



The computer calculations of the dissolving process of coaly powder in melt, contained in industrial bowl, are carried out. The dependencies of changing of mass of the powder material, consisted of particles with different diameter, on time of stirring process are presented.

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, Н. В. АНДРИАНОВ, С. В. ТЕРЛЕЦКИЙ, РУП «БМЗ»

УДК 519:669.27

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОГО ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА В РАСПЛАВЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ АРГОНА

Математическое моделирование растворения порошкообразных материалов в расплавах является одной из сложнейших задач теории металлургических процессов. Сложность этой задачи связана с тем, что растворение зависит от процесса перемешивания, который изменяет границу раздела фаз (порошок–расплав) в пространстве и времени. В основе физики перемешивания расплава и порошка лежат нестационарные процессы, которые протекают в трехмерном пространстве. С математической точки зрения описание этих процессов представляет серьезную теоретическую задачу. Анализируя литературные данные по расчетам процессов растворения в системе «расплав–порошок», можно сделать вывод о том, что практически отсутствуют конкретные расчетные данные по растворению порошковых материалов с расплавом в условиях промышленного ковша [1–3]. В то же время получение таких данных представляет научный и практический интерес для специалистов металлургического профиля. Для решения задач растворения могут быть использованы клеточно-автоматные методы моделирования, развитые в работах [4–6] и позволяющие в динамике визуализировать трехмерные динамические процессы. Развивая идеи математического моделирования процесса перемешивания, основанные на законе сохранения импульса и энергии расплава [7], можно проводить компьютерное моделирование и расчет процесса растворения.

Цель настоящей работы – компьютерное моделирование и расчет процесса растворения углеродсодержащих материалов различного фракционного состава в железоуглеродистых расплавах в процессе подачи материала посредством бункерной системы в промышленный разливочный ковш, в нижнюю часть которого подается аргон.

В основе математической модели растворения углеродсодержащих материалов и расплавов под действием струи аргона лежит математический

формализм, изложенный в работе [7], который позволяет рассчитывать поля скоростей, концентраций углерода, плотностей расплава и порошковых материалов в трехмерном пространстве изменяющейся во времени системы «расплав–порошок». В качестве пространственного объекта моделирования (клеточный автомат) использован промышленный ковш с реальными размерами.

Объемная схема моделируемого процесса представлена на рис. 1. Как видно из рисунка, в центр ковша направляются струя расплава и порошкообразная смесь (бункерная засыпка). Струя расплава начинает свое движение при наличии в ковше так называемого «болота», занимающего  $\frac{1}{4}$  ковша по высоте. До момента начала выпуска металла из отверстия в нижней части ковша через пористый материал подается аргон в виде пу-

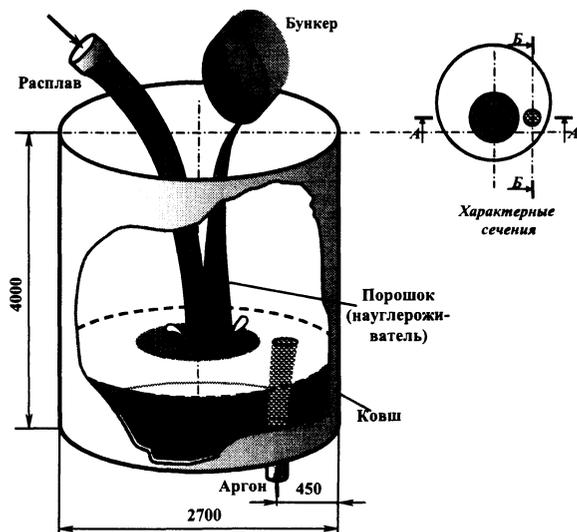


Рис. 1. Объемная схема процесса в ковше (РУП «БМЗ») для моделирования гидродинамического перемешивания

зырьков газа со средним диаметром около 2 мм. Диаметр отверстия, через которое подается газ, составляет 130 мм, при этом расход газа – 100–300 л/мин. До начала моделирования выпуска расплава из печи проводили моделирование газового перемешивания «болота» с целью получения стационарного или близстационарного распре-

ления скоростей в объеме «болота» к моменту выпуска расплава из печи.

