



The mathematical model of the mixing and dissolving process of carbonic powder in a system "vacuumator-bowl" under influence of circulating argon is offered. The spatial distribution of hydrodynamic currents at mixing of carbonic powder, received on the basis of computer calculations is presented. The character of distribution of hydrodynamic speeds of melt (circulating currents) in industrial bowl and vacuumator for different time slots of mixing is determined.

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, Н. В. АНДРИАНОВ, С. В. ТЕРЛЕЦКИЙ, РУП «БМЗ»,
Д. М. КУКУЙ, Ю. В. ЯЦКЕВИЧ, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 519:669.27

МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВ В ВАКУУМАТОРЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОМ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ РУП «БМЗ»

Вакуумирование стали в ковше является важнейшим этапом внепечной обработки металлургического производства, позволяющим проводить дегазацию и удалять неметаллические включения из расплава стали. При вакуумировании необходимо создание условий для гидродинамики металла в вакууматоре и ковше. Поэтому в системе «вакууматор – ковш» используют аргон, постоянно подаваемый через фурмы. В результате этого в ковше создаются циркуляционные скоростные потоки, образуемые пузырями аргона, инжектируемыми в жидкую сталь [1]. Следует отметить, что расход аргона должен быть оптимальным, так как повышение его концентрации в ванне, с одной стороны, не оказывает существенного влияния на гидродинамику расплава, с другой – может приводить к повышенным энергетическим затратам в процессе перемешивания. Интенсивное перемешивание металла в процессе циркуляционного вакуумирования обеспечивает равномерное распределение элементов в объеме металла в ковше после их присадок в вакуум-камеру. Экспериментальное исследование процессов вакуумирования в стали является очень трудоемким, не позволяющим в деталях оценить гидродинамику потоков, растворение и раскисление углерода в стали. Поэтому наиболее эффективным инструментом для исследования процесса растворения углерода в стали в условиях работы системы «вакууматор – ковш» является математическое моделирование [2]. Математическое моделирование процесса перемешивания и растворения углеродсодержащего порошка позволяет детально проанализировать динамику и интенсивность циркуляционных потоков газовой фазы, а также рассчитать процесс растворения углерода в стали.

Цель настоящей работы – моделирование гидродинамических потоков в условиях работы системы «вакууматор – ковш» на основе клеточно-автоматного подхода, использующего уравнения Навье–Стокса.

Для моделирования процесса перемешивания расплава и порошка в системе вакууматора использовали математическую модель, включающую систему уравнений Навье–Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_l + \rho_s} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho_l + \rho_s} \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial V_y}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_l + \rho_s} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho_l + \rho_s} \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) - g, \\ \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_l + \rho_s} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho_l + \rho_s} \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

и уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial \tau} + \left(\frac{\partial(\rho_l V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_l V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_l V_z)}{\partial z} \right) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + (V_y + V_s) \frac{\partial \rho_s}{\partial y} + V_z \frac{\partial \rho_s}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где τ – время; x, y, z – декартовы координаты (ось Y направлена вертикально); V_x, V_y, V_z – проекции скорости жидкости на координатные оси X, Y, Z соответственно; P – давление жидкости; ρ_l – плотность расплава в данной пространственной точке (x, y, z) ковша; ρ_s – плотность порошка в данной пространственной точке (x, y, z) ковша; η – динамическая вязкость расплава; V_s – средняя скорость всплывания частиц науглероживателя, которая зависит от фракционного состава порошка и плотности вещества в частице. Для учета скорости всплывания частиц использовали полуэмпирическую формулу [3]:

$$V_s = \sqrt{\frac{8 g d_s (\rho_l - \rho_c)}{3 \cdot 2,29 \rho_l}},$$

где d_s – средний размер частицы; ρ_c – плотность частицы (плотность углерода).

Для описания связи между плотностью и давлением использовали полуэмпирическую зависимость:

$$P = \begin{cases} k_1 (\rho_l / \rho_{l0} + \rho_s / \rho_{s0} - 1) & \text{при } \rho_l / \rho_{l0} + \rho_s / \rho_{s0} > 1, \\ 0 & \text{при } \rho_l / \rho_{l0} + \rho_s / \rho_{s0} \leq 1, \end{cases} \quad (4)$$

где ρ_{l0} – нормальная плотность расплавленного металла; ρ_{s0} – нормальная плотность порошка; k_1 – модуль объемного сжатия.

