

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ВНУТРИТРУБНОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО СВС

Р.А. Садыков, В.И. Потапов, А.А. Ермоленко, Е.А. Трофимов

Разработана и реализована в форме программы для ЭВМ модель теплообмена между смесью для СВС и стенкой металлической трубы, реализующегося в ходе получения слоистых металлокерамических труб посредством центробежного СВС.

Ключевые слова: теплообмен, математическое моделирование, СВС-металлургия, центробежное СВС-литье.

Способ получения композиционных слоистых металлокерамических труб с внешним металлическим и внутренним керамическим слоями с помощью реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) разработан в 70-х годах прошлого века. Основоположниками этого направления стали классики применения метода СВС: Osamu Odawara (Япония) и А.Г. Мержанов с сотрудниками (СССР).

Стальные композиционные трубы, покрытые внутренним слоем металлокерамики, используются для транспортировки абразивных материалов в угольной и металлургической промышленности, теплоэнергетике и т. п., поскольку обладают устойчивостью к эрозии, коррозии, механическому износу, нагреву [1–3].

Чтобы с помощью метода центробежного СВС получить покрытие, удовлетворяющее эксплуатационным требованиям, необходимо обеспечить оптимальные условия его синтеза. Поэтому возникает необходимость создания математической модели процесса нанесения внутритрубного покрытия методом центробежного СВС, которая бы учитывала все множество теплофизических и физико-химических параметров, формирующих это покрытие.

В работе [4] при создании математической модели было принято, что теплообмен происходит только радиально, и не учитывалась скорость фронта волны горения, от которого во многом зависят условия протекания процесса. Задачей настоящего исследования стала разработка математической модели центробежного СВС, учитывающей теплофизические факторы процесса, в том числе скорость распространения фронта горения.

В процессе формирования покрытия методом центробежного СВС по длине трубы образуется три области: сухой смеси, жидкой и твердой фазы покрытия. В общем виде математическая модель распределения температур в ходе центробежного СВС должна учитывать теплообмен между среда-

ми: порошкообразной смесью для СВС; твердой фазой, образующей покрытие; жидкой фазой, металлом стенки трубы, а также газовой фазой внутри трубы и снаружи.

В настоящей работе представлена методика, использовавшаяся для моделирования теплообмена между стенкой трубы и смесью для СВС в процессе прохождения фронта горения вдоль трубы [5, 6].

При составлении математического описания процесса теплообмена сделаны следующие допущения: толщина слоя смеси СВС постоянна по радиусу и по длине трубы, теплофизические параметры сред постоянны и не зависят от температуры, фронт волны горения распространяется в режиме устойчивого, стационарного горения (в поршневом режиме).

С учетом принятых допущений уравнения энергии для стенки трубы и смеси, начальные и граничные условия примут вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{ct}}{\partial t} = \chi_{ct,s1} (T_{s1} - T_{ct}) + \\ + \chi_{ct,cm} (T_{cm} - T_{ct}) + a_{ct} \frac{\partial^2 T_{ct}}{\partial x^2}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{cm}}{\partial t} + v_r \frac{\partial T_{cm}}{\partial x} = \chi_{cm,ct} (T_{ct} - T_{cm}) + \\ + \chi_{cm,s2} (T_{s2} - T_{cm}) + a_{cm} \frac{\partial^2 T_{cm}}{\partial x^2} + \frac{Q}{c_{cm} \rho_{cm}}; \end{cases} \quad (2)$$

$$T_{ct}(x, 0) = \varphi_{ct}(x), \quad T_{cm}(x, 0) = \varphi_{cm}(x); \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_{ct}(0, t) = \Phi_{ct}(t), \quad T_{cm}(0, t) = \Phi_{cm}(t); \\ \lambda_{ct} \frac{\partial T_{ct}(0, t)}{\partial x} = \alpha_{ct,cm} (T_{ct}(0, t) - T_{cm}(0, t)); \\ \lambda_{cm} \frac{\partial T_{cm}(0, t)}{\partial x} = \alpha_{cm,ct} (T_{cm}(0, t) - T_{ct}(0, t)), \end{cases} \quad (3)$$

