

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 699.042

Владимир Александрович Горбунов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: gorbynov.w@mail.ru

Григорий Александрович Перевезенцев

ООО «Ковровские котлы», инженер-конструктор, Россия, Ковров, e-mail: mkandy@mail.ru

Светлана Сергеевна Теплякова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: svetlana20212120@mail.ru

Мария Николаевна Мечтаева

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

Методика определения коэффициентов эффективной теплопроводности при нагреве пористых тел на основе использования фракталоподобных структур

Авторское резюме

Состояние вопроса. В энергетической сфере активно используются теплоизоляционные, пористые композитные, керамические, шихтовые материалы. Для улучшения структуры и придания материалам заданных свойств, необходимых для конкретных условий производства, выполняется их термическая обработка. Актуальной задачей является оценка влияния геометрических параметров фракталоподобной структуры и радиационного теплообмена на теплофизические свойства пористых тел.

Материалы и методы. Для численного описания пористых тел значимой является методика замены геометрии пористого тела на тела с фракталоподобной структурой, имеющие свойства самоподобия. Исследуемым объектом выбран массив расположенных хаотично заготовок, представляющий собой структуры, называемые насыпными садками. Реальное пористое тело заменено фрактальной структурой куба 2-го ранга разбиения. Моделирование выполнено в программном комплексе COMSOL Multiphysics на основе трехмерной модели ковры Серпинского. Поскольку распределение теплоты может быть неравномерным по структуре объекта, рассмотрено три варианта сечения фракталоподобной кубической структуры.

Результаты. Разработана методика определения эффективных коэффициентов теплопроводности на основе использования фракталоподобных структур. Получены одномерные расчетные модели, обладающие достаточной для инженерного анализа точностью, для различных сечений. Определены эффективные коэффициенты теплопроводности. Анализ данных показал, что геометрические пара-

метры структуры и радиационный теплообмен значительно влияют на эффективный коэффициент теплопроводности при высоких температурах.

Выводы. В отличие от существующих подходов, предложенная методика позволяет решить задачу определения теплофизических свойств без физических экспериментов. Используемая методика может применяться для математического моделирования процессов теплообмена теплоэнергетических объектов при расчете температурных полей и определения режимов нагрева.

Ключевые слова: фракталоподобный элемент, кондуктивный теплообмен, радиационный теплообмен, ковер Серпинского, губка Менгера, коэффициент теплопроводности, методика определения эффективных коэффициентов теплопроводности

Vladimir Alexandrovich Gorbynov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: gorbynov.w@mai.ru

Grigori Alexandrovich Perevezentsev

"Kovrovskie kotly" Co., Design Engineer, Russia, Kovrov, e-mail: mkandy@mail.ru

Svetlana Sergeevna Teplyakova

Ivanovo State Power Engineering University, Post Graduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: svetlana20212120@mail.ru

Maria Nikolaevna Mechtaeva

Ivanovo State Power Engineering University, Post Graduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

Methodology to determine coefficients of effective thermal conductivity when heating porous bodies using fractal-like structures

Abstract

Background. Thermal insulation, porous composite, ceramic, charge materials are frequently used in the energy industry. The materials are heat treated to improve the structure and give them the desired properties required for specific production conditions. The important task is to assess the influence of geometric parameters of the fractal-like structure and radiation heat transfer on the thermophysical properties of porous bodies.

Materials and methods. For numerical description of porous bodies, the technique of replacing geometry of porous body with the bodies with a fractal-like structure having self-similarity properties is significant. The object under study is an array of blanks arranged chaotically, the structures that are called bulk cages. The porous body is replaced by a fractal cube structure of the 2nd rank of partitioning. The simulation has been performed in the COMSOL Multiphysics software based on a three-dimensional model of the Sierpinski carpet. Since the distribution of heat can be non-uniformed over the structure of the object, three variants of the fractal-like cubic structure cross section are considered.

