

Тривимірні математичні моделі гідродинамічних процесів у порожнині конвертера під час продування розплаву із використанням багатосоплової фурми

О.І. ЗУЄВ

Дніпродзержинський державний технічний університет

Розроблено математичну модель процесів гідродинаміки багатофазного середовища у порожнині конвертера під час продування розплаву з використанням багатосоплової фурми. Методами чисельного дослідження виявлено вплив глибини занурення фурми, витрат газу, кількості та кута нахилу сопел фурми на перебіг процесу перемішування, розподіл газової фази у порожнині конвертера.

Разработана математическая модель процессов гидродинамики многофазной среды в полости конвертера во время продувки расплава с использованием многосопловой фурмы. Методами численного исследования определено влияние глубины погружения фурмы, затрат газа, количества и угла наклона сопел фурмы на протекание процесса перемешивания, распределение газовой фазы в полости конвертера.

The mathematical model of hydrodynamics of multiphase medium in a cavity of the converter while refining with multiple-jet lance is constructed.

Вступ. Під час верхнього продування розплаву у конвертері із використанням багатосоплової фурми вкрай небажаними є ефекти інтенсивного бризкоутворення на поверхні ванни, які призводять до заметалювання фурми та зменшення терміну її служби. Для запобігання процесу утворення охолоді на стовбурі фурми та футерівці конвертера необхідно отримати інформацію про механізм взаємодії струменів газу з конвертерною ванною, характер руху середовища газ-шлак-розплав, виявити основні чинники, які сприяють інтенсифікації процесу бризкоутворення на поверхні ванни. На сьогоднішній день існує ряд публікацій з результатами високотемпературного моделювання процесу продування. У роботі [1] наводяться дані про дослідження гідродинамічних особливостей взаємодії багатоструменевого кисневого дуття з конвертерною ванною, пропонуються вирази для визначення умов переходу до різних гідродинамічних режимів при збільшенні тиску кисневих струменів на розплав. У роботі [2] досліджено особливості гідродинамічних та теплофізичних процесів при продуванні з використанням звичайних та нетрадиційних конструкцій наконечників фурм, запропоновано методику розрахунку основних конструктивних параметрів наконечників одноконтурних кисневих фурм з дворядним розташуванням сопел.

Серед робіт, які присвячені математичному моделюванню динаміки багатофазного середовища у порожнині конвертера слід виділити роботи [3-4], в яких отримана за допомогою чисельних розрахунків картина процесу продування якісно узгоджується з даними високотемпературного моделювання руху газозшлакометалевого середовища в робочому просторі конвертера. Розроблені математичні моделі та проведені чисельні експерименти дозволили доповнити відомості про механізм накопичення газу в об'ємі конвертера та виходу продуктів реакції на поверхню ванни. Отримані дані виступають основою подальших досліджень гідродинамічних особливостей продування конвертерної ванни.

У переважній більшості праць, присвячених математичному моделюванню та чисельному дослідженню гідродинамічних процесів, що перебігають у порожнині конвертера під час конверторної плавки розглядається віссиметричний випадок розрахункової області, внаслідок чого задача ефективно зводиться до двовимірної.

Використання при продуванні розплаву фурм з соплами, розташованими під кутом до осі симетрії конвертера обумовлює необхідність розглядати задачу в тривимірній постановці. Зазначимо, що двовимірне наближення в цьому випадку відповідає припущенню про нескінчену кількість сопел. Фактично це припущення стає виправданим при достатньо великій кінцевій кількості сопел. Однак двовимірні моделі мають ще один принциповий недолік, який неможливо усунути: вони не дозволяють проводити дослідження картини продування при використанні фурм із соплами різного діаметру, які призводять до появи струменів з різним динамічним напором, що у свою чергу викликає обертальний рух у приповерхневому шарі ванни. Тобто в багатьох практично корисних випадках виникає необхідність відмови від наближення осьової симетрії.

Побудована у даній роботі математична модель та її комп'ютерна реалізація дозволяє виконати чисельні дослідження динаміки багатофазного середовища газ-шлак-розплав у порожнині конвертера під час конверторної плавки для різних режимів продування, дослідити перебіг процесу перемішування, розподіл газової фази у конвертері в залежності від кількості та кута нахилу сопел фурми, глибини занурення фурми, витрат газу.

