

СОПРЯЖЁННАЯ ТРЁХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И МАССОПЕРЕНОСНЫХ ПРОЦЕССОВ В ШЛАКОВОЙ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗАХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОНВЕРТЕРА

А. Н. СОКОЛ

Днепродзержинский государственный технический университет

Предложена сопряжённая трёхмерная математическая модель гидродинамических и массопереносных процессов в шлаковой и металлической фазах конвертера, которые имеют место при комбинированной продувке расплава металла при помощи верхней многосопловой фурмы с использованием донного продувания. Разработанная математическая модель может быть использована для изучения закономерностей циркуляционных процессов в объёме металлургического конвертера при разных положениях верхней фурмы и разном размещении донных сопел.

Представлено спряжену тривимірну математичну модель, яка описує гідродинамічні та масопереносні процеси в шлаковій та металевій фазах металургійного конвертера, що мають місце при комбінованому продуванні розплаву металу за допомогою верхньої багатосоплової фурми з використанням донного дуття. Розроблена математична модель може бути використана для вивчення закономірностей циркуляційних процесів в об'ємі металургійного конвертера при різних положеннях верхньої фурми та різному розташуванні донних сопел.

The attended three-dimensional mathematical model of hydrodynamic and mass transfer processes in the slag and metallic phases of converter, which take place at the combined blowing out of metals melt through an overhead multinozzle tuyere with the use of the ground blowing through, is created. The developed mathematical model can be used for the study of conformities to law of circulation processes in the volume of metallurgical converter at different positions of overhead tuyere and different placing of the ground nozzles.

Постановка проблемы. Сегодня принципы организации дутьевого режима при работе металлургического конвертера являются одинаковыми для конвертеров самой различной ёмкости. При этих условиях уменьшение относительного количества циркулирующего металла с увеличением ёмкости неизбежно. Циркуляция определяет в значительной мере скорость процессов переноса, в частности скорость реакции углерода с кислородом. Перемешивание металла, определяемое скоростью циркуляции, влияет на общую скорость гетерогенных физико-химических превращений. Отсутствие в период интенсивного обезуглероживания ванны достаточного по высоте слоя вспененного шлака, способного перекрыть торец наконечника кислородной фурмы, особенно в условиях “малошлаковой” технологии продувки, сопровождается интенсивным выносом за пределы реакционной зоны мелких капель металла и шлака с формированием настывшей на поверхности фурмы, конусной части футеровки и горловине конвертера. Знание гидродинамической картины в полости конвертера даёт возможность на её основании проводить расчеты переносных процессов, а также проводить численные эксперименты для определения рационального дутьевого режима (уменьшение выноса капель, увеличение скорости циркуляции и относительного количества циркулирующего металла).

Анализ публикаций. Инженеры и учёные на протяжении последних двадцати лет активно интересуются гидродинамическими процессами в полости конвертера. В настоящее время инженеры всего мира в своей работе активно применяют подобные программные пакеты. Примером тому могут служить программные комплексы ANSYS CFX и FLUENT от компании ANSYS Inc., FLOW-3D от Flow Science Inc., STAR-CD от CD-adapco. Крупные программные комплексы явля-

ются коммерческим продуктом и, следовательно, полученные с их помощью результаты расчётов не разглашаются и не публикуются. Стоимость таких программных комплексов очень велика. По этой причине отдельными группами учёных предпринимаются попытки создания более специализированных и доступных решений для моделирования, в частности для моделирования процессов в металлургии.

В Днепродзержинском государственном техническом университете на протяжении более двадцати лет разрабатываются математические модели, описывающие различные аспекты процессов в металлургических агрегатах. В том числе ведутся работы по описанию гидродинамических и переносных процессов в объёме металлургического конвертера. На данный момент усилиями сотрудников кафедры прикладной математики создана квазитрёхмерная математическая модель [1] и трёхмерные математические модели [2, 3].

Цель работы. Целью работы стало развитие существующих квазитрёхмерной и трёхмерных математических моделей в направлении учёта наличия включений газовой фазы в металлической фазе конвертера, а также в направлении обеспечения возможности моделировать продувку верхней фурмой с неравномерным по углу расположением сопел и наличием донных сопел.

