

The results of numerical simulation of the carbonic powder mixing processes in steel-smelting bowl tub at different frequency regimes of the argon sources activation are presented. The influence of frequency switching regime of sources for the process of the carbonic powder mixing in industrial bowl, that allowed to reveal the additional opportunities, increasing efficiency of the process of the hydrodynamic mixing, is studied.

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

УДК 519:669.27

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СТАЛЕЙ В ПРОМЫШЛЕННОМ КОВШЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ ПОДАЧИ АРГОНА

Важной технологической характеристикой процесса внепечной обработки стали в металлургическом производстве является время перемешивания металла в ковше аргоном. Выбор оптимального времени перемешивания аргоном и расположение источников подачи газа, используемого для получения расплава, зависят от углеродсодержащего материала, температуры расплава и других технологических характеристик процесса плавки. В этом случае тип углеродсодержащего материала (фракционный состав) существенно влияет на время перемешивания и эффективность процессов растворения, что, в конечном счете, определяет технико-экономические показатели внепечной обработки стали аргоном.

Моделирование процессов перемешивания и растворения углеродсодержащего порошка позволило выявить дополнительные возможности, повышающие эффективность перемешивания. В частности, представляет интерес введение дополнительного источника перемешивания в ковше. В этом случае представляет научный и практический интерес рассчитать процесс гидродинамического перемешивания для двух источников аргона, которые работают в определенном частотном режиме ковшевой обработки.

Цель настоящей работы – исследование влияния различных технологических режимов подачи аргона на процесс перемешивания углеродсодержащего порошка в промышленном ковше.

Для реализации этой цели были поставлены задачи:

- сформировать исходные данные для расчета процесса перемешивания и растворения в условиях ковшевой обработки сталеплавильного участка БМЗ;
- рассчитать двумерные поля скоростей для различных сечений промышленного ковша при изменении временных режимов подачи аргона;
- рассчитать интегральные характеристики процесса перемешивания для различных режимов подачи аргона.

В основу модели растворения углеродсодержащего порошка в промышленном ковше положена математическая модель, основанная на уравнении Навье–Стокса и уравнении, описывающем перераспределение концентрации углерода в поле скоростей, дополненные системой граничных условий для промышленного ковша. Подобная модель уже использовалась при решении ряда задач, связанных с перемешиванием стали в ковше [1–4]. Следует отметить, что при перемешивании учитываются перенос порошка и его растворение в условиях изменяющегося поля скоростей и концентраций.

В качестве математической модели перемешивания, разработанной при выполнении настоящей работы, использована система уравнений Навье–Стокса, которая реализована к системе «расплав–порошок», где плотность системы определяется суммарной плотностью жидкости и порошка:

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

и уравнение неразрывности:

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

где  $\tau$  – время;  $x, y, z$  – декартовы координаты (ось  $Y$  направлена вертикально);  $V_x, V_y, V_z$  – соответственно проекции скорости жидкости на координатные оси  $X, Y, Z$ ;  $P$  – давление жидкости;  $\rho_l$  – плотность жидкости;  $\rho_s$  – масса порошка в единице объема в данной точке пространства;  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости.

Моделирование процесса движения порошка в расплаве с учетом всплывания частиц проводили на основе дифференциальных уравнений

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

где  $V_s$  – средняя скорость всплывания частиц порошка (зависит от фракционного состава порошка и плотности вещества в частице).

Таким образом, описанная выше система уравнений была положена в основу численного моделирования процесса. Дифференциальные уравнения системы были расписаны в виде конечно-разностных аппроксимаций, на базе которых была разработана компьютерная программа по моделированию процесса перемешивания расплавов. В качестве основной схемы использовали ковш для приготовления расплавов из сталей, применяемых на Белорусском металлургическом заводе.

В основу промышленной схемы приготовления сплава из ковша были положены цеховые данные о размерах ковша, который используется на БМЗ. Температура металла принималась равной 1550 °С, химический состав сплава (расплава) соответствовал системе Fe–C–Mn–Si. Причем количество углерода в исходном состоянии до ввода порошка соответствовало 0,13 мас.% при 0,10% Mn и 0,1% Si. Количество вводимого порошка – 130 кг, начальная скорость струи – 2,5 м/с. Плотность порошка была равна 700 кг/м<sup>3</sup> при плотности гранул порошка 1200 кг/м<sup>3</sup>. По представленному чертежу ковша была построена клеточно-автоматная модель процесса перемешивания. Объемная модель была разбита равномерной объемной сеткой для проведения численных экспериментов по моделированию полей скоростей и распределения углерода в ковше.