Математична модель розроблена із використанням наступних припущень:

- весь кисень, що поступає у порожнину конвертера, взаємодіє з вуглецем з утворенням оксиду вуглецю;
- межа поділу газозшлакової зони та зони розплаву фіксована і не змінюється з часом;
- лунки, що утворюються на поверхні розплаву внаслідок дії газових струменів мають параболічну форму, характерні розміри лунок визначаються за методикою, яка наведена у [5];
- рух газозшлакового середовища несоленоїдалний, а саме середовище ефективно стисливе внаслідок наявності об'ємного джерела газової фази в околі фурми;
- рух розплаву соленоїдалний, а сам розплав нестисливий;
- опис гідродинамічної картини здійснюється з використанням теорії дослідження багатофазних середовищ на основі методів розщеплення за фізичними факторами [6].

Динаміка руху середовища описується наступною системою рівнянь:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} + \nu_e \Delta \vec{V} + \zeta_e \nabla(\vec{V} \cdot \nabla) + (1 - \alpha) \vec{g} - \nabla \tilde{p}, \quad (1)$$

$$\vec{V} \cdot \nabla = \Psi - \alpha \frac{\partial \ln \rho}{\partial p} \rho_0 \vec{g} (\vec{V} + \vec{W}) - \vec{V} \cdot (\alpha \vec{W}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\vec{V} \cdot (\alpha \nabla) + \Psi - \alpha \frac{\partial \ln \rho}{\partial p} \rho_0 \vec{g} (\vec{V} + \vec{W}) - \vec{V} \cdot (\alpha \vec{W}), \quad (3)$$

де: $\tilde{p} = \frac{p_d}{\rho_0}$ - динамічна складова тиску, поділена на значення густини ρ_0 ; \vec{V} - барицентрична швидкість середовища; ν_e, ζ_e - ефективні коефіцієнти в'язкості; ρ - густина газу; Ψ - об'ємне джерело газової фази,

відмінно від нуля лише в реакційній зоні; $\vec{W} = \vec{W}_c + \vec{W}_d = -W_c \frac{\vec{g}}{g} - \frac{D_e}{\alpha} \nabla \alpha$ - дифузійна швидкість газової фази, W_c - колективна швидкість підйому бульбашок газу (прийнята 0,5 м/с); D_e - ефективний коефіцієнт турбулентної дифузії газової фази.

Рівняння (1)-(3) доповнюються граничними умовами: для швидкості на поверхні поблизу стінок - умови непротікання та вільного ковзання: $V_{\perp} = 0$, $\vec{n} \cdot \nabla V_{\parallel} = 0$; для об'ємної концентрації газової фази - умови непротікання: $\vec{n} \cdot \nabla \alpha = 0$; для тиску: $\vec{n} \cdot \nabla p = 0$, де \vec{n} - одиничний вектор нормалі до поверхні.

