



The mathematical mechanism for modeling of the mixing processes of melts and powder materials, assumed as a basis of the out-of-furnace steel processing, is presented. The computer calculations of the melt speed fields, formed in the industrial bowl of the Belorussian metallurgical works, are given and analyzed.

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

УДК 519:669.27

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГИДРОДИНАМИКА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА И ПОРОШКОВЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ В КОВШЕ

Математическое моделирование гидродинамики перемешивания порошкообразных материалов в расплавах является одной из сложнейших задач теории моделирования технологических процессов. Сложность этой задачи связана с двухфазным характером процесса перемешивания, который сопровождается растворением порошка с течением времени. В основе перемешивания расплава и порошка лежат нестационарные процессы, которые протекают в трехмерном пространстве. До настоящего времени нестационарные процессы перемешивания рассматривались со значительными расчетными упрощениями для двухмерного случая. А количественная оценка процессов перемешивания, учитывающая трехмерные поверхности раздела компонентов, была невозможна в большей степени из-за недостаточного быстродействия современных компьютеров. Анализируя литературные данные по расчетам процессов перемешивания в системе «расплав – твердая фаза», можно сделать вывод о том, что практически отсутствуют конкретные данные по распределению скоростей, давлений в трехмерном металлургическом реакторе в условиях перемешивания порошковых материалов с расплавом [1–3]. Одним из эффективных инструментов количественного анализа металлургических реакций в промышленном оборудовании могут стать клеточно-автоматные методы моделирования, развитые в работах [4–6], и позволяющие в динамике визуализировать трехмерный процесс перемешивания. Основу таких методов должны составить математические модели процесса перемешивания, основанные на законе сохранения импульса и энергии расплава. Следует отметить, что полной физической модели процессов перемешивания до сих пор нет и многие вопросы, рассмотренные в литературе, касаются отдельных сторон этой довольно сложной задачи, что и явилось стимулом выполнения настоящей работы.

Для описания гидродинамики скоростных потоков можно использовать закон сохранения импульса, следствием которого является уравнение Навье–Стокса. Дополненная начальными и граничными условиями система уравнений Навье–Стокса позволяет определить скорость потока в любой момент времени в любой пространственной точке. В основу математической модели перемешивания, представленной в настоящей работе, положена система уравнений Навье–Стокса, дополненная уравнением неразрывности, которые применены к системе «расплав – порошок»:

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

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

где τ – 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;

ρ_l — плотность расплава в единице объема; ρ_s — масса порошка в единице объема в данной точке пространства; η — динамическая вязкость жидкости.

Процесс переноса порошка моделировали с учетом всплывания частиц и 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-науглероживателя.

В данной модели делается допущение, что частицы имеют приблизительно одинаковый размер. Они всплывают под действием архимедовой силы, которая уравнивается силами сопротивления движению в данной жидкости, т.е. частицы разгоняются до скорости V_s относительно вертикального потока жидкости и далее движутся с этой скоростью. В данной модели процесс разгона частиц не учитывается, так как допускается, что частицы мгновенно приобретают эту скорость.

Для моделирования процесса перемешивания была разработана специальная программа, с помощью которой рассчитывали нестационарные поля скоростей и углерода в ковше. На рис. 1 представлена одна из геометрических схем процесса перемешивания углеродсодержащего материала с расплавом стали, используемых на РУП «БМЗ» при приготовлении сталей. Как видно из рисунка, слева находится падающая струя металла, справа — порошок. Вся система перемешивается за счет кинетической энергии струи металла и порошка.

