

УДК 699.042

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ С ПОДОВЫМИ КАНАЛАМИ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕЕ РАБОТЫ

Г.А. ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ, В.А. ГОРБУНОВ, О.Б. КОЛИБАБА
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: mkandy@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Основным звеном металлообрабатывающей, машиностроительной и других отраслей промышленности являются нагревательные и термические печи. Массив заготовок, загружаемых в печь, представляет собой насыпные садки, характеризующиеся различными параметрами. Существующие конструкции нагревательных печей имеют ряд недостатков, одним из которых является отсутствие фильтрации теплоносителя в вертикальном направлении. Такой особенностью обладает разработанная конструкция садочной печи с подовыми каналами. Целью работы является разработка и исследование параметров математической модели процесса нагрева насыпной садки в термической печи с подовыми каналами.

Материалы и методы. Описана и исследована математическая модель садочной термической печи, оборудованной специальными подовыми каналами. Модель насыпной садки построена на основе фрактальной структуры, в частности губки Менгера. Для решения задачи по определению температурного поля насыпной садки используется численный расчет теплообмена на основе конечно-разностного метода, называемого также методом сеток.

Результаты. Предложена новая конструкция садочной печи с подовыми топками. В результате математического моделирования процесса нагрева получена графическая зависимость, отражающая температурное поле насыпной садки на поверхности и в тепловом центре. Проведено сравнение температурного режима нагрева садки при обычных условиях и при организации дополнительной фильтрации теплоносителя через каналы из подовых топок в подину печи.

Выводы. Достоверность результатов обеспечивается согласованием результатов численного моделирования с результатами физического эксперимента. Погрешность составляет не более 10 %. Повышение эффективности работы термической печи достигается за счет организации дополнительной фильтрации теплоносителя через специальные каналы в поду печи. Полученная математическая модель может быть использована для расчета различных тепловых режимов нагрева в садочных печах и разработки технологических карт нагрева садок с различным значением порозности.

Ключевые слова: математическая модель, термическая печь, теплообмен в пористых телах, эффективная теплопроводность, подовый канал, насыпная садка, фильтрация теплоносителя, фрактал, порозность

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF HEAT-TREATING FURNACES WITH SOLE FLUES AND A NUMERICAL STUDY OF ITS OPERATION PARAMETERS

G.A. PEREVEZENTSEV, V.A. GORBUNOV, O.B. KOLIBABA
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: mkandy@mail.ru

Abstract

Background. The main element of metalworking, engineering and other industries is heating and heat-treating furnaces. An array of workpieces that are loaded into the furnace includes bulk tanks with different parameters. The existing designs of heating furnaces have a number of disadvantages, one of which is the lack of heat carrier filtration in the vertical direction. However, this feature can be found in the developed design of the batch furnace with sole flues. The aim of the work is to develop and study the parameters of a mathematical model of the heating process of a bulk tank in a heat-treating furnace with sole flues.

Materials and methods. The paper describes and studies a mathematical model of a heat-treating furnace equipped with special sole flues. The bulk tank model is built based on a fractal structure, in particular the

Menger sponge. To solve the problem of determining the temperature field of the bulk tank, we used a numerical calculation of heat exchange based on the finite-difference method, also called the grid method.

Results. For this purpose, a new design of the batch furnace with hearth chambers has been proposed. As a result of mathematical modeling of the heating process, we have obtained a graph reflecting the temperature field of the bulk tank on the surface and in the heating center. We have also compared the temperature regime of bulk tank heating under normal conditions and in conditions of additional heat carrier filtration through the flues from the hearth chambers to the furnace hearth.

Conclusions. The reliability of the results is confirmed by comparing the numerical simulation results and the results of the physical experiment. The error is not more than 10 %. The efficiency of the heat-treating furnace is improved by additional heat carrier filtration through special channels in the furnace sole. The obtained mathematical model can be used to calculate different heating modes in heat-treating furnaces and to develop technological maps of heating bulk tanks with different porosity values.

Key words: mathematical model, heat-treating furnace, heat exchange in porous bodies, effective heat conductivity, sole flue, bulk tank, heat carrier filtration, fractal, porosity

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.4.022-030

Введение. Основным звеном металлообрабатывающей, машиностроительной и других отраслей промышленности являются нагревательные и термические печи. Для улучшения структуры и придания заданных свойств (прочности, твердости, износоустойчивости и т. п.), необходимых для конкретных условий производства, выполняется термическая обработка металлов.

Зачастую 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 [1].

