

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ УЛАВЛИВАНИЯ ШЛАКОВЫХ ЧАСТИЦ В ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ

*Докт. физ.-мат. наук, проф. ЧИЧКО А. Н., асп. ЛУКАШЕВИЧ Ф. С.,
кандидаты техн. наук ЛИХОУЗОВ С. Г., ЧИЧКО О. И.*

Белорусский национальный технический университет

Одной из важнейших задач, возникающих при разработке литейной технологии, является проектирование литниковой системы, обеспечивающей улавливание неметаллических и шлаковых включений и исключающей попадание их в форму. Известно, что движение шлаковых частиц происходит при изменении гидродинамических и тепловых процессов, протекающих в литниковой системе и форме. Поэтому при расчете траекторий движения частиц необходимы как минимум гидродинамические расчеты полей скоростей. В настоящее время математические расчеты движения частиц в литниковой системе в литературе практически отсутствуют и для оценки движения частиц используют полуэмпирические формулы, игнорирующие распределение скоростей в литниковой системе и основывающиеся только на учете силы Архимеда [1]. Традиционно при расчете литниковых систем для отливок используются эмпирические формулы, справедливые для частных условий, в которых они получены. Конечным результатом расчета литниковой системы по этим формулам является площадь сечения питателей. При этом невыясненными остаются вопросы выбора числа питателей, расположения их по длине шлакоуловителя, соотношения площадей сечения отдельных питателей и шлакоуловителя, несмотря на то, что эти особенности конструкции литниковой системы оказывают решающее влияние на процесс улавливания шлака. Использование современных компьютерных методов численного моделирования открывает новые возмож-

ности в проектировании литниково-питающих систем.

Цель настоящей работы – расчет динамики шлакоулавливания при изменении параметров литниковой системы заданной отливки на основе численного моделирования движения шлаковой частицы в поле скоростей расплава.

В основу расчета движения шлаковых частиц положена идея о том, что скорость частицы является суперпозицией скорости потока, описываемой уравнением Навье – Стокса расплава, и скорости частицы, возникающей в результате действия силы тяжести и архимедовой силы в условиях стабилизации движущегося потока. В первом приближении движение частицы может быть описано уравнениями А

$$\begin{cases} \vec{v}_q = \vec{v}_1 + \vec{v}_2; \\ m_q \frac{d\vec{v}_2}{dt} = \vec{F}_A + m_q \vec{g}, \end{cases} \quad (1)$$

где \vec{v}_q – скорость частицы; \vec{v}_1 – компонента скорости, связанная с потоком расплава; \vec{v}_2 – то же, с силой Архимеда и силой тяжести; m_q – масса частицы; \vec{F}_A – сила Архимеда.

Для определения скорости \vec{v}_1 ($v_1^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$) использовались система уравнений Навье – Стокса для движущейся жидкости и уравнения Фурье – Кирхгофа для описания охлаждения движущегося потока.

В основу математических моделей для расчета полей скорости положены дифференциальные уравнения Навье – Стокса, дополнен-

ные уравнением неразрывности для потока и функцией, связывающей давление и плотность. На этих моделях основывается компьютерная система «ПроЛит-1» [2] (разработка БНТУ), модули которой использовались для расчета скоростных и температурных полей моделируемого объекта. Ниже представлены основные уравнения математических моделей:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho_l} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial v_y}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho_l} \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial v_z}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho_l} \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

и уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial \tau} + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \rho_l = 0, \quad (3)$$

где τ – время; x, y, z – декартовы координаты (ось y направлена вертикально вверх); v_x, v_y, v_z – проекции скорости жидкости на координатные оси x, y, z соответственно; p – давление жидкости; ρ_l – плотность жидкости; η – динамическая вязкость жидкости.

Для описания связи между плотностью и давлением использовалась полуэмпирическая зависимость:

$$p = \begin{cases} k \frac{\rho_l - \rho_{lic0}}{\rho_{lic0}} & \text{при } \rho_l > \rho_{lic0}; \\ 0 & \text{при } \rho_l \leq \rho_{lic0}, \end{cases} \quad (4)$$

где ρ_l – плотность жидкости; ρ_{lic0} – нормальная плотность расплавленного металла при данной температуре; $k = 10000$ Па – модуль объемного сжатия.

В модели использовались следующие начальные и граничные условия для скоростей и температур: $v_x(x, y, z, 0) = 0$; $v_y(x, y, z, 0) = 0$; $v_z(x, y, z, 0) = 0$; $v(x, y, z, 0) = 0$; $T_p(x, y, z, 0) = 700$ °С; $T_\phi(x, y, z, 0) = 20$ °С, где T_p – температура расплава; T_ϕ – то же формы.

На основании метода конечных разностей по уравнениям (2), (3) была разработана программа для моделирования траектории нематаллической частицы при ее движении в расплаве литниковой системы. С ее помощью исследован характер движения и улавливания шлаковых частиц в каналах литниковых систем с различным числом и пространственным расположением питателей. Суммарная площадь сечения питателей литниковой системы принималась постоянной, причем варьировались их ширина, высота, количество. Сечение шлакоуловителя при этом оставалось неизменным.

На рис. 1 представлены варианты исследованных литниковых систем. В варианте I выполнен один питатель высотой 15 мм, в варианте II – два питателя высотой 10 мм, в варианте III – один питатель высотой 10 мм. Вариант IV представляет собой три питателя высотой 5 мм. Вариант V – один питатель высотой 5 мм. Ширина питателей подбиралась таким образом, чтобы их площадь оставалась постоянной.

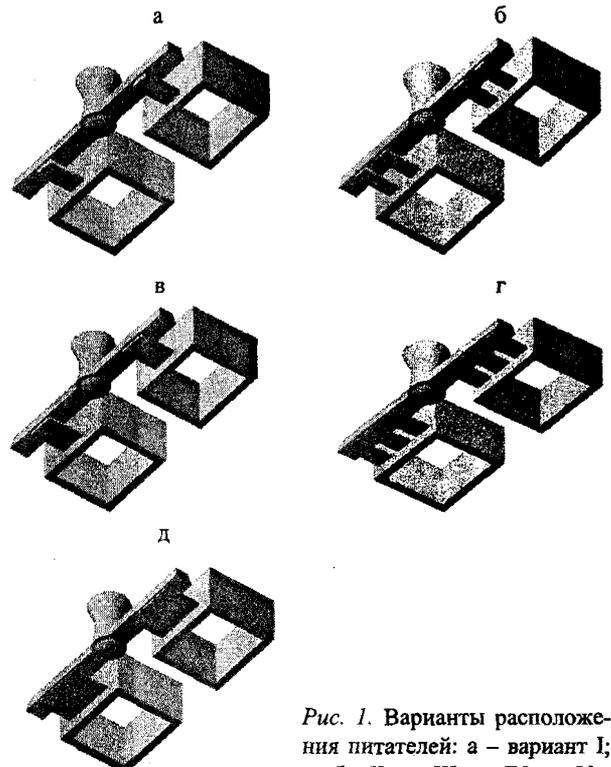


Рис. 1. Варианты расположения питателей: а – вариант I; б – II; в – III; г – IV; д – V

При моделировании движения шлаковых частиц в исследуемых литниковых системах учитывались скорость движения расплава, а также плотности расплава и шлаковой частицы. Плотность шлака принята равной $3,6 \text{ г/см}^3$, чугуна – $6,8 \text{ г/см}^3$. В качестве расплава в расчетах принимался серый чугун следующего химического состава: С – 3,6 %, Si – 2,4, Mn – 0,65, P – 0,2, S – 0,15 %. Температура заливки принята равной $1380 \text{ }^\circ\text{C}$, а форма – песчано-глинистая. В качестве исходных данных для расчета использовались также теплофизические характеристики чугуна и формы (теплопроводность, теплоемкость и т. д.). В процессе моделирования в верхнюю часть стояка в различные моменты времени заполнения запускали по 168 шлаковых частиц.

Количество шлаковых частиц, увлеченных в форму в различные моменты времени, представлено в табл. 1.

Таблица 1

Расчетное количество частиц, попавших в отливку при их движении по литниковым системам

Время, с	Вариант I		Вариант II		Вариант III		Вариант IV		Вариант V	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
0,60	65	38,69	41	24,40	65	38,69	6	3,57	18	10,71
0,70	14	8,33	20	11,90	41	24,40	0	0,00	0	0,00
0,80	4	2,38	13	7,74	15	8,93	6	3,57	5	2,98
0,90	8	4,76	1	0,60	17	10,12	2	1,19	5	2,98
1,00	34	20,24	10	5,95	9	5,36	12	7,14	12	7,14
1,10	7	4,17	10	5,95	13	7,74	11	6,55	4	2,38
1,20	4	2,38	1	0,60	5	2,98	1	0,60	2	1,19
1,30	3	1,79	19	11,31	16	9,52	5	2,98	0	0,00
1,40	9	5,36	2	1,19	17	10,12	5	2,98	6	3,57
1,50	23	13,69	14	8,33	15	8,93	8	4,76	7	4,17

Как видно, наилучшие результаты, с точки зрения удержания шлаковых частиц, достигаются в вариантах IV, V, наихудшие – в вариантах I...III. Это позволяет сделать вывод: чем меньше высота питателя по отношению к высоте шлакоуловителя, тем меньше частиц шлака попадает в отливку.

На рис. 2 представлены траектории движения шлаковых частиц для двух вариантов литниковых систем (лучший и худший результаты). Видно, что чем дальше питатель находится от стояка, тем меньше шлаковых частиц заса-

сывается в питатель (рис. 2б). Все попадающие в отливку шлаковые частицы засасываются через ближний к стояку питатель. Объясняется это тем, что скорость движения шлаковой частицы является суперпозицией скорости потока расплава и скорости, возникающей в результате действия силы тяжести и силы Архимеда. Взвешенные в потоке шлаковые частицы не успевают всплыть и попадают в зону подсоса. Максимальное число частиц заносится в отливку в начальный период заполнения, в период неустановившегося турбулентного движения расплава.

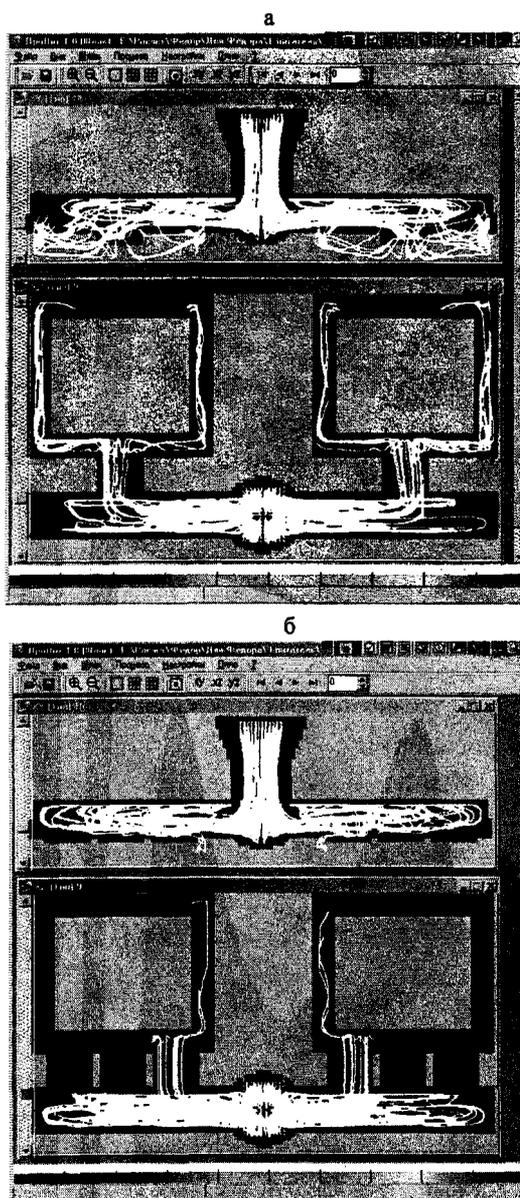


Рис. 2. Расчетные траектории движения шлаковых частиц для вариантов I (а) и IV (б)

ВЫВОД

Таким образом, выполненный на основе модели, включающей уравнения Навье – Стокса, расчет траекторий движения шлаковых частиц в каналах литниковой системы позволил установить, что скорость движения расплава в шлакоуловителе и соотношение площадей сечения «питатель – шлакоуловитель» оказывают решающее влияние на удержание неметаллических частиц в литниковой системе. Предложенная модель для расчета движения частиц может быть использована при проектировании

литниковых систем для литья в песчано-глинистые формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галдин Н. М. Литниковые системы для отливок из легких сплавов. – М.: Машиностроение, 1978. – 198 с.
2. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // Докл. НАН Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 4. – С. 110–114.
3. 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.

УДК 658.012.011.56

УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ РОТОРОВ РЕЗИНОСМЕСИТЕЛЯ

*Докт. техн. наук, проф. КУЗНЕЦОВ А. П., асп. КРОЛИВЕЦ А. В.,
ВАСИЛЬЕВ П. В., КРАСНОБАЕВ В. В., КРОЛИВЕЦ В. А.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ОАО «Белшина»*

Повышение технического уровня технологических процессов приготовления резиновых смесей и резиносмесительного оборудования – важнейшая составляющая повышения качества выпускаемых и освоения новых типоразмеров шин.

Эксплуатационные свойства шин в значительной степени определяются физико-механическими характеристиками резиновых смесей, качество которых существенно зависит от реализации оптимальных режимов смешения. Одним из эффективных управляющих воздействий при реализации оптимальных режимов смешения является регулирование частоты вращения роторов резиносмесителя.

Анализ результатов [1] математического моделирования процесса смешения свидетельствует о том, что для стабилизации теплового режима процесса целесообразно управлять частотой вращения роторов по определенному закону.

Основная цель системы управления – обеспечение оптимального (в определенном смысле) функционирования объекта управления (резиносмесителя). Степень оптимальности функционирования объекта количественно опреде-

ляется значением одного или нескольких показателей (критериев), таких как производительность, качество смесей, себестоимость, прибыль и др.

Реализация метода управления скоростью вращения роторов резиносмесителя является одним из решений задачи оптимизации периодического процесса резиносмешения с точки зрения достижения максимальной производительности резиносмесителя при изготовлении резиновых смесей заданного качества.

Оптимальным считается процесс изготовления резиновых смесей определенного состава с затратой заданного удельного количества энергии за минимальное время без превышения допустимой температуры смеси [2]. Таким образом, под кривой оптимизации понимается длительность цикла смешения t_k , а в результате решения задачи определяется оптимальный закон изменения частоты вращения роторов $n(t)$ резиносмесителя, при котором соблюдаются ограничения на данный технологический процесс и достигается минимум указанного критерия.

Рассмотрим необходимые элементы постановки задачи оптимального управления частотой вращения роторов: а) математическую мо-