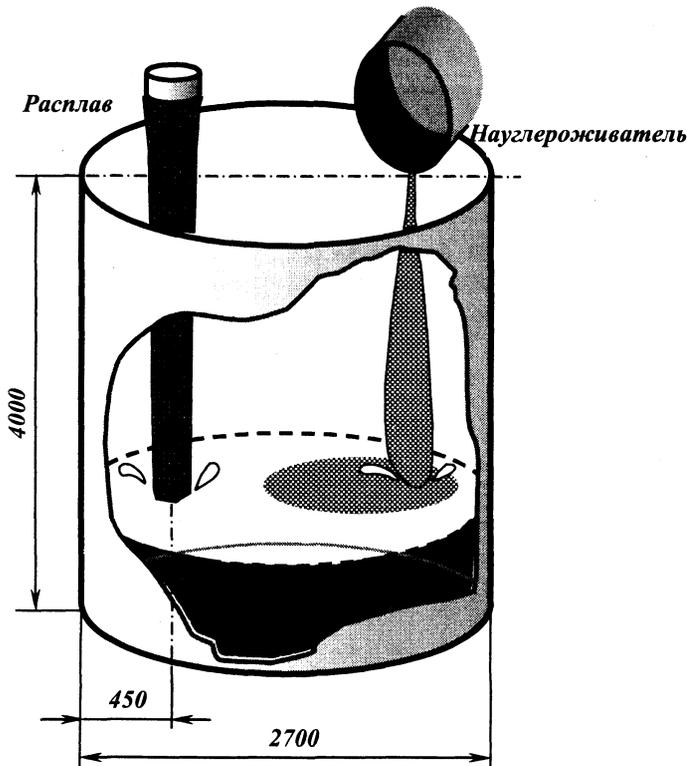


Рис. 1. Трехмерная геометрическая схема процесса перемешивания

картину циркуляционных потоков, распределенных неоднородно по пространству ковша. Создание циркуляционных потоков в пространстве ковша обеспечивает хорошие условия для быстрого перемешивания порошка за счет его увлечения в нижние слои расплава. По мере заполнения порошка (рис. 3) происходит расслаивание циркуляционных потоков, за счет чего возникают дополнительные перемещения расплава «вверх — вниз». С увеличением времени подачи расплава картина циркуляционных потоков изменяется. Доступ циркулирующих слоев расплава к порошку уменьшается. По-видимому, на этом этапе уменьшается эффективность растворения, так как снижается площадь поверхности «порошок — расплав». На последних стадиях заполнения порошка, как показал вычислительный эксперимент, значительная часть циркуляционных потоков отрывается от поверхности расплава (порошка), который, имея низкую плотность, собирается сверху.

В основу моделирования процесса перемешивания расплава и порошка в ковше были положены следующие данные. Размеры ковша соответствуют размерам, принятым в цехе плавки РУП «БМЗ». Температура металла принималась равной 1550 °С, а количество углерода в момент заливки расплава в ковш составляло 0,10%. Количество вводимого порошка составляло 130 кг, начальная скорость струи — 2,5 м/с. Плотность порошка была равна 700 кг/м³ при плотности гранул порошка 1200 кг/м³. В программе было предусмотрено задание фракционного состава. При этом анализировали растворение пяти фракций порошка, которые имели различный диаметр гранул.

На рис. 2 представлено численное распределение скоростных потоков расплава в начале заполнения ковша. Как видно из рисунка, на стыке струи и уровня расплава образуются два вихреобразных потока, обеспечивающих круговую циркуляцию сверху вниз в плоскости А-А. Подобные вихреобразные движения образуются и в сечении Б-Б. Суперпозиция вихревых потоков в сечениях А-А и Б-Б в объеме дает сложную гидродинамическую

