



ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИТНОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С МИКРОГРАНУЛАМИ

С.А. Соловьев, О.В. Соловьева, И.Г. Ахметова, Ю.В. Ваньков, Р.З. Шакурова

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
solovev.sa@kgeu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемы, возникающие при создании композитного теплоизоляционного материала, включающего слой микросферических гранул. Провести численное моделирование композитного материала с различным объемным содержанием микросфер и различными вариантами образования пустот. Оценить влияние наличия зон, не занятых микрогранулами, на изоляционные свойства композитного материала. Определить влияние объемного содержания микросферических гранул на тепловой поток через композитный материал. *МЕТОДЫ.* Численное моделирование проводилось путем создания моделей элементарных кубических ячеек композита с упаковкой из 27 микросфер в программном комплексе ANSYS Fluent 19.2. Оценка изоляционных свойств проводилась путем измерения коэффициента теплопроводности. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье исследовано влияние наличия зон, не занятых микросферическими гранулами, на теплоизоляционные свойства композитного материала. Построены модели элементарных кубических ячеек с различным объемным содержанием микрогранул. Построены модели элементарных ячеек с различными вариантами образования пустот, такими как удаление вертикального или горизонтального ряда гранул и уплотнение гранул по вертикали или горизонтали. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Удаление микрогранул оказывает значительное влияние на изоляционные свойства композита. Наименьший коэффициент теплопроводности получен для простой кубической ячейки при объемном содержании микрогранул $\phi = 40\%$. Наличие пустот в материале способствует большим тепловым потерям, причем в случае вертикального сквозного канала тепловые потери больше, чем для горизонтального сквозного канала. В случае уплотнения сфер тепловые потери в зоне, не занятой микрогранулами, компенсируются уменьшением теплового потока в области с уплотнением сфер.

Ключевые слова: теплоизоляция; композитный материал; сферические микрогранулы; теплопроводность; численное моделирование.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2021-175/3 от 30.09.2021 г.

Для цитирования: Соловьев С.А., Соловьева О.В., Ахметова И.Г., Ваньков Ю.В., Шакурова Р.З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 86-98. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-86-98.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF A COMPOSITE HEAT-INSULATING MATERIAL WITH MICROGRANULES

SA Solovev, OV Soloveva, IG Akhmetova, YV Vankov, RZ Shakurova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
solovev.sa@kgeu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To consider the problems that arise when creating a composite heat-insulating material, including a layer of microspherical granules. Numerical modeling of a

composite material with different volume content of microspheres and different options for the formation of voids. Determination of the influence of the presence of zones not occupied by microgranules on the insulating properties of the composite material. Determination of the influence of the volume content of microspherical granules on the heat flux through the composite material. **METHODS.** Numerical simulation was carried out by creating models of elementary cubic cells of a composite with a package of 27 microspheres in the ANSYS Fluent 19.2 software package. The evaluation of the insulating properties was carried out by measuring the thermal conductivity coefficient. **RESULTS.** The article investigates the influence of the presence of zones not occupied by microspherical granules on the thermal insulation properties of a composite material. Models of elementary cubic cells with different volume content of microgranules are constructed. Models of elementary cells are built with various options for the formation of voids, such as the removal of a vertical or horizontal row of granules and the compaction of granules vertically or horizontally. **CONCLUSION.** The removal of microgranules has a significant effect on the insulating properties of the composite. The lowest thermal conductivity coefficient was obtained for a simple cubic cell with a volume content of microgranules $\varphi = 40\%$. The presence of voids in the material contributes to large heat losses, and in the case of a vertical through channel, the heat losses are greater than for a horizontal through channel. In the case of densification of spheres, heat losses in the zone not occupied by microgranules are compensated by a decrease in the heat flux in the area with densification of spheres.

Keywords: thermal insulation; composite material; spherical microgranules; thermal conductivity; numerical simulation.

Acknowledgments: This research was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment № 075-03-2021-175/3 from 30.09.2021.

For citation: Solovev SA, Soloveva OV, Akhmetova IG, Vankov YV, Shakurova RZ. Numerical investigation of the thermal conductivity of a composite heat-insulating material with microgranules. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1): 86-98. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-86-98.

Введение

Согласно федеральному закону Российской Федерации № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...», необходимо снижать потребление топливно-энергетических ресурсов и стремиться к рациональному использованию тепловой и электрической энергии. Одним из направлений в энергосбережении является снижение тепловых потерь зданий и сооружений, а также при производстве, транспортировке и потреблении тепловой энергии [1, 2]. Для этих целей применяются различные теплоизоляционные материалы: минеральная вата, стекловата, пенополиуретан, пенополистерол и т.д. Несмотря на широкую распространенность, данные материалы обладают рядом недостатков. Минеральная вата гигроскопична и теряет свои изоляционные свойства при контакте с влагой. Стекловолокно не выдерживает механических нагрузок. Пенополиуретан и пенополистерол являются пожароопасными веществами, выделяющими при горении токсичные вещества. По этой причине в настоящее время в энергетике уделяется внимание замене традиционных изоляционных материалов на более современные материалы, обладающие не только низкой теплопроводностью, но также высокой химической и коррозионной стойкостью, высокой удельной прочностью и легким весом. Ярким представителем класса современных теплоизоляционных материалов являются матричные композиты, армированные микрогранулами. В качестве матрицы применяются различные полимеры, в качестве микрогранул применяют шарики из пенополистерола, стеклянные микросферы, термопластичные микросферы или ценосферы.

В качестве наполнителя в синтаксических пенах и композитных теплоизоляционных материалах нередко применяют ценосферы – алюмосиликатные полые шарики, которые образуются в составе золы-уноса при высокотемпературном факельном сжигании угля. Ценосферы имеют диаметр в среднем 100 мкм, толщина стенки от 2 до 10 мкм, обладают низкой теплопроводностью и высокой температурой

плавления (1400-1500 °С), ввиду чего этот материал получил широкое распространение в качестве изоляционного материала в строительстве и промышленности. Кроме того, высокая температура плавления позволяет применять этот материал также для создания огнеупорных конструкций. Таким образом, ценосферы – естественный побочный продукт процесса горения угля на тепловых электростанциях, обладающий теми же свойствами, что и полые стеклянные сферы. Свойства ценосфер позволяют совмещать их с матричными полимерными материалами, полиэфирами или эпоксидными смолами, получая эффективный теплоизоляционный композит.

