



УДК 621.74

Поступила 06.06.2013

А. Н. ЧИЧКО, Д. М. КУКУЙ, В. Ф. СОБОЛЕВ, С. Г. ЛИХОУЗОВ, О. А. САЧЕК, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В САЕ «ПРОТЕРМ-1» ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ В ПЕЧАХ С ЗАДАНЫМ РЕЖИМОМ НАГРЕВА

С помощью разработанного модуля нагрева проведено численное моделирование процесса термообработки стальной отливки «Кулиса» для заданного режима нагрева. Рассчитаны зависимости статистических параметров температурного поля от времени нагрева с целью проведения количественной оценки различных групп сеточных элементов по отношению к средней температуре объекта.

The numerical modeling of process of the steel casting "Link" heat treatment for the set mode of heating is carried out by means of the developed module of heating. Dependences of statistical parameters of temperature field on heating time for the purpose of carrying out quantitative assessment of various groups of net elements in relation to the average temperature of an object are calculated.

Известно, что моделирование процессов нагрева изделий является одним из важнейших направлений современного машиностроения, открывающим новые возможности для разработчиков технологических процессов. В работах [1–4] рассмотрены различные аспекты решения задач, связанных с режимами нагрева и процессами, протекающими в процессе нагрева изделий. В работе [5–7] рассмотрены металлургические задачи нагрева слитков при заданных режимах. В работе [8] предложены клеточно-автоматные модели для решения задач, связанных с термообработкой изделий, позволяющие детально анализировать изменение температур и градиентов по всей геометрии изделий, что открывает новые возможности для разработки оптимальных режимов промышленных деталей.

Целью настоящей работы является численное моделирование процесса термообработки заготовок в САЕ системе «ПроТерм-1» [8] для заданного режима термической обработки (табл. 1).

Таблица 1. Исходный режим нагрева детали «Кулиса», используемый при компьютерном моделировании

$t, c$	0	600	1200	1800	2400	3000	7000
$T, ^\circ C$	20	300	500	650	750	820	850

Для проведения моделирования была использована 3d-модель (рис. 1) стальной отливки «Ку-

лиса», которая построена с помощью системы SolidWorks и импортирована в систему «ПроТерм-1». Материалом отливки являлась сталь 40Л, ГОСТ 977-88, имеющая следующие характеристики:

- удельная теплоемкость  $c_1$ , задаваемая в табличном виде:  $c_1, Дж/(кг \cdot ^\circ C) = 470 (100 ^\circ C), 483 (200 ^\circ C), 525 (400 ^\circ C), 571 (600 ^\circ C)$ ;
- коэффициент теплопроводности  $\lambda_1$ , задаваемый в табличном виде:  $\lambda_1, Вт/(м \cdot ^\circ C) = 60 (100 ^\circ C), 53 (200 ^\circ C), 47 (400 ^\circ C), 41 (500 ^\circ C)$ ;
- плотность  $\rho = 7810 \text{ кг/м}^3$ .
- $T_{лик} = 1505 ^\circ C; T_{сол} = 1430 ^\circ C$ .

Результатом численного моделирования были значения температур на протяжении всего процесса



Рис. 1. 3d-модель отливки «Кулиса», используемой при моделировании

термообработки, сохраненные с заданным в программе шагом. В программе использовали два вида представления результатов: в виде графиков изменения температуры заданной точки в отливке на протяжении всего процесса термообработки и в виде цветных пространственно распределенных полей температур заданных сечений. На рис. 2 показано температурное поле в сечении ХУ отливки «Кулиса» для момента времени  $t = 100$  с, соответствующего начальному этапу нагрева. Для анализа изменения температур были выбраны наименее и наиболее интенсивно нагреваемые в процессе термообработки точки: точка  $T_1$ , находящаяся в центральной массивной части отливки, точка  $T_2$  в удаленной от центра части, а также точка  $T_3$  – в тонкой части.

