

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ КИСЛОРОДА С ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ КОНВЕРТЕРЕ

Х. Милошевич, А. Д. Рычков

Институт вычислительных технологий СО РАН

Новосибирск, Россия

e-mail: rych@net.ict.nsc.ru

The mathematical modeling of the process of a supersonic oxygen jet interaction with the surface of a liquid metal in a steel-making converter was carried out. A simplified scheme of chemical reactions and the gear of the metal drops dispersion from the phase interface is suggested. Practical recommendations for increasing the process efficiency of the reburning the generated carbon monoxide are given on the basis of the obtained flow structure.

Верхняя продувка ванны жидкого чугуна в кислородном сталеплавильном конвертере организуется с целью "выжигания" растворенного в нем углерода, что является основой процесса превращения чугуна в сталь [?]. Продувка осуществляется с помощью системы высоконапорных сверхзвуковых и дозвуковых струй кислорода, натекающих на поверхность ванны металла, под силовым воздействием которых в толще металла образуется газовая полость (каверна) с гидродинамически неустойчивой поверхностью раздела фаз. С этой поверхности происходит интенсивное диспергирование мелкодисперсных капель металла в объем каверны, за счет чего многократно увеличивается поверхность взаимодействия кислорода с металлом. Основными газообразными продуктами такого взаимодействия являются СО и СО₂, причем для повышения эффективности конвертерного процесса и уменьшения вредных выбросов необходимо повысить степень дожигания СО до СО₂ в рабочем пространстве конвертера за счет улучшения технологической схемы верхней продувки.

В данной работе предпринята попытка рассмотреть газодинамический аспект этой проблемы, включая процесс формирования каверны и исследование структуры двухфазного течения в ней с учетом протекания здесь неравновесных химических реакций.

1. Физическая модель процесса

Типичная технологическая схема процесса верхней продувки приведена на рис. 1 (1 — верхняя фурма, 2 — конвертер, 3 — металл, 4 — сверхзвуковая струя кислорода, 5 — боковые дозвуковые струи). Через специальную вертикальную трубу (фурму) подается

технически чистый кислород, истекающий через многосопловой наконечник этой фурмы в виде системы дозвуковых и сверхзвуковых струй, интенсивность воздействия которых на поверхность металла в ванне может регулироваться [?].

Согласно данным работы [?], можно считать, что рафинировка металла кислородом происходит в два этапа: окисление металла с образованием преимущественно оксидов железа (первичная зона реакций) и взаимодействие последних с химическими элементами, растворенными в ванне металла (вторичная зона). При этом основным газообразным продуктом реакций во вторичной зоне является моноокись углерода, который выделяется из реакционного слоя и поступает в газовую полость, частично догорая при взаимодействии здесь со струями кислорода. В целом процесс превращения чугуна в сталь описывается системой из нескольких десятков химических реакций [?], однако для целей исследования газодинамической картины течения в каверне, как показали исследования, вполне достаточной является следующая упрощенная схема процесса:

— жидкая фаза представляет собой расплав, содержащий 4% углерода С и 96% металла (Fe);

— на поверхности раздела фаз протекает одна обобщенная реакция горения углерода



— догорание монооксида углерода происходит в полости каверны в газофазной реакции



— на гидродинамической неустойчивости поверхности раздела фаз газ — металл происходит образование капель жидкого металла (корольков), которые поступают в полость каверны. На их поверхности также предполагается протекание реакции (1);

— процесс образования шлакометаллической эмульсии над поверхностью ванны металла не рассматривается.

2. Математическая модель

Поскольку, как уже отмечалось, основной целью исследования является газодинамический аспект рассматриваемого процесса, реальную схему верхней продувки (см. рис. 1) несколько упростим (рис. 2).

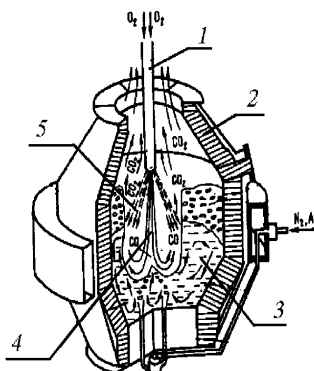


Рис. 1.

