



The results of calculations of dynamics of the temperature field changing of the metallic mode used at production of casting "rack" are presented. The method of analysis of volumetric temperature field of metallic mode in time, which allows to analyze the dynamics of the chill heating under influence of casting melt by frequency curves of a number of grid elements, is offered.

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, Л. В. МАРКОВ, ОАО «ММЗ»

УДК 519:669.27

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Проектирование кокилей в литейном производстве является одной из сложнейших научно-технических задач, от решения которой зависит эффективность производства. От конструкции кокиля в значительной степени зависит его стойкость в процессе эксплуатации. В то же время образование трещин в кокиле и сетки разгара после начала его эксплуатации скорее всего свидетельствует о неверно выбранной толщине стенки и пространственной конфигурации кокиля. В теории кокильного литья, основы которой были заложены А. И. Вейником [1–3], рассматриваются упрощенные аналитические подходы, позволяющие оценить возникающие напряжения и стойкость кокиля для простых модельных форм. При этом не учитывается не только пространственная конфигурация, но и неоднородный характер температурного поля, формирующийся при заполнении расплавом формы. Предлагаемые методы в основном сводятся к определению выбора средней толщины стенки, по которой оценивают стойкость кокиля и возможный характер напряжений при его нагреве. Естественно, что такие подходы лишь с большой натяжкой можно применять на практике. Поэтому до сих пор они носят в основном теоретический характер и при проектировании кокилей не используются. Альтернативой этому подходу является эксперимент и практический опыт конструктора, позволяющий предлагать варианты кокилей, которые часто не выдерживают требуемое число заливок. Эксперимент очень трудоемкий и энергозатратный, так как требует промежуточных вариантов изготовления кокилей.

Развитие современных численных методов позволяет по-новому сформулировать задачи кокильного литья. В частности, используя методы математического моделирования и численный анализ, можно оценить изменения температур в различных сечениях кокиля, разрабатываемого конструктором и выбрать оптимальный вариант среди предложенных.

Цель настоящей работы – разработка метода анализа динамики изменения температур для трехмерных металлических форм, нагреваемых движущимся расплавом на примере отливки, используемой на Могилевском металлургическом заводе.

В основу предлагаемого метода положены трехмерные расчеты нагрева кокиля в условиях его заполнения расплавом. Динамика изменения температур кокиля определяется устанавливающимся температурным полем в различные моменты времени заполнения. Это означает, что нагрев кокиля является неоднородным и зависит от пространственной конфигурации литниковой системы и формы. В этом случае одни участки формы перегреваются сильнее, а другие слабее, что приводит к неоднородному распределению температур и напряжений. Математически рассчитываемое температурное поле определяется скоростными потоками расплава с учетом уравнений движения Навье–Стокса [4–6]. Математическая модель движущегося и кристаллизующегося расплава в металлической форме имеет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial V_y}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) - g, \\ \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right), \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \rho = 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \\ & = \frac{1}{c(T)\rho} \left(\frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right) + \frac{F(x, y, z, \tau)}{c(T(x, y, z, \tau))\rho}, \end{aligned} \quad (3)$$

где τ – время течения расплава; x, y, z – декартовы координаты (ось Y направлена вертикально); V_x, V_y, V_z – проекции скоростей элементов расплава на координатные оси X, Y, Z соответственно; $P(\tau)$ – давление в расплаве; ρ – плотность расплава; η – динамическая вязкость; T – температура; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности расплава; $c(T)$ – удельная теплоемкость расплава; $F(x, y, z, \tau)$ – функция объемной плотности мощности выделения теплоты при кристаллизации.

Систему (1)–(3) применяли для расчета температурного поля движущегося расплава, которое задает начальные условия задачи нагрева кокиля. Для решения задачи нагрева кокиля под действием полученного температурного поля отливки использовали уравнение теплопроводности с граничными условиями первого рода, которые изменяются при динамике температуры отливки. В основу расчета температур кокиля положено трехмерное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c(T)\rho} \left(\frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где $T(x, y, z)$ – температура в точке кокиля; x, y, z – декартовы координаты; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности материала при температуре T ; $c(T)$ – удельная теплоемкость материала при температуре T ; ρ – плотность материала.