От классического теплообмена однородных сплошных сред теплообмен в пористых материалах отличается наличием поправки на значение порозности, означающей, что применение закона Фурье в таких средах является условным. Коэффициент теплопроводности, а также плотность и теплоемкость в пористых телах зависят как от величины порозности, так и от структуры пор. Исследователи предлагают различные подходы к определению параметров описания процессов теплообмена в пористых средах, в которых, как правило, пористая структура рассматривается как однородное тело.

Расчет процессов теплообмена в пористых телах обычно сводится к поиску эффективных теплофизических свойств, что подразумевает описание тела как условно однородного с эффективными теплофизическими свойствами. Если по-

иск эффективной плотности и теплоемкости не вызывает проблем, то определение эффективной теплопроводности является затруднительным процессом.

Существует два подхода к описанию закономерностей теплообмена в пористых телах. В первом случае реальная структура заменяется ее моделью – условным квазиоднородным изотропным пористым телом с усредненными величинами порозности, температуры, давления и т. д. Такому условному пористому телу приписывают непрерывное температурное поле и условные эффективные теплофизические коэффициенты: эффективный коэффициент удельной теплоемкости c_3 и эффективный коэффициент теплопроводности λ_3 , также полагают, что температуры газа в порах и материале мало отличаются друг от друга, их принимают одинаковыми:

$$c_3(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = -wf \rho_T c_T \nabla T + \text{div}(\lambda_3(T) \cdot \nabla T), \quad (1)$$

где w – скорость фильтрации газа, м/с; f – значение порозности; c_T – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·град); ρ_T – плотность газа, кг/м³; $c_3(T)$ – эффективный коэффициент теплоемкости, Дж/(м³·град); $\lambda_3(T)$ – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Во втором случае теплообмен описывают системой дифференциальных уравнений:

• для твердого элемента тела простейшей формы:

$$c_m(T_m) \cdot \rho_m(T_m) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{x^k} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T_m) x^k \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (2)$$

- баланса тепла газов

$$c_{\Gamma}(T_{\Gamma}) \cdot \rho_{\Gamma}(T_{\Gamma}) \cdot \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial \tau} - w_{\Gamma}(\tau) \cdot c_{\Gamma}(T_{\Gamma}) \cdot \rho_{\Gamma}(T_{\Gamma}) \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial y} = \quad (3)$$

$$= \alpha(T_{\Gamma} - T_{\text{М}}) \omega F,$$

где x – координата по толщине элемента слоя, м; y – координата по высоте слоя, м; w_{Γ} – скорость фильтрации газа, м/с; ω – поверхность материала в единице объема слоя, м²/м³; k – коэффициент формы тела; T_{Γ} , $T_{\text{М}}$ – температуры газа и материала соответственно, К; $c_{\text{М}}$ – средняя удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град); c_{Γ} – средняя удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·град); $\rho_{\text{М}}$ – плотность материала, кг/м³; ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м³; α – приведенный коэффициент теплоотдачи между газом и стенкой, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности материала, участвующая в теплообмене, м².

Использование при расчете температурных полей пористых тел как в первом, так и во втором подходе вызывает ряд затруднений. Прежде всего, это описание самой структуры пористого тела. Обычно при математическом моделировании исходят из того, что твердый «скелет» состоит из тел простейшей формы (шаров, цилиндров и т.д.). Отклонения от известных форм учитывают введением всевозможных поправок, которые на практике бывает трудно оценить [2].

Известные аналитические решения для расчета температурного поля пористого тела в форме пластины с фильтрацией теплоносителя, полученные О.Л. Рудых, В.Л. Мальтером, Д.П. Волковым [3, 4, 5], громоздки, их использование в инженерной практике затруднительно.

В работах российских ученых более 40 лет назад была распространена модель Ребиндера – Щукина – Марголис [6], при использовании которой пористое тело заменялось регулярными упаковками монодисперсных сфер.

Н.П. Гусенкова [7] предлагает математическую модель насыпной садки, в которой структура садки заменяется на изотропную пористую призму с эффективными теплофизическими свойствами.

На практике садка представляет собой хаотично расположенные в пространстве заготовки. Применение методов математического моделирования процесса

нагрева насыпной садки и, таким образом, решение задачи «в лоб» при точном описании геометрии затруднительно из-за сложности ее структуры.

Для решения этой задачи в настоящее время все большее распространение получают методы моделирования разнообразных структур на основе геометрии фрактального типа. Такое моделирование используется в различных отраслях промышленности, потому как фрактальная структура позволяет с большой степенью точности описать геометрическую топологию внутреннего пространства пористых тел. Эффективность применения фрактальной концепции заключается в том, что она позволяет не только отражать физические явления, происходящие в пористых структурах, но и дает возможность включать фрактальные параметры в дифференциальные уравнения, описывающие исследуемые физические явления.

