

УДК 621.643.001:536.2

КОНДУКТИВНО-КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС В ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Половников Вячеслав Юрьевич,
polov@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена тем, что тепловая защита оборудования и трубопроводов играет важную роль при проведении энергосберегающих мероприятий на объектах различного назначения, а рост уровня потерь теплоты или холода при транспортировке энергоносителей является причиной создания новых подходов к энергосберегающим мероприятиям при выполнении теплоизоляционных работ. Известно, что основным методом снижения потерь тепловой энергии при ее транспортировке и хранении является применение высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Таким материалом является тонкопленочная тепловая изоляция. Уникальные теплофизические характеристики тонкопленочных теплоизоляционных покрытий позволяют использовать их в различных энергетических системах и оборудовании. Несмотря на это технологии применения тонкопленочных теплоизоляционных покрытий к настоящему моменту времени не получили развития. Это объясняется рядом причин, основными из которых являются: недостаток знаний о физических свойствах и механизмах процессов тепломассопереноса в тонкопленочных теплоизоляционных покрытиях.

Цель: исследование кондуктивно-конвективного теплопереноса в слое тонкопленочных теплоизоляционных покрытий с учетом разнородности свойств микросфер и связующих веществ.

Объект: цилиндрический слой тонкопленочных теплоизоляционных покрытий. На внутренней и внешней поверхностях тонкопленочных теплоизоляционных покрытий поддерживаются постоянные температуры. Геометрия тонкопленочных теплоизоляционных покрытий представляла собой связующее вещество и полые микросферы. Исследования проводились для слоя тонкопленочных теплоизоляционных покрытий толщиной 0,33 мм. Температуры на внутренней и внешней поверхностях тонкопленочных теплоизоляционных покрытий принимались в соответствии с экспериментальными данными. Предполагалось, что слой тонкопленочных теплоизоляционных покрытий на 62 % состоит из микросфер диаметром 50 мкм и на 38 % из связующего вещества. Рассматривались два типа полых микросфер с толщинами стенок 5 и 2 мкм.

Методы. Решение поставленной задачи получено методом конечных элементов. Использовалась аппроксимация Галеркина, неравномерная конечно-элементная сетка. Параметры элементов сетки выбирались из условий сходимости решения. Увеличение числа элементов расчетной сетки проводилось с использованием метода Делоне.

Результаты. Выявлено влияние на тепловые потери вида связующего вещества и характеристик микросфер, толщины стенки микросферы и газовой фазы, содержащейся в полости микросферы. Для рассматриваемого случая отклонение от экспериментальных данных составило до 90 % в зависимости от состава тонкопленочных теплоизоляционных покрытий. Анализ результатов численного моделирования теплопереноса в слое тонкопленочных теплоизоляционных покрытий для кондуктивно-конвективной и кондуктивной моделей показал, что расхождение между ними не превышает 3 % и объясняется погрешностями численных расчетов. По этой причине в практических расчетах можно использовать более простую кондуктивную модель теплопереноса.

Ключевые слова:

Тонкопленочная тепловая изоляция, энергосбережение, теплоснабжение, транспортировка и хранение энергии, моделирование.

Введение

Тепловая защита оборудования и трубопроводов играет важную роль при проведении энергосберегающих мероприятий на объектах различного назначения [1–4]. Рост уровня потерь теплоты или холода при транспортировке энергоносителей является причиной создания новых подходов к энергосберегающим мероприятиям при выполнении теплоизоляционных работ. Основным методом снижения потерь тепловой энергии при ее транспортировке и хранении является применение высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Одними из таких материалов являются жидкокерамические материалы или тонкопленочные теплоизоляционные покрытия (ТПП) [5, 6].

Исследованиям теплопереноса в слое ТПП и эффективности их применения посвящено достаточное количество работ [5–20]. В них рассматриваются технология использования теплозащитных светопогос-

яющих ТПП [7–11], кондуктивный теплоперенос в слое ТПП [6, 12, 13], а также различные практические приложения [14–20], в которых учитывается влияние условий эксплуатации ТПП на уровень тепловых потерь оборудования и трубопроводов.

Исследования [6] показали, что наиболее вероятный состав ТПП включает в себя полые микросферы и многокомпонентное связующее вещество. Теплоперенос в газонаполненных полостях микросфер может осуществляться за счет теплопроводности и конвекции (радиационный теплообмен мало вероятен, поскольку разности температур в слое ТПП не превышают нескольких градусов [6]). По этой причине необходимым является исследование сопряженного кондуктивно-конвективного теплопереноса в рассматриваемой системе.

