



УДК 621.74

Поступила 06.06.2013

В. Ф. СОБОЛЕВ, С. Г. ЛИХОУЗОВ, А. Н. ЧИЧКО, О. А. САЧЕК, Т. В. МАТЮШИНЕЦ, БНТУ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ФОРМАХ И КРИТЕРИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОТЕРЬ ТЕМПЕРАТУР В ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ ОТЛИВКИ

На основе данных численного моделирования течения металла предложен комплексный количественный критерий для анализа потерь температур в литниковых системах отливки. Представлена динамика изменения критерия для анализа потерь температур в литниковых системах на примере литниковой системы с отливкой «Корпус конической пары».

The complex quantitative criterion for the analysis of temperatures loss in gate systems of casting is offered on the basis of data of numerical modeling of metal current. Dynamics of change of criterion for the analysis of temperatures loss in gate systems on the example of the gate system with casting "Case of conical pair" is presented.

Известно, что заполнение литейной формы расплавом посредством литниковой системы сопровождается сложными тепловыми, гидродинамическими, физико-химическими процессами, протекающими на границе раздела «металл-форма». Изменение температуры заливки, теплопроводности металла и формы, а также пространственная конфигурация литников, площадь сечения и положения питателей оказывают большое влияние на процесс кристаллизации и свойства металла в отливке. Поэтому для разработчика технологии изготовления отливок важнейшим вопросом является предпроектная количественная оценка влияния технологических факторов на качество изготавливаемой отливки. В настоящее время все более широкое внимание литейщиков привлекают компьютерные системы моделирования литейных процессов, позволяющие существенно повысить время и качество проектирования литниковых систем и, как следствие, ускорить процессы внедрения новых отливок в производство.

В работах [1–4] описаны методы и подходы, основанные на идеях клеточно-автоматного моделирования, позволяющие автоматизировать многие этапы процесса разработки литниковых систем. С целью дальнейшего развития этих методов и подходов предлагается критериальный метод оценки процессов, которые оказывают важнейшее влияние на качество отливки.

Цель настоящей работы – разработка теплового критерия для оценки количественных параметров литейных процессов, протекающих в системе «литниковая система–отливка–форма». В работе [5] были предложены некоторые критерии для оценки литниковых систем на основе математического аппарата, представленного в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} F_{н.с.} < F_{л.х.} < F_{п}, \\ F_{н.с.} < F_{л.х.} > F_{п}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \omega c p \frac{\partial t}{\partial y} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}, \quad y > 0, \\ q(y) = \sqrt{\frac{\lambda_{п}}{\lambda_{а}}} \alpha [t(y) - t_{п}], \\ \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \\ t_{y=0} = t_{зал} = \text{const}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} K_{ш.ст} \leq K'_{ш.ст}, \\ K_{ш.л.х} \leq K'_{ш.л.х}, \\ K_{ш.п} \leq K'_{ш.п}, \end{cases} \quad (3)$$

$$K_{Q_1} \geq 1, \quad (4)$$

$$K_{Re} \geq 1,2, \quad (5)$$

где $K_{Q_1} = \frac{Q_{п}}{Q_{ф}} = \frac{\omega_{п} F_{п}}{Q_{ф} F_{ф}}$ – критерий соответствия расходов металла в полости формы и питателях;

$K_{ш.ст}, K_{ш.л.х}, K_{ш.п}$ – критерии шлакообразования соответственно для стояка, литникового хода и питателей; $K'_{ш.ст}, K'_{ш.л.х}, K'_{ш.п}$ – критические значения шлакообразования соответственно для стояка, литникового хода и питателей; $K_{Q_2} = \frac{Q_{с.в.}}{Q_{п.}} = \frac{\omega_{с.в.} F_{с.в.}}{\omega_{п.} F_{п.}}$ – дополнительные критерии, характеризующие вероятность образования в литниковой системе вакуума; $K_{Re} = \frac{Re_{ш}}{Re_{л.х}} = \frac{l_{с-п} \omega_{в.}}{\omega_{л.х}}$ – критерии шлакообразования (шлакоулавливания); $F_{ф}, F_{с.н}, F_{л.х}$ и $F_{п.}$ – площади соответственно полости формы нижнего сечения стояка, литникового хода и питателя; $\omega_{с.в.}, \omega_{л.х}, \omega_{п.}$ – скорости потока расплава соответственно в верхнем сечении стояка (на выходе из чаши), литниковом ходе, питателях; $\omega_{в.}$ – максимальная скорость всплытия шлаковой частицы; $l_{с-п}$ – расстояние от стояка до первого питателя.