Results. A method to determine the effective thermal conductivity coefficients based on the use of fractal-like structures has been developed. Depending on the cross sections, one-dimensional computational models with sufficient accuracy for engineering analysis are obtained. The effective thermal conductivity coefficients are determined. The results of data analysis have shown that the geometric parameters of the structure and radiation heat transfer significantly affect the effective coefficient of thermal conductivity at high temperatures.

Conclusions. In comparison to the currently available approaches, the developed method allows solving the problem of determining thermophysical properties without physical experiments. The technique used in the study may be used for mathematical modeling of heat exchange processes of heat-power facilities when calculating temperature fields and determining heating modes.

Key words: fractal-like element, conductive heat transfer, radiative heat transfer, Sierpinski carpet, Menger sponge, thermal conductivity coefficient, method to determine effective thermal conductivity coefficients

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.1.005-011

Введение. Пористые материалы применяют в энергетике, машиностроении, авиационной, химической, нефтяной, пи-

щевой, металлургической и других отраслях промышленности [1].

В энергетической сфере активно используются теплоизоляционные, пористые композитные, керамические, шихтовые материалы и порошки. На основе порошков изготавливаются таблетки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), которые являются основной составляющей активной зоны реакторов на АЭС [2, 3].

Для улучшения структуры и придания материалам заданных свойств, необходимых для конкретных условий производства, выполняется их термическая обработка.

При термической обработке металлов заготовки помещаются в термические печи в виде хаотично расположенных элементов. Массив таких заготовок представляет собой структуры, называемые насыпными садками.

Насыпные садки характеризуются рядом параметров, среди которых важнейшим является порозность, определяемая как доля объема пор в общем объеме пористого тела. Поры могут быть открытыми и закрытыми. Рассмотрим тела с закрытыми порами.

В процессе нагрева пористого тела теплопередача осуществляется следующими путями:

- теплопроводностью через твердый «скелет», состоящий из тел простейшей формы (шаров, цилиндров и т.д.);
- теплопроводностью через среду, заполняющую поры;
- излучением через поверхности пор;
- конвекцией при движении газа в порах [4].

Расчет процессов теплообмена в насыпных садках сводится к поиску эффективных теплофизических свойств, приведению тела к условно однородному. Поиск эффективной плотности и теплоемкости не доставляет проблем, а определение эффективной теплопроводности затруднительно [5].

На практике для определения эффективного коэффициента теплопроводности решают обратную задачу на основе физического эксперимента по определению температурного поля пористого тела. Недостатком этого метода является то, что при изменении размеров заготовок нужно вновь проводить физический эксперимент.

В настоящее время универсального метода нахождения эффективных теплофизических свойств не найдено. В зависимости от определенных структур

садок, формируемых элементами заданной канонической формы, предлагаются различные методики [1, 5, 6].

Построение геометрии насыпной садки (рис. 1) вызывает сложности. В [5] предлагается замена геометрии пористого тела на тела с фракталоподобной структурой, имеющие свойства самоподобия. Замена позволяет решить задачу определения теплофизических свойств насыпных садок без физических экспериментов.

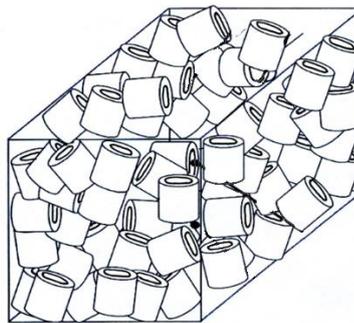


Рис. 1. Контейнер с насыпной садкой

Для унификации насыпных садок сложных форм предлагается применять геометрическую модель, построенную на основе структуры фрактальной геометрии, в частности «губки Менгера», т.е. трехмерной модели ковра Серпинского [1, 7–9]. Для точного описания необходимо подобрать ранг разбиения. Для начала заменим реальное пористое тело фрактальной структурой [10]. В соответствии с реальным значением порозности насыпной садки предлагается предварительно выбрать фрактальную модель 2-го ранга разбиения.

Общий вид предлагаемой фрактальной модели представлен на рис. 2.