где T_{ct} , T_{cm} , T_{s1} , T_{s2} – температуры стенки, смеси, окружающей среды снаружи и внутри трубы соответственно;

$$\chi_{ст,с1} = \frac{\alpha_{ст,с1} P_{ст,с1}}{\rho_{ст} c_{ст} S_{ст}}; \chi_{ст,см} = \frac{\alpha_{ст,см} P_{ст,см}}{\rho_{ст} c_{ст} S_{ст}};$$

$$\chi_{см,с2} = \frac{\alpha_{см,с2} P_{см,с2}}{\rho_{см} c_{см} S_{см}}; \chi_{см,ст} = \frac{\alpha_{см,ст} P_{см,ст}}{\rho_{см} c_{см} S_{см}};$$

$a_{ст}, a_{см}$ – теплопроводности стенки, смеси;

v_f – скорость продвижения фронта горения;

$\alpha_{ст,с1}, \alpha_{ст,см}, \alpha_{см,с2}, \alpha_{см,ст}$ – коэффициенты теплоотдачи от стенки к внешней окружающей среде, от стенки к смеси, от смеси к внутренней окружающей среде, от смеси к стенке;

$P_{ст,с1}, P_{ст,см}, P_{см,с2}, P_{см,ст}$ – периметры раздела между стенкой и внешней окружающей средой, между стенкой и смесью, между смесью и внутренней окружающей средой, между смесью и стенкой;

$\rho_{ст}, \rho_{см}$ – плотности стенки, смеси;

$c_{ст}, c_{см}$ – удельные теплоемкости стенки, смеси;

$S_{ст}, S_{см}$ – площади поперечного сечения стенки трубы и смеси;

Q – мощность источника энергии;

$\lambda_{ст}, \lambda_{см}$ – теплопроводность стенки трубы, смеси.

Точный расчет количества теплоты, выделяющейся в процессе СВС, достаточно сложен, так как количество выделяющейся теплоты будет существенно зависеть от температуры протекающего процесса. Представление о характере и количественных характеристиках измерений, происходящих с величиной теплового эффекта в ходе повышения температуры процесса, дает информация, представленная на рис. 1, которая получена с помощью баз данных FactSage, представленных в открытом доступе (<http://www.crct.polymtl.ca/fact/>).

Упрощенно можно рассчитать тепловой эффект реакции как сумму средневзвешенных значений тепловых эффектов реакций алюминия с оксидами в составе смеси.

Для численного решения краевой задачи (1)–(3) использовали метод конечных разностей. Систему (1), условия (2), (3) представили в дискретном блочно-матричном виде:

$$T_m^{n+1} = MT_m^n + NT_S + Q_S + I, \quad (4)$$

где $T_m^{n+1}, M, T_m^n, N, T_S, Q, I$ – блочные матрицы вида:

$$T_m^{n+1} = \begin{bmatrix} \theta_1^{n+1} \\ \theta_2^{n+1} \\ \vdots \\ \theta_{m-1}^{n+1} \\ \theta_m^{n+1} \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} F & G & \dots & \dots & 0 \\ A & F & C & \dots & 0 \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ 0 & \dots & A & F & C \\ 0 & \dots & \dots & G & F \end{bmatrix},$$

$$T_m^n = \begin{bmatrix} \theta_1^n \\ \theta_2^n \\ \vdots \\ \theta_{m-1}^n \\ \theta_m^n \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} E & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & E & \dots & \dots & 0 \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ 0 & \dots & \dots & E & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & E \end{bmatrix},$$

$$T_S = \begin{bmatrix} \theta_S \\ \theta_S \\ \vdots \\ \theta_S \\ \theta_S \end{bmatrix}, \quad Q_S = \begin{bmatrix} \Psi \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_2 \end{bmatrix}.$$