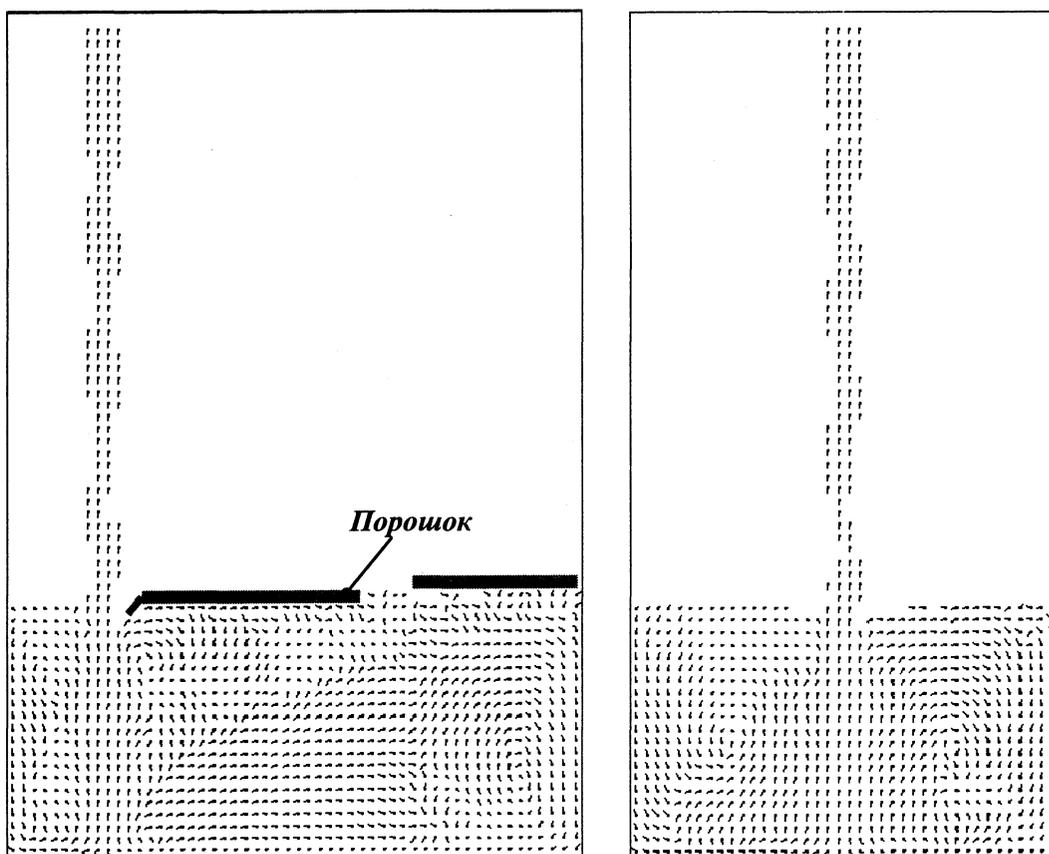


Рис. 2. Распределение скоростных потоков при перемешивании струи стали и углеродсодержащего материала (порошок) в сечениях А и Б ковша через 60 с после начала выпуска металла в ковш

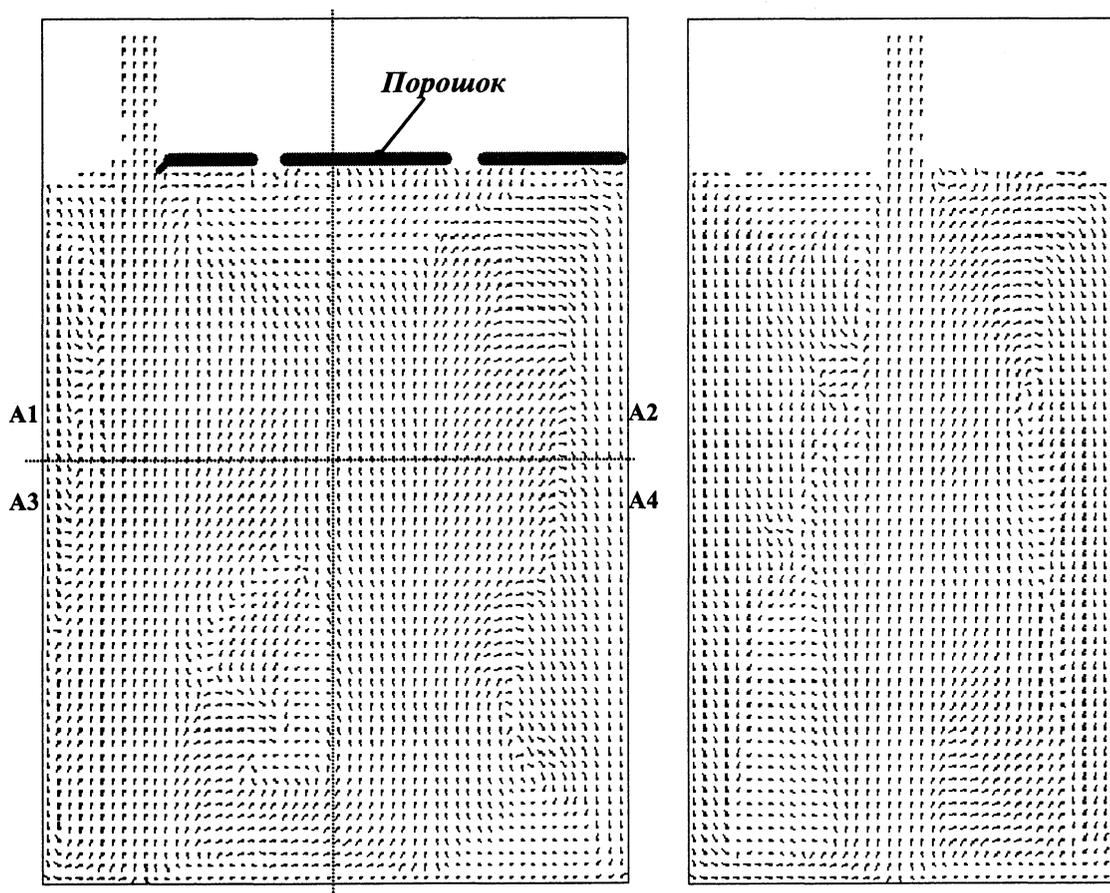


Рис. 3. Распределение скоростных потоков при перемешивании струи стали и углеродсодержащего материала (порошок) в сечениях А и Б ковша через 190 с после начала выпуска металла в ковш

