

УДК 669.18:519.876.3:621.43.013.1

Ю.В. Костецкий, А.В. Мач, В.В. Прокофьев

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КОВШЕ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОЙ ПРОДУВКЕ ЧЕРЕЗ ПОГРУЖЕННУЮ И ДОННУЮ ФУРМЫ

Представлены результаты компьютерного моделирования движения потоков металла в разливочном ковше при одновременной продувке через донную и погруженную сверху фурмы. Определены скорости и распределение потоков металла для различных расходов и взаимного расположения фурм, сформулированы требования к размерам инжектируемых частиц.

Ключевые слова: ковш-печь, гидродинамика, моделирование, фурма, включения, инжекция, сульфидная обработка

### Введение

В металлургической практике при внепечной обработке чугуна и стали широко используют инжекционные технологии. Вдувание порошкообразных материалов в объем металлической ванны в струе газа носителя обеспечивает высокую скорость протекания физико-химических процессов в сочетании с высокой степенью использования вдуваемых материалов, даже при использовании легкоплавких, легкоокисляющихся материалов [1,2].

Применение метода инжекции порошкообразных материалов в струе инертного газа позволило повысить эффективность процесса сульфидного рафинирования железоуглеродистых расплавов от растворенной меди [3,4]. При этом порошкообразную смесь реагентов, содержащих серу, вводят в объем расплавленного металла с помощью погруженной фурмы в потоке аргона. Вследствие интенсивного перемешивания расплава происходит эффективное насыщение расплава серой и формирование частиц сульфидной фазы в объеме металла. С целью стимулирования процесса образования неметаллических включений в расплав предложено инжектировать твердые частицы тугоплавкого материала, не взаимодействующего с расплавом. При этом важно, чтобы они достаточно долго пребывали в объеме металла и как можно равномернее распределялись в объеме металла. Аналогичная задача возникает и при реализации технологии рафинирования с использованием твердого сорбирующего материала, когда растворенная в металле медь сорбируется поверхностным слоем твердой частицы непосредственно из металлического расплава [4]. При этом поток примеси на поверхность отдельной частицы, полученный интегрированием плотности диффузионного потока по всей ее поверхности, зависит не только от размера частицы и величины коэффициента диффузии примеси в расплаве, но и от скорости движения частицы относительно жидкости [5]

$$I_i = 7,98C_i D_i^{\frac{2}{3}} u^{\frac{1}{3}} r^{\frac{4}{3}}, \quad (1)$$

где  $C_i$  – концентрация примеси в металле;  $D_i$  – коэффициент диффузии примеси в жидком металле,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $u$  – скорость движения частицы,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $r$  – радиус частицы,  $\text{м}$ .

Характер движения частиц, инжектированных в расплав, тесным образом связан с условиями движения потоков металла, возникающих под влиянием газовой струи. После контакта с расплавом твердые частицы быстро замедляются, теряя кинетическую энергию, сообщенную им газовым потоком, и восходящие потоки металла в зоне барботажа могут интенсивно выносить инжектированные в расплав частицы на поверхность ванны, существенно сокращая время их пребывания в расплаве и соответственно коэффициент полезного использования.

### Цель работы

Работа по поиску эффективных технических решений по организации продувки металла в ходе инжекционной обработки выдвигает на передний план задачу по определению характеристик потоков жидкого металла, формирующихся в ковше в ходе продувки, чтобы оптимизировать организацию и параметры продувки, добившись более длительного пребывания частиц в объеме расплава.

### Основная часть

Динамика движения частиц, погруженных в жидкость, зависит, прежде всего, от их характеристик – плотности, размеров и смачиваемости металлом [6,7]. Для адекватного описания траектории движения частиц требуется учет действия силы тяжести, архимедовой силы, силы сопротивления, а для крупных частиц и сил, обусловленных наличием присоединенной массы [6]. В общем случае уравнение движения отдельной частицы может быть записано на основе второго закона Ньютона:

$$\frac{d(m\vec{U}_p)}{d\tau} = \sum \vec{F}, \quad (2)$$

где  $\vec{U}_p$  – скорость движения частицы,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\vec{F}$  – сила, действующая на частицу,  $\text{Н}$ ;  $m$  – масса частицы,  $\text{кг}$ .

Если скорость потока жидкости больше или равна скорости всплывания частицы, то последняя увлекается этим потоком. Максимальный размер частиц, которые могут быть захвачены потоком металла, или, с другой стороны, минимальную скорость, при которой поток может увлечь частицу определенного размера, можно оценить с помощью следующего упрощенного неравенства, учитывающего баланс архимедовой силы и сил сопротивления:



$$\frac{4}{3} \pi g r^3 (\rho_m - \rho_p) \leq 6 \pi r \eta_m u_m, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус частицы, м;  $\rho_m, \rho_p$  – плотность металла и частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_m$  – динамическая вязкость металла, Па·с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $u_m$  – скорость металла, м/с.

