

# Моделирование процесса растворения углеродсодержащих порошков при обработке стали в ковше<sup>1</sup>

А. Н. Чичко, Н. В. Андрианов,  
С. В. Терлецкий

Белорусский национальный  
технический университет,  
РУП "Белорусский металлургический завод"

Анализ многочисленных исследований [1, 2] процессов перемешивания в системе сталь – науглероживатель показывает, что экспериментально получить конкретные данные о пространственном распределении скорости, давления и углерода в промышленных ковшах как в стационарном, так и нестационарном режимах очень сложно. Одним из эффективных инструментов количественного анализа процессов перемешивания порошковых материалов могут стать клеточно-автоматные методы моделирования, развиваемые в Белорусском национальном техническом университете [3 – 5]. Основу таких методов должны составить математические модели процесса, основанные на законах сохранения импульса и энергии перемешиваемого расплава.

В настоящей статье приводятся результаты разработки математической модели процессов перемешивания углеродсодержащих порошков в расплаве и использования ее для оценки растворимости углерода в промышленном ковше сталеплавильного производства Белорусского металлургического завода.

Для описания гидродинамики скоростных потоков системы расплав – порошок (плотность системы определяется суммарной плотностью жидкости и порошка) предлагается использовать закон сохранения импульса в виде системы уравнений Навье – Стокса с начальными и граничными условиями:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_x}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho_l + \rho_s + \rho_{ar}} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho_l + \rho_s + \rho_{ar}} \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_y}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho_l + \rho_s + \rho_{ar}} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho_l + \rho_s + \rho_{ar}} \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) - g, \\ \frac{\partial v_z}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho_l + \rho_s + \rho_{ar}} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho_l + \rho_s + \rho_{ar}} \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

и уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial(\rho_l v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_l v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_l v_z)}{\partial z} \right) = 0, \quad (2)$$

где  $\tau$  — время;  $x, y, z$  — декартовы координаты (ось  $Y$  направлена вертикально);  $v_x, v_y, v_z$  — проекции скорости расплава на координатные оси;  $P$  — давление в данной точке моделируемого пространства;  $\rho_l$  — плотность расплава (отношение массы расплава в элементарном объеме, в котором кроме расплава могут быть пузыри аргона и частицы порошка, к этому объему);  $\rho_s$  — плотность порошка (отношение суммы масс частиц порошка, плавающих в элементарном объеме расплава, к этому объему);  $\rho_{ar}$  — плотность аргона (отношение суммы масс пузырьков газа, плавающих в некотором элементарном объеме расплава, к этому объему);  $\eta$  — динамическая вязкость расплава.

Для описания связи между плотностью и давлением использовали полуэмпирическую зависимость:

$$P = \begin{cases} k_1 \left( \frac{\rho_l}{\rho_{l0}} + \frac{\rho_s}{\rho_{s0}} + \frac{\rho_{ar}}{\rho_{ar0}} - 1 \right) \text{ при } \frac{\rho_l}{\rho_{l0}} + \frac{\rho_s}{\rho_{s0}} + \frac{\rho_{ar}}{\rho_{ar0}} > 1, \\ 0 \text{ при } \frac{\rho_l}{\rho_{l0}} + \frac{\rho_s}{\rho_{s0}} + \frac{\rho_{ar}}{\rho_{ar0}} \leq 1, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\rho_l$  — количество металла в единице объема;  $\rho_{l0}$  — нормальная плотность расплавленного металла;  $\rho_s$  — количество порошка в единице объема;  $\rho_{s0}$  — нормальная плотность порошка;  $\rho_{ar0}$  — плотность, которую имеет аргон при данных температуре (1500 – 1560 °С) и давлении (сумме атмосферного давления и давления столба расплава ~240 кПа);  $k_1 = 10000$  Па — модуль объемного сжатия.