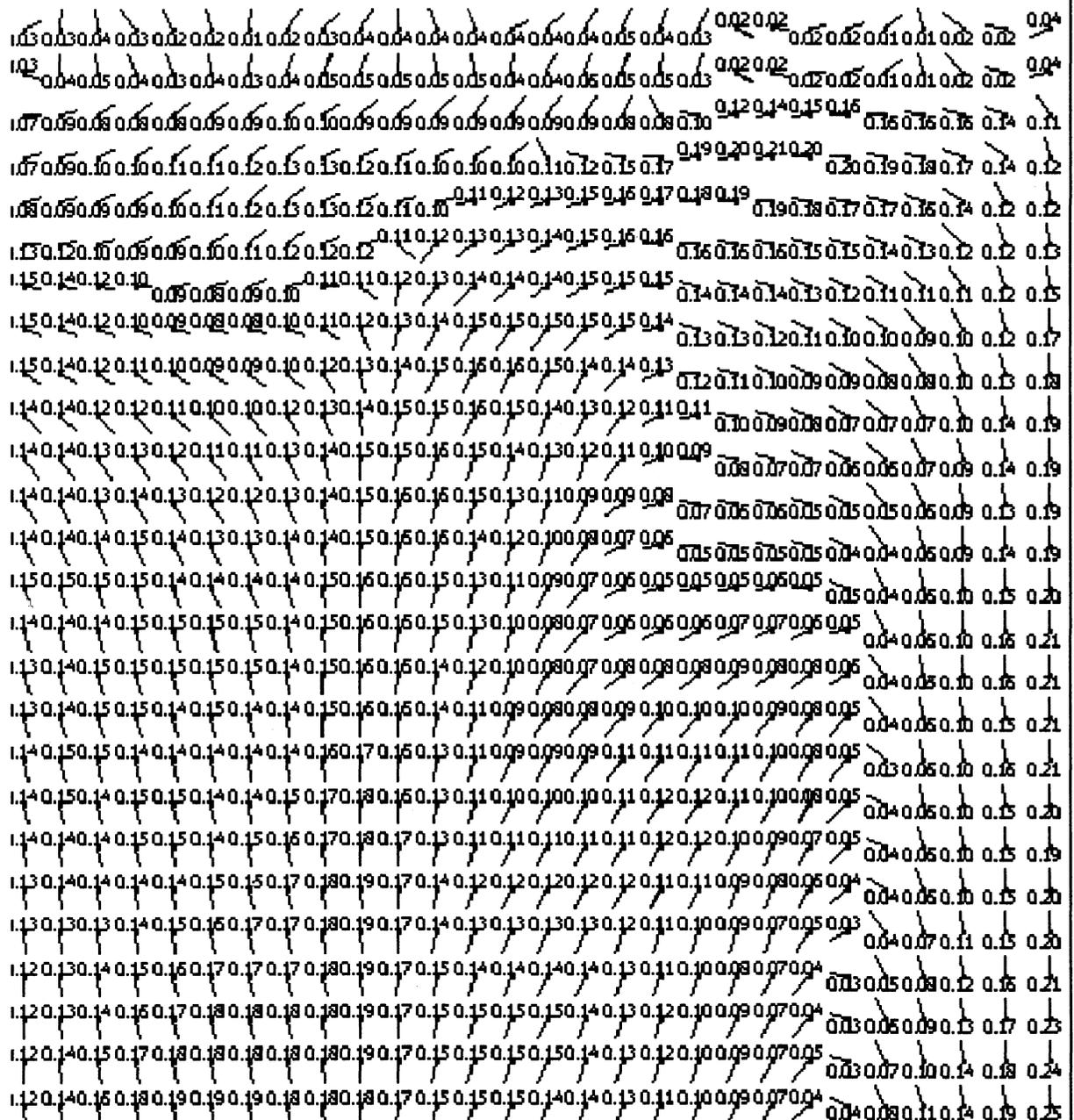


Рис. 5. Детализированное распределение скоростей расплава в сечении А через 190 с после начала выпуска (фрагмент А2 рис. 3)

