Численное моделирование гидродинамики слабосжимаемой газожидкостной среды при выпуске металла в сталеразливочный ковш

С.Е. САМОХВАЛОВ, М.В. БАБЕНКО

Днепродзержинский государственный технический университет

Проведено численное моделирование гидродинамики слабосжимаемой газожидкостной среды при выпуске металла в сталеразливочный ковш. Предложенный численный метод позволяет адекватно описывать движение газожидкостных сред любой плотности.

Проведено числове моделювання гідродинаміки слабостиснутого газорідинного середовища при випуску металу у сталерозливний ківш. Наведений числовий метод дозволяє адекватно описати рух газорідинних середовищ будь-якої щільності.

Numeral modeling of hydrodynamics of poorlysqueezed of gasliquid environment during metal casting into scoop have been conducted. The offered numeral method allows adequately to describe motion of gasliquid environments of any closeness.

Постановка проблемы. Газожидкостные среды встречаются на всех этапах производства стали, начиная от выплавки в конвертерах при их продувке [1], до внепечной обработки в ковшах и разливки, где необходимо учитывать воздух, попадающий в расплав со струёй [2], или инертный газ, вдуваемый в ковш на стадии внепечной обработки [3]. В связи с этим было проведено множество экспериментальных исследований поведения газожидкостных сред в различных условиях, соответствующих перечисленным процессам [4-6], а также разработан ряд математических моделей, позволяющих численно описывать гидродинамику расплава с учетом газовой фазы как при выпуске (разливке) стали [7], так и при продувке: в приближении Буссинеска [8] и с использованием более сложных модельных предположений [9].

Однако все известные математические модели, в том числе и перечисленные, не учитывают одно существенное свойство среды газ-расплав - ее сжимаемость, появляющуюся вследствие довольно значительной плотности расплава. Большая плотность расплава приводит к относительно большим градиентам давления в его объеме. Так, в расплаве стали ферростатическое давление достигает величины атмосферного на глубине около полутора метров, в то время как, например, в ковше уровень расплава может быть равен четырем - пяти метрам. В этом случае пузырь газа, всплывающий от дна ковша к поверхности расплава, увеличивается в объеме примерно в три раза. Пузыри же воздуха, захватываемого струёй расплава при заполнении сверху ковшей и изложниц, попадая в глубь расплава, сжимаются, что уменьшает объемный коэффициент газосодержания расплава α и изменяет его гидродинамические параметры. Зависимость α не только от ферростатического, а, по-видимому, и от динамического давления в среде газ - расплав может в определенных случаях влиять на его динамику, например, при изучении воздействия газожидкостной струи на дно ковша при заполнении.

Вследствие сказанного выше как физические водяные модели, так и хорошо согласующиеся с ними математические могут давать неверные результаты для сред газ - расплав из-за неучета их сжимаемости.

Постановка задания. В данной работе предложена математическая модель, предназначенная для численного исследования гидродинамики газожидкостных сред при небольших коэффициентах газосодержания, когда газожидкостная среда слабо сжимаема. Здесь, как и в [7], делается предположение о сплошности газожидкостной среды, уравнения которой записываем в нулевом приближении по ρ_1/ρ_0 [10]:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V}\nabla)\mathbf{V} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\mu}{\rho}\Delta\mathbf{V} + g \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{V}) = 0 \qquad (2)$$

В этом случае скорость среды $\mathbf{V}$ совпадает со скоростью жидкой фазы, $\rho = (1-\alpha)\rho_0$ и инерционными свойствами газовой фазы можно пренебречь, что позволяет использовать диффузионное приближение, дополняя уравнения (1), (2) уравнением сохранения массы газовой фазы:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \nabla(\rho'(\mathbf{V}+\mathbf{W})) = 0 \qquad (3)$$

где $\rho' = \alpha\rho_1$ – плотность газовой фазы в газожидкостной среде, и выражением для скорости газовой фазы относительно расплава [11] $\mathbf{W} = -\frac{g}{q}W$, где (с учетом нашего приближения $\rho_1/\rho_0 \to 0$)

$$W = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{r_п\rho_0} + qr_п\right)} \qquad (4)$$

Формула (4) хорошо согласуется с экспериментальными данными по всплытию одиночных пузырей как в воде [11], так и в расплаве стали [12]. Однако для ее применения в газожидкостной среде необходимо экспериментальное определение среднего радиуса пузырей газовой фазы $r_п$, который зависит от множества факторов, в том числе и от характера течения. Поэтому во многих случаях величиной W приходится, исходя из различных соображений, задаваться непосредственно.

