

Тепловые потери подземных канальных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции с учетом радиационного теплообмена в полости канала

*Д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой Г.В. Кузнецов;
к.т.н., доцент В.Ю. Половников*,*

ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Ключевые слова: математическое моделирование; теплопровод; тепловые потери; теплоизоляция

Наиболее слабым звеном централизованных систем теплоснабжения являются теплопроводы и трубопроводы горячего водоснабжения. Схемы и средства транспортировки теплоносителя в системах централизованного теплоснабжения, построенные в СССР, характеризуются недостаточной надежностью, высокой повреждаемостью трубопроводов тепловой сети и большими тепловыми потерями в них [1].

По различным оценкам [2], потери тепла при транспортировке теплоносителя составляют от 10 до 30 % и более. В тепловых сетях теряется вся экономия от комбинированной выработки тепла и электроэнергии на ТЭЦ. В связи с этим, вопросы, связанные с анализом тепловых режимов и тепловых потерь теплопроводов, эксплуатируемых в различных условиях, приобретают особую актуальность.

Основными причинами роста тепловых потерь теплопроводов являются увлажнение [3], деформация и нарушения целостности слоя тепловой изоляции [4]. Масштабы потерь тепла теплотрубопроводов, эксплуатирующихся с увлажненной изоляцией, и факторы, оказывающие основное влияние на интенсификацию тепловых потерь в подобных условиях, установлены и приведены в [5, 6]. Однако до настоящего времени не опубликовано результатов каких-либо теоретических или экспериментальных исследований тепловых режимов и тепловых потерь систем транспортировки тепла, работающих с частично разрушенной или деформированной тепловой изоляцией.

Целью данной работы является численный анализ масштабов тепловых потерь подземных канальных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции с учетом радиационного теплообмена в полости канала.

Постановка задачи

Рассматривается широко распространенная в РФ конфигурация подземного теплопровода [7], размещенного в непроходном канале и теплоизолированного минеральной ватой. Схематическое изображение области решения приведено на рис. 1.

Деформация изоляции теплопровода имитировалась путем снижения толщины слоя тепловой изоляции в верхней части и провисанием (с образованием воздушной прослойки) теплоизоляции в нижней части теплопровода. Подобное состояние теплоизоляционной конструкции теплопроводов является достаточно распространенным и отражает реальную геометрию изоляции теплопроводов тепловых сетей [8].

Для рассматриваемой области (рис. 1) решается двумерная сопряженная стационарная задача кондуктивно-конвективно-радиационного теплопереноса [9, 10] в системе «подземный канальный теплопровод с деформированной изоляцией – окружающая среда». Целесообразность перехода к сопряженным постановкам задач [9, 10] при прогностическом моделировании тепловых режимов работы теплопроводов описана в [11, 12]. В [11, 12] показаны обоснованность предложенного перехода, существенное влияние распределений температур и теплового излучения в полости канала на формировании теплового режима рассматриваемых систем и необходимость учета этого фактора при проектировании и анализе работы тепловых сетей.

Следует отметить, что решение нестационарной задачи теплопереноса для рассматриваемой системы (рис. 1) не является целесообразным, поскольку нестационарные режимы работы теплопроводов наблюдаются только при вводе тепловых сетей в эксплуатацию после плановых или внеплановых остановок и не являются характерными режимами их работы.

При постановке задачи приняты следующие основные допущения.

1. Теплофизические характеристики материалов, используемые при численном анализе, являются постоянными и известными величинами.
2. Воздух, заполняющий полость канала, является сухим, несжимаемым и удовлетворяющим приближению Буссинеска [13].
3. В воздушной прослойке, образовавшейся в результате деформации слоя тепловой изоляции, расчет теплопередачи производится с использованием эффективного коэффициента теплопроводности [14], учитывающего интенсификацию теплообмена, вызываемую свободной конвекцией.

Принятые допущения, с одной стороны, не накладывают принципиальных ограничений на физическую модель рассматриваемой системы, а с другой – позволяют определенным образом упростить алгоритм и метод решения поставленной задачи.