Ф.В. Пелевин [8] применяет метод фрактального анализа для исследования структуры металлических материалов.

С.В. Федосеев, В.А. Горбунов [9] на основе пространственного аналога квадратного ковра Серпинского исследуют процессы фильтрации слоя твердых бытовых отходов.

Современные программно-расчетные комплексы позволяют производить моделирование процесса теплообмена и массообмена в телах любой структуры. Однако основная сложность заключается в точном воспроизведении неоднородности структуры насыпной садки и ее теплофизических характеристик при построении в САЕ-пакете.

Целью работы является математическое моделирование процесса нагрева насыпной садки в термической печи. В качестве модели насыпной садки предлагается использовать фрактальную структуру, построенную на основе губки Менгера.

Задачами исследования являются:

1. Доказать возможности применять фрактальную структуру при моделировании печей с загрузкой в виде насыпной садки в целях упрощения построения геометрической модели насыпной садки.
2. Сравнить результаты моделирования с физическим экспериментом.
3. Использовать математическую модель термической садочной печи с предложенной фрактальной структурой насып-

ной садки для снижения технически обоснованных норм расхода энергии на нагрев металла и повышения эффективности работы термических садочных печей.

Материалы и методы. В настоящем исследовании для унификации насыпных садок сложных форм предлагается применять в математической модели садочной термической печи геометрическую модель пористой садки, построенную на основе структуры фрактальной геометрии, в частности губки Менгера.

Построение губки Менгера является итерационной процедурой, включающей вырезание сквозных отверстий и последующее превращение каждого оставшегося кубика в 20 еще более мелких кубиков с размерами в три раза меньше исходного. Этот процесс может продолжаться до бесконечности, таким образом образуется идеально самоподобный объект. Геометрическая модель, построенная на основе фрактальной структуры губки Менгера, при бесконечном количестве итераций имеет нулевой объем и бесконечную площадь поверхности, что позволяет исследовать разнообразные структуры, значение порозности которых может изменяться в пределах от 0,2 до 0,8.

В качестве объекта исследования рассмотрена промышленная горизонтальная термическая печь с подовыми топками. Схема печи показана на рис. 1.

Исследуемая садка массой 5600 кг состояла из заготовок, выполненных из стали 45х, размещенных на поддонах. Так как поддоны в рабочем пространстве печи

располагались вплотную друг к другу, принимаем допущение, что в рабочем пространстве печи располагается единая насыпная садка с габаритными размерами $4 \times 1,7 \times 0,17$ м и порозностью $f = 0,6$.

В ходе промышленного эксперимента измеряли температуру печи T_n и температуру в самой холодной точке T_c (тепловой центр). Замер осуществляли термопарами типа ТХА ($d = 2,2$ мм). В качестве вторичного прибора использовали самопишущий потенциометр типа КСП.

Холодную садку (290 К) помещали в предварительно разогретую до 1160 К печь. Процесс сгорания газа осуществлялся в подовых топках, и далее продукты сгорания поступали в рабочее пространство печи, где происходила фильтрация теплоносителя с температурой 800 К через садку. Массовый расход теплоносителя изменялся в диапазоне 0–1220 кг/ч.

Поскольку эффективным способом интенсификации процессов теплообмена в насыпной садке является организация фильтрации газов [10], то предлагается организовать дополнительную фильтрацию теплоносителя сквозь объем садки в вертикальном направлении. Это возможно осуществить при помощи специальных топок, равномерно расположенных в подовом пространстве печи [11].

Повышение эффективности процесса нагрева достигается за счет того, что через специальные каналы, равномерно расположенные по поду, поступает теплоноситель, фильтрующийся через объем насыпной садки.