При численном моделировании использовали следующие условия для скоростей и давлений: 1) начальные условия: $V_x(x, y, z) = V_y(x, y, z) = V_z(x, y, z) = 0$, $\rho_l(x, y_0, z) = \rho_{l0}$, где

y_0 – координата поверхности расплава; $\rho_s(x, y, z) = 0$; $\rho_l(x, y - \Delta y, z) = \frac{\rho_l(x, y, z)(\rho_l(x, y, z)g\Delta y + k_1)}{2k_1 - \rho_l(x, y, z)g\Delta y}$;

$\rho_l(x, y - \Delta y, z) = \frac{\rho_l(x, y, z)(\rho_{l0}g\Delta y + 2k_1)}{2k_1 - \rho_{l0}g\Delta y}$; 2) граничные условия для границы «расплав – стенка (дно)»

ковша: $V_x = 0$, если стенка слева или справа; $V_y = 0$, если система на дне; $V_z = 0$, если стенка спереди или сзади; $P_k = P_l$, где P_k – давление в стенках ковша; P_l – давление в расплаве; 3) для границы «расплав – воздух»: $V_{xv} = V_{xl}$, $V_{yv} = V_{yl}$, $V_{zv} = V_{zl}$, где V_{xv}, V_{yv}, V_{zv} – компоненты скорости воздуха; V_{xl}, V_{yl}, V_{zl} – компоненты скорости расплава; $P_v = 0$, где P_v – давление воздуха. Здесь «воздух» – это пространство над поверхностью расплава.

В основу моделирования положен конечно-разностный метод, прямоугольная сетка имеет шаг дискретизации 0,05 м и состоит из $52 \times 102 \times 52 = 281112$ элементов.

На основе чертежа (в основу положен чертеж вакууматора, используемого на РУП «БМЗ») была построена 3d-схема процесса перемешивания порошка и стали, которая показана на рис. 1 в сечениях. При моделировании учитывали следующие технологические особенности. Давление в пространстве вакууматора равно 1,5 млбар. Это давление создается за 3 мин и уменьшается от атмосферного. При этом расплав поднимается от нижней части «штанов» вакууматора на высоту 2 м. В этой системе проводится подача порошка науглероживателя, который перемещается через специальное окно на поверхность расплава. Глубина погружения «штанов» вакууматора составляет 0,5 м. В боковой части вакууматора находится трубка, через которую подается аргон через шесть отверстий диаметром 3 мм. Общий расход газа составляет 500 л/мин. Через окно в вакууматоре подается науглероживатель.

Одновременно с засыпкой порошка осуществляется продувка аргоном расплава в вакууматоре. В итоге в расплаве, находящемся в ковше и вакууматоре, образуются сложные поля скоростей, которые являются движущей силой процесса растворения.

При анализе гидродинамической картины перемешивания использовали три продольных сечения, которые проходили через «штаны» вакууматора, и одно поперечное (Б–Б), проходящее через середину ковша. Две концентрические окружности соответствуют двум объемам жидкости, находящимся в цилиндрах («штанах») вакууматора.

На рис. 2 изображен фрагмент моделирования распределения пространственных полей по скоростям. Как показали результаты моделирования, распределение скоростей в сечении А–А системы «вакууматор – ковш» на момент времени 2 с соответствует началу процесса перемешивания расплава аргоном. При этом в нижней половине ковша направления скоростей носят хаотический характер. Практически