Процесс всплывания пузырей аргона и их переноса течением расплава был описан уравнением:

$$\frac{\partial \rho_{ar}}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial \rho_{ar}}{\partial x} + (v_y + v_{ar}) \frac{\partial \rho_{ar}}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho_{ar}}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где  $v_{ar}$  — средняя скорость всплывания пузырей. В данной модели делается допущение, что значения диаметра всех пузырей одинаковы. Они всплывают под действием архимедовой силы, которая уравновешивается силами сопротивления движению в жидкости, т.е. пузыри разгоняются до скорости  $v_{ar}$  относительно вертикального потока жидкости и далее движутся с этой скоростью. В рассматриваемой модели скорость движения пузырей определяется как [2]:

$$v_{ar} = \sqrt{\frac{8 g d_{ar} (\rho_l - \rho_{ar0})}{3 \xi \rho_l}}, \quad (5)$$

где  $d_{ar}$  — средний размер пузыря;  $\xi$  — эмпирический коэффициент.

В модели порошок науглероживателя разделен по размерам частиц (гранул) на  $K$  фракций со средними

<sup>1</sup> В работе принимали участие Д. М. Кукуй, В. Ф. Соболев, Ю. В. Яцкевич, О. И. Чичко.

размерами  $d_1, d_2, \dots, d_n, \dots, d_k$ . Плотность порошка в данной точке пространства является суммой плотностей всех фракций:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i. \quad (6)$$

Процесс переноса каждой фракции порошка течением расплава и всплывания гранул определялся на основе уравнения:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial \rho_i}{\partial x} + (v_y + v_z) \frac{\partial \rho_i}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho_i}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

где  $\rho_i$  — плотность фракции  $i$  порошка;  $v_i$  — средняя скорость всплывания частиц науглероживателя фракции  $i$ . В данной модели делается допущение, что значения диаметров частиц во фракции распределены равномерно, а скорость всплывания всех частиц равна скорости всплывания средних по диаметру частиц во фракции. Они всплывают под действием архимедовой силы, которая уравновешивается силами сопротивления движению в жидкости, т.е. частицы разгоняются до скорости  $v_i$  относительно вертикального потока жидкости и далее движутся с этой скоростью, которая определяется как

$$v_i = \sqrt{\frac{8}{3} \frac{g d_i (\rho_i - \rho_c)}{\xi \rho_i}}, \quad (8)$$

где  $d_i$  — средний размер частицы во фракции  $i$ ;  $\rho_c$  — плотность частицы (плотность углерода);  $\xi$  — эмпирический коэффициент.

Процесс перераспределения концентрации (перемешивания) растворенного в расплаве углерода с течением времени был описан уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

где  $C$  — концентрация углерода в расплаве.

Для описания процесса перехода углерода в расплав были построены конечно-разностные уравнения (10) и (11), описывающие изменение концентрации углерода в расплаве от концентрации порошка, который плавает на поверхности:

$$\frac{\Delta C}{\Delta \tau} = \begin{cases} k_2 \frac{\rho \Delta x \Delta y \Delta z}{\rho_{s0} d} (C_r - C) & \text{при } 0 \leq \rho < \rho_{s0} \frac{d}{\Delta y} \text{ и } C < C_r, \\ k_2 \Delta x \Delta z (C_r - C) & \text{при } \rho_s \geq \rho_{s0} \frac{d}{\Delta y} \text{ и } C < C_r, \\ 0 & \text{при } C = C_r, \end{cases} \quad (10)$$

где  $C_r$  — равновесная концентрация углерода в расплаве;  $d$  — средний диаметр частиц порошка;  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  — шаг дискретизации пространства расплава;  $k_2$  — коэффициент массопереноса.