Используя идеологию сеточных методов, была разработана программа по нагреву кокиля, в основу которой положен метод конечных разностей. Начальные и граничные условия для охлаждения расплава и нагрева кокиля были приняты следующими:

$$\begin{cases} T(x, y, z, \tau) = 20^\circ\text{C}, & \text{если } x, y, z \in \Omega_1, \\ T(x, y, z, \tau) = 50^\circ\text{C}, & \text{если } x, y, z \in \Omega_2, \tau = 0, \\ T(x_p, y_p, z_p, \tau) = T(x_k, y_k, z_k, \tau), & \text{если } x_p, y_p, z_p \text{ и } x_k, y_k, z_k \in \Omega_{23}, \\ T(x_0, y_0, z_0, \tau) = T_{\text{зал}}, & \text{если } x_0, y_0, z_0 \in \Omega_0, \tau = 0, \end{cases}$$

где Ω_0 – множество сеточных элементов, принадлежащих источнику расплава; Ω_1 – множество сеточных элементов, принадлежащих внешней среде; Ω_2 – множество сеточных элементов, принадлежащих кокилю; Ω_3 – множество сеточных элементов, принадлежащих области расплава; Ω_{23} – множество сеточных элементов, принадлежащих граничным элементам между кокилем и расплавом; x_p, y_p, z_p – координаты точек расплава; x_k, y_k, z_k – координаты точек кокиля.

При работе с программой были использованы следующие этапы. На первом этапе строили изображение 3d-кокиля. Далее он разбивался на сеточные элементы таким образом, чтобы самая тонкая его стенка имела размер не ниже 2-сеточных элементов. На втором этапе, используя начальные и граничные условия для расплава, было рассчитано поле скоростей и температур расплава в кокиле (система (1)–(3)). Затем температурное поле отливки принималось в качестве начального для кокиля, т.е. начальные условия по температурам для кокиля при решении уравнения теплопроводности (4) являлись динамически изменяющимися температурами отливки. На третьем этапе проводили расчет температур кокиля.

В расчетах использовали следующие данные: расплав – чугун марки СЧ20 заданного состава; температура заливки – 1351°C ; начальная температура кокиля – 200°C ; масса отливки – 46 кг; ее габаритные размеры – $740 \times 400 \times 80$ мм; материал отливки – чугун СЧ20 (C – 3,3–3,5%; Si – 1,4–2,4; Mn – 0,7–1,0; P – 0,2; S – 0,15%). Для изготовления отливки применяли кокиль с горизонтальной плоскостью разъема. С двух сторон кокиля расположены литниковые чаши. Одна чаша

используется для заливки, вторая работает как выпор. При появлении сетки разгара на первой чаше назначение чаш меняется на противоположное. Весь объем кокиля был разбит на элементы с помощью пространственной равномерной сетки. В зависимости от положения в пространстве каждой клетке (форма, отливка, воздух) присваивали соответствующие физические свойства (теплопроводность, теплоемкость, плотность и т.д.).

На рис. 1 показано изображение кокиля и находящейся в нем отливки «решетка». Боковое изображение кокиля представлено на рис. 1, а, б, где отмечены два горизонтальных сечения, для которых анализировали распределения температур. Сечение 1-1 находится на расстоянии $y=0,01$ м от поверхности кокиля, где $y=0$. Сечение 2-2 сдвинуто относительно сечения 1-1 и находится на расстоянии $y=0,02$ м от поверхности кокиля. На рис. 2, 3 показаны распределения температур в различные моменты времени для выделенных плоскостей. Как видно из рис. 2, а, на момент времени $\tau=100$ с температура в сечении 1-1 в основном соответствует интервалу температур $200-220^\circ\text{C}$. Число клеток, имеющих температуры $320-340^\circ\text{C}$, незначительно. Причем основное повышение температуры кокиля наблюдается в местах соединения литниковой системы и отливки, т.е. основной вклад в высокие температуры кокиля вносится литниковой системой. Из рисунка видно, что уменьшение температур идет в направлении уменьшения значений X . С увеличением времени $\tau=150$ с температура в сечении 1-1 повышается, о чем свидетельствует увеличение доли клеток с температурой $T \in [220, 240^\circ\text{C}]$.