Уравнения (1)–(5) дополнены условиями, связанными с геометрией литниковой системы:

$$t_c(y_1 = H_c) = t_{л.х}(y_1 = H_c),$$

$$t_{л.х}(y_2 = L_{л.х}) = t_{п.}(y = L_{л.х}),$$

$$t_{п.}(y_3 = L_{п.}) = t_1(y_3 = L_{п.}),$$

где $t_c, t_{л.х}, t_{п.}$ – температуры фронта потока в нижнем сечении стояка, литниковом ходе и питателе; H_c – высота стояка; $L_{л.х}$ – длина литникового хода; $L_{п.}$ – длина питателя; t_1 – температура фронта потока на выходе из питателя (на входе в рабочую полость формы).

Расчеты охлаждения металла в каналах литниковой системы по данным формулам выполняются последовательно от одного канала к другому в направлении движения потока. Неравенства (3)–(5) накладывают ограничения на турбулентность потока и позволяют избежать образования вторичных шлаков в стояке, литниковом ходе и питателях, обеспечивают улавливание шлака в литниковом ходе, а также условие постоянства расхода в каналах литниковой системы и питателях.

Для широко-интервальных сплавов предлагаются измененные уравнения, связывающие параметры литниковых систем:

$$\begin{cases} F_{с.н} < F_{л.х} < F_{п.}, \\ F_{с.н} < F_{л.х} > F_{п.}, \end{cases} \quad (6)$$

$$K_{Q_1} / K_{суж} = 1, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \omega c_p \frac{\partial t}{\partial y} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}, \quad y > 0, \\ q(y) = \sqrt{\frac{\lambda_{п.}}{\lambda_{ф}}} \alpha [t(y) - t_{п.}], \\ \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad t_{y=0} = t_{зал} = \text{const}, \end{cases} \quad (8)$$

$$K_{эр.л.с} < K_{эр.кр}, \quad (9)$$

$$K_{Q_2} \geq 1, \quad (10)$$

$$K_{Re} \geq 1, 2, \quad (11)$$

$$Q = \text{const}, \quad (12)$$

$$Q_{п_1} = Q_{п_2} = \dots = Q_{п_n}. \quad (13)$$

Приведенные критерии и параметры из работы [5] довольно сложно использовать при проектировании литниковых систем, так как они фактически не учитывают полную геометрию литниковых систем (рассмотрение касается координат x - y), а также основаны на трудно определяемых экспериментальных характеристиках.

В данной работе развивается новый подход для анализа процесса течения и кристаллизации отливок, основанный на синтезе клеточно-автоматных методов и методов обработки трехмерных изображений полей температур, давлений и скоростей. В основу этого метода положены численные аппроксимации уравнений Навье-Стокса и Фурье-Кирхгофа [6]:

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + U \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \right) = \\ - \frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + V \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) = \\ \rho g - \frac{\partial P}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial W}{\partial t} + V \frac{\partial W}{\partial x} + U \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} \right) = \\ - \frac{\partial P}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right), \\ c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial x} + U \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \\ \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q(x, y, z, \tau), \end{cases} \quad (14)$$

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 жидкости (расплава); t – время; P – давление в рассматриваемой точке потока; c, λ – соответственно теплоемкость и теплопроводность жидкости; T – температура в рассматриваемой точке потока; q – источник скрытой

теплоты кристаллизации в рассматриваемой точке потока.

