

## Квазитрёхмерная математическая модель гидродинамических процессов в полости конвертера

САМОХВАЛОВ С.Е., СОКОЛ А.Н.

Днепродзержинский государственный технический университет

В данной работе предпринята попытка построения квазитрёхмерной математической модели, которая описывает процессы, протекающие в полости конвертера во время продувки его кислородом с помощью верхней продувочной фурмы.

В цій роботі ми спробували побудувати математичну модель, що описує процеси, які протікають у порожнині конвертера під час продування його киснем за допомогою верхньої продувочної фурми.

In current work we tried to create quasi-three-dimensional mathematical model which describes the processes, taking place in the cavity of converter during scavenging his by oxygen with the aid of the upper blow-off tuyere.

**Вступление.** Гидродинамика многофазной среды в полости конвертера (жидкого металла и газошлаковой суспензии) в значительной степени определяет протекание всех других процессов: теплопереносных, массопереносных и т.д. Знание её необходимо и для выбора оптимального режима продувки.

**Постановка задачи.** В данной работе предпринята попытка построения квазитрёхмерной математической модели, которая описывает процессы, протекающие в полости конвертера во время продувки его кислородом с помощью верхней продувочной фурмы. Модель описывает гидродинамику многофазной среды (имеем несколько фаз: газ-металл, газ-шлак, реакционная зона), а также перенос концентрации газовой фазы. Гидродинамика и перенос газовой фазы рассчитываются по всему объёму конвертера одновременно. Программная реализация этой модели может помочь при исследованиях физических процессов в полости конвертера с целью оптимизации технологического процесса.

**Математическая модель.** В основу модели закладываются следующие исходные предположения:

А. По геометрии расчётной области:

- конвертер цилиндрически симметричен и имеет геометрические характеристики, представленные на рис. 1;
- форма реакционной зоны полагается имеющей вид параболоида;
- верхняя продувочная фурма имеет 4 сопла;
- уровень металла и шлака в конвертере, а также форма реакционной зоны не изменяются с течением времени.

В. По гидродинамике среды:

- зеркало шлака является ровным, на нём отсутствуют волны и брызги;
- граница сопряжения металлической и шлаковой фаз является плоскостью и не меняется с течением времени;
- расплав металла полагается эффективно сжимаемым;
- присутствуют внешние силовые воздействия на расплав (подъёмная сила инжектированного воздуха);
- расплав в объёме считается турбулизованным, турбулентный характер движения рас-

плава учитывается с помощью трёхпараметрической алгебраической модели.

Сделанные допущения позволяют динамике движения расплава и газошлаковой суспензии описать следующей системой уравнений [1]:

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

$$\nabla \cdot \vec{v} = \psi - \alpha \frac{\partial \ln \rho_2^0}{\partial p} \rho_1^0 \vec{g} (\vec{v} + \vec{W}) - \nabla \cdot (\alpha \vec{W}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\nabla \cdot (\alpha \vec{v}) + \psi - \alpha \frac{\partial \ln \rho_2^0}{\partial p} \rho_1^0 \vec{g} (\vec{v} + \vec{W}) - \nabla \cdot (\alpha \vec{W}), \quad (3)$$

где  $\vec{v}$  – барицентрическая скорость движения расплава;  $\alpha$  – концентрация газовой фазы в объёме;  $\tilde{p}$  – давление, нормированное на плотность расплава;  $v'$  – эффективный коэффициент кинематической вязкости среды;  $\psi$  – объёмный источник газовой концентрации;  $\rho_1^0$  и  $\rho_2^0$  – истинные плотности каждой из сред (металл и шлак);  $\vec{W}$  – скорость движения газовой фазы;  $\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения.