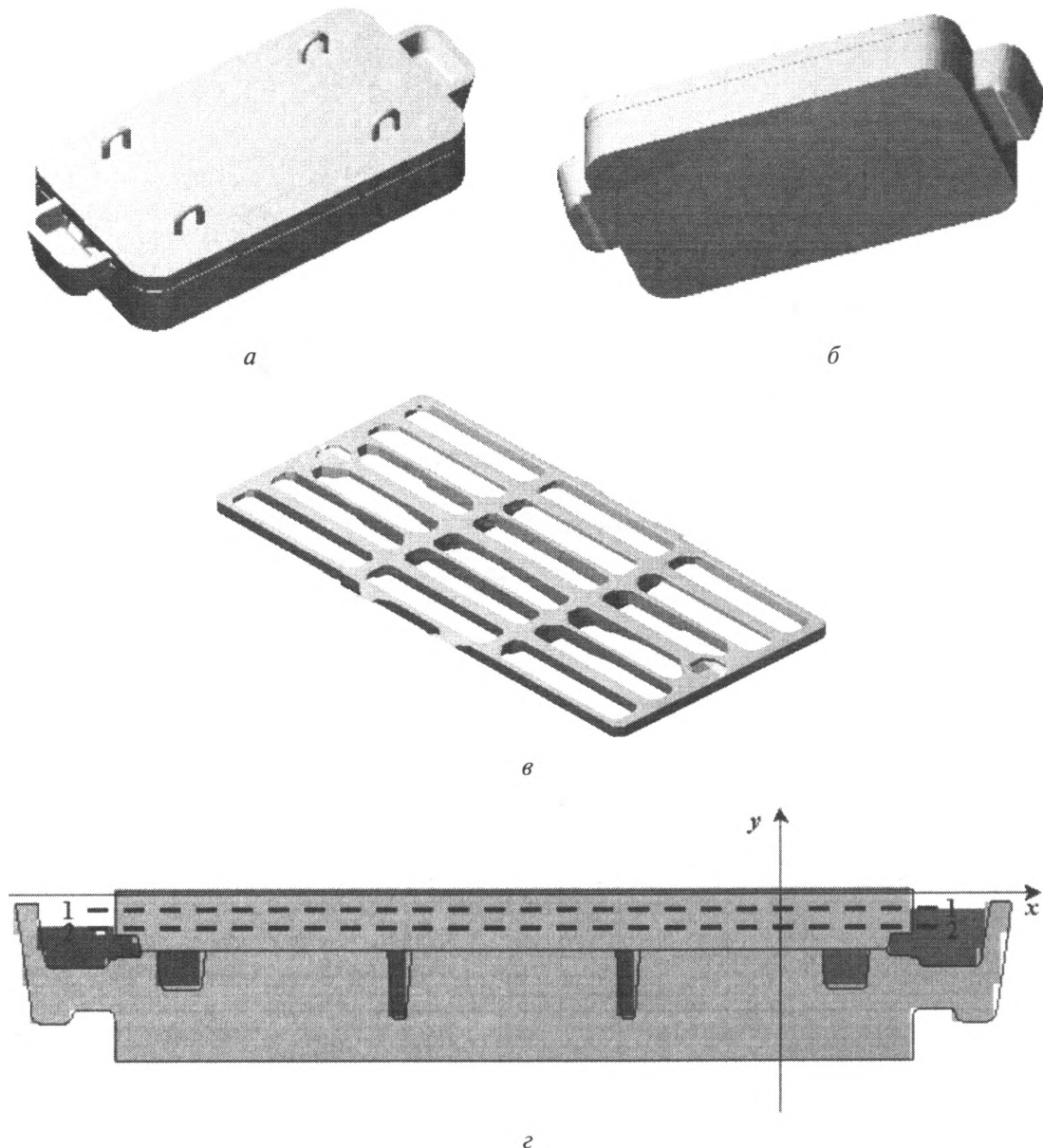
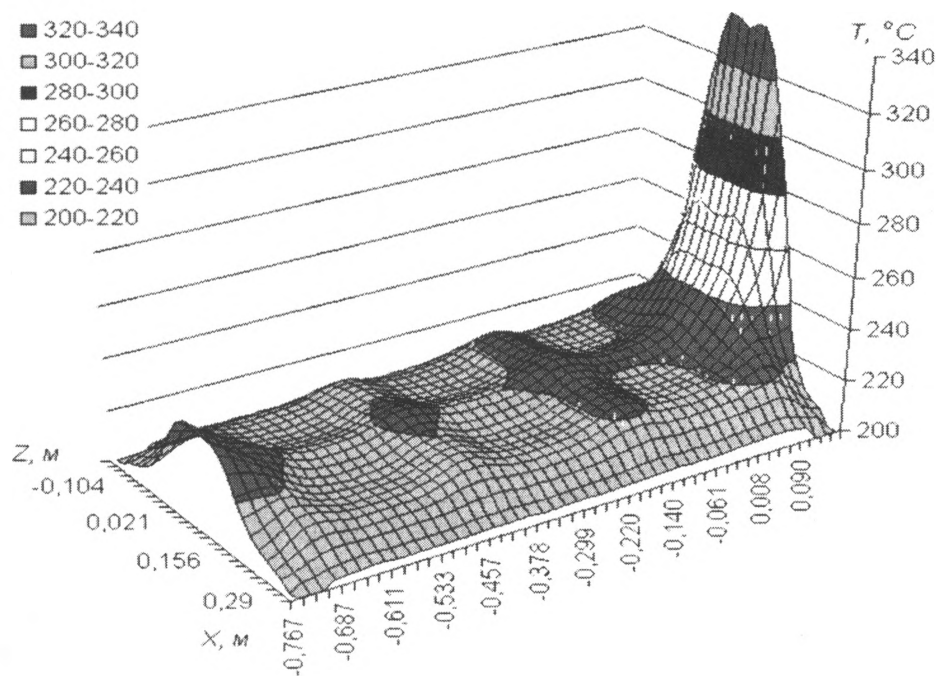
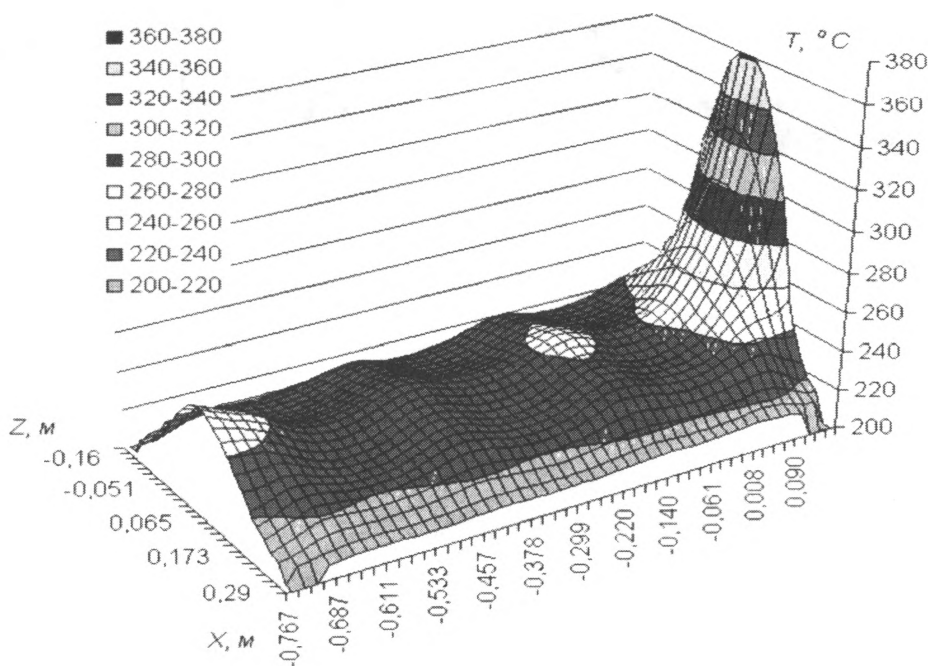


