

Численное моделирование процессов перемешивания при продувке ванны агрегата «ковш-печь»

Е.Н. КУЛИКОВ, В.Ф. КОМАРОВ, В.В. БЕЛОУСОВ

Донецкий национальный университет

Исследованы различные способы моделирования переноса газовой фазы. На основании результатов численного эксперимента предложена математическая модель, наиболее адекватно отражающая процесс продувки и учитывающая его многофакторность.

Досліджено різні способи моделювання переносу газової фази. На підставі результатів чисельного експерименту запропонована математична модель, що найбільш адекватно відображає процес продувки та враховує його багатofакторність.

A various ways of modeling of gas-phase transferring were investigated. On the basis of results of numeral experiment a mathematical model is offered, most adequately reflecting the process of blowing out and considering its factorial multiplicity.

Продувка (барботажа) металла в ковш-печи с целью его гомогенизации по составу и температуре находит в современной металлургии все более широкое применение. В тоже время, возникающие в агрегате, гидродинамические и теплофизические процессы недостаточно изучены, что приводит к выбору неверных дутьевых режимов, а, следовательно, и к снижению качества отпускаемой продукции. Поэтому изучение характера гидродинамических потоков при перемешивании расплава представляет большой интерес для ковшовой металлургии.

В литературе, посвященной процессам барботажа, описано несколько различных подходов в моделировании продуваемой системы [1-2]. В настоящей работе, сравниваются различные модели переноса газовой фазы, а также различные способы учета процесса барботажа.

Целью работы является разработка модели, адекватно отражающей процесс барботажа и учитывающей его многофакторность.

Выбор скоростной модели

Моделирование осуществлялось с помощью системы уравнений, включавшей в себя уравнения Навье-Стокса, теплопроводности, неразрывности и переноса газовой фазы [3].

Во всех рассмотренных моделях процесса продувки газосодержание рассчитывается на основе информации о поле скоростей газовой фазы. Поэтому, в первую очередь были исследованы различные способы задания скорости газа \vec{v}_g , которые можно классифицировать, как показано ниже.

Односкоростной способ: для любой точки ванны ковш-печи: $\vec{v}_g = \vec{v}_m$, где \vec{v}_m – скорость металла.

Двухскоростной способ: горизонтальная составляющая скорости газа во всех точках равна нулю, а вертикальная задается следующим образом:

- *первый вариант:* в случае, когда границы барботажной зоны непосредственно не задаются, принимается, что для всех точек расплава: $v_{gy} = v_{g0}$, где v_{gy}

– вертикальная составляющая скорости газовой фазы, v_{g0} – скорость газа на срезе фурмы;

- *второй вариант:* в случае, когда границы барботажной зоны задаются строго, принимается, что во всех точках барботажной зоны: $v_{gy} = v_{g0}$;
- *третий вариант:* в случае, когда границы барботажной зоны определяются строго, вертикальная составляющая скорости газовой фазы задается следующим образом [4]:

на оси зоны: $v_{gy} = v_{g0}$;

$$\text{на расстоянии } y \text{ от оси: } \frac{v_{gy}}{v_{g0}} = e^{-\frac{y^2}{r^2}}, \quad (1)$$

где r – радиус барботажной зоны.

Результаты расчета газосодержания с использованием вышеуказанных способов представлены на рис. 1.

Согласно визуальным наблюдениям реального агрегата ковш-печь, уже приблизительно через 10 секунд продувки пузыри газа появляются на зеркале металла. На рис. 1, а приведено расчетное распределение газовой фазы через 10 секунд продувки с использованием односкоростного подхода. Как видно из рисунка, величины скорости движения металла, возникающего вследствие естественно-гравитационной конвекции, недостаточны для получения нормального распределения газовой фазы по ванне агрегата. Более того, если продолжить расчет с условием, что зона барботажа строго не задается, то получится картина, представленная на рис. 1. б. Здесь уже видно влияние нисходящих потоков металла, которые затягивают газ вглубь ванны, что не соответствует реальному поведению газовой фазы.

На рис. 1. в приведен результат расчета 10 секунд продувки с использованием двухскоростного подхода. В этом случае газ не только не покидает границы барботажной зоны (при строгом и нестрогом ее определении), но и доходит до верхней части ванны.