На рис. 2 приведены входные данные, использованные при моделировании перемешивания трех порошков с диаметрами гранул 1, 3 и 5 мм. Для всех рассматриваемых порошков был принят одинаковый коэффициент растворения – 0,001 кг/м<sup>3</sup>.

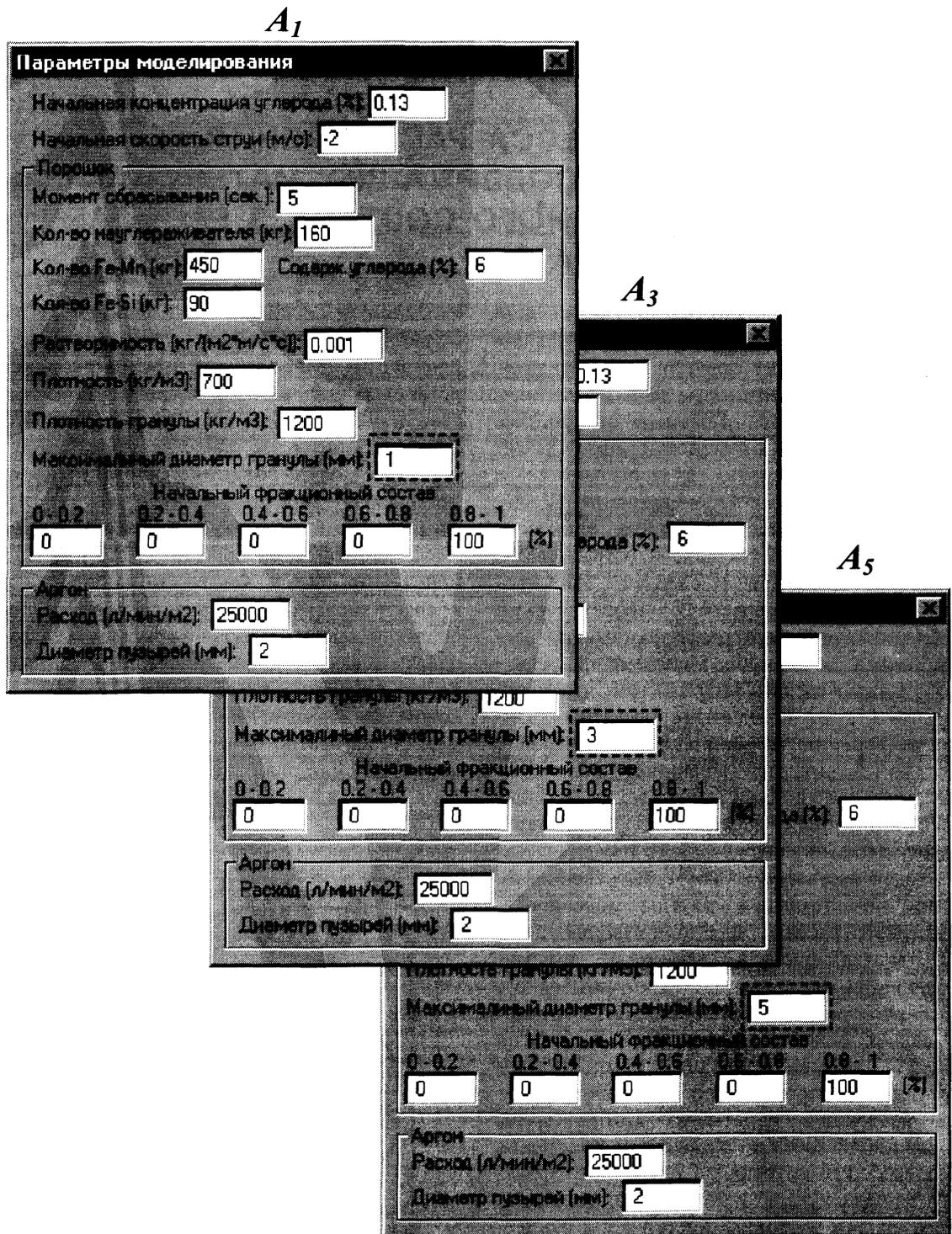


Рис. 2. Исходные данные для моделирования растворения науглероживателей с тремя различными диаметрами гранул: А<sub>1</sub> – 1 мм; А<sub>3</sub> – 3; А<sub>5</sub> – 5 мм