Рис. 1. Внешний вид сверху (а) и снизу (б) кокиля, получаемой отливки «решетка» (в) и вид моделируемой детали в плоскости $z=0$ со схематично выделенными анализируемыми сечениями 1-1 и 2-2 (г)



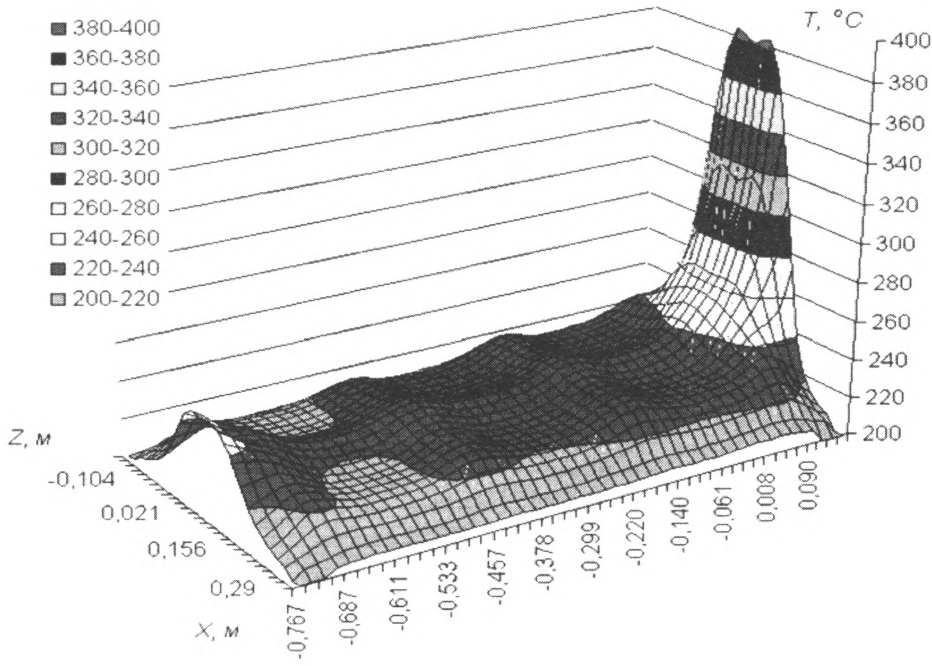
a



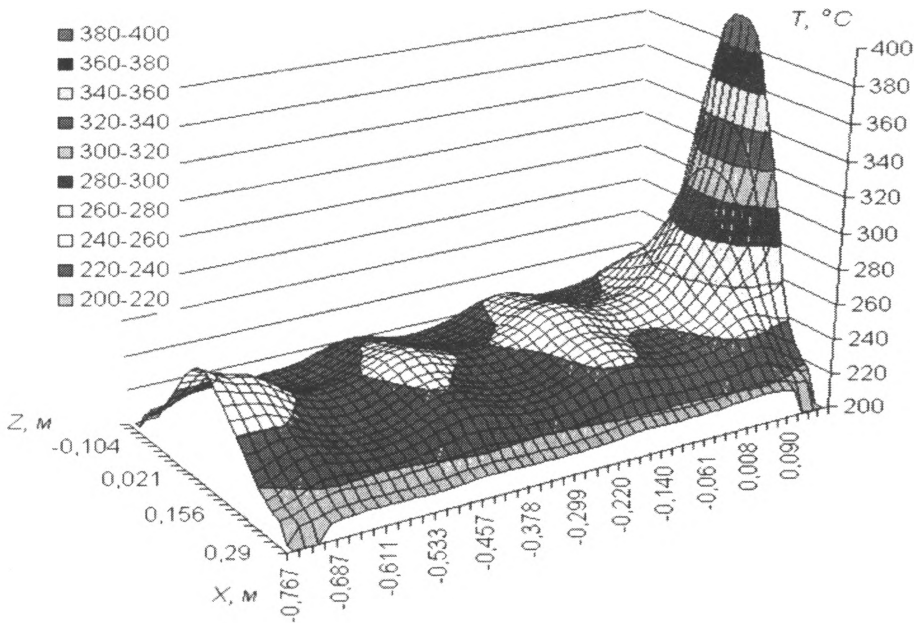
b

Рис. 2. Распределение температуры в сечении 1-1, находящимся на расстоянии 0,01 м от поверхности кокиля, в момент времени $\tau=100$ с (a) и $\tau=150$ с (б)

Анализируя температуры сечения 2-2 на момент времени $\tau=150$ с, можно видеть, что температура кокиля повышается, о чем свидетельствует большая доля клеток с температурой 240–260°C (рис. 3). Следует отметить, что литниковая система является источником тепла и приводит к появлению в кокиле клеток с температурой 380–400°C, что объясняется близостью сечения 2-2 к литниковой системе. Представленные зависимости показывают, что положение литниковой системы и размеры ее каналов могут быть причиной анизотропного температурного поля, что способствует условиям образования трещин в кокиле. Таким образом, причина того, что распределение температур в сечениях носит волнообразный характер (рис. 2, 3) связана с неравномерным распределением заливаемого металла в кокиль и сложной конфигурацией отливки.