Исходя из приведенных результатов, все последующие расчеты проводились с использованием двухскоростного подхода.

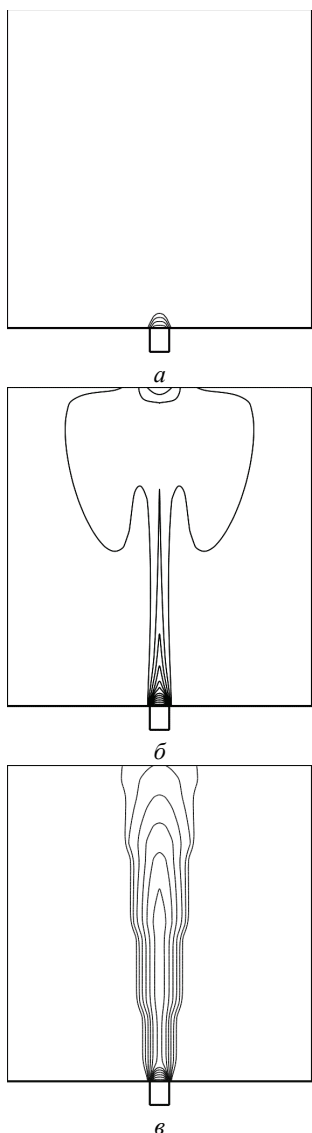


Рис. 1. Распределение газовой фазы при различных подходах в выборе скоростной модели: *a*, *б* – односкоростной, *в* – двухскоростной

Определение зоны барботажа

Рассмотрены следующие варианты определения барботажной зоны.

1) Барботажная зона задавалась строго в виде перевернутого усеченного конуса с основаниями, соответствующими фурме и аргоному пятну на поверхности ванны. Начальное газосодержание задавалось граничным условием $\beta = 1$ в области фурмы. Расчет уравнения газосодержания производился только в пределах указанной области. На каждом уровне горизонтальное распределение газовой фазы задавалось выражением, аналогичным (1).

2) В правую часть уравнения газосодержания добавлялся диффузионный член $D\nabla^2\beta$, где D – коэффициент турбулентной диффузии. Начальное газосодержание задавалось граничным условием $\beta = 1$ в об-

ласти фурмы. Расчет уравнения газосодержания производился на всей области ванны ковш-печи.

3) В правую часть уравнения газосодержания добавлялись диффузионный член $D\nabla^2\beta$ и источниковый $\frac{Q}{\frac{4}{3}\pi r^3 V}$, который учитывался только в области около продувочной фурмы [1]. Здесь Q – объемный расход газа, r – радиус пузырька, V – объем зоны, в которую поступает газ. Расчет уравнения газосодержания производился на всей области ванны ковш-печи.

Результаты расчетов по всем трем вариантам приведены на рис.2. Расчет осуществлялся для продувки ковш-печи емкостью 90 тонн в течение 1 минуты с интенсивностью 100 л/мин.

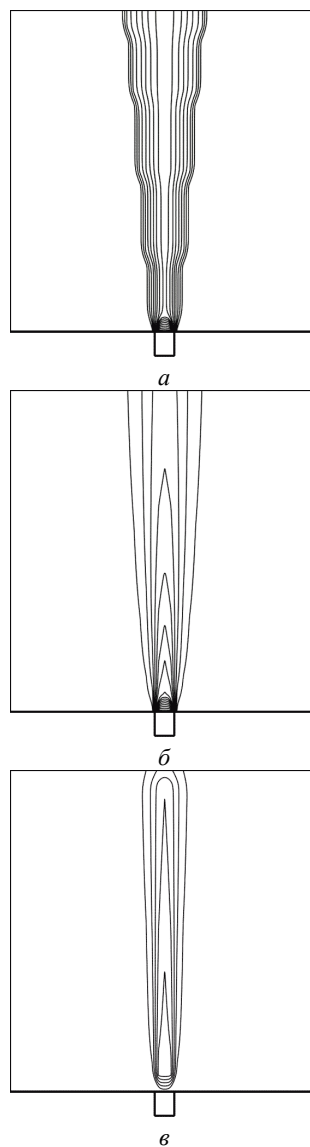


Рис. 2. Изолинии распределения газосодержания вдоль оси барботажной зоны: *a* – первый вариант, *б* – второй вариант, *в* – третий вариант

В работе [5] приводится схематическая структура барботажной зоны для разной интенсивности дутья. Если сравнивать полученные результаты с данными этой работы, то видно, что первый вариант соответствует пробой ванны, что невозможно при указанном расходе газа. Второй же вариант, по форме, хорошо сочетается с режимом турбулентной продувки.