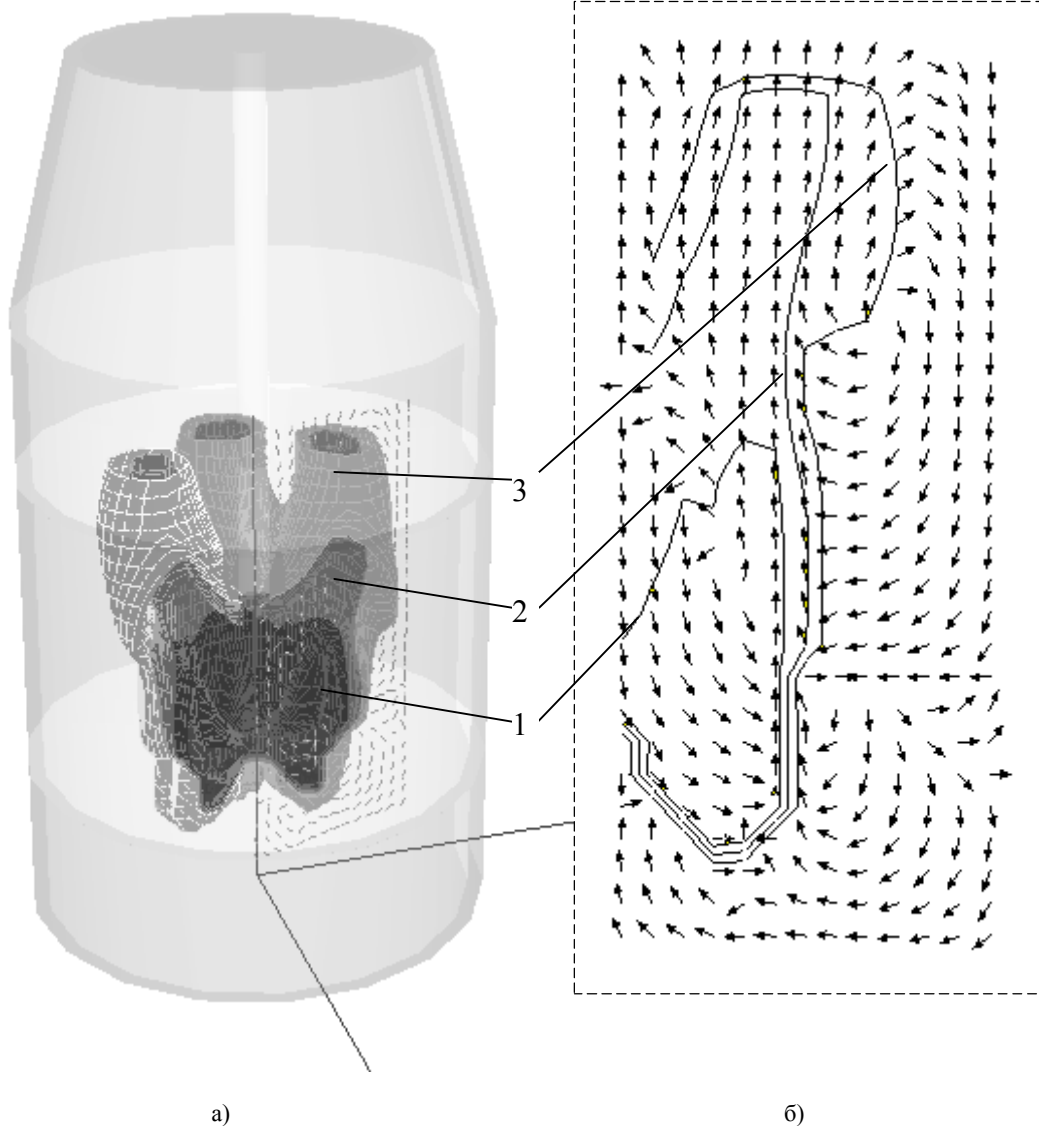


Рис. 1. Динаміка продування конвертерної ванни із використанням 5-соплової фурми на початку запалювання: а) поверхні рівної об'ємної концентрації газової фази (1 - 0,75; 2 - 0,5; 3 - 0,25); б) поле напрямків швидкостей та ізолінії об'ємної концентрації газової фази для осьового перерізу однієї лунки;