Предположение о малости α позволяет уравнения (1), (2) записать в приближении Буссинеска:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V}\nabla)\mathbf{V} = -\frac{1}{\rho}\nabla\tilde{p} + \nu_э\Delta\mathbf{V} + (1-\alpha)g \qquad (5)$$

$$\nabla\mathbf{V} = 0 \qquad (6)$$

учитывая присутствие газовой фазы лишь в силах плавучести. В настоящей работе используется алгебраическая модель турбулентности [13], в которой эффективный коэффициент кинематической вязкости $\nu_э$ определяется выражением

$$\nu_э = \nu + \frac{d}{\mathrm{Re}_d} V + (bd)^2 \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right|, \tag{7}$$

содержащим два параметра d/Re_d и bd (при численном решении уравнений (5), (6) d выбирается равным шагу пространственной сетки и в качестве параметров турбулентности выступают два безразмерных параметра: локальное, или сеточное число Рейнольдса Re_d, и b - отношение длины перемешивания к шагу сетки).

При получении уравнения для α учтем, что газ, находящийся в жидкости, подчиняется уравнению состояния $\rho_1 = \rho_1(p)$ (зависимость от температуры и других факторов не рассматриваем) и давление p явно от времени не зависит. Тогда из формулы (3) следует

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla\,(\alpha\,(\mathbf{V}+\mathbf{W})) = -\,\alpha\xi\,(p)\,(\mathbf{V}+\mathbf{W})\,\nabla p \tag{8}$$

где $\xi = \partial \ln\rho_1/\partial p$. Таким образом, уравнение переноса для коэффициента объемного газосодержания α включает источник, пропорциональный α, скалярному произведению скорости газовой фазы $\mathbf{V} + \mathbf{W}$ на градиент давления ∇p и зависящему от уравнения состояния фактору ξ, который в приближении несжимаемости газовой фазы ρ_1 = const равен нулю. Для политропного процесса

$$\rho_1 = \mathrm{const}\, p^{1/\gamma} \tag{9}$$

и $\xi = 1/\gamma p$, что мы в дальнейшем и предполагаем. При небольших градиентах давления, имеющих место, когда плотность жидкой фазы относительно невелика и она движется относительно спокойно, что реализуется, например, для большинства газоводяных моделей заполнения и продувки в лабораторных условиях, источниковым членом в уравнении (8) можно пренебречь. Для сред газ - расплав градиенты давления, как правило, велики и влияние источникового члена в (8) становится заметным.

Уравнения (5), (6) и (8), дополненные выражениями для эффективного коэффициента турбулентной вязкости $\nu_э$, скорости газовой фазы относительно жидкой фазы W и уравнением состояния газа, которые могут быть выбраны, например, в виде (7), (4) и (9), образуют полную систему уравнений для описания динамики слабосжимаемой газожидкостной среды.

Присутствие в источниковом члене для α давления является аргументом в пользу применения при численном решении системы (4)-(9) естественных переменных скорость - давление $\mathbf{V}$ - p. При этом нами используется комбинированный метод расщепления, изложенный в [7] и объединяющий преимущества метода расщепления по физическим факторам [14] для уравнений гидродинамики и пересчетной разностной схемы [15] для уравнения конвективного переноса концентрации газа. В соответствии с этим методом численное решение системы (4)-(9) производится в три этапа:

$$\text{I)}\ \ \widetilde{\mathbf{V}} = \mathbf{V}^n + \tau\,[\,-(\mathbf{V}^n\nabla)\mathbf{V}^n + \nu_э\Delta\mathbf{V}^n + (1-\alpha^n)\,\mathrm{g}\,] \tag{10}$$

$$\widetilde{\alpha} = \alpha^n - \tau(\mathbf{V}^n\nabla)\alpha^n \tag{11}$$

$$\text{II)}\ \ \Delta\widetilde{p} = \nabla\widetilde{\mathbf{V}}/\tau \tag{12}$$

$$\text{III)}\ \ \mathbf{V}^{n+1} = \widetilde{\mathbf{V}} - \tau\nabla\widetilde{p} \tag{13}$$

$$\alpha^{n+1} = \alpha^n - \tau\,[\,(\mathbf{V}^n\nabla)\ \widetilde{\alpha}\ +\ \widetilde{\alpha}\ (\mathbf{V}^n + \mathbf{W})\,\nabla p^n/\gamma p^n\,] \tag{14}$$