В статье [3] исследовали тепловые и механические свойства легкого бетона, содержащего ценосферы, экспериментально доказав, что включение ценосфер летучей золы приводит к значительному снижению теплопроводности бетона, а также препятствует распространению микротрещин благодаря прочной оболочке и малому размеру частиц. В следующей работе [4] разработали высокотемпературную пену из глинистой суспензии с добавлением ценосфер различных размеров (от 100 до 600 мкм), и исследовали её термические свойства методом нестационарного плоского источника. Как и в случае с бетоном, ценосферы показали отличные теплоизолирующие свойства.

Благодаря более высокой прочности на сжатие в сравнении с ценосферами наибольшее распространение получили полые стеклянные микросферы (*hollow glass microsphere* – HGM). Полые стеклянные микросферы благодаря своим уникальным свойствам: легкий вес, низкая теплопроводность, высокая прочность на сжатие и химическая инертность, нашли широкое применение в энергетике, строительстве, транспорте, пищевой и космической промышленности. Полые сферы широко применяются в качестве наполнителей в синтаксических пенах. Включение HGM в соответствующий матричный материал (эпоксидная смола, цемент, полипропилен и т.д.) позволяет получить легкий композит с относительно низким коэффициентом теплопроводности.

Для всестороннего понимания механизма теплопередачи в композитах с HGM необходимо проводить численные и экспериментальные исследования влияния их физических параметров на эффективную теплопроводность. Для моделирования теплопроводности синтаксических пен необходимо учесть их трехфазную структуру: матрица, оболочка полый частицы и газ внутри частицы. При этом теплопроводность синтаксической пены зависит от четырех параметров: тип матричного материала, тип материала стенки полый частицы, отношение толщины стенки к радиусу частицы и объемная доля частиц [5]. Кроме того, необходимо учитывать, что полые сферы могут иметь различное распределение по размеру и толщине стенки, даже частицы одного размера могут иметь разные толщины стенок [6], что также сказывается на их теплопроводящих свойствах. Большая часть теплового потока в синтаксической пене проходит в обход газового ядра внутри полый частицы. Это объясняется тем, что теплопроводность газовой области на два порядка ниже, чем у твердой стенки, и как следствие, пути теплопередачи становятся длиннее, время теплопередачи увеличивается, а эффективность теплопередачи значительно снижается.

Тепловые и механические свойства матричных композитов широко исследованы путем численного моделирования и экспериментальных исследований [7-10]. Изучалось влияние таких параметров как объемная доля частиц, размер частиц и их распределение на теплопроводность композита. В работе [8] авторы предложили многослойную изоляцию переменной плотности с HGM и сравнили её характеристики с существующими на данный момент теплоизоляционными материалами. Результаты экспериментальных исследований показали, что предложенная многослойная изоляция переменной плотности, армированная полыми стеклянными микросферами, позволяет уменьшить количество слоев изоляции, а значит и её вес при одновременном снижении теплопроводности. В статье [11] авторы представили модель на основе элементарной ячейки, содержащей одну единственную частицу. Однако такой подход показывает большие расхождения с экспериментальными данными при высоких объемных долях частиц. В работе [12] авторы предложили модель для прогнозирования теплопроводности теплоизоляционных композитов с HGM, в которой микросфера заменяется на эквивалентный наполнитель с известной теплопроводностью, а теплопроводность композита определяется с использованием модели Эшелби. Результаты моделирования показали, что на теплопроводность композита значительно влияют теплопроводности оболочки микросферы и матрицы. В статье [13] авторы представили модель трехмерной кубической элементарной ячейки со случайным расположением HGM в матрице и провели численный анализ теплопроводности композитной ячейки. Распределение

теплового потока в композите оказалось неравномерным, при этом в *HGM* плотность теплового потока резко падает, что указывает на высокое термическое сопротивление полых стеклянных сфер [14]. Результаты экспериментов показали, что 20% массового содержания *HGM* в композите позволяет снизить теплопроводность композита на 47,4% по сравнению с чистой матрицей.

Влияние микроструктуры композита на его эффективную теплопроводность очень существенно. В работе [15] авторы провели численные исследования эффективной теплопроводности пены с полыми сферами методом конечных элементов. На основе упаковок ячеек в виде простого (*simple cubic* – *SC*), объемно-центрированного (*body-centered cubic* – *BCC*) и гранецентрированного (*face-centered cubic* – *FCC*) куба авторы создали 23 различных модели расположения и содержания (объемной долей) сфер. Расчеты показали, что теплопроводность практически не зависит от модели упаковки, но определяющим фактором является объемная доля сфер. С увеличением содержания стеклянных микросфер уменьшается теплопроводность композита.

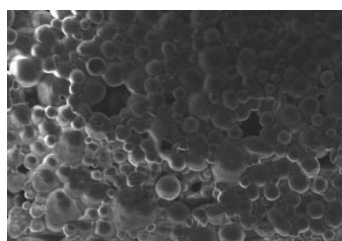
Авторы статьи [16] разработали теплоизоляционный материал из полиборосилоксана (BSiO_2) и полых стеклянных микросфер *HGM* с теплопроводностью 0,045 Вт/(мК) и плотностью 0,30 г/см³. Благодаря BSiO_2 в качестве термостойкого связующего, полые микросферы были хорошо склеены, а композит показал хорошую термическую стабильность и огнестойкость.

