



The computer calculations of cast iron flow in industrial foundry goods "Radiator" with different constructive elements of gating systems are carried out. The distributions of total pulse of melt flow on components of velocity vector are calculated. There are offered the characteristics of melt flow for choice of the optimal gating systems constructions.

О. И. ЧИЧКО, В. Ф. СОБОЛЕВ, С. Г. ЛИХОУЗОВ,
Белорусский национальный технический университет

УДК 669.27:519

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА СКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ РАСПЛАВА В ЛИТНИКОВЫХ КАНАЛАХ

Появление компьютерных систем моделирования технологических процессов расширило возможности разработки литейных технологий [1,2] благодаря имитации процессов течения расплава в литниковых системах и форме для реальных трехмерных геометрических моделей. В частности, визуализация физической картины процесса изготовления отливки на компьютере дает ценнейшую информацию технологу для принятия решений по выбору литниковой системы. Однако широкое использование компьютерных технологий делает необходимым разработку метода сравнительного анализа литниково-питающих систем для конкретной отливки. Изменение конструкции литниково-питающей системы может количественно и качественно изменять скоростные и температурные потоки, в связи с чем возникает проблема оценки различных пространственных конфигураций литниковых каналов. Решение этой проблемы лежит в разработке надстройки компьютерной системы, которая дает возможность выбирать среди группы вариантов литниково-питающих систем лучший. Следует отметить, что в настоящее время практически нет методов, позволяющих системно выбирать конструкции литниковых систем по характеристикам скоростных и температурных потоков, изменяющихся в литниковом ходе и отливке во время движения металла. В настоящей статье развивается метод оценки литниковых систем на основе результатов моделирования компьютерной системы "ПроЛит"[3,4].

Целью настоящей статьи является анализ промышленных литниковых систем, используемых при получении радиаторов на ОАО "МЗОО" на основе характеристик течения расплава, вычисляемых с помощью компьютерной системы "ПроЛит".

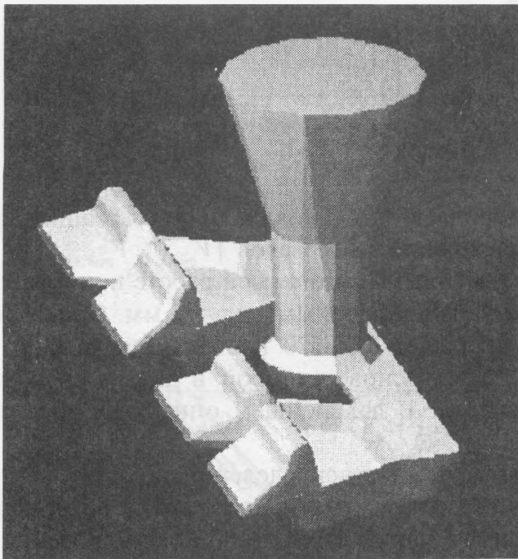
Для моделирования процесса течения расплава в системе "ПроЛит" используют систему уравнений Навье-Стокса для движущейся жидкости [3] и уравнения Фурье-Кирхгофа для описания охлаждения движущегося потока [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial V_y}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) - g, \\ \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \rho = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \\ = \frac{1}{c(T)\rho} \left(\frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right) + \frac{F(x, y, z, \tau)}{c(T(x, y, z, \tau))\rho}, \end{cases} \quad (1)$$

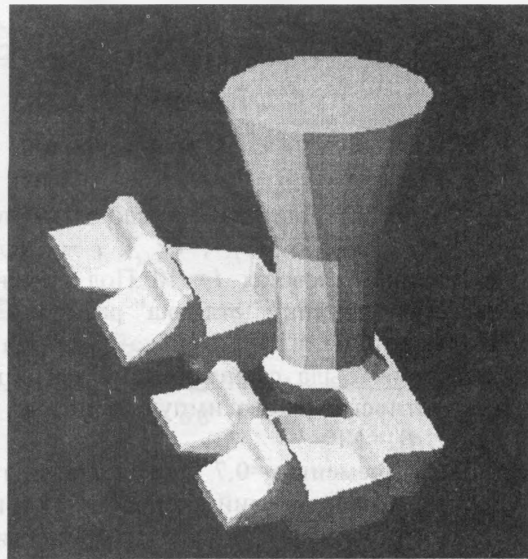
где τ – время; x, y, z – декартовы координаты (ось Y направлена вертикально); V_x, V_y, V_z – проекции скорости жидкости соответственно на координатные оси X, Y, Z ; $P(\tau)$ – давление жидкости; ρ – плотность жидкости; η – динамическая вязкость; g – ускорение свободного падения; T – температура.