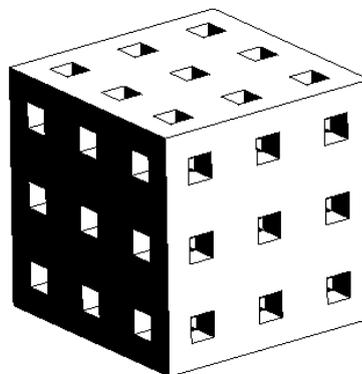


Рис. 2. Фрактальная модель 2-го ранга разбиения

Подобная структура фрактальной модели позволяет проводить численные эксперименты процессов, происходящих в

насыпных садках, со значением порозности, лежащим в пределах от 0,15 до 0,9 [10].

Материалы и методы исследования. В качестве методов исследования фракталоподобной структуры «губки Менгера» используются численные пакеты теплофизического моделирования. Для построения моделей и исследования особенностей тепловыделения использован программный комплекс COMSOL Multiphysics [11, 12].

Материалом фракталоподобного элемента принимается сталь 40, структура которой состоит из металла и воздушного пространства, называемого порой [6].

Для исследования фракталоподобной структуры была выбрана геометрическая фигура куб и определены его параметры. Сторона куба равна $L_1 = 0,09$ м. Размер поры равен $\ell_1 = 0,01$ м.

Поскольку фракталоподобная структура является условно однородной, распределение теплоты может быть неравномерным. Рассмотрено три геометрических параметра куба при различных вариантах сечения: 1 – по средней линии; 2 – по малой диагонали; 3 – по большей диагонали (рис. 3).

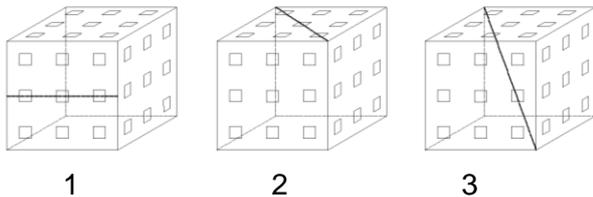


Рис. 3. Исследуемые варианты сечения куба

Значения параметров куба и размеры пор указаны в табл. 1.

Таблица 1. Значения исследуемых параметров куба и соответствующие им размеры пор

Длина, м		Размер поры, м	
L_1	0,0900	ℓ_1	0,01000
L_2	0,1273	ℓ_2	0,01414
L_3	0,1559	ℓ_3	0,01732

На основе геометрических параметров куба необходимо построить одномерные модели сечений фракталоподобных элементов.

Процессы в расчетных моделях фракталоподобной структуры описаны основным уравнением теплопроводности в стационарном режиме нагрева, а также

начальными и граничными условиями, которые показаны на рис. 4.

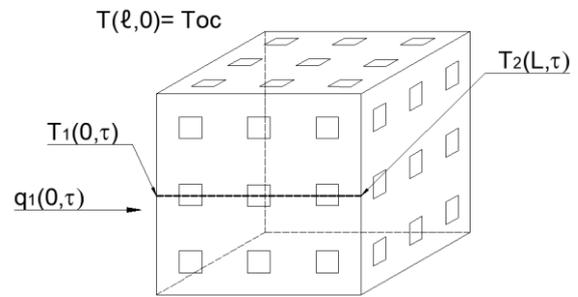


Рис. 4. Начальные и граничные условия пластины фракталоподобной структуры

Начальное температурное поле соответствует температуре окружающей среды:

$$T(\ell, 0) = T_{oc} = 273 \text{ K}, \ell \in [0, L], \quad (1)$$

где $T(\ell, 0)$ – температура точек фракталоподобной структуры при $\tau = 0$; L – длина сечения куба, м.

Граничные условия второго рода на левой стороне фракталоподобной структуры имеют вид

$$q_1(0, \tau) = q_0, \quad (2)$$

где $q_1(0, \tau)$ – тепловой поток на левой стороне при $\tau = \infty$, Вт/м²; $T_1(0, \tau)$ – температура на левой стороне при $\tau = \infty$, К.