Для удобства обозначим:

$$\Phi(\vec{v}, \alpha) = \psi - \alpha \frac{\partial \ln \rho_2^0}{\partial p} \rho_1^0 \vec{g} (\vec{v} + \vec{W}) - \nabla \cdot (\alpha \vec{W}).$$

В соответствии с методом расщепления по физическим факторам [2] на каждом временном шаге  $\tau$  отщепляем слагаемое с давлением:

$$\tilde{\vec{v}} = \vec{v}^n + \tau \left( (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + v' \Delta \vec{v} + (1 - \alpha) \vec{g} \right), \quad (4)$$

$$\vec{v}^{n+1} = \tilde{\vec{v}} - \tau (\nabla \tilde{p}). \quad (5)$$

С целью получения уравнения для давления воспользуемся уравнением (2), требуя его точного выполнения на  $n+1$ -м временном слое:

$$\nabla \cdot \vec{v}^{n+1} = \psi - \alpha^{n+1} \frac{\partial \ln \rho_2^0}{\partial p} \rho_1^0 \vec{g} (\vec{v}^{n+1} + \vec{W}) - \nabla \cdot (\alpha^{n+1} \vec{W}). \quad (6)$$

Находя дивергенцию обеих частей формулы (5) и учитывая равенство (6), на  $n+1$ -м временном слое получим:

$$\Delta \tilde{p}^{n+1} = \frac{[\nabla \cdot \tilde{\vec{v}} - \Phi(\vec{v}^{n+1}, \alpha^{n+1})]}{\tau}$$