Уравнения (1) дополнили следующими начальными и граничными условиями для скоростей и температур: $V_x(x, y, z, 0) = 0$, $V_y(x, y, z, 0) = 0$, $V_z(x, y, z, 0) = 0$, $T_p(x, y, z, 0) = 1400$ °С, $T_f(x, y, z, 0) = 20$ °С (T_p , T_f – соответственно температура расплава и формы). В расчете использовали следующие теплофизические характеристики: $\lambda = 40$ Вт/(м·К), $\eta = 0,0035$ кг/(м·с), $\rho_0 = 1700$ кг/м³, $Q_{\text{крист.}} = 268\,000$ Дж/кг, $T_{\text{сол.}} = 1145$ °С, $T_{\text{ликв.}} = 1370$ °С, которые были взяты для расплава чугуна, и теплофизические свойства песчано-глинистой формы: $\rho_0 = 1680$ кг/м³, $C = 1050$ Дж/(кг·°С), $\lambda = 0,34$ Вт/(м·К).

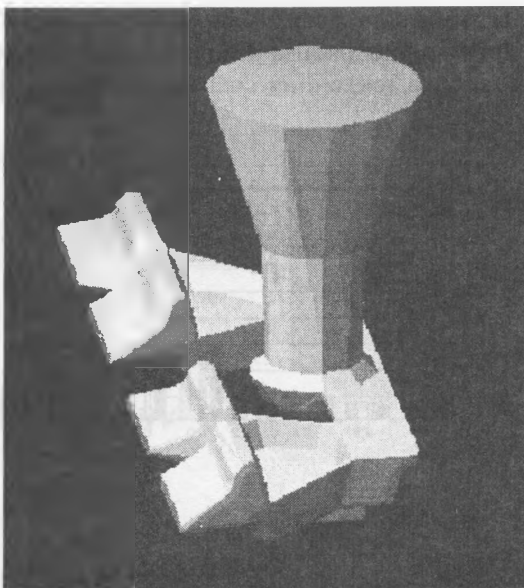
В качестве объекта исследования были выбраны четыре литниковые системы отливки “Радиатор” (рис. 1), которые опробованы в производстве на ОАО “МЗОО”. Вариант 1 был выбран в качестве базового. По сравнению с ним у варианта 2 был укорочен литниковый ход. Вариант 3 отличается от варианта 2 меньшими размерами литникового хода (вариант 3 обладает самым малым объемом среди рассматриваемых литников). Вариант 4 отличается от базового дополнительным шлакоуловителем высотой 20 мм.



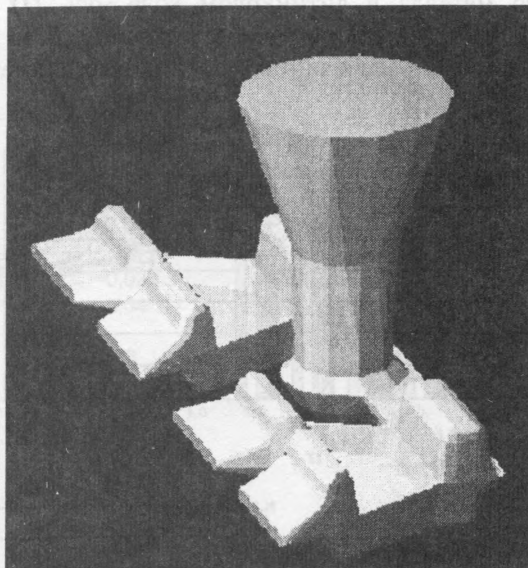
Вариант 1



Вариант 2



Вариант 3



Вариант 4

Рис. 1. Изображение геометрических моделей литников, используемых в расчетах

Изображения литниковых систем были построены в системе Solid Works, откуда в формате .stl были “прочитаны” в системе “ПроЛит”. С помощью генератора сетки все варианты литниковых систем были разбиты на “клетки”, каждой из которых присваивали теплофизические свойства в зависимости от типа материала, которому они соответствовали. Взаимосвязи между клетками формировали на основе конечно-разностной системы уравнений (1). Задавая начальные условия, проводили имитацию движения расплава в литниковой системе и форме. В результате чего определяли динамику полей скоростей, температур и давлений.