В качестве объекта моделирования использовали виртуальный 3D-ковш, построенный по чертежам реального промышленного ковша.

В качестве исходных данных использовали: расход аргона – 300 л/мин; начальная концентрация углерода в расплаве – 0,13 мас.%; количество порошка науглероживателя – 140 кг при плотности порошка 700 кг/м<sup>3</sup> и плотности гранул 1200 кг/м<sup>3</sup>; растворимость порошка принималась равной 0,006 кг/м<sup>3</sup>; фракционный состав моделируемого порошка соответствовал условиям: 5% – 0–0,6 мм; 10% – 0,6–1,2 мм; 70% – 1,2–1,8 мм; 10% – 1,8–2,4 мм; 5% – 2,3–3,0 мм.

Были промоделированы следующие режимы временной подачи аргона:

- режим с одним постоянным источником аргона с расходом газа 300 л/мин;
- режим, соответствующий двум источникам аргона, с интервалом переключения подачи между ними 20 с.
- режим, соответствующий двум источникам аргона, с интервалом переключения подачи 10 с;
- режим, соответствующий двум источникам аргона, с интервалом переключения подачи 1 с;
- режим, соответствующий двум включенным одновременно источникам аргона с расходом 300 л/мин каждый.

На рис. 1 показана общая схема моделируемого процесса в основных сечениях ковша. Как видно из рисунка, аргон подается снизу

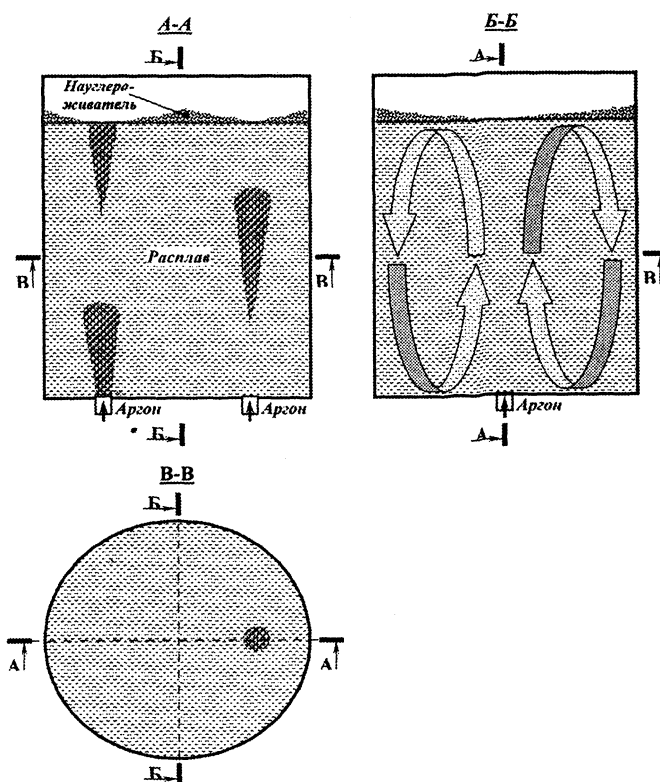


Рис. 1. Общая схема процесса моделирования перемешивания расплава двумя потоками аргона в основных сечениях ковша

ковша и выходит на поверхность, где плавают порошок. Причем в центральном сечении ковша Б-Б формируются два циркулирующих потока скоростей.

Анализ результатов расчетов полей скоростей показал, что на поверхности расплава образуются скоростные потоки, которые, отражаясь от поверхности, проходят внутрь в направлении дна ковша. Причем скоростные потоки в дальней от отверстия части ковша перемещаются по поверхности и в глубь ковша.

Причем скоростные потоки в центре ковша (центральное сечение) направлены снизу вверх, а по стенкам ковша образуются небольшие вихри, разделяющие два противоположных потока, один из которых направлен вверх (центральная часть), а другой – вниз (пристеночная область ковша).