В табл. 2 приведены значения температур на протяжении всего процесса термообработки в характерных точках отливки «Кулиса», а также разностей между температурами:  $\Delta_1 = T_1 - T_2$  и  $\Delta_2 = T_1 - T_3$ . Как видно из таблицы, начальный этап нагрева характеризуется плавным увеличением градиента температур для выбранных точек, затем стабилизируется и плавно снижается по мере приближения к температуре в печи. Все точки отливки достигают температуры 800 °С за 5700 с. Следует отметить, что пик разности температур приходится на момент времени  $t = 2000$  с и достигает 88 °С для разности температур между точками  $T_1$  и  $T_2$  и 158 °С для разности температур между точками  $T_1$  и  $T_3$ . Максимальная разность температур характеризует вероятность возникновения термических напряжений. После достижения пиковых значений разности температур постепенно снижаются и составляют менее 30 °С к моменту достижения самой холодной точкой отливки температуры 800 °С.

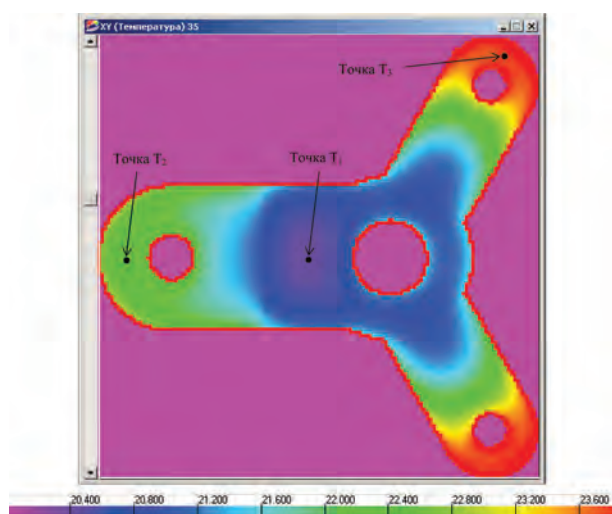


Рис. 2. Рассчитанное температурное поле отливки «Кулиса» для момента времени  $t = 100$  с в процессе термообработки по режиму 2

Таблица 2. Значения температур в различных точках отливки «Кулиса» в процессе термообработки по режиму (см. табл. 1)

Время, с	Температура в различных точках пластины, °С			Разность температур, °С	
	точка $T_1$	точка $T_2$	точка $T_3$	$\Delta_1 = T_1 - T_2$	$\Delta_2 = T_1 - T_3$
0	20	20	20	0	0
100	20	22	24	-2	-3
300	27	41	52	-13	-25
500	44	73	97	-29	-54
700	69	114	151	-46	-83
900	100	159	206	-59	-105
1200	156	230	288	-74	-132
1600	242	326	393	-84	-151
2000	332	419	489	-88	-158
2400	419	503	572	-84	-153
2800	500	578	642	-78	-142
3200	574	643	701	-70	-127
3600	637	696	745	-59	-109
4000	688	735	776	-47	-88
4400	728	764	796	-36	-68
4800	758	785	810	-27	-52
5200	781	801	820	-21	-39
5600	797,85	813,26	827,40	-15	-30
6000	810,79	822,34	833,05	-12	-22
6400	820,52	829,19	837,28	-9	-17
6800	827,83	834,34	840,45	-7	-13
7000	830,78	836,42	841,72	-6	-11

На рис. 3 представлены зависимости скорости изменения температуры от времени в процессе термообработки в различных точках отливки «Кулиса» для заданного режима (см. табл. 1). Как видно из рисунка, в начальный момент времени скорость изменения температуры для всех точек растет. Максимальная скорость изменения температуры наблюдается в точке  $T_3$  в момент времени 1200 с, составляя 0,27 °С/с. С течением времени скорость изменения температуры в точке  $T_3$  падает и начиная с момента времени 2000 с скорость изменения температуры в данной точке меньше, чем в других точках. В точке  $T_1$  максимальная скорость изменения температуры составляет 0,23 °С/с в момент времени 2000 с. После момента времени 2000 с скорость изменения температуры в точке  $T_1$  становится выше скорости изменения температуры в точках  $T_2$  и  $T_3$ .

Таким образом, в результате численного моделирования процесса термообработки стальной отливки «Кулиса» для заданного режима было установлено, что максимальная разность температур между различными частями отливки, характеризующая вероятность возникновения термических напряжений, достигается за 2000 с и составляет 158 °С; все точки отливки достигают температуры 800 °С за 5700 с.