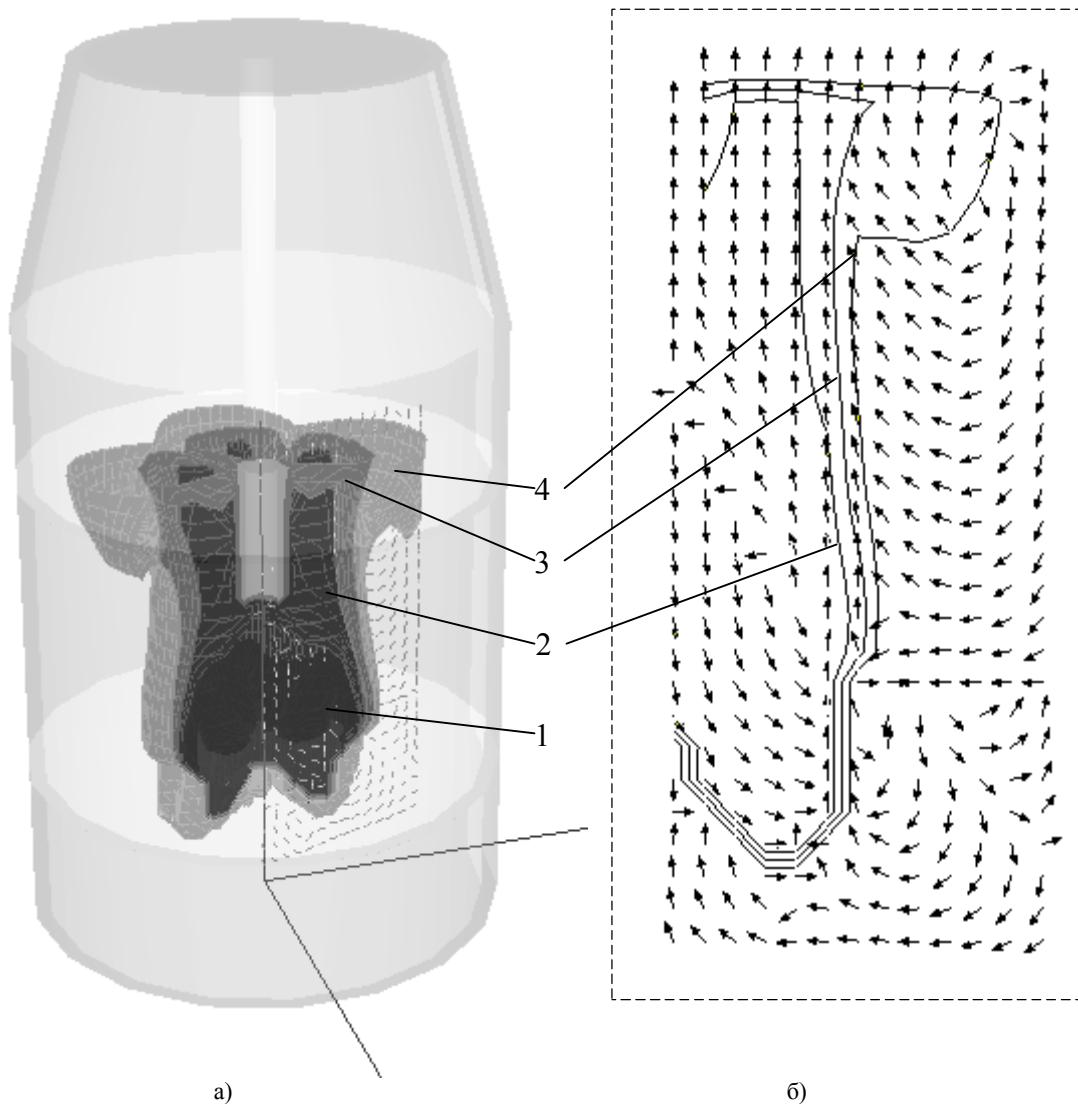


Рис. 2. Динаміка продування конвертерної ванни із використанням 5-соплової фурми на етапі розширення площі зон виходу продуктів реакції на поверхню: а) поверхні рівної об'ємної концентрації газової фази (1 – 0,9; 2 – 0,75; 3 – 0,5; 4 – 0,25); б) поле напрямків швидкостей та ізолінії об'ємної концентрації газової фази для осевого перерізу однієї лунки;

Значення ефективного коефіцієнту кінематичної в'язкості можна визначити за методикою, докладно викладеною у [6]:

$$v_e = v_m + \frac{\Delta}{Re_\Delta} V_\Delta + 1^2 \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right|, \quad (4)$$

де: V_Δ - швидкість в напрямку потоку в межах комірки розрахункової сітки; v_m - молекулярна в'язкість; Re_Δ - сіткове число Рейнольда; Δ - характерний масштаб розрахункової сітки; y - змінна, що параметризує вісь, перпендикулярну напрямку потоку; l - довжина перемішування.

Аналогічно формулі (4) одержимо вираз для ефективного коефіцієнту турбулентної дифузії газової фази:

$$D_e = D_m + \frac{\Delta}{Re_\Delta} V_\Delta + 1^2 \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right|, \quad (5)$$

де D_m - молекулярна дифузія.