Элементы блочных матриц – матрицы коэффициентов $\theta_m^n, \theta_m^{n+1}, A, G, E, F, C, \Psi, \theta_S, I_1, I_2$ имеют следующий вид:

$$\theta_m^n = \begin{bmatrix} \Theta_{стм}^n \\ \Theta_{смм}^n \end{bmatrix}, \quad \theta_m^{n+1} = \begin{bmatrix} \Theta_{стм}^{n+1} \\ \Theta_{смм}^{n+1} \end{bmatrix}, \quad \theta_S = \begin{bmatrix} T_{s1} \\ T_{s2} \end{bmatrix},$$

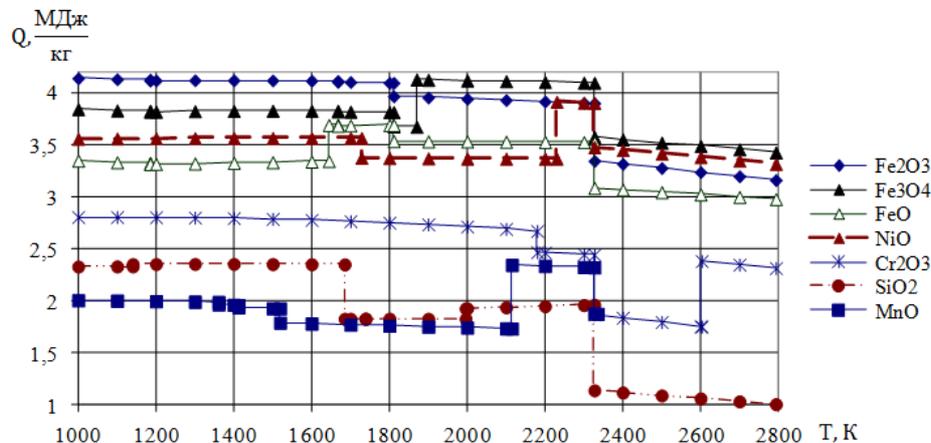


Рис. 1. Зависимость количества теплоты, выделяющейся в ходе реакции алюмотермического восстановления из одного килограмма стехиометрических смесей на основе различных оксидов, от температуры процесса

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\tau a_{CT}}{h^2} & 0 \\ 0 & \frac{\tau a_{CM}}{h^2} + \frac{\tau v_{\Gamma}}{2h} \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \tau \chi_{CT,s1} & 0 \\ 0 & \tau \chi_{CM,s2} \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 - \tau \chi_{CT,s1} - \tau \chi_{CT,CM} - \frac{2\tau a_{CT}}{h^2} & \tau \chi_{CT,CM} \\ \tau \chi_{CM,CT} & 1 - \tau \chi_{CM,s2} - \tau \chi_{CM,CM} - \frac{2\tau a_{CM}}{h^2} \end{bmatrix},$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0 \\ Q \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \frac{2\tau a_{CT}}{h^2} & 0 \\ 0 & \frac{2\tau a_{CM}}{h^2} \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\tau a_{CT}}{h^2} & 0 \\ 0 & \frac{\tau a_{CM}}{h^2} - \frac{\tau v_{\Gamma}}{2h} \end{bmatrix},$$

$$I_1 = \begin{bmatrix} \frac{\tau a_{CT} \alpha_{CT,CM}}{h \lambda_{CM}} (\Theta_{CT1}^n - \Theta_{CM1}^n) \\ \frac{h \alpha_{CM,CT}}{\lambda_{CM}} \left(\frac{\tau a_{CM}}{h^2} - \frac{\tau v_{\Gamma}}{2h} \right) (\Theta_{CM1}^n - \Theta_{CT1}^n) \end{bmatrix},$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} \frac{\tau a_{CT} \alpha_{CT,CM}}{h \lambda_{CM}} (\Theta_{CTm}^n - \Theta_{CMm}^n) \\ \frac{h \alpha_{CM,CT}}{\lambda_{CM}} \left(\frac{\tau a_{CM}}{h^2} + \frac{\tau v_{\Gamma}}{2h} \right) (\Theta_{CMm}^n - \Theta_{CTm}^n) \end{bmatrix}.$$

Для адаптации математической модели использовали интервальный метод для определения параметра c_{CM} .