При разработке данного подхода моделируемые процессы были разбиты на три блока. В первый блок вошли процессы, протекающие в литниковой системе при течении металла, во второй блок – процессы кристаллизации металла в форме, в третий блок – процессы нагрева формы, протекающие при формировании отливки. Данное разделение в математических терминах описано через изменение переменных пространства:

$$G = 1, r_x, m = 1, r_z,$$

где $x, y, z \in \{X_1^{G_1}, Y_1^{G_1}, Z_1^{G_1}; X_2^{G_2}, Y_2^{G_2}, Z_2^{G_2}; X_3^{G_3}, Y_3^{G_3}, Z_3^{G_3}\}$; G_1, G_2, G_3 – множества точек отливки, литниковой системы и формы соответственно; $G_1 = 1, r_1$; $G_2 = 1, r_2$; $G_3 = 1, r_3$.

Характерные дефекты, возникающие при изготовлении отливок, – это недоливы и спай, возникающие вследствие значительных потерь тепла расплавом при его движении в каналах литниковой системы. Необходимым условием исключения указанных дефектов и получения качественной отливки является исключение потери теплоты перегрева движущихся расплавом. При движении металла в литниковой системе в форме происходит снижение начальной температуры металла. Чем длиннее и сложнее геометрия литниковой системы, тем выше теплоотвод металла в форму. Чем ниже теплопроводность формовочной смеси, тем меньше теплоотдача металла от литниковой системы в форму. Таким образом, при прохождении литниковой системы металл с температурой заливки охлаждается до какой-то средней температуры. Причем она определяется объемом и массой литниковой системы и ее конструкцией. Так как литниковая система представляет собой 3d-модель, разбиваемую на сеточные элементы, то число этих элементов и их распределение в пространстве является математической формой, учитывающей особенности температурного поля литниковой системы за счет движения металла от стояка в форму. Предлагается следующий критерий для оценки средней температуры литниковой системы для заданного времени:

$$K_{p1} = T_{\text{зал}} - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n T_{ijk}(\tau = t_1)}{X_2^n + Y_2^n + Z_2^n}, \quad (15)$$

где $n \in \{G_2\}$.

Данный критерий описывает охлаждение фронта потока расплава в каналах литниковой системы. Условием исключения спаев и недоливов в отливке является условие $K_{p1} > T_{\text{лик}}$. Рассмотрим приме-

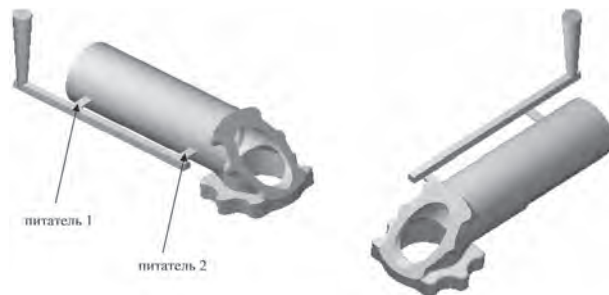


Рис. 1. 3d-модель литниковой системы со стальной отливки «Корпус конической пары»

нение этого критерия к отливке «Корпус конической пары». На рис. 1 представлена 3d-модель стальной отливки «Корпус конической пары» с литниковой системой, которая была построена с помощью системы Solid Works и импортирована в систему «ПроЛит-1» [1–4].

В качестве расплава была использована сталь 25Л ГОСТ 977-88, имеющая следующие характеристики:

- удельная теплоемкость c_1 , задаваемая в табличном виде: $c_1, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) = 470 (100^\circ\text{C}), 483 (200^\circ\text{C}), 525 (400^\circ\text{C}), 571 (600^\circ\text{C})$;
- коэффициент теплопроводности λ_1 , задаваемый в табличном виде: $\lambda_1, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}) = 51 (20^\circ\text{C}), 76 (100^\circ\text{C}), 65 (200^\circ\text{C}), 44 (300^\circ\text{C}), 38 (400^\circ\text{C})$;
- плотность $\rho = 7830 \text{ кг}/\text{м}^3$.
- $T_{\text{лик}} = 1521^\circ\text{C}$; $T_{\text{сол}} = 1487^\circ\text{C}$; $T_{\text{зал}} = 1620^\circ\text{C}$.