В статье [17] авторы оценили теплопроводность композита из бисмалеимидной смолы АРОВМІ с теплопроводностью 0,307 Вт/(мК) с добавлением полых углеродных сфер 4,6 Вт/(мК). Ввиду низкого межфазного связывания частицы и матрицы теплопроводность композита с содержанием 70 об.% углеродных сфер снизилась до 0,284 Вт/(мК). Таким образом, важным фактором, влияющим на теплопроводность композита, является межфазная связь частиц с матрицей

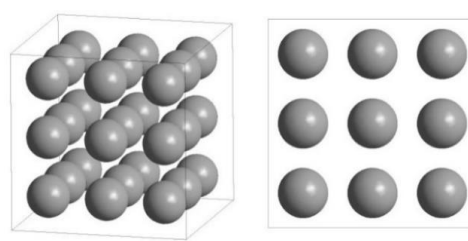
Одним из главных преимуществ композитов являются их настраиваемые свойства. Изменяя тип и состав матрицы и полых сфер, соотношение их объемных долей, можно создать композит с желаемыми механическими и тепловыми свойствами. В работе [18] авторы исследовали влияние плотности *HGM* на прочностные и термические свойства полиметилакрилатной синтаксической пены. Исследования показали, что добавление микросфер с самой высокой плотностью позволило получить композит с самой низкой плотностью без ухудшения его прочностных свойств. При этом на тепловые характеристики плотность *HGM* не оказала значительного влияния.

Материалы и методы

При создании изоляционного материала с применением слоя микросферических гранул могут образовываться дефекты. Например, при плохом перемешивании гранул в основном материале происходит формирование зоны с гранулами с разной плотностью упаковки. В самом неблагоприятном случае можно наблюдать небольшие объемы основного материала, где отсутствуют микросферические гранулы. На рисунке 1 (а) представлен снимок, полученный с помощью электронного микроскопа. Мы видим плотный слой микросферических гранул, а также несколько участков не занятых гранулами. Эти пустоты на рисунке имеют размеры от одного до трех диаметров микросферы.



(а)



(б)

Рис. 1. Упаковка микросфер в композитном материале: (а) – картина упаковки сферических гранул, полученная сканированием электронным микроскопом; (б) – модель расчетной области

Fig. 1. Packing of microspheres in a composite material: (a) – a picture of the packing of spherical granules obtained by scanning with an electron microscope; (b) – a model of the computational domain

Целью настоящего исследования является определение влияния наличия зон, не занятых микрогранулами, на изоляционные свойства композитного материала. Изоляционные свойства при наличии дополнительных пустот оцениваются посредством

расчета коэффициента теплопроводности.

В расчетах используется простая кубическая упаковка (SC). Данное приближение обосновано простотой модели для учета изменения параметров занимаемого объема тем или иным материалом при удалении или перераспределении микросферических гранул в исследуемой области.

На рисунке 1 (б) представлена расчетная область, состоящая из 27 сфер, по 3 сферы в направлении каждой координатной оси. Выбор трех рядов сфер позволяет исследовать несколько вариантов образования пустот в слое гранул. Также рассматриваются несколько вариантов объемного содержания сферы в единичной кубической ячейке, определяемого как

$$\varphi = \frac{V_{\text{сфера}}}{V_{\text{ячейка}}} \cdot 100\% = \frac{4\pi R^3}{3L^3} \cdot 100\% \quad (1)$$

где R – внешний радиус микросферы, L – размер стороны единичной кубической ячейки. В настоящем исследовании мы рассматривали варианты $\varphi=10\%$, 20% , 30% , 40% . Так как в исследовании используется микросферу с твердой стенкой, то введем параметр толщины стенки t . Тогда внутренний радиус области сферы, заполненный газом, будет $R-t$.

В настоящем исследовании для выбора геометрических размеров, параметров материалов и верификации модели мы будем опираться на данные исследований работ [5, 13]. В частности, выберем внешний диаметр микросферической гранулы $D = 2R = 58,64$ мкм, $t = 1,6$ мкм. Размер единичной кубической ячейки рассчитывается из уравнения (1).

Так как твердая стенка микросферической гранулы, как правило, имеет коэффициент теплопроводности выше, чем заключенный внутри газ, то оценим объемное содержание каждого компонента композитного материала в единичной кубической ячейке. Результаты расчетов представлены в таблице 1. С увеличением плотности упаковки также увеличивается объемное содержание твердой стенки гранул. Так для $\varphi = 40\%$ в единичной кубической ячейке материал стенки гранул занимает уже 6,2 % объема.

Таблица 1

Объемное содержание составляющих компонентов микросферической гранулы в единичной кубической ячейке

Объемное содержание сфер, %	Объемное содержание газа, %	Объемное содержание твердой стенки, %
10	8,45	1,55
20	16,90	3,10
30	25,35	4,65
40	33,80	6,20

Далее рассмотрим варианты образования пустот в построенной упаковке из 27 гранул. Первым вариантом рассмотрим удаление некоторых микросфер из построенной упаковки, например, целого горизонтального ряда (рис. 2 (а)). Затем рассмотрим вариант удаления целого вертикального ряда (рис. 2 (б)). Описание рассматриваемых случаев образования пустот приведено в Таблице 2.

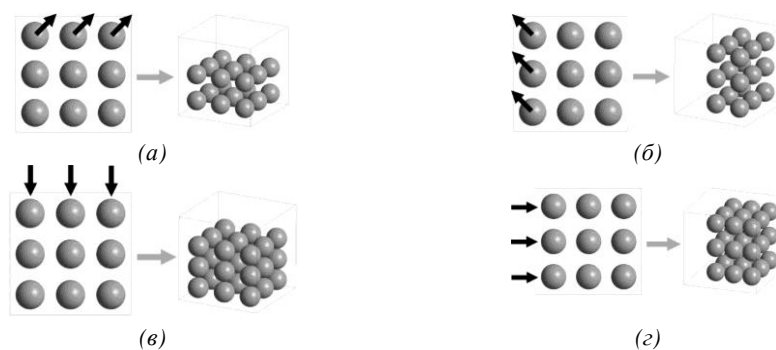


Рис. 2. Примеры геометрических моделей образования пустот для $\varphi = 20\%$: (а) – удаление горизонтального ряда; (б) – удаление вертикального ряда; (в) – уплотнение рядов по вертикали; (г) – уплотнение рядов по горизонтали.