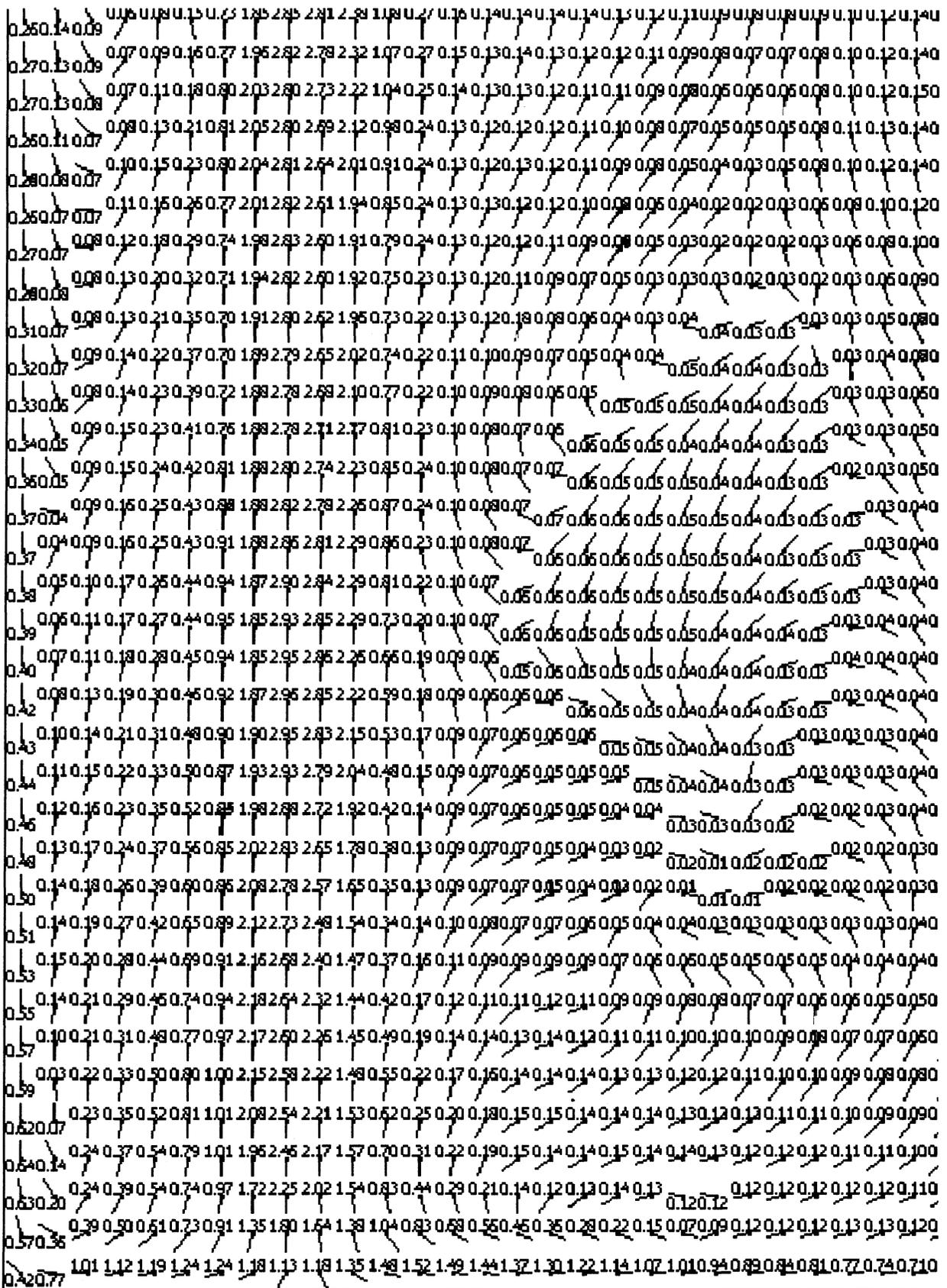


Рис. 6. Детализированное распределение скоростей расплава в сечении А через 190 с после начала выпуска (фрагмент АЗ рис. 3)