Для чисельного розв'язку системи (1)-(3) використовуємо метод розщеплення за фізичними факторами:

$$\tilde{\vec{V}} = \vec{V}^n + \tau \cdot R(\vec{V}^n, \alpha^n), \quad (6)$$

$$\alpha^{n+1} = \alpha^n + \tau \cdot \left(-\tilde{\vec{V}}(\alpha^{n+1} \tilde{\vec{V}}^{n+1}) + \Phi(\vec{V}^{n+1}, \alpha^{n+1}) \right), \quad (7)$$

$$\Delta \tilde{p}^{n+1} = \left(\tilde{\vec{V}} \cdot \vec{V}^{n+1} - \Phi(\vec{V}^{n+1}, \alpha^{n+1}) \right) / \tau, \quad (8)$$

$$\vec{V}^{n+1} = \tilde{\vec{V}} - \tau \tilde{\vec{V}} \tilde{p}^{n+1}. \quad (9)$$

Апроксимація рівнянь (6)-(9) проводилась на шаховій сітці в циліндричних координатах.

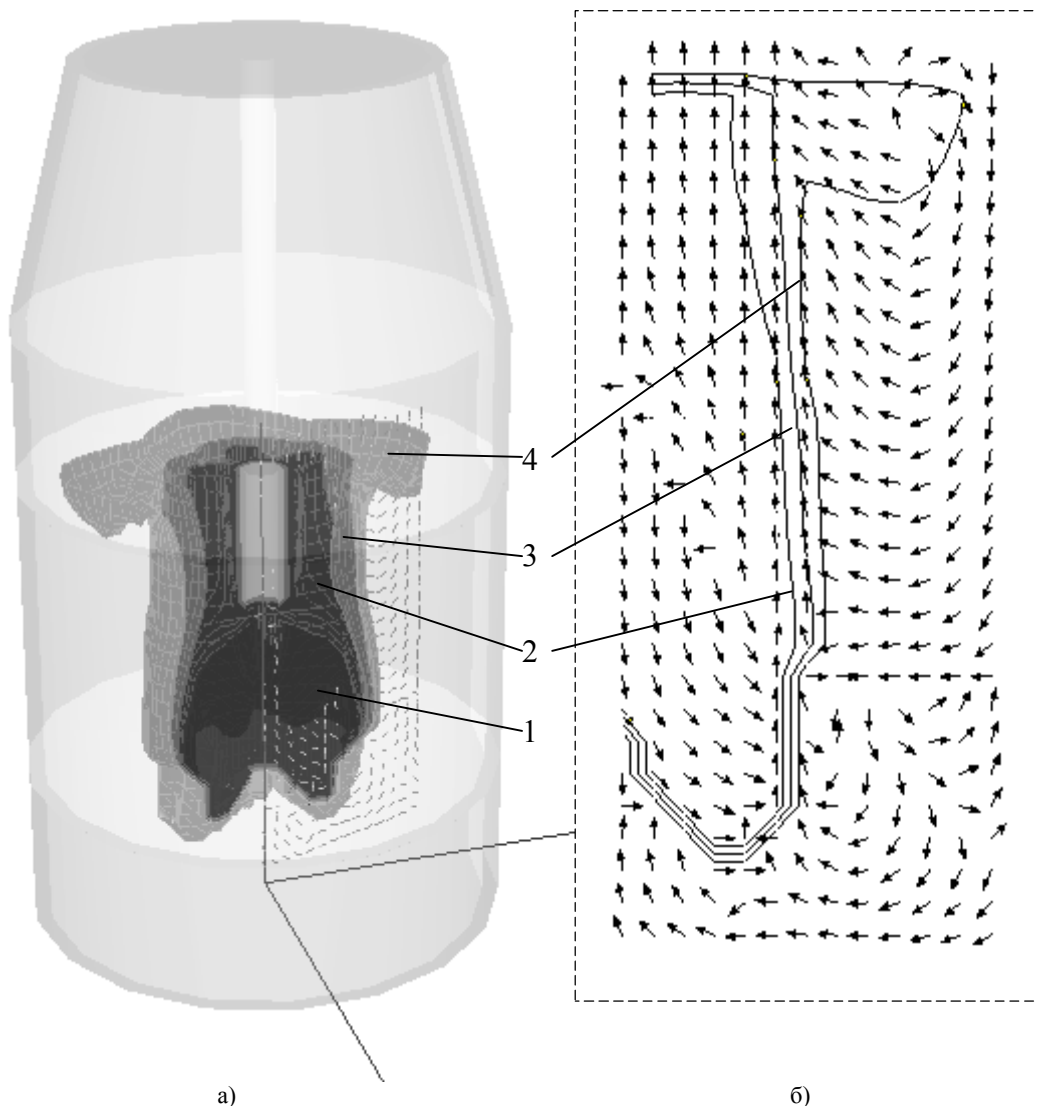


Рис. 3. Динаміка продування конвертерної ванни із використанням 5-соплової фурми на етапі об'єднання зон виходу газової фази на поверхню: а) поверхні рівної об'ємної концентрації газової фази (1 – 0,9; 2 – 0,75; 3 – 0,5; 4 – 0,25); б) поле напрямків швидкостей та ізолінії об'ємної концентрації газової фази для осьового перерізу однієї лунки;

Розрахунки проводилися для умов роботи 160-т конвертера при наступних значеннях технологічних параметрів: рівень металу в конвертері 1м, робоче положення фурми на відстані 1м над поверхнею металу, рівень шлаку 3м від дна конвертера, витрати кисню через п'ятисоплову фурму $400 \text{ м}^3/\text{хв}$, температура розплаву у конвертері 1650 К, кут нахилу сопел фурми до вертикальної осі 17° .