Изложение материалов исследования. Существующие квазитрёхмерная и трёхмерные математические модели не учитывают наличие включений газовой фазы в металлической фазе конвертера либо не позволяют моделировать продувку с помощью фурмы с неравномерным по углу расположением сопел. Этого недостатка лишена представленная математическая модель сопряжённых гидродинамических и массопереносных процессов в объёме металлургического конвертера.

Предложенная математическая модель базируется на модели, опубликованной в работе [3], в основу которой заложены следующие исходные предположения:

А. В отношении геометрии расчётной области:

- форма реакционной зоны, которая образуется при взаимодействии струи одного сопла с металлом, имеет вид параболоида, следовательно, форма реакционной зоны от многосопловой фурмы несимметрична по углу;
- уровень металла и шлака в конвертере, а также форма реакционной зоны не изменяются с течением времени.

В. В отношении гидродинамики среды:

- среда в целом полагается эффективно сжимаемой за счёт наличия источников газовой фазы и её ненулевой диффузионной скорости движения;
- поверхность шлака ровная, на ней отсутствуют волны и брызги;
- граница сопряжения металлической и газошлаковой зон является плоскостью и не меняется с течением времени;
- присутствуют внешние силовые воздействия в газошлаковой зоне (подъёмная сила газа);

Сделанные допущения позволяют динамику движения многофазной среды описать следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} + \nu' \Delta \vec{V} - \vec{\nabla} \tilde{p} - \alpha \vec{g}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \Phi, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{V}) + \Phi_\alpha, \quad (3)$$

где \vec{V} — барицентрическая скорость движения расплава;

α — концентрация газовой фазы в объёме;

\tilde{p} — динамическая составляющая давления, нормированная на плотность расплава;

ν' — эффективный коэффициент кинематической вязкости среды;

$\Phi = \Phi_\alpha - \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{W})$ — источник дивергенции поля скоростей;

$\Phi_\alpha = \psi_\alpha - \alpha \zeta \rho_0 \vec{g} \vec{V}_\alpha$ — эффективный объёмный источник концентрации газовой фазы;

ψ_α — объёмный источник концентрации газовой фазы, отличен от нуля в зоне контакта вдуваемого кислорода с металлом (на границе реакционной зоны) и в зоне формирования барботажного режима в местах установки донных сопел;

$\vec{V}_\alpha = \vec{W} + \vec{V}$ — скорость движения газовой фазы;

$\vec{W} = \vec{V}_\alpha - \vec{V}$ — диффузионная скорость движения газовой фазы;

\vec{g} — вектор ускорения свободного падения.

В отличие от базовой модели, представленной в работе [3], уравнения (1)-(3) решаются не только в области, которая занята шлаковой фазой, а и в области,

которая занята металлической фазой конвертера. Это позволяет исследовать

Система уравнений (1)-(3) дополняется граничными условиями. На твёрдых границах для скоростей принимаются условия непротекания и частичного прилипания:

$$\vec{V}_\perp \Big|_S = 0, \quad \vec{V}_\parallel \Big|_S = 0.$$

На границе металлической и шлаковой фаз для скоростей принимаются условия непротекания и частичной передачи импульса:

$$\vec{v}_\perp \Big|_S = 0, \quad \vec{V}_\parallel \Big|_{S-\delta} = K_V \vec{V}_\parallel \Big|_{S+\delta},$$

где K_V — коэффициент передачи импульса (в расчетах принимал значение от 0,2 до 1,0).