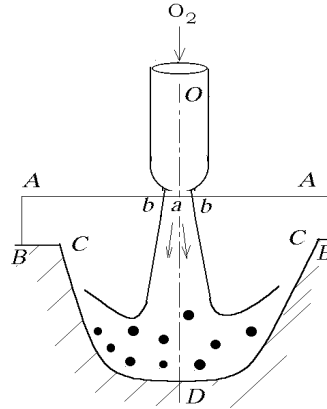


Рис. 2.

Заменяем систему струй одной сверхзвуковой струей, т.к. основной целью расчетов является получение газодинамической картины течения в полости каверны с учетом протекания в ней химических реакций, диспергирования частиц металла (корольков) с гидродинамически неустойчивой поверхности раздела фаз и их движения в полости каверны. Форма поверхности раздела заранее неизвестна и определяется из условия равенства между давлением в газовой фазе и гидростатическим давлением в жидком металле в каждой точке этой поверхности. Течение в газовой полости каверны содержит дозвуковые и сверхзвуковые зоны, ударные волны и является двухфазным и турбулентным.

Дополнительно к упрощающим предположениям, сформулированным в предыдущем разделе, предполагалось следующее:

- задача является осесимметричной и стационарной;
- движением жидкой фазы пренебрегается. В ней учитывается только гидростатическое давление;
- газовая фаза состоит из пяти компонентов — O_2 , CO , CO_2 , N_2 , H_2O , и в ней протекает единственная химическая реакция (2);
- массовая концентрация углерода в металле полагается постоянной, поскольку характерное время протекания газодинамических процессов в каверне на несколько порядков меньше времени плавки в конвертере.

Химические компоненты N_2 и H_2O считаются нейтральными. Наличие молекулярного азота связано с его присутствием в воздухе, который может подсасываться сверхзвуковой струей из окружающего пространства. Присутствие паров воды, как указывается в работе [?], необходимо для протекания реакции (2), однако полная схема их образования в полости каверны достаточно сложна, а концентрация их согласно [?] не превышает 0.1%. Поэтому при расчетах полагалось, что с поверхности раздела фаз имеет место массоприход H_2O с указанной выше концентрацией.

Для описания такого течения использовался континуальный подход, в рамках которого система уравнений в тензорной форме записи имеет вид (по повторяющимся индексам проводится суммирование)

$$\frac{\partial}{\partial x_k} y \rho U_k = y J, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} y \rho U_i U_k + \frac{\partial}{\partial x_i} y P = \frac{\partial}{\partial x_k} y [\mu \tau_{ik} - \rho \langle u'_i u'_k \rangle] + y \rho_p C_R (U_{pi} - U_i), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_k} y \rho H U_k &= U_k \frac{\partial}{\partial x_k} y P + \frac{\partial}{\partial x_k} y \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_k} - \rho \langle h' u'_k \rangle + (\mu \tau_{ik} - \right. \\ &\left. - \rho \langle u'_i u'_k \rangle) \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right] + y \rho_p \{ C_\alpha (T_p - T) + C_R U_{pi} (U_{pi} - U_i) \}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} y \rho U_k K = \frac{\partial}{\partial x_k} y \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_k} \right] - \rho \langle u'_i u'_k \rangle \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - \rho \varepsilon - K \Phi_s, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} y \rho U_k \varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_k} y \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} \rho \langle u'_i u'_k \rangle \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} - C_{\varepsilon 3} \varepsilon \Phi_s, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} y \rho \left[C_i U_k - D_i^* \frac{\partial}{\partial x_k} C_i \right] = y J_i, \quad i = 1, \dots, 5, \quad (8)$$

$$\lambda = c_p \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right), \quad D_i^* = D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t},$$