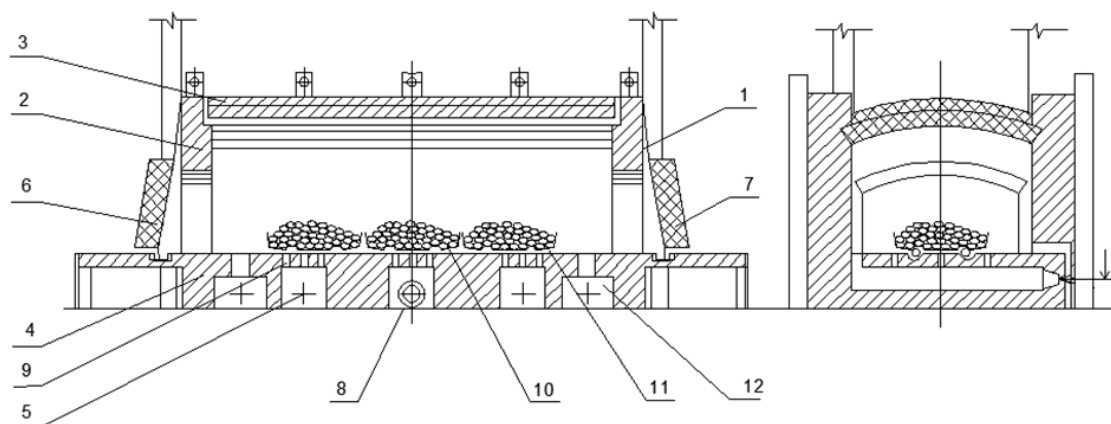


Рис. 1. Схема печи с каналами в подовых топках: 1 – наружная обмуровка печи; 2 – внутренняя обмуровка печи; 3 – верхняя обмуровка печи; 4 – подина печи; 5 – подовые топки; 6 – окно загрузки; 7 – окно выгрузки; 8 – газовые горелки; 9 – выводные каналы; 10 – поддоны; 11 – отверстия в поддонах для фильтрации; 12 – дымопады

Фильтрация теплоносителя через подовые каналы осуществляется обеспечением дополнительного сопротивления на выходе из основных дутьевых каналов. Продукты сгорания в рабочее пространство печи попадают из топки (5), расположенной в подовом пространстве. При движении продукты сгорания разделяются на 2 потока, один из которых продолжает движение в подовой топке, расположенной в поду рабочего пространства печи, а другой движется в перпендикулярном направлении по специальным каналам (9, 11) и в конечном итоге фильтруется сквозь объем насыпной садки.

В процессе исследования был использован пакет Ansys Fluent, в котором была построена математическая модель нагревательной газовой печи с подовыми топками, в которой насыпная садка была заменена на фракталоподобную структуру второго ранга разбиения [12]. Для упрощения математической модели приняты следующие допущения:

1. В печи используются горелки с активным перемешиванием воздуха и газа в камере. Факел у них короткий. Поэтому считаем, что из горелки истекает газовая смесь с завершённым процессом горения. Следовательно, в рабочей камере печи процесс горения отсутствует.

2. Продукты горения находятся в состоянии локального термодинамического равновесия.

3. Все тела, участвующие в теплообмене, являются серыми.

Математическая постановка задачи сводится к записи дифференциальных уравнений:

• для газа

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_i} = - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial P}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left([\mu + (\mu_T)_i] \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right), \quad (5)$$

$$i \neq j, \quad \rho = \rho_{\text{пр}}^0 \frac{273}{T};$$

$$\frac{\partial(\rho c_P T)}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial(\rho U_i c_P T)}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left([\lambda + (\lambda_T)_i] \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Sr; \quad (6)$$

• для металла

$$\frac{\partial(\rho_M c_P^M T_M)}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial x_i}); \quad (7)$$

• для кладки

$$\frac{\partial(\rho_{\text{кп}} c_P^{\text{кп}} T_{\text{кп}})}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_{\text{кп}} \frac{\partial T_{\text{кп}}}{\partial x_i}), \quad (8)$$

где ρ – плотность дымовых газов, кг/м³; τ – время, с; U_i, U_j – компоненты вектора скорости, м/с; x_i – координаты x, y, z , м; P – абсолютное давление, Па; μ – динамический коэффициент вязкости газа, Па·с; μ_T – динамический коэффициент турбулентной вязкости газа, Па·с; $\rho_{\text{пр}}^0$ – плотность продуктов горения при нормальных условиях, кг/м³; $\lambda, \lambda_M, \lambda_{\text{кп}}$ – коэффициент теплопроводности для газа, металла и кладки соответственно, Вт/(м·К); λ_T – коэффициент турбулентной теплопроводности, Вт/(м·К); c_P – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); T – абсолютная температура, К; $T_M, T_{\text{кп}}$ – температуры металла и кладки соответственно, К; Sr – источниковое слагаемое, учитывающее радиационный перенос, Вт/м³.

Начальные условия постановки задачи:

$$T_{\text{кп}}(x_{\text{кп}}, 0) = T_{\text{кп}}(0, 0) + \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^m b_{n,i}^{\text{кп}} \cdot x_{\text{кп},i}^n; \quad (9)$$

$$T_M(x_M, 0) = T_M(0, 0) + \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^m b_{n,i}^M \cdot x_{M,i}^n; \quad (10)$$

где $b_n^{\text{кп}}, b_n^M$ – коэффициенты аппроксимации начального температурного поля кладки и металла; x_i – текущая пространственная координата x, y, z , м.