Целью работы является исследование сопряженного кондуктивно-конвективного теплопереноса в слое ТПП с учетом разнородности свойств микросфер и связующих веществ.

Постановка задачи

Рассматривается слой ТТП, состоящего из полых микросфер и связующего вещества. Предполагается, что на внутренней и внешней поверхностях изоляционного слоя поддерживаются постоянные температуры. На рис. 1 схематично представлена область, для которой была решена задача, учитывающая сопряженный теплоперенос в системе «полые микросферы – связующее вещество». Использование подхода такого рода к решаемой задаче обосновано в [21], поскольку из анализа размерных эффектов в проблемах переноса теплоты [22] известно, что нижней границей применения уравнений Навье–Стокса и законов теплопереноса Фурье и Ньютона–Рихмана является размер не менее 100 нм.

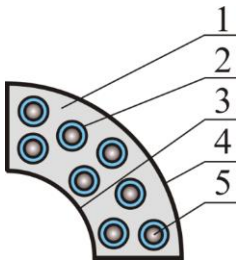


Рис. 1. Область решения задачи: 1 – связующее вещество; 2 – стенка микросферы; 3 – внутренняя поверхность изоляции; 4 – внешняя поверхность изоляции; 5 – полость микросферы

Fig. 1. Scheme of solution area: 1 – binder; 2 – surface of microspheres; 3 – inner surface of insulation; 4 – outer surface of insulation; 5 – microsphere cavity

Основные допущения, при которых решена задача, состоят в следующем:

1. Теплофизические свойства являются известными и постоянными величинами [23].
2. Газ в микросферах является несжимаемой средой [24].
3. Микросферы являются унифицированными по размеру и в слое изоляции располагаются упорядоченно.
4. На границах соприкосновения между микросферами и связующим веществом выполняются условия идеального теплового контакта.
5. Не учитывается теплообмен излучением и фазовые переходы в полостях микросфер и на внешней поверхности ТТП.
6. На внутренней и внешней поверхностях ТТП выставляются граничные условия первого рода.
7. Скорость газа на внутренней поверхности стенок микросфер равна нулю.

Математическая модель

С учетом вышеописанных допущений математическая постановка задачи в обобщенном виде будет описываться:

в полостях микросфер уравнениями энергии, движения и неразрывности

$$C_{i,5}\rho_{i,5}(\vec{w}_{i,5}, \nabla T_{i,5}) = \lambda_{i,5} \nabla^2 T_{i,5}, i = 1-n, \quad (1)$$

$$(\vec{w}_{i,5}, \nabla) \vec{w}_{i,5} = -\frac{1}{\rho_{i,5}} \nabla p_{i,5} + \nu_{i,5} \nabla^2 \vec{w}_{i,5} + \vec{F}, i = 1-n, \quad (2)$$

$$\nabla \vec{w}_{i,5} = 0, i = 1-n; \quad (3)$$

в связующем веществе и стенках микросфер уравнениями теплопроводности

$$\nabla^2 T_1 = 0, \quad (4)$$

$$\nabla^2 T_{i,2} = 0, i = 1-n. \quad (5)$$

На внутренней и внешней поверхностях ТТП (рис. 1) значения температур считались постоянными:

$$T_{ins,3} = T_{in} = \text{const}, \quad (6)$$

$$T_{ins,4} = T_{ex} = \text{const}. \quad (7)$$

В местах соприкосновения между микросферами и связующим веществом выставлялись граничные условия четвертого рода:

$$\lambda_1 \text{grad}(T_1) = \lambda_2 \text{grad}(T_{i,2}), T_1 = T_{i,2}, i = 1-n. \quad (8)$$

Для стенок микросфер выполнялись условия симметрии:

$$\text{grad}(T_{i,2}) = 0, i = 1-n. \quad (9)$$

На внутренней поверхности стенок микросфер скорость движения газовой фазы равна нулю:

$$w_{i,5} = 0, i = 1-n. \quad (10)$$

Массовые силы в уравнении (2) вычислялись из следующих соотношений:

$$F_x = 0; \quad (11)$$

$$F_y = G\beta_{i,5}(T_4 - T_3), i = 1-n. \quad (12)$$

Обозначения: C – теплоемкость; F – массовые силы; G – ускорение силы тяжести; T – температура; p – давление; w – скорость; β – коэффициент температурного расширения; λ – коэффициент теплопроводности; ν – кинематическая вязкость; ρ – плотность.

