-T_{вн}}-$$
$$-\frac{1}{\frac{1}{C_2}+\frac{F_3}{F_2}\left(\frac{1}{C_1}-\frac{1}{C_0}\right)}\cdot\frac{\left(\frac{T_{вн}}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_{вн}-T_2}. \quad (7)$$

Результаты моделирования

Численный анализ проводился для периода времени, соответствующего выходу процессов теплопереноса на стационарный режим. Обоснованность и достоверность результатов численных исследований следует из проведенных проверок используемых методов решения задач на сходимость и устойчивость [12]. Погрешность по балансу энергии и массы во всех вариантах численного анализа не превысила 0,5 %, что можно считать приемлемым при моделировании тепломассопереноса в изоляции теплопроводов.

На рис. 1 представлены температурное поле и направление векторов теплового потока при нестационарном сложном теплообмене между горячим трубопроводом и холодным водопроводом, на рис. 2 и 3 – распределение теплового потока и температурного поля вдоль радиальной компоненты и z-й компоненты соответственно.

Поверхность: общий тепловой поток, z-я компонента, Вт/м^2; контур: температура, K; стрелка: общий тепловой поток.

Исходя из графического представления результатов математической модели ясно, что горячий трубопровод теряет большое количество тепла, находясь рядом с холодным. На базе данной математической модели был сделан анализ тепловых потерь, результаты которого сведены в таблице.

Суммарная потеря теплоты трубопровода сетевой воды, q, Вт/м^2

Совместная укладка с учетом лучистой составляющей	Отдельная укладка с учетом лучистой составляющей	Совместная укладка без учета лучистой составляющей	Отдельная укладка без учета лучистой составляющей
32,26	23,2	24,06	18,05
Разница потерь теплоты между отдельно изолированным трубопроводом и трубопроводом, уложенным совместно с водопроводом, Δq, Вт/м^2			
с учетом лучистой составляющей		без учета лучистой составляющей	
9,06		6,01	
Увеличение потерь теплоты при совмещенной прокладке трубопроводов, Δ, %			
39,05		33,33	
Доля не учитываемой тепловой энергии за счет лучистой составляющей, $\Delta_т$, %			
5,72%			

В результате численного моделирования температурных полей в теплоизоляции трубопровода, проведенного на базе математической модели (1)–(7), было установлено, что имеются существенные тепловые потери трубопроводом при совместной прокладке с водопроводом.

Анализ тепловых потерь позволяет говорить о том, что потери тепла будут значительными при данном виде прокладки и учет лучистой составляющей позволяет более точно определять количество потерянной теплоты. Здесь следует отметить, что величины степеней черноты материалов, из которых изготовлены эле-

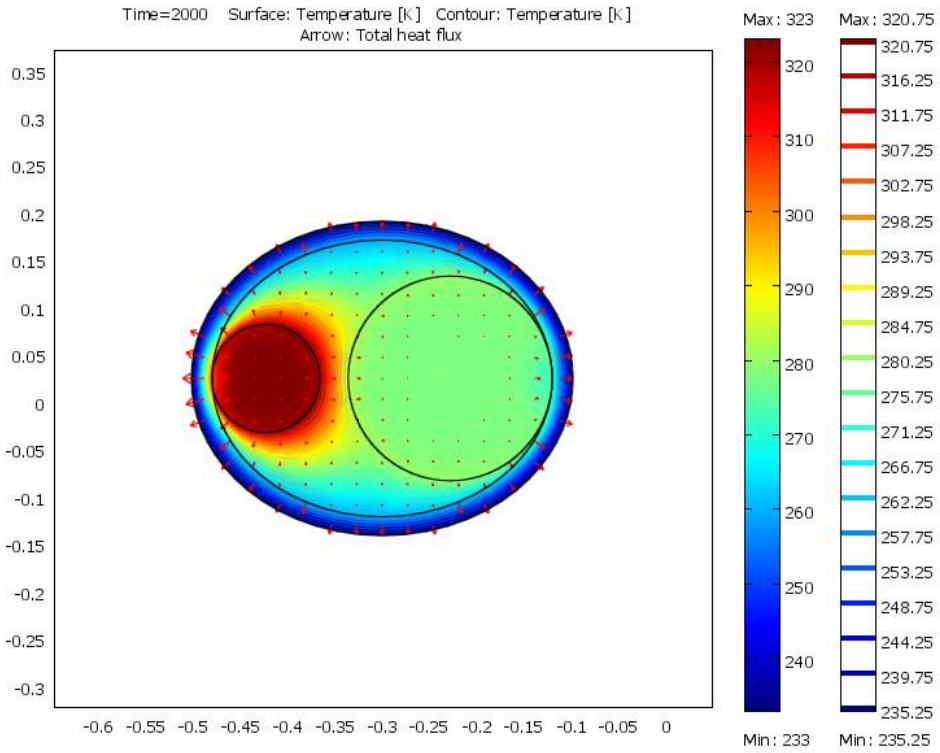

Рис. 1. Температурное поле: поверхность – температура, K; контур – температура, K; стрелка – общий тепловой поток

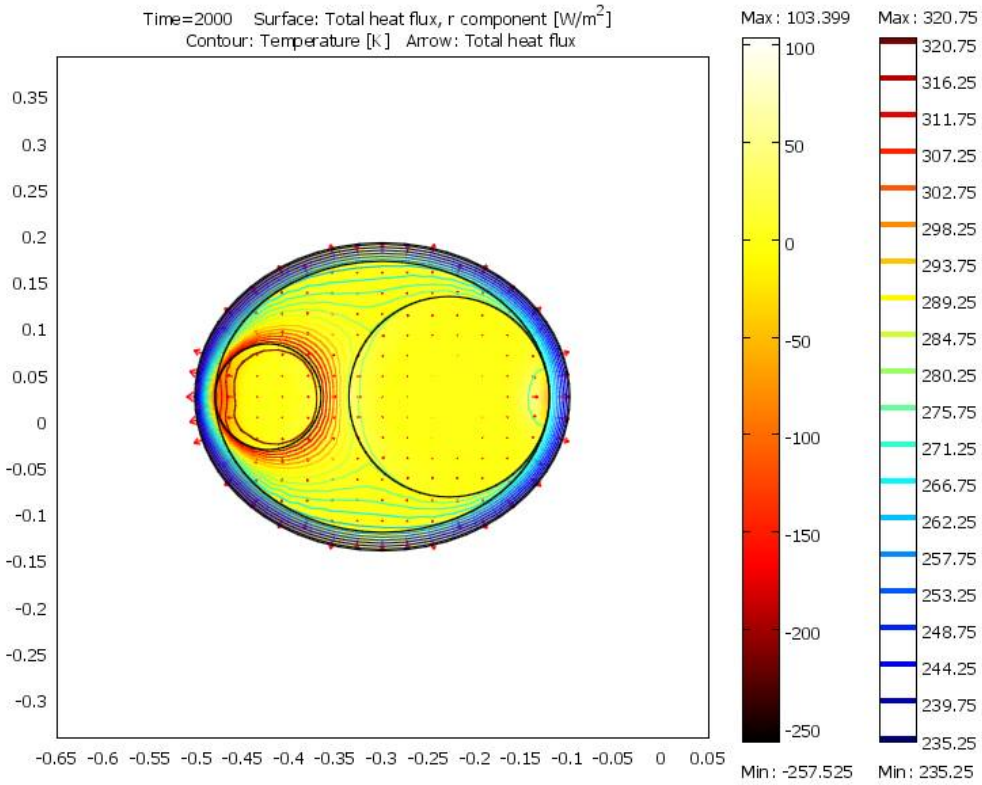

Рис. 2. Общий тепловой поток, радиальная компонента: поверхность – общий тепловой поток, радиальная компонента, Вт/м^2; контур – температура, K; стрелка – общий тепловой поток

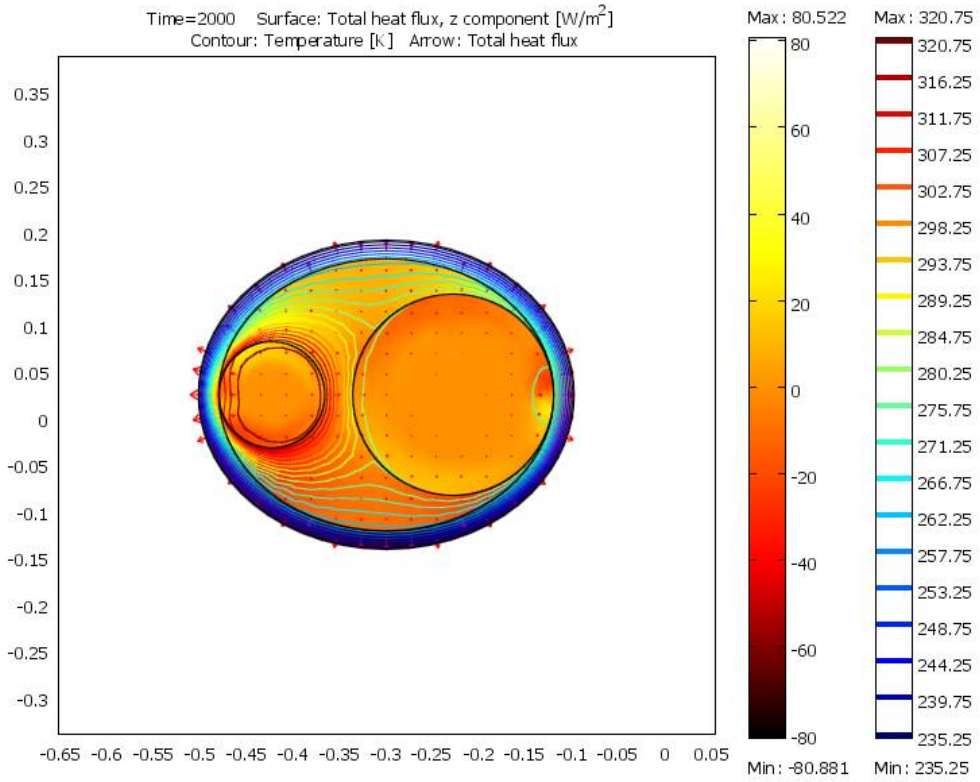

Рис. 3. Общий тепловой поток, z-я компонента: поверхность – общий тепловой поток, z-я компонента, Вт/м^2; контур – температура, К; стрелка – общий тепловой поток

менты конструкции, взяты при одном значении разницы температур между трубопроводом и водопроводом. Данная проблема мало изучена и требует дальнейших исследований с учетом различных вариаций разницы температур, от которых будут зависеть и остальные теплофизические параметры элементов конструкции.

Сравнение результатов численных исследований тепловых потерь трубопровода (таблица) в условиях процесса теплообмена в совместной изоляции с учетом коэффициентов излучения позволяет сделать вывод о том, что отдельная укладка трубопровода горячего водоснабжения позволит в значительной степени сохранить тепловую энергию, подаваемую для потребителей. Анализ расчетных значений тепловых потерь, приведенных в таблице, свидетельствует о том, что влияние теплопередачи излучением позволит учитывать 5,72 % от теряемой теплоты.

Выводы

Разработана математическая модель процесса теплообмена в общей тепловой изоляции водопровода, уложенного вместе с обратным трубопроводом сетевой воды, и приведена методика численного анализа тепловых потерь с учетом лучистой составляющей. Детальная оценка показала, что доля лучистой составляющей является существенной при теплообмене трубопроводов совместной укладки. Выявлено, что совместная укладка трубопровода горячего водоснабжения и водопровода значительно увеличивает потери тепла горячим водопроводом за счет излучения и составляет 5,72 %.

Список обозначений

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м^2·К^4);

$C_{1,2}$ – коэффициенты излучения поверхностей тепловой изоляции, Вт/(м^2·К^4);

$F_{1,2,3}$ – площади поверхности сетевого трубопровода, водопровода тепловой изоляции соответственно, м^2;

n – внешняя по отношению к расчетной области нормаль на границе;

q – тепловой поток, Вт/м^2;

r, z – пространственные координаты, м;

$T_{из}$ – температура тепловой изоляции, К;

α_0, α_w – коэффициенты теплообмена на внешней и внутренней границах тепловой изоляции, Вт/(м^2·К);

δ – толщина тепловой изоляции, м;

σ =5,67·10^{-8} Вт/(м^2·К^4) – постоянная Стефана-Больцмана.

Литература

1. *Местников А.Е., Абрамова П.С.* Тепловая защита зданий на Севере: материалы, изделия, конструкции. М.: Изд-во АВС, 2009. 236 с.

2. *Степанов А.В., Тимофеев А.М.* Развитие строительной теплофизики в регионах холодного климата // Труды III Евразийского симпозиума: Пленарные доклады. Якутск: Изд-во ЯФ СО РАН, 2006. С. 170–176.

3. *Михеев М.А.* Основы теплопередачи. М.; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1949. 397 с.

4. *Оцисик М.Н.* Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976. 616 с.

5. *Hawkey D.J.C.* District heating in the UK: A Technological Innovation Systems analysis // Environmental Innovation and Societal Transitions. 2012. V. 5. P. 19–32.

6. *Соколов Е.Я.* Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 1999. 472 с.

7. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с.

8. *СНиП* 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. М.: Изд-во стандартов, 2004. 25 с.

9. *Даниэлян П.И., Яницкий П.А.* Температурный режим движения жидкости по двум параллельным трубам // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1988. № 3, С. 100–107.

10. *Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А.* Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984. 288 с.

11. *Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В.* Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.

12. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоиздат, 1991. 304 с.

Поступила в редакцию 03.11.2017