Построенная модель теплообмена между смесью для СВС и стенкой трубы реализована в виде программы для ЭВМ, написанной на языке программирования С# с использованием возможностей параллельного программирования. Программа позволяет рассчитывать распределение температур сред, контактирующих в ходе процесса СВС по длине трубы, в зависимости от времени, прошедшего с момента начала процесса (примеры результатов таких расчетов, проведенных для условий, представленных в таблице, показаны на рис. 2–4).

В процессе дальнейших работ по созданию полной модели процесса планируется разработать модели других частных процессов теплообмена, реализующихся в процессе СВС, а затем объединить их.

Данные, использованные в процессе расчета

| Параметры | | Стенка | Смесь СВС | |
|-----------------|---|------------------------------|--------------------|--------------------|
| Теплофизические | Плотность, кг/м ³ | 7800 | 4000 | |
| | Теплоемкость, Дж/(кг·К) | 500 | 1000 | |
| | Теплопроводность, Вт/(м·К) | 47 | 1,00 | |
| | Теплопередача, Вт/(м ² ·К) | Внешняя среда Труба/Смесь | 1000 30 000 | 10000 30 000 |
| Геометрические | Внешний радиус трубы, м | 0,15 | | |
| | Внутренний радиус трубы/внешний радиус смеси, м | 0,14 | 0,14 | |
| | Внутренний радиус смеси, м | – | 0,09481 | |
| | Периметр раздела сред, м | Внешняя среда Труба/Смесь | 0,94248 0,87964 | 0,59573 0,87964 |
| | Площадь сечения, м ² | 0,00911 | 0,03333 | |
| Механические | Скорость горения, мм/с | – | 20,0 | |
| | Скорость вращения, мм/с | 1500 | 1500 | |

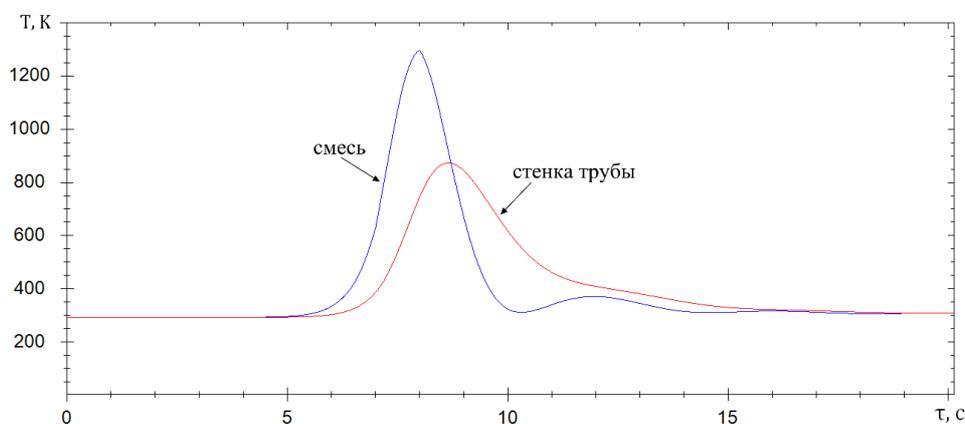


Рис. 2. Пример результатов расчета распределения температур взаимодействующих сред в сечении трубы ($x = 0,15$ м) в зависимости от времени, прошедшего от начала процесса

