

УДК 631.536

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОЖИГАНИЯ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ВЕРХНЕЙ ПРОДУВКЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО КОНВЕРТЕРА

Х. МИЛОШЕВИЧ

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

Численно исследован процесс взаимодействия высоконапорных струй кислорода с поверхностью жидкого металла в сталеплавильном конвертере, где под силовым воздействием струй в толще металла образуется каверна, поверхность которой является гидродинамически неустойчивой. Предложены упрощенная схема химических реакций и механизмы диспергирования капель металла с поверхности раздела фаз, позволяющие правильно описывать газодинамическую картину течения в полости каверны. Моделирование двухфазного турбулентного течения в каверне рассматривается в рамках континуальной модели на основе осредненных уравнений Навье — Стокса. Для их замыкания используется модифицированная $k - \varepsilon$ -модель турбулентности, учитывающая наличие второй фазы. Проведено исследование структуры течения в каверне. Предложены практические рекомендации по повышению эффективности процесса дожигания в каверне монооксида углерода.

Верхняя продувка ванны жидкого чугуна в кислородном сталеплавильном конвертере проводится с целью “выжигания” растворенного в нем углерода, что является основой процесса превращения чугуна в сталь [1]. 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 конвергентного процесса и уменьшения вредных выбросов необходимо повысить степень дожигания СО до СО₂ в рабочем пространстве конвертера путем улучшения технологической схемы верхней продувки.

Исследования в этом направлении являются актуальными для всех конвертерных цехов России и стран СНГ, так как в них не осуществляется улавливание отходящих газов для последующего использования в качестве топлива. В целом проблема дожигания монооксида углерода в полости конвертера является предметом большого числа исследований, однако до настоящего времени она не имеет удовлетворительного решения из-за сложности и относительно малой изученности процессов, протекающих при взаимодействии кислорода с жидким чугуном. В данной работе предпринята попытка рассмотреть газодинамический аспект этой проблемы, включая процесс формирования каверны и исследование структуры двухфазного течения в ней с учетом протекания неравновесных химических реакций.

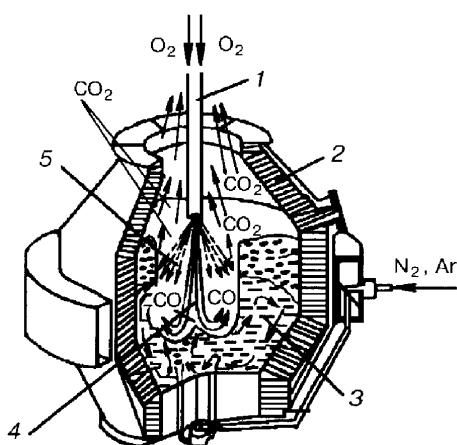


Рис. 1. Технологическая схема верхней продувки.

1 — верхняя фурма, 2 — конвертер, 3 — металл, 4 — сверхзвуковая струя кислорода, 5 — боковые дозвуковые струи.

1. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

Типичная технологическая схема процесса верхней продувки приведена на рис. 1. Через специальную вертикальную трубу (фурму) подается технически чистый кислород, истекающий через многосопловой наконечник в виде системы дозвуковых и сверхзву-

ковых струй, интенсивность воздействия которых на поверхность металла в ванне может регулироваться [2]. Тем самым создаются условия для обеспечения контролируемого процесса выплавки стали при минимальных потерях металла и повышения эффективности дожигания отходящих газов в полости конвертера без заметного снижения стойкости его огнеупорной футеровки.

Согласно данным работы [1], можно считать, что рафинирование 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 монооксид углерода, который выделяется из реакционного слоя и поступает в газовую полость, где частично догорает при взаимодействии со струями кислорода. В целом процесс превращения чугуна в сталь описывается системой нескольких десятков химических реакций [1], однако для исследования газодинамической картины течения в каверне, как показали исследования, вполне достаточна 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 газодинамически неустойчивой поверхности раздела фаз газ — металл происходит образование капель жидкого металла (корольков), которые поступают в полость каверны. На поверхности капель также предполагается протекание реакции (1);

— процесс образования шлакометаллической эмульсии над поверхностью металла не рассматривается.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Поскольку, как уже отмечалось, основная цель работы — исследование газодинамического аспекта рассматриваемого процесса, несколько упростим реальную схему верхней продувки, приведенную на рис. 1. Будем считать, что течение является осесимметричным и фурма заканчивается полусферой, с поверхности которой истекают две струи технического чистого кислорода (рис. 2) — центральная

Рис. 2. Схема расчетной области.