Fig. 2. Examples of geometric models of the formation of voids for $\varphi = 20\%$: (a) - removal of a horizontal row; (b) - removal of a vertical row; (c) - compaction of rows vertically; (d) - compaction of rows horizontally.

Удаление сферических гранул из модели упаковки влечет к уменьшению объемного содержания газа в исследуемом объеме. Кроме подхода с удалением гранул также можно использовать подход с уплотнением существующих гранул в выделенном объеме. Для значений $\phi = 30\%$ и $\phi = 40\%$ дополнительное перемещение гранул внутри исследуемого объема не принесет существенного уплотнения или образования пустоты. Для значений $\phi = 10\%$ и $\phi = 20\%$ рассмотрим варианты с уплотнением в горизонтальном и в вертикальном направлении. Примеры представлены на рисунке 2 (в, г).

Таблица 2

Варианты моделей образования пустот в упаковке микросферических гранул

Случай	Описание
1	27 сфер, базовый случай
2	18 сфер, удаление горизонтального ряда
3	18 сфер, удаление вертикального ряда
4	27 сфер, уплотнение по горизонтали
5	27 сфер, уплотнение по вертикали
6	Пустой куб

Рассмотрим передачу тепловой энергии через композитный материал, состоящий из основного материала и микросферических гранул с газом и твердыми стенками. Примем незначительным влияние конвекции и радиации, согласно исследованиям [5, 19]. Тогда в качестве механизма передачи тепла мы имеем теплопроводность. Уравнение сохранения энергии запишем как [19]:

$$\nabla^2 T_i(x, y, z) = 0 \quad (2)$$

где T_i – температура в i -ом материале в точке (x, y, z) . В нашем исследовании мы будем рассматривать 3 материала: основной материал, газ внутри микросферы, материал стенки микросферы.

Для оценки свойств теплопроводности композитного материала мы используем закон Фурье как [20]:

$$\vec{q}_i(x, y, z) = -k_i \nabla T_i(x, y, z) \quad (3)$$

где q_i – вектор теплового потока в i -ом материале в точке (x, y, z) . На границе i -го и j -го материалов выполняются условия неразрывности в виде

$$T_i(x, y, z) = T_j(x, y, z), \vec{q}_i(x, y, z) = \vec{q}_j(x, y, z) \quad (4)$$

Для оценки изменения теплоизоляционных свойств композитного материала рассмотрим средний коэффициент теплопроводности как [21, 22]

$$k_{eff} \approx \frac{\bar{q}_l}{\nabla T_l} = \frac{\bar{q}_l L}{T_1 - T_2} \quad (5)$$

где \bar{q}_l – средний тепловой поток при прохождении расстояния L и изменении температуры от T_1 до T_2 .

Программное обеспечение *ANSYS Fluent* 19.2 использовано для решения описанных выше уравнений. Для реализации решения определим расчетную область и граничные условия (рис. 3 (а)). Пусть на нижней границе расчетной области задана температура T_1 , и на верхней границе задана температура T_2 ($T_1 > T_2$). На остальных внешних границах расчетной области заданы условия симметрии.

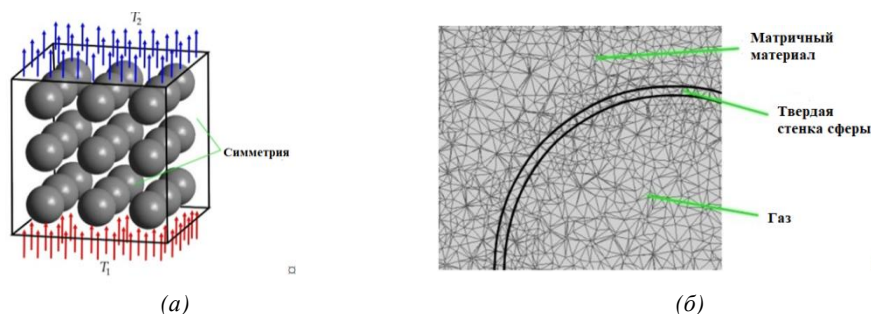


Рис.3. Расчетная область: (а) – граничные условия; (б) – сеточное разбиение.

Fig.3. Calculation area: (a) – boundary conditions; (b) - grid partitioning.

Все расчетная область заполнена построенной сеткой. Пример сеточного разбиения в окрестности границы микросферы представлен на рисунке 3 (б). В зоне твердой стенки гранулы в направлении нормали располагается от 2-3 ячейки, что приемлемо для задачи теплопроводности в твердом теле. Общее количество ячеек в области с 27 микросферами составляет в среднем 6,000,000 элементов.

Так как мы приняли геометрические размеры микросферических гранул и объемное содержание сфер в единичной кубической ячейке, опираясь на работы [5, 13], то физические свойства материалов выберем аналогичными значениями. Это позволит нам верифицировать наши модели. Итак, для расчетов выберем параметры коэффициентов теплопроводности материалов: основной материал матрицы – $k_c = 0,93$ Вт/м·К [5], газ внутри сфер – $k_g = 0,023$ Вт/м·К [23], твердая стенка микросферы – $k_w = 1,03$ Вт/м·К [24].

Температуру на нижней границе расчетной области выберем $T_1 = 30$ °С (303,15 К), температуру на верхней границе $T_2 = 10$ °С (283,15 К). При этом в нашем исследовании размер кубической расчетной области зависит от параметра φ . Так для $\varphi = 10\%$ длина $L = 305,49$ мкм, а для $\varphi = 40\%$ длина $L = 192,3$ мкм. Проведем расчет кубической области без микросфер и посмотрим изменение температуры по длине расчетной области материала. Изменение температуры в зависимости от пройденного расстояния вдоль материала имеет линейный характер.