В формуле (10) учитывались три варианта перемешивания. Первый соответствует случаю, когда в рассматриваемом элементарном объеме масса порошка меньше, чем необходимо для обеспечения самого тонкого плотного слоя на поверхности жидкости. Второй

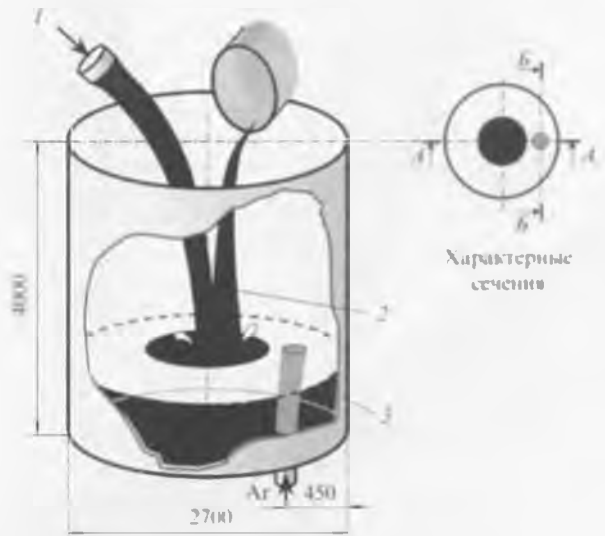


Рис. 1. Трехмерная геометрическая схема процесса перемешивания с выделенным сечением: 1 — расплав; 2 — порошок (науглероживатель); 3 — ковш

вариант соответствует случаю, когда только часть вводимого в расплав порошка контактирует с жидкостью. Третий вариант соответствует случаю насыщения расплава углеродом, после чего порошок больше не может раствориться.

Для случая перехода порошка внутрь расплава (порошок плавает внутри жидкости) изменение концентрации порошка во времени задавалось конечно-разностным соотношением:

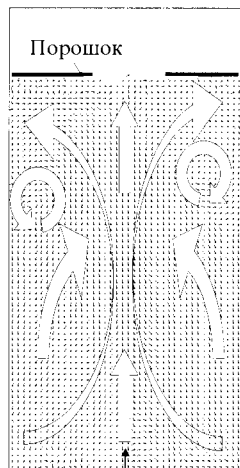
$$\frac{\Delta C}{\Delta \tau} = \begin{cases} k_3 \frac{6 \rho_s \Delta x \Delta y \Delta z}{\rho_{s0} d} (C_r - C) & \text{при } C < C_r, \\ 0 & \text{при } C = C_r, \end{cases} \quad (11)$$

где  $k_3$  — коэффициент массопереноса при нахождении порошка внутри расплава. Были приняты начальные условия:  $v_x(x, y, z) = v_y(x, y, z) = v_z(x, y, z) = 0$ ;  $\rho_s(x, y, z) = 0$ ;  $\rho_{ar}(x, y, z) = 0$ ;  $\rho_l(x, y_0, z) = \rho_{l0}$ , где  $y_0$  — координата поверхности расплава;

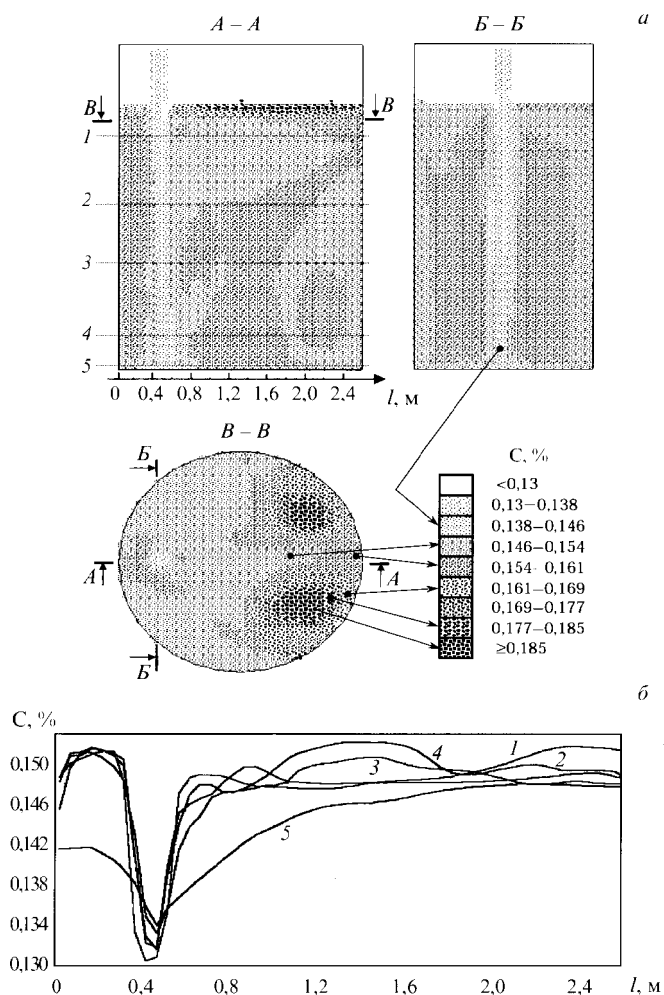
$$\rho_l(x, y - \Delta y, z) = \frac{\rho_l(x, y, z) (\rho_{l0} g \Delta y + 2k_1)}{2k_1 - \rho_{l0} g \Delta y}$$