Для перечисленных вариантов литниковых систем (рис. 1) были рассчитаны поля проекций скоростей $V_x=f(x, y, z, \tau)$, $V_y=f(x, y, z, \tau)$, $V_z=f(x, y, z, \tau)$ и $V=f(x, y, z, \tau)$, поля давлений $P=f(x, y, z, \tau)$ и температур $T=f(x, y, z, \tau)$. В качестве характеристик направления потока расплава использовали поля потоков, полученные как $V_x/V=f(x, y, z, \tau)$, $V_y/V=f(x, y, z, \tau)$, $V_z/V=f(x, y, z, \tau)$. Таким образом, пространственное направление потока расплава характеризовалось косинусами углов, вычисленных по этим отношениям. На основе анализа изображений течения расплава было выбрано два времени процесса заполнения формы. Каждому времени соответствовало определенное физическое состояние течения расплава. В частности, выбиралось время, соответствующее 90% заполнению литниковой системы ($\tau=0,7$ с) и 100% заполнению литниковой системы ($\tau=0,9$ с). Для каждого выбранного момента движения расплава были сформированы матрицы на основе полученного распределения элементов расплава:

$$\begin{bmatrix} N_{1V_x} & N_{1V_y} & N_{1V_z} \\ N_{2V_x} & N_{2V_y} & N_{2V_z} \\ \dots & \dots & \dots \\ N_{20V_x} & N_{20V_y} & N_{20V_z} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где N_{iV_x} , N_{iV_y} , N_{iV_z} – соответственно число элементов расплава, имеющих скорости, лежащие в интервале $[V_{i-1,x}, V_{i+1,x}]$, $[V_{i-1,y}, V_{i+1,y}]$, $[V_{i-1,z}, V_{i+1,z}]$, i – число разбиений интервалов $[V_{\min,x}, V_{\max,x}]$, $[V_{\min,y}, V_{\max,y}]$, $[V_{\min,z}, V_{\max,z}]$. В данных расчетах $i = 10$. Под элементом расплава в настоящей работе понимается элемент разбиения системы “литник – отливка” размером $\Delta x = 2$ мм, $\Delta y = 2$ мм, $\Delta z = 2$ мм. Общее количество элементов системы “литник – отливка – форма” составляет 812 570 клеток. Для каждого варианта литниковой системы была сформирована матрица (2), на основе которой в дальнейшем вычисляли характеристики относительного импульса потока расплава. В дальнейшем они будут обозначены как $P_x=NV_x$, $P_y=NV_y$, $P_z=NV_z$.

На рис. 2 для времени $\tau=0,7$ с представлены гистограммы распределения доли элементов чугуна по характеристикам направлений скоростей. Из рисунка видно, что для всех характерных направлений V_x/V , V_y/V , V_z/V потока имеются свои особенности для вариантов 1 и 4 литниковых систем. Например, для варианта 1 литниковой системы (рис. 2, а) характерна высокая доля элементов, имеющих перпендикулярное направление к оси OX . В данных литниковых системах ось OX направлена по движению металла в литниковом ходе, ось OY – вертикально вверх, ось OZ – перпендикулярна плоскости XY и в глубину рисунка (см. рис. 1). В то же время для варианта 4 доля таких элементов самая малая среди всех рассчитанных литниковых систем. Такая же тенденция сохраняется для направления оси OZ (рис. 2, в).

