

УДК 669.27:519

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА САДКИ КЕРАМИЧЕСКИХ КАМНЕЙ С УЧЕТОМ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА ВНУТРИ САДКИ

Докт. физ.-мат. наук, проф. ЧИЧКО А. Н., асп. БОРОЗДИН А. С.,
канд. техн. наук ЛИХОУЗОВ С. Г.

Белорусский национальный технический университет

Одной из важнейших энергетических проблем при производстве керамических камней является оптимизация процесса нагрева. Известно, что стоимость топлива, используемого для сушки и обжига изделий стеновой керамики, может составлять до 50 % от себестоимости готовой продукции [1]. В то же время неоптимальные режимы нагрева могут приводить к браку в изделиях, вызванному образованием трещин, деформаций, короблению [2, 3]. Развитие компьютерных методов позволяет моделировать процессы обжига керамических изделий и на основе этого предлагать рекомендации по оптимизации температурных режимов.

Основная характеристика обжига керамических изделий – температурный режим, который графически изображается температурно-временной зависимостью между температурой обжига и его длительностью. На сегодняшний день оптимальные температурные режимы обжига для каждого вида изделий строительной керамики формируются технологами предприятий на основе экспериментальных данных по нагреву глинистого сырья в лабораторных условиях. При этом, как правило, не учитывается ни перепад температур по сечению обжигового канала печи, ни конфигурация садки и влияние соседних кирпичей. Поэтому сформированные таким образом режимы обжига не являются оптимальными и в дальнейшем требуют корректировки при опытной эксплуатации режима [4–6].

Цель данной работы – разработка математической модели и компьютерное моделирование процесса обжига для садки кирпичей с учетом естественной конвекции воздуха внутри садки для печей туннельного типа.

Поставленная задача решалась в три этапа. На первом этапе была построена компьютерная клеточно-автоматная модель садки камней и туннельной печи. На втором этапе моделировали процессы естественной кон-

векции воздуха внутри фрагмента садки при постоянной температуре нагревающей среды. Результатом второго этапа было температурное поле камней садки и нагревающей среды внутри фрагмента садки. На основе этих данных разработан набор клеточно-автоматных правил для определения температуры нагревающей среды внутри садки камней при ее движении по рабочему пространству туннельной печи. На третьем этапе определялись температурно-временные зависимости для камней фрагмента садки при нагреве садки по заданной температурной кривой обжига и скорости движения садки.

Для математического описания движения воздуха использована система уравнений Навье – Стокса, представляющая собой закон количества движения (импульса):

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V}{\partial \tau} + V \frac{\partial V}{\partial x} + U \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + V \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) &= \rho g - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left(\frac{\partial W}{\partial \tau} + V \frac{\partial W}{\partial x} + U \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Для полноты описания процесса движения дополнительно применено уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) = 0. \quad (2)$$

где V – проекция скорости на ось X ; U – проекция скорости на ось Y ; W – проекция скорости на ось Z ; g – ускорение свободного падения; ρ и η – плотность и динамическая вязкость; τ – время; p – давление в рассматриваемой точке потока.

Для учета процесса охлаждения потока описанные выше системы дополнялись уравнением теплообмена Фурье – Кирхгофа

$$c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + V \frac{\partial T}{\partial x} + U \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q(x, y, z, T). \quad (3)$$

Теплообмен на поверхности твердого тела с воздухом описывался как

$$\alpha \Delta T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости (расплава); T – температура в рассматриваемой точке потока (x, y, z) ; λ и c – теплопроводность и теплоемкость жидкости; α – коэффициент теплоотдачи на граничной поверхности.

При решении задачи движения воздуха в садке камней использовано несколько вариантов задания типов границ для скоростей, давлений и температур. В моделях применено три типа областей, которые определяют граничные условия: Ω_1 – воздух; Ω_2 – садка камней; Ω_3 – граница первого