На оси симметрии конвертера для скоростей принимаются условия непротекания и свободного скольжения:

$$\vec{V}_\perp \Big|_S = 0, \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} \vec{V}_\parallel \Big|_S = 0.$$

Применяя к системе уравнений (1)-(3) метод расщепления по физическим факторам для несолоноидального движения, получаем следующую схему расщепления:

$$I \quad \vec{V} = \vec{V}^n + \tau R(\vec{V}^n, \alpha^n);$$

$$\alpha^{n+1,0} = \alpha^n, \quad p'^{n+1,0} = p'^n, \quad \vec{V}^{n+1,0} = \vec{V}^n; \quad (4)$$

$$II \quad \alpha^{n+1,k+1} = \alpha^n + \tau \left[-\vec{\nabla} \cdot (\alpha^{n+1,k} \vec{V}^{n+1,k}) + \Phi(\vec{V}^{n+1,k}, \alpha^{n+1,k}) \right]; \quad (5)$$

$$p'^{n+1,k+1} = p'^{n+1,k} + \omega \left[\Delta p'^{n+1,k} - (\vec{\nabla} \cdot \vec{V} - \Phi(\vec{V}^{n+1,k}, \alpha^{n+1,k})) / \tau \right]; \quad (6)$$

$$\vec{V}^{n+1,k+1} = \vec{V} - \tau \vec{\nabla} p'^{n+1,k+1},$$

где $R(\vec{V}, \alpha) = -(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} - \vec{\nabla} p' + \nu \Delta \vec{V} - \alpha \vec{g}$.

Эффекты турбулентности описываются трёхпараметрической алгебраической моделью, которая включает в себя изотропную составляющую эффективной вязкости, учитывает перенос вихрей вдоль потока и условия зарождения вихрей (модель Л. Прандтля):

$$\nu_e = \nu_0 + \frac{\Delta}{\text{Re}_\Delta} V + l^2 \left| \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \right|, \quad (7)$$

где ν_0 — изотропную составляющую эффективной вязкости;

Δ — характерный линейный размер ячейки расчётной сетки;

Re_Δ — сеточное число Рейнольдса;

V — модуль скорости в ячейке;

\vec{V} — скорость в ячейке;

l — длина перемешивания;

y — переменная, которая параметризует ось поперёк потока.

Поскольку уравнения математической модели решаются как в шлаковой, так и в металлической фазах многофазной среды в объёме конвертера, то появляется

принципиально новая возможность по сравнению с моделями в работах [1–3]. Она заключается в том, что можно учитывать донную подачу газа через донные сопла. Такая возможность актуальна, так как многие металлургические предприятия переходят к комбинированной продувке конвертеров. Очевидно, что схема расположения донных сопел и соотношение количества подведенного верхнего дутья к количеству донного существенно влияют на циркуляционные процессы в объёме конвертера.

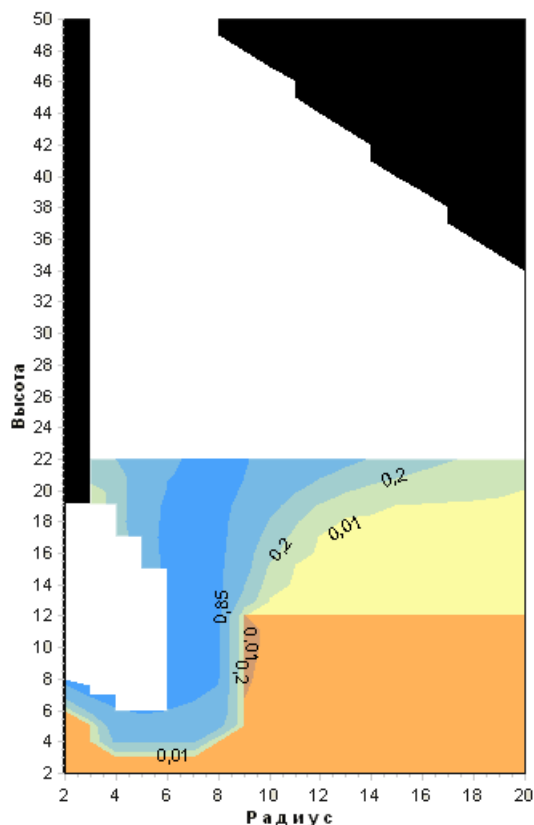


Рис. 1. Графическое представление распределения газа на половине осевого сечения конвертера

Уравнения предложенной математической модели были записаны в цилиндрических координатах и аппроксимировались конечными разностями на шахматной сетке. Полученные алгебраические уравнения решались методом простой итерации.