$$p = \rho T R_0 \sum_{i=1}^5 C_i / M_i, \quad (9)$$

$$\tau_{ik} = \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_l}{\partial x_l} \delta_{ik} \right), \quad \rho \langle u'_i u'_k \rangle = \frac{2}{3} \rho K \delta_{ik} - \mu_t \tau_{ik},$$

$$\mu_t = C_\mu \rho K^2 / \varepsilon, \quad \rho \langle h' u'_k \rangle = - \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial H}{\partial x_k},$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} y (\rho_p U_{pk} + \langle \rho'_p u'_{pk} \rangle) = y J_p, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_k} y \rho_p U_{pi} U_{pk} &= \frac{\partial}{\partial x_k} y \left[-U_{pi} \langle \rho'_p u'_{pk} \rangle - \rho_p \langle u'_{pi} u'_{pk} \rangle \right] + \\ &+ y \rho_p C_R (U_i - U_{pi}), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_k} y \rho_p U_{pi} H_p &= \frac{\partial}{\partial x_k} y \left[-H_p \langle \rho'_p u'_{pk} \rangle - \rho_p \langle h'_p u'_{pk} \rangle \right] + \\ &+ y \rho_p C_\alpha (T - T_p), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\Phi_s = 2 \rho_p C_R \left(1 - \frac{\tau_L}{\tau_L + 1/C_R} \right), \quad \tau_L = 0.35 K / \varepsilon,$$

$$J = J_2 - J_1, \quad J_p = -J, \quad J_3 = J_4 = J_5 = 0,$$

где μ_t — турбулентная динамическая вязкость, C_R, C_α — коэффициенты аэродинамического сопротивления частицы и теплопередачи от частицы к газу соответственно, D_i — коэффициенты диффузии, индексы 1–5 относятся к компонентам газовой фазы O_2, CO, CO_2, N_2, H_2O , индекс p — к частицам, J_1, J_2 — массовая скорость расходования O_2 и образования CO_2 , M_i — молекулярные веса компонент, K, ε — кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации.

Значения коэффициентов C_R, C_α и корреляций пульсационных параметров частиц определялись через осредненные параметры несущего газа с помощью выражений, приведенных в работе [?], а выражение для Φ_s , учитывающее дополнительную диссипацию K на частицах, было взято из [?]. В области торможения натекающей струи использовалась модификация k — ε -модели, предложенная в [?], и коррекция констант модели турбулентности в области течения свободной струи, взятая из работы [?].

При расчете скорости горения монооксида углерода учитывалось влияние на ее величину турбулентности газовой фазы, поэтому скорость горения определялась из выражения

$$J_{CO} = \min\{J_{ch}, J_{tb}\},$$

$$J_{ch} = 1.3 \cdot 10^{14} \exp(-30000/RT) \cdot C_{CO} \sqrt{C_{O_2} C_{H_2O}},$$

$$J_{tb} = A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min\left\{C_{O_2}, \frac{C_{CO}}{s}\right\},$$

где J_{ch} — скорость обобщенной химической реакции горения CO, взятая из [?] и учитывающая влияние концентрации паров воды на процесс горения, J_{tb} — скорость турбулентного перемешивания, описываемая моделью дробления турбулентных вихрей [?], s — стехиометрический коэффициент, A — эмпирическая постоянная ($A = 2$).

Решение системы уравнений (3) – (12) отыскивалось в области, изображенной на рис. 2, которая затем покрывалась прямоугольной нерегулярной разностной сеткой. На границах области с учетом симметрии течения задавались следующие граничные условия:

— в выходном сечении сопла (ab) фурмы задавались массовый расход кислорода, угол наклона струи к оси симметрии и температура торможения, соответствующая температуре окружающей среды;

