

УДК 519.711.3

Д.Ю. Кабаков, С.Є. Самохвалов

СПРЯЖЕНІ ПРОЦЕСИ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛОПЕРЕНОСУ У КОВШІ ПІД ЧАС НАПОВНЕННЯ

У статті представлено математичну модель спряжених гідродинамічних та теплопереносних процесів, які перебігають у ковші під час наповнення з одночасним продуванням розплаву інертним газом. Отримані завдяки розробленим програмам результати проаналізовані та порівняні з попередніми.

ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ, МЕХАНІКА СУЦІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ, КОВШОВА ОБРОБКА, ПРОДУВАННЯ МЕТАЛУ, ПРОГРАМУВАННЯ.

Важливою задачею розвитку промисловості України є ресурсозбереження при виробництві сталі, а також підвищення якості металопродукції та забезпечення її конкурентоспроможності на світовому ринку. Значне місце при цьому займають ковшова обробка сталі.

Математична модель теплопереносу у газорідному середовищі розплав-газ, побудована у рамках концепції взаємодіючих та взаємопроникаючих континуумів по методиці, що описана у [1], була представлена у [2]. У [1], [2] та деяких інших роботах методи визначення теплового стану ковша не враховували гідродинамічні особливості поведінки розплаву металу, що вже не відповідає сучасним вимогам, так як процеси руху металу мають великий вплив на теплопереносні процеси. В статті [3] представлено тривимірну модель спряжених гідродинамічних та теплопереносних процесів у ковші під час його продування.

В даній статті розглянуто математичну модель спряжених гідродинамічних та теплопереносних процесів у ковші при продуванні крізь донні фурми під час наповнення, причому в даному випадку загальна гідродинамічна картина кардинально відрізняється від аналогічного стаціонарного випадку.

Динаміка газорідного середовища описується наступною системою рівнянь. По-перше, це рівняння Нав'є-Стокса для випадку соленоїдального руху середовища газ-розплав:

© Кабаков Д.Ю., Самохвалов С.Є., 2012

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = R(\vec{v}, \alpha) - \vec{\nabla} \tilde{p}, \quad (1)$$

де $\vec{v}$ — барицентрична швидкість газорідного середовища, α — коефіцієнт об'ємного газовміщення, $\tilde{p}$ — тиск, поділений на ρ_0 , t — час процесу і

$$R(\vec{v}, \alpha) = -(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v} + v_e \Delta \vec{v} + \alpha \vec{g}, \quad (2)$$

де v_e — ефективний коефіцієнт в'язкості, $\vec{g}$ — прискорення вільного падіння.

Рівняння (1) доповнено до повної системи рівнянь рівнянням нерозривності за умови соленоїдальності руху середовища:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0, \quad (3)$$

рівнянням переносу газової фази відносно α :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{v}) - \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{w}) + \psi \quad (4)$$

та рівнянням конвективного теплопереносу в газорідному середовищі [1], записаному у наближенні малого α :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot [a_e (1 - \frac{3}{2} \alpha) \vec{\nabla} T] / (1 - \alpha), \quad (5)$$

де ψ — об'ємне джерело газової фази, $\vec{w}$ — дифузійна швидкість газової фази, T — температура середовища, a_e — коефіцієнт ефективної теплопровідності.

Система рівнянь згідно методу розщеплення за фізичними факторами, описаний у [4], може бути подана у наступному вигляді:

I етап

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

II етап

$$\Delta \tilde{p}^{n+1} = [\vec{\nabla} \cdot \vec{\tilde{v}}] / \tau, \quad (7)$$

III етап

$$\vec{v}^{n+1} = \vec{\tilde{v}} - \tau \vec{\nabla} \tilde{p}^{n+1}, \quad (8)$$

$$\alpha^{n+1} = \alpha^n + \tau [-\vec{\nabla} \cdot (\alpha^n \vec{v}^{n+1}) - \vec{\nabla} \cdot (\alpha^n \vec{w}) + \psi], \quad (9)$$

$$T^{n+1} = T^n + \tau \left\{ -\vec{v}^{n+1} \cdot \vec{\nabla} T^n + \vec{\nabla} \cdot [a_e (1 - \frac{3}{2} \alpha^n) \vec{\nabla} T^n] / (1 - \alpha^n) \right\}, \quad (10)$$

де τ — крок за часом, а верхні індекси означають номер часового шару.

На другому етапі розв'язується рівняння Пуассона відносно тиску. Для цього використано метод ітерацій, який не залежить від розрахункової області.