граничные условия для границы расплав — стенка (дно) ковша:  $v_x = 0$ , если стенка слева или справа;  $v_y = 0$  на дне;  $v_z = 0$ , если стенка спереди или сзади;  $P_k = P_r$ , где  $P_k$  — давление в стенках ковша,  $P_r$  — давление в расплаве; условия для границы расплав — воздух:  $v_{xy} = v_{xz}$ ,  $v_{yz} = v_{zx}$ , где  $v_{xy}, v_{xz}, v_{yz}$  — компоненты скорости воздуха;  $v_{x/r}, v_{y/r}, v_{z/r}$  — компоненты скорости расплава;  $P_v = 0$ , где  $P_v$  — давление воздуха. Здесь “воздух” — это пространство над поверхностью расплава.

Для моделирования процесса перемешивания разработали программу “ПроНПС-2П”, с помощью которой рассчитывали нестационарные поля скоростей и углерода в ковше. Эта программа разрабатывается для моделирования процессов перемешивания порошкооб-



**Рис. 2.** Распределение скоростных потоков при перемешивании струи стали и углеродсодержащего материала (порошок) в сечении  $B-B$  (см. рис. 1) ковша через 120 с после начала выпуска металла в ковш



**Рис. 3.** Распределение концентрации углерода в различных сечениях (а) и графики изменения концентрации вдоль выделенных направлений (б) через 190 с после начала выпуска

разных материалов в расплавах в условиях промышленного оборудования. На рис. 1 представлена геометрическая схема процесса, используемая на Белорусском металлургическом заводе при выпечной обработке. Схема была построена как сеточный 3d-объект в соответствии с размерами ковшевого оборудования.

В основу промышленной схемы перемешивания расплава и порошка в ковше были положены следующие

данные. Размеры ковша соответствуют размерам, принятым в цехе. Температура металла принималась равной  $1550^{\circ}\text{C}$ ; химический состав соответствовал сплаву с массовыми долями:  $\text{Fe} + 0,13\% \text{C} + 0,10\% \text{Mn} + 0,1\% \text{Si}$ . Масса вводимого порошка составляла 130 кг; начальная скорость струи —  $2,5 \text{ м/с}$ ; плотность порошка —  $700 \text{ кг/м}^3$  при плотности гранул  $1200 \text{ кг/м}^3$ .

Как видно из рис. 2, на стыке струи и уровня расплава образуются два вихреобразных потока, обеспечивающие круговую циркуляцию сверху вниз в плоскости  $A-A$ . Подобные движения образуются и в сечении  $B-B$ . Суперпозиция вихревых потоков в этих сечениях в объеме дает сложную картину группы циркуляционных потоков, распределенных неоднородно в пространстве ковша. Они обеспечивают хорошие условия для быстрого перемешивания порошка за счет его увлечения в нижние слои расплава. С увеличением длительности операции подачи расплава картина потоков меняется. Доступ циркулирующих слоев расплава к порошку сокращается. По-видимому, на этом этапе уменьшается эффективность растворения, так как площадь поверхности порошок — расплав сужается.