— на границе раздела фаз (DCB) задавались постоянное давление, равное гидростатическому давлению в жидкости, и условия прилипания для газовой фазы. Массовая скорость прихода с поверхности компоненты CO определялась из реакции горения углерода:

$$J_{CO} = M_{CO}/M_C \rho C_{O_2} \rho_C K_C \exp(-E/RT),$$

где ρ_C — массовая концентрация углерода в металле, $K_C = 2 \cdot 10^5$ м/с, $E = -158000$ Дж/моль, и для CO здесь задавалось граничное условие

$$\rho C_{CO} - \rho D_{CO} \frac{\partial C_{CO}}{\partial n} = J_{CO},$$

где D_{CO} — коэффициент диффузии, n — нормаль к поверхности. Для остальных же компонентов смеси задавалось условие отсутствия потока через поверхность;

— на оси симметрии (OD) задавались условия симметрии течения;

— на выходной границе (AB) — “мягкие” граничные условия и на (bA) условия в окружающем пространстве (воздух при стандартных условиях).

Для описания процесса диспергирования капель металла с поверхности раздела фаз предлагается подход, основанный на следующем представлении этого процесса: поверхность раздела предполагается “устойчивой в среднем” и с нее в полость газовой каверны поступают мелкодисперсные частицы жидкого металла. При этом размеры частиц и интенсивность их прихода определяются скоростными характеристиками газового потока, движущегося по касательной к поверхности раздела фаз и физическими свойствами обеих фаз. С целью их определения будем рассматривать процесс взаимодействия фаз как результат обтекания газовым потоком криволинейной непроницаемой поверхности, с жидкой испаряющейся пленкой металла, которая при ее обтекании газовой фазой может дробиться на капли из-за тейлоровской неустойчивости. Поведение пленки, как показывают эксперименты [?, ?], оказывается неустойчивым в том случае, когда скорость поперечного вдува массы с поверхности пленки становится сравнимой с величиной массовой скорости газовой фазы, касательной к “осредненной” поверхности раздела фаз.

В качестве параметра, характеризующего начало разрушения пленки, использовались результаты работы [?]

$$\left(\frac{\rho''}{\rho}\right)^{1/2} \frac{U'' \mu}{\sigma} \text{Ar}_*^{1/3} \text{Re}^{1/6} > 1.75, \quad (13)$$

$$\text{Ar}_* = \left(\frac{\sigma^3}{\nu^2 \rho^3 |(\vec{g}, \vec{\tau})| (1 - \rho''/\rho)} \right)^{1/2},$$

где U'' — модуль вектора скорости газа, обтекающего поверхность вне пограничного слоя, ρ'' — плотность газа, ρ — плотность жидкости, σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкой пленки, ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости, $(\vec{g}, \vec{\tau})$ — проекция вектора ускорения силы тяжести на направление к касательной к поверхности.

Обработка экспериментальных зависимостей позволила установить связь между размером капель и скоростным напором газового потока:

$$\frac{U''^2 \rho'' D_0}{\sigma} \geq 10, \quad (14)$$

где D_0 — диаметр капли в момент отрыва. Поэтому из выражений (13) и (14) можно определить положение точки начала дробления пленки жидкости и размеры возникающих при этом капель.

Для определения массовой скорости прихода капель металла использовались практические рекомендации работы [?], согласно которым массоприход капель G_p примерно в три – пять раз превышает расход кислорода G_{O_2} через фурму. Поэтому при расчетах использовалась следующая параметрическая зависимость:

$$G_p = \alpha G_{O_2}, \quad (15)$$

где параметр α задавался рядом значений и значения всех параметров частиц на подвижной границе (DC) определялись из приведенных выше соотношений. На границах (Da , ab) и (bA) задавались условия отсутствия частиц, на (AB) — “мягкие” граничные условия.

Численное решение данной задачи проводилось с помощью метода ELAFINT — смешанного эйлерово-лагранжева метода для расчета несжимаемых течений с подвижными границами [?], который был модифицирован для сжимаемых течений. Использовалась также процедура сглаживания, основанная на использовании B -сплайнов для определения “устойчивой в среднем” поверхности раздела фаз.