На рис. 2 показано распределение скоростей в сечении А-А на момент времени  $\tau=100$  с при перемешивании двумя источниками аргона, работающими попеременно с интервалом 20 с. Как видно из рисунка, второй источник оказывает влияние на распределение скоростей от основного источника. При этом усиливается движение основного потока от дна ковша к поверхности и ослабляются вихреобразные движения вдоль стенок ковша.

На рис. 3 приведено распределение скоростей в сечении А-А при перемешивании двумя источниками аргона с периодом включения  $\Delta\tau=10$  с. На рисунке зафиксирован момент при включенном втором источнике. Как видно из рисунка, циркуляционный поток увлекается вторым источником от дна к поверхности. Анализ результатов в различные моменты показывает, что основной поток в центре при переключении смещает свое направление к движущемуся потоку аргона.

На рис. 4 представлено распределение скоростей в сечении А-А на момент времени  $\tau=100$  с при интервале переключения  $\Delta\tau=1$  с. Как видно из рисунка, на момент времени 100 с устойчиво формируются три вертикальных потока скоростей. Первый соответствует первому источнику, второй – второму источнику и третье направление является суперпозицией потоков, получаемых при импульсном подключении двух источников. Это направление идет от дна к поверхности. Как видно из рисунка, в центральном сечении ковша, проходящем между источником аргона, тенденция к формированию трех потоков сохраняется. Анализ расчетных значений скоростей показал, что

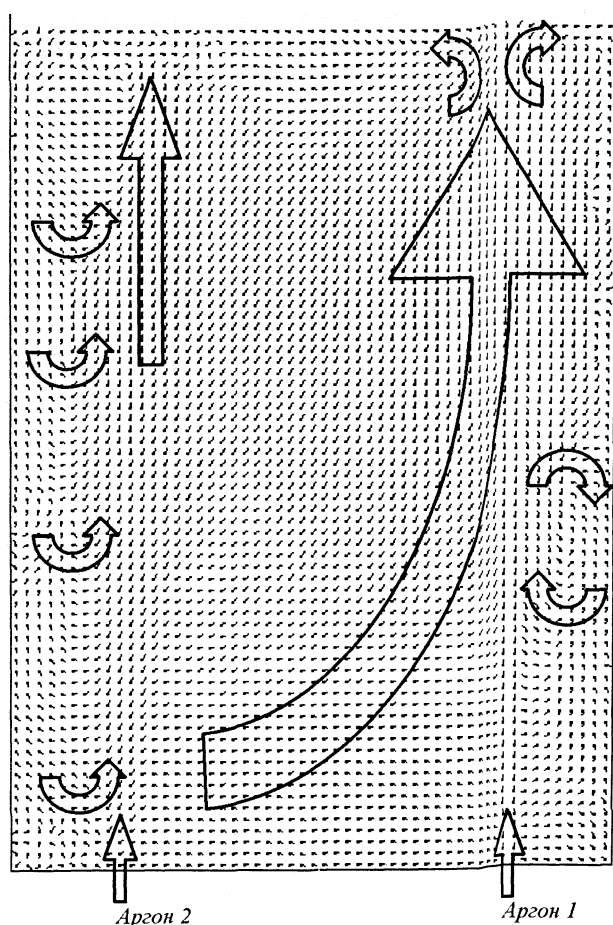


Рис. 2. Распределение скоростей в сечении А-А на момент времени 100 с при перемешивании двумя потоками аргона, источники которых работают попеременно с временным интервалом  $\Delta\tau=20$  с