Из рис. 3 видно, что в конце выпуска металла в ковше углерод распределен неоднородно. Светлые области, соответствующие в основном струе расплава, имеют концентрацию углерода  $0,130 - 0,138\%$ , а вытянутые вдоль струи в сечении  $B-B$  темные участки —  $0,154 - 0,161\%$ . Для сечения  $A-A$  характерно сложное распределение углерода. Чередование светлых и темных областей свидетельствует о неоднородности распределения углерода в момент времени перемешивания стали в ковше, равный 190 с. В выделенных сечениях 1–5 экстремальное уменьшение концентрации углерода на расстоянии  $0,4 \text{ м}$  от стенки ковша соответствует области падения струи. По высоте ковша концентрация изменяется нелинейно. Например, для уровня 4 по длине ковша она увеличивается на участке  $1,0 - 1,6 \text{ м}$ , а на участке  $1,8 - 2,4 \text{ м}$  уменьшается. На верхнем уровне концентрация углерода увеличивается, особенно в пристеночной области ковша, что свидетельствует о коагуляции здесь порошка. Слева от струи ( $0 - 0,4 \text{ м}$ ) концентрация углерода первоначально возрастает, а затем уменьшается в пристеночной области, т.е. порошок переходит из верхнего уровня в нижний, не локализуясь на поверхности, как в правой части ковша. Как видно из рис. 4, через 60 с усредненная концентрация углерода существенно смещается в сторону увеличения.

Представленные результаты моделирования — это фрагмент проводимых на БМЗ хозяйственных исследований по процессам перемешивания порошков и расплавов в условиях промышленного оборудования. Важно было оценить эффективность растворения углеродсодержащих порошков, получаемых от разных поставщиков. Следует отметить, что возможности проведения эксперимента в условиях ковшевой обработки ограничены, хотя бы из-за отсутствия соответствующих приборов. Даже взятие проб расплава из внутренних частей ковша (а это помогло бы сопоставить теоретическую и экспериментальную концентрации углерода)

— довольно сложный в техническом плане эксперимент, так как процесс перемешивания и растворения находится в динамическом состоянии. Поэтому наиболее целесообразным представляется проведение интегральной оценки растворения порошков по результатам ковшевой обработки расплава. Выбранные четыре порошка от разных поставщиков имели следующий фракционный состав  $P_i$ , %:

Порошок	Доля фракций, % ( $P_i$ )				
	0–1,2 мм	1,2–2,4 мм	2,4–3,6 мм	3,6–4,8 мм	4,8–6 мм
A1	1	32	34,6	32	0,4
A2	7	27	27	27	12
A3	7	30	30	30	3
A4	2	28	30	28	12

Был предложен интегральный критерий растворимости в условиях гидродинамического перемешивания аргоном:

$K = \sum_{i=1}^5 W_i P_i$ . Каждой фракции ставился в соответствие параметр  $W_i$ , характеризующий ее вклад в скорость растворения, которую определяли по результатам моделирования. Следует отметить, что величина  $W_i$  определялась как скорость растворения фракции  $i$  порошка за выделенный промежуток времени перемешивания. Для примера на рис. 5 представлена динамика растворения фракций порошка, которая закладывалась в критерий растворимости с учетом концентрации фракций.

