



*There is presented the model and computer calculations on numerical simulation of temperatures in the ingot, moving in the furnace, consisted of three thermal zones. There is received the distribution of the ingot temperatures for different speeds of its moving in the furnace.*

А. Н. ЧИЧКО, А. С. БОРОЗДИН, БНТУ

УДК 669.27:519

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ДВИЖУЩЕГОСЯ СЛИТКА

Одной из важнейших задач теории процессов нагрева слитков, полученных методом непрерывного литья, является математическое моделирование и компьютерный анализ динамики формирования температур и напряжений в печах с различным положением нагревателей [1]. Сложность математического моделирования этих процессов связана с тем, что слиток в процессе нагрева перемещается в печи с заданной скоростью и заданным количеством нагревателей. При этом он движется практически в неоднородном температурном поле. В этом случае в разных точках поверхности слитка изменяются граничные условия, что приводит к нелинейному закону изменения температуры во времени. Компьютерное моделирование процесса нагрева слитка при его перемещении представляет значительный научный и практический интерес. Поэтому в настоящей работе были проведены системные исследования процессов нагрева заготовки заданного размера при различных вариантах трехмерной пространственной печи с заданными температурными зонами и скоростью движения слитка.

Цель данной работы — исследование влияния геометрических размеров слитка, скорости его движения и конфигурации рабочего пространства печи на распределение температур в объеме слитка заданного размера.

В качестве основной математической модели была использована трехмерная математическая модель с краевыми условиями, включающая в себя уравнение теплопроводности Фурье [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

$$(0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, 0 \leq z \leq Z, 0 \leq \tau \leq t)$$

с граничными условиями I рода:

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z),$$

$$T(0, y, z, \tau) = \mu_x, \quad T(X, y, z, \tau) = \nu_x,$$

$$T(x, 0, z, \tau) = \mu_y, \quad T(x, Y, z, \tau) = \nu_y,$$

$$T(x, y, 0, \tau) = \mu_z, \quad T(x, y, Z, \tau) = \nu_z,$$

где  $f(x, y, z)$  — функция начального распределения температуры;  $\mu_x, \mu_y, \mu_z, \nu_x, \nu_y, \nu_z$  — функции, описы-

вающие тепловое взаимодействие между окружающей средой и поверхностью тела.

Решение уравнений (1), (2) проводили по экономичной локально одномерной схеме со вторым порядком точности. Для проведения расчетов на ЭВМ данная вычислительная схема была реализована в программе моделирования теплофизических процессов, основанных на клеточно-автоматном подходе.

Согласно целям поставленного исследования, рабочее пространство моделируемой печи было разделено на три температурные зоны (разделение может быть любым) с температурами  $T_1, T_2$  и  $T_3$  для каждой зоны. Протяженность каждой температурной зоны полагалась равной  $L_1 = L_2 = L_3 = 5$  м. Пространство печи заполняли воздухом со следующими теплофизическими характеристиками:  $\lambda = 0,034$  Вт/(м·К),  $c = 1009$  Дж/(кг·К),  $\rho = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>. Слиток изготавливали из стали марки 40Х с теплофизическими характеристиками, являющимися функциями от температуры слитка. Геометрические размеры слитка были взяты следующие:  $0,25 \times 0,25 \times 0,3$  м. Начальная температура слитка принималась равной  $t_0 = 30$  °С. При численном моделировании процесса нагрева данный слиток двигался вдоль печи с равномерной скоростью  $v$ . Компьютерные расчеты проводили при пространственном шаге  $h_x = h_y = h_z = 0,02$  м и временном шаге  $\eta = 0,2$  с. На рис. 1 показаны упрощенная схема рабочего пространства моделируемой печи, местоположение температурных зон и исходное положение слитка.

На слитке были зафиксированы три контрольные точки, для которых анализировали температурно-временные зависимости. На рис. 2 представлено продольное сечение слитка и выделены контрольные точки. При моделировании проводили варьирование как значениями температур в зонах рабочего пространства печи, так и скоростью движения слитка. В таблице приведены технологические варианты, для которых выполняли вычислительные эксперименты.