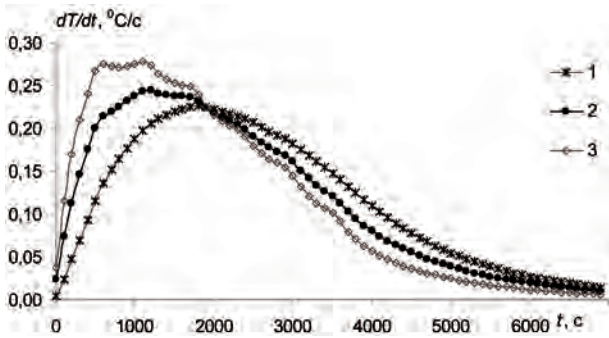


Рис. 3. Зависимость скорости изменения температуры от времени для различных областей отливки «Кулиса» в процессе термообработки по заданному режиму (см. табл. 1): 1 – точка  $T_1$ ; 2 – точка  $T_2$ ; 3 – точка  $T_3$

На следующем этапе был проведен расчет параметров статистических функций распределения температур заготовок, нагреваемых по заданному режиму термообработки. Статистическая функция распределения является комплексной пространственной характеристикой распределения температурных полей по всему объему отливки и может служить основой для оценки вероятности появления термических напряжений вследствие неравномерного прогрева различных узлов отливки.

На рис. 4, 5 представлены гистограммы распределения значений температур для отливки «Кулиса» в процессе термообработки по заданному режиму для следующих моментов времени  $t = 600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600, 4200, 4800$  и  $5400$  с. Как видно из рисунков, распределения характеризуются большим количеством менее прогретых ячеек в левой их части и небольшим количеством

сильно прогретых ячеек в правой части. При общей схожести распределений следует отметить различный диапазон температур по оси  $X$ , что говорит о распределениях как характеристике пространственной геометрии отливки с учетом тенденции к нагреву ее различных узлов. С течением времени в процессе нагрева происходит изменение температурных диапазонов и некоторое перераспределение температур внутри отливки, однако общий характер распределения температур является характеристикой геометрии отливки и значительно не меняется с течением времени.

Анализ рассчитанных распределений по температурам для различных моментов времени показывает, что распределения температур в разные моменты времени имеют два пика. Для момента времени  $t = 600$  с первый пик формируется на температурном интервале  $[58,07 \text{ }^\circ\text{C}; 61,79 \text{ }^\circ\text{C})$  и достигает значения 23 554 о. е., второй пик – на температурном интервале  $[69,22 \text{ }^\circ\text{C}; 72,94 \text{ }^\circ\text{C})$  и достигает значения 30 607 о. е. Для момента времени  $t = 1200$  с первый пик формируется на температурном интервале  $[161,8 \text{ }^\circ\text{C}; 168,8 \text{ }^\circ\text{C})$  и достигает значения 25 966 о. е., второй пик – на температурном интервале  $[182,7 \text{ }^\circ\text{C}; 189,6 \text{ }^\circ\text{C})$  и достигает значения 27 533 о. е. Для момента времени  $t = 1800$  с первый пик формируется на температурном интервале  $[292,8 \text{ }^\circ\text{C}; 301,0 \text{ }^\circ\text{C})$  и достигает значения 26 324 о. е., второй пик – на температурном интервале  $[325,5 \text{ }^\circ\text{C}; 333,7 \text{ }^\circ\text{C})$  и достигает значения 28 298 о. е. Для момента времени  $t = 2400$  с первый пик формируется на температурном интер-