Математическая модель

В предлагаемой постановке процесс переноса тепла в рассматриваемой области решения будет описываться:

- для воздуха в полости канала – уравнениями энергии, движения и неразрывности:

$$C_a \rho_a (\vec{w}, \nabla T_a) = \lambda_a \nabla^2 T_a, \quad (1)$$

$$(\vec{w}, \nabla) \vec{w} = -\frac{1}{\rho_a} \nabla p + \nu_a \nabla^2 \vec{w} + \vec{F}, \quad (2)$$

$$\nabla \vec{w} = 0; \quad (3)$$

- в стенке трубы, слое тепловой изоляции, воздушной прослойке, стенах канала и грунте – уравнениями теплопроводности:

$$\nabla^2 T_p = 0, \quad (4)$$

$$\nabla^2 T_i = 0, \quad (5)$$

$$\nabla^2 T_{ai} = 0, \quad (6)$$

$$\nabla^2 T_c = 0, \quad (7)$$

$$\nabla^2 T_g = 0. \quad (8)$$

При постановке задачи предполагалось, что на внутренней поверхности трубы поддерживается постоянная температура, равная температуре теплоносителя:

$$T_{p,i} = T_{in} = \text{const}. \quad (9)$$

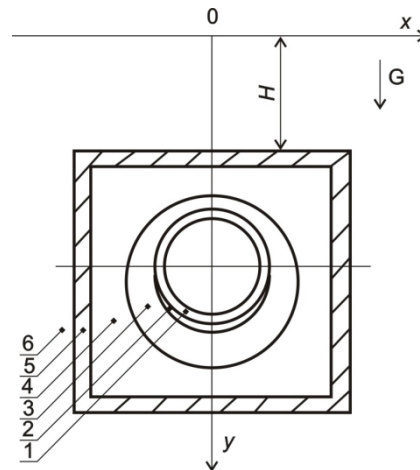


Рисунок 1. Схема области решения задачи:
1 – стенка трубы; 2 – воздушная прослойка;
3 – слой деформированной тепловой
изоляции; 4 – воздушная полость канала;
5 – железобетонная стенка канала; 6 – грунт

На границах слоев реализуются условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_p \text{grad}(T_{p,2}) = \lambda_i \text{grad}(T_{i,2}), \quad T_{p,2} = T_{i,2}, \quad (10)$$

$$\lambda_p \text{grad}(T_{p,3}) = \lambda_{ef} \text{grad}(T_{ai,3}), \quad T_{p,3} = T_{ai,3}, \quad (11)$$

$$\lambda_{ef} \text{grad}(T_{ai,4}) = \lambda_i \text{grad}(T_{i,4}), \quad T_{ai,4} = T_{i,4}, \quad (12)$$

$$\lambda_a \text{grad}(T_{a,6}) = \lambda_g \text{grad}(T_{g,6}), \quad T_{a,6} = T_{g,6}. \quad (13)$$

На границе раздела «слой изоляции – полость канала» учтен теплообмен излучением:

$$\lambda_i \text{grad}(T_{i,5}) = \lambda_a \text{grad}(T_{a,5}) + \varepsilon_{res} \sigma (T_{i,5}^4 - T_{a,5}^4), \quad T_{i,5} = T_{a,5}. \quad (14)$$

На поверхности раздела «грунт – окружающая среда» реализуются условия конвективного теплообмена:

$$-\lambda_g \text{grad}(T_{g,7}) = \alpha (T_{g,7} - T_{ex}). \quad (15)$$

Для стенки трубы, воздушной прослойки и слоя тепловой изоляции выполняются условия симметрии:

$$\text{grad}(T_p) = 0, \quad (16)$$

$$\text{grad}(T_{ai}) = 0, \quad (17)$$

$$\text{grad}(T_i) = 0. \quad (18)$$

На достаточно большом расстоянии от теплопровода градиенты температур в грунте равны нулю:

$$\text{grad}(T_g) = 0, \quad x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow -\infty. \quad (19)$$