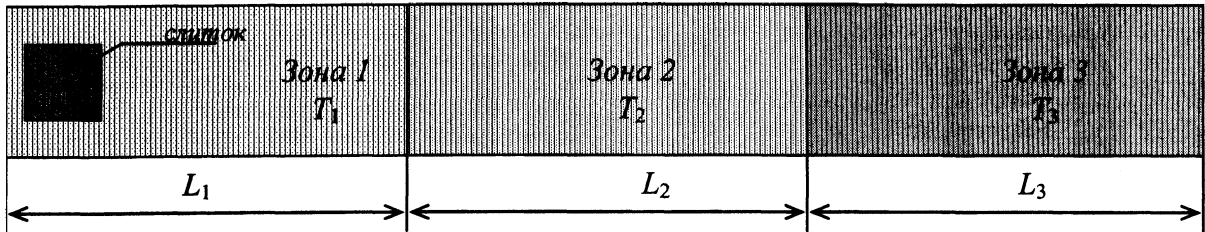


Рис. 1. Схема рабочего пространства печи, расположение температурных зон и слитка

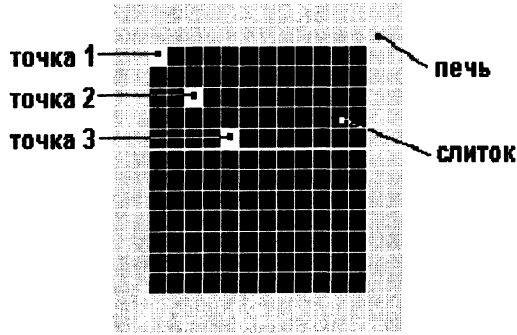


Рис. 2. Продольное сечение слитка и расположение контрольных точек

**Технологические варианты расчетов процессов нагрева**

$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$v, \text{ м/с}$
1200	1200	1200	0,01
800	1000	1200	0,01
400	800	1200	0,01
1200	1200	1200	0,1
800	1000	1200	0,1
400	800	1200	0,1

На рис. 3 представлены частотные распределения элементов слитка для различных конфигураций рабочего пространства печи при скорости движения слитка  $v = 0,01 \text{ м/с}$ . Данное распределение показывает число элементов слитка, находящихся в том или ином температурном диапазоне на момент выхода слитком из каждой тепловой зоны печи.

На рис. 4 показано частотное распределение элементов слитка для различных конфигураций рабочего пространства печи при скорости движения слитка  $v = 0,1 \text{ м/с}$ , а на рис. 5 – температурно-временные зависимости для фиксированных точек слитка. На рис. 5, а, в, д приведены функции, описывающие поведение температурного поля в контрольных точках слитка при движении со скоростью  $v = 0,01 \text{ м/с}$ , а на рис. 5, б, г, е – при движении со скоростью  $v = 0,1 \text{ м/с}$ .

Таким образом, проведенное исследование показывает, что численное моделирование позволяет решать задачи нагрева слитков в условиях их движения в промышленной печи. Это открывает

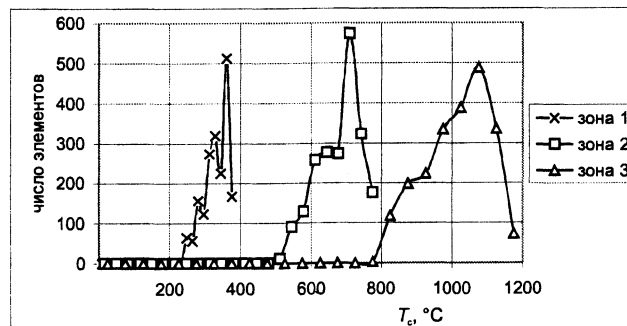
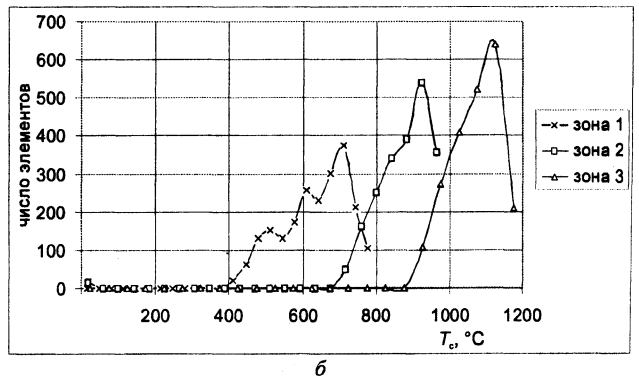
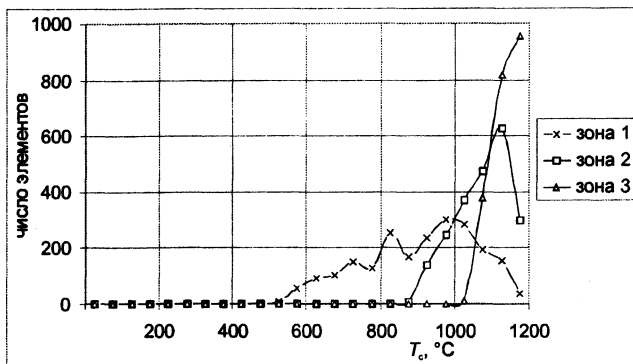