где f^n – значение функции f в момент времени $n\tau$. Разностную аппроксимацию правых частей формул (10)-(14) производим на шахматной сетке стандартным образом [13].

Предлагаемый метод использовался для расчета гидродинамики расплава в ковше в двух случаях: при его заполнении и продувке инертным газом через шиберный затвор. В обоих случаях предполагалась цилиндрическая симметрия и использовались цилиндрические координаты. Программы расчета реализованы на языке Паскаль для IBM PC. Параметры турбулентности приняты следующими: $\mathrm{Re}_d = 2$, $b = 0{,}05$, показатель политропы $\gamma = 1$, что соответствует изотерме.

В задаче заполнения ковша граничные условия для всех вычисляемых величин задавались так же, как и в [7], причем, как и в [7], принято $W = 0$.

Предварительно для проверки адекватности модели была проведена серия вычислений заполнения емкости водой для режимов, соответствующих работе [7]. При этом, как мы и предполагали, были получены результаты, практически совпадающие с результатами расчетов, приведенных в [7]. Этим, с одной стороны, была доказана адекватность предлагаемого метода для описания гидродинамики воздушно-водяной среды при относительно спокойном ее движении (в данном случае при заполнении емкости), с другой показано, что сжимаемость газожидкостной среды в таких условиях не проявляется и можно использовать более простые методы ее описания, не учитывающие сжимаемость.

Сжимаемость газожидкостной среды сказывается, если ковш заполняется расплавом стали. Вследствие большой плотности расплава стали (7000 кг/м^3) и большой глубины проникновения газожидкостной струи (несколько метров) ее сжимаемость уже влияет на результаты вычислений. Расчеты проводились для 350-тонного ковша, имеющего следующие размеры: средний радиус R = 1,9 м, высота металла H = 4,9 м. Эффективный радиус струи был принят равным R_{cm} = 0,15 м, а доля инжектируемого струей воздуха – α_0 = 0,7. Скорость вхождения струи под поверхность для почти полностью заполненного ковша $V_{ст}$ = 8 м/с.

Для выявления роли сжимаемости среды рассматривали два варианта расчетных данных: полученных с помощью предлагаемого здесь метода, учитывающего сжимаемость среды (вариант *А*), и полученных в предположении ее несжимаемости (вариант *Б*). Из расчетов следует, что характер движения расплава в ковше в целом для вариантов *А* и *Б* одинаков. Различие вариантов *А* и *Б* начинает проявляться в поле концентраций газовой фазы. Это связано с тем, что при больших α сжимаемость газожидкостной среды сказывается больше, чем при малых α. В результате общее газосодержание в струе в случае *А* ниже и архимедова сила меньше тормозит струю, чем в случае *Б*. Это приводит к большей для варианта *А* глубине проникновения струи для варианта *А*. Из полученных данных следует, что наибольшее различие значения скоростей расплава для вариантов *А* и *Б* наблюдается на глубинах, примерно соответствующих максимальной глубине проникновения струи, и чем ближе к оси симметрии, тем больше. Величины скоростей для обоих вариантов на расстояниях от оси ковша, больших половины радиуса, практически не различаются. Обращает на себя внимание совпадение для обоих вариантов всех данных (изолиний α и графиков скоростей) в верхней части ковша. Это наводит на мысль, что все различие рассматриваемых вариантов в данном случае обусловлено ферростатическим давлением, что и подтверждается контрольным расчетом с выключением динамического давления при вычислении источникового слагаемого в уравнении (8).