Граничные условия:

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_{\text{кп}}(T_{\text{кп}}) \frac{\partial T_{\text{кп}}}{\partial x_i} = q_{\text{к,кп}} + q_{\text{л,кп}}; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_M(T_M) \frac{\partial T_M}{\partial x_i} = q_{\text{к,М}} + q_{\text{л,М}}, \quad (12)$$

где $q_{\text{к,кп}}, q_{\text{л,кп}}$ – конвективный и лучистый тепловые потоки на кладку, Вт/м²; $q_{\text{к,М}}, q_{\text{л,М}}$ – конвективный и лучистый тепловые потоки на металл, Вт/м²; x_i – координаты x, y, z , м.

Для уменьшения ресурсов численной модели было принято допущение, что тепловые процессы на центральной поперечной оси происходят симметрично, что позволило использовать при математическом моделировании только 1/2 рабочего пространства печи.

На рис. 2 показан общий вид геометрической модели исследуемой горизонтальной термической садочной печи с подовыми топками. Расположенные в боковых стенках каналы соответствуют каналам, ведущим из подовых топок.

Объем садки – $V_{\text{ТВ}} = 0,1468 \text{ м}^3$, объем воздушного пространства – $V_{\text{пор}} = 1,3036 \text{ м}^3$. Значение порозности данной модели составило $f = 0,6$, площадь поверхности пор составила $18,644 \text{ м}^2$.

Общий вид геометрической модели печи с расчетной сеткой показан на рис. 3. Количество элементов сетки – 2429943, количество расчетных узлов – 3065366.

Результаты исследования. В результате численного расчета было получено температурное поле садки при скоростях движения теплоносителя через до-

полнительные каналы, расположенные в поду печи, 0 и 0,05 м/с (рис. 4, 5).

На рис. 4,а приведено температурное поле, полученное математическим моделированием процесса нагрева насыпной садки в печи при отсутствии дополнительной фильтрации теплоносителя. Полученная картина показывает, что теплоноситель только омывает поверхность садки, процесс теплообмена в тепловом центре не эффективен. На рис. 4,б,в,г показано температурное поле, полученное при организации дополнительной фильтрации продуктов сгорания. Полученная картина свидетельствует о повышении интенсивности теплообмена внутри объема садки.

На рис. 5 показано температурное поле садки, полученное математическим моделированием с применением фрактальной модели и экспериментально.