Рис. 3. Распределение по температурным диапазонам элементов слитка в различных температурных зонах при его движении со скоростью  $v = 0,01 \text{ м/с}$ : а –  $T_1=T_2=T_3=1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б –  $T_1=800 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_2=1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_3=1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; в –  $T_1=400 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_2=800 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_3=1200 \text{ }^\circ\text{C}$

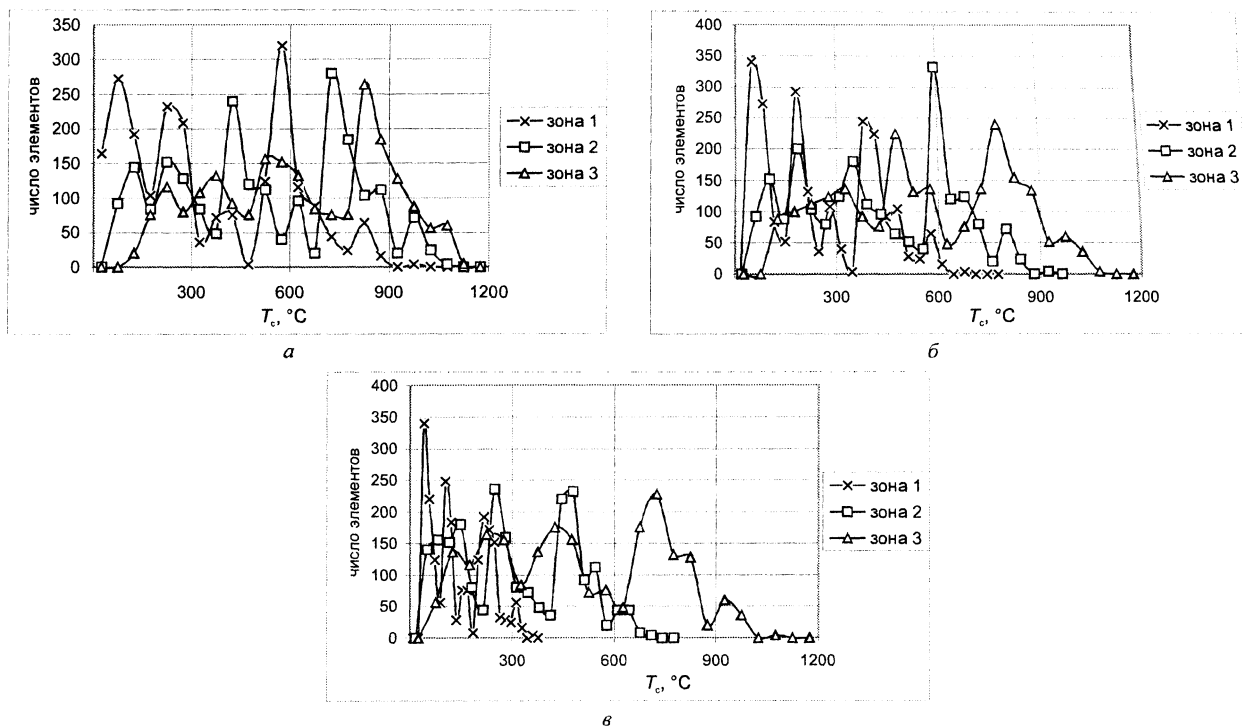


Рис. 4. Распределение по температурным диапазонам элементов слитка в различных температурных зонах при его движении со скоростью  $v = 0,1$  м/с: а -  $T_1=T_2=T_3=1200$  °С; б -  $T_1=800$  °С;  $T_2=1000$ ;  $T_3=1200$  °С; в -  $T_1=400$  °С;  $T_2=800$ ;  $T_3=1200$  °С