1.12	0.140	0.150	0.170	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180	0.190	0.170	0.150	0.150	0.150	0.140	0.140	0.130	0.110	0.100	0.090	0.070	0.04	0.18	0.24									
1.12	0.140	0.150	0.180	0.190	0.190	0.190	0.180	0.180	0.180	0.170	0.150	0.150	0.150	0.140	0.140	0.130	0.110	0.100	0.090	0.070	0.04	0.08	0.11	0.14	0.19	0.25						
1.12	0.150	0.160	0.180	0.190	0.190	0.180	0.170	0.170	0.170	0.160	0.150	0.150	0.150	0.140	0.130	0.120	0.100	0.090	0.070	0.04	0.05	0.09	0.12	0.15	0.20	0.25						
1.13	0.140	0.160	0.170	0.180	0.170	0.170	0.160	0.160	0.170	0.160	0.160	0.150	0.150	0.140	0.130	0.130	0.120	0.110	0.100	0.070	0.04	0.05	0.10	0.12	0.15	0.20	0.25					
1.12	0.140	0.150	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.170	0.170	0.160	0.160	0.160	0.140	0.140	0.130	0.130	0.110	0.100	0.080	0.04	0.05	0.10	0.12	0.15	0.20	0.25					
1.10	0.120	0.130	0.140	0.150	0.160	0.160	0.160	0.160	0.180	0.170	0.170	0.160	0.160	0.150	0.140	0.130	0.120	0.110	0.100	0.080	0.05	0.05	0.09	0.12	0.15	0.20	0.25					
1.08	0.100	0.120	0.130	0.140	0.150	0.160	0.160	0.160	0.170	0.170	0.170	0.160	0.150	0.140	0.130	0.120	0.110	0.100	0.090	0.070	0.05	0.05	0.10	0.12	0.15	0.19	0.24					
1.06	0.090	0.110	0.120	0.140	0.150	0.160	0.160	0.150	0.160	0.170	0.160	0.160	0.150	0.140	0.120	0.110	0.090	0.080	0.070	0.050	0.03	0.07	0.10	0.12	0.15	0.19	0.23					
1.05	0.080	0.100	0.120	0.130	0.140	0.150	0.150	0.150	0.160	0.160	0.160	0.150	0.150	0.130	0.110	0.090	0.060	0.050	0.040	0.02	0.03	0.07	0.10	0.12	0.15	0.19	0.23					
1.04	0.070	0.090	0.120	0.130	0.140	0.150	0.150	0.150	0.160	0.170	0.160	0.150	0.140	0.120	0.090	0.070	0.040	0.040	0.03			0.02	0.05	0.08	0.10	0.12	0.15	0.19	0.24			
1.03	0.060	0.090	0.110	0.130	0.140	0.150	0.160	0.160	0.170	0.170	0.160	0.150	0.130	0.110	0.080	0.060	0.040	0.04				0.03	0.04	0.05	0.08	0.10	0.12	0.15	0.20	0.25		
1.03	0.050	0.080	0.100	0.130	0.140	0.160	0.160	0.160	0.180	0.170	0.160	0.140	0.120	0.090	0.070	0.060	0.05					0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.13	0.17	0.21	0.26	
1.03	0.050	0.070	0.100	0.120	0.140	0.160	0.160	0.160	0.170	0.170	0.160	0.140	0.120	0.090	0.070	0.060	0.05					0.05	0.05	0.07	0.07	0.08	0.10	0.13	0.17	0.22	0.27	
1.03	0.040	0.070	0.100	0.120	0.140	0.150	0.160	0.150	0.170	0.170	0.170	0.150	0.120	0.090	0.070	0.060	0.06					0.05	0.07	0.07	0.07	0.08	0.11	0.13	0.17	0.22	0.28	
1.03	0.040	0.060	0.090	0.120	0.140	0.150	0.160	0.150	0.170	0.180	0.170	0.150	0.120	0.100	0.070	0.060	0.06					0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.10	0.13	0.18	0.23	0.29	
1.03	0.040	0.060	0.090	0.110	0.140	0.150	0.160	0.160	0.170	0.180	0.160	0.130	0.110	0.090	0.070	0.060	0.05					0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.10	0.14	0.18	0.24	0.30	
1.04	0.040	0.060	0.090	0.110	0.130	0.150	0.160	0.150	0.170	0.180	0.150	0.120	0.100	0.070	0.060	0.040	0.05					0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.11	0.14	0.18	0.24	0.30	