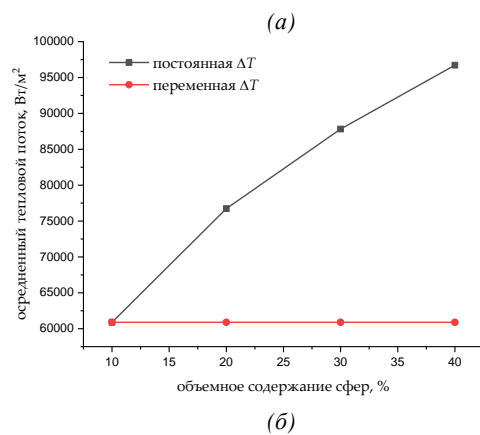
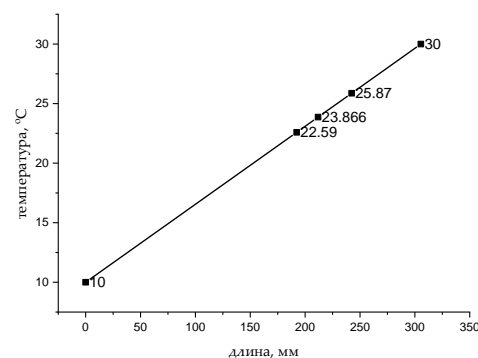


Рис.4. Зависимость параметров теплопередачи от температуры на границе расчетной области для расчетной области без микросфер: (а) – зависимость температуры от длины; (б) – зависимость теплового потока от разности температур.

Fig.4. Dependence of the heat transfer parameters on the temperature at the boundary of the computational domain for the computational domain without microspheres: (a) – the dependence of temperature on length; (b) - the dependence of the heat flux on the temperature difference.

На рисунке 4 (а) черной линией представлен график зависимости среднего теплового потока для всех вариантов φ . Очевидно, что для более короткой по размеру области мы имеем больший тепловой поток при фиксированном значении ΔT . Мы можем скорректировать температуру на одной из границ расчетной области в зависимости от значения φ . Это позволит допустить, что на единицу длины материал матрицы проходит одинаковый тепловой поток. Зафиксируем температуру $T_2 = 10$ °С. Тогда с учетом

линейной зависимости определим значения T_1 для размера области при каждом значении ϕ (рис. 4 (а)). На рисунке 4 (б) красной линией представлен график зависимости среднего теплового потока для всех вариантов ϕ при корректировке T_1 под размеры каждой расчетной области. В этом случае мы видим одинаковый тепловой поток. В нашем исследовании мы рассмотрим оба варианта задания ΔT (постоянный и изменяемый) для всех расчетов.

Результаты и обсуждение

Для всех построенных геометрических вариантов проведены расчеты согласно описанной выше вычислительной модели. Сначала рассмотрим расчеты для граничных условий с постоянным значением $\Delta T = 20$ °С. Отметим, что для случаев удаления ряда микрогранул мы рассматривали несколько вариаций. Для случая с удалением одного горизонтального ряда мы рассматривали три варианта: удаление нижнего ряда, среднего ряда и верхнего ряда. Рассчитанные величины среднего теплового потока и среднего коэффициента теплопроводности отличались незначительно. Поэтому для окончательных результатов выбраны осредненные значения по трем вариантам. Аналогичные результаты наблюдаются для случая удаления вертикального ряда. Результаты расчетов при удалении бокового ряда или центрального ряда показывают близкие значения среднего теплового потока и среднего коэффициента теплопроводности.

Рассмотрим значения среднего теплового потока. Результаты представлены на рисунке 5 (а). Очевидно, что наибольший тепловой поток будет для случая пустого куба (случай 6). Наличие 27 микросфер в исследуемом объеме существенно уменьшает тепловой поток через композитный материал. Максимальное уменьшение теплового потока по сравнению со случаем пустого куба наблюдается для $\phi = 40$ %, так как там наибольшая часть объема матрицы заменена микросферами, которые имеют меньший коэффициент теплопроводности.

Также мы видим, что с увеличением параметра ϕ тепловой поток не возрастает монотонно при наличии микросфер. Это связано с заданием граничных условий. Перепад температуры $\Delta T = T_1 - T_2$ постоянен, а размер куба L расчетной области меняется в зависимости от ϕ . Согласно формуле (5) тепловой поток будет меняться при изменении k_{eff} и L . Имеем зависимость $\phi \sim k_{eff} / L$. Для варианта $\phi = 10$ % размер куба очень большой, и этот параметр преобладает над значением коэффициента теплопроводности. При увеличении ϕ уменьшаются оба параметра k_{eff} и L . Когда k_{eff} начинает иметь больше значение по сравнению с L , мы наблюдаем уменьшение среднего теплового потока.

Далее оценим влияние неравномерности распределения микросфер в композитном слое изоляционного материала. При удалении гранул из слоя (случаи 2 и 3) мы, очевидно, наблюдаем увеличение среднего теплового потока. При этом более существенные отличия в изменении абсолютной величины теплового потока наблюдаются с увеличением ϕ . Интересны для сравнения результаты расчетов случаев 2 и 3, так как в обоих случаях удалены по 9 гранул. При удалении вертикального ряда мы видим большее увеличение теплового потока, чем при удалении горизонтального ряда. Такие результаты получены при всех исследуемых значениях ϕ . Таким образом, сквозной вертикальный канал без микросфер способствует большим тепловым потерям для изоляционного материала.

Результаты для случаев уплотнения микросфер при $\phi = 10$ % и 20 % также представлены на рисунке 5. Изменения в величине теплового потока незначительно отличаются от случая равномерного распределения гранул. При этом уплотнение по высоте слоя микросфер приводит к увеличению теплового потока, а уплотнение гранул по ширине приводит к небольшому уменьшению теплового потока. Таким образом, разрежение и увеличение теплового потока в одной зоне расчетной области компенсируется уплотнением и уменьшением теплового потока в другой зоне расчетной области.