За розрахункову область взято усічений конус. Враховуючи тривимірну конфігурацію граничних умов та вільно розташовані аргонні фурми, задачу, що розглядається, розв'язано в повній тривимірній постановці в циліндричних координатах (r, ϕ, z) . Задачу розв'язано на шаховій сітці, що обрамлена шаром заграничних комірок. Скалярні величини задаються у центрах комірок, векторні – на гранях.

Граничні умови для швидкостей. Для паралельних швидкостей взято умову часткового прилипання на твердих поверхнях і умову вільного ковзання на осі симетрії. Для перпендикулярних швидкостей – умову непротікання. На вільній поверхні – умову вільного протікання.

Граничні умови для коефіцієнта газозміщення. На твердих поверхнях і осі симетрії прийнято умову непротікання, а на вільній поверхні – умову вільного протікання.

Граничні умови для теплопереносу. На стінках, вільній поверхні та днищі задано умови ефективною конвективної тепловіддачі з коефіцієнтами тепловіддачі, які лінійно залежать від температури (тобто різні на стінках, днищі та вільній поверхні).

Граничні умови, які враховують наповнення. Згідно заданого часу наповнення $T_{\text{нап}}$ вираховується середня швидкість дзеркала металу $V_{\partial z} = H / T_{\text{нап}}$, та час наповнення одного шару комірок по висоті $T_w = T_{\text{нап}} / MK$, де H – висота ковша, MK – кількість комірок по висоті. Швидкість струменю знаходиться по формулі:

$$V_{\text{cmp}} = \frac{1^2}{(MI - 1)^2} V_{\partial z}, \quad (11)$$

де MI – кількість комірок по радіусу на поточній висоті (нагадаємо, що розрахункова область має форму усіченого конусу). V_{cmp} задається у перших комірках по радіусу на висоті поточного рівня металу, $V_{\partial z}$ – задається в усіх комірках на висоті поточного рівня металу, окрім тих, в яких задано швидкість струменю. Кожні T_w секунд рівень металу збільшується на одну комірку по висоті.

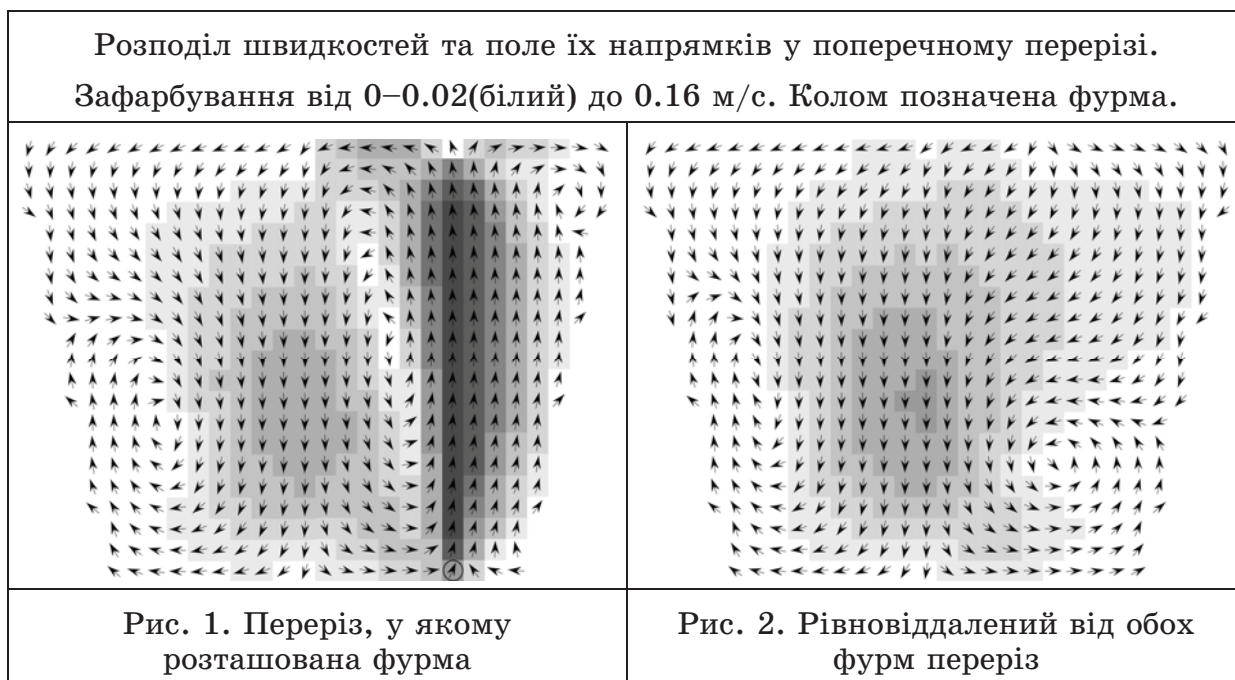
Подача газу через фурми проведена шляхом введення в місцях їх розташування джерела газової фази об'ємної густини:

$$\psi = \frac{q}{V_k}, \quad (12)$$

де q – розхід аргону через фурму в одиницю часу, V_k – об’єм зони формування барботажного режиму в області біля фурми (в розрахунках він дорівнює об’єму розрахункової комірки).

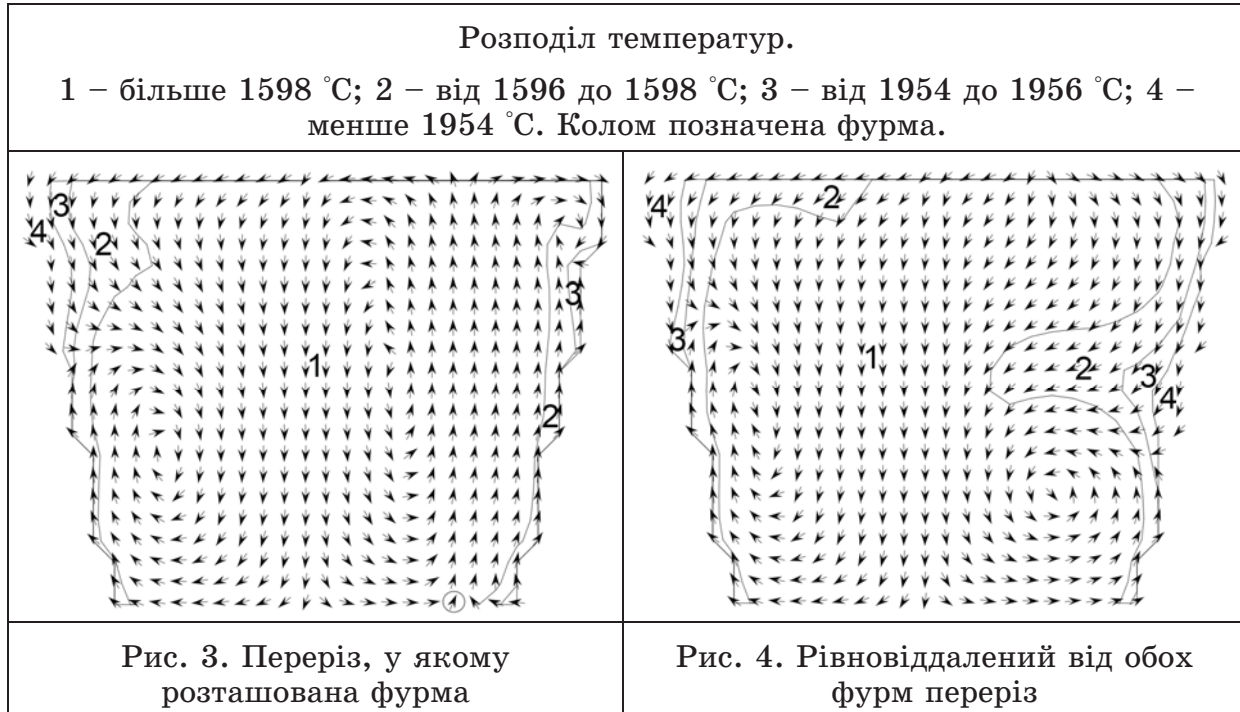
Подана математична модель була програмно реалізована у середовищі Qt на алгоритмічній мові C++. В розрахунках були прийняті наступні параметри: верхній радіус ковша: 2.8 м, нижній радіус ковша: 2 м, висота ковша: 4.2 м; донні фурми були розташовані кутах на 49° та 311° , відстань від осі симетрії до фурм: 1.2 м, розхід аргону через одну фурму: $0.0001 \text{ м}^3/\text{с}$ (6 л/хв); час наповнення: 300 с, початковий рівень металу: 1.5 м; початкова температура металу та струменю металу: 1600°C , температура навколишнього середовища: 30°C , теплопровідність на стінках: $35 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, на дні: $12 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, температура над вільною поверхнею металу: 1200°C , теплопровідність вільної поверхні: $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$.

Далі аналізуємо результати, отримані на 320 секунд після початку наповнення і продування.