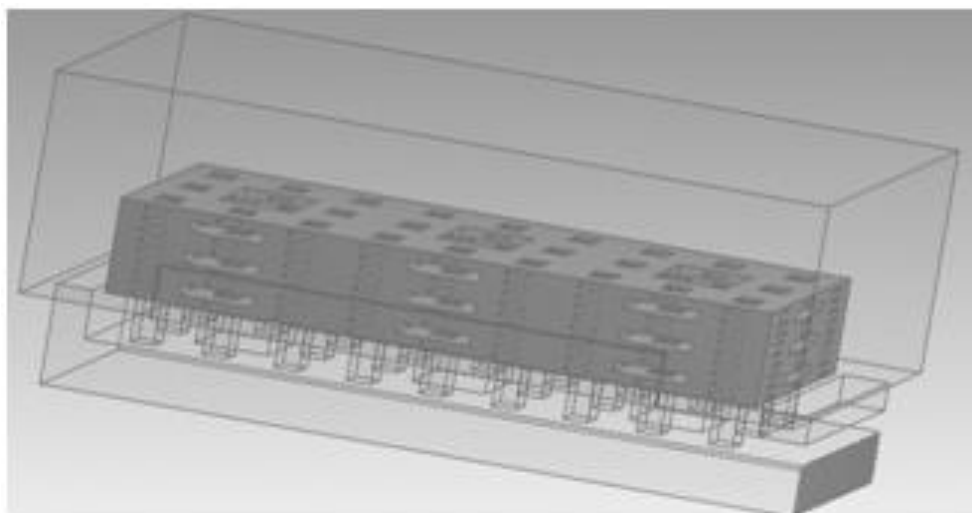


Рис. 2. Общий вид геометрической модели термической садочной печи

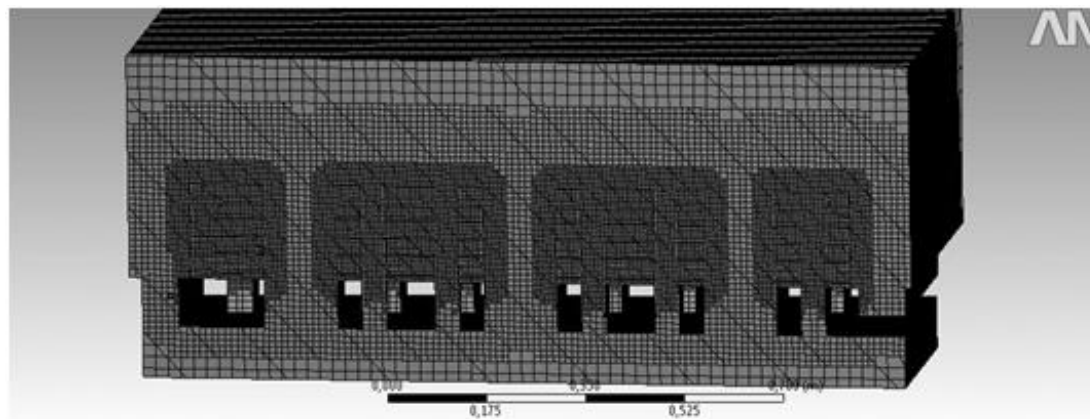


Рис. 3. Общий вид расчетной сетки (поперечный разрез)

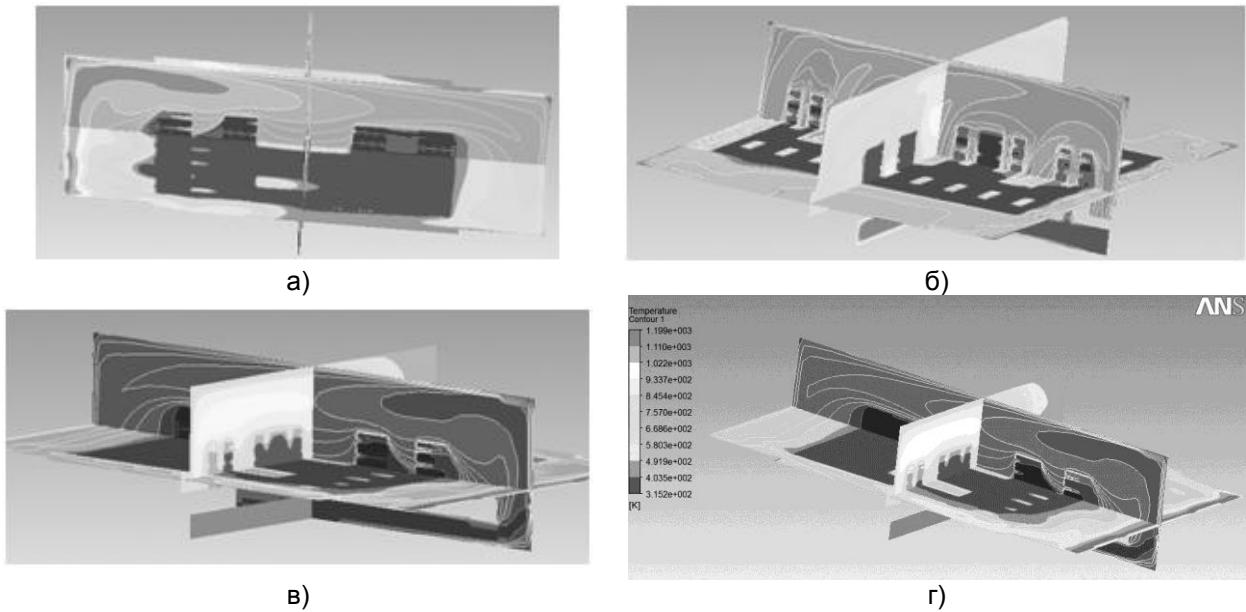


Рис. 4. Температурное поле печи: а – при отсутствии фильтрации; б – при фильтрации через подовые каналы со скоростью 0,05 м/с в момент времени 700 с от начала нагрева; в – при фильтрации через подовые каналы со скоростью 0,05 м/с в момент времени 1400 с от начала нагрева; г – при фильтрации через подовые каналы со скоростью 0,05 м/с в момент времени 2500 с от начала нагрева