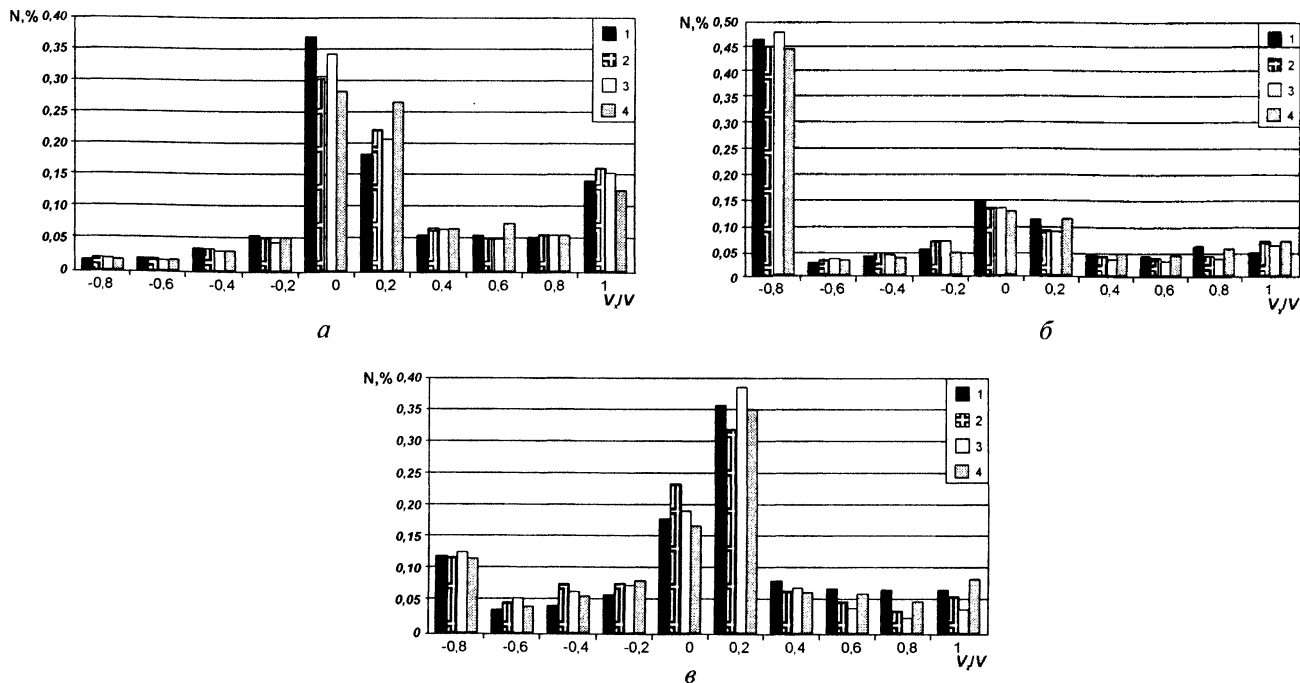


Рис. 2. Распределение числа элементов расплава чугуна по характеристикам направления скоростей (V_x/V , V_y/V , V_z/V) различных вариантов литниковых систем для времени заполнения $\tau = 0,7$ с

На рис. 3 представлены результаты расчета распределения относительного импульса потока по компонентам скорости. Высокая доля относительного импульса в положительном направлении соответствует варианту 1 литниковых систем. В то же время для варианта 2 характерно снижение доли элементов, имеющих высокие положительные скорости V_x и V_z . Самая высокая скорость элементов характерна для варианта 1 литниковой системы, что, по-видимому, может приводить к размыву формы потоком расплава. Анализ результатов показывает эффективность использования характеристики относительного импульса при сравнении различных литниковых каналов.