Количество вводимого порошка состоит из следующих компонентов: 160 кг науглероживателя, 450 кг лигатуры Fe–Mn, 90 кг лигатуры Fe–Si. Расход аргона принимался с учетом данных сталеплавильного цеха РУП «БМЗ» и составлял 250 л/мин, или 25000 л/мин/м<sup>2</sup> с учетом площади впускного устройства 0,01 м<sup>2</sup>. В расчетах принята средняя плотность порошка 700 кг/м<sup>3</sup> при плотности гранул 1200 кг/м<sup>3</sup>. В данных расчетах предполагалось, что порошок имеет приблизительно одинаковый размер гранул.

На рис. 3 представлена частотная гистограмма распределения концентрации углерода в промышленном ковше на момент времени 30 с для трех различных порошков. По оси ординат отложен процент объема расплава, имеющего данную концентрацию углерода. Из рисунка видно, что порошок из 5-миллиметровых гранул растворяется медленнее, чем порошки из 1- и 3-миллиметровых гранул. При этом наиболее равномерное распределение углерода наблюдается для 3-миллиметрового порошка, для которого более 40% объема имеет концентрацию 0,19–0,22%. С увеличением времени перемешивания частотная гистограмма несколько изменяется, смещаясь в сторону больших концентраций по углероду (рис. 4, 5).

Например, на момент времени 90 с для 1-миллиметрового порошка концентрация углерода

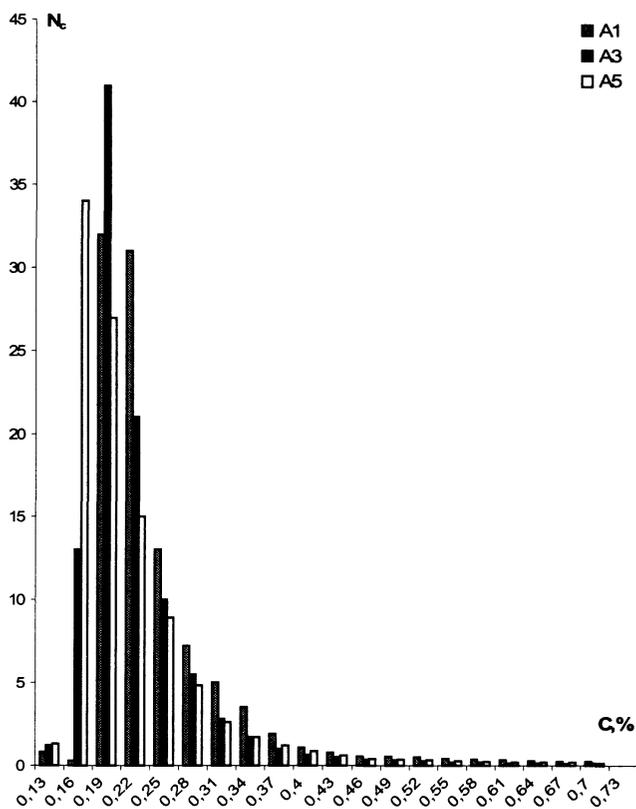


Рис. 3. Частотная гистограмма распределения концентрации углерода на момент времени 30 с для науглероживателей с фракционным составом  $A_1$ ,  $A_3$  и  $A_5$