a



b

Рис. 3. Распределение температуры в сечении 2-2, находящимся на расстоянии 0,02 м от поверхности кокиля, в момент времени $\tau=100$ с (a) и $\tau=150$ с (b)

На рис. 4, a, б показано распределение числа сеточных элементов в полном объеме кокиля по температуре. Представленные зависимости отражают объемное распределение температур по всему пространству кокиля. Как видно из рисунка, распределение температур в объеме кокиля носит убывающий характер для времени заполнения кокиля $\tau=20-80$ с. Сравнивая кривые распределения для $\tau=20$ и 30 с, можно видеть, что число элементов, имеющих $T=200^{\circ}\text{C}$, уменьшается и при этом увеличивается число элементов кокиля, имеющих температуру более $T=215^{\circ}\text{C}$. Эта тенденция сохраняется для времени заполнения $\tau=40-80$ с. Причем на момент времени $\tau=80$ с наибольшее количество сеточных элементов кокиля имеет высокие температуры. Из рис. 5, б на участке температур $T \in [250, 390^{\circ}\text{C}]$ сохраняется аналогичная тенденция – нижняя кривая распределения температур соответствует $\tau=20$ с, а верхняя – $\tau=80$ с. Следует отметить, что для некоторых времен заполнения статистические кривые могут пересекаться, например, при $\tau=50$ с и $\tau=60$ с, что может свидетельствовать о нестационарности температурного поля данного кокиля.