Граничные условия первого рода на правой стороне фракталоподобной структуры имеют вид

$$T_2(L, \tau) = T_0, T_0 \in [273 \text{ K}, 1173 \text{ K}], \quad (3)$$

где $T_2(L, \tau)$ – температура на правой стороне при $\tau = \infty$, К;

К левой стороне фракталоподобной структуры подается тепловой поток, который повышает температуру материала $T_1(0, \tau)$. На правой стороне задается температура $T_2(L, \tau)$. На основе одномерной модели, построенной в программном комплексе Comsol Multiphysics, рассчитывается эффективный тепловой поток с достижением интервала температур $\Delta T = 100$ °С.

По полученным результатам рассчитывается эффективный коэффициент теплопроводности

$$\lambda_{эф} = \frac{q_0 L}{\Delta T}, \quad (4)$$

где $\lambda_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Результаты исследования. Оценка влияния вида сечения фракталоподобного элемента на эффективный коэффициент теплопроводности без учета радиационного теплообмена. В ходе исследования в программном пакете Comsol Multiphysics были определены значения эффективных коэффициентов теплопроводности в зависимости от параметров сечения куба. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения эффективных коэффициентов теплопроводности в зависимости от сечения куба

Диапазон температур, °С	Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)			
	воздух	L_1	L_2	L_3
0–100	0,0283	0,0847	0,0848	0,0848
100–200	0,0357	0,1069	0,1071	0,1071
200–300	0,0427	0,1278	0,1281	0,1281
300–400	0,0491	0,1470	0,1472	0,1472
400–500	0,0548	0,1638	0,1640	0,1640
500–600	0,0599	0,1789	0,1791	0,1791
600–700	0,0647	0,1933	0,1934	0,1934
700–800	0,0695	0,2073	0,2074	0,2074
800–900	0,0741	0,2209	0,2210	0,2209
900–1000	0,0785	0,2341	0,2342	0,2342

Наибольшее расхождение значений при кондуктивном теплообмене в зависимости от сечения фракталоподобного элемента составляет 0,18 %. Следовательно, анизотропность эффективных коэффициентов теплопроводности находится в пределах погрешности (не более 5 %).

Оценка влияния вида сечения фракталоподобного элемента на эффективный коэффициент теплопроводности с учетом радиационного теплообмена. Газ является прозрачной средой, в которой надо учитывать два вида теплообмена: конвективный и радиационный. Предварительные исследования показали, что учет конвективного теплообмена в закрытых порах находится в пределах погрешности [2, 3].

В ходе исследования был учтен механизм передачи теплоты радиационным теплообменом от поверхности к окружающему пространству согласно методике, описанной в COMSOL Multiphysics [3, 11, 12].

В результате расчетов были получены значения эффективных коэффициентов теплопроводности с учетом радиационного теплообмена, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3. Расчетные значения эффективных коэффициентов теплопроводности с учетом радиационного теплообмена

Диапазон температур, °С	Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)			
	воздух	L_1	L_2	L_3
0–100	0,0283	0,0849	0,0853	0,0856
100–200	0,0357	0,1075	0,1081	0,1086
200–300	0,0427	0,1288	0,1300	0,1309
300–400	0,0491	0,1485	0,1503	0,1518
400–500	0,0548	0,1662	0,1687	0,1710
500–600	0,0599	0,1825	0,1859	0,1893
600–700	0,0647	0,1981	0,2029	0,2075
700–800	0,0695	0,2137	0,2202	0,2264
800–900	0,0741	0,2293	0,2377	0,2458
900–1000	0,0785	0,2449	0,2556	0,2660

В зависимости от сечения фракталоподобного элемента с учетом радиационного теплообмена наибольшее расхождение расчетных значений составляет 8 %. Следовательно, при расчете температурного поля трехмерного тела следует учитывать анизотропность эффективного коэффициента теплопроводности.