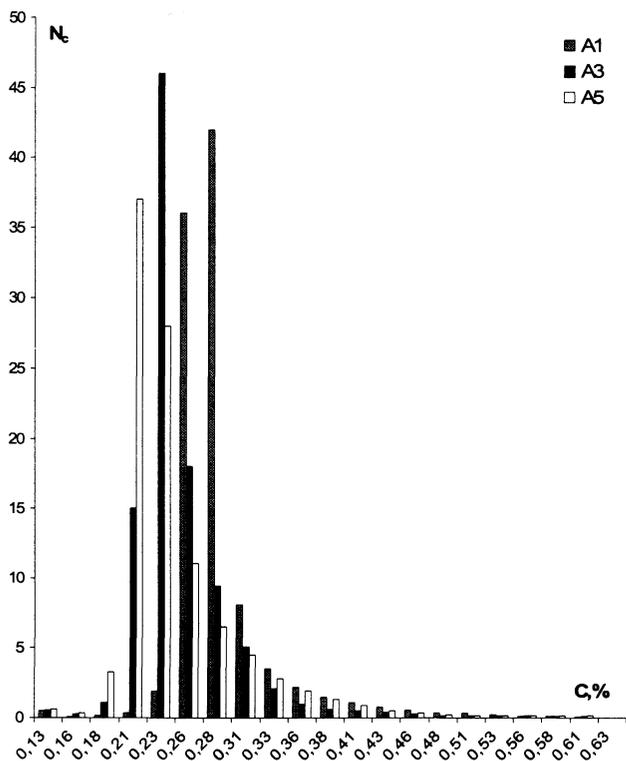


Рис. 4. Частотная гистограмма распределения концентрации углерода на момент времени 60 с для науглероживателей с фракционным составом  $A_1$ ,  $A_3$  и  $A_5$

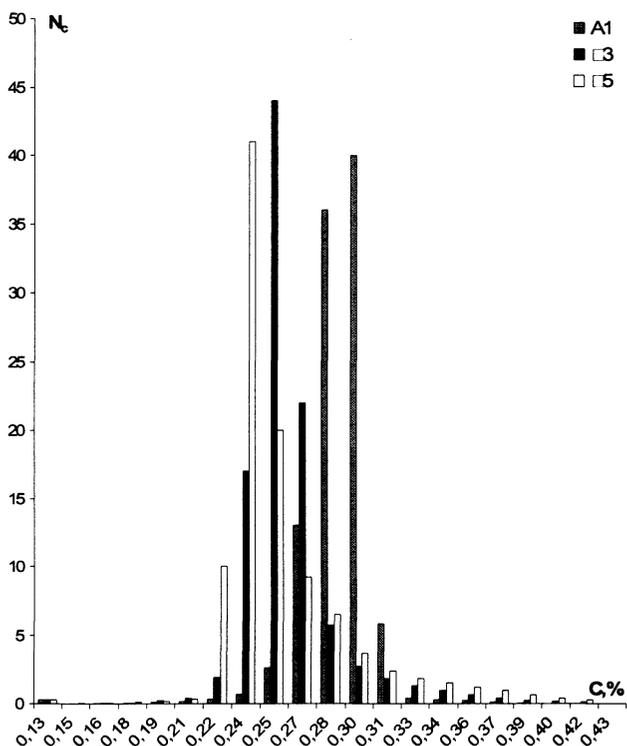


Рис. 5. Частотная гистограмма распределения концентрации углерода на момент времени 90 с для науглероживателей с фракционным составом  $A_1$ ,  $A_3$  и  $A_5$

быстрее уходит в сторону больших значений, локализуясь в интервале 0,27–0,31%. Следовательно, 1-миллиметровая фракция в расплаве растворяется лучше, чем более крупные фракции. Подобная тенденция сохраняется и на моменты времени 60 и 120 с (рис. 5, 6).

Следует отметить, что мелкодисперсные частицы в условиях реального оборудования не всегда «долетают» до поверхности расплава, образуя при этом пылеобразную массу, что не позволяет принимать самую мелкозернистую фракцию за оптимальный гранулометрический состав. Поэтому порошок самой мелкой фракции не является оптимальным при использовании его в процессе плавки и соответственно науглероживания.