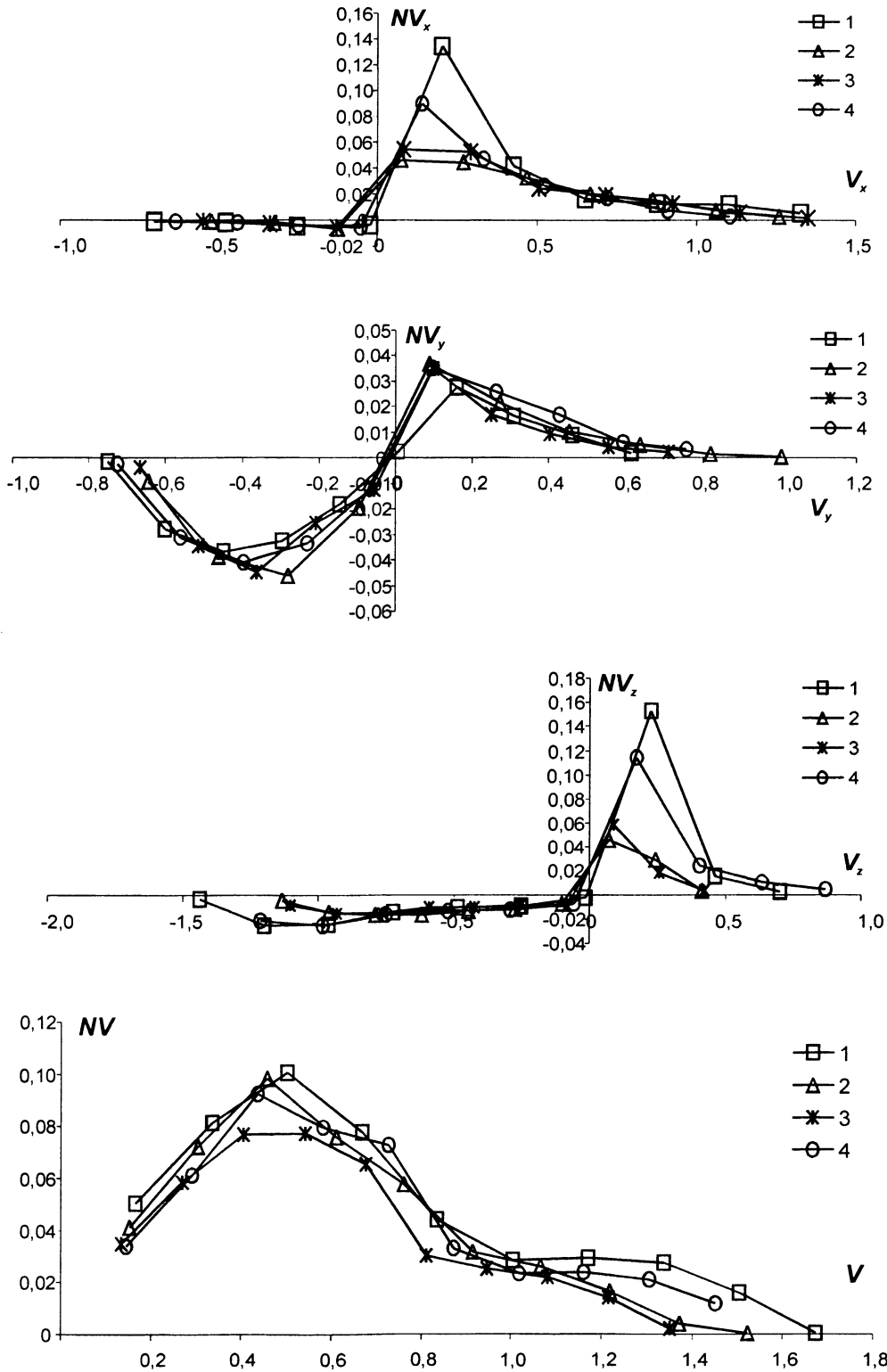


Рис. 3. Распределение относительного импульса потока расплава чугуна по скорости V и ее составляющим (V_x, V_y, V_z) для различных литниковых систем в момент времени $\tau=0,7$ с: 1 – вариант 1; 2 – вариант 2; 3 – вариант 3; 4 – вариант 4

По результатам расчетов функций $P_x=f(V_x)$, $P_y=f(V_y)$, $P_z=f(V_z)$ были проведены вычисления относительного импульса положительно и отрицательно направленных потоков расплава, а также их разности по абсолютной величине (см. таблицу). Как следует из таблицы, для времени $\tau=0,7$ с видна значительная положительная доля относительного импульса по компоненте X и малая доля отрицательной компоненты. Для компоненты Y наблюдается противоположная тенденция. На основании результатов расчетов можно сделать вывод о большой доле положительного потока у варианта 1 литниковой системы по сравнению с остальными вариантами, что частично было отражено на рис. 2,а. Таблица содержит интегральные характеристики потока, которые могут быть использованы для выбора литниковой системы. Чтобы проанализировать динамику изменения относительного импульса потока, можно суммарный относительный импульс вычислять для различных времен заполнения формы. Из таблицы видно, что с течением времени заполнения от $\tau=0,7$ с до $\tau=0,9$ с происходят изменения соотношений между положительными и отрицательными потоками движущегося расплава.