Полученные результаты показывают, что учет сжимаемости среды газ - расплав приводит к уточнению скоростей расплава в случае заполнения ковша и его продувки в пределах 10%. Ясно, что значения прочих параметров, существенно влияющих на результат расчета, таких, как параметры турбулентности или скорость газовой фазы относительно расплава *W,* должны обеспечивать такую точность. Иначе сжимаемость среды газ - расплав при вычислении скоростей расплава можно не учитывать. Однако вследствие более существенного различия коэффициентов газосодержания в вариантах *А* и *Б* учет сжимаемости может значительно повлиять на другие параметры, например тепловые характеристики.

Отметим, что принятое в настоящей работе уравнение состояния (9) может быть обобщено. Можно, например, учесть возможность схлопывания газового пузыря при достижении критического давления. Можно также учесть в уравнении состояния зависимость от температуры. В этом случае источниковый член в уравнении (8) приобретет дополнительную составляющую, пропорциональную произведению α на субстанциональную производную температуры. Важным также кажется уточнение выражения для диффузионной скорости газовой фазы *W* в зависимости от характера движения среды (скорости среды и ее производных, а также параметров турбулентности). Эти вопросы оказываются важными при решении некоторых задач тепломассопереноса из области металлургии стали и мы намерены рассмотреть их в дальнейшем.

Выводы.

1. Предложенный численный метод позволяет адекватно описывать движение газожидкостных сред любой плотности (в том числе и с расплавами в качестве несущей жидкости) при малых коэффициентах объемного газосодержания в приближении $\rho_1/\rho_0 = 0$.

2. Рассмотренный метод может быть применен, например, для изучения гидродинамики расплава в ковше при его заполнении. В этом случае достаточно учитывать лишь атмосферное и ферростатическое давление, а динамическим давлением можно пренебречь.

Обозначения

V, V – скорость среды и ее величина; W – диффузионная скорость газовой фазы; g – ускорение свободного падения; ρ, ρ_0, ρ_1 – плотности среды, жидкой и газовой фаз; p – давление; $\widetilde{p} = p / \rho$, α_0, α, μ, ν, σ – коэффициенты газосодержания в струе, газосодержания среды, динамической и кинематической вязкостей, поверхностного натяжения; $\nu_э$ – эффективный коэффициент кинематической вязкости, Re_d, b – его параметры: сеточное число Рейнольдса и отношение длины перемешивания к шагу сетки; y – расстояние по оси, перпендикулярной потоку; $r_п$ – радиус пузыря газа; γ – показатель политропы; R, H – радиус и высота емкости; $R_{ст}$ – радиус струи; t – шаг по времени; d – шаг сетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсентьев П. П., Квитко М. П. Конвертерный процесс с донным дутьем. - М., 1983.
2. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали. - М., 1976.
3. Баканов К. П., Бармотин И. П. и др. Рафинирование стали инертным газом. - М., 1975.
4. Чернятевич А. Г., Наливайко А. П., Приходько А. А. и др.//Металлы. 1988. № 2. С. 13-18.
5. Яковлев Ю. Н., Харченко С. В., Тарапай М. А. и др.//Металлургия и коксохимия. 1972. № 30. С. 83-88.
6. Охотский В. Б., Войтюк К. В., Шибко А. В. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1991. № 1. С. 17-19.
7. Огурцов А. П., Яковлев Ю. Н., Самохвалов С. Е. и др.//ИФЖ. 1992. Т. 63, № 3. С. 358-363.
8. Зекели Дж., Эль-Кадах Н. Х., Гревест Дж. А. // Инжекционная металлургия. - М., 1982. С. 65-75.
9. Бакакин А. В., Хорошилов В. О., Гальперин Г. С.//Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 9. С. 51-54.
10. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. - М., 1978.
11. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем. - М., 1976.
12. Охотский В. Б., Чернятевич А. Г., Просвирин К. С. и др.//Изв. вузов Черная металлургия. 1973. № 5. С. 24-26
13. Огурцов А. П., Самохвалов С. Е. Численные методы исследования гидродинамических и тепломассопереносных процессов сталеплавильного производства. Киев, 1993.
14. Белоцерковский О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред. - М., 1984.
15. Никитенко Н. И.//ИФЖ. 1986. Т. 5, № 3. С. 476-482.

пост. 30.05.06.