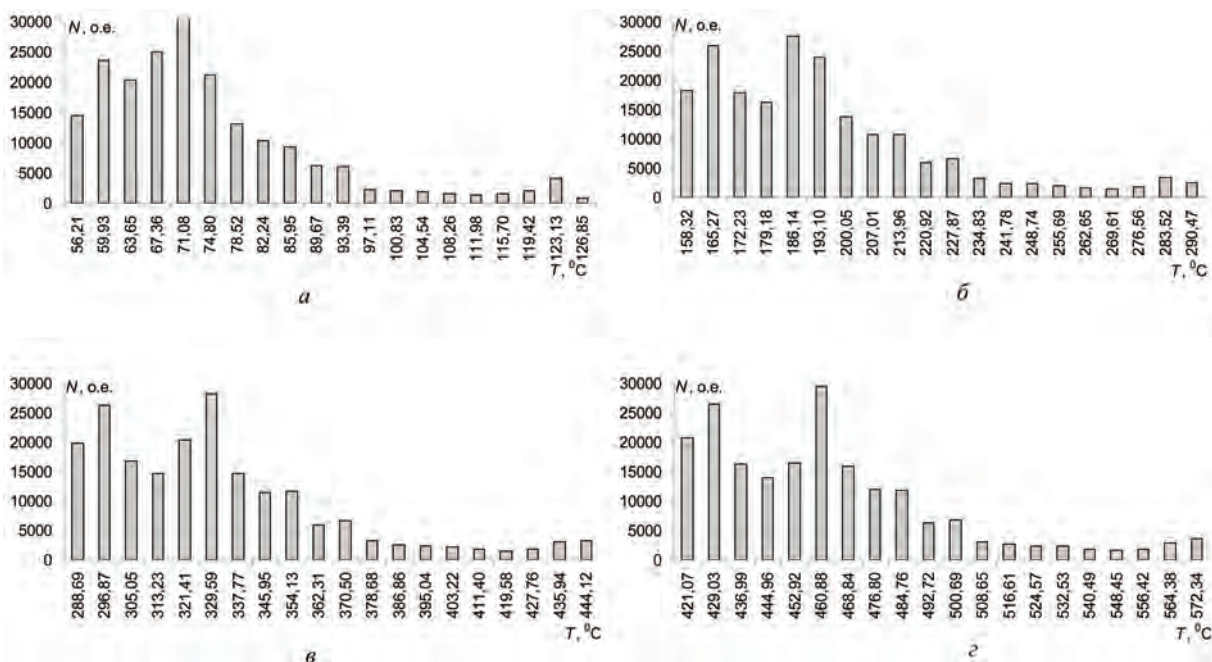


Рис. 4. Гистограмма распределения значений для отливки «Кулиса» для различных моментов времени в процессе термообработки по заданному режиму: а –  $t = 600$  с; б –  $1200$ ; в –  $1800$ ; з –  $2400$  с