Индексы: 1–5 – в соответствии с рис. 1; ex – внешний; ins – изоляция; in – внутренний, n – количество микросфер, шт.

Метод решения и исходные данные

Задача (1)–(12) решена методом конечных элементов [25] с использованием неравномерной конечно-элементной сетки.

Численное моделирование проводилось для слоя теплоизоляции толщиной 0,33 мм. Температуры на внутренней и внешней поверхностях изоляции принимались в соответствии с экспериментальными данными (табл. 1). Предполагалось, что слой ТТП на 62 % состоит из микросфер диаметром 50 мкм и на 38 % из связующего вещества. Рассматривались два типа полых микросфер с толщинами стенок 5 и 2 мкм. Микросферы по толщине ТТП располагались упорядоченно с «коридорным» вариантом размещения. Исследования проводились при значениях теплофизических характеристик рассматриваемой системы (рис. 1), описанных в [6, 23, 26].

В табл. 1 приведены результаты экспериментального определения тепловых потерь [6] (T_3 , T_4 , К – температуры внутренней и наружной поверхностей, Q , Вт/м – линейные тепловые потери).

Таблица 1. Результаты экспериментального определения тепловых потерь [6]

Table 1. Results of experimental determination of heat loss [6]

T_3 , К	359,49	339,59	319,77
T_4 , К	363,15	343,15	323,15
Q , Вт/м, W/m	27,09	25,84	24,20

Результаты численного моделирования

В табл. 2 приведены величины тепловых потерь теплопровода, имеющего слой ТТП, в зависимости от состава материала, вычисленные в соответствии исходными экспериментальными данными (табл. 1), для

кондуктивно-конвективной Q_1 и кондуктивной Q_2 [6] моделей.

Результаты численного моделирования, приведенные в табл. 2, позволяют сделать вывод о существенном влиянии состава ТТП на тепловые потери теплопровода.

Сопоставление результатов численного моделирования тепловых потерь теплопровода, изолированного ТТП, с результатами экспериментальных исследований свидетельствует об их существенном расхождении (до 90 %) в зависимости от состава ТТП.

Анализ результатов численного моделирования позволяет сделать вывод о том, что для практических расчетов можно использовать более простую кондуктивную модель [6], поскольку расхождение между расчетными значениями тепловых потоков для кондуктивно-конвективной и кондуктивной [6] моделей не превышает 3 %.

Таблица 2. Результаты численного моделирования теплопереноса в слое ТТП при $T_4=319,77$ К, $T_3=323,15$ К

Table 2. Results of numerical simulation of heat transfer in the layer of thin-film thermal insulation at $T_4=319,77$ К, $T_3=323,15$ К

Состав тонкопленочного теплоизоляционного покрытия Composition of the thin-film insulation coating				Q_1	Q_2 [6]	$\frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} 100\%$	$\frac{Q - Q_2}{Q} 100\%$
				Вт/м/W/m			
Толщина стенки микросферы (мкм) Microsphere wall thickness (microns)	5	Воздух Air	Трехкомпонентное связующее Three-component binder	47,45	48,03	1,21	49,59
			Однокомпонентное связующее Single component binder	123,40	120,00	−2,83	79,84
		CO ₂ +N ₂	Трехкомпонентное связующее Three-component binder	52,33	51,99	−0,65	49,66
			Однокомпонентное связующее Single component binder	116,37	119,20	2,37	79,7
	2	Воздух Air	Трехкомпонентное связующее Three-component binder	28,31	28,12	−0,66	13,57
			Однокомпонентное связующее Single component binder	73,69	75,20	2,01	67,8
		CO ₂ +N ₂	Трехкомпонентное связующее Three-component binder	30,18	30,56	1,25	20,81
			Однокомпонентное связующее Single component binder	75,32	74,08	−1,67	67,34