Разработанное программное обеспечение позволило провести серию численных экспериментов с разными значениями определяющих параметров. Рассмотрим некоторые из них. На рис. 1 представлена половина осевого сечения конвертера с нанесенным разбиением на области (фурма, стенка, металлическая фаза, шлаковая фаза) и с градиентной заливкой, с помощью которой представлено концентрацию газовой фазы.

Очевидно, что лишь незначительная часть газа попадает в металлическую фазу. Это происходит в области контакта струи кислорода с металлической фазой. Для интенсификации взаимодействия дутья с расплавом применяют комбинированную технологию продувки. На рис. 2 представлена половина осевого сечения конвертера с распределением концентрации газовой фазы и

проекциями векторов бариецентрической скорости среды.

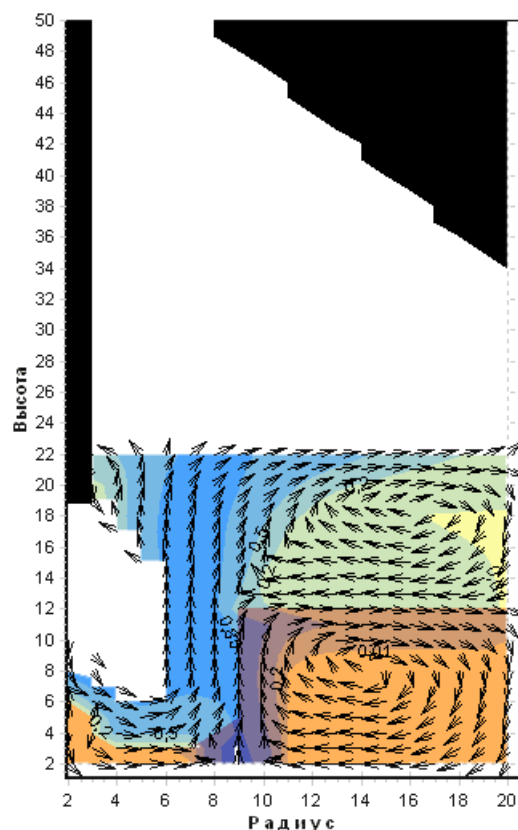


Рис. 2. Графическое представление распределения газа на половине осевого сечения конвертера при комбинированной продувке (положение донных сопел 1)

Подаваемый через днище в объём конвертера газ частично объединяется с потоками, которые образуются в реакционной зоне. Другая его часть увлекается в толщу металла. При неудачном расположении донных сопел, возможно накопление газа в толще металла, что приводит к выносу металлических капель в область шлаковой фазы и вспениванию шлака. Такой вариант проиллюстрирован на рис. 3.

На рис. 4 представлено трёхмерное распределение газовой фазы в виде линий равной концентрации, соответствующее результатам расчета, приведенным на рис. 2. Наличие донного подвода газа приводит к изменению поля скоростей в металлической фазе конвертера, а также к повышению в металлической фазе содержания газа. В совокупности это приводит к интенсификации физико-химических превращений и должно сократить время, затрачиваемое на продувку конвертера.