рода ($T(\Omega_3) = \text{const}$). В методе использованы следующие начальные условия для $\tau = 0$: $V_x(\Omega_1) = 0$; $V_y(\Omega_1) = 0$; $V_z(\Omega_1) = 0$; $\rho(\Omega_1) = \rho_0(\Omega_1)$; $p(\Omega_1) = 0$; $T(\Omega_1) = T_{\text{нач}}$; $V_x(\Omega_2) = 0$; $V_y(\Omega_2) = 0$; $V_z(\Omega_2) = 0$; $\rho(\Omega_2) = \rho_0(\Omega_2)$; $p(\Omega_2) = 0$; $T(\Omega_2) = T_2$; $V_x(\Omega_3) = 0$; $V_y(\Omega_3) = 0$; $V_z(\Omega_3) = 0$; $\rho(\Omega_3) = \rho_0(\Omega_1)$; $p(\Omega_3) = 0$; $T(\Omega_3) = T_3$. При $\tau \neq 0$ используются граничные условия: $V_x(\Omega_1) = V_x(\Omega_{1n})$; $V_y(\Omega_1) = V_y(\Omega_{1n})$; $V_z(\Omega_1) = V_z(\Omega_{1n})$; $\rho(\Omega_1) = \rho(\Omega_{1n})$; $p(\Omega_1) = p(\Omega_{1n})$; $T(\Omega_1) = T(\Omega_{1n})$; $V_x(\Omega_2) = 0$; $V_y(\Omega_2) = 0$; $V_z(\Omega_2) = 0$; $\rho(\Omega_2) = \rho_0(\Omega_2)$; $p(\Omega_2) = p(\Omega_1)$; $T(\Omega_2) = T(\Omega_{2n})$; $V_x(\Omega_3) = 0$; $V_y(\Omega_3) = 0$; $V_z(\Omega_3) = 0$; $\rho(\Omega_3) = \rho_0(\Omega_3)$; $p(\Omega_3) = p(\Omega_1)$; $T(\Omega_3) = T_3$.

Математическая модель процесса нагрева садки построена на трехмерном уравнении теплопроводности, которое для декартовых координат может быть записано в следующем виде:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right),$$

$$x, y, z, \tau \in \Omega, \quad (5)$$

где $c(T)$ – функция теплоемкости, Дж/(кг·К); $\rho(T)$ – функция плотности, кг/м³; $\lambda(T)$ – функция теплопроводности, Вт/(м·К); Ω ($0 \leq x < X$; $0 \leq y < Y$; $0 \leq z < Z$; $0 \leq \tau < t$) – пространственно-временная область расчета.

Для задания начальных и граничных условий, определяющих взаимодействие между нагревающей средой и внешней поверхностью садки, перемещающейся с заданной скоростью в печи с неоднородным температурным полем, применена следующая система уравнений [7]:

$$T(x, y, z, \tau) = \begin{cases} T_0, \tau = 0; \\ T_1, 0 < \tau \leq \frac{L_1}{v}; \\ T_2, \frac{L_1}{v} < \tau \leq \frac{L_1 + L_2}{v}; \\ \dots \\ T_n, \frac{\sum_{k=1}^{n-1} L_k}{v} < \tau \leq \frac{\sum_{k=1}^n L_k}{v}, \end{cases} \quad (6)$$

где T_0 – начальная температура заготовки; n – число однородных тепловых зон в рабочем пространстве печи, T_i ($i = 1, 2, \dots, n$) – значение температуры в i -й тепловой зоне, °С; L_i ($i = 1, 2, \dots, n$) – протяженность i -й тепловой зоны, м; v – скорость перемещения заготовки вдоль рабочего пространства печи, м/с.

В качестве объекта моделирования выбрана садка керамических камней одного из кирпичных заводов. В силу симметрии садки (садка состоит из восьми одинаковых блоков) и с целью упрощения расчетов для компьютерного моделирования выбран фрагмент садки, содержащий один блок. В качестве исходных данных использовали температурный режим работы печи, применяемый на предприятии. Продолжительность обжига для выбранного типа садки по данным экспериментальной температурной кривой составляет 61,5 ч.