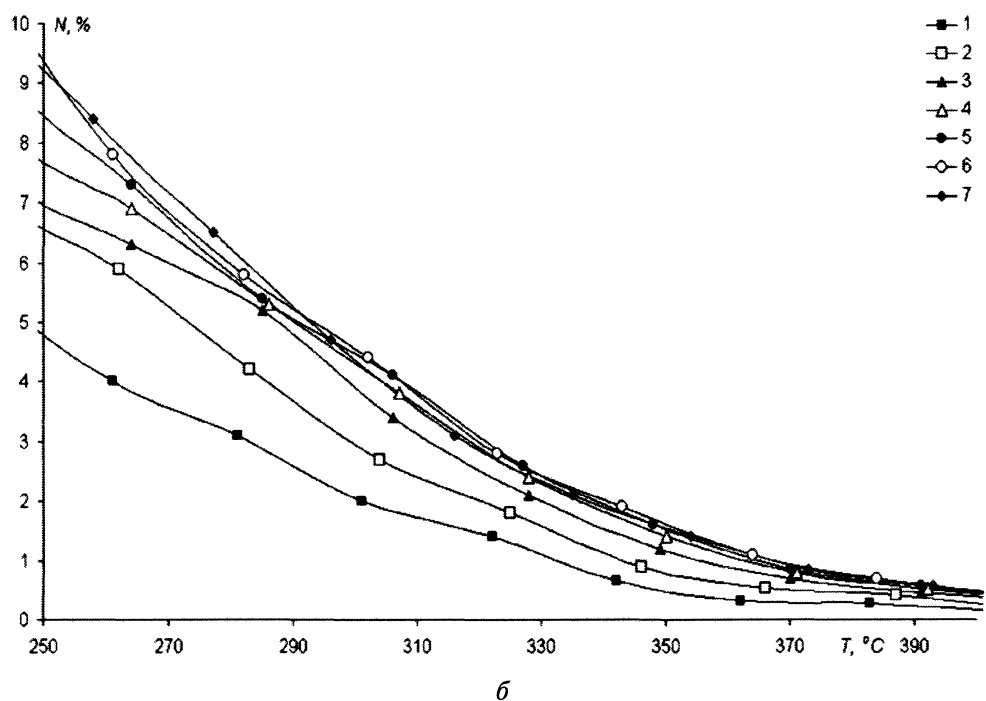
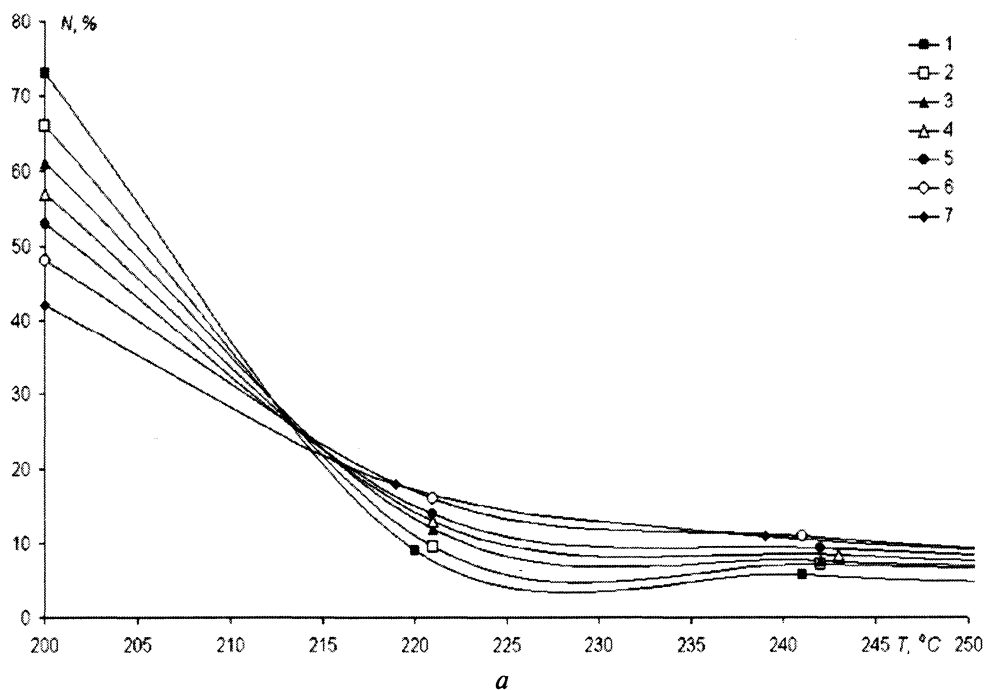