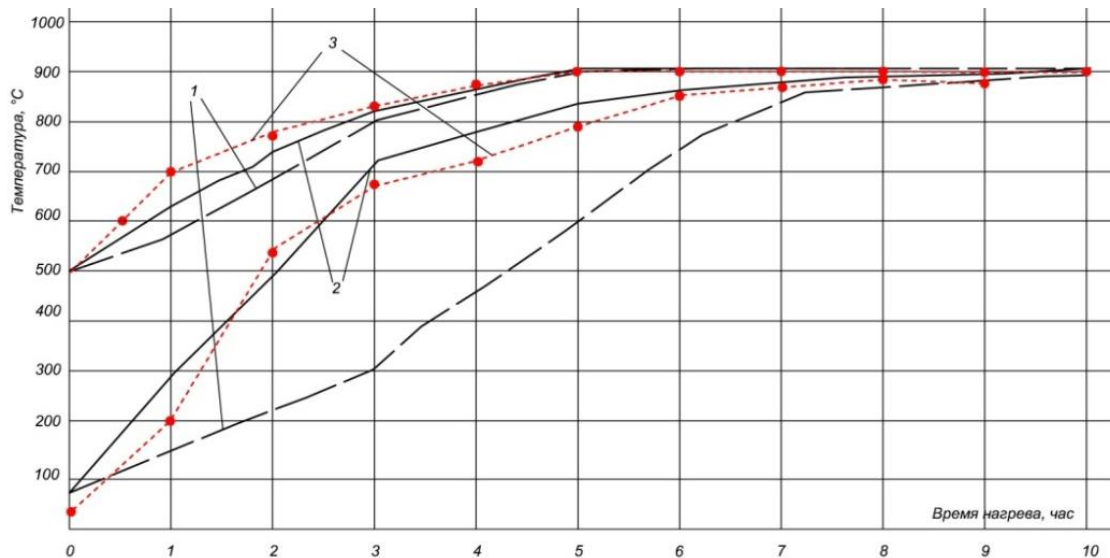


Рис. 5. Температурные поля на поверхности и в тепловом центре садки: 1 – при отсутствии фильтрации; 2 – при скорости фильтрации 0,05 м/с; 3 – результаты физического эксперимента по нагреву насыпной садки в нагревательной печи при скорости фильтрации 0,05 м/с

Анализ полученных полей показывает, что при организации дополнительной фильтрации теплоносителя через каналы, расположенные в поду печи, увеличивается интенсивность процесса теплообмена, что способствует уменьшению времени нагрева технологического материала до заданных параметров на 15–20 %. Также следует отметить тот факт, что при организации фильтрации теплоносителя в вертикальном направлении негативный

эффект от температурных неравномерностей по сечению садки сглаживается. Таким образом, речь идет не только о повышении эффективности нагрева насыпных садок, но и об улучшении качества нагрева обрабатываемых изделий.

Выводы. Предложенная математическая модель, в которой насыпная садка заменяется фрактальной геометрической моделью, может быть использована для расчета различных тепловых режимов

нагрева в садочных печах и разработки технологических карт нагрева садок с различным значением порозности. Отличие результатов математического моделирования от экспериментальных данных невелико, погрешность составляет не более 10 %.

Новая конструкция садочной печи с подовыми топками, в которой организована дополнительная фильтрация теплоносителя через специальные каналы в поду печи, позволяет уменьшить время нагрева насыпных садок на 15–20 % по сравнению с базовой моделью.

Список литературы

1. **Пористость** // Малый энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: в 4 т. – СПб., 1907–1909.

2. **Определение** эффективных теплофизических свойств насыпных садок. *Металлургические печи* / А.У. Пуговкин, О.Б. Крылова, В.И. Становой, А.А. Буйлов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 1987. – № 10. – С. 105–107.

3. **Волков Д.П., Дульнев Г.Н.** Тепло- и массоперенос в нефтеносных грунтах // *Инженерно-физический журнал*. – 1986. – Т. 50, № 6. – С. 939–946.

4. **Леонтьев Н.Е.** Основы теории фильтрации. – М.: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009. – С. 24–29.

5. **Рудых О.Л.** Расчет тепло- и массопереноса в пористых телах методом конечных элементов // *Инженерно-физический журнал*. – Т. 42, № 6. – С. 1026–1029.

6. **Ребиндер П.А., Щукин Е.Д., Марголис Л.Я.** О механической прочности пористых дисперсных тел // *ДАН*. – 1964. – Т. 154, № 3. – С. 695–698.

7. **Гусенкова Н.П., Крылова Л.С., Коротин А.Н.** Численное исследование процесса теплообмена в пористом теле при фильтрации теплоносителя // *Сб. науч. тр. Государственной металлургической академии Украины (Энергетика. Металлургия): в 2 т. Т. 2.* – Днепропетровск: ГметАУ, 1999. – С. 154–157.

8. **Пелевин Ф.В., Пономарев А.В.** Эффективность теплообмена в пористых сетчатых металлах при двумерном движении теплоносителя // *Тепловые процессы в технике*. – 2014. – № 1.

9. **Федосеев С.В., Горбунов В.А.** Использование фрактальной геометрии при создании моделей установки фильтрации ТБО в пакете Ansys // *Вестник ИГЭУ*. – 2015. – Вып. 7.