На основе полученных параметров построены графики изменения эффективного коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры нагрева фракталоподобного элемента и различных видов сечения (рис. 5).

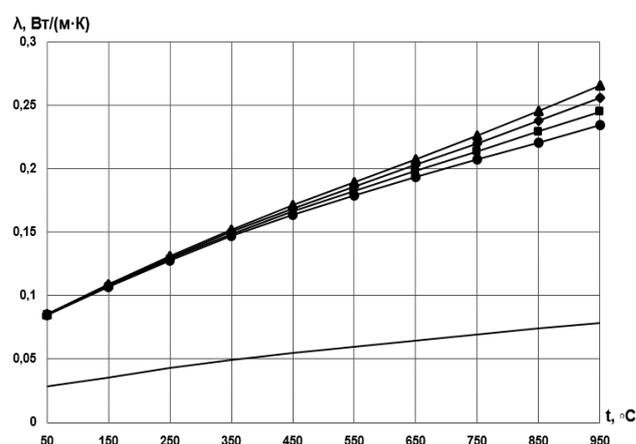


Рис. 5. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температур, находящихся в различных диапазонах: — — для воздуха; ● — без учета радиационного теплообмена с сечением по средней линии L_1 ; с учетом радиационного теплообмена с сечением: ■ — по средней линии L_1 ; ◆ — по малой диагонали куба L_2 ; ▲ — по большей диагонали L_3

Анализ данных табл. 3 показал, что при высоких температурах влияние радиационного теплообмена возрастает. Наибольшее расхождение значений эффективного коэффициента теплопроводности без учета радиационного теплообмена и с его учетом превышает 12 %.

При относительно невысоких температурах до 400 °С радиационный теплообмен слабо влияет на эффективный коэффициент теплопроводности. При температурах свыше 400 °С он начинает оказывать существенное влияние [6].

Выводы. Полученные в программном пакете Comsol Multiphysics одномерные расчетные модели обладают достаточной точностью для инженерного анализа.

Результаты расчета и расчетные модели, полученные с использованием предложенной методики определения эффективного коэффициента теплопроводности на основе фракталоподобной структуры, показывают, что при высоких температурах наблюдаются значительные отличия значений эффективных коэффициентов теплопроводности от справочных (экспериментальных). Радиационный теплообмен в порах необходимо учитывать через эффективные коэффициенты плотности, теплоемкости, теплопроводности.

Использованная методика может применяться для математического моделирования процессов теплообмена теплоэнергетических объектов при расчете температурных полей и определении режимов нагрева. Эффективность методики заключается в снижении времени расчетов и затрат на проведение физических экспериментов.

Представленные результаты могут применяться в энергетической сфере, на ТЭС и АЭС, в частности в таблетках тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) активной зоны реактора, где присутствуют высокие температуры.

Список литературы

1. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. – М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. 656 с.
2. **Разработка** модели по определению температурного поля ТВЭЛ в двумерной постановке задачи / В.А. Горбунов, Н.Б. Иванова, Н.А. Лоншаков, Я.В. Белов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 174–184.

3. **Горбунов В.А., Андрианов С.Г., Коновальцева С.С.** Оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей ТВЭЛ различного конструктивного исполнения // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 2. – С. 23–31. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.023-031

4. **Головин Н.Н., Зарубин В.В., Кувыркин Г.Н.** Оценки эффективного коэффициента теплопроводности композита, модифицированного фуллеренами // Композиты и наноструктуры. – 2012. – № 4. – С. 15–22.

5. **Перевезенцев Г.А., Горбунов В.А., Колибаба О.Б.** Метод фрактального моделирования насыпной садки при ее нагреве в термической печи // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2017. – № 1. – С. 84–87.

6. **Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А.** Фрактальная модель насыпной садки при ее нагреве в термической печи // Труды VIII Междунар. науч.-практич. конф. «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования печей». – М.: Изд. дом МИСиС, 2016. – С. 141–146.

7. **Поляков А.Ф.** Теплообмен в пористой металлической оболочке // Тепловые процессы в технике. – 2010. – № 10. – С. 466–470.