(сверхзвуковая) и боковая (дозвуковая), угол наклона которой к оси фурмы может изменяться. В рассматриваемой осесимметричной постановке боковая струя является веерной, что достаточно хорошо моделирует многосопловую конструкцию реальных наконечников [2].

Далее предположим, что режим истечения струй является стационарным. Форма поверхности раздела заранее не известна и определяется из условия равенства между давлением в газовой

фазе и гидродинамическим давлением в жидком металле в каждой точке этой поверхности. Течение в газовой полости каверны содержит дозвуковые, сверхзвуковые зоны и ударные волны и является двухфазным и турбулентным.

Дополнительно добавлялись следующие предположения:

- движением жидкой фазы пренебрегается; здесь 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 газодинамических процессов в каверне на несколько порядков меньше времени плавки в конвертере.

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 [3], необходимо для протекания реакции (2), однако полная схема их образования в полости каверны достаточно сложна, а концентрация, согласно [1], не превышает 0,1 %. Поэтому в расчетах полагалось, что с поверхности раздела фаз поступает H_2O с указанной выше концентрацией.

Для описания такого течения использовался континуальный подход, в рамках которого система уравнений в векторно-тензорной форме имеет вид

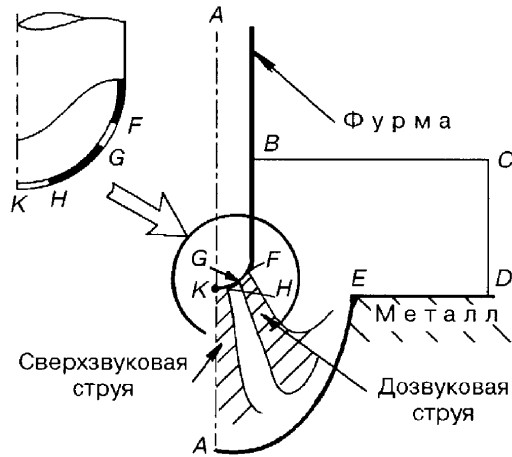
$$\nabla(y\rho\vec{U}) = yJ, \quad (3)$$

$$\nabla(y\rho\vec{U}\vec{U}) + \nabla y\rho - \nabla(y\tau) = y[\rho_p C_R(\vec{U}_p - \vec{U}) - J\vec{U}_p], \quad (4)$$

$$\nabla y[\rho\vec{U}h - \lambda\nabla T] = \vec{U}\nabla y\rho + y[\Phi + \rho_p\{C_\alpha(T_p - T) + C_R\vec{U}_p(\vec{U}_p - \vec{U})\}], \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \nabla y\left[\rho\vec{U}k - \left(\frac{\mu_t}{\sigma} + \mu\right)\nabla k\right] = -y\left\{\left[\mu_t\left(\frac{\partial u_l}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_l}\right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_l}\right)\delta_{ik}\right]\frac{\partial u_l}{\partial x_k} + \rho(\varepsilon + \varepsilon_s + \varepsilon_J)\right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

$$\nabla y\rho[C_i\vec{U} - D_i\nabla C_i] = yJ_i \quad (i = 1, \dots, 5), \quad (7)$$



$$\lambda = c_p \left(\frac{\mu}{\text{Pr}} + \frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \right), \quad D = \frac{\mu}{\text{Sc}} + \frac{\mu_t}{\text{Sc}_t},$$

$$p = \rho T R_0 \sum_{i=1}^5 C_i / M_i, \quad (8)$$

$$\nabla y \left(\rho_p \bar{U}_p + \langle \rho'_p \bar{U}'_p \rangle \right) = y J_p, \quad (9)$$

$$\nabla y \left(\rho_p \bar{U}_p \bar{U}_p + \bar{U}_p \langle \rho'_m \bar{U}'_p \rangle \right) + \nabla y \rho_p \langle \bar{U}'_p \bar{U}'_p \rangle = y \rho_p C_R (\bar{U} - \bar{U}_p), \quad (10)$$

$$\nabla y \left(\rho_p \bar{U}_p + \langle \rho'_p \bar{U}'_p \rangle \right) h_p + \nabla y \rho_p \langle h'_p \bar{U}'_p \rangle = y \left[\rho_p C_\alpha (T - T_p) + J_p q \right], \quad (11)$$