В качестве формы использовали песчаную смесь со следующими характеристиками:

- удельная теплоемкость $c_2 = 120 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;
- коэффициент теплопроводности $\lambda_2 = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;
- плотность $\rho_2 = 1600 \text{ кг}/\text{м}^3$.

В табл. 1, 2 приведены распределения температур в питателях 1 и 2 литниковой системы с отливкой «Корпус конической пары» для момента времени $t = 0,5 \text{ с}$. Серым цветом выделена область песчано-глинистой формы вокруг питателей. Как видно из таблиц, температура металла в питателе 1 находится в диапазоне $1575,05\text{--}1592,67^\circ\text{C}$, температура формы вокруг питателя 1 – в диапазоне $20,00\text{--}69,13^\circ\text{C}$. Питателя 2 металл не достигает на данный момент времени.

В табл. 3, 4 представлены распределения температур в питателях 1 и 2 литниковой системы с отливкой «Корпус конической пары» для момента времени $t = 2 \text{ с}$. Как видно из таблиц, температура металла в питателе 1 находится в диапазоне $1557,79\text{--}1574,59^\circ\text{C}$, температура формы вокруг питателя 1 – в диапазоне $20,32\text{--}426,46^\circ\text{C}$. Температура металла в питателе 2 находится в диапазоне $1514,41\text{--}1532,45^\circ\text{C}$, температура формы вокруг питателя 2 – в диапазоне $20,18\text{--}361,20^\circ\text{C}$.

Т а б л и ц а 1. Распределение температур в питателе 1 литниковой системы с отливкой «Корпус конической пары» для момента времени $t = 0,5$ с

Координата по оси Y	Температура в точке с координатой по оси X										
	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022
0,002	20,00	20,00	20,21	20,23	20,30	20,30	20,38	20,38	20,36	20,01	20,00
0,004	20,00	20,41	56,62	57,60	63,23	63,73	69,09	69,13	68,28	20,72	20,01
0,006	20,21	56,50	1575,05	1587,81	1590,62	1592,05	1592,49	1591,02	1580,00	68,26	20,36
0,008	20,10	45,30	1575,42	1585,97	1588,30	1590,47	1592,28	1592,67	1583,72	68,22	20,36
0,010	20,00	20,20	45,21	45,70	45,91	57,51	63,42	69,11	68,24	20,72	20,01
0,012	20,00	20,00	20,10	20,12	20,12	20,23	20,30	20,38	20,36	20,01	20,00

Т а б л и ц а 2. Распределение температур в питателе 2 литниковой системы с отливкой «Корпус конической пары» для момента времени $t = 0,5$ с

Координата по оси Y	Температура в точке с координатой по оси X											
	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022	0,024
0,002	20,00	20,00	20,02	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,02	20,00	20,00
0,004	20,00	20,05	20,55	20,86	20,94	20,97	20,97	20,94	20,86	20,55	20,05	20,00
0,006	20,02	20,54	20,78	21,28	21,61	21,76	21,76	21,61	21,28	20,78	20,54	20,02
0,008	20,02	20,54	20,78	21,28	21,61	21,76	21,76	21,61	21,28	20,78	20,54	20,02
0,010	20,00	20,05	20,55	20,86	20,94	20,97	20,97	20,94	20,86	20,55	20,05	20,00
0,012	20,00	20,00	20,02	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,02	20,00	20,00

Т а б л и ц а 3. Распределение температур в питателе 1 литниковой системы с отливкой «Корпус конической пары» для момента времени $t = 2$ с

Координата по оси Y	Температура в точке с координатой по оси X										
	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022
0,002	20,35	24,36	50,15	53,15	53,86	54,12	54,55	54,48	51,53	24,67	20,38
0,004	24,34	74,00	392,32	418,53	422,86	424,30	426,46	425,58	400,10	76,45	24,66
0,006	49,76	389,75	1563,73	1572,74	1574,13	1574,49	1574,43	1573,61	1567,25	398,61	51,32
0,008	48,73	383,48	1557,79	1566,87	1568,96	1570,87	1572,65	1572,99	1567,47	398,42	51,28
0,010	24,07	71,76	383,85	408,63	411,38	417,87	422,81	424,90	399,82	76,35	24,65
0,012	20,32	24,07	48,72	51,46	51,84	53,01	53,90	54,37	51,47	24,65	20,38