3. Некоторые результаты расчетов

Численное моделирование процесса верхней продувки проводилось для случая его начальной стадии, когда концентрация углерода в металле является максимальной. Полагалось, что число Маха центральной струи (см. рис. 2) $M_0 = 1.2$. Задавались три значения параметра α в (15): $\alpha = 2, 4, 6$. На рис. 3, 4 показана структура поля течения в виде векторов скоростей и положения изолиний чисел Маха в полости каверны, образующейся при взаимодействии струй кислорода с поверхностью жидкого металла для случая $\alpha = 2$.

При других значениях этого параметра существенно изменяется лишь форма каверны (показана штриховыми линиями для $\alpha = 4, 6$ на рис. 4), структура же течения в ней

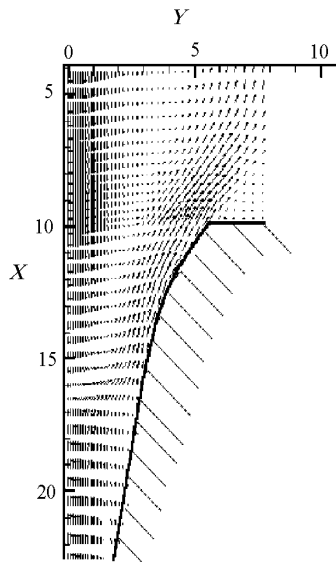


Рис. 3.

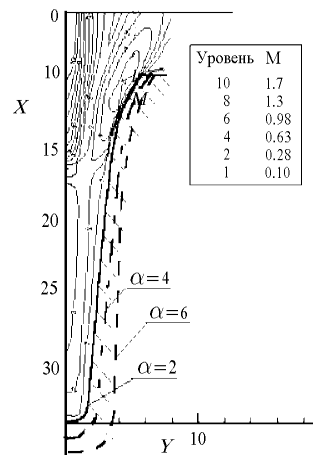


Рис. 4.

заметных изменений не претерпевает. Как следует из рисунков, торможение сверхзвуковой струи происходит вблизи поверхности металла без ее существенного проникновения в глубь каверны. Вследствие большой разности температур струи и ванны металла температура газовой фазы и ее плотность в полости каверны существенно неравномерны, что приводит к появлению вблизи поверхности раздела фаз зоны с высокими значениями скоростей газа, которые вблизи выходного сечения каверны могут превышать скорость звука.

На рис. 5 приведены профили плотностей частиц в различных поперечных сечениях каверны. Видно, что взаимодействие частиц с несущим газом приводит к повышенной их концентрации вблизи поверхности раздела фаз. Эта неравномерность в распределении концентрации приводит к тому, что основная часть СО выделяется вблизи поверхности каверны и здесь же происходит и основное поглощение кислорода в реакции (2), который поставляется в эту зону за счет конвективного и диффузионного переноса. Однако такой перенос не обеспечивает достаточно полного сжигания СО и значительная его доля выносится из полости каверны, о чем можно судить по распределению концентраций O_2 (кривые 1) и СО (кривые 2) в полости каверны, приведенному на рис. 6. Практически полное отсутствие концентрации монооксида углерода вблизи центра струи связано с тем, что здесь из-за низкой температуры и отсутствия паров воды, не достигающих центра оси струи кислорода, не протекает реакция (2). Увеличение концентрации паров воды на порядок приводит к заметному росту полноты сгорания монооксида углерода (штриховые кривые). Поэтому проведение мероприятий, направленных на повышение интенсификации переноса кислорода к поверхности раздела фаз и повышение концентрации паров воды в каверне можно рассматривать в качестве практических рекомендаций по повышению эффективности процесса дожигания СО.

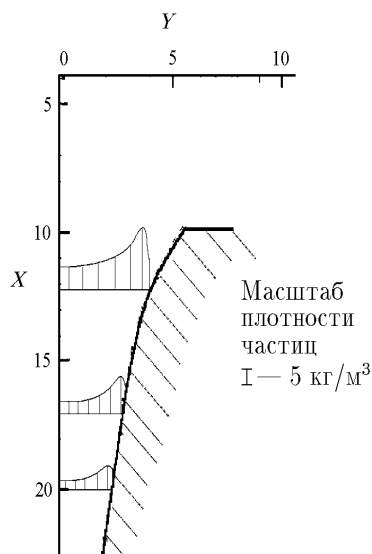


Рис. 5.