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

где τ , Φ — тензор вязких напряжений и член, учитывающий диссипацию за счет действия вязких сил в осредненной модели Навье — Стокса (τ включает в себя и тензор турбулентных напряжений через эффективную динамическую вязкость $\mu_{\text{ef}} = \mu + \mu_t$); μ_t — турбулентная динамическая вязкость; C_R , C_α — коэффициенты аэродинамического сопротивления частицы и теплоотдачи от частицы к газу соответственно; индексы 1 – 5, p относятся соответственно к компонентам газовой фазы O_2 , CO , CO_2 , N_2 , H_2O и к частицам; J_1 , J_2 — массовые скорости расхода O_2 и образования CO_2 ; M_i — молекулярные массы компонентов; 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 [4], а члены ε_s , ε_j , учитывающие дополнительную диссипацию k на частицах, были взяты из [5]. В области торможения натекающей струи использовалась модификация $k - \varepsilon$ -модели, предложенная в работе [6], с коррекцией констант модели турбулентности в области течения свободной струи [7].

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

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

$$J_{\text{ch}} = 1,3 \cdot 10^{14} \exp(-30000/RT) C_{\text{CO}} \sqrt{C_{\text{O}_2} C_{\text{H}_2\text{O}}},$$

$$J_{\text{tb}} = A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ C_{\text{O}_2}, \frac{C_{\text{CO}}}{s} \right\},$$

где J_{ch} — скорость обобщенной химической реакции горения CO , взятая из [8] и учитывающая влияние концентрации паров воды на процесс горения; J_{tb} — скорость турбулентного перемешивания, описываемая моделью дробления турбулентных вихрей [9]; s — стехиометрический коэффициент; A — эмпирическая постоянная ($A = 2$).

Решение системы уравнений (3) – (11) отыскивалось в области, изображенной на рис. 2, которая затем покрывалась прямоугольной нерегулярной разностной сеткой. На границах области с учетом симметрии течения задавались граничные условия:

— в выходных сечениях сопел (HK , FG), расположенных на фурме, задавались массовый расход кислорода, угол наклона струй к оси симметрии и температура торможения, соответствующая температуре окружающей среды;

— на границе раздела фаз AED задавались постоянное давление, равное гидростатическому давлению в жидкости, и условия прилипания для газовой фазы. Массовая скорость поступления с поверхности компонента 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, 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 компонентов смеси задавалось условие отсутствия потока через поверхность;

— на оси симметрии AA задавались условия симметрии течения;

— на выходной границе CD принимались “мягкие” граничные условия и на границе BC — 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”, откуда 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. При этом поведение пленки, как показывают эксперименты [10, 11], 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 [11]:

$$\left(\frac{\rho''}{\rho} \right)^{1/2} \frac{U'' \mu}{\sigma} Ar_*^{1/3} Re^{1/6} > 1,75, \quad (12)$$

где

$$Ar_* = \left(\frac{\sigma^3}{v^2 \rho^3 |\bar{g}, \bar{\tau}| (1 - \rho''/\rho)} \right)^{1/2}, \quad Re = \frac{u'' \delta}{v}.$$

Здесь 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 касательной к поверхности, δ — толщина пленки.

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

$$\frac{U''^2 \rho'' D_0}{\sigma} \geq 10, \quad (13)$$

где D_0 — диаметр капли в момент отрыва. Поэтому из выражений (12) и (13) можно определить положение точки начала дробления пленки жидкости и значение размеров возникающих при этом капель.

Для определения массовой скорости прихода капель металла использовались практические рекомендации работы [1], согласно которым массоприход капель G_p примерно в три – пять раз превышает расход кислорода G_{O_2} через фурму. В силу этого при расчетах использовалась следующая параметрическая зависимость:

$$G_p = \alpha G_{O_2}, \quad (14)$$

где параметр α задавался рядом значений и значения всех параметров частиц на подвижной границе AE определялись из приведенных выше соотношений. На границах KF и BC задавались условия отсутствия частиц, а на CD — “мягкие” граничные условия.