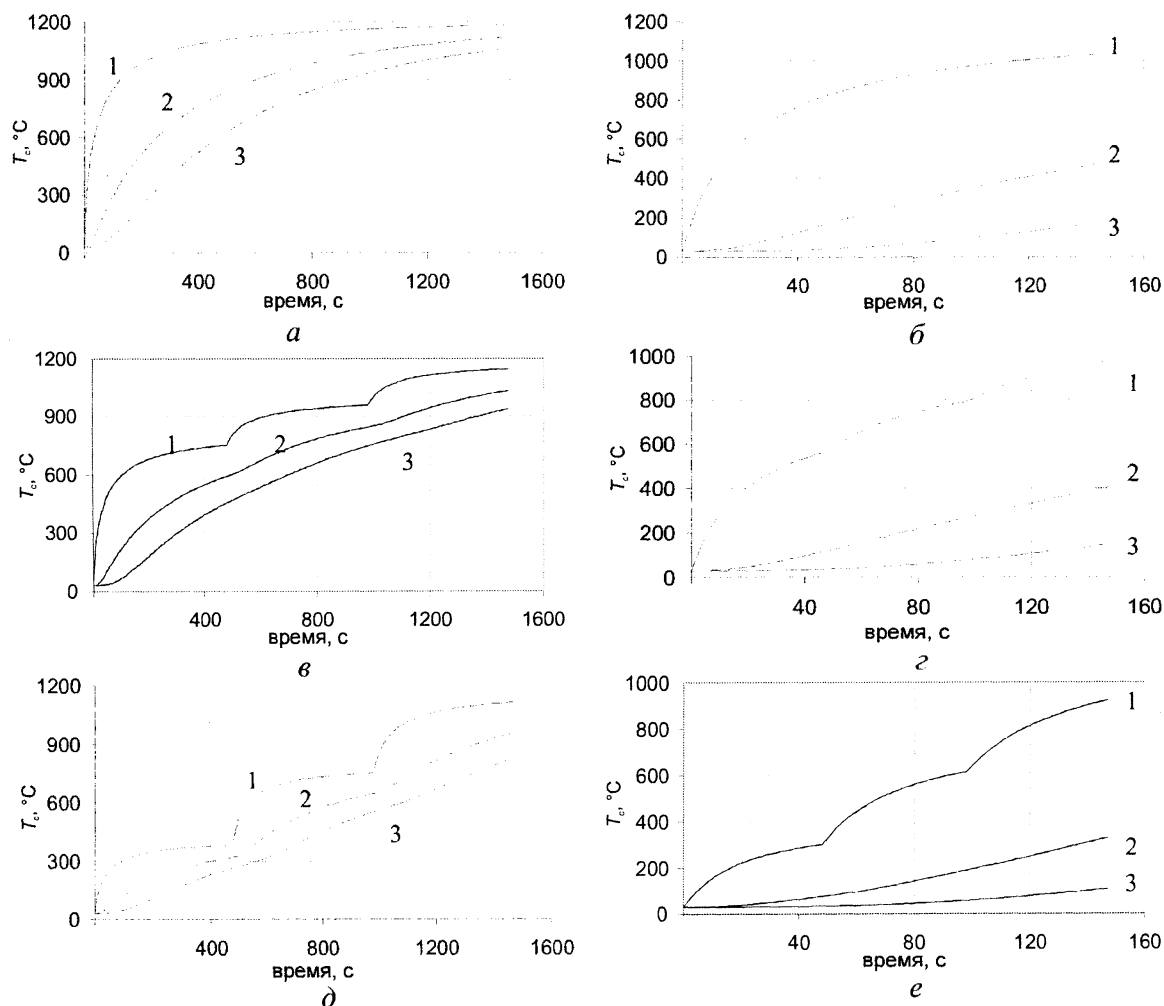


Рис. 5. Температурные зависимости в контрольных точках слитка при его движении по температурным зонам для различных технологических вариантов: а -  $T_1=T_2=T_3=1200$  °С,  $v=0,01$  м/с; б -  $T_1=T_2=T_3=1200$  °С,  $v=0,1$  м/с; в -  $T_1=800$  °С;  $T_2=1000$ ;  $T_3=1200$  °С,  $v=0,01$  м/с; г -  $T_1=800$  °С;  $T_2=1000$ ;  $T_3=1200$  °С,  $v=0,1$  м/с; е -  $T_1=400$  °С;  $T_2=800$ ;  $T_3=1200$  °С,  $v=0,1$  м/с

новые возможности для оптимизации режимов нагрева слитков с заданными теплофизическими характеристиками в промышленных печах, имеющих различную пространственную конфигурацию нагревателей, задающих неоднородное перемещающееся температурное поле.

### Литература

1. Чичко А.Н., Бороздин А.С. О новом подходе к решению тепловой задачи охлаждения 3D-объектов // *Литье и металлургия*. 2002. №4. С. 7–11.
2. Бутковский А. Г., Малый С. А., Андреев Ю. Н. Управление нагревом металла. М.: Металлургия, 1981.



**03.05–14Г.1. Литейное производство в XX веке. Анализ итогов.** Гини Э.Ч. (МГТУ им. Баумана). Литейное пр-во. 2002. №8, с. 4–9, 1 ил., табл. 3. Библ. 6. Рус.

Приведены данные по структуре производства отливок из разных сплавов в странах "шестерки" в 50-е гг. прошлого века и в последние годы.

**03.05–14Г.2. Рынок литья. The foundry industry: scenarios and perspectives.** Galante Gabriele. Foundryman. 2002. 95. №9. с. 322–323, 1 ил. Англ.

На мировом рынке ожидается снижение производства ферроматериалов и стали, ожидается рост алюминиевого литья. Литейное производство в Испании более конкурентоспособно, чем в Великобритании, Франции, Швейцарии. Отмечается спад в литейном производстве США, успех у литейщиков стран Восточной Европы, имеющих соглашение с Германией или с перепродавцами