Отсюда:

$$u_m \geq \frac{2}{9} \frac{g r^2 (\rho_m - \rho_p)}{\eta_m}. \quad (4)$$

Либо:

$$r \leq 3 \left( \frac{\eta_m \cdot u_m}{2g(\rho_m - \rho_p)} \right)^{0,5}. \quad (5)$$

Таким образом, располагая данными о направлении движения и скоростях потоков металла, формирующихся в объеме жидкометаллической ванны в ходе продувки можно в первом приближении прогнозировать траекторию движения частиц, инжектированных в расплав.

Для решения гидродинамической задачи о движении жидкого металла в ковше воспользовались методом компьютерного моделирования с использованием прикладного пакета программ вычислительной гидродинамики. Математическая модель описания гидродинамического перемешивания жидкого металла базируется на системе уравнений Навье-Стокса [8]. Она включает уравнение неразрывности в форме Эйлера (уравнение несжимаемости) и уравнение сохранения импульса. Для расчета турбулентных напряжений была применена двухпараметрическая диссипативная  $k-\varepsilon$  модель Лаундера – Сполдинга, основанная на рассмотрении кинетической энергии пульсации скоростей  $k$  и скорости диссипации кинетической энергии  $\varepsilon$ . Модельные коэффициенты для стандартной  $k-\varepsilon$  модели принимали равными  $C_1=1,44, C_2=1,92, C_\mu=0,09, \sigma_k=1,0, \sigma_\varepsilon=1,3$ .

Для моделирования взаимодействия аргона с металлом использовали VOF модель многофазных течений [8]. Уравнение объемной доли аргона в металле решалось по явной схеме дискретизации:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[ \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} + S_{\alpha_q}) \right] V, \quad (6)$$

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, м<sup>3</sup>;  $U_f$  – объемный поток через грань ячейки, базирующийся на векторе скорости, направленном по нормали к поверхности, м<sup>3</sup>/с.

Задачу решали в двумерной постановке. При выполнении расчетов была применена произвольно стыкующаяся сетка из 8264 ячейки (рис. 1).

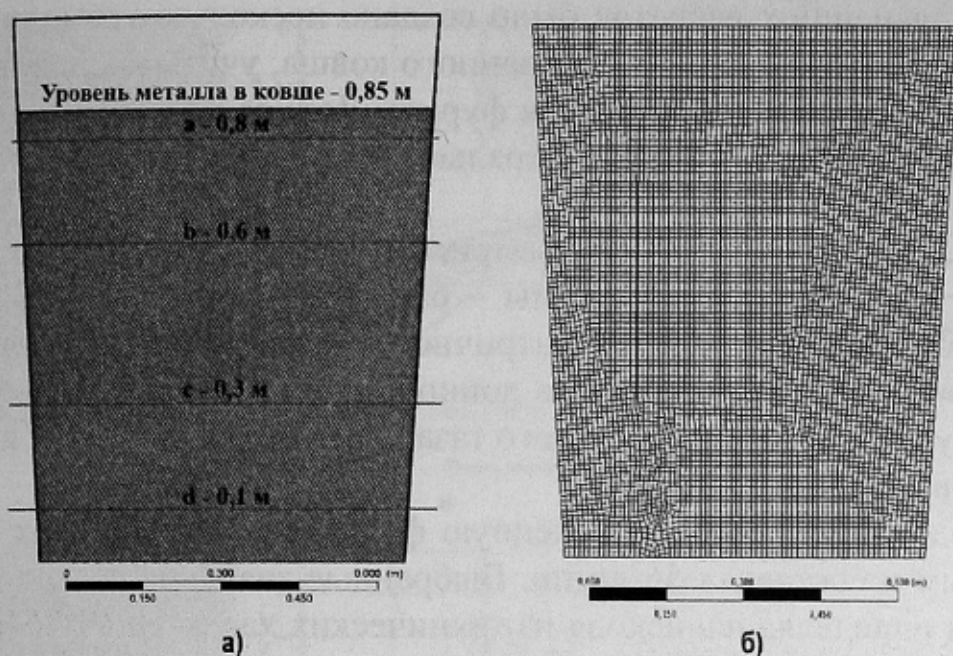


Рисунок 1 – Уровни замера скоростей металла в ковше (а) и расчетная сетка (б)

Плотность жидкого металла принимали равной  $7000 \text{ кг/м}^3$ , а вязкость равной  $0,006 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Для аргона эти величины составляли соответственно  $0,275 \text{ кг/м}^3$  и  $22,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$  [10]. Поверхностное натяжение на границе металл-аргон принимали равным  $1,823 \text{ Н/м}$ .

Результат расчета, выполненного для случая двухтонного ковша с максимальным заданным заглублением погруженной фурмы при отсутствии донной продувки, представлен на рисунке 2.