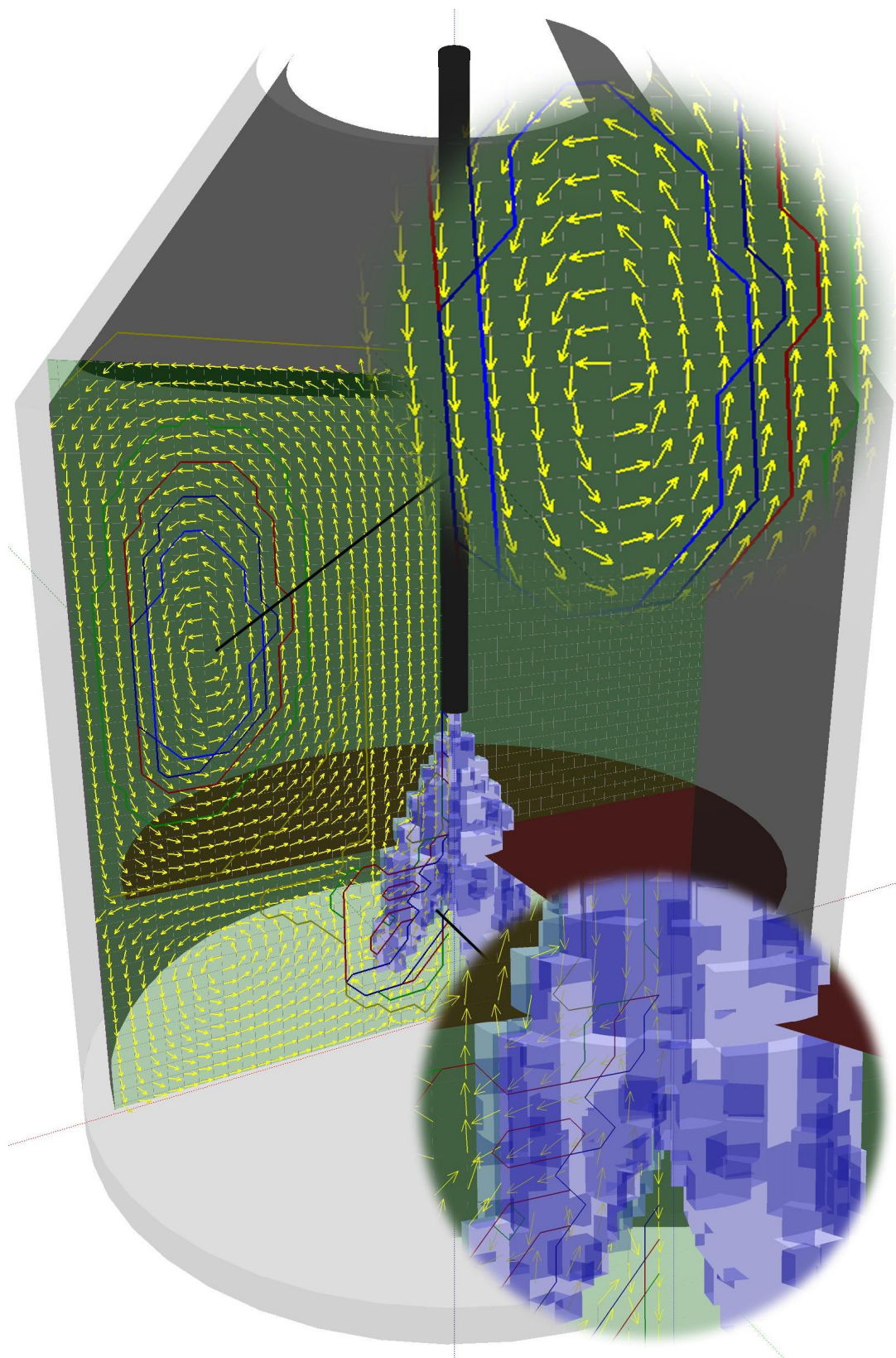


Рис. 1. Изображение конвертера с нанесенной на него графической информацией

Выбираем для уравнения (4) явную схему расчёта, а для уравнения (3) – неявную. Тогда для определения характеристик движения среды получим следующую систему уравнений:

$$\tilde{v} = \tilde{v}^n + \tau \left[ \left( \tilde{v}^n \cdot \tilde{\nabla} \right) \tilde{v}^n + v \Delta \tilde{v}^n + (1 - \alpha^n) \tilde{g} \right], \quad (7)$$

$$\alpha^{n+1} = \alpha^n + \tau \left[ \tilde{\nabla} \cdot \left( \alpha^{n+1} \tilde{v}^{n+1} \right) + \Phi \left( \tilde{v}^{n+1}, \alpha^{n+1} \right) \right] \quad (8)$$

$$\Delta \tilde{p}^{n+1} = \frac{\tilde{\nabla} \tilde{v} - \Phi \left( \tilde{v}^{n+1}, \alpha^{n+1} \right)}{\tau} \quad (9)$$

$$\tilde{v}^{n+1} = \tilde{v} - \tau \tilde{\nabla} \tilde{p}^{n+1}. \quad (10)$$

На первом этапе (явные вычисления) без учёта поля давления  $p$  находится промежуточная скорость  $\tilde{v}$ , которая уравнению (2) в общем случае не удовлетворяет. На втором этапе (неявные вычисления) определяются газосодержание  $\alpha^{n+1}$  и давление  $\tilde{p}^{n+1}$ , а также с помощью значения давления «подправляется» промежуточная скорость  $\tilde{v}$  до значения  $\tilde{v}^{n+1}$ , которое уже удовлетворяет уравнению (2).

На втором этапе необходимо решать систему взаимосвязанных уравнений (8)-(10). Для этого используется метод итераций. Чтобы не решать на каждом итерационном шаге уравнение Пуассона (9), заменим его соответствующим эволюционным аналогом:

$$\tilde{p}' = \tilde{p} + \omega [\Delta \tilde{p} - R(\tilde{v}, \alpha)], \quad (11)$$

где

$$R(\tilde{v}, \alpha) = \Delta \tilde{p} - \frac{\left[ \tilde{\nabla} \tilde{v} - \left( \psi - \alpha \frac{\partial \ln \rho_2^0}{\partial p} \rho_1^0 \tilde{g} (\tilde{v} + \tilde{W}) - \tilde{\nabla} \cdot (\alpha \tilde{W}) \right) \right]}{\tau},$$

с некоторым эволюционным параметром  $\omega$ , обеспечивающим сходимость эволюционного процесса. Такая замена позволяет нам решать все уравнения второго этапа в одном итерационном цикле, что экономит машинное время, необходимое для расчётов.

Система уравнений (7)-(10) дополняется граничными условиями для давления, скорости и газовой концентрации. Они выбраны условиями непротекания и частичного прилипания на твёрдых границах, непротекания и свободного скольжения на оси симметрии; на границе раздела металла и шлака выбраны условия свободного протекания газовой концентрации и импульса.