Критерий растворимости  $K$  учитывает долю каждой фракции порошка и ее растворимость в стали. Чем больше величина  $K$ , тем больше скорость растворения порошка в расплаве. Критерий растворимости порошков равнялся 437,8 (A1); 440 (A2); 470 (A3) и 406 (A4). Как показали расчеты, изменение массы всех четырех порошков во времени характеризуется линейным законом, причем наиболее интенсивно растворяется порошок A3, затем A2, A1 и A4. Представленные результаты хорошо согласуются с данными, накапливаемыми в практике использования промышленных порошков на БМЗ. Были определены оптимальные фракционные составы углеродсодержащих порошков, которые обеспечивают наилучшую скорость растворения углерода в ковше. На основе этих данных в настоящее время на БМЗ разрабатываются технические условия на углеродсодержащие материалы.

Проведенные вычислительные эксперименты по моделированию растворения порошка в условиях гидродинамического перемешивания расплавов показывают широкие возможности компьютерного моделирования протекающих в системе расплав – порошок нестационарных процессов. Это позволяет визуализировать процессы растворения углерода на каждом временном промежутке обработки. В процессе перемешивания возможен как послойный, так и интегральный анализ распределения углерода в ковше любой пространственной конфигурации, что может быть использовано для проектирования ковшевого оборудования.

### Заключение

Рассмотрена математическая модель гидродинамического процесса перемешивания расплава и углеродсодер-

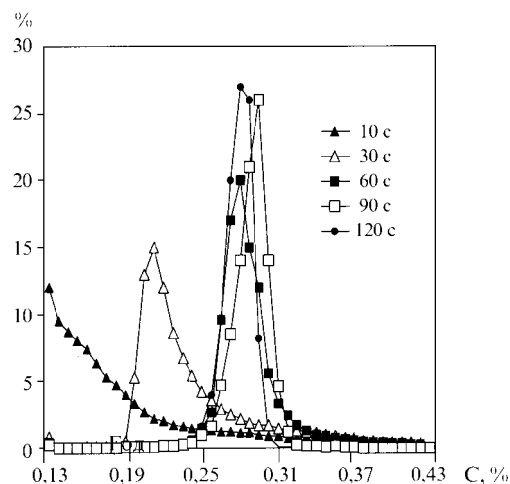


Рис. 4. Диаграмма частотного распределения концентрации углерода в объеме ковша в различные моменты после начала выпуска

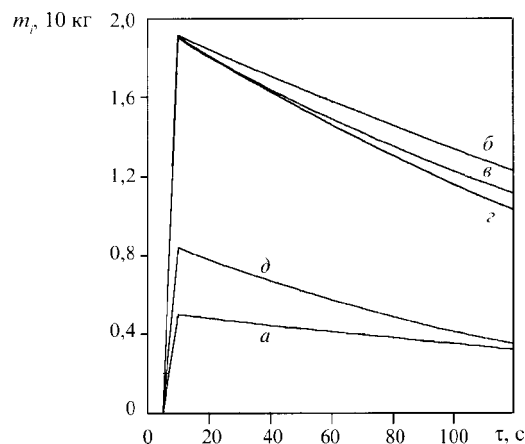


Рис. 5. Изменение массы отдельных фракций (а — 0–1,2 мм, б — 1,2–2,4 мм, в — 2,4–3,6 мм, г — 3,6–4,8 мм, д — 4,8–6 мм) в процессе растворения порошка

жащих порошков, позволяющая оценить в пространстве и во времени динамику насыщения расплава углеродом. Проведены расчеты процесса перемешивания и растворения нескольких видов углеродсодержащих порошков в промышленном ковше, используемом на Белорусском металлургическом заводе. По полученным результатам разрабатываются технические условия на порошки, в которых будут определены оптимальные концентрационные границы фракционного состава.

### Библиографический список

1. Григорян В. А., Беляничков Л. И., Стомахин А. Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. — М.: Металлургия, 1987. — 272 с.
2. Инжекционная металлургия '80. Лунд, Швеция, 1980. Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1982. — 352 с.
3. Чичко А. Н. Компьютерные системы моделирования физических процессов // Вестник БНТУ. 2003. № 2. С. 42–48.
4. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // Доклады НАН Беларуси. 2001. Т. 45. № 4. С. 110–114.
5. 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.