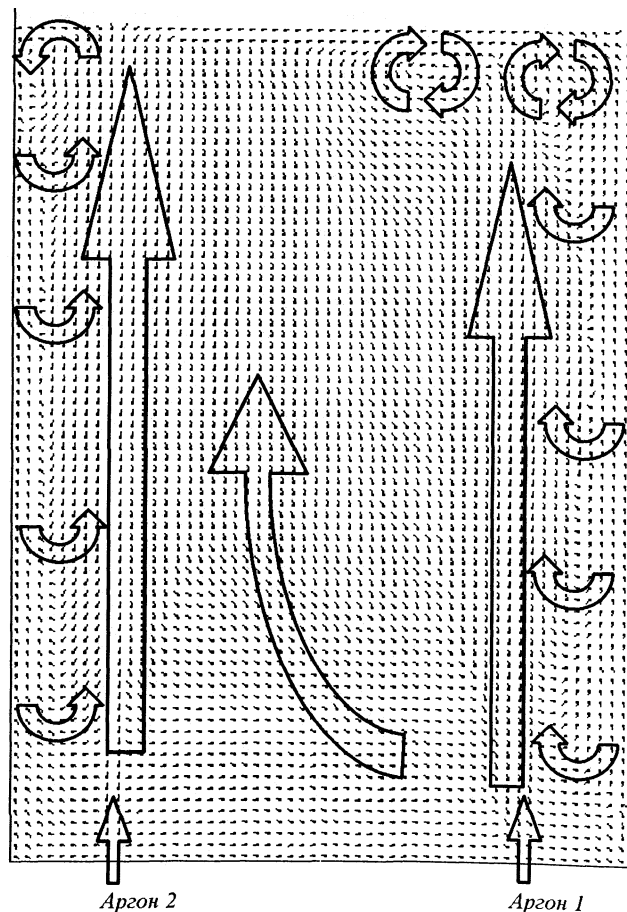


Рис. 3. Распределение скоростей в сечении А-А на момент времени 100 с при перемешивании двумя потоками аргона, источники которых работают попеременно с временным интервалом  $\Delta\tau=10$  с

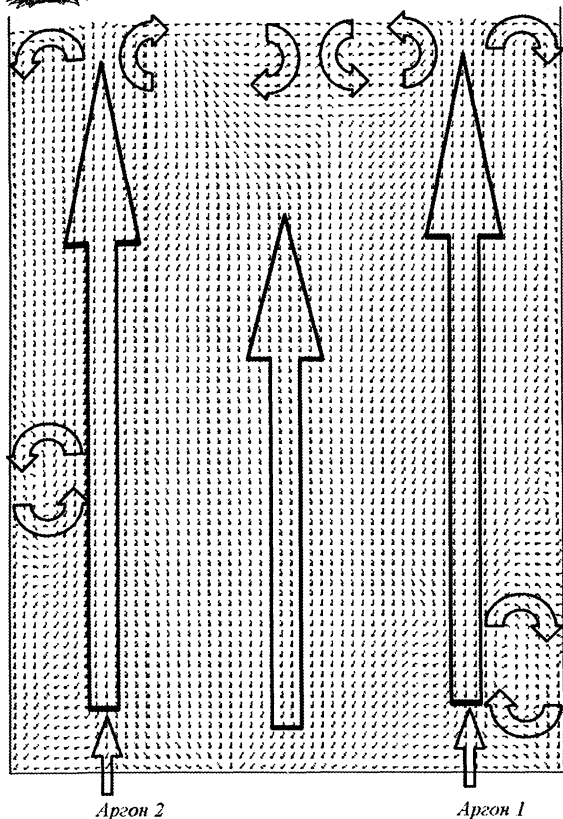


Рис. 4. Распределение скоростей в сечении А-А на момент времени 100 с при перемешивании двумя потоками аргона, источники которых работают попеременно с временным интервалом  $\Delta t=1$  с

порядок скоростей в нижней части ковша близок к 0,01 м/с. По направлению к поверхности ковша скорости растут и составляют 0,03–0,05 м/с. На поверхности расплава скорости достигают 0,5–0,8 м/с (в центральной части ковша) и 1,0–1,1 м/с (в месте выхода струи аргона). Причем скорость расплава в струе аргона составляет 2,0–3,36 м/с. Таким образом, анализ поля скоростей показал, что значения скоростей не превышают 3 м/с, причем основные скорости в ковше соответствуют интервалу 0–0,05 м/с.

