



The numerical analysis of dynamics of the cindery particle moving in the system "riser-gate channel" is presented. The dependencies of the cindery particle speed on the period of its moving, denseness, radius and proportion of sectional area of riser and feeder are calculated.

А. Н. ЧИЧКО, Ф. С. ЛУКАШЕВИЧ, С. Г. ЛИХОУЗОВ, БНТУ

УДК 519:669.27

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ШЛАКОВОЙ ЧАСТИЦЫ В ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЕ

Литье литейных сплавов часто приводит к образованию различного вида неметаллических включений. Причем эти неметаллические включения могут попадать в стояк при заливке, при ударе металла о стенки формы и литниковой системы (песок). Кроме того, возможно образование частиц вследствие окисления металла. Турбулентный характер потоков приводит к сложному распределению скоростей, в результате чего неметаллические включения могут совершать сложные пространственные движения. При разработке литниковой системы технолог конструирует систему так, чтобы шлаковые включения задерживались в таких элементах, как чаша, стояк, коллектор. При этом стараются предотвратить инжекцию воздуха через стенки формы. Кратковременность процесса заполнения формы, к сожалению, далеко не всегда позволяет обеспечить полное задержание шлака при проникновении его в форму. Поэтому технологи используют так называемые коллекторы для предотвращения попадания шлака в область питателя.

На начальной стадии заливки формы поток металла движется при незаполненном коллекторе. При этом глубина потока может быть оценена по формуле [1]

$$h_a = \sqrt[3]{\frac{v_k^2 F_k}{g B^2}}, \quad (1)$$

где  $h_a$  – глубина потока;  $v_k$  – скорость металла в коллекторе;  $F_k$  – площадь сечения коллектора;  $g$  – ускорение свободного падения;  $B$  – ширина коллектора.

Для обеспечения задержания шлаковых частиц, находящихся на поверхности потока, необходимо выполнение условия [2]

$$\delta_n < \frac{v_{k \max}^2}{g}, \quad (2)$$

где  $\delta_n$  – толщина питателя;  $v_{k \max}$  – максимальная скорость потока металла в коллекторе в начальный период заливки.

В применении к литниковому каналу это же условие имеет вид [3, 4]

$$\delta_n < \frac{v_{л.х. \max}^2}{g}, \quad (3)$$

где  $v_{л.х. \max}$  – максимальная скорость металла в литниковом канале.

При этом максимальная скорость в литниковом канале определяется как

$$v_{л.х. \max} = 2 \sqrt{\frac{d_{ш} \rho - \rho_{ш}}{3c} g}, \quad (4)$$

где  $d_{ш}$  и  $\rho_{ш}$  – соответственно диаметр и плотность шлаковой частицы;  $c$  – коэффициент сопротивления.

Формулы (1)–(4) входят в теорию шлаковых частиц, однако на практике используется отношение [5, 6]:

$$\sum F_n : \sum F_{ш} : \sum F_c = c_1 : c_2 : c_3, \quad (5)$$

где  $\sum F_n$ ,  $\sum F_{ш}$  и  $\sum F_c$  – соответственно сумма площадей сечений питателей, шлакоуловителей и стояков;  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  – эмпирические коэффициенты, значения которых находятся вблизи единицы и определяются типом отливок и материалов, например, для некоторых чугуновых отливок используют  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 1,1$ ,  $c_3 = 1,2$ .

При проектировании стояка литниковой системы может быть использовано теоретическое условие, описывающее идеальный профиль стояка [2, 5]:

$$F_{с.в} \geq F_{с.н} \frac{\mu_c}{\mu_{ч}} \sqrt{\frac{H}{H_{ч}}}, \quad (6)$$

где  $F_{с.в}$  и  $F_{с.н}$  – соответственно верхнее и нижнее сечение стояка;  $\mu_c$ ,  $\mu_{ч}$  – коэффициенты расхода системы соответственно в нижнем сечении стояка и литниковой чаши;  $H$  – напор над нижним сечением стояка ( $H = H_c + H_{ч}$ );  $H_{ч}$  – высота уровня металла в чаше.

В то же время на практике используют соотношение (5), привязываясь при этом к наименьшей площади сечения стояка, которая может быть рассчитана как

$$F_c = \frac{Q_{op}}{v_c}, \quad (7)$$

$$v_c = \mu \sqrt{2gH_p}, \quad (8)$$

где  $Q_{op}$  — объемный расход расплава;  $v_c$  — фактическая скорость течения расплава в стояке.

Как видно из представленного анализа литературных данных, теория литейных процессов в применении к шлаковым частицам, движущимся в расплавах, в значительной степени основывается на эмпирических формулах, полученных из опыта и гидравлических соотношений.

В работе [8] на основе анализа физики движения шлаковой частицы была разработана математическая модель переноса частицы в геометрической системе «стояк — литниковый канал» и теоретически выведены необходимые условия для движения шлаковых частиц в ней. На основе представленной модели теоретически исследованы зависимости динамики максимальной скорости частицы в литниковых каналах. В связи с этим представляет интерес проиллюстрировать на модели движение шлаковой частицы для различных ее физических характеристик. Основные закономерности движения шлаковой частицы могут быть математически описаны в виде следующих зависимостей, выведенных аналитически в работе [8]:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{8(\rho_{ж} - \rho_{ч})gR_{ч}}{3k_{ч}\eta}},$$

$$v_{ч} = \sqrt{\frac{A e^{2\sqrt{AB}t} - 1}{B e^{2\sqrt{AB}t} + 1}},$$

$$A = \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{ч}} - 1\right)g,$$

$$B = \frac{3k_{ч}\eta}{8\rho_{ч}R_{ч}},$$

где  $\rho_{ж}$  — плотность расплава;  $k_{ч}$  — коэффициент, характеризующий поверхность частицы;  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости;  $R_{ч}$  — радиус частицы;

$\rho_{ч}$  — плотность частицы;  $v_{ч}$  — скорость частицы, до которой она успевает разогнаться за время прохождения потока через стояк.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование влияния физических характеристик частицы и расплава на ее скорость движения в системе «стояк — литниковый канал». Для реализации этой цели были проведены расчеты зависимости скорости частицы от характеристик расплава и частицы.

На рис. 1 показана зависимость скорости частицы от времени для различных значений ее плотности. Как видно из рисунка, чем выше плотность частицы, тем ниже ее скорость всплытия в литниковой системе, причем скорость частицы определяется относительно заданной системы отсчета. На рис. 2 представлены расчетные данные максимально возможной в данной литниковой системе скорости частицы в зависимости от ее плотности. Из рисунка видно, что максимальная скорость, которую может приобрести частица в литниковой системе, изменяется по закону квадратного корня. Чем выше плотность частицы,

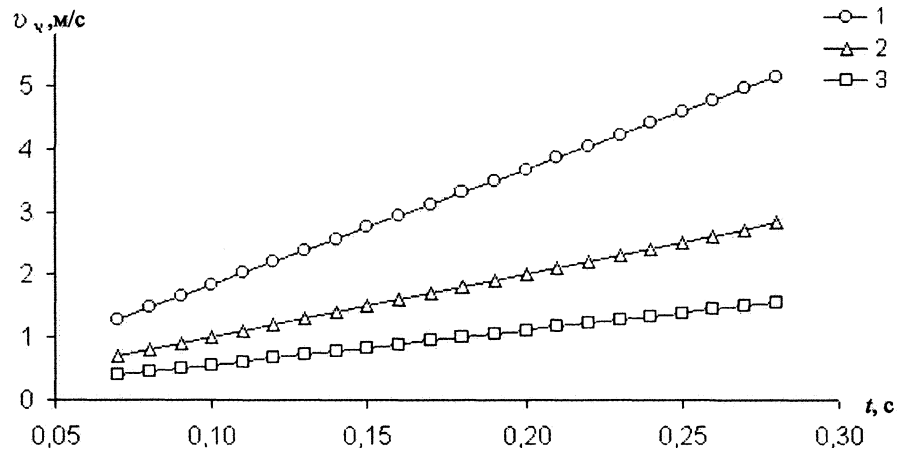


Рис. 1. Зависимость скорости частицы  $v_{ч}$  от времени для значений ее плотности: 1 —  $\rho=2400$  кг/м<sup>3</sup>; 2 — 3400; 3 — 4400 кг/м<sup>3</sup>

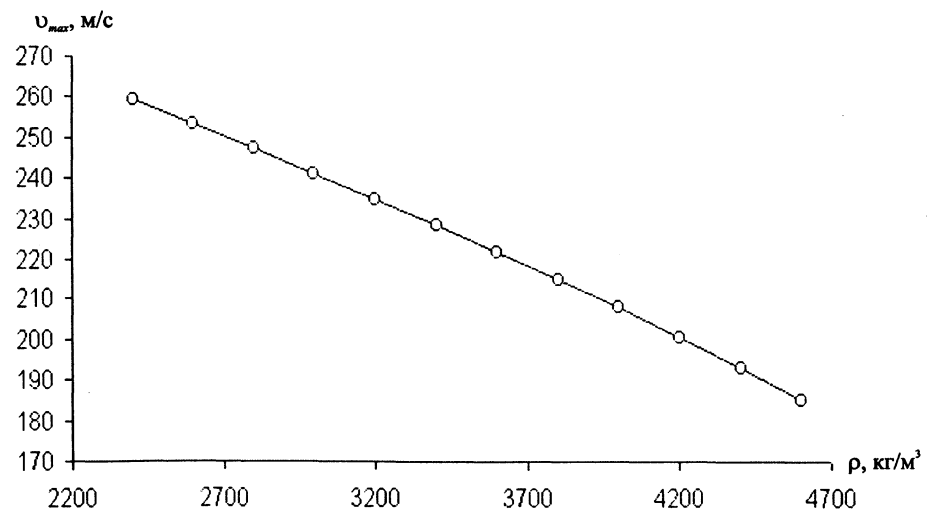


Рис. 2. Зависимость максимальной скорости частицы от ее плотности

тем ниже максимальная скорость. Следует отметить, что максимальная скорость частицы достигается только в случае, если ее ускорение равно нулю. Это предельный случай, соответствующий равномерному и прямолинейному движению. К тому же эти скорости не реализуются в литниковой системе, так как частица не имеет достаточно времени для разгона до таких скоростей.

На следующем этапе была проанализирована зависимость скорости движения частицы от ее радиуса. На рис. 3 показана зависимость скорости движения частицы от времени для различных ее радиусов. Как видно из рисунка, скорость слабо зависит от радиуса частицы в течение первых 5 с, в дальнейшем рост скорости происходит быстрее для частиц с большим радиусом. Максимальная скорость, которую может достигнуть частица, также растет с увеличением ее радиуса (рис. 4).

Анализ зависимости скорости частицы от вязкости показал, что скорость слабо зависит от вязкости жидкости в течение первых 3 с, в дальнейшем рост скорости происходит быстрее для частиц, движение которых происходит в менее вязкой жидкости, что видно на рис. 5. На рис. 6 приведена зависимость максимальной скорости частицы от вязкости. Как видно из рисунка, максимальная скорость, которой может достигнуть частица, падает с ростом вязкости жидкости.

На последнем этапе были проанализированы зависимости скорости движения жидкости в стояке и времени нахождения жидкости в стояке от высоты стояка для различного отношения площади стояка к площади питателя. Взаимосвязи этих характеристик описаны в работе [8]. На рис. 7 представлена зависимость скорости движения жидкости в стояке от высоты стояка. Из рисунка видно, что с ростом высоты стояка скорость движения в нем увеличивается, причем происходит это тем быстрее, чем меньше отношение площади стояка к площади питателя. В свою очередь с ростом высоты стояка время нахождения частицы в нем также увеличивается, причем рост времени происходит быстрее для большего отношения площади стояка к площади питателя (см. таблицу).

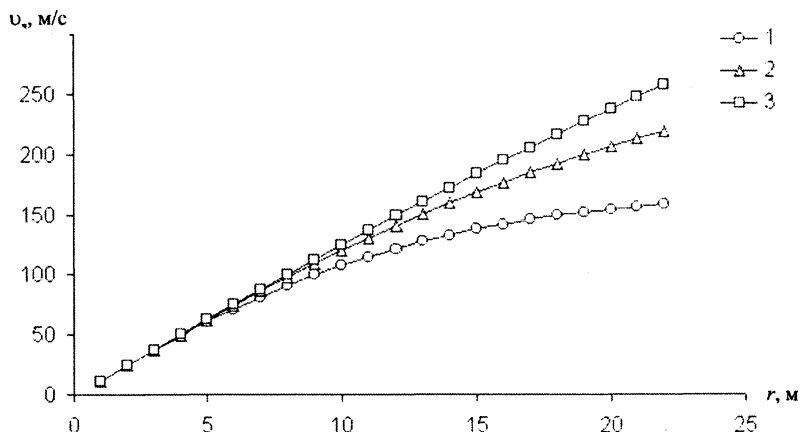


Рис. 3. Зависимость скорости частицы от времени для значений ее радиуса: 1 -  $R=0,001$  м; 2 -  $0,003$ ; 3 -  $0,01$  м

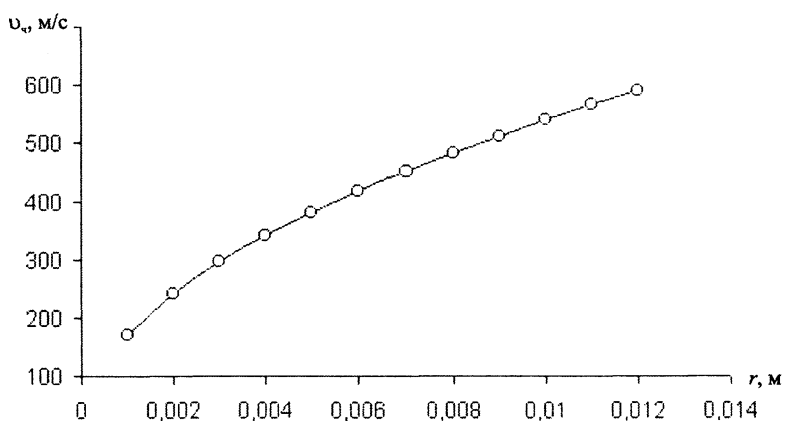


Рис. 4. Зависимость максимальной скорости частицы от ее радиуса

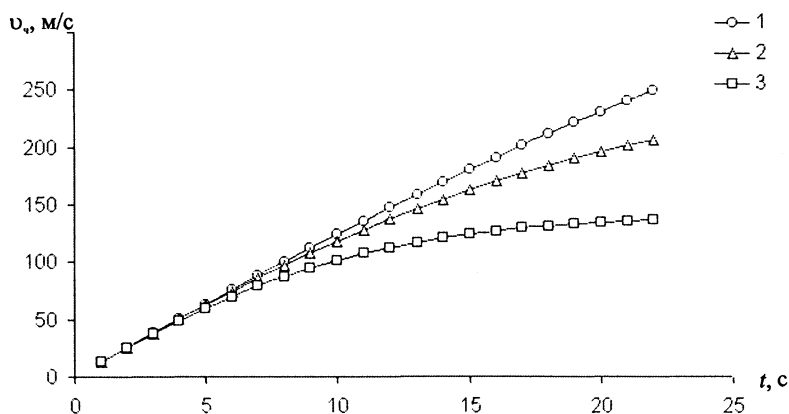


Рис. 5. Зависимость скорости частицы от времени для значений вязкости жидкости: 1 -  $\eta=0,001$  кг/(м·с); 2 -  $0,003$ ; 3 -  $0,01$  кг/(м·с)

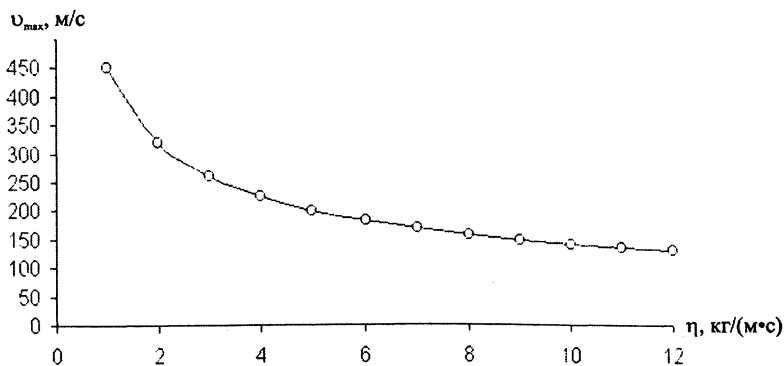


Рис. 6. Зависимость максимальной скорости частицы от вязкости жидкости

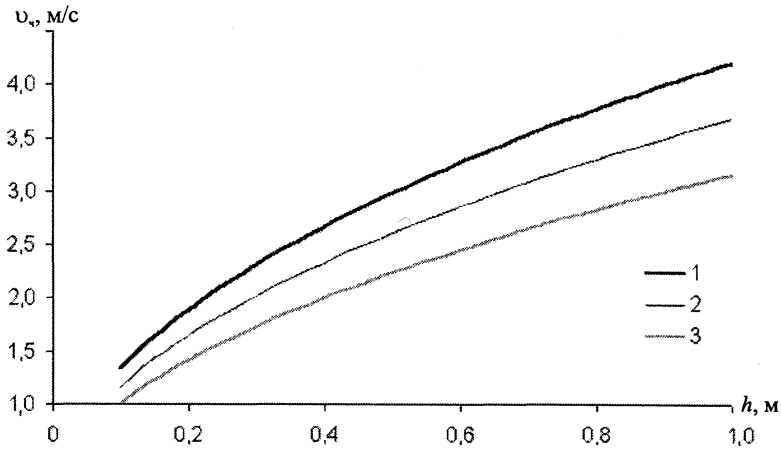


Рис. 7. Зависимость скорости потока в стояке от высоты стояка для соотношения сечений стояка к питателю: 1 – 1,05; 2 – 1,2; 3 – 1,4

Зависимость скорости движения жидкости в стояке и времени нахождения расплава в стояке от отношения площади стояка к площади питателя определяли по соотношениям

$$v_{ст} = \frac{S_n}{S_{ст}} \sqrt{2gh_n} \quad \text{и} \quad t = \frac{h_{ст}}{v_{ст}}$$

Таким образом, исследованные закономерности на основе аналитической модели [8] иллюстрируют различные варианты поведения частиц разной плотности в литниковых каналах с изменяющимися размерами. Причем основные закономерности процесса движения частицы заданно-

**Зависимость времени (t) прохождения металла через стояк от высоты стояка (h<sub>ст</sub>) при различных соотношениях сечения стояка к сечению питателя**

h <sub>ст</sub>	Время (t, с) в зависимости от соотношения S <sub>ст</sub> /S <sub>пит</sub>								
	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0,10	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	
0,15	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	
0,20	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	
0,25	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	
0,30	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	
0,35	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,19	
0,40	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18	0,19	0,19	0,20	
0,45	0,16	0,17	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	
0,50	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,22	
0,55	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,23	
0,60	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	
0,65	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,25	
0,70	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,26	
0,75	0,21	0,22	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	
0,80	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	
0,85	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	
0,90	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	
0,95	0,23	0,24	0,25	0,26	0,28	0,29	0,30	0,31	
1,00	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32	

го размера удовлетворительно описываются в рамках введенных приближений модели. Данная модель позволяет конкретизировать процесс движения шлаковых частиц в литниковой системе.

**Литература**

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика (Техническая механика жидкости). Л.: Энергия, 1975.
2. Галдин Н.М., Чистяков В.В., Шатульский А.А. Литниковые системы и приборы для фасонных отливок. М.: Машиностроение, 1992.
3. Цветное литье: Справ. / Под общ. ред. Н.М. Галдина. М.: Машиностроение, 1989.

4. Василевский П.Ф. Технология стального литья. М.: Машиностроение, 1974.
5. Галдин Н.М. Литниковые системы для отливок из легких сплавов. М.: Машиностроение, 1978.
6. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. Л.: Машиностроение, 1976.
7. Теоретические основы литейной технологии: пособ. для вузов / Под общ. ред. А. Ветишка. Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1981.
8. Лукашевич Ф.С., Лихоузов С.Г., Чичко О.И. О физических условиях движения шлаковой частицы в стояке литниковой системы // Литье и металлургия. 2005. № 2. Ч. 1. С. 32–34.