1.04	0.040	0.060	0.090	0.110	0.130	0.140	0.150	0.150	0.170	0.180	0.160	0.130	0.100	0.070	0.060	0.040	0.05					0.05	0.07	0.08	0.07	0.08	0.10	0.13	0.18	0.24	0.31	
1.04	0.040	0.060	0.090	0.100	0.120	0.140	0.140	0.150	0.170	0.180	0.170	0.140	0.100	0.060	0.040	0.06						0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.10	0.13	0.18	0.25	0.31	
1.03	0.040	0.060	0.090	0.100	0.130	0.140	0.150	0.160	0.170	0.180	0.170	0.140	0.090	0.060	0.040	0.05						0.06	0.07	0.07	0.06	0.05	0.08	0.13	0.18	0.24	0.31	
1.03	0.040	0.060	0.090	0.110	0.130	0.150	0.160	0.160	0.170	0.180	0.160	0.130	0.090	0.060	0.050	0.06						0.06	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.08	0.12	0.17	0.24	0.31
1.03	0.040	0.060	0.090	0.110	0.140	0.150	0.160	0.160	0.170	0.170	0.160	0.130	0.100	0.080	0.070	0.080	0.06					0.05	0.04	0.03	0.03	0.05	0.07	0.11	0.17	0.24	0.31	
1.02	0.030	0.050	0.080	0.110	0.130	0.150	0.160	0.160	0.170	0.170	0.170	0.140	0.110	0.090	0.080	0.070	0.06					0.04	0.03	0.02	0.03	0.04	0.07	0.11	0.17	0.24	0.31	
1.02	0.030	0.050	0.080	0.110	0.130	0.150	0.160	0.160	0.170	0.180	0.170	0.140	0.120	0.100	0.080	0.070	0.050	0.03					0.02	0.02	0.02	0.04	0.07	0.11	0.16	0.24	0.30	
1.03	0.040	0.060	0.080	0.110	0.130	0.150	0.160	0.160	0.170	0.170	0.160	0.140	0.110	0.090	0.080	0.070	0.060	0.03					0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.09	0.15	0.23	0.30	
1.04	0.040	0.060	0.080	0.100	0.120	0.140	0.150	0.150	0.160	0.150	0.140	0.120	0.100	0.090	0.080	0.060	0.030	0.01					0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.14	0.23	0.31		
1.05	0.050	0.060	0.080	0.100	0.120	0.130	0.140	0.140	0.140	0.150	0.150	0.140	0.120	0.110	0.100	0.090	0.060	0.040	0.01					0.02	0.03	0.03	0.04	0.07	0.13	0.23	0.31	
1.07	0.050	0.070	0.090	0.100	0.110	0.130	0.130	0.130	0.130	0.140	0.140	0.140	0.120	0.110	0.100	0.090	0.070	0.040	0.03					0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.12	0.22	0.30	
1.08	0.080	0.090	0.090	0.100	0.110	0.120	0.120	0.120	0.120	0.130	0.130	0.120	0.120	0.110	0.100	0.090	0.070	0.050	0.04					0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.10	0.21	0.29	
1.09	0.090	0.090	0.090	0.100	0.100	0.100	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.100	0.100	0.090	0.080	0.070	0.070	0.060	0.050	0.040	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.09	0.21	0.29		
1.11	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.090	0.100	0.100	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.080	0.080	0.070	0.070	0.060	0.060	0.050	0.040	0.030	0.020	0.030	0.050	0.090	0.20	0.28		
1.12	0.110	0.110	0.100	0.100	0.100	0.090	0.080	0.080	0.080	0.070	0.070	0.070	0.080	0.100	0.100	0.100	0.100	0.090	0.090	0.080	0.070	0.060	0.050	0.040	0.030	0.020	0.030	0.050	0.090	0.25		
1.13	0.120	0.110	0.100	0.100	0.090	0.080	0.080	0.070	0.060	0.060	0.060	0.070	0.090	0.110	0.110	0.120	0.120	0.120	0.120	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110		
1.74	0.710	0.700	0.680	0.660	0.640	0.630	0.620	0.610	0.600	0.580	0.560	0.550	0.540	0.530	0.520	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510		