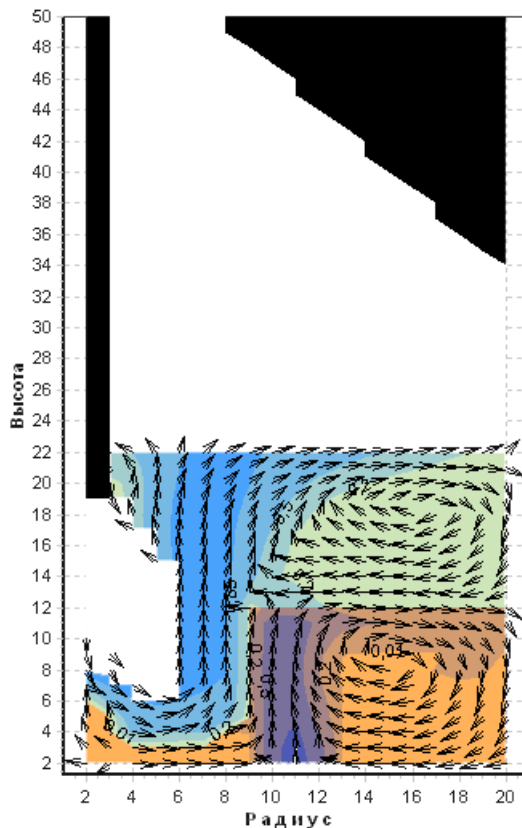


Рис. 3. Графическое представление распределения газа на половине осевого сечения конвертера при комбинированной продувке (положение донных сопел 2)

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Получили развитие существующие квазитрёхмерная и трёхмерные математические модели в направлении учёта наличия включений газовой фазы в металлической фазе конвертера, а также обеспечения возможности моделировать комбинированную продувку (верхняя фурма с неравномерным по углу расположением сопел и наличие донной подачи газа).

Предложенная математическая модель позволяет изучить закономерности циркуляционных процессов шлаковой и металлической фазах кислородного конвертера при разном расположении донных сопел и разных соотношениях количества верхнего и донного дутья.

В дальнейшем планируется развитие математической модели в направлении усложнения геометрии расчетной области (учёт придонной конусности, возможность установки верхней фурмы под углом к вертикальной оси конвертера, учёт заваленного в объём конвертера металлического лома) и учёта теплофизических процессов, которые имеют место при конвертерной плавке.

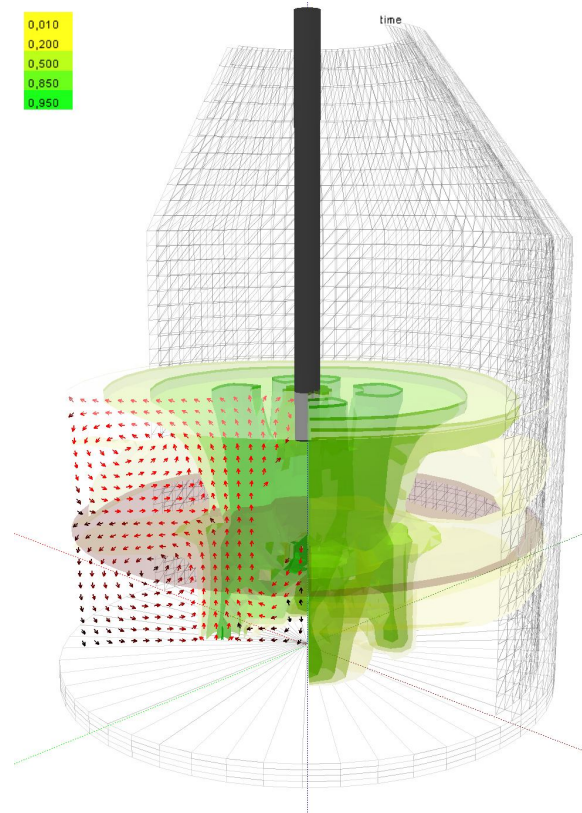


Рис. 4. Поверхности равной концентрации газовой фазы и проекции векторов скорости

ЛИТЕРАТУРА

1. Самохвалов С. Е. Квазитрёхмерная математическая модель гидродинамических процессов в полости конвертера / С. Е. Самохвалов, А. Н. Сокол // Математичне моделювання. — 2008. — Дніпродзержинськ : ДДТУ, № 2(19). — С. 67—70.
2. Зуев О. І. Тривимірна математична модель гідродинамічних процесів у порожнині конвертера під час продування розплаву із використанням багатосоплової фурми / О. І. Зуєв // Математичне моделювання. — Дніпродзержинськ : № 2(14). — 2005. — С. 63—68.
3. Сокол А. Н. Математическое моделирование гидродинамических процессов в полости конвертера во время верхней продувки в трёхмерной постановке / А. Н. Сокол // Вестник Херсонского национального технического университета. — 2010. — Херсон : ХНТУ, № 3(39). — С. 448—454.