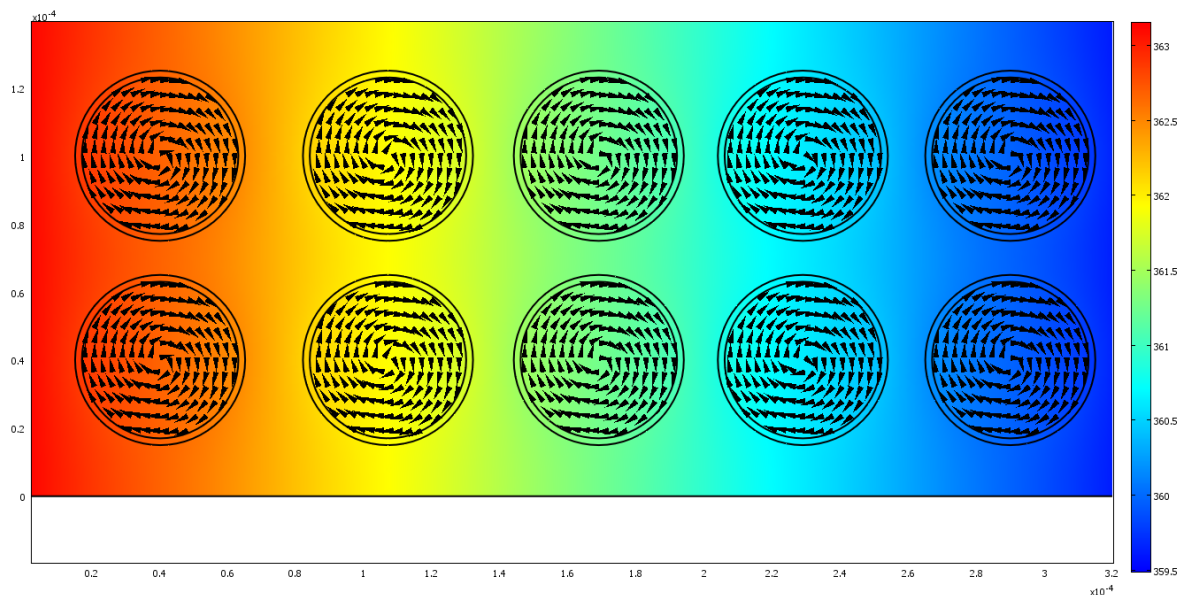


Рис. 2. Типичные поля скоростей в полостях микросфер ТТП и распределение температур в слое ТТП

Fig. 2. Typical velocity fields in the cavities of the microspheres of a thin-film thermal insulation coating and temperature field in the thin film insulation layer

На рис. 2 в качестве примера представлены фрагменты типичных полей температур и скорости в рассматриваемой области решения для случая, когда: $T_4=359,49$ К, $T_3=363,15$ К, связующее вещество – трехкомпонентное, материал стенок микросфер – стекло С38-1, толщина стенки 2 мкм, полости микросфер заполнены воздухом.

Из рис. 2 видно, что в полостях микросфер ТТП теплообмен осуществляется в условиях естественной конвекции в замкнутом пространстве [24]. Структура движения газовой среды в полостях микросфер тонкопленочного теплоизоляционного покрытия представляет собой замкнутые циркуляционные течения (максимальная скорость не превышает $7 \cdot 10^{-4}$ м/с). Здесь необходимо отметить, что для рассматриваемой задачи значения чисел Грасгоффа составляют не более $5 \cdot 10^{-7}$. Это обстоятельство подтверждает возможность [24] использования более простой кондуктивной модели [6] при исследовании теплопереноса в ТТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optimization modeling for smart operation of multi-source district heating with distributed variable-speed pumps / H. Wang, H. Wang, Zh. Haijian, T. Zhu // *Energy*. – 2017. – V. 138. – P. 1247–1262.
2. Половников В.Ю. Тепловые режимы и тепловые потери подземных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 124–131.
3. Thermal transient prediction of district heating pipeline: Optimal selection of the time and spatial steps for fast and accurate calculation / Y. Wang, S. Youa, H. Zhanga, X. Zhenga, W. Zhenga, Q. Miao, G. Luc // *Applied Energy*. – 2017. – V. 206. – P. 900–910.
4. Селиванова З.М., Павлов В.И. Интеллектуальная информационно-измерительная система теплофизических свойств теплоизоляционных покрытий магистральных трубопроводов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 145–154.
5. Choice and optimization of ratio of components to develop fast-mounted thermostable heat-insulating constructions / N.A. Loginova, S.V. Grigorev, E.E. Lapin, S.I. Pogorelov, A.V. Ryzhenkov // *Thermal Engineering*. – 2016. – V. 63 (5). – P. 355–359.
6. Половников В.Ю. Кондуктивный теплоперенос в слое тонкопленочной тепловой изоляции // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 189–197.
7. Chou H.M., Chen C.R., Wu T.N. New transparent thin films for thermal insulation // *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers. Transactions of the Chinese Institute of Engineers. Series C*. – 2015. – V. 36 (1). – P. 85–90.
8. The evaluation of energy saving using ultrathin heat insulation in railway electrification substation / H. Kim, J. Jang, S. Shin, Y. Park, S. Kim, H.R. Kim, B. Hyun, J. Kim // *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*. – 2015. – V. 64 (1). – P. 171–175.
9. Qi Y., Yin X., Zhang J. Transparent and heat-insulation plasticized polyvinyl chloride (PVC) thin film with solar spectrally selective property // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2016. – V. 151. – P. 30–35.
10. Patankar S.N., Kranov Y.A. Hollow glass microsphere HDPE composites for low energy sustainability // *Materials Science and Engineering*. – 2010. – V. 527. – P. 1361–1366.
11. Effect of hollow glass microsphere thin film on heat-insulation performance of building envelope / H. Wang, H.J. Fang, Q.D. Lan, S. He, C. Jiang // *Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University*. – 2014. – V. 48 (9). – P. 1341–1345.