Компьютерное моделирование движения воздушных потоков осуществлялось с помощью программного обеспечения «ПроЛит-1» [8]. Процесс динамического изменения условий внутри садки фиксировался шестью виртуальными термопарами в камнях садки, равномерно расположенными по ее высоте. В качестве исходных данных заданы: поле температур воздуха, одинаковое для всего пространства садки, $T = 300$ °С и поле температур садки, одинаковое для всего фрагмента садки, $T = 20$ °С. Моделирование проводили до момента установления стационарного режима, когда температурное поле внутри садки с течением времени колебалось незначительно. Результаты моделирования были получены в виде графиков зависимостей температуры от времени в выбранных точках и температурных полей во всем пространстве садки камней. В результате моделирования было установлено, что в различных слоях садки температура печной среды падает по определенному закону. Если садку кирпичей разбить на семь равных уровней, то в центральной части температура нагревающей среды уменьшается следующим образом:

$$T_1 = 0,88T_0; T_2 = 0,80T_0; T_3 = 0,77T_0; \\ T_4 = 0,70T_0; T_5 = 0,64T_0; T_6 = 0,61T_0; T_7 = 0,54T_0,$$

где T_0 – температура нагревающей среды с внешней стороны садки, °С; T_j – температура нагревающей среды в центральной части садки на j -м уровне ($j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$), °С.

На втором этапе моделировался процесс нагрева садки кирпичей по заданной температурно-временной кривой обжига на основе уравнений теплопроводности программным пакетом «ПроТерм-1н» [9].

Входными параметрами для вычислительных экспериментов являлись размеры и тип кирпича, тип садки, пространственный шаг, кривая обжига, скорость движения вагонетки, теплофизические свойства сырца, вагонетки и печной атмосферы, начальные температуры сырца и вагонетки. Скорость движения вагонетки, используемая в модели, определялась по известным данным о протяженности печи (118 м) и времени обжига при условии, что за указанное время вагонетка проходит вдоль всей печи. Моделирование проводилось с пространственным шагом $h_x = h_y = h_z = h = 0,025$ м. Таким образом, на каждый камень садки с размерами $0,25 \times 0,125 \times 0,125$ м приходилось 250 клеток. Размеры всей клеточной модели для моделирования процесса обжига фрагмента садки и вагонетки получились следующими: $64 \times 84 \times 64$ клеток. Общее количество элементов (среда + вагонетка + садка): 344064. Начальная температура вагонетки принималась равной температуре сырца $t_{в0} = t_{с0}$.

На клеточно-автоматной модели фрагмента садки были зафиксированы 10 контрольных точек – виртуальных термопар: одна точка в области рабочего пространства печи (точка А) и девять точек, расположенных в разных областях фрагмента садки. В процессе моделирования температурные данные в контрольных точках сохранялись в текстовый файл для последующего анализа. Продольное сечение садки и расположение контрольных точек представлено на рис. 1. Дополнительно на рисунке стрелкой обозначено направление движения садки. Далее представлены некоторые результаты проведенного моделирования. Как показали компьютерные исследования, в середине и нижних частях садки наблюдается значительное падение тем-

пературы по сравнению с температурой внешних кирпичей садки, что может привести к существенным отклонениям от заданного температурного режима обжига сырца.

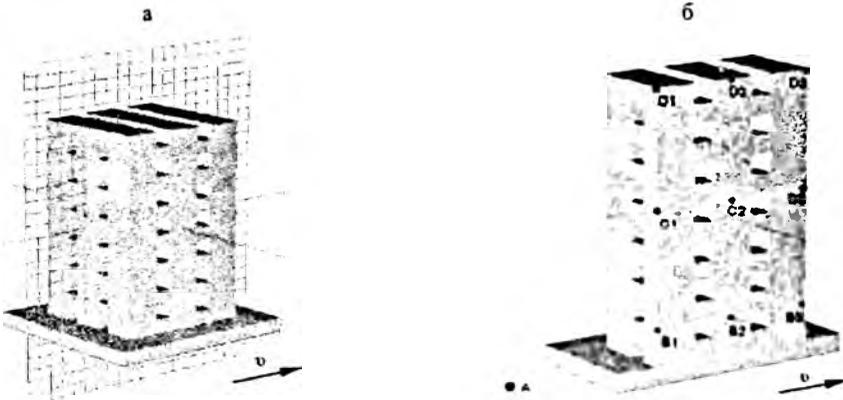


Рис. 1. Компьютерная модель фрагмента садки: а – фрагмент садки и секущая плоскость; б – расположение контрольных точек внутри фрагмента садки

На рис. 2 изображены температурно-временные зависимости для контрольных точек фрагмента садки. На рис. 2б видно значительное «отставание» температурных кривых для точек B_2 и C_2 от заданного режима нагрева (точка A).