На следующем этапе представляло интерес изучить интегральные характеристики поля скоростей. В качестве интегральных характеристик использовали параметры частных функций, отражающих распределение по скоростям. На рис. 5 показана частотная диаграмма распределения скоростей в интервале 0,1–3,3 м/с. Как видно из рисунка, для этого участка скоростей характерен один пик, протяженность и максимальное значение которого незначительно изменяется от времени переключения источника. Интервал скоростей с наибольшими изменениями числа клеток соответствует 0,42–1,22 м/с. Уменьшение времени переключения источников аргона увеличивает число клеток расплава, имеющих более высокую скорость. Казалось бы, постоянно действующие два источника должны были бы привести к наибольшему количеству клеток, имеющих высокие скорости. Однако оптимальным среди изученных режимов является временной интервал  $\Delta t=1$  с, т.е. при использовании двух источников с частотой их переключения 1 с должно наблюдаться наиболее интенсивное перемешивание, о чем свидетельствует самое большое количество клеток, имеющих высокие скорости.

Таким образом, по скоростному полю расплава в ковше можно сделать вывод о том, что наиболее интенсивно процесс перемешивания стали протекает в условиях попеременного включения двух источников аргона с временем переключения  $\Delta t=1$  с.

### Литература

1. Чичко А.Н., Андрианов Н.В., Терлецкий С.В. Моделирование процесса растворения углеродсодержащих порошков при обработке стали в ковше // Сталь. 2005. №5. С. 23–27.
2. Чичко А.Н., Андрианов Н.В., Терлецкий С.В. Гидродинамическая модель перемешивания газовой струей аргона порошкообразного углеродсодержащего материала в вакууматоре // Сталь. 2005. №6. С. 69–71.
3. Чичко А.Н., Андрианов Н.В., Терлецкий С.В. и др. Компьютерная гидродинамика перемешивания расплава и порошковых углеродсодержащих материалов в ковше // Литье и металлургия. 2004. № 3. С. 60–67.
4. Чичко А.Н., Андрианов Н.В., Демин А.В. и др. Компьютерное моделирование динамики перемещения жидкой фазы в слитке круглого сечения, кристаллизующемся в МНЛЗ // Литье и металлургия. 2005. № 2. Ч.2. С. 87–90.
5. Чичко А.Н., Андрианов Н.В., Терлецкий С.В. и др. Теоретическая оценка растворения в ковше порошковых углеродсодержащих материалов, используемых в сталеплавильном производстве РУП «БМЗ» // Литье и металлургия. 2005. № 1. С. 9–17.

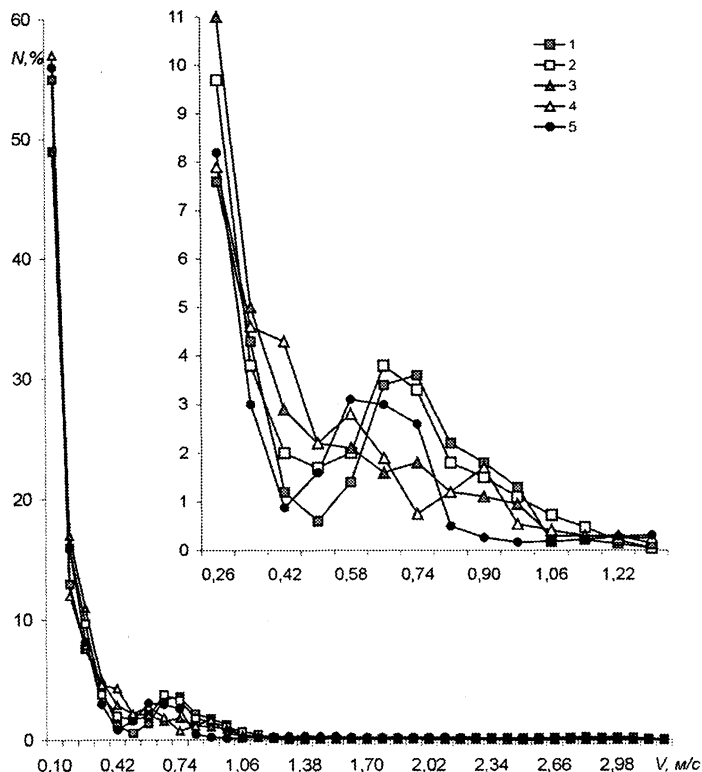


Рис. 5. Частотные диаграммы распределения скоростей расплава в интервале 0,1–3,3 м/с при перемешивании одним потоком аргона (1); двумя потоками, источники которых работают попеременно с интервалом  $\Delta t=20$  с (2),  $\Delta t=10$  с (3),  $\Delta t=1$  с (4);  $\Delta t=0$  с (5)