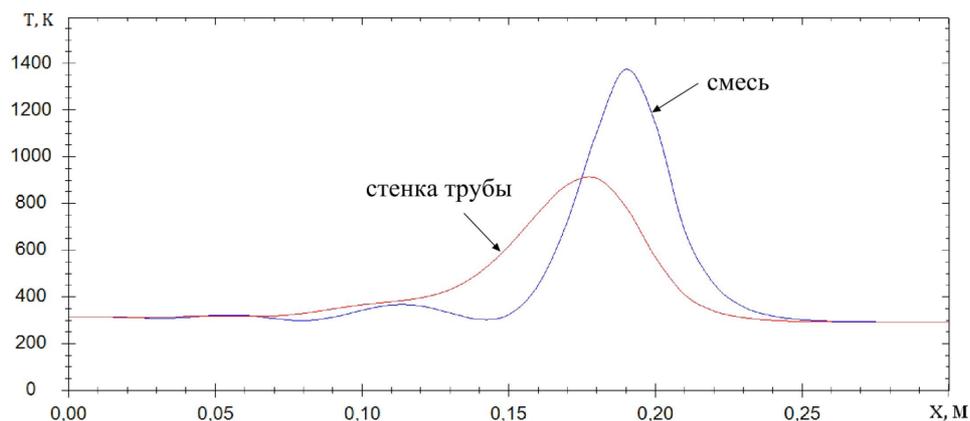


Рис. 3. Пример результатов расчета распределения температур взаимодействующих сред вдоль трубы спустя 10 с от начала процесса

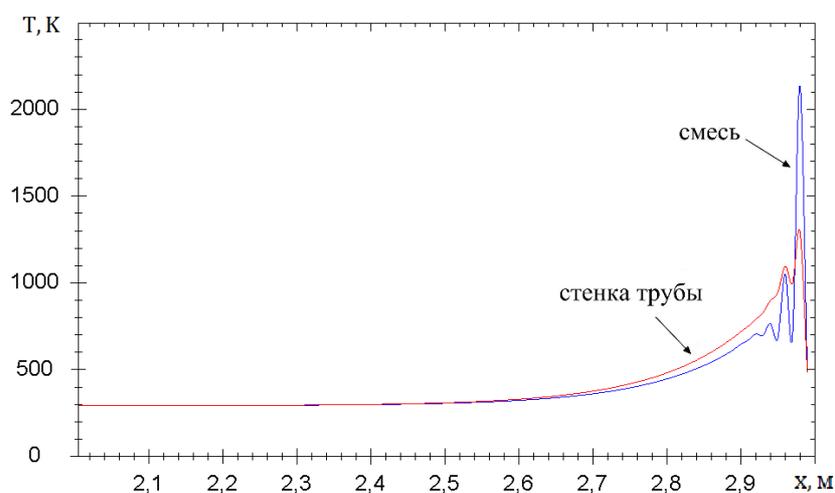


Рис. 4. Пример результатов расчета распределения температур взаимодействующих сред вдоль трубы спустя 150 с от начала процесса

Выводы

В рамках работ по построению теплофизической математической модели процесса получения слоистых металлокерамических труб с внешним металлическим и внутренним керамическим слоями с помощью СВС разработана и реализована в форме программы для ЭВМ модель теплообмена между смесью для СВС и стенкой металлической трубы.

Часть работы, связанная с термохимическими расчетами процесса СВС, выполнена при поддержке РФФИ, грант № 13-08-00545.

Литература

1. Концепция развития СВС как области научно-технического прогресса / под ред. А.Г. Мерджанова. – Черноголовка: Территория, 2003. – 368 с.
2. Мерджанов, А.Г. Твердопламенное горение / А.Г. Мерджанов, А.С. Мукасян. – М.: Торус Пресс, 2007. – 336 с.
3. Санин, В.Н. СВС-металлургия труб с износостойким защитным покрытием с использовани-

ем техногенных отходов металлургических производств / В.Н. Санин, Д.Е. Андреев, В.И. Юхвид // Изв. высш. учеб. заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2011. – № 2. – С. 37–43.

4. Wang, Y.-F. Finite element analysis of residual thermal stress in ceramic-lined composite pipe prepared by centrifugal-SHS / Yu-Fei Wang, Zhen-Guo Yang // Materials Science and Engineering: A. – 2007. – Vol. 460–461. – P. 130–134.

5. Потапов, В.И. Математические модели теплофизических процессов в объектах многослойной структуры: моногр. / В.И. Потапов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 270 с.