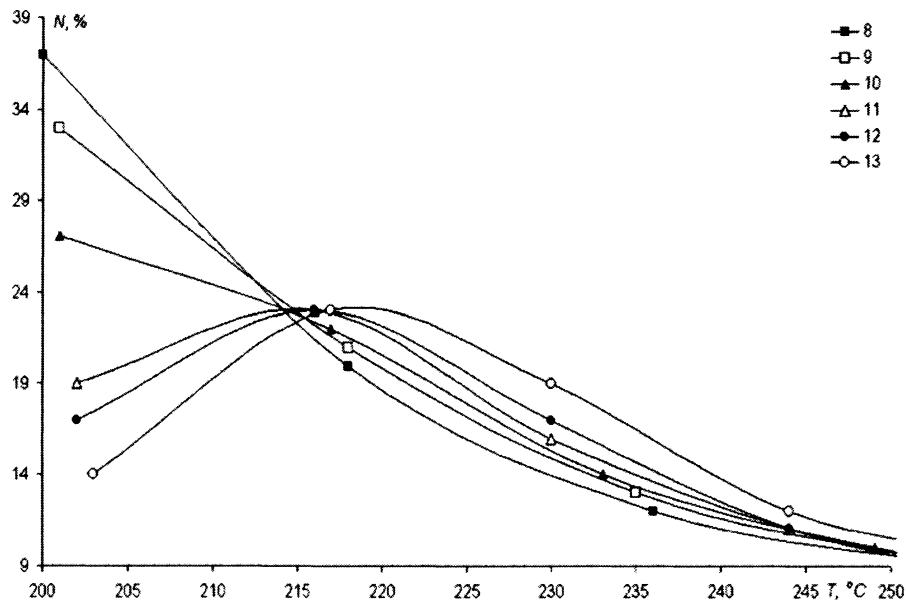
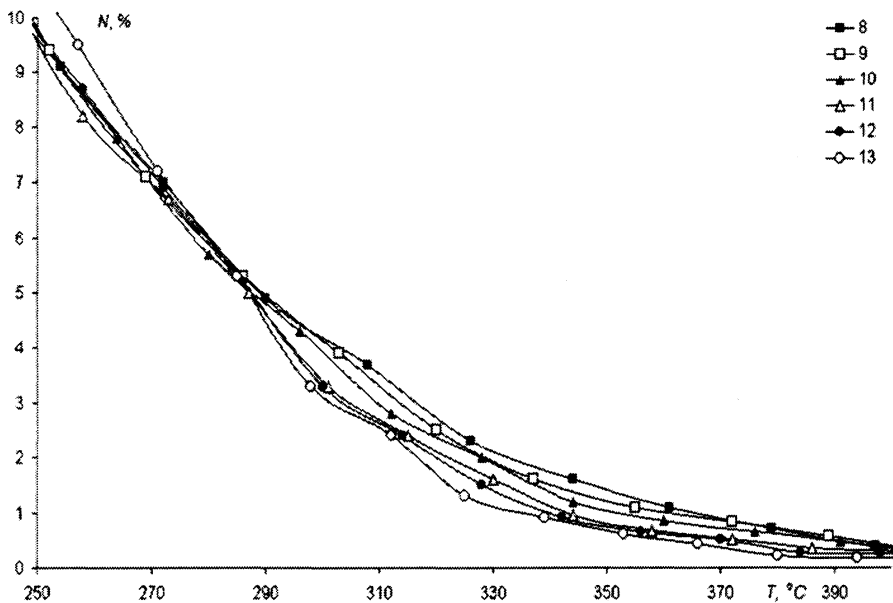