Численное решение данной задачи проводилось с помощью метода ELAFINT — смешанного эйлерово-лагранжева метода для расчета несжимаемых течений с подвижными границами [12], который был модифицирован для сжимаемых течений. Использовалась также процедура сглаживания, основанная на использовании β -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 максимальна. Полагалось, что число Маха центральной струи (см. рис. 2) $M_0 = 1,2$ и боковой струи $M_1 = 0,5$. Угол наклона боковой струи к оси фурмы составлял 45° . Задавались три значения параметра α в (14): $\alpha = 2, 4, 6$. На рис. 3 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 $\alpha = 2$ (сплошная линия). При других значениях этого параметра существенно изменяется лишь форма каверны (см. штриховые линии для $\alpha = 4, 6$ на рис. 3, *b*), структура же течения в ней заметных изменений не претерпевает. Как следует из рис. 3, торможение сверхзвуковой струи происходит вблизи поверхности металла без ее существенного проникновения вглубь каверны. Вследствие большой разности температур струи и металла температура газовой фазы и ее плотность в полости каверны существенно неравномерны, что приводит к появлению вблизи поверхности раздела фаз области с высокими значениями скоростей газа, которые вблизи выходного сечения каверны могут превышать скорость звука.

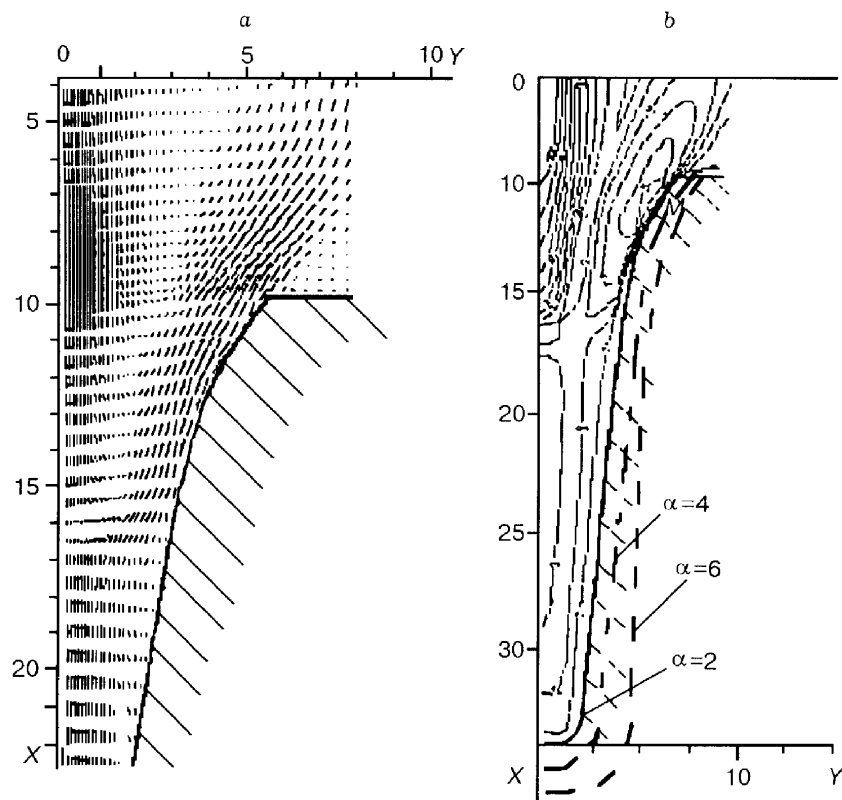


Рис. 3. Структура поля течения.

a — вектора скоростей в полости каверны, b — изолинии поля течения.