Т а б л и ц а 4. Распределение температур в питателе 2 литниковой системы с отливкой «Корпус конической пары» для момента времени $t = 2$ с

Координата по оси Y	Температура в точке с координатой по оси X											
	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022	0,024
0,002	20,18	22,70	41,82	43,65	43,80	43,83	43,84	43,84	43,79	41,95	22,72	20,18
0,004	22,70	59,84	339,19	358,99	360,65	361,08	361,16	361,04	360,22	340,74	60,07	22,71
0,006	41,71	338,21	1515,22	1524,43	1529,70	1532,45	1532,38	1529,81	1525,20	1517,54	339,79	41,84
0,008	41,68	337,80	1514,41	1523,72	1528,43	1531,48	1532,04	1529,65	1525,13	1518,07	339,89	41,85
0,010	22,69	59,77	338,70	358,26	360,12	360,91	361,20	361,01	359,78	340,78	60,08	22,71
0,012	20,18	22,69	41,78	43,59	43,76	43,82	43,84	43,83	43,72	41,95	22,72	20,18

В табл. 5, 6 приведены распределения температур в питателях 1 и 2 литниковой системы с отливкой «Корпус конической пары» для момента времени $t = 10$ с. Как видно из таблиц, температура металла в питателе 1 находится в диапазоне 1577,53–1588,90 °С, температура формы вокруг питателя 1 – в диапазоне 113,00–1112,21 °С, температура металла в питателе 2 – в диапазоне 1352,17–

1519,74 °С, температура формы вокруг питателя 2 – в диапазоне 103,60–1057,32 °С.

Анализ данных табл. 1–6 показывает, что температура металла, проходящего через питатель 1, падает до момента времени 2 с, а затем возрастает. При этом температура песчано-глинистой формы вокруг питателя растет на всем протяжении времени. Рост температуры металла, проходящего через питатель 1 после момента

Таблица 5. Распределение температур в питателе 1 литниковой системы с отливкой «Корпус конической пары» для момента времени $t = 10$ с

Координата по оси Y	Температура в точке с координатой по оси X										
	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022
0,002	114,09	231,75	422,11	503,29	527,11	531,86	527,78	504,51	423,64	233,32	115,24
0,004	226,31	499,51	969,75	1083,10	1108,19	1112,21	1107,76	1082,33	969,39	501,27	228,17
0,006	391,49	939,06	1583,46	1588,61	1588,90	1588,12	1586,41	1583,59	1577,60	939,72	394,15
0,008	390,62	937,40	1580,88	1586,49	1588,12	1588,88	1587,63	1583,59	1577,53	939,79	394,16
0,010	224,94	497,12	966,27	1079,41	1105,23	1110,58	1107,20	1082,06	969,36	501,26	228,13
0,012	113,00	229,77	418,93	499,50	523,53	529,27	526,34	503,87	423,41	233,22	115,18

Таблица 6. Распределение температур в питателе 2 литниковой системы с отливкой «Корпус конической пары» для момента времени $t = 10$ с

Координата по оси Y	Температура в точке с координатой по оси X											
	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022	0,024
0,002	103,66	209,85	381,48	461,55	489,95	497,24	497,47	490,97	463,59	383,61	210,95	104,13
0,004	204,93	448,55	858,77	985,87	1040,28	1056,88	1057,32	1043,86	991,95	865,01	451,50	206,07
0,006	352,46	826,50	1352,22	1408,60	1476,23	1519,58	1519,74	1493,82	1419,72	1362,83	832,92	354,76
0,008	352,41	826,44	1352,17	1408,33	1475,23	1519,65	1519,75	1493,93	1419,78	1362,85	832,99	354,80
0,010	204,85	448,41	858,60	985,65	1039,92	1056,80	1057,31	1043,90	992,11	865,14	451,58	206,10
0,012	103,60	209,72	381,28	461,32	489,70	497,09	497,36	490,88	463,58	383,63	210,96	104,14