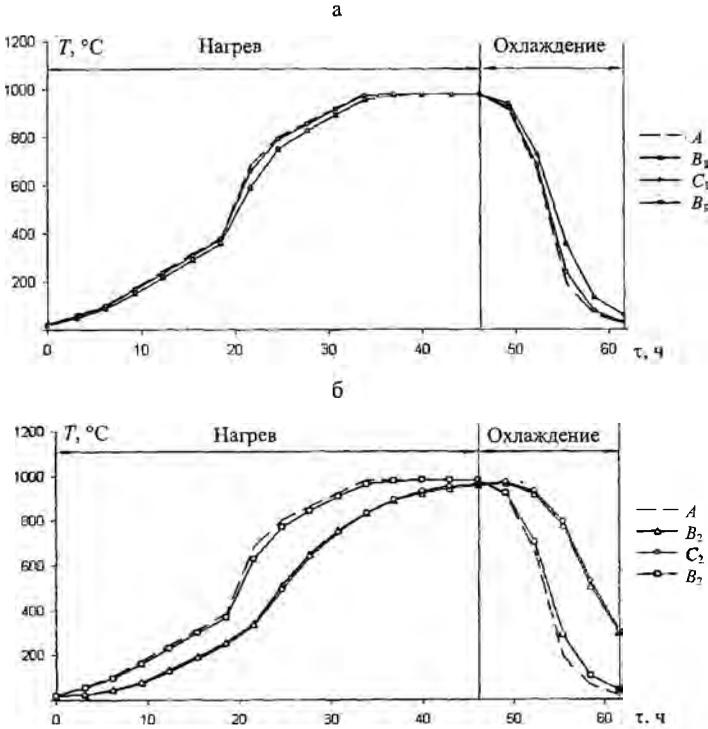


Рис. 2. Распределения изменения температур в различных точках объекта при его движении в печи: а – на поверхности фрагмента садки; б – в центральной его части

На рис. 3 представлено распределение температуры для сечения фрагмента садки для различных моментов времени. Рисунок иллюстрирует динамику во времени процесса обжига фрагмента садки керамических кам-

ней. Пространственные изображения полей температур также свидетельствуют о наличии проблем с прогреванием середины и нижней части садки.