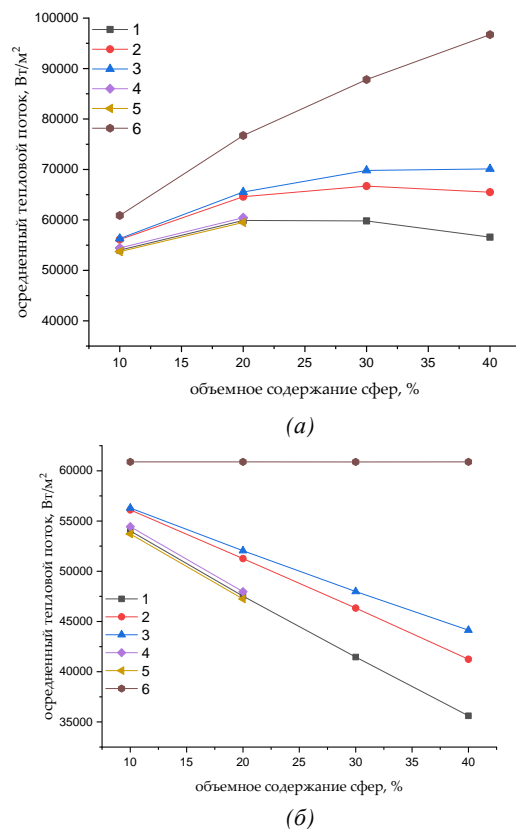


Рис. 5. Средний тепловой поток. Цифры соответствуют случаям из табл. 2: (а) – для постоянной $\Delta T = 20^\circ\text{C}$; (б) – для переменной ΔT .

Fig. 5. Average heat flow. The figures correspond to the cases from Table 2: (a) - for the constant $\Delta T = 20^\circ\text{C}$; (b) - for the variable ΔT .

Далее проведены расчеты с изменяемым значением $\Delta T = T_1 - T_2$ в зависимости от величины ϕ . В этом случае в формуле (5) $L/\Delta T = \text{const}$ и $\phi \sim k_{\text{eff}}$. Результаты расчета среднего теплового потока представлены на рисунке 5(б). В отличие от предыдущих расчетов, здесь мы видим постоянное значение для случая 6 кубической области без микросферических гранул. Для случаев с наличием микросфер мы наблюдаем монотонное уменьшение теплового потока с увеличением ϕ . При этом качественные изменения при изменении в распределении микросфер аналогичны изменениям для варианта постоянного ΔT .

Далее рассчитаем коэффициент теплопроводности композитного материала для всех исследуемых случаев. Как для варианта с постоянным ΔT , так и с переменным мы имеем одинаковые значения k_{eff} для соответствующих случаев и вариантов. Результаты представлены на рисунке 6 (а). Видно, что поведение графиков на рисунке 6 (а) повторяет поведение графиков на рисунке 5 (б). Как уже было описано выше, при переменной ΔT по формуле (5) $L/\Delta T = \text{const}$ и $\phi \sim k_{\text{eff}}$.

При отсутствии микросфер мы получаем коэффициент теплопроводности равный коэффициенту теплопроводности материала матрицы. При добавлении микросфер уменьшается коэффициент теплопроводности композитного материала. Аналогично графикам для теплового потока, уменьшение коэффициента теплопроводности соответствует увеличению количества гранул. Существенные различия наблюдаются для случаев 2 и 3 с одинаковым количеством микросфер. При значении начального объемного содержания микросфер $\phi = 40\%$ отличие между результатами при удалении горизонтального слоя или вертикального слоя составляет около 6 %.

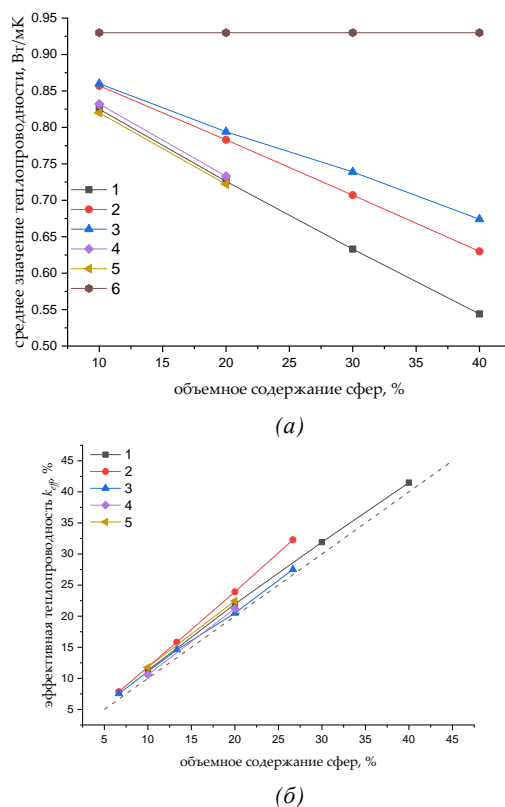


Рис. 6. Зависимость теплопроводности от объемного содержания сфер. Номера соответствуют случаям из табл. 2: (а) – среднее значение теплопроводности; (б) – эффективная теплопроводность.

Fig. 6. The dependence of thermal conductivity on the volume content of spheres. The numbers correspond to the cases from Table 2: (a) – the average value of thermal conductivity; (b) – effective thermal conductivity.

Далее проведем анализ зависимости изменения коэффициента теплопроводности для всех исследуемых случаев в зависимости от объемного содержания непосредственно расположенных микросфер в композитном материале. Например, для $\phi = 30\%$ при удалении горизонтального или вертикального ряда фактическое объемное содержание микросфер в исследуемой области составит значение 20 %. На рисунке 6 (б) представлены результаты расчетов. По горизонтальной оси отложены значения фактического объемного содержания гранул в матрице. Мы видим, что для многих вариантов изменение в коэффициенте теплопроводности примерно равно изменению в объемном содержании микросферических гранул в композитном материале. Больше всего отклоняется от прямолинейной зависимости от объемного содержания микросфер случай. Таким образом, именно удаление горизонтального ряда отклоняется от пропорциональной зависимости от объемного содержания микросфер.