На рис. 4, a приведены профили плотностей частиц в различных поперечных сечениях каверны. Видно, что взаимодействие частиц с несущим газом приводит к повышению их концентрации вблизи поверхности раздела фаз. Эта неравномерность приводит к тому, что основная часть СО выделяется вблизи поверхно-

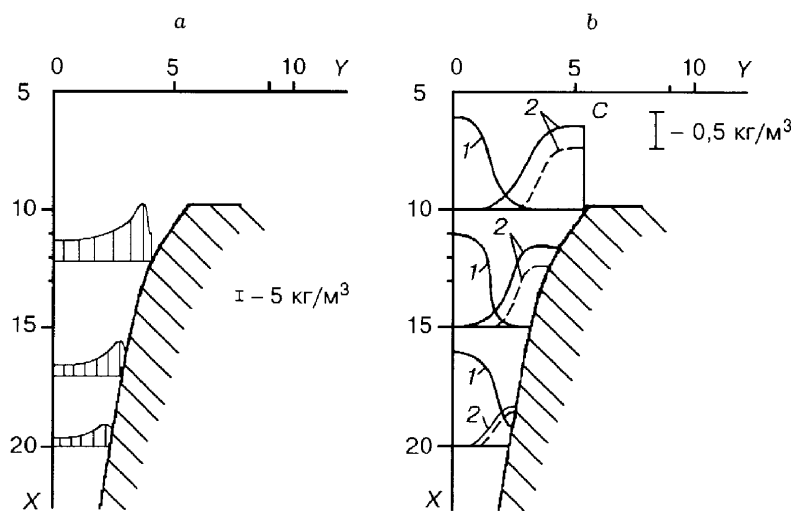


Рис. 4. Концентрации частиц (a) и O_2 и CO (b) в поле течения.

1 — O_2 , 2 — CO .

сти каверны и здесь же происходит основное поглощение кислорода в реакции (2), который поставляется в эту зону за счет конвективного и диффузионного переноса. Однако такой перенос, как это следует из рис. 4, *b*, не обеспечивает достаточно полного сжигания СО, и значительная его доля выносится из полости каверны. 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, реакция (2) не протекает. Увеличение концентрации паров воды на порядок приводит к заметному росту полноты сгорания СО (штриховые линии на рис. 4, *b*). 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.

Результат проведенной работы позволяет сделать следующие выводы.

1. Разработана методика численного моделирования процесса верхней продувки сталеплавильного конвертера с учетом дожигания СО в полости каверны в точной постановке;
2. Исследована структура двухфазного течения в полости каверны с учетом протекания здесь химических реакций;
3. На основе анализа структуры течения и особенностей протекания процесса дожигания СО предложены практические рекомендации по повышению эффективности этого процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баптизманский В.И., Охотский В.Б.** Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. — Киев; Донецк: Вища школа, 1984. — 184 с.
2. **Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В.** Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конвертеров // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1995. — № 12. — С. 13 – 17.
3. **Основы** практической теории горения / Под ред. В.В. Померанцева. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 312 с.
4. **Шрайбер А.А., Гавин Л.Б., Наумов В.А. и др.** Турбулентные течения газозвеси. — Киев: Наук. думка, 1987. — 240 с.
5. **Pourahmadi F., Humphrey J.A.C.** Modeling solid-fluid turbulent flows with application to predicting erosive wear // Phys.-Chem. Hydrodynamics. — 1983. — Vol. 4, No. 3. — P. 191 – 219.
6. **Kato M., Launder B.E.** The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders // Proc. 9th Symp. on Turbulent Shear Flow. — Kyoto, Japan, 1993.
7. **Knowles K.** Computational studies of impinging jets using $k - \varepsilon$ turbulence models // Int. J. Numer. Meth. Fluids. — 1996. — Vol. 22. — P. 799 – 810.
8. **Mitchell J.W., Tarbell J.M.** A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion // AIChE J. — 1982. — Vol. 28, No. 2. — P. 302 – 311.
9. **Magnussen B.F., Hjertager H.** On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // Proc. 16th Int. Symp. on Combustion, 1976, 747-75.
10. **Алексеев С.В., Накоряков В.А., Покусаев Б.Г.** Волновое течение пленок жидкости. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. — 256 с.
11. **Гогонин И.И., Лазарев С.И.** Экспериментальное исследование теплообмена и гидродинамики при конденсации движущегося пара на поверхности горизонтального цилиндра // Инж. физ. журн. — 1990. — Т. 58, № 2. — С. 181 – 188.
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. for Numer. Methods in Fluids. — 1996. — Vol. 22. — P. 691 – 712.

Статья поступила в редакцию 29 сентября 1998 г.