Учёт турбулентного характера движения расплава проводился путём замены коэффициента кинематической вязкости среды его эффективным аналогом, который моделируется с помощью двухпараметрической модели турбулентности.

$$v' = v + \frac{\Delta}{\text{Re}_\Delta} v_\Delta + l^2 \left| \frac{dv}{dy} \right|, \quad (12)$$

где  $v$  – изотропная (молекулярная) составляющая вязкости;  $\text{Re}_\Delta$  – сеточное число Рейнольдса;  $\Delta$  – характерный размер ячейки;  $v_\Delta$  – скорость в пределах одной ячейки;  $y$  – переменная, параметризующая ось, перпендикулярную движению потока.

Для описанной выше модели был разработан модуль визуализации расчётной информации, в некотором смысле аналогичный использованному в [3]. Результат его работы показан на рис. 1, а именно:

- схематическое изображение конвертера;
- уровень металла в конвертере (красно-коричневый диск внизу);
- уровень шлака в конвертере (серый диск сверху);
- верхнюю продувочную фурму, с помощью которой вдувается кислород;
- реакционную зону (тело синего цвета, образованное четырьмя параболоидами);
- плоскость поперечного сечения конвертера с изображенными на ней изолиниями газовой концентрации и единичными векторами скорости движения газометаллической и газошлаковой фаз.

Как уже упоминалось, модель гидродинамических процессов в полости конвертера, описываемая в данной работе, является квазитрёхмерной. Это заключается в том, что геометрия задачи учитывается нами в трёхмерной постановке (несимметричная по углу поворота форма реакционной зоны), но фактический расчёт ведётся в двухмерной постановке. Т.е. перед началом счёта необходимо задать угол поворота плоскости осевого сечения конвертера, в которой нам необходимо провести расчёты, и провести расчёт; затем следует изменить угол и вновь провести расчёт и т.д. Тем не менее, такая организация расчётов даёт возможность получить трёхмерное представление о протекающем процессе в виде набора результатов последовательных расчётов с разным углом поворота плоскости, в которой выполняется фактический счёт. Очевидно, что такой подход в принципе не может учесть действие различных факторов на гидродинамику процесса в азимутальном направлении.

**Результаты.** Обратимся к результатам численных экспериментов, которые были получены с помощью программной реализации описанной модели. Расчёты проводились для стандартного 160-тонного конвертера в режиме продувки  $400 \frac{m^3}{мин}$ .

На рисунке 2 а изображена правая половина осевого сечения конвертера (на этом изображении продувочная фурма расположена слева) при угле  $\varphi = 0^\circ$ , соответствующая самой большой площади сечения реакционной зоны. На рисунке 2 б изображена половина осевого сечения конвертера при угле  $\varphi = 25^\circ$ , что практически соответствует самой маленькой площади сечения реакционной зоны. Напомним, что речь идёт об осевом сечении реакционной зоны, форму которой мы приближаем несколькими параболоидами.

Картина течений развивается и изменяется в течении первых 10-15 секунд процесса, а в дальнейшем стабилизируется и утрачивает временную зависимость. На рисунках приведены также изолинии концентрации газовой фазы, позволяющие судить о её распределении в объёме конвертера. Изолинии соответствуют следующим значениям газовой концентрации: 1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 0,9.