На рисунках 1–4 наведені результати тестових розрахунків продування конвертерної ванни із використанням п'ятисоплової фурми (сопла з рівним діаметром вихідного отвору) на різних етапах процесу. Для зручності сприйняття поверхні рівної об'ємної концентрації газової фази на рисунках а) представлені в розрізі.

На етапі початку запалювання операції (рис. 1) можна чітко визначити відокремлені одна від одної зони виходу продуктів реакції на поверхню ванни.

Об'ємна концентрація газової фази в зонах виходу не перевищує 0,5. На рис. 2 простежується картина збільшення площі зон виходу газової фази з одночасним підвищенням значення об'ємної концентрації газу у центральних частинах кожної зони до 0,75. В ході подальшого продування зони виходу продуктів реакції починають переміщуватися по поверхні ванни з наближенням до фурми та одночасним об'єднанням в одну велику зону (рис. 3). Найбільша концентрація газу у приповерхневому шарі ванни спостерігається саме в околі фурми і відповідне значення лежить у межах 0,75 – 0,85. На рис. 4 спостерігається зменшення площі зони виходу оксиду вуглецю на поверхню ванни з утворенням суцільного каналу виходу газової фази вздовж стовбура фурми.

Адекватність моделі перевірялась співставленням результатів чисельних розрахунків з даними високотемпературного моделювання [1-2]. Отримана в чисельних