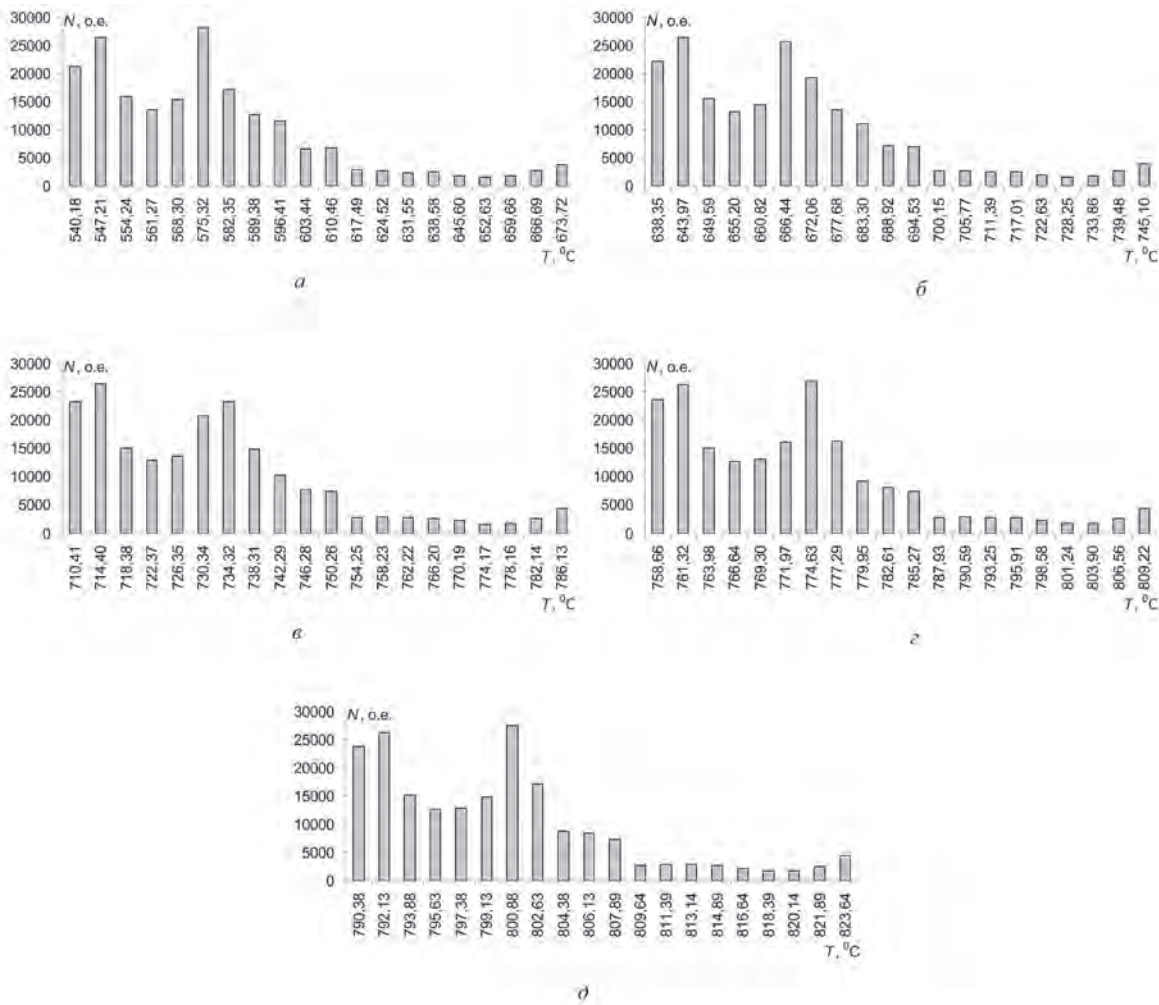


Рис. 5. Гистограмма распределения значений для отливки «Кулиса» для различных моментов времени в процессе термообработки по заданному режиму: а –  $t = 3000$  с; б –  $3600$ ; в –  $4200$ ; г –  $4800$ ; д –  $5400$  с

вале [425,1 °C; 433,0 °C) и достигает значения 26 451 о. е., второй пик – на температурном интервале [456,9 °C; 464,9 °C) и достигает значения 29 486 о. е. Для момента времени  $t = 3000$  с первый пик формируется на температурном интервале [543,7 °C; 550,7 °C) и достигает значения 26 486 о. е., второй пик – на температурном интервале [571,8 °C; 578,8 °C) и достигает значения 28 186 о. е. Для момента времени  $t = 3600$  с первый пик формируется на температурном интервале [641,2 °C; 646,8 °C) и достигает значения 26 443 о. е., второй пик – на температурном интервале [663,6 °C; 669,3 °C) и достигает значения 25 717 о. е. Для момента времени  $t = 4200$  с первый пик формируется на температурном интервале [712,4 °C; 716,4 °C) и достигает значения 26 343 о. е., второй пик – на температурном интервале [732,3 °C; 736,3 °C) и достигает значения 23 164 о. е. Для момента времени  $t = 4800$  с первый пик формируется на температурном интервале [760,0 °C; 762,7 °C) и достигает значения 26 197 о. е., второй пик – на температурном интервале [773,3 °C; 776,0 °C) и достигает значения

26 844 о. е. Для момента времени  $t = 5400$  с первый пик формируется на температурном интервале [791,3 °C; 793,0 °C) и достигает значения 26 164 о. е., второй пик – на температурном интервале [800,0 °C; 801,8 °C) и достигает значения 27 428 о. е. Как видно из рисунков, второй пик распределений на протяжении процесса термообработки смещается вправо в область больших значений температур.

Для количественной оценки статистических функций распределения были использованы четыре параметра, которые вычисляются для каждого момента времени по формулам:

$$P_1(t) = T_{cp}(t) - \frac{\sum_{i=1}^5 N_i(t, T_i) T_i}{\sum_{i=1}^5 N'_i(T_i)},$$

$$P_2(t) = T_{cp}(t) - \frac{\sum_{i=6}^{10} N_i(t, T_i) T_i}{\sum_{i=6}^{10} N'_i(T_i)},$$

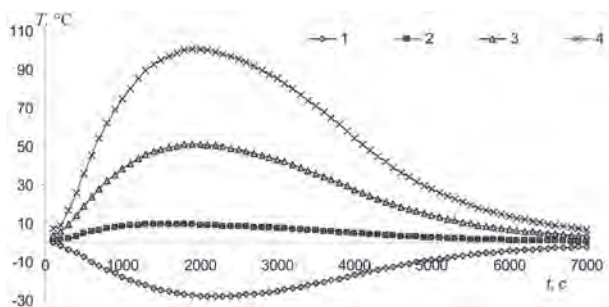


Рис. 6. Изменение значений параметров распределения температур  $P_1, P_2, P_3, P_4$  на протяжении всего процесса термообработки по режиму 2 отливки «Кулиса»: 1 –  $P_1$ ; 2 –  $P_2$ ; 3 –  $P_3$ ; 4 –  $P_4$

$$P_3(t) = T_{cp}(t) - \frac{\sum_{i=11}^{15} N_i(t, T_i) T_i}{\sum_{i=11}^{15} N_i'(T_i)},$$

$$P_4(t) = T_{cp}(t) - \frac{\sum_{i=16}^{20} N_i(t, T_i) T_i}{\sum_{i=16}^{20} N_i'(T_i)},$$