Скорость движения воздуха на внешней поверхности изоляции трубопровода, а также на внутренней поверхности стенок канала равна нулю (условия прилипания):

$$w_{a,5} = w_{a,6} = 0. \quad (20)$$

Эффективный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки вычисляется из соотношения [14]:

$$\lambda_{ef} = 0.18 \lambda_a (\text{Gr Pr})^{0.25}. \quad (21)$$

Обозначения: T – температура, К; x, y – координаты; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); C – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; p – давление, Па; w – скорость, м/с; ν – кинематическая вязкость, м²/с; G – ускорение силы тяжести, м/с²; β – коэффициент температурного расширения, К⁻¹; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля; F – массовые силы, Н/кг: $F_x=0$, $F_y=G \beta (T_{a,5} - T_{a,6})$; ε – степень черноты; $\sigma=5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана.

Индексы: p – стенка трубы; i – слой тепловой изоляции; ef – эффективный; ai – воздушная прослойка; a – полость канала; s – стенка канала; g – грунт; in – внутренний; ex – внешний; res – приведенный; 1 – внутренняя поверхность трубы; 2–7 –соответственно границы разделов «стенка трубы – изоляция», «стенка трубы – воздушная прослойка», «воздушная прослойка – изоляция», «изоляция – стенка канала», «стенка канала – грунт», «грунт – окружающая среда».

Метод решения и исходные данные

Задача (1)-(21) решена методом конечных элементов [15] с использованием аппроксимации Галеркина. Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке, состоящей из 15492 элементов. Воздушная полость канала содержала 4640 элементов. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения, сгущение сетки проводилось методом Делоне [16].

Исследования проводились для трубопровода с диаметром условного прохода 600 мм, изготовленного из стали 10 (толщина стенки 9 мм), тепловая изоляция – минеральная вата (толщина 70 мм) [7]. Теплопровод размещался в канале марки КЛс 120-120 [7]. Расстояние от поверхности грунта до верхней части канала составляло $H = 1$ метр. Температура внутренней поверхности трубы считалась равной $T_{in}=363\text{K}$ и соответствовала среднегодовой температуре теплоносителя в подающих трубопроводах водяных тепловых сетей при их работе по температурному графику [17] – 150/70 °С. Температура окружающей среды во всех вариантах численного анализа принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск [17] – $T_{ex}=264,2\text{K}$. Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела «грунт – окружающая среда» составлял $\alpha=5\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$.

Несмотря на то, что при постановке задачи предполагалось использование области решения неограниченных размеров (выражение (19)), при проведении численного моделирования использовалась расчетная область размерами 6 м в глубину и по 5 м в стороны от оси симметрии. Размеры расчетной области выбирались на основании серии предварительных численных экспериментов таким образом, чтобы относительное изменение температур на границах области решения не превышало 0,5 %.

Наличие деформации изоляции теплотрубопровода учитывалось снижением толщины слоя в верхней части и провисанием теплоизоляции в нижней части теплопровода на величину, равную полутолщине изоляции (35 мм). Размер воздушной прослойки соответствовал размеру слоя тепловой изоляции, на который была уменьшена толщина теплоизоляции в верхней части конструкции.

В таблице 1 приведены значения теплофизических характеристик [18, 19], использованных при проведении численных исследований тепловых потерь рассматриваемой системы.

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов [18, 19]

Материал	Тепловая изоляция	Покровный слой	Стенка канала	Грунт				Суглинок с массовой влажностью 42 %
				Глинистый		Песчаный		
				Талый	Мерзлый	Талый	Мерзлый	
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	0,059	0,87	1,54	1.1	1.3	2.3	3.7	1.5
$C, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	670	837	887	1231	959	1486	1005	1150
$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	206	1750	2200	1700	1700	2000	2000	1960
ε	–	0,8	0,85	–	–	–	–	–

Результаты численного моделирования

Основные результаты численного исследования тепловых потерь теплопроводов в рассматриваемых условиях приведены в таблице 2.