Информация об авторах

Половников В.Ю., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Распределения температур, приведенные на рис. 2, демонстрируют деформацию температурного поля, вызванную разнородностью теплофизических характеристик ТТП, что соответствует представлениям о процессах теплопереноса.

Заключение

Проведено исследование кондуктивно-конвективного теплопереноса в слое ТТП с учетом разнородности свойств микросфер и связующих веществ.

Анализ результатов численного моделирования теплопереноса в слое тонкопленочных теплоизоляционных покрытий для кондуктивно-конвективной и кондуктивной [6] моделей показал, что расхождение между ними не превышает 3 % и объясняется погрешностями численных расчетов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-48-700008-р_а.

12. Thermal conductivity of powder silica hollow spheres / Y. Liao, X. Wua, H. Liua, Y. Chen // *Thermochimica Acta*. – 2011. – V. 526. – P. 178–184.
13. Numerical analyses of the thermal conductivity of random hollow sphere structures / T. Fiedler, R. Löffler, T. Bernthaler, R. Winkler, I.V. Belova, G.E. Murch, A. Öchsner // *Materials Letters*. – 2009. – V. 63. – № 13–14. – P. 1125–1127.
14. Evaluation of the thermal efficiency of a high-temperature heat-insulation structure based on honeycomb plastic / A.V. Ryzhenkov, E.E. Lapin, N.A. Loginova, D.R. Sitdikov, S.V. Grigorev // *Thermal Engineering*. – 2016. – V. 63 (6). – P. 445–448.
15. Investigation of heat capacity of syntactic foam based on silicone and organic matrix / E.V. Belyaeva, N.A. Loginova, E.E. Lapin, S.I. Pogorelov, A.V. Ryzhenkov // *Oil Industry*. – 2016. – № 11. – P. 116–119.
16. Study of the influence of the modification of glass microspheres on the properties of syntactic foams based on oligomethylsiloxane / V.S. Osipchik, N.V. Kostromina, Y. Olikhova, V.N. Ivashkina, E.V. Belyaeva, N.A. Loginova, A.V. Ryzhenkov, E.E. Lapin // *International Polymer Science and Technology*. – 2016. – V. 43 (7). – P. 133–137.
17. Study of relations components for making flexible polymer insulation with optimum thermal and mechanical characteristics / S.V. Levitin, E.V. Belyaeva, N.A. Loginova, E.E. Lapin, A.V. Ryzhenkov // *Oil Industry*. – 2015. – № 9. – P. 130–133.
18. Review of binding agents in syntactic foams for heat-insulating structures in power industry Facilities / A.V. Ryzhenkov, N.A. Loginova, E.V. Belyaeva, Y.Y. Lapin, A.F. Prischepov // *Modern Applied Science*. – 2015. – V. 9. – № 4. – P. 96–105.
19. Application of nanocomposite coatings to protect power equipment from droplet impingement erosion / V.N. Varavka, O.V. Kudryakov, A.V. Ryzhenkov, G.V. Kachalin, O.S. Zilova // *Thermal Engineering*. – 2014. – V. 61. – № 11. – P. 797–803.
20. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Integrated indentation tests of metal-ceramic nanocomposite coatings // *Inorganic Materials*. – 2015. – V. 51. – № 15. – P. 1508–1514.
21. Zhang Z. Nano/microscale heat transfer. – New York: McGraw-Hill, 2007. – 479 c.
22. Flik M., Choi B., Goodson K. Heat transfer regimes in microstructures // *Journal Heat Transfer*. – 1992. – V. 114. – P. 667–674.
23. Bynum R.T. Insulation handbook. – New York: McGraw-Hill, 2001. – 494 c.
24. Bejan A. Convection heat transfer. – New York: Wiley, 2004. – 696 c.
25. Garcia A.L. Numerical methods for physics. – San Jose CA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. – 432 c.