При моделировании по третьему варианту получается, на наш взгляд, недостаточно высокое газосодержание, что видно из рисунка.

Таким образом, при исследовании различных моделей продувки было принято решение использовать второй вариант определения зоны барботажа.

Учет продувки в уравнении Навье-Стокса

Учет продувки осуществлялся в двух вариантах:

1) влияние газовой фазы учитывалось в уравнении Навье-Стокса только за счет выражения

$$\beta g, \quad (2)$$

где β – коэффициент газосодержания; g – ускорение свободного падения

2) модель [1], в которой продувка учитывалась за счет добавления к уравнению Навье-Стокса как выражения (2), так и выражения

$$\frac{3}{8} \frac{\xi \beta (v_{gy} - v_{my})^2}{R},$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления пузыря, v_{my} – вертикальная составляющая скорости металла, R – характерный радиус ячейки.

Для подтверждения адекватности модели расчет производился с использованием данных о размерах агрегата, приведенных в статье [2]: радиус ванны – 0,3 м; высота ванны – 0,6 м.

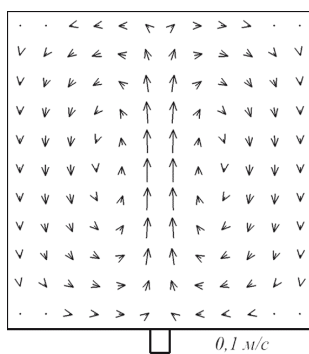


Рис. 3. Распределение скоростей металла в ванне ковш-печи

В результате численного эксперимента в приближении холодной модели получены распределения скоростей металла (рис. 3), величины которых состави-

ли 0,1 м/с, что согласуется с результатами работы статьи [2]. При этом сравнение данных, полученных по каждой из моделей барботажа, не выявило существенных отличий.

На основании вышеприведенных результатов для дальнейшего исследования процесса продувки выбран второй вариант, поскольку он учитывает наибольшее число параметров: разность скоростей металлической и газовой фаз, коэффициент гидравлического сопротивления пузыря и размер ячейки. При этом учет всех вышеуказанных параметров не оказывает существенного влияния на скорость расчета.

Выводы

Двухскоростной подход в задании поля скоростей газовой фазы приводит к более естественным результатам.

При использовании в уравнении расчета газосодержания диффузионного члена $D\nabla^2\beta$, получаемое распределение газовой фазы соответствует режиму турбулентной продувки.

Для дальнейшего исследования выбрана модель продувки, представленная в [1], поскольку, в сравнении с другими моделями, она учитывает наибольшее число физических параметров.

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет судить об адекватности барботажной модели и возможности ее применения для исследования реального агрегата «ковш-печь».

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакакин А.В., Хорошилов В.О. О математическом описании течения металла в ковше при продувке инертным газом. // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1981 № 1. С. 143 – 144.
2. Зекели Дж., Эль-Кадах Н.Х., Грэвет Дж.А. Анализ гидродинамических явлений в ковшах при холодном моделировании // В кн. Инжекционное моделирование, 1980. – Лелау, Швеция, 1980, М. Металлургия, 1982, С. 65 – 75.
3. Дюдкин Д.А., Бать С.Ю., Гринберг С.Е., Маринцев С.Н. Производство стали на агрегате ковш-печь. – Донецк: Юго-Восток, 2003. – 306 с.
4. Лернер Т., Карлссон Г., Шао Цечанг. Потoki жидкости и металлургические реакции в продуваемом газом металле // В кн. Инжекционное моделирование 80.- Лелау, Швеция, 1980, М. Металлургия. 1982.
5. Гуляев А.Г., Коминов С.В., Окорочков Б.Н., Бакума С.С. Математическая модель процесса взаимодействия газовых струй с жидкой металлической ванной // Черная металлургия. 2000. № 7. С. 20.

пост. 11.05.07.