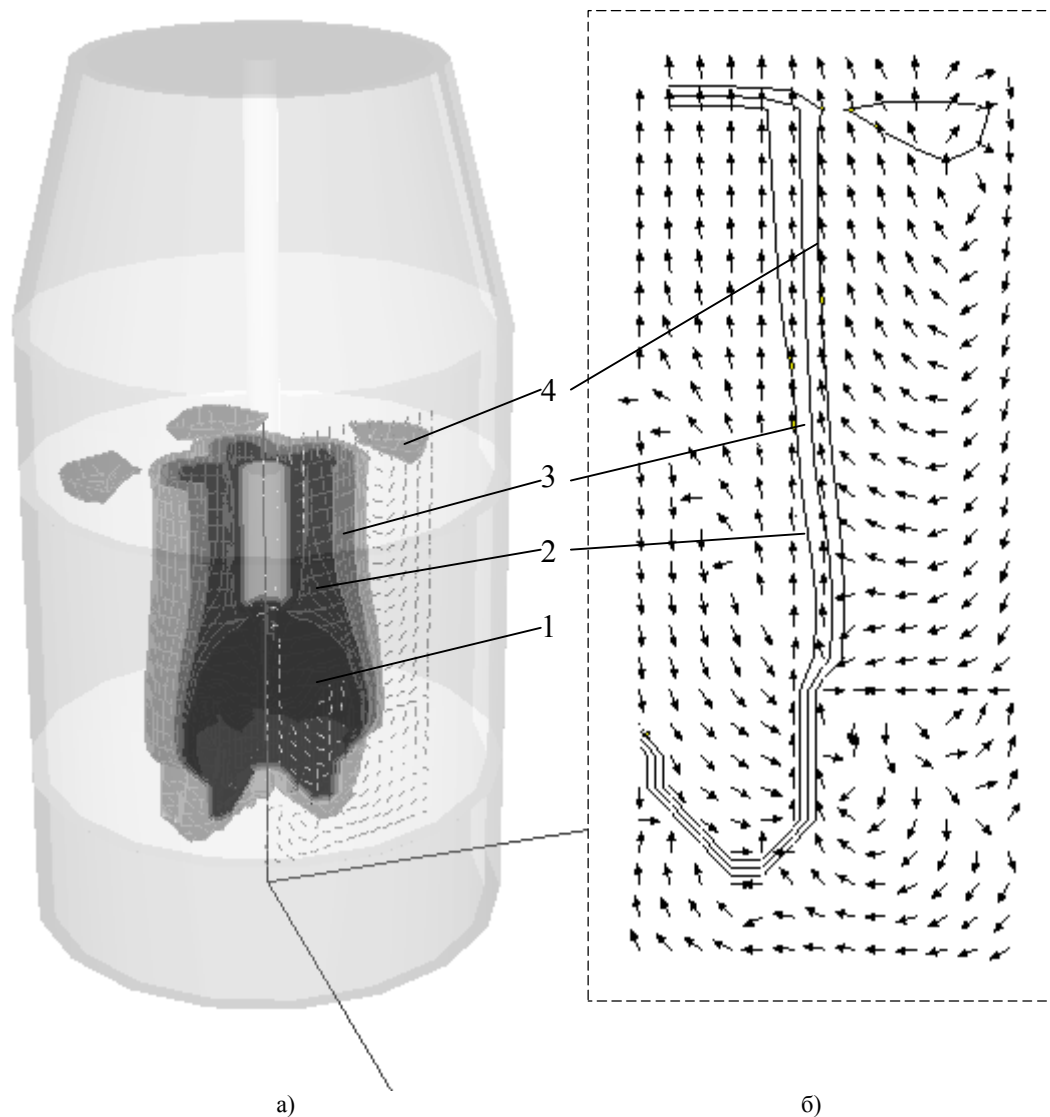


Рис. 4. Динаміка продування конвертерної ванни із використанням 5-соплової фурми на завершальній стадії об'єднання зон виходу газу з утворенням суцільного каналу: а) поверхні рівної об'ємної концентрації газової фази (1 – 0,9; 2 – 0,75; 3 – 0,5; 4 – 0,25); б) поле напрямків швидкостей та ізолінії об'ємної концентрації газової фази для осьового перерізу однієї лунки;

експериментах картина руху багатofазного середовища у порожнині конвертера дозволяє стверджувати про якісну адекватність моделі. Поле швидкостей та розподіл об'ємної концентрації газової фази в половині осьового перерізу конвертера, який проходить через вісь симетрії лунки, фактично співпадають з результатами чисельного дослідження у двовимірних випадках (при однакових значеннях основних технологічних параметрів продування).

Висновки. Розроблена математична модель, яка дозволяє виконати чисельні розрахунки гідродинамічних процесів у конвертері під час продування розплаву у тривимірному просторовому випадку. Результати чисельних досліджень на якісному рівні добре узгоджені з