8. **Божокин С.В., Паршин Д.А.** Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.

9. **Кроновер Р.М.** Фракталы и хаос в динамических системах. – М.: Постмаркет, 2000.

10. **Экспериментальное** исследование влияния фильтрации на температурное поле насыпной садки / Г.А. Перевезенцев, В.А. Горбунов, О.Б. Колибаба, А.Е. Потехин // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 5. – С. 37–41. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.037-041.

11. **Тихомиров В.П., Горленко О.А., Измеров М.А.** Протекание через фрактальную пористую среду // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13. – № 4–3. – С. 879–883.

12. **Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 5.4.** – 2018. – 702 с. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.he at/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>

References

1. Mandel'brot, B. *Fraktal'naya geometriya prirody* [Fractal geometry of nature]. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2002. 656 p.
2. Gorbunov, V.A., Ivanova, N.B., Lonshakov, N.A., Belov, Ya.V. *Razrabotka modeli po opredeleniyu temperaturnogo polya tvela v dvumernoy postanovke zadachi* [Development of model for determination of temperature fields of fuel rods in two-dimensional formulation of the problem]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2019, no. 2, pp. 174–184.

3. Gorbunov, V.A., Andrianov, S.G., Konoval'tseva, S.S. Otsenka vliyaniya radiatsionnogo teploobmena na parametry temperaturnykh poley tvelov razlichnogo konstruktivnogo ispolneniya [Assessment of radiation heat transfer influence on parameters of temperature fields of various design fuel rods]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 2, pp. 23–31. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.023-031.

4. Golovin, N.N., Zarubin, V.V., Kuvyrkin, G.N. Otsenki effektivnogo koeffitsienta teploprovodnosti kompozita, modifitsirovannogo fullerenami [Estimates of the effective coefficient of thermal conductivity of a composite modified with fullerenes]. *Kompozity i nanostruktury*, 2012, no. 4, pp. 15–22.

5. Perevezentsev, G.A., Gorbunov, V.A., Kolibaba, O.B. Metod fraktal'nogo modelirovaniya nasypnoy sadki pri ee nagreve v termicheskoy pechi [Method of fractal modelling of the bulk tank heated in a heat-treating furnace]. *Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii «Chernaya metallurgiya»*, 2017, no. 1, pp. 84–87.

6. Perevezentsev, G.A., Kolibaba, O.B., Gorbunov, V.A. Fraktal'naya model' nasypnoy sadki pri ee nagreve v termicheskoy pechi [Fractal model of a bulk tank when it is heated in a thermal furnace]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Energoeffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii v pro-myshlennosti. 100 let otechestvennogo proektirovaniya pechey»* [Proceedings of the VIII International scientific-practical

conference “Energy-efficient and resource-saving technologies in industry. 100 years of domestic design of furnaces”]. Moscow: Izdatel'skiy Dom MISiS, 2016, pp. 141–146.

7. Polyakov, A.F. Teploobmen v poristoy metallicheskoj obolochke [Heat transfer in a porous metal shell]. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2010, no. 10, pp. 466–470.

8. Bozhokin, S.V., Parshin, D.A. *Fraktaly i mul'tifraktaly* [Fractals and multifractals]. Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2001. 128 p.

9. Kronover, R.M. *Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh* [Fractals and chaos in dynamic systems]. Moscow: Postmarket, 2000.

10. Perevezentsev, G.A., Gorbunov, V.A., Kolibaba, O.B., Potekhin, A.E. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya fill'tratsii na temperaturnoe pole nasypnoy sadki [Experimental study of filtration influence on temperature field of bulked batch]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 5, pp. 37–41. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.037-041.

11. Tikhomirov, V.P., Gorlenko, O.A., Izmerov, M.A. Protekanie cherez fraktal'nuyu poristuyu sredu [Flow through a fractal porous medium]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2011, no. 4–3, vol. 13, pp. 879–883.

12. *Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 5.4*. 2018. 702 p. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>