Выводы

В настоящей работе мы исследовали влияние наличия зон, не занятых микрогранулами, на изоляционные свойства композитного материала. Определение изоляционных свойств мы определяли с помощью измерения коэффициента теплопроводности при наличии дополнительных пустот. Наличие микросфер или их частичное удаление в исследуемом объеме существенно уменьшает тепловой поток через композитный материал. При этом наибольшие отклонения с разным количеством микросфер наблюдаются при увеличении плотности гранул ϕ в исследуемом объеме. Максимальное изменение теплового потока и коэффициента эффективной теплопроводности по сравнению со случаем пустого куба наблюдается для $\phi = 40\%$, так как там наибольшая часть объема матрицы заменена микросферами, которые имеют меньший собственный коэффициент теплопроводности. Подробный анализ результатов показал нелинейность зависимости изменения параметров теплопроводности композитного материала от объемного содержания микросферических гранул для разных исследуемых случаев. Так удаление горизонтального ряда больше всех исследуемых случаев приводит к отклонению от пропорциональной зависимости от объемного содержания микросфер.

Литература

1. Гапоненко С. О., Файзлиев Р.А., Калинина М.В. Метод повышения эффективности тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения путем применения отражающего элемента // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 1(49). С. 204-217.
2. Гапоненко С. О., Файзлиев Р.А., Калинина М.В. Метод повышения эффективности тепловой изоляции трубопроводов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2(50). С. 142-147.
3. Zhou H., Brooks A.L. Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres // Construction and Building Materials. 2018. V. 198, pp. 512-526.
4. Brooks A.L., Shen A., Zhou H. Development of a high-temperature inorganic synthetic foam with recycled fly-ash cenospheres for thermal insulation brick manufacturing // Journal of Cleaner Production. 2020. V. 246, 118748.
5. Liu B., Wang H., Qin Q. H. Modelling and characterization of effective thermal conductivity of single hollow glass microsphere and its powder // Materials. 2018. Vol. 11, N5, 133.
6. Curd M.E., Morrison N.F., Smith M.J., et al. Geometrical and mechanical characterisation of hollow thermoplastic microspheres for syntactic foam applications // Composites Part B: Engineering. 2021. V. 223, 108952.
7. Petkova-Slipets R., Penka Z. An analysis of the structure and thermal conductivity of hollow microsphere filled syntactic foams // Civil and Environmental Engineering. 2019. V. 15, N1, pp. 36-41.
8. Wang P., Ji L., Yuan J., et al. Modeling and optimization of composite thermal insulation system with HGMs and VDMLI for liquid hydrogen on orbit storage // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. V. 45, N11, pp. 7088-7097.
9. Yang H., Jiang Y., Liu H., et al. Mechanical, thermal and fire performance of an inorganic-organic insulation material composed of hollow glass microspheres and phenolic resin // Journal of Colloid and Interface Science. 2018. V. 530, pp. 163-170.
10. Shao Nn., Zhang Yb., Liu Z., et al. Fabrication of hollow microspheres filled fly ash based foam geopolymers with ultra-low thermal conductivity and relative high strength // Construction and Building Materials. 2018. V. 185, pp. 567-573.
11. Liang J.Z., Li F.H. Simulation of heat transfer in hollow-glass-bead-filled polypropylene composites by finite element method // Polymer Testing. 2007. Vo 26, N3, pp. 419-424.
12. Park Y.K., Kim J.G., Lee J.K. Prediction of thermal conductivity of composites with spherical microballoons // Materials Transactions. 2008. V. 49, pp. 2781-2785.
13. Wang H., Hou F., Chang C. Experimental and computational modeling of thermal conductivity of cementitious syntactic foams filled with hollow glass microspheres // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 265, 120739.
14. Xiao P., Yifeng Z., Peng W., et al. Estimation of thermal conduction in hollow-glass-beads-filled cement-based composites by variational asymptotic homogenization method // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 161, 114191.
15. Jia Z., Wang Z., Hwang D.J., et al. Prediction of the effective thermal conductivity of hollow sphere foams // ACS Applied Energy Materials. 2018. V. 1, N3, pp. 1146-1157.
16. Zhan Yl., Zang Cg., Jiao Qj., et al. Heat-insulating materials with high-temperature resistance through binding hollow glass microspheres with vinyl-functionalized polyborosiloxane // Journal of Materials Science. 2020. V. 55, pp. 14264-14279.
17. Shabde V.S., Hoo K.A., Gladysz G.M. Experimental determination of the thermal conductivity of three-phase syntactic foams // Journal of Materials Science. 2006. V. 41, N13, pp. 4061-4073.
18. Ozkutlu M., Dilek C., Bayram G. Effects of hollow glass microsphere density and surface modification on the mechanical and thermal properties of poly(methyl methacrylate) syntactic foams // Composite Structures. 2018. V. 202, pp. 545-550.
19. Qin Q.H. Trefftz finite element method and its applications // Applied Mechanics Reviews. 2005. V. 58, pp. 316-337.
20. Wang H., Qin Q.H. Hybrid FEM with fundamental solutions as trial functions for heat conduction simulation // Acta Mechanica Sinica. 2009. V. 22, pp. 487-498.
21. Wang H., Qin Q.H., Xiao Y. Special n-sided Voronoi fiber/matrix elements for clustering thermal effect in natural-hemp-fiber-filled cement composites // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. V. 92, pp. 228-235.
22. Wang H., Zhao X.J., Wang J.S. Interaction analysis of multiple coated fibers in cement composites by special n-sided interphase/fiber elements // Composites Science and Technology. 2015. V. 118, pp. 117-126.
23. Lienhard J.H., Lienhard, J.H. A Heat Transfer Textbook // Phlogiston Press: Cambridge. USA,

2005.

24. Kang Y., Morita K. Thermal conductivity of the CaO–Al₂O₃–SiO₂ system // ISIJ International. 2006. V. 46, pp. 420–426.