6. Ермоленко, А.А. Математическая модель теплообмена при нанесении внутритрубного покрытия методом центробежного СВС / А.А. Ермоленко, Р.А. Садыков, В.И. Потапов // Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. «Современные научные достижения – 2013». Т. 68. Секция: Математика / Издат. дом «Образование и наука». – Прага, 2013. – 72 с.

Садыков Руслан Артурович, инженер кафедры математики и вычислительной техники, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте. 456209, Челябинская обл., г. Златоуст, ул. Тургенева, 16. Тел.: (3513)665869. E-mail: guslan-666@inbox.ru.

Потапов Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры математики и вычислительной техники, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте. 456209, Челябинская обл., г. Златоуст, ул. Тургенева, 16. Тел.: (3513)665869. E-mail: potap-v@mail.ru.

Ермоленко Андрей Александрович, директор ООО «ВХЗ-Урал». E-mail: ermolenko.andrey@gmail.com.

Трофимов Евгений Алексеевич, кандидат химических наук, доцент кафедры общей металлургии, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте. 456209, Челябинская обл., г. Златоуст, ул. Тургенева, 16. Тел.: (3513)665829. E-mail: tea7510@gmail.com.

THERMOPHYSICAL MODELING OF APPLICATION-TUBE COATING BY CENTRIFUGAL SHS

R.A. Sadykov, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Chelyabinsk region, Russian Federation, ruslan-666@inbox.ru,

V.I. Potapov, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Chelyabinsk region, Russian Federation, potap-v@mail.ru,

A.A. Ermolenko, VHZ-Ural Ltd, Chelyabinsk, Russian Federation, ermolenko.andrey@gmail.com,

E.A. Trofimov, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Chelyabinsk region, Russian Federation, tea7510@gmail.com

A model of heat transfer between a SHS mixture and the wall of the metal tube that realizing during the preparation of layered metal-ceramic tubes by centrifugal SHS is developed and implemented in the form of a computer program.

Keywords: heat transfer, mathematical modeling, SHS metallurgy, centrifugal SHS casting.

References

1. *Kontseptsiya razvitiya SVS kak oblasti nauchno-tekhnicheskogo progressa* [The Concept of SHS as a Field of Scientific and Technical Progress] Ed. by A.G. Merzhanova. Chernogolovka, Territoriya, 2003. 368 p.

2. Merzhanov A.G., Mukas'yan A.S. *Tverdoplamennoe gorenie* [Solid-Flame Combustion]. Moscow, Torus Press, 2007. 336 p.

3. Sanin V.N., Andreev D.E., Yukhvid V.I. SHS Metallurgy Tubes with Wear-resistant Protective Coating with the Use of Industrial Waste Iron and Steel Industries [SVS-metallurgiya trub s iznosostoykim zashchitnym pokrytiem s ispol'zovaniem tekhnogennykh otkhodov metallurgicheskikh proizvodstv]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*, 2011, no. 2, pp. 37–43.

4. Wang Y.-F., Yang Z.-G. Finite Element Analysis of Residual Thermal Stress in Ceramic-Lined Composite Pipe Prepared by Centrifugal-SHS. *Materials Science and Engineering A*, 2007, vol. 460–461, pp. 130–134. doi: 10.1016/j.msea.2007.01.017.

5. Potapov V.I. *Matematicheskie modeli teplofizicheskikh protsessov v ob"ektakh mnogosloynnoy struktury* [Mathematical Models of Thermal Processes in the Objects of the Multilayer Structure]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2004. 270 p.

6. Ermolenko A.A., Sadykov R.A., Potapov V.I. Mathematical Model of Heat Transfer for Application-Tube Coating by Centrifugal SHS [Matematicheskaya model' teploobmena pri nanesenii vnuritrubnogo pokrytiya metodom tsentrobezhnogo SVS]. *Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennye nauchnye dostizheniya – 2013". Tom 68. Sektsiya: Matematika* [Proceedings of the IX International Scientific-Practical Conference "Modern Scientific Achievements – 2013". Vol. 68. Section: Mathematics]. Praga, Education and Science, 2013, p. 72.

Поступила в редакцию 19 сентября 2013 г.