времени 2 с, можно объяснить достижением песчано-глинистой формой определенной температуры, начиная с которой интенсивность отбора тепла ниже скорости подвода металла из ковша. Температура металла, проходящего через питатель 2, падает на всем протяжении времени, проходя температуру ликвидуса. Для поддержания рабочего режима данного питателя выбранной температуры заливки недостаточно, поскольку песчано-глинистая форма не достигает необходимой температуры, начиная с которой интенсивность отбора тепла ниже скорости подвода металла из ковша.

На следующем этапе работы по формуле (15) был проведен расчет критерия потерь температур в различных питателях литниковой системы. Динамика изменения критерия для анализа потерь температур в литниковых системах на примере литниковой системы с отливкой «Корпус конической пары» показана на рис. 2.

Как видно из рисунка, критерий хорошо согласуется с данными исследования температурных полей в системе «стояк-шлакоуловитель-питатели», представленными выше как результаты моделирования. Так, для питателя 1 наблюдается рост значений критерия до 50 °С на момент времени 2 с, после чего происходит снижение его значений.

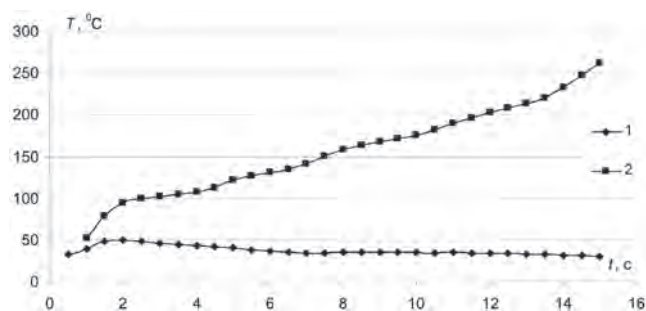


Рис. 2. Динамика изменения критерия для анализа потерь температур в литниковых системах на примере отливки «Корпус конической пары»: 1 – питатель 1; 2 – питатель 2

Для питателя 2 наблюдается рост значений критерия на всем протяжении времени.

Таким образом, критерий характеризует преимущество заполнения через питатель 1 по сравнению с питателем 2, а также выделяет критические точки на всем протяжении заполнения отливки металлом. Представленные исследования показывают широкие возможности численного моделирования процессов течения металла в литниковых системах и их использование для оценки работы тепловых режимов работы питателей в отливках со сложной пространственной геометрией.

Литература

1. Чичко А. Н., Матюшинцев Т. В., Марков Л. В. и др. Модели и алгоритмы для САПР технологического процесса изготовления отливок, ориентированного под суперкомпьютер СКИФ // Литье и металлургия. 2009. № 1. С. 94–101.
2. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г., Чичко О. И. Программное обеспечение «ПроЛит-1С» для моделирования литейных процессов на кластерных мультимикропроцессорных технологиях суперкомпьютера СКИФ // Литье и металлургия. 2007. № 3. С. 76–80.

3. Чичко А. Н., Кукуй Д. М., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г. и др. Программное обеспечение под суперкомпьютер «СКИФ» «ПроЛит-1с» и «ПроНПС-1с» для литейного и металлургического производств // Литье и металлургия. 2008. № 3. С. 131–139.
4. Чичко А. Н., Лукашевич Ф. С., Лихоузов С. Г., Чичко О. И. Расчетное и экспериментальное исследование характеристик движущегося расплава // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. № 3. С. 1–6.
5. Чистяков В. В. Методы подобия и размерностей в литейной гидравлике. М.: Машиностроение, 1960.
6. Моделирование пространственного распределения скоростей металла в формах с различным типом связи литниковых каналов в САЕ «ПроЛит-1» / А. Н. Чичко [и др.] // Литье и металлургия. 2012. № 1. С. 71–75.