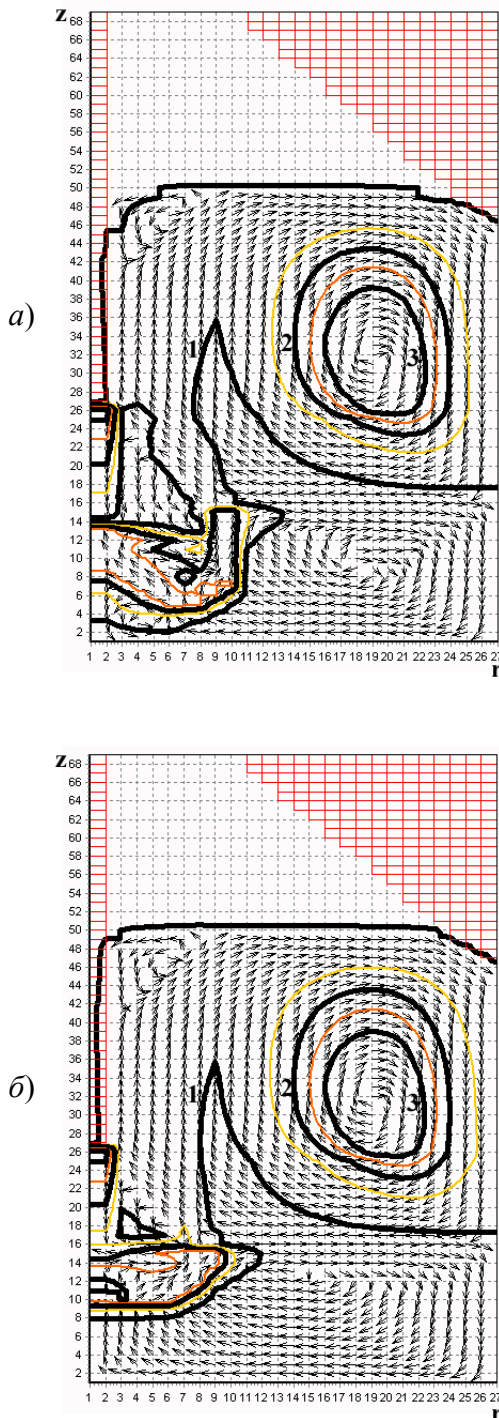


Рис. 2. Поле направлений скоростей шлаковой и металлической фаз и изолинии концентрации газовой фазы в объеме конвертера при различном значении  $\varphi$ : а)  $\varphi = 0^\circ$ ; б)  $\varphi = 25^\circ$ .

Как видно из рисунков в объеме расплава металла под влиянием потоков газа, вдуваемого в полость

конвертера и попадающего на зеркало металла (соответственно металлу передаётся часть импульса газовой струи), наблюдается макровихрь, направленный по часовой стрелке (в правой половине осевого сечения). Следует также отметить наличие микровихря в этой зоне, который располагается под реакционной зоной и имеет направление против часовой стрелки. Этот микровихрь заметно уменьшается при  $\varphi = 25^\circ$ , т.к., очевидно, воздействие факела на металлическую фазу в этом случае ослабляется.

Газошлаковая среда под влиянием движущихся вверх в прифурменной области объёмов газа вовлекается в вихреобразное движение. Это подтверждает отчётливо просматривающийся макровихрь в шлаковой зоне, направленный по часовой стрелке. Непосредственно же вблизи свободной поверхности шлака в прифурменной области наблюдается микровихрь, вызванный, по видимому, интенсивным выходом газа из объёма шлака.

### Выводы

Разработана квазитрёхмерная математическая модель, которая позволяет выполнить численные расчёты гидродинамических процессов, протекающих в полости конвертера во время верхней кислородной продувки. Выполнена трёхмерная визуализация расчётных данных (изображены: плоскость поперечного сечения конвертера с расчётной сеткой, единичные векторы полей скоростей различных фаз, изолинии концентрации газовой фазы) с размещением их непосредственно на изображении конвертера, которое выполнено в соответствии с его геометрическими параметрами. С помощью программной реализации модели можно проводить численные эксперименты. Данные численных экспериментов могут послужить выработке рекомендаций по подбору оптимальных в некотором смысле параметров технологического процесса и могут быть использованы технологами на металлургических предприятиях. На основании рассчитанной гидродинамической картины могут проводиться расчёты других важных процессов: массопереноса, теплопереноса, т.к. знание её необходимо при моделировании процессов конвективного переноса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Семькин С.И., Самохвалов С.Е., Поляков В.Ф., Рязанцев Р.О. // Сопряженная математическая модель гидродинамических процессов в шлаковой и металлической фазах в полости конвертера. – Математичне моделювання. – Днепродзержинск: ДГТУ, № 1 (4) - 2000. – С.20-23.
2. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е., Надрыгайло Т.Ж. // Методы расщепления в задачах гидродинамики и теплопереноса. – Днепропетровск: системные технологии, 2003. – 260 с.
3. Зуев А.И. // Тривимірна математична модель гідродинамічних процесів у порожнині конвертера під час продування розплаву із використанням багатого соплової фурми. – Математичне моделювання. – Днепродзержинск: ДГТУ, №2(14) - 2005. – С. 63-68.