Поступила 04.06.2019 г.

CONDUCTIVE-CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN THIN-FILM THERMAL INSULATION

Viacheslav Yu. Polovnikov,
polov@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the study is explained by the fact that thermal protection of equipment and pipelines is important when implementing energy-saving measures at energy facilities for various purposes. The increase in heat or cold losses during transportation of energy carriers is the reason for development of new approaches to energy-saving measures when performing thermal insulation actions. The main method of reducing heat energy losses during its transportation and storage is the use of highly efficient thermal insulation materials. This material is thin-film thermal insulation. The unique thermal characteristics of thin-film thermal insulation coatings are the reason for their use in various energy systems and equipment. Despite this, the technology of using thin-film insulating coatings has not been developed. This is due to the following reasons: lack of knowledge about the physical properties and mechanisms of heat and mass transfer in thin-film thermal insulation coatings.

The main aim of the research is to study the conductive-convective heat transfer in the layer of thin-film thermal insulation taking into account the heterogeneity of the properties of the microspheres and binders.

The object of the research is a cylindrical layer of thin-film insulating coating. The temperature is constant on the inner and outer surfaces of the thermal insulation coating. The geometry of the thin-film thermal insulation coating was a binder and hollow microspheres. Scientific research was carried out for a layer of insulation thickness of 0.33 mm. The temperatures on the inner and outer surfaces of the insulation were taken in accordance with the experimental data. The layer of thin-film thermal insulation for 62 % consists of microspheres with a diameter of 50 microns and for 38 % from binder. Two types of hollow microspheres with wall thicknesses (5 and 2 μm) were considered.

Methods. The solution of the problems posed is obtained by the finite element method. Galerkin approximation, non-uniform finite element mesh was used. The parameters of the grid elements were chosen from the conditions of convergence of the solution. An increase in the number of elements of the computational grid was carried out using the Delaunay method.

Results. The author has investigated the effect of the type of binder and the characteristics of the microspheres, the wall thickness of the microsphere and the gas phase contained in the cavity of the microsphere on heat loss. For the case under consideration, the deviation from the experimental data was up to 90 %, depending on the composition of the thin-film thermal insulation coating. Comparison of the results of numerical simulation of heat transfer in a layer of thin-film thermal insulation, performed using a conductive-convective heat transfer model with the results for a conductive model showed a discrepancy between them does not exceed 3 %. This is due to the errors in numerical calculations. For this reason, a simpler conductive model of heat transfer can be used in practical calculations.

Key words:

Thin-film thermal insulation, energy saving, heat supply, transportation and storage of energy, modeling.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 18-48-700008-p_a.