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчета, а также подтверждается проведенной ранее проверкой [11] адекватности предложенного подхода к анализу тепловых режимов теплопроводов. Относительная погрешность расчетов тепловых потерь во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %, что можно считать приемлемым при проведении численных исследований тепловых потерь систем транспортировки тепла.

В таблице 2 приведены величины тепловых потерь теплопровода, тепловая изоляция которого не деформирована Q , деформирована без учета Q_1 и с учетом Q_2 радиационного

Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Тепловые потери подземных канальных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции с учетом радиационного теплообмена в полости канала

теплообмена в полости канала, а также тепловые потери $Q_{\text{рул}}$, рассматриваемого объекта, рассчитанные с использованием действующих правил по проектированию тепловой изоляции трубопроводов [17].

Таблица 2. Результаты расчета тепловых потерь рассматриваемой системы (рис. 1)

Грунт		$Q_{\text{рул}}$, Вт/м	Q , Вт/м	Q_1 , Вт/м	Q_2 , Вт/м	$\frac{Q_{\text{рул}} - Q}{Q_{\text{рул}}} 100\%$	$\frac{Q_1 - Q}{Q_1} 100\%$	$\frac{Q_2 - Q}{Q_2} 100\%$
Глинистый	Талый	117.5	114.7	124.0	146.6	2.4	7.5	21.8
	Мерзлый	122.8	119.5	129.7	152.3	2.7	7.7	21.5
Песчаный	Талый	137.8	132.8	145.9	169.1	3.6	9.0	21.5
	Мерзлый	146.6	140.6	154.1	179.8	4.1	8.8	21.8
Суглинок с массовой влажностью 42 %		127.1	123.2	133.7	156.8	3.1	7.8	21.4

Результаты численного моделирования, приведенные в таблице 2, свидетельствуют о закономерном увеличении тепловых потерь теплопроводов при их прокладке в грунтах, имеющих более высокую теплопроводность (таблица 1). Сопоставление результатов численного анализа тепловых потерь теплопровода с недеформированной тепловой изоляцией Q с тепловыми потерями $Q_{\text{рул}}$, вычисленными по методике [17], позволяет сделать вывод о том, что расхождение между ними (таблица 2) не превышает 4.1 %, что в целом подтверждает адекватность предлагаемой в данной работе математической модели и методики анализа тепловых потерь теплопроводов.

Сопоставление Q с Q_1 (таблица 2) свидетельствует о том, что относительно небольшое изменение геометрических характеристик теплоизоляционной конструкции рассматриваемой системы приводит к увеличению тепловых потерь рассматриваемого теплопровода на 7.5-9.0 %. Учет теплообмена излучением в полости канала теплопровода (таблица 2) для рассматриваемых в данной работе условий позволяет говорить о возрастании тепловых потерь Q_2 до 21.8 % по сравнению с Q .

Поскольку рассматриваемые условия работы теплопроводов являются достаточно распространенными [8], а протяженность тепловых сетей в крупных городах и промышленных центрах составляет десятки [1], а иногда и сотни километров [5], суммарные потери тепла, связанные с деформацией тепловой изоляции, могут достигать существенных значений. Величины тепловых потерь, приведенные в таблице 2, для теплопроводов, эксплуатируемых в условиях достаточно умеренной деформации слоя тепловой изоляции, определенным образом объясняют существующий в настоящее время уровень тепловых потерь в тепловых сетях [1-6, 8, 11, 12].

Анализ температурных полей в зоне прокладки теплопровода и структуры течения воздуха в полости канала свидетельствует о том, что распределение изотермических линий в рассматриваемой области решения качественно согласуется с результатами численного моделирования [11, 12], а наличие деформации тепловой изоляции теплопровода не вносит заметных изменений в структуру течения и поле скоростей воздуха в полости канала [11, 12].

Заключение

Проведен численный анализ влияния деформации слоя тепловой изоляции и наличия теплообмена излучением в полости канала на тепловые режимы и тепловые потери подземных канальных теплопроводов.

Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Тепловые потери подземных канальных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции с учетом радиационного теплообмена в полости канала

Установлено, что в рамках предложенной модели тепловые потери теплопровода в условиях деформации изоляции с учетом радиационного теплообмена в полости канала возрастают на 21.4-21.8 %.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о перспективности применения разработанной модели и методики численного анализа для оценки масштабов тепловых потерь теплопроводов, работающих с деформированной тепловой изоляцией.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ (проект № МК-1284.2011.8).

Литература

1. Слепченко В. С., Петраков Г. П. Повышение энергоэффективности теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей северных и северо-восточных регионов России // Инженерно-строительный журнал. 2011. №4(22). С. 26–32.
2. Кузнецов Л. А., Григорьева Л. А. Определение потерь тепловой энергии через изоляцию трубопроводов теплофикационной воды в результате тепловых испытаний // Новости теплоснабжения. 2006. № 3. С. 51–52.
3. Яковлев Б. В. Предотвращение коррозионной повреждаемости теплосетей канальной прокладки // Новости теплоснабжения. 2009. № 3. С. 39–41.
4. Байбаков С. А., Тимошкин А. С. Основные направления повышения эффективности тепловых сетей // Электрические станции. 2004. № 7. С. 19–25.
5. Kuznetsov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical Simulation of the Thermal State of a Flooded Pipeline Taking into Account Unsteadiness of the Process of Heat Insulation Saturation with Moisture // Thermal Engineering. 2008. Vol. 55. No. 5. Pp. 426-430.
6. Kuznetsov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical analysis of heat losses by main heat pipelines under conditions of complete or partial flooding // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2008. Vol. 81.No. 2. Pp. 323-331.
7. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей. Курган: Интеграл, 2010. 357 с.
8. Шойхет Б. М., Ставрицкая Л. В. Обследование технического состояния и реконструкция тепловой изоляции эксплуатируемых магистральных теплопроводов // Энергосбережение. 2002. № 3. С. 60-62.
9. Luikov A. V. Conjugate convective heat transfer problems // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1974. Vol. 17. Pp. 257-265.
10. Lee J. R., Ha M. Y. A numerical study of natural convection in a horizontal enclosure with a conducting body // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 48. Pp. 3308-3318.
11. 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.
12. Kuznetsov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical Investigation of Thermal Regimes in Twin-Tube-Channel Heat Pipelines Using Conductive-Convective Model of Heat Transfer // Thermal Engineering. 2012. Vol. 59. No. 4. Pp. 310-315.
13. Spiegel E. A., Veronis G. On the Boussinesq approximation for a compressible fluid // Astrophys. J. 1960. Vol. 131. No. 5. Pp. 442-447.
14. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 415 с.
15. Самарский А. А., Гулин А. Н. Численные методы математической физики. М.: Научный мир, 2000. 316 с.
16. Шайдуров В. В. Многосеточные методы конечных элементов. М.: Наука, 1989. 288с.
17. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. М.: Госстрой России, 2001. 42 с.
18. Гува А. Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. 300 с.
19. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник. М.: Энергия, 1974. 472 с.

**Вячеслав Юрьевич Половников, г. Томск, Россия*

Тел. раб.: (3822) 42-08-33; эл. почта: polov@tpu.ru

doi: 10.5862/MCE.28.1

Heat loss of underground channel heat pipelines with strained thermal insulation layer, taking into account radiative heat transfer in the cavity of the channel

G.V. Kuznetsov

Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia

V.Yu. Polovnikov

Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia

(3822) 42-08-33, (3822) 56-36-13, email: polov@tpu.ru

Key words

mathematical modeling; heat pipeline; heat losses; heat insulation

Abstract

The weakest places of centralized heating systems are the pipelines. Heat pipe network systems, built in the USSR, are characterized by low reliability, high damage possibility and large heat losses. The main reasons for the heat losses growth are moisture, deformation and breakage of the thermal insulation layer.