Рис. 7. Детализированное распределение скоростей расплава в сечении А через 190 с после начала выпуска (фрагмент А4 рис. 3)

На рис. 8 показано частотное нестационарное распределение углерода по концентрациям в конце выпуска из ковша. Как видно из рисунка, около 45 % объема имеют концентрацию по углероду чуть ниже 0,15 %. Практически весь интервал концентрации составляет 0,143–0,163 мас.%. В остальной части расплава концентрация углерода выходит за эти пределы.

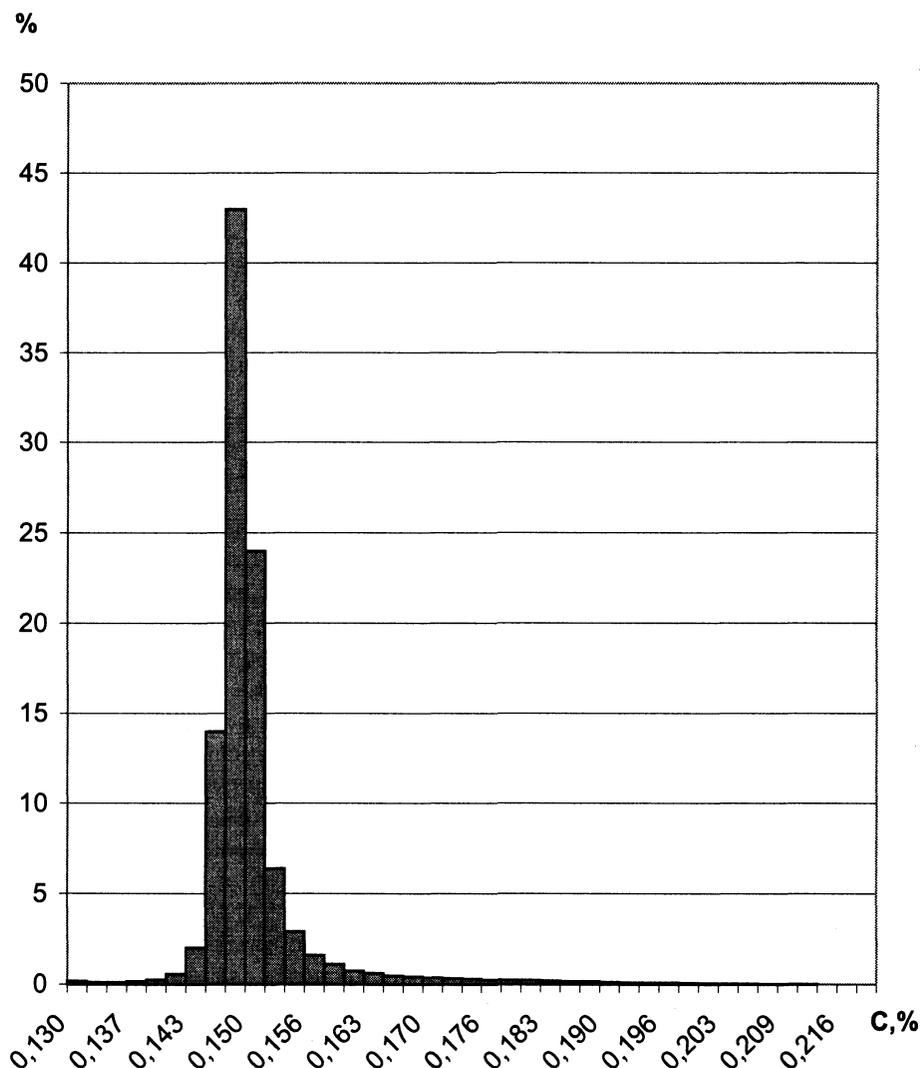


Рис. 8. Диаграмма распределения концентрации углерода по всему объему ковша через 190 с после начала выпуска

Проведенные вычислительные эксперименты по гидродинамическому перемешиванию показывают широчайшие возможности компьютерного моделирования нестационарных процессов, протекающих в системе «расплав – порошок». Это позволяет визуализировать процессы перемешивания расплава и порошка на каждом временном промежутке обработки расплава. В процессе перемешивания возможен как послойный, так и интегральный анализ распределения углерода в ковше любой пространственной конфигурации. Для разработчиков технологического процесса внепечной обработки открываются широкие возможности для проектирования ковшевого оборудования.

Литература

1. Григорян В.А., Бемянчиков Л.И., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. М.: Metallurgy, 1987.
2. Инжекционная металлургия '80 / Пер. с англ. Лулеа, Швеция, 1980. М.: Metallurgy, 1982.
3. Инжекционная металлургия / Пер. с англ. Лулеа, Швеция, 1977. М.: Metallurgy, 1981.
4. Чичко А.Н. Компьютерные системы моделирования физических процессов // Вест. БНТУ. 2003. № 2. С. 42–48.
5. Чичко А.Н., Лихоузов С.Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т.45. №4. 2001. С. 110–114.
6. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. Комплекс программных средств «ПРОЛИТ» для моделирования процессов течения и охлаждения сплавов // Программные продукты и системы. 2002. №4. С.47–48.