литья, которые поддерживают литейщиков Чехии, Словакии, Румынии, Польши, чтобы продавать их литье в Италии, Германии, Франции, Швейцарии. В России при возрождении промышленности ожидается рост потребности в литье, которое не обеспечивается местными средствами, и придется покупать его у южноевропейских стран. В Японии отмечается спад литейного производства, его перемещают в Китай и Индонезию. В Китае растет внутренний рынок литья, потребность которого 12 млн. т отливок в год.

**03.05–14Г.7. Основы моделирования литейных процессов. Что лучше – метод конечных элементов или метод конечных разностей?** Тихомиров М.Д., Коमारов И.А. Литейное производство. 2002, №5, с. 22–28, 5 ил. Библ. 7. Рус.

Метод конечных разностей (МКР) применительно к моделированию тепловых процессов в затвердевающих отливках уступает методу конечных элементов (МКЭ) по всем основным параметрам, достоверности решения, требуемым ресурсам вычислительной техники, скорости расчетов, возможности анализа решения. МКР можно применять для моделирования тепловых процессов в отливках несложной конфигурации, заливаемых в малотеплопроводные формы. При этом желательно, чтобы в отливке было как можно меньше поверхностей, не параллельных трем ортогональным плоскостям разбивки (чтобы отливка больше походила на параллелепипед). Однако МКЭ позволит решать эти задачи быстрее и потребует меньше машинных ресурсов. В любом случае при МКР анализ результатов расчетов будет существенно затруднен. МКЭ может с достаточной достоверностью применяться для всех способов литья и для фасонных отливок практически любой сложности. МКЭ обеспечивает возможности для полноценного анализа результатов расчетов, обеспечивает скорость расчетов как минимум в два раза быстрее, чем МКР и требует в ~10 раз меньше оперативной памяти.