На рис. 7 показано изменение усредненной концентрации углерода от времени перемешивания. Из рисунка видно, что порошок с гранулами 1 мм на момент времени 70 с приводит к максимальной усредненной концентрации углерода в расплаве, которая в дальнейшем в интервале 70–110 с уменьшается. Это связано с тем, что обедненная углеродом струя, имеющая 0,13% углерода, продолжает заполнять ковш, в то время как значительная часть высыпаемого порошка уже растворилась в расплаве. Для порошка с размером гранул 2 мм этот эффект менее ярко выражен. Причем максимальная усредненная концентрация по углероду достигается на момент времени 90 с. Дальнейшее увеличение времени перемешивания незначительно снижает усредненную концентрацию. Для порошков с размерами гранул 4 и 5 мм изменение усредненной концентрации углерода в расплаве проходит несколько иначе. Так, зависимости, соответствующие порошкам 4 и 5 мм, напоминают кривые насыщения расплавом углерода. По-видимому, механизм растворения этих порошков из-за геометрических размеров гранул отличается от механизма растворения 1-миллиметрового порошка.

Из этого можно сделать вывод, что при данной технологии растворения преимущество мелкодисперсных фракций (1 мм и менее) нивелируется, так как время перемешивания в ковше достаточно для растворения крупных фракций. Однако преимущество крупных фракций состоит в том, что они полностью попадают в расплав, не превращаясь в пылеобразную массу, что характерно для мелких фракций. В то же время доведение порошка до мелкодисперсных фракционных состояний приводит к увеличению их стоимости, так как это связано с дополнительными энергозатратами на процесс измельчения. В данном случае определение оптимальных размеров гранул представляет практическую задачу сталеплавильного производства.

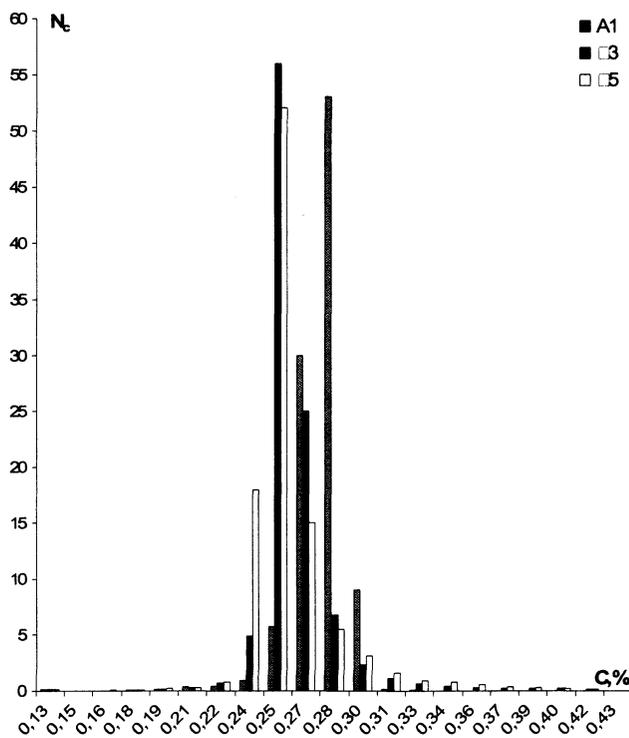


Рис. 6. Частотная гистограмма распределения концентрации углерода на момент времени 120 с для науглероживателей с начальным фракционным составом  $A_1$ ,  $A_3$  и  $A_5$

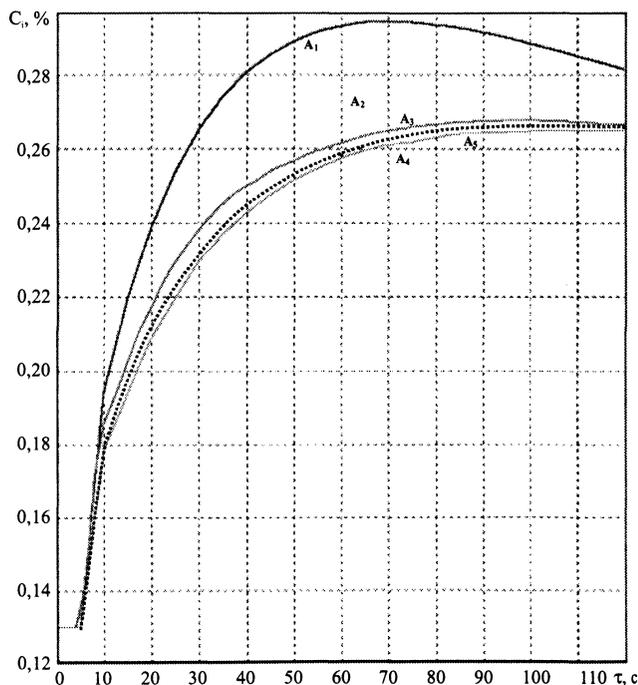


Рис. 7. Изменение усредненной концентрации углерода в расплаве в процессе перемешивания для порошков  $A_1$  (1 мм),  $A_2$  (2 мм),  $A_3$  (3 мм),  $A_4$  (4 мм) и  $A_5$  (5 мм)