где  $T_{cp}(t)$  – среднее значение температуры пластины для момента времени  $t$ ;  $N_i(t, T_i)$  – число ячеек с температурой  $T_i$  для момента времени  $t$ ;  $T_i$  – среднее значение температуры для  $i$ -го интервала дискретизации,  $i = 1, 20$ .

Физический смысл этих параметров сводится к количественной оценке различных групп сеточных элементов от средней температуры объекта.

Последняя определяется по статистической функции распределения температур всего нагреваемого объекта. Чем больше температурное различие между «холодными» сеточными элементами и «горячими», тем больше склонность к образованию дефектов, связанных с градиентом температур объекта.

На рис. 6 показано изменение рассчитанных значений параметров  $P_1, P_2, P_3, P_4$  на протяжении всего процесса термообработки отливки «Кулиса». Как видно из рисунка, абсолютные значения параметров возрастают на начальном этапе нагрева. Так, параметр  $P_1$  возрастает до момента времени  $t = 2100$  с, достигая значения  $28^\circ\text{C}$ , параметр  $P_2$  возрастает до момента времени  $t = 1500$  с, достигая значения  $9^\circ\text{C}$ , параметр  $P_3$  возрастает до момента времени  $t = 1900$  с, достигая значения  $51^\circ\text{C}$ , параметр  $P_4$  возрастает до момента времени  $t = 1900$  с, достигая значения  $101^\circ\text{C}$ . Затем наблюдается снижение абсолютных значений статистических параметров, вначале более резкое, затем более плавное. Этот этап характеризует перераспределение тепла внутри отливки и выравнивание значений температур по всему объему.

Таким образом, представленные данные на примере стальной отливки Кулиса», полученные с помощью разработанного модуля нагрева программного обеспечения «ПроТерм-1», показывают широкие возможности для выбора наилучших термических режимов нагрева. Это открывает новые возможности для решения задач оптимизации термообработки деталей промышленного производства.

### Литература

1. Чичко А. Н., Сачек О. А. Математическое моделирование процесса цементации на основе уравнения теплопроводности и диффузии // *Литье и металлургия*. 2008. № 2. С. 88–92.
2. Чичко А. Н., Сачек О. А. О точности методов численного моделирования процессов нагрева и охлаждения объектов, используемых в задачах оптимизации расходования энергоресурсов // *Изв. высш. учеб. завед. и энергет. объедин. СНГ. Энергетика*. 2008. № 1. С. 34–43.
3. Чичко А. Н., Бороздин А. В., Сачек О. А. Алгоритмы теории графов и оптимизация режимов нагрева пространственного объекта // *Литье и металлургия*. 2007. № 2. С. 110–114.
4. Чичко А. Н., Сачек О. А., Бороздин А. В. Сравнительный анализ аналитического и численного решения тепловой задачи, использующей уравнение теплопроводности // *Литье и металлургия*. 2007. № 2. С. 94–101.
5. Чичко А. Н., Бороздин А. С. Трехмерное моделирование напряженного состояния движущегося слитка при изменении граничных условий по температуре // *Изв. вузов. Энергетика*. 2005. № 4. С. 61–67.
6. Чичко А. Н., Андрианов Н. В., Бороздин А. С. Компьютерная система «ПроТерм-1н»- для моделирования процессов ступенчатого нагрева стальных слитков // *Сталь*. 2005. № 11. С. 66–71.
7. Чичко А. Н., Бороздин А. С. Математическая модель расчета напряжений движущегося в печи слитка // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2005. № 8. С. 47–50.
8. Чичко А. Н., Кукуй Д. М., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г., Сачек О. А. Моделирование процессов нагрева и охлаждения деталей на основе трехмерного уравнения теплопроводности в САЕ «ПроТерм-1» // *Литье и металлургия*. 2012. № 1. С. 65–70.