

УДК 669.18:519.876.3:621.43.013.1

Ю.В. Костецкий, А.В. Мач

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ
ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ОБЪЕМЕ МЕТАЛЛА В
ПРОЦЕССЕ ИНЖЕКЦИИ**

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования движения твердых частиц в объеме металла в сталеразливочном ковше при одновременной продувке газом через донные фурмы и инъекции твердых частиц через погруженную сверху фурму. Определены скорости всплывания и распределение частиц в металле при различных параметрах инъекции, сформулированы требования к размерам инжестируемых частиц.

Ключевые слова: Математическое моделирование, продувка, перемешивание, ковш, поток, частицы, инжестирование.

Для оптимизации технологических параметров в процессе инъекции порошкообразных материалов в объем металла важно иметь представление о поведении твердых частиц в жидкометаллической ванне в различных условиях. Особенно важен этот анализ при использовании нерастворяющихся в металле материалов. При этом траектории движения частиц определяются как характером движения потоков жидкого металла, так и характеристиками самих частиц, прежде всего их размерами, плотностью и смачиваемостью жидким металлом.

В работе [1] на основе результатов двумерного математического моделирования было показано, что при определенных условиях можно деформировать потоки жидкого металла в зонах барботажа и добиться затягивания инжестированных частиц в объем расплава, увеличивая время их пребывания в металле. Принимая во внимание, что двумерное приближение не во всех случаях приемлемо для моделирования сильно турбулентных потоков, поскольку турбулентные вихри по своей природе трехмерные, для изучения поведения твердых частиц в ванне жидкого металла было проведено моделирование на основе трехмерной математической модели процесса.

Для описания гидродинамического перемешивания жидкого металла применена математическая модель, базирующаяся на

уравнениях Навье-Стокса [2]. Она включает уравнение неразрывности в форме Эйлера (уравнение несжимаемости) и уравнение сохранения импульса. Для расчета турбулентной вязкости была применена стандартная $k-\varepsilon$ модель, основанная на рассмотрении кинетической энергии пульсации скоростей k и скорости диссипации энергии ε . Константы, для стандартной $k-\varepsilon$ модели принимали равными $C_1=1,44$, $C_2=1,92$, $C_\mu=0,09$, $\sigma_k=1,0$, $\sigma_\varepsilon=1,3$.

При создании математической модели для расчета гидродинамической картины движения металла в ковше и движения частиц были сделаны следующие допущения: сталь, шлак и аргон – вязкие несжимаемые Ньютонские жидкости; давление воздуха над ковшом равно 1 атм; гидродинамическое поле в коше изотермическое, и имеет температуру 1823К; твердые неметаллические частицы имеют одинаковый размер и форму сферы.

Принятое в модели взаимное расположение продувочных пробок и погружной фурмы показано на рисунке 1.



Рисунок 1 - Схема расположения погруженной фурмы и продувочных блоков в днище ковша

Размеры ковша и значения основных величин, используемые в расчетах, приведены в таблице 1.

Расчетная сетка состоит из 264246 ячеек с минимальным размером ячейки 0,01 м. Для моделирования движения неметаллических включений использована модель DPM (Discrete Phase Model). Сталь, шлак и аргон моделировали с помощью модели многофазных потоков VOF.

Таблица 1
Основные параметры модели

Параметр	Величина
Верхний диаметр ковша, мм	3008
Нижний диаметр ковша, мм	2458
Высота ковша, мм	3800
Расход газа по продувочным блокам, л/мин.	250
Расход вдуваемых частиц, кг/с	0,03
Плотность вдуваемых частиц, кг/м ³ .	2500
Плотность аргона, кг/м ³ .	1,784
Вязкость аргона, Па·с.	8,9·10 ⁻⁵
Плотность стали, кг/м ³ .	7000
Вязкость стали, Па·с.	0,005
Поверхностное натяжение стали, Н/м.	1,8
Плотность шлака, кг/м ³ .	2800
Вязкость шлака, Па·с.	0,04

Уравнение объемной доли аргона в металле решалось по явной схеме дискретизации:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} + S_{\alpha_q}) \right] V, \quad [1]$$

где $n+1$ – индекс текущего шага по времени;

n – индекс предыдущего шага по времени;

$\alpha_{q,f}$ – значение объемной доли q -той фазы на грани расчетной ячейки;

V – объем ячейки, м³;

U_f – объемный поток через грань ячейки, базирующийся на векторе скорости, направленном по нормали к поверхности, м³/с.

В ходе моделирования изучалось поведение твердых не расплавляющихся в металле частиц, вдуваемых через погруженную в металл на глубину 2,5 м фурму. Расход аргона через продувочные блоки принимали равным 250 л/мин во всех расчетных случаях.

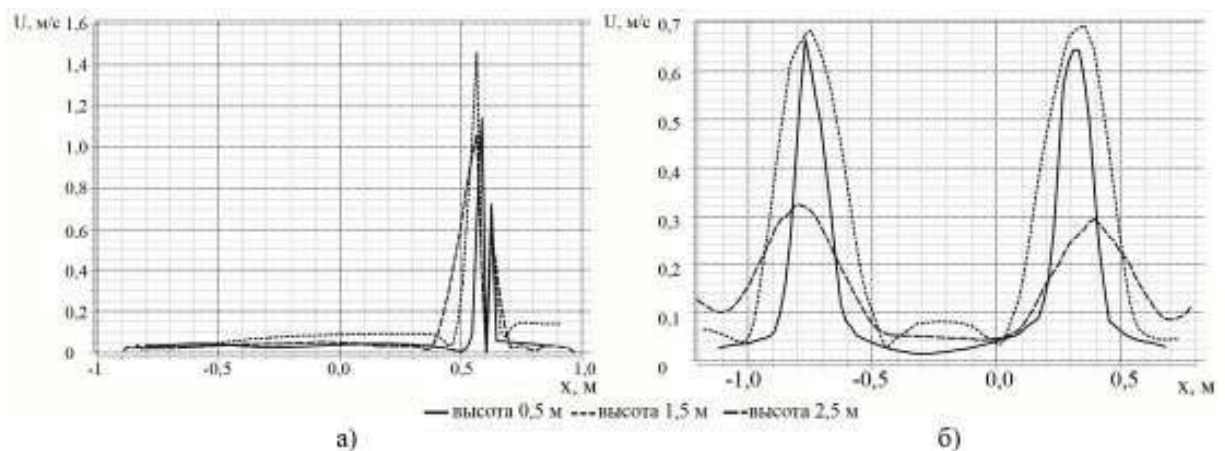


Рисунок 2 – Графики распределения скоростей металла в сечении погруженной фурмы (а) и продувочных пробок (б)

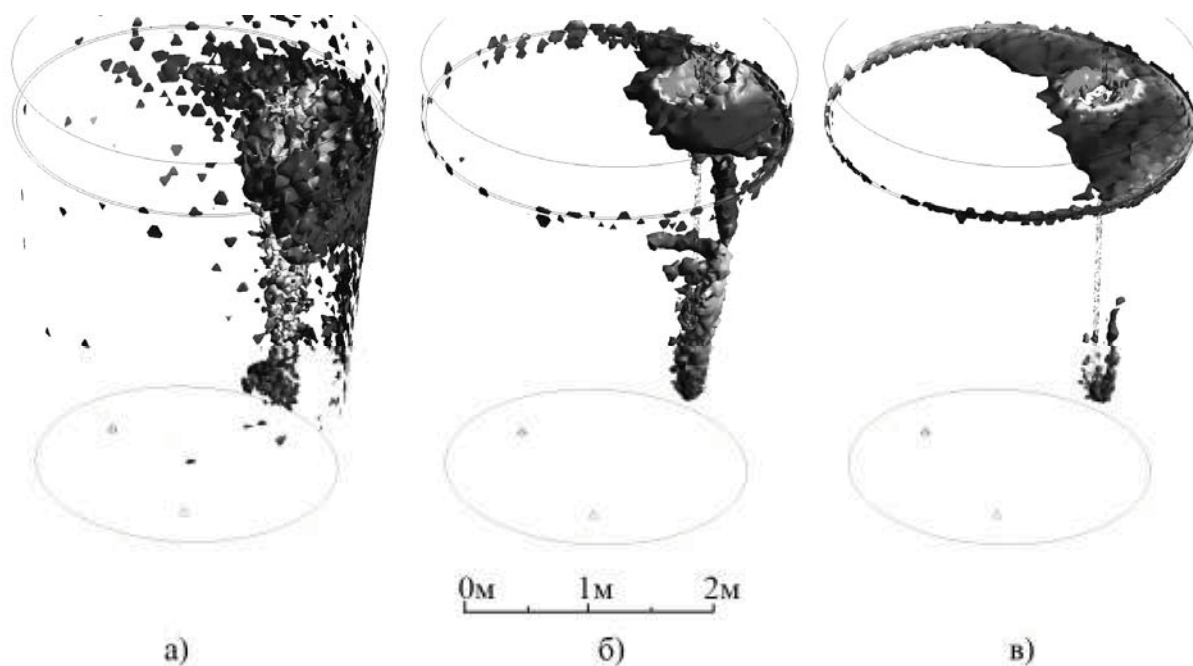


Рисунок 3 – Изоповерхности распределения частиц в объеме металла в зависимости от их размера: а) - частицы диаметром 0,1 мм, б) - частицы диаметром 1 мм, в) - частицы диаметром 3 мм.

Изменение размеров вдуваемых частиц не оказывало существенного влияния на гидродинамическую картину движения расплава в ковше. Характерное распределение скоростей металла в сечениях продувочных пробок и погруженной фурмы показано на рисунках 2а и 2б.

Для анализа влияния размера частиц на их распределение в объеме металла в процессе инжекции были выполнены расчеты для частиц диаметром 0,1 мм, 1 мм и 3 мм. Изоповерхности концентраций частиц в объеме металла приведены на рисунке 3. Моделировалось вдувание частицы непрерывно в течение 1 минуты. Как показывают полученные результаты, более мелкие частицы диаметром 0,1 мм за рассматриваемый промежуток времени распространяются в большем объеме металла за счет их захвата потоками металла, в то время как частицы диаметром 3 мм сразу выносятся к зеркалу металла и границе раздела «шлак-металл» и остаются там. При этом среднее время всплывания для частиц диаметром 0,1мм составило 6,5-7,0 секунд, для частиц диаметром 1мм – 4,0-4,5 секунд, для частиц диаметром 3 мм – 2,0-2,5 секунд.

С целью оценки влияния плотности вдуваемых частиц на характер их распределения в объеме жидкого металла выполнили

расчеты для случаев вдувания частиц диаметром 1мм с плотностью 2500 кг/м³ и 5000 кг/м³ (Рис.4).

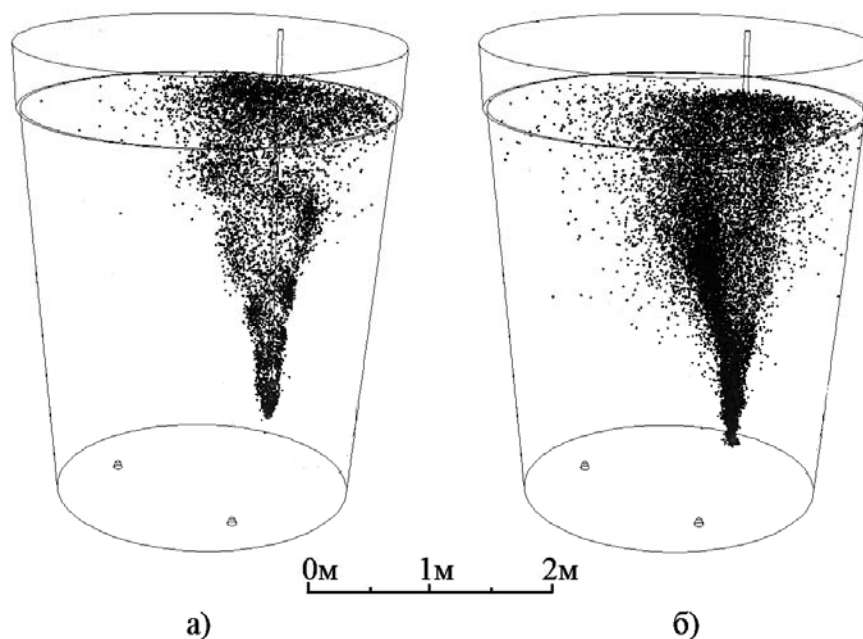


Рисунок 4 - Распределение частиц в объеме металла в зависимости от их плотности а) плотность 2500 кг/м³, б) плотность 5000 кг/м³.

С увеличением плотности частиц средняя продолжительность их всплывания существенно изменяется, если для частиц с плотностью 2500 кг/м³ она составляла 4,0-4,5 секунд, то для частиц с плотностью 5000 кг/м³ эта величина возросла до 11,5-12,0 секунд.

Во всех расчетных случаях за время продувки частицы распределялись не по всему объему металла, что показывает необходимость совершенствования технологии их вдувания в расплав. В частности перспективными являются варианты ввода через несколько фурм одновременно и инъекция в потоке направленном под углом к вертикальной оси ковша.

В целом, на основе результатов математического моделирования поведения частиц в объеме жидкого металла в процессе их инъекции можно сделать следующие выводы:

- для лучшего распределения частиц плотностью 2500-3000 кг/м³ в объеме жидкого металла они должны иметь размеры не превышающие 1мм;
- увеличение плотности частиц существенно влияет на продолжительность их прибывания в объеме металла;

- для большего распространения вдуваемых частиц по объему металла за время инъекции необходимо изменить организацию ввода частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костецкий Ю.В., Мач А.В. Математическое моделирование перемешивания жидкого металла в ковше в процессе инъекции материалов через погруженную фурму с одновременной продувкой снизу // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 2 (67). – Днепропетровск, 2010. – с. 37 - 43.
2. Ландау Л.Я. Гидродинамика / Л.Я. Ландау, В.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1986. – 710 с.