Авторы публикации

Соловьев Сергей Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Инженерная кибернетика» (ИК), Казанский государственный энергетический университет.

Соловьева Ольга Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС), Казанский государственный энергетический университет.

Ахметова Ирина Гареевна – д-р. техн. наук, зав. кафедрой «Экономика и организация производства» (ЭОП), Казанский государственный энергетический университет.

Ваньков Юрий Витальевич – д-р. техн. наук, зав. кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ), Казанский государственный энергетический университет.

Шакурова Розалина Зуфаровна – аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ), Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Gaponenko SO, Fazliev RA, Kalinina MV. Method of increasing the efficiency of thermal insulation by applying a reflective element. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2021; 13(1):204-217.
2. Gaponenko SO, Fazliev RA, Kalinina MV. Method of increasing the efficiency of thermal insulation of pipelines. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2021; 13(2):142-147.
3. Zhou H, Brooks AL. Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres. *Construction and Building Materials*. 2018;198:512-526. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.074
4. Brooks AL, Shen A, Zhou H. Development of a high-temperature inorganic synthetic foam with recycled fly-ash cenospheres for thermal insulation brick manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 246:118748. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118748
5. Liu B, Wang H, Qin Q. H. Modelling and characterization of effective thermal conductivity of single hollow glass microsphere and its powder. *Materials*. 2018; 11(1):133. doi:10.3390/ma11010133
6. Curd ME, Morrison NF, Smith MJ, et al. Geometrical and mechanical characterisation of hollow thermoplastic microspheres for syntactic foam applications. *Composites Part B: Engineering*. 2021; 223:108952. doi:10.1016/j.compositesb.2021.108952
7. Petkova-Slipets R, Penka Z. An analysis of the structure and thermal conductivity of hollow microsphere filled syntactic foams. *Civil and Environmental Engineering*. 2019; 15(1):36-41. doi:10.2478/cee-2019-0006
8. Wang P, Ji L, Yuan J, et al. Modeling and optimization of composite thermal insulation system with HGMS and VDMLI for liquid hydrogen on orbit storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(11):7088-7097. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.110
9. Yang H, Jiang Y, Liu H, et al. Mechanical, thermal and fire performance of an inorganic-organic insulation material composed of hollow glass microspheres and phenolic resin. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018; 530:163-170. doi:10.1016/j.jcis.2018.06.075
10. Shao Nn, Zhang Yb, Liu Z, et al. Fabrication of hollow microspheres filled fly ash based foam geopolymers with ultra-low thermal conductivity and relative high strength. *Construction and Building Materials*. 2018;185:567-573. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.077
11. Liang JZ, Li FH. Simulation of heat transfer in hollow-glass-bead-filled polypropylene composites by finite element method. *Polymer Testing*. 2007; 26(3):419-424. doi:10.1016/j.polymertesting.2006.12.014
12. Park YK, Kim JG, Lee JK. Prediction of thermal conductivity of composites with spherical microballoons. *Materials Transactions*. 2008; 49:2781-2785. doi:10.2320/matertrans.MRA2008139
13. Wang H, Hou F, Chang C. Experimental and computational modeling of thermal conductivity of cementitious syntactic foams filled with hollow glass microspheres. *Construction and Building Materials*. 2020; 265:120739. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120739
14. Xiao P, Yifeng Z, Peng W, et al. Estimation of thermal conduction in hollow-glass-beads-filled

cement-based composites by variational asymptotic homogenization method. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 161:114191. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114191

15. Jia Z, Wang Z, Hwang DJ, et al. Prediction of the effective thermal conductivity of hollow sphere foams. *ACS Applied Energy Materials*. 2018; 1(3):1146-1157. doi:10.1021/acsaem.7b00264

16. Zhan Yl, Zang Cg, Jiao Qj, et al. Heat-insulating materials with high-temperature resistance through binding hollow glass microspheres with vinyl-functionalized polyborosiloxane. *Journal of Materials Science*. 2020; 55:14264-14279. doi:10.1007/s10853-020-05046-y

17. Shabde VS, Hoo KA, Gladysz GM. Experimental determination of the thermal conductivity of three-phase syntactic foams. *Journal of Materials Science*. 2006; 41(13):4061-4073. doi:10.1007/s10853-006-7637-x

18. Ozkutlu M, Dilek C, Bayram G. Effects of hollow glass microsphere density and surface modification on the mechanical and thermal properties of poly(methyl methacrylate) syntactic foams. *Composite Structures*. 2018;202:545-550. doi:10.1016/j.compstruct.2018.02.088

19. Qin QH. Trefftz finite element method and its applications. *Applied Mechanics Reviews*. 2005; 58:316-337. doi:10.1115/1.1995716

20. Wang H, Qin QH. Hybrid FEM with fundamental solutions as trial functions for heat conduction simulation. *Acta Mechanica Sinica*. 2009; 22:487-498. doi:10.1016/S0894-9166(09)60300-1

21. Wang H, Qin QH, Xiao Y. Special n-sided Voronoi fiber/matrix elements for clustering thermal effect in natural-hemp-fiber-filled cement composites. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 92:228-235. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.093

22. Wang H, Zhao XJ., Wang JS. Interaction analysis of multiple coated fibers in cement composites by special n-sided interphase/fiber elements. *Composites Science and Technology*. 2015; 118:117-126. doi:10.1016/j.compscitech.2015.08.022

23. Lienhard JH, Lienhard JH. A Heat Transfer Textbook. *Phlogiston Press: Cambridge*. USA, 2005.

24. Kang Y, Morita K. Thermal conductivity of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system. *ISIJ International*. 2006; 46:420-426. doi:10.2355/isijinternational.46.420

Authors of the publication

Sergei A. Solovev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Olga V. Soloveva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Irina G. Akhmetova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yury V. Vankov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rozalina Z. Shakurova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 18.03.2022г.

Отредактировано 25.03.2022г.

Принято 25.03.2022г.