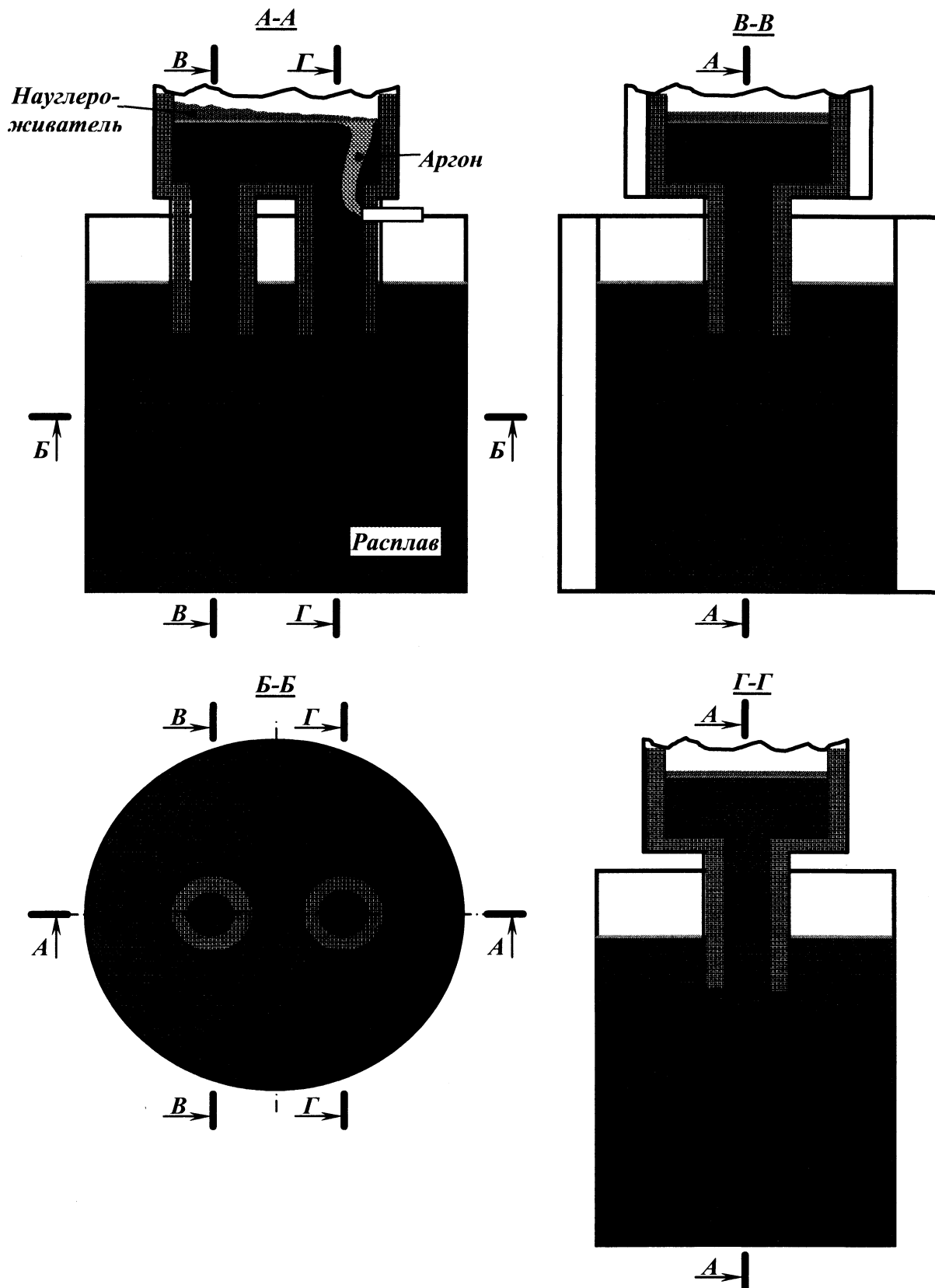


Рис. 1. Анализируемые сечения моделируемого вакууматора

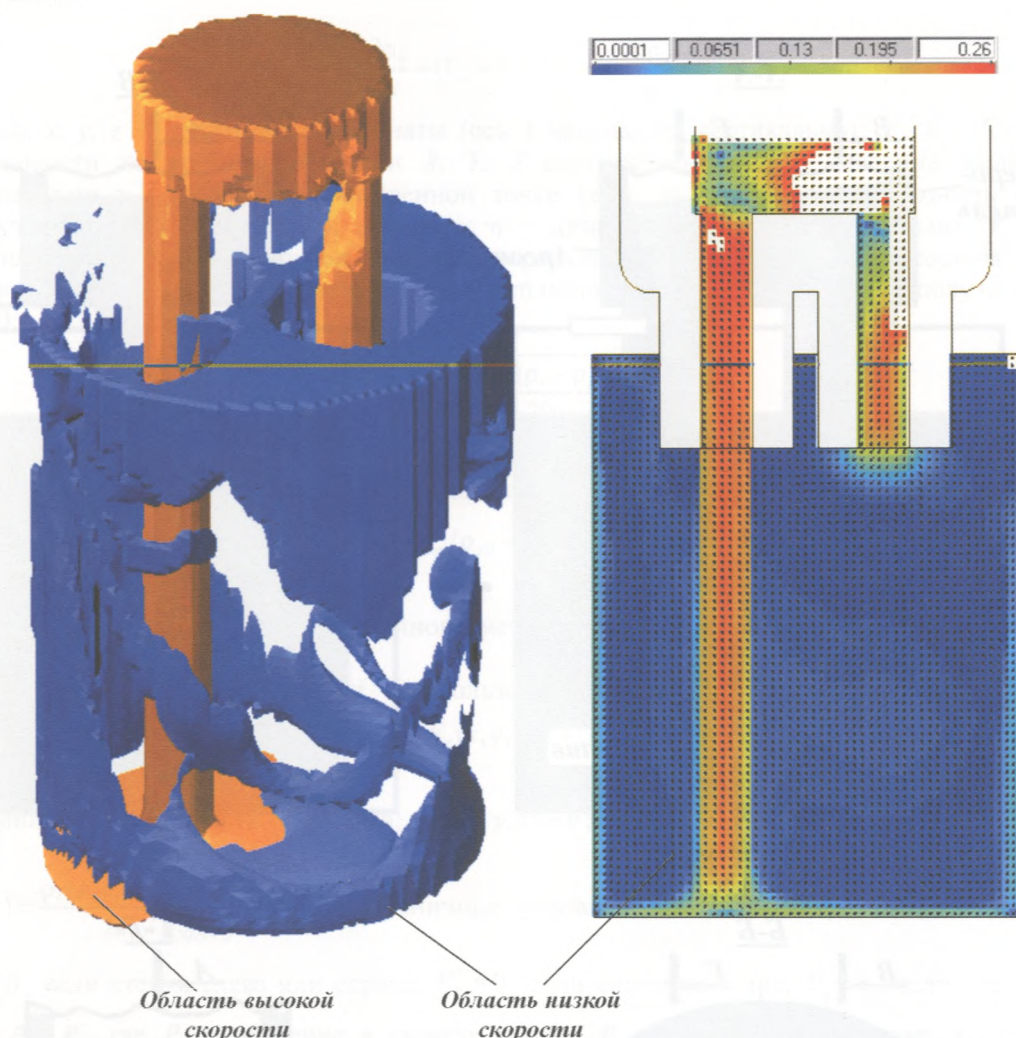


Рис. 2. Пространственное распределение скоростей в расплаве в момент времени перемешивания 440 с. Цветовая шкала по скорости указана в м/с

значения скоростей в этой части ковша близки к нулю. В верхней половине ковша в направлении «штанов» вакууматора начинают формироваться два потока (восходящий и нисходящий). Движение этих потоков обусловлено движением пузырьков аргона. С течением времени в нижней части ковша начинается формирование двух новых направлений и перемещения вихрей расходящихся в стороны относительно основного. Для детализации плоскостного поля скоростей на рис. 3 показано распределение скоростей в системе «вакууматор – ковш» на момент времени 10 с. Как видно из рисунка, с увеличением времени основной циркуляционный поток повышается, о чем свидетельствуют значения скоростей и глубина его проникновения в нижнюю половину ковша. На момент времени 35 с скоростной поток достигает дна ковша. В дополнение к этому потоку формируются два вихреобразных циркуляционных потока, которые возникают в направлении большого скоростного потока. Дальнейшее увеличение времени процесса перемешивания в вакууматоре и ковше приводит к углублению основного циркуляционного потока в верхнюю часть ковша и увеличению его влияния на нижнюю часть. На момент времени 150 с в направлении стенок ковша снизу вверх происходит движение двух циркулирующих потоков. В центральной части ковша под «штанами» вакууматора, как показывают расчеты, поле скоростей носит стационарный характер, что можно видеть из динамики скорости для нескольких точек выделенных в пространстве ковша.

Анализ модельных значений скоростей расплава показал, что наибольшие скорости (0,16–0,24 м/с) наблюдаются внутри «штанов» вакууматора. Такой же порядок скоростей наблюдается в пространственном цилиндре ковша, являющемся продолжением выпускного отверстия вакууматора.