10. **Бровкин Л.А., Гусев В.А.** О краевых условиях в процессах сушки фильтрацией теп-

лоносителя // *Известия вузов. Энергетика*. – 1983. – № 5. – С. 79–82.

11. Пат. на изобретение РФ №139405. Проходная термическая пламенная печь / В.А. Горбунов, О.Б. Колибаба, Г.А. Перевезенцев, М.Г. Сулейманов; заявл. 04.12.2013; зарегист. 17.03.2014.

12. **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.

References

1. Poristost' [Porosity]. *Malyy entsiklopedicheskiy slovar' Brokgauza i Efrona: v 4 t.* [Brockhaus and Efron Shorter Encyclopedic Dictionary: in 4 vol.]. Saint-Petersburg, 1907–1909.

2. Pugovkin, A.U., Krylova, O.B., Stanovoy, V.I., Buylov, A.A. Opredelenie effektivnykh teplofizicheskikh svoystv nasypanykh sadok. *Metallurgicheskie pechi* [Determining of effective thermophysical properties of bulk tanks. Metallurgical furnaces]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 1987, no. 10, pp. 105–107.

3. Volkov, D.P., Dul'nev, G.N. Teplo- i massoperenos v neftenosnykh gruntakh [Heat and mass transfer in oil-bearing soils]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 1986, vol. 50, no. 6, pp. 939–946.

4. Leont'ev, N.E. *Osnovy teorii fil'tratsii* [Basics of filtration theory]. Moscow: Izdatel'stvo TsPI pri mekhaniko-matematicheskome fakul'tete MGU, 2009, pp. 24–29.

5. Rudykh, O.L. Raschet teplo- i massoperenosa v poristykh telakh metodom konechnykh elementov [Calculation of heat and mass transfer in porous bodies by the finite element method]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, vol. 42, no. 6, pp. 1026–1029.

6. Rebinder, P.A., Shchukin, E.D., Margolis, L.Ya. O mekhanicheskoy prochnosti poristykh dispersnykh tel [On mechanical strength of porous dispersed bodies]. *DAN*, 1964, vol. 154, no. 3, pp. 695–698.

7. Gusenkova, N.P., Krylova, L.S., Korotin, A.N. Chislennoe issledovanie protsessa teploobmena v poristom tele pri fil'tratsii teplonositelya [A numerical study of heat exchange in a porous body in heat carrier filtration conditions]. *Sbornik nauchnykh trudov Gosudarstvennoy metallurgicheskoy akademii Ukrainy (Energetika. Metallurgiya) v 2 t., t. 2* [Collected scientific works of the State Metallurgical Academy of Ukraine (Power Engineering. Metallurgy) in 2 vol., vol. 2]. Dnepropetrovsk: GmetAU, 1999, pp. 154–157.

8. Pelevin, F.V., Ponomarev, A.V. Effektivnost' teploobmena v poristykh setchatykh metallakh pri dvumernom dvizhenii teplonositelya

[Heat exchange efficiency in porous cellular metals in conditions of two-dimensional motion of the heat carrier]. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2014, no. 1.

9. Fedoseev, S.V., Gorbunov, V.A. Ispol'zovanie fraktal'noy geometrii pri sozdanii modeley ustanovki fil'tratsii TBO v pakete Ansys [The use of fractal geometry in creating models of the household waste filtration unit in the Ansys package]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 7.

10. Brovkin, L.A., Gusev, V.A. O kraevykh usloviyakh v protsessakh sushki fil'tratsiey teplonositelya [On edge conditions in drying processes with heat carrier filtration]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1983, no. 5, pp. 79–82.

11. Gorbunov, V.A., Kolibaba, O.B., Perevezentsev, G.A., Suleymanov, M.G. *Prokhodnaya termicheskaya plamennaya pech'* [The through flame heat treating furnace]. Patent RF, no. 139405, 2014.

12. Perevezentsev, G.A., Gorbunov, V.A., Kolibaba, O.B. Metod fraktal'nogo modelirovaniya nasyynoy 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.

Перевезенцев Григорий Александрович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант,
телефон (4932)38-57-05, e-mail: mkandy@mail.ru
Perevezentsev Grigory Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, telephone (4932)38-57-05,
e-mail: mkandy@mail.ru

Колибаба Ольга Борисовна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: koli-baba@mail.ru
Kolibaba Olga Borisovna,
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Thermal Technologies and Gas Supply, e-mail: koli-baba@mail.ru

Горбунов Владимир Александрович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: gorbynov.w@mail.ru
Gorbunov Vladimir Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Associate Professor of the Department of Thermal Technologies and Gas Supply, e-mail: gorbynov.w@mail.ru