На рис. 8 показано изменение массы углерододержащего порошка различного гранулометрического состава. Как видно из рисунка, фракция размером 1 мм растворяется быстрее, чем фрак-

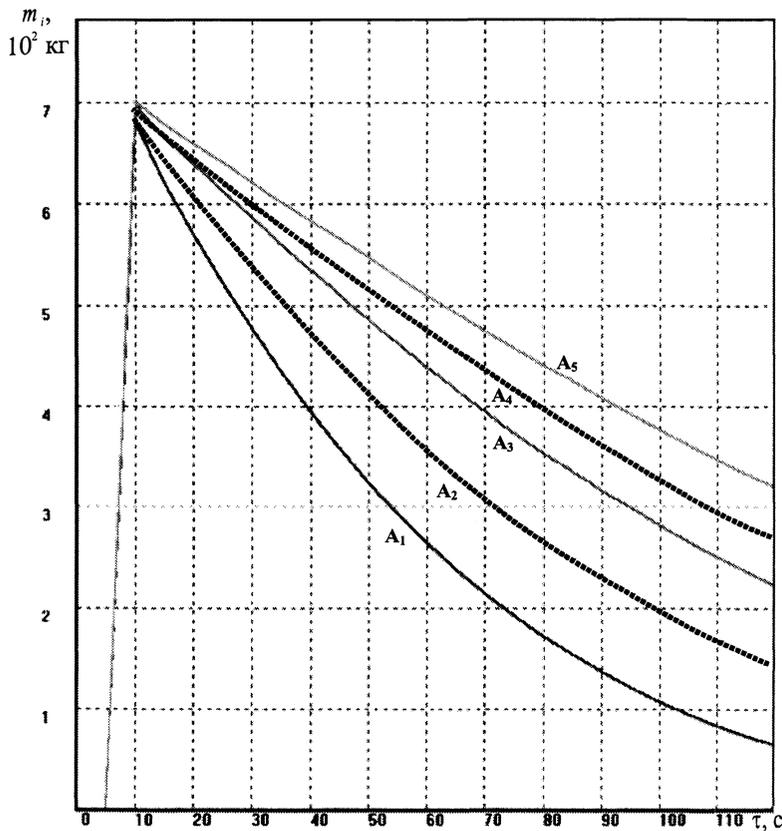


Рис. 8. Изменение массы (растворение) введенного порошка в процессе перемешивания для порошков  $A_1$  (1 мм),  $A_2$  (2 мм),  $A_3$  (3 мм),  $A_4$  (4 мм) и  $A_5$  (5 мм)

ция размером 5 мм. Все остальные порошки промежуточного диаметра изменяются в интервале этих крайних случаев.

### Выводы

На основе компьютерных расчетов методом клеточно-автоматного моделирования определена

динамика растворения углеродсодержащих порошков различного фракционного состава 1, 2, 3, 4, 5 мм в расплаве от времени перемешивания. Рассчитаны интегральные зависимости изменения углерода в расплаве, находящемся в промышленном ковше, от времени перемешивания. Проведена оценка процессов растворения углеродсодержащего порошка различного фракционного состава по изменению рассчитанной массы в реальных условиях заполнения расплавленной струей промышленного ковша.

### Литература

1. Григорян В.А., Белянчиков Л.И., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. М.: Металлургия, 1987.
2. Инжекционная металлургия '80. Лулеа, Швеция, 1980 / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982.
3. Инжекционная металлургия. Лулеа, Швеция, 1977 / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1981.
4. Чичко А.Н. Компьютерные системы моделирования физических процессов // Вестн. 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.
7. 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.