Таким образом, представленные расчеты позволяют оценить значения и направление скоростей в различных точках ковша при работе вакууматора, что дает основу для расчетов процесса растворения углеродсодержащих порошков в расплаве в условиях промышленного оборудования. С помощью подобных расчетов можно оценить эффективность перемешивания для двух и более потоков аргона, а также перспективы введения дополнительных отверстий для оценки перемешивания аргоном.

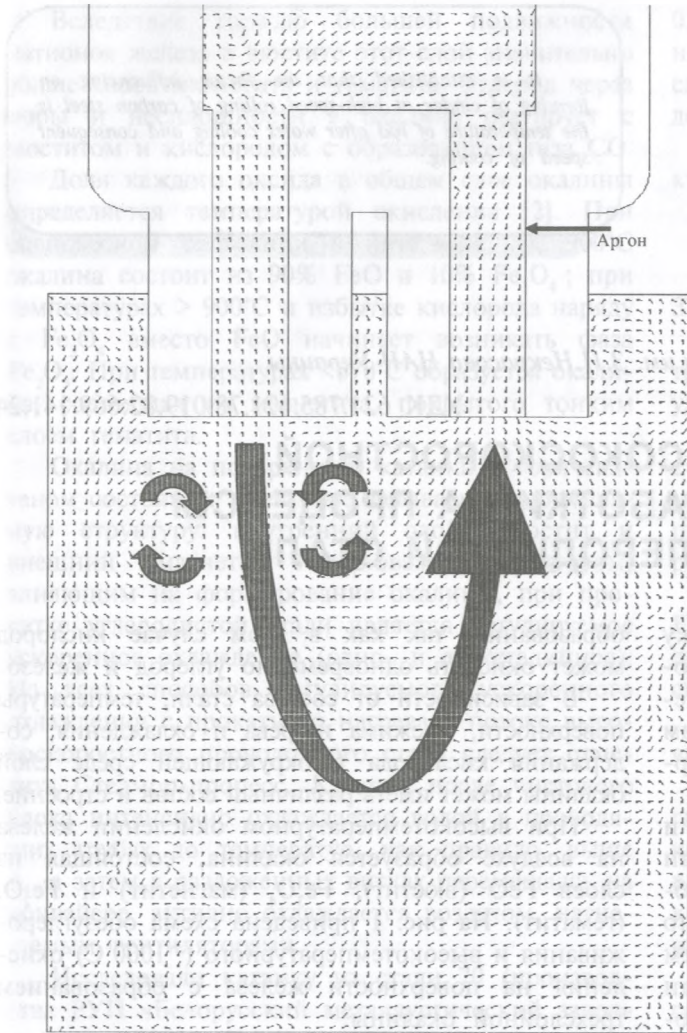


Рис. 3. Распределение скоростей в сечении А-А вакууматора на момент времени 10 с

Терлецкий С.В., и др. Компьютерная гидродинамика перемешивания расплава и порошковых углеродсодержащих материалов в ковше // Литье и металлургия. 2004. № 3. С. 60–67.

4. Инжекционная металлургия // Сб. тр. междунар. конф. 12–13 июля 1980. Лунда. Швеция / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982.

Выводы

1. Разработана математическая модель процесса перемешивания и растворения углеродсодержащего порошка в системе «вакууматор – ковш» под действием циркулирующего аргона. В основу геометрической схемы моделируемого процесса положены промышленные чертежи разливочного ковша и вакууматора, используемого на РУП «БМЗ». Математическая модель построена на основе уравнений Навье–Стокса, реализованных в клеточном автомате трехмерного типа и позволяет в любой точке промышленного ковша и вакууматора проанализировать трехмерную динамику скоростных потоков и процессов растворения углерода в стальном расплаве.

2. На основе компьютерных расчетов методом клеточно-автоматного моделирования установлен характер распределения гидродинамических скоростей расплава в промышленном ковше для различных временных интервалов перемешивания. Представлено пространственное распределение гидродинамических потоков при перемешивании углеродсодержащего порошка.

Литература

1. Поводский Д.Я., Кудрин В.А., Вишкарев А.Ф. Внепечная обработка стали. М.: МИСИС, 1995.

2. Чичко А.Н., Андрианов Н.В.,