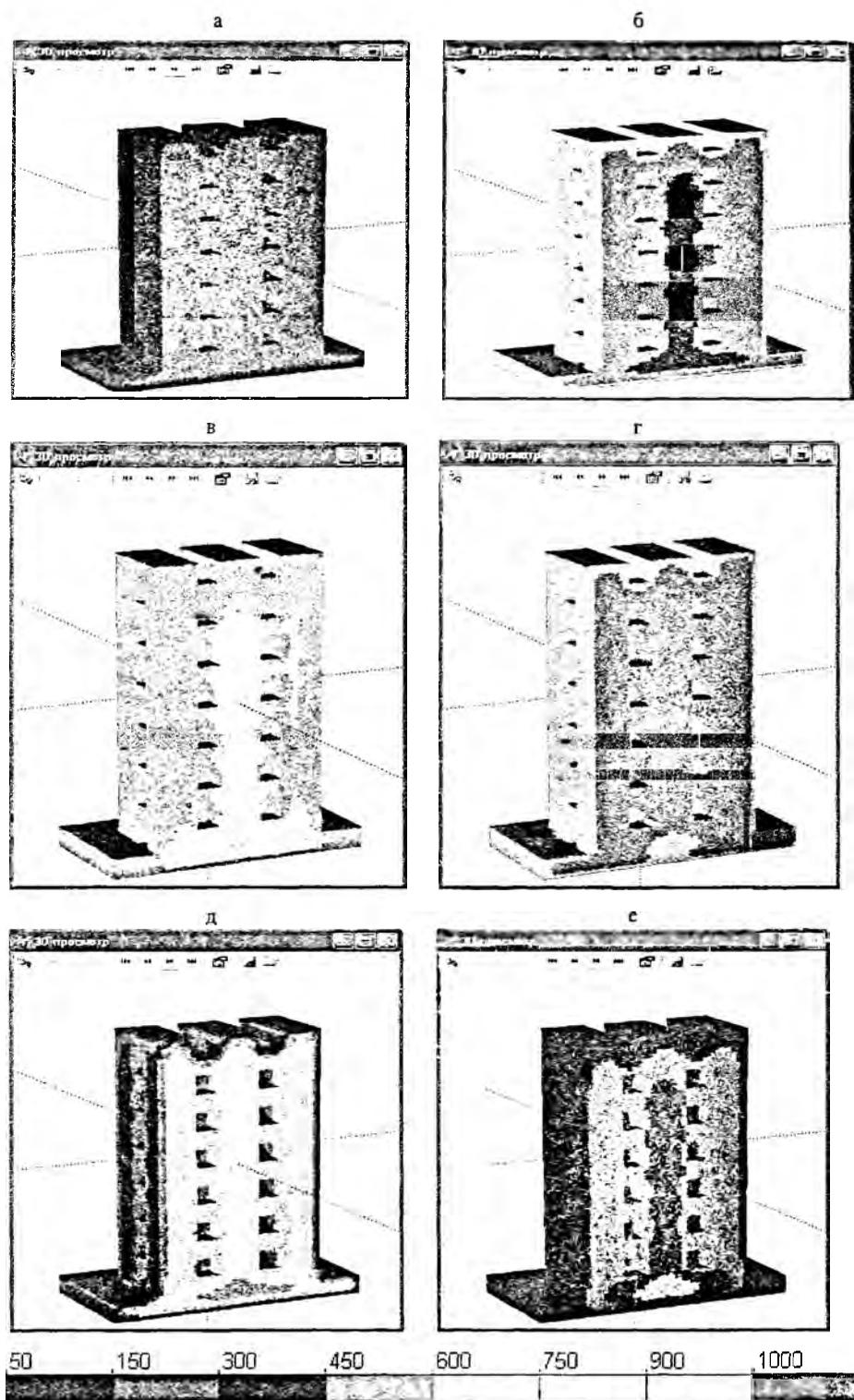


Рис. 3. Распределение температурного поля в различные моменты времени обжига:
а – $\tau = 12,3$ ч; б – 21,5 ч; в – 30,7 ч; г – 49,2 ч; д – 55,4 ч; е – 61,4 ч

ВЫВОД

Предложена математическая модель, основанная на совместном использовании уравнений Навье – Стокса и уравнений нестационарной теплопроводности, которая может быть использована для компьютерного моделирования процесса обжига изделий строительной керамики. Представленные вычислительные эксперименты наглядно демонстрируют возможности компьютерного моделирования температурных полей при обжиге садки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н о х р а т я н К. А. Сушка и обжиг в промышленности строительной керамики – М.: Госстройиздат, 1962. – 603 с.
2. Г о с и н Н. Я. Производство керамических строительных материалов. – М., 1971. – 200 с.
3. П р о ц е с с ы керамического производства / Под ред. Дж. Кингери. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
4. К о т о в В. И. Оптимализация технологии строительной керамики. – Сыктывкар, 1969. – 64 с.
5. Т и х и О. Обжиг керамики. – М.: Стройиздат, 1988 – 343 с.
6. Ю ш к е в и ч М. О., Р о г о в о й М. И. Технология керамики. – М.: Стройиздат, 1969. – 350 с.
7. Ч и ч к о А. Н., Б о р о з д и н А. С. Численное моделирование процесса нагрева движущегося слитка // Литье и металлургия. – 2003. – № 4. – С. 59–62.
8. Ч и ч к о А. Н., Л и х о у з о в С. Г., Л у к а ш е в и ч Ф. С. Компьютерная система «ПроЛит-1» для моделирования течения и охлаждения расплавов // Литье и металлургия. – 2003. – № 4. – С. 64–72.
9. Ч и ч к о А. Н., А н д р и а н о в Н. В., Б о р о з д и н А. С. Компьютерная система «ПроТерм-1n» – для моделирования процессов ступенчатого нагрева стальных слитков // Сталь. – 2005. – № 11. – С. 66–71.

Представлена кафедрой машин
и технологий литейного производства

Поступила 10.02.2006

УДК 621.311.22:658.012

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТЬЮ РАБОТЫ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АСУ ТП ТЭС

Канд. техн. наук, доц. НАЗАРОВ В. И.

Белорусский национальный технический университет

При наличии на тепловой электрической станции автоматизированной системы управления технологическими процессами имеет место ряд проблем, вызванных большим объемом информации, воспринимаемой оператором. Эти проблемы связаны с повышением психофизической нагрузки оператора, обязанного просматривать значительные последовательности информации, выводимые на устройства отображения. Кроме того, хотя