Расчетные значения относительного импульса для различных литниковых систем в зависимости от времени заполнения

τ, c	Номер варианта	X - компонента			Y - компонента			Z - компонента		
		$P(-)$	$P(+)$	ΔP	$P(-)$	$P(+)$	ΔP	$P(-)$	$P(+)$	ΔP
0,7	1	-0,01	0,22	0,23	-0,12	0,06	0,17	-0,09	0,17	0,26
	2	-0,01	0,17	0,18	-0,11	0,08	0,19	-0,08	0,08	0,16
	3	-0,01	0,17	0,18	-0,12	0,07	0,19	-0,08	0,08	0,16
	4	-0,01	0,19	0,20	-0,12	0,09	0,21	-0,10	0,15	0,25
0,9	1	-0,01	0,16	0,16	-0,09	0,07	0,16	-0,07	0,07	0,14
	2	-0,01	0,12	0,13	-0,10	0,06	0,16	-0,07	0,06	0,13
	3	-0,01	0,16	0,17	-0,09	0,06	0,15	-0,07	0,08	0,15
	4	-0,01	0,16	0,17	-0,09	0,08	0,17	-0,08	0,15	0,23

Примечание. $P(-)$ – сумма отрицательных значений, $P(+)$ – сумма положительных значений, ΔP – разность между суммарными положительными и отрицательными значениями.

Таким образом, представленные результаты расчетов для различных литниковых систем промышленной отливки показывают возможности для системного анализа влияния литниковых каналов на процесс заполнения формы. В качестве критериев для системного анализа литниковых каналов могут использоваться суммарные доли относительного импульса положительного и отрицательного потоков движущегося расплава, а также их разности. Для анализа размыва формы движущимся расплавом могут быть использованы функциональные зависимости $V_x/V=f(V_x)$, $V_y/V=f(V_y)$, $V_z/V=f(V_z)$, которые позволяют оценить относительную долю элемента расплава в зависимости от угла удара потока о стенки формы. В дальнейшем эти характеристики можно использовать, применяя статистические методы анализа, формируя матрицы на основе экспериментальных и расчетных данных по различным литниковым системам. В этих методах в качестве параметра X можно использовать характеристики течения расплава, полученные на основе результатов моделирования. В качестве параметра Y можно использовать количество бракованных отливок по таким дефектам, как “засор”, “ужим”, “недолив”, “спай” и т.д., которые могут быть взяты на основе промышленных испытаний. В дальнейшем по экспериментальным и расчетным данным можно строить регрессионные зависимости вида $Y=f(V_x, V_y, V_z, V_x/V, V_y/V, V_z/V, \dots)$ для конкретных отливок, которые могут быть использованы для выбора и оптимизации размеров литниковых систем с целью снижения брака и уменьшения расхода металла.

Литература

1. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г. Компьютерная система “ПроЛит” – инструмент для повышения качества //ТЭО. 2001. № 6. С.30–31.
2. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Яцкевич Ю. В. Компьютерная система “ПроТерм”: применение для управления процессом термической обработки деталей//ТЭО. 2002. № 1. С. 22–23.
3. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме// Докл. НАН Беларуси. 2001. Т. 45, № 4. С. 110–114.
4. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г., Соболев В. Ф. Компьютерная система “ПроЛит” для моделирования течения охлаждающихся расплавов в форме //Литье и металлургия. 2000. № 4. С. 68–72.
5. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В. Тепловая модель расплав-зародыш и исследование характеристик переходной зоны под влиянием электронного строения 3d-элементов в алюминии//ИФЖ. 1999. Т. 72, № 4. С. 792–796.