Рис. 4. Расчетное распределение числа сеточных элементов кокиля A по температурам в различные моменты времени его заполнения расплавом: 1 – $\tau=20$ с; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 50; 5 – 60; 6 – 70; 7 – 80 с

На рис. 5, a , b представлено частотное распределение числа сеточных элементов по температурам для времени $\tau=90-150$ с. Как видно из рисунка, характер изменения зависимости $N=f(T)$ меняется для $\tau=120$ с. На этот момент времени сеточных элементов, имеющих $T=200^\circ\text{C}$, уже нет. В то же время увеличивается число сеточных элементов, имеющих температуру $T \in [215, 225^\circ\text{C}]$. Причем на частотной кривой распределения по температурам появляется небольшой максимум, характерный для гауссовой кривой. На интервале температур $T \in [250, 390^\circ\text{C}]$ тенденция в сторону увеличения общей температуры кокиля с течением времени сохраняется. При этом частотные кривые могут пересекаться, что свидетельствует о динамике перераспределения температур между сеточными элементами кокиля. Представленные расчетные данные хорошо согласуются с известными фактами о том, что в металлических формах сложной конфигурации характер изменения температуры нагреваемого кокиля под действием расплавленного металла меняется.



a



б

Рис. 5. Расчетное распределение числа сеточных элементов кокиля A по температурам в различные моменты времени его заполнения расплавом: 8 – $\tau=90$ с; 9 – 100; 10 – 110; 11 – 120; 12 – 130; 13 – 150 с

Таким образом, выполненные исследования показали, что на основе математического моделирования и компьютерных расчетов можно проводить исследование динамики распределения температур во времени 3d-кокилей. Это позволяет предложить метод расчета температур по объему формы в качестве основного инструмента для выбора конфигурации кокиля на этапе его проектирования. Сущность этого метода состоит в том, чтобы выбирать оптимальную конфигурацию кокиля по характеру динамики частотных зависимостей числа сеточных элементов, показывающих объемное распределение температур металлической формы при его заполнении расплавом. Данный метод отличается от известных тем, что он учитывает динамику заполнения формы и пространственное положение литниковой системы.

Литература

1. Вейник А. И. Кокиль. Мн.: Наука и техника, 1972.
2. Литье в кокиль / С. Л. Бураков, А. И. Вейник, Н. П. Дубинин и др. / Под ред. А. И. Вейника. М.: Машиностроение, 1980.
3. Вейник А. И. Теплообмен между слитком и изложницей. М.: Metallurgizdat, 1959.
4. Чичко А. Н., Марков Л. В. Математическое моделирование термонапряженного состояния кокиля с целью повышения его стойкости // Литье и металлургия. 2005. №1.
5. Chichko A., Yatskevich Y., Sobolev V. Three-dimensional computer modeling of alloys flow and foundry technology // Technologia 99. 6-th International conference. 1999. Bratislava. P. 672–675.
6. Чичко А.Н., Яцкевич Ю.В., Соболев В.Ф., Чичко О.И. Компьютерное моделирование в задачах термоупругости сложных пространственных деталей // Изв. вузов. Энергетика. 2003. №3. С. 68–74.