даними високотемпературного моделювання у лабораторних та промислових умовах. Дані чисельних експериментів дозволяють надати рекомендацій з раціоналізації режимів продування з точки зору зменшення бризкоутворення на поверхні ванни та продовження терміну служби кисневих фурм. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на аналіз руху середовища при використанні під час продування двоконтурних і дворусних кисневих фурм, які забезпечують створення над реакційною зоною газової завіси з додаткового кисневого або нейтрального дуття (з меншими витратами газу через відповідні додаткові сопла порівняно з основними) для перешкодження утворенню на стовбурі фурми та футерівці конвертера охолоді.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гидродинамические режимы взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной. Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. №4. С. 11–17.
2. Совершенствование конструкций наконечников одноконтурных кислородных фурм на основе высокотемпературного моделирования. Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. №8. С. 10–16.
3. 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. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, №1(4) - 2000. – С. 20-23.
4. Чернятевич А.Г., Сігарьов Є.М., Зуєв О.І. // Математична модель гідродинамічних процесів у багатозонному середовищі в порожнині конвертера під час продувки розплаву металу газовими струменями з частковою передачею імпульсу на межі розподілу зон. – Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, №1(8) – 2002. – С. 77-80.
5. Особенности верхней продувки конвертерной ванны струями с разным динамическим напором. Ганзер Л.А., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. №2. С. 13–16.
6. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е., Надрьгайло Т.Ж. // Методы расщепления в задачах гидродинамики и тепломассопереноса. – Днепропетровск: системные технологии, 2003. – 260 с.

пост. 28.12.05

Моделирование информации из радиоизотопных технических средств автоматизации доменной печи

В.А. СМОЛЯК

Днепродзержинский государственный технический университет

Моделированием определены конструктивные и функциональные погрешности измерения технологических параметров радиоизотопными уровнемером и профилимером в доменной печи.

Моделюванням визначені конструктивні та функціональні помилки вимірювання технологічних параметрів радіоізотопними рівноміром та профілімером в доменній печі.

Structural and functional errors of measurement of technological parameters by radioisotope level controller and profilometer in a blast furnace are determined by modeling.

Строящиеся и реконструируемые доменные печи оснащаются новейшими техническими средствами автоматического контроля, регулирования и управления, в том числе и радиоизотопными приборами (РИП): гамма – локаторами профиля (рельефа) и следящими уровнемерами поверхности засыпи шихты, а также нейтронными влагомерами кокса и устройствами контроля службы огнеупорной футеровки [1,2,3,4].

Для эффективного управления загрузкой и распределения шихтовых материалов и восходящих газов по диаметру и окружности колошника доменной печи большого объема необходима достоверная информация о рельефе и уровне поверхности засыпи шихты.

Для оперативного получения такой информации применяются радиоизотопные гамма - локаторы (профилимеры) и следящие уровнемеры [5,6]. Оснащение доменной печи радиометрическими уровнемером и гамма – профилимером показано на *рис. 1, 2*, а схема комплексного их применения приведена на *рис. 3*.

Надежный и точный контроль уровня поверхности засыпи шихты по сечению и диаметру колошника имеет важное значение для эффективного управления сверху загрузкой и распределением шихтовых материалов и газов, а также сходом шихты в доменных печах большого объема. Уровень засыпи шихты измеряется механическими зондовыми уровнемерами, а в течение последних лет – радиомет-

рическими уровнемерами. За последние годы радиометрические уровнемеры типа УРМС-2 установлены на многих доменных печах. На базе уровнемеров типа УРМС-2 автоматизированы загрузка шихтовых материалов и управление работой засыпных аппаратов доменных печей.

Определение уровня засыпи шихты механическими зондовыми уровнемерами имеет существенные недостатки. Электромеханические приводы требуют тщательного ухода. Уровень засыпи не измеряется с достаточной точностью из-за провалов и затягивания зондов в шихту и зонды необходимо поднимать в крайнее верхнее положение перед загрузкой подач. Зондовый метод измерения не дает достоверной и полной информации об уровне засыпи (всего две контролируемые точки по сечению колошника). Кроме того, измерение глубины уровня засыпи ограничивается определенным пределом (до 3 м). Одним из факторов, определяющих характер опускания шихтовых материалов в доменной печи и развитие тепло - и массообменных процессов, также оказывающих существенное влияние на ход доменной плавки, является распределение на колошнике печи загружаемых шихтовых материалов. Под воздействием загружаемых порций шихты поверхность ее приобретает сложную форму с гребнями и откосами, которые предопределяют распределение последующих порций материалов и газового потока в верхней части печи.