REFERENCES

- Wang H., Wang H., Haijian Zh., Zhu T. Optimization modeling for smart operation of multi-source district heating with distributed variable-speed pumps. *Energy*, 2017, vol. 138, pp. 1247–1262.
- Polovnikov V.Y. Thermal regimes and thermal losses of underground pipelines in real heat exchange on the outer interaction boundary. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 124–131. In Rus.
- Wanga Y., Youa S., Zhanga H., Zhenga X., Zhenga W., Miaoa Q., Luc G. Thermal transient prediction of district heating pipeline: Optimal selection of the time and spatial steps for fast and accurate calculation. *Applied Energy*, 2017, vol. 206, pp. 900–910.
- Selivanova Z.M., Pavlov V.I. Intelligent information-measuring system of thermophysical properties of thermal insulation coatings of trunk pipelines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 145–154. In Rus.
- Loginova N.A., Grigorev S.V., Lapin E.E., Pogorelov S.I., Ryzhenkov A.V. Choice and optimization of ratio of components to develop fast-mounted thermostable heat-insulating constructions. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63 (5), pp. 355–359.
- Polovnikov V.Yu. Conductive heat transfer in layer of thin-film thermal insulation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 189–197. In Rus.
- Chou H.M., Chen C.R., Wu T.N. New transparent thin films for thermal insulation. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers. Transactions of the Chinese Institute of Engineers. Series C*, 2015, vol. 36 (1), pp. 85–90.
- Kim H., Jang J., Shin S., Park Y., Kim S., Kim H.R., Hyun B., Kim J. The evaluation of energy saving using ultrathin heat insulation in railway electrification substation. *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2015, vol. 64 (1), pp. 171–175.
- Qi Y., Yin X., Zhang J. Transparent and heat-insulation plasticized polyvinyl chloride (PVC) thin film with solar spectrally selective property. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, vol. 151, pp. 30–35.
- Patankar S.N., Kranov Y.A. Hollow glass microsphere HDPE composites for low energy sustainability. *Materials Science and Engineering*, 2010, vol. 527, pp. 1361–1366.
- Wang H., Fang H.J., Lan Q.D., He S., Jiang C. Effect of hollow glass microsphere thin film on heat-insulation performance of building envelope. *Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2014, vol. 48 (9), pp. 1341–1345.
- Liao Y., Wua X., Liua H., Chen Y. Thermal conductivity of powder silica hollow spheres. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 526, pp. 178–184.
- Fiedler T., Löffler R., Bernthaler T., Winkler R., Belova I.V., Murch G.E., Öchsner A. Numerical analyses of the thermal conductivity of random hollow sphere structures. *Materials Letters*, 2009, vol. 63 (13–14), pp. 1125–1127.
- Ryzhenkov A.V., Lapin E.E., Loginova N.A., Sitdikov D.R., Grigorev S.V. Evaluation of the thermal efficiency of a high-temperature heat-insulation structure based on honeycomb plastic. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63 (6), pp. 445–448.

15. Belyaeva E.V., Loginova N.A., Lapin E.E., Pogorelov S.I., Ryzhenkov A.V. Investigation of heat capacity of syntactic foam based on silicone and organic matrix. *Oil Industry*, 2016, no. 11, pp. 116–119.
16. Osipchik V.S., Kostromina N.V., Olikhova Y., Ivashkina V.N., Belyaeva E.V., Loginova N.A., Ryzhenkov A.V., Lapin E.E. Study of the influence of the modification of glass microspheres on the properties of syntactic foams based on oligomethylsiloxane. *International Polymer Science and Technology*, 2016, vol. 43 (7), pp. 133–137.
17. Levitin S.V., Belyaeva E.V., Loginova N.A., Lapin E.E., Ryzhenkov A.V. Study of relations components for making flexible polymer insulation with optimum thermal and mechanical characteristics. *Oil Industry*, 2015, no. 9, pp. 130–133.
18. Ryzhenkov A.V., Loginova N.A., Belyaeva E.V., Lapin Y.Y., Prischepov A.F. Review of binding agents in syntactic foams for heat-insulating structures in power industry Facilities. *Modern Applied Science*, 2015, vol. 9, no. 4, pp. 96–105.
19. Varavka V.N., Kudryakov O.V., Ryzhenkov A.V., Kachalin G.V., Zilova O.S. Application of nanocomposite coatings to protect power equipment from droplet impingement erosion. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61 (11), pp. 797–803.
20. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Integrated indentation tests of metal-ceramic nanocomposite coatings. *Inorganic Materials*, 2015, vol. 51, no. 15, pp. 1508–1514.
21. Zhang Z. *Nano/microscale heat transfer*. New York, McGraw-Hill, 2007. 479 p.
22. Flik M., Choi B., Goodson K. Heat transfer regimes in microstructures. *Journal Heat Transfer*, 1992, vol. 114, pp. 667–674.
23. Bynum R.T. *Insulation handbook*. New York, McGraw-Hill, 2001. 494 p.
24. Bejan A. *Convection heat transfer*. New York, Wiley, 2004. 696 p.
25. Garcia A.L. *Numerical methods for physics*. San Jose CA, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. 432 p.

Received: 4 June 2019.

Information about the authors

Viacheslav Yu. Polovnikov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.