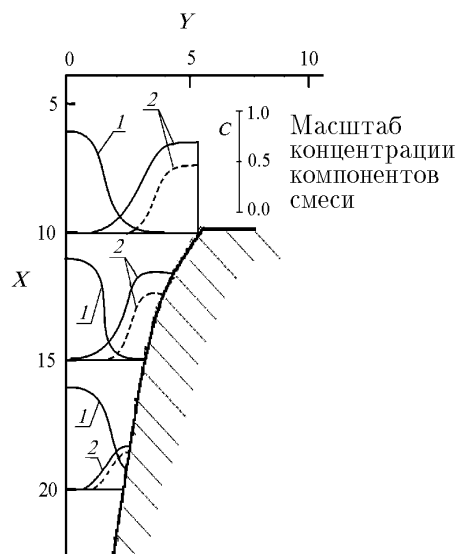


Рис. 6.

4. Выводы

Таким образом, в статье

— разработана методика численного моделирования процесса верхней продувки сталеплавильного конвертера с учетом дожигания монооксида углерода в полости каверны в точной постановке;

— исследована структура двухфазного течения в полости каверны с учетом протекания здесь химических реакций;

— на основе анализа структуры течения и особенностей протекания процесса дожигания монооксида углерода предложены практические рекомендации по повышению эффективности этого процесса.

Список литературы

- [1] АЛЕКСЕЕНКО С. В., НАКОРЯКОВ В. А., ПОКУСАЕВ Б. Г. *Волновое течение пленок жидкости*. Наука, Новосибирск, 1992.
- [2] БАПТИЗМАНСКИЙ В. И., ОХОТСКИЙ В. Б. *Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса*. Вища школа, Киев — Донецк, 1984.
- [3] ГОГОНИН И. И., ЛАЗАРЕВ С. И. Экспериментальное исследование теплообмена и гидродинамики при конденсации движущегося пара на поверхности горизонтального цилиндра. *Инж.-физ. журн.*, **2**, 58, 1990, 181–188.
- [4] *Основы практической теории горения*. Под ред. В. В. Померанцева. Энергоатомиздат, Л., 1986.

- [5] ЧЕРНЯТЕВИЧ А. Г., ПРОТОПОПОВ Е. В. Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конверторов. *Изв. вузов. Черная металлургия*, №12, 1995, 13–17.
- [6] ШРАЙБЕР А. А., ГАВИН Л. Б., НАУМОВ В. А. и др. *Турбулентные течения газозвеси*. Наукова думка, Киев, 1987.
- [7] КАТО М., LAUNDER В. Е. The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders. *Proc. 9th Symp. on Turbulent Shear Flows*, Kyoto, 10–4, 1993.
- [8] KNOWLES K. Computational studies of impinging jets using $k - \varepsilon$ turbulence models. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **22**, 1996, 799–810.
- [9] MAGNUSSEN В. F., HJERTAGER H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Proc. 16th Int. Symp. on Combustion*, 1976, 747–775.
- [10] MITCHELL J. W., TARBELL J. M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion. *AIChE J.*, **2**, No. 28, 1982, 302–311.
- [11] POURAHMADI F., HUMPHREY J. A. C. Modeling solid-fluid turbulent flows with application to predicting erosive wear. *Phys.-Chem. Hydrodynamics*, **3**, No. 4, 1983, 191–219.
- [12] UDAYKUMAR H. S., SHYY W, AND RAO M. M. ELAFINT: A mixed Eulerian-Lagrangian method for fluid flows with complex and moving boundaries. *Int. J. Numer. Methods in Fluids*, **22**, 1996, 691–712.

Поступила в редакцию 3 августа 1998 г.