The purpose of this paper is to assess the extent of underground channel pipelines with strained thermal insulation layer heat losses, taking into account radiative heat transfer in the cavity of the channel.

During the work the numerical analysis of thermal insulation layer deformation effect and radiation heat transfer in the cavity of the channel influence on thermal conditions and heat losses of underground channel pipelines was achieved. On the basis of these results the perspective of the developed model and numerical analysis techniques for the extent of pipelines with deformed thermal insulation heat losses evaluation was determined.

References

1. Slepchenok V. S., Petrakov G. P. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 4(22). Pp. 26-32. (rus)
2. Kuznecov L. A., Grigoreva L. A. *Novosti teplosnabjeniya* [Heating news]. 2006. No. 3. Pp. 51-52. (rus)
3. Yakovlev B. V. *Novosti teplosnabjeniya* [Heating news]. 2009. No. 3. Pp. 39-41. (rus)
4. Baibakov S. A., Timoshkin A. S. *Elektricheskie stancii* [Electrical stations]. 2004. No. 7. Pp. 19-25. (rus)
5. Kuznetsov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical Simulation of the Thermal State of a Flooded Pipeline Taking into Account Unsteadiness of the Process of Heat Insulation Saturation with Moisture. *Thermal Engineering*. 2008. Vol. 55. No. 5. Pp. 426-430.
6. Kuznetsov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical analysis of heat losses by main heat pipelines under conditions of complete or partial flooding. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2008. Vol. 81. No. 2. Pp. 323-331.
7. Nikolaev A. A. *Spravochnik proektirovschika. Proektirovanie teplovyh setei* [Directory of the designer. Designing of thermal networks]. Kurgan: Integral, 2010. 357 p. (rus)
8. Shoihet B. M., Stavrickaya L. V. *Energoberezheniye* [Energy saving]. 2002. No. 3. Pp. 60-62. (rus)
9. Luikov A. V. Conjugate convective heat transfer problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1974. Vol. 17. Pp. 257-265.
10. Lee J. R., Ha M. Y. A numerical study of natural convection in a horizontal enclosure with a conducting body. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 48. Pp. 3308-3318.
11. Kuznecov G. V., Polovnikov V. Yu. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [Universities news. Energetics problems]. 2011. No. 5-6. Pp. 12-20. (rus)
12. Kuznetsov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical Investigation of Thermal Regimes in Twin-Tube-Channel Heat Pipelines Using Conductive-Convective Model of Heat Transfer. *Thermal Engineering*. 2012. Vol. 59. No. 4. Pp. 310-315.

Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. Heat loss of underground channel heat pipelines with strained thermal insulation layer, taking into account radiative heat transfer in the cavity of the channel

13. Spiegel E. A., Veronis G. On the Boussines approximation for a compressible fluid. *Astrophysical Journal*. 1960. Vol. 131. No. 5. Pp. 442-447.
14. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of heat transfer theory]. Moscow: Atomizdat, 1979. 415 p. (rus)
15. Samarskii A. A., Gulin A. N. *Chislennye metody matematicheskoi fiziki* [Numerical methods of mathematical physics]. Moscow: Nauchnyi mir, 2000. 316 p. (rus)
16. Shaidurov V. V. *Mnogosetochnye metody konechnyh elementov* [Multigrid finite element methods]. Moscow: Nauka, 1989. 288 p. (rus)
17. SP 41-103-2000. *Proektirovanie teplovoi izolyatsii oborudovaniya i truboprovodov* [Design of thermal insulation of equipment and pipelines]. Moscow: Gosstroj Rossii, 2001. 42 p. (rus)
18. Guva A. Ya. *Kratkii teplofizicheskii spravochnik* [The short thermophysical guide]. Novosibirsk: Sibvuzizdat, 2002. 300 p. (rus)
19. Sheindlin A. E. *Izluchatelnye svoystva tverdyh materialov. Spravochnik* [The radiative properties of solid materials. Handbook]. Moscow: Energiya, 1974. 472 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 2-8.