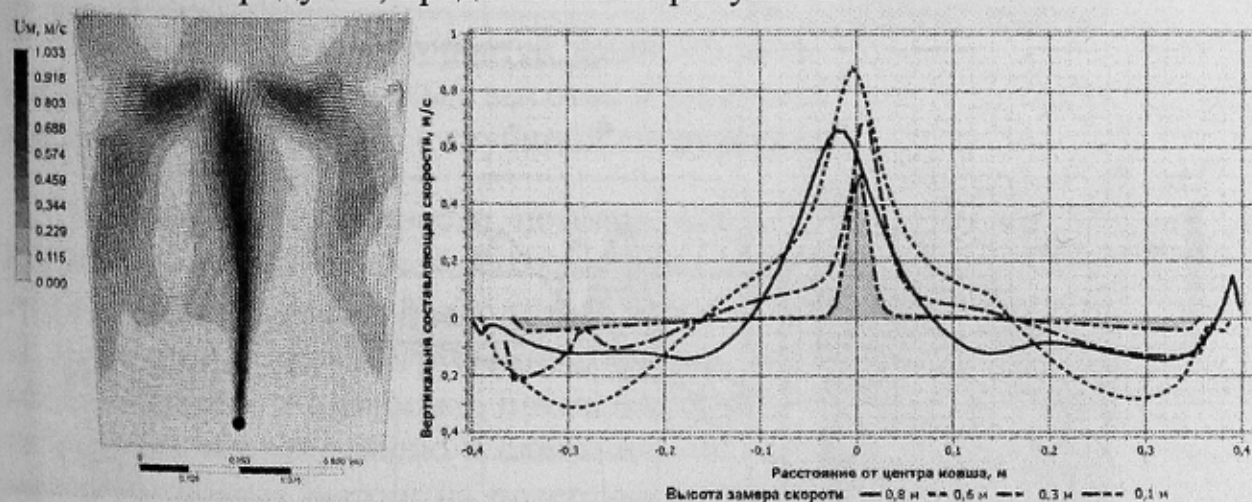


Рисунок 2 – Поля скоростей жидкого металла и графики распределения скоростей на различных высотах в ковше при центральном положении погруженной фурмы

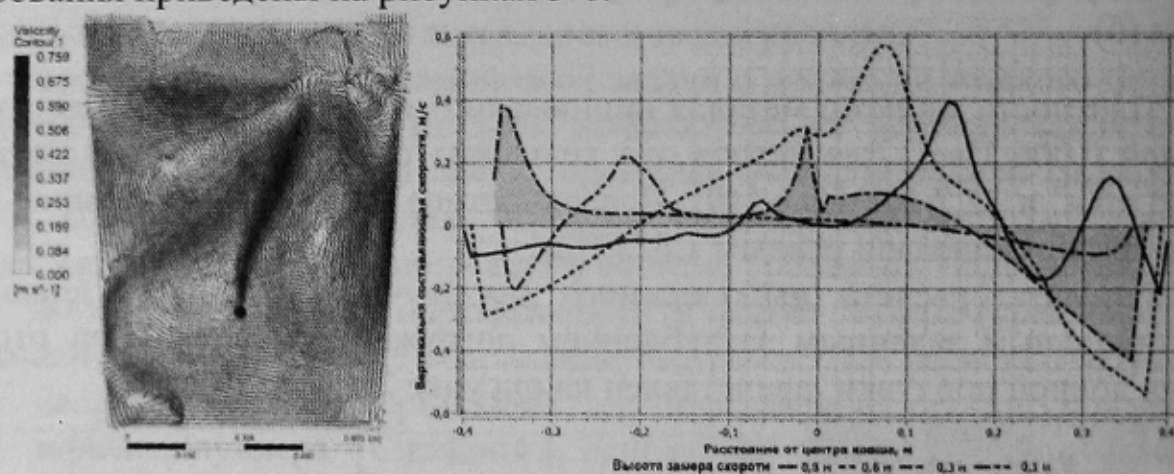
На основе анализа полей и графиков распределения скоростей можно прогнозировать, что инжестируемые в металл частицы будут интенсивно выносятся потоками жидкого металла на поверхность ванны. Это свидетельствует о неэффективности данного варианта организации инжекции.



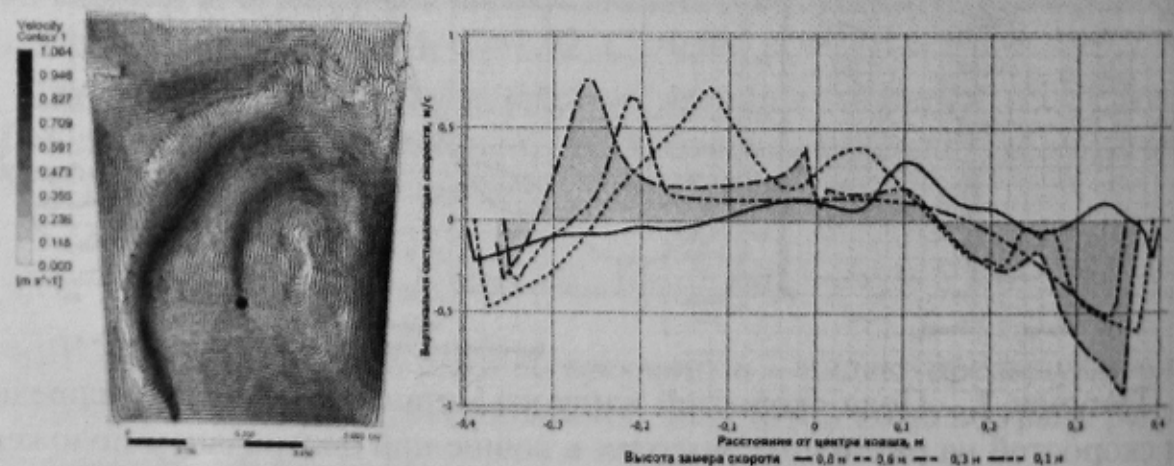
Для дальнейших расчетов было создано несколько геометрических и конечно-разностных моделей для данного ковша, учитывающих различное положение погруженной в расплав фурмы. Донная фурма во всех случаях располагалась на удалении от центральной оси ковша равном  $2/3R$ , где  $R$  – внутренний радиус дна ковша.

В ходе моделирования рассматривали четыре характерных варианта расположения погруженной фурмы – осевое положение с глубинами погружения 0,55 м и 0,25 м и эксцентричное со смещением от оси в сторону, противоположную расположению донной фурмы, с аналогичными глубинами погружения. Расход инертного газа через нижнюю фурму варьировали в интервале 1,2-6,4 л/мин.

Расход аргона через погруженную фурму во всех расчетах оставался неизменным и составлял 56 л/мин. Выбранные значения расходов газа через фурмы определялись исходя из технических характеристик оборудования, применяемого в опытно-промышленных условиях. Результаты моделирования приведены на рисунках 3-6.



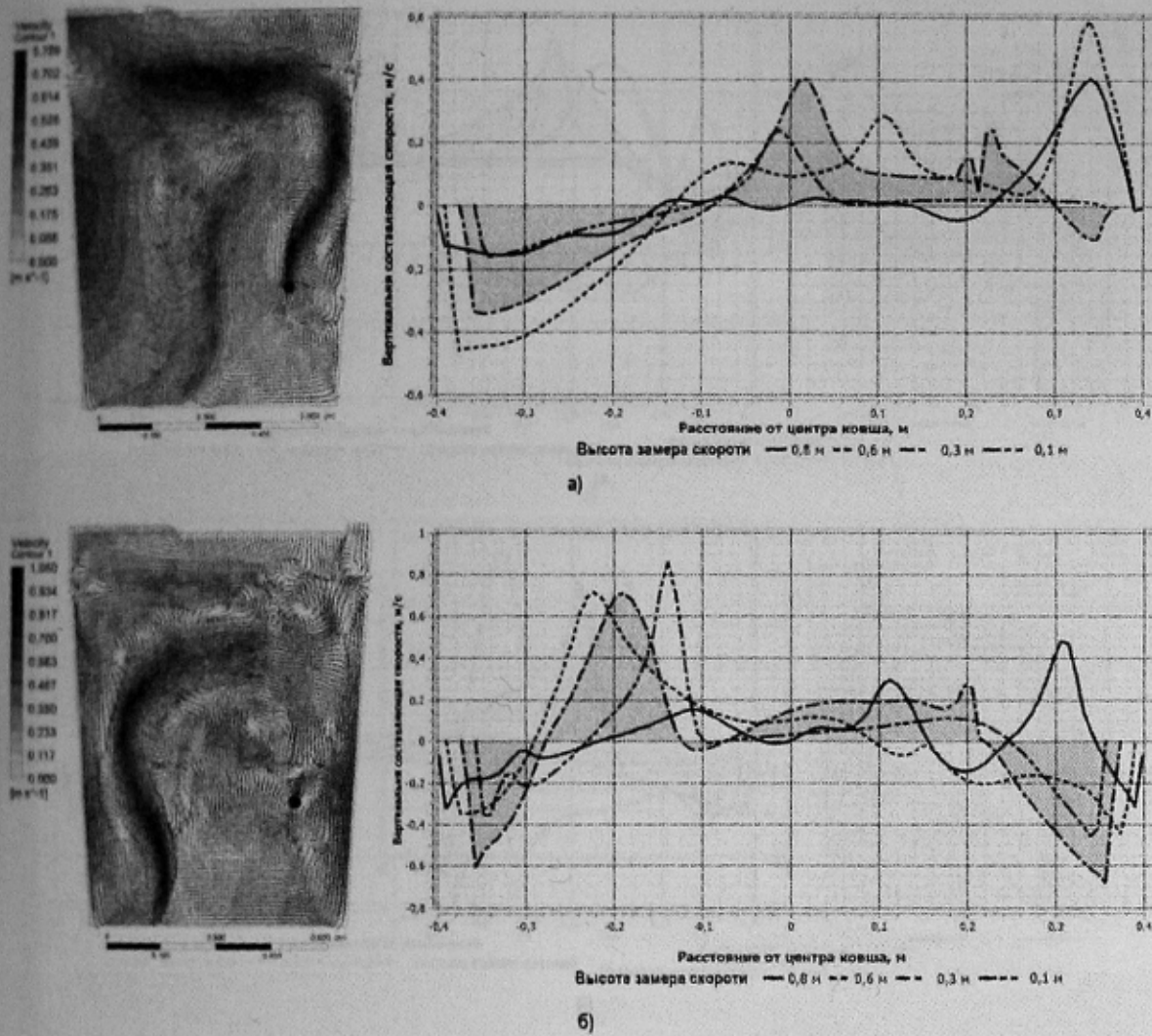
а)



б)

а – расход аргона 1,2 л/мин, б – расход аргона 6,4 л/мин

Рисунок 3 – Поля скоростей жидкого металла и графики распределения скоростей на различных высотах в ковше при центральном положении погруженной фурмы с глубиной погружения 0,55 м.



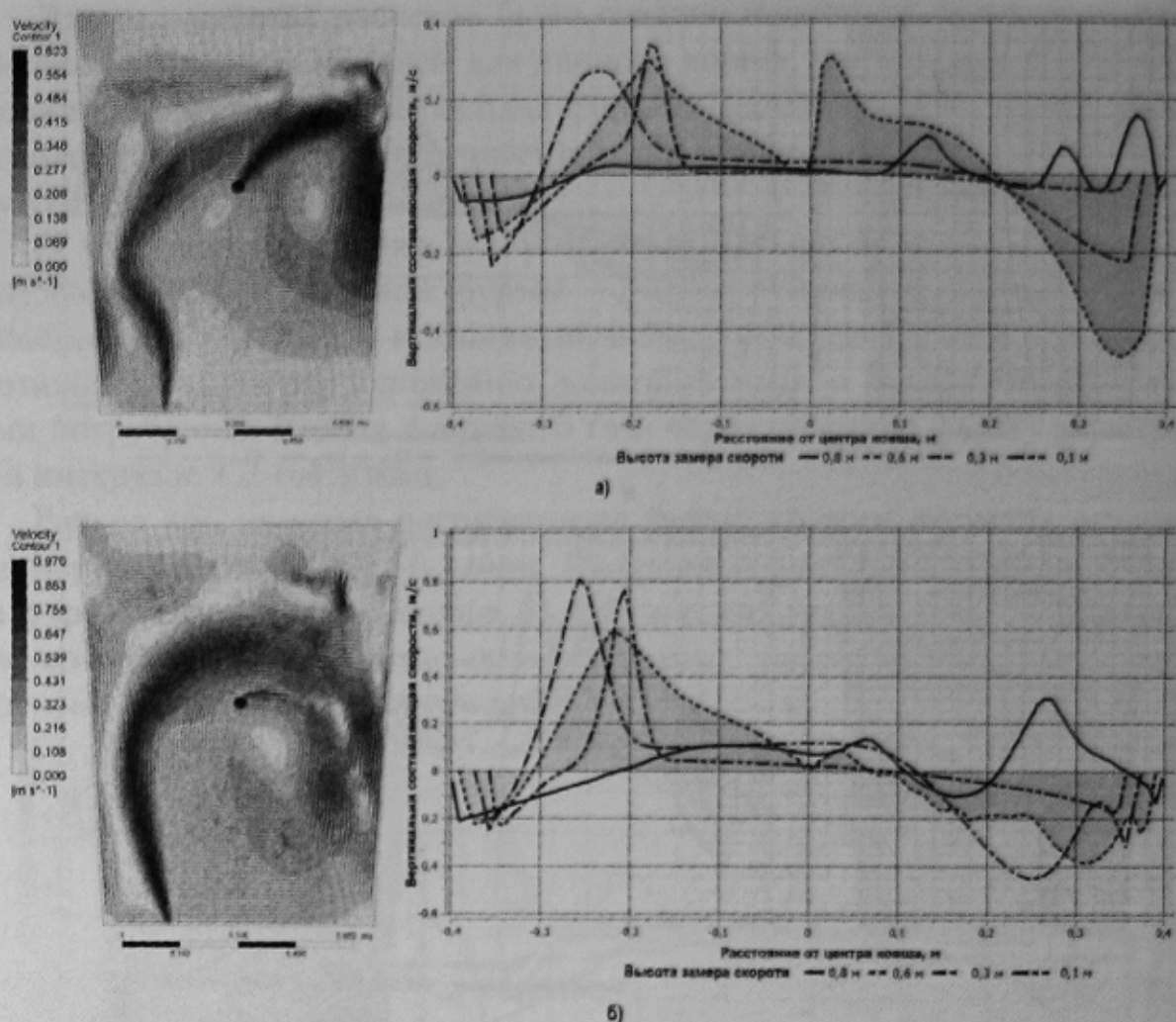
а – расход аргона 1,2 л/мин, б – расход аргона 6,4 л/мин

Рисунок 4 – Поля скоростей жидкого металла и графики распределения скоростей на различных высотах в ковше при эксцентричном положении погруженной фурмы с глубиной погружения 0,55 м.

Максимальные скорости потоков наблюдаются в зонах барботажа. Видно, что при малых расходах газа через донную фурму не удастся существенно деформировать восходящий поток в зоне всплывания пузырей газа, вдуваемого через погруженную фурму. Более того, анализ поведения потоков металла в динамике, показывает, что восходящие потоки металла от фурм имеют тенденцию к сливанию, что будет способствовать выносу инжесктированных частиц на поверхность ванны. Максимальные скорости потоков металла достигают 0,7-0,8 м/с. При этом основная масса потоков металла движется со скоростями, не превышающими 0,2 м/с.

Продувка через донную фурму с максимальным для данных условий расходом газа в большинстве случаев обеспечивает необходимое нарушение целостности восходящего потока от погруженной фурмы и формирование интенсивных циркуляционных потоков в объеме металла (рисунки 36, 46, 56, 66).





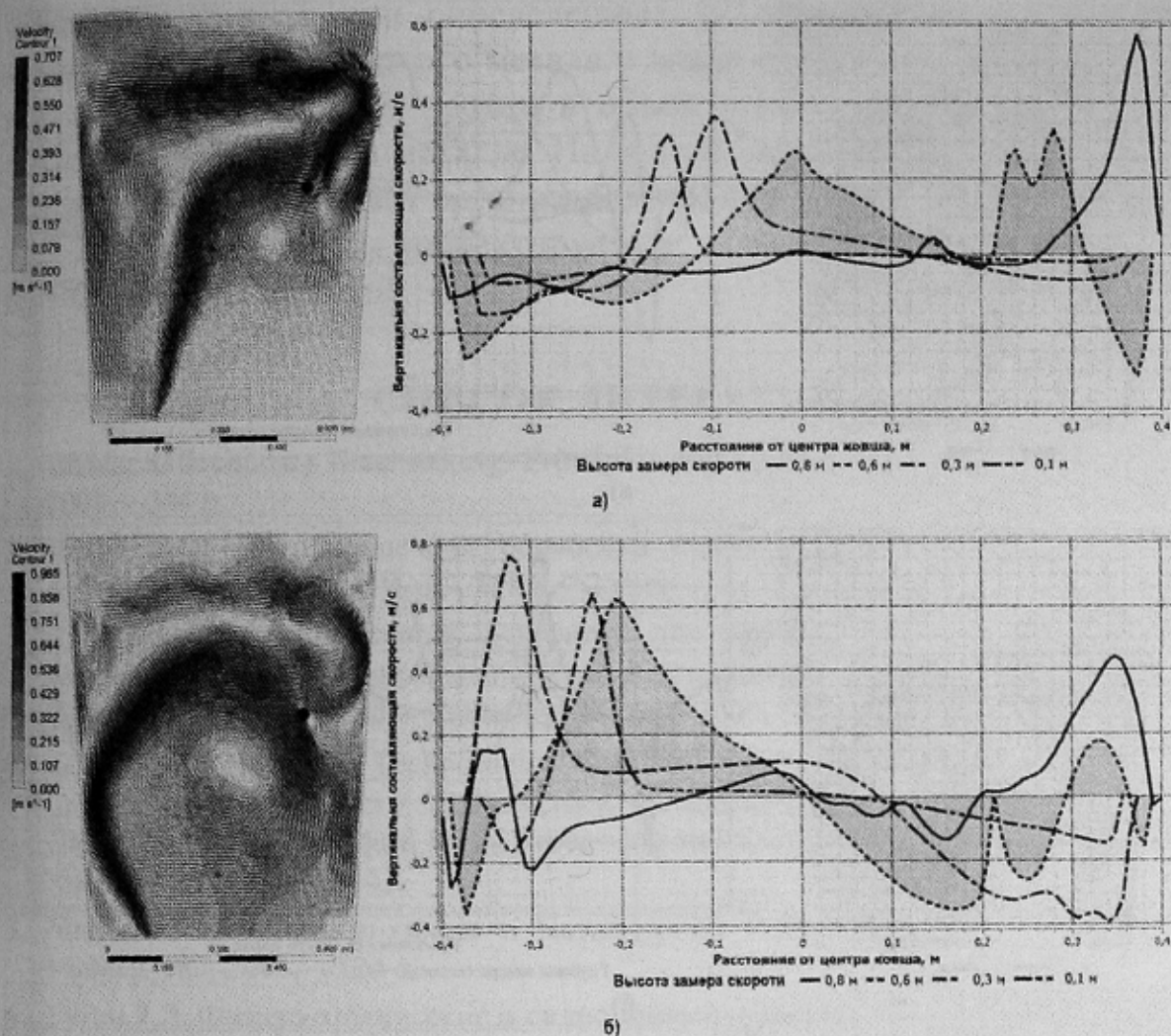
а – расход аргона 1,2 л/мин, б – расход аргона 6,4 л/мин

Рисунок 5 – Поля скоростей жидкого металла и графики распределения скоростей на различных высотах в ковше при центральном положении погруженной фурмы с глубиной погружения 0,25 м.

Это создает предпосылки для затягивания инжескированных частиц в объем ванны жидкого металла. Максимальные скорости потоков в этих случаях несколько выше (0,9-1,0 м/с). Основная масса металла также движется быстрее со скоростями 0,3-0,4 м/с. Расчет по формуле (4) показывает, что при такой скорости потоки металла должны увлекать частицы размером до  $(5-6) \cdot 10^{-4}$  м (при плотности частиц 2200-3900 кг/м<sup>3</sup>).

Анализ результатов моделирования показывает, что наилучший результат с точки зрения целей моделирования достигается при максимальном заглублении фурмы и эксцентричном ее расположении (рис. 4, б). При осевом расположении фурмы наилучший результат достигается при малом ее заглублении (рис. 5, б).

По аналогичной методике было проведено математическое моделирование движения потоков металла в ковше емкостью 75 т при продувке через донную и эксцентрично расположенную погруженную фурму с максимальным заглублением 2,365 м.



а – расход аргона 1,2 л/мин, б – расход аргона 6,4 л/мин

Рисунок 6 – Поля скоростей жидкого металла и графики распределения скоростей на различных высотах в ковше при эксцентричном положении погруженной фурмы с глубиной погружения 0,25 м.

Были рассмотрены варианты продувки с расходом газа через погруженную фурму от 300 до 1000 л/мин с шагом 100 л/мин. Расход газа через донную фурму во всех случаях задавали равным 200 л/мин. На рисунке 7 показаны результаты расчетов для вариантов с расходом газа через погруженную фурму, равным 300, 500, 700 л/мин. Анализ полученных данных показывает, что наилучший результат при инъекционной обработке металла в 75 т ковше по принятой схеме следует ожидать при расходах газа через погруженную фурму на уровне 500-600 л/мин. При этом максимальные скорости потоков достигают величин 1,0-1,3 м/с, а основная масса металла движется со скоростями порядка 0,5 м/с.



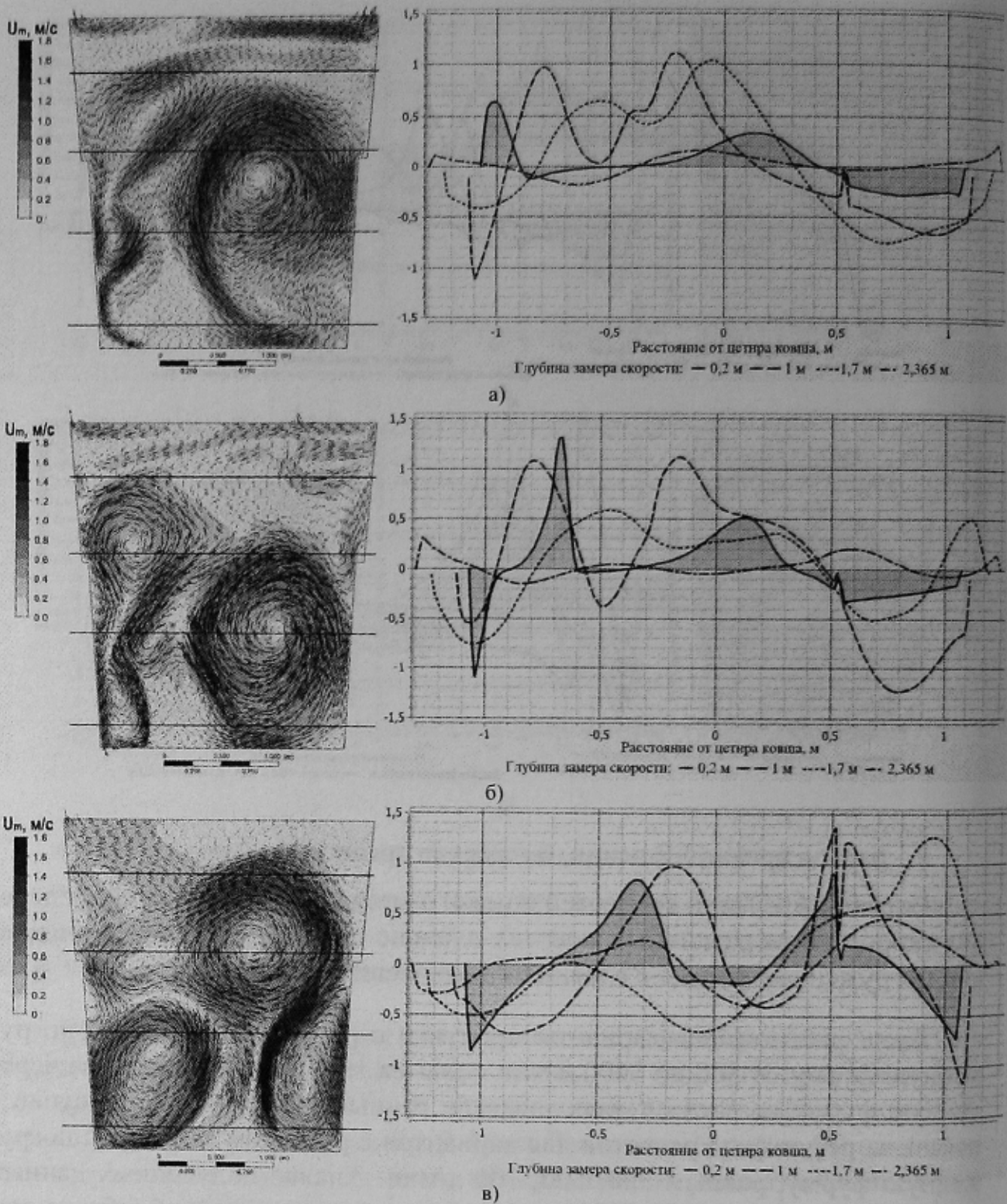


Рисунок 7 – Поля скоростей жидкого металла и графики распределения скоростей на различных высотах в 75 тонном ковше при продувке через донную фурму с расходом газа 200 л/мин и эксцентрично расположенную погруженную фурму с глубиной погружения 2,365 м и расходом аргона: а – 300 л/мин, б – 500 л/мин, в - 700 л/мин.

### Выводы

Проведенное компьютерное моделирование показало, что при одновременной продувке расплавленного металла в ковше через донную и по-

грузенную фурмы, при определенных условиях можно деформировать восходящие потоки жидкого металла в зонах барботажа и добиться затягивания инжесктурированных частиц в объем расплава, увеличив тем самым время их пребывания в металле. На основе полученных результатов определен наилучший вариант организации продувки, а также сформулированы требования к размерам инжесктурируемых частиц для конкретных опытно-промышленных условий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghosh A. Secondary Steelmaking: Principles and Application / A. Ghosh. – CRC Press, 2001. – 344 p.
2. Поволоцкий Д.Я. Внепечная обработка стали / Д.Я.Поволоцкий, В.А.Кудрин, А.Ф.Вишкарев. – М.:МИСиС, 1995. – 255 с.
3. Перспективы использования сульфидов для рафинирования железоуглеродистых расплавов от растворенной меди /Ю.В. Костецкий, В.П. Карпов, В.И. Омельченко, Д.Ю. Миронов // Металл и литье Украины. – 2005, №3-4. – С.87-88.
4. Kostetsky Y. Advanced Technological Solutions for Quality Steel Production with Scrap Contaminated by Copper / Y. Kostetsky, V. Karpov, D. Mironov // Proceeding of the 2007 Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. – Nancy : Ecole des Mines de Nancy, 2007. – P. 339-343.
5. Минаев Ю.А. Физико-химия в металлургии / Ю.А. Минаев, В.В. Яковлев. – М.:МИСИС, 2001. – 320 с.
6. Гутри Р.Л. Физико-химические и гидродинамические аспекты легирования расплава методом вдувания порошков / Р.Л. Гутри // Инжекционная металлургия'80, Лула, Швеция. – М.:Металлургия, 1982. – С.75-92.
7. Guthrie R. L. Fluid Flows in Metallurgy – Friend or Foe? / L.R. Guthrie //Metallurgical and Materials Transactions B. – 2004. – V 35, N3. – P. 417-437.
8. Ландау Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, В.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 710с.
9. Ranade V. V. Computational Flow Modelling for Chemical Reactor Engineering /V.V. Ranade. – Academic Press, 2002. – 452 p.
10. Фастовский В.Г. Инертные газы / В.Г. Фастовский, А.Е. Ровинский, Ю.В. Петровский. – М.: Атомиздат, 1972, 352 с.

Поступила в редакцию 27.05.2010

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.А. Троянский

© Костецкий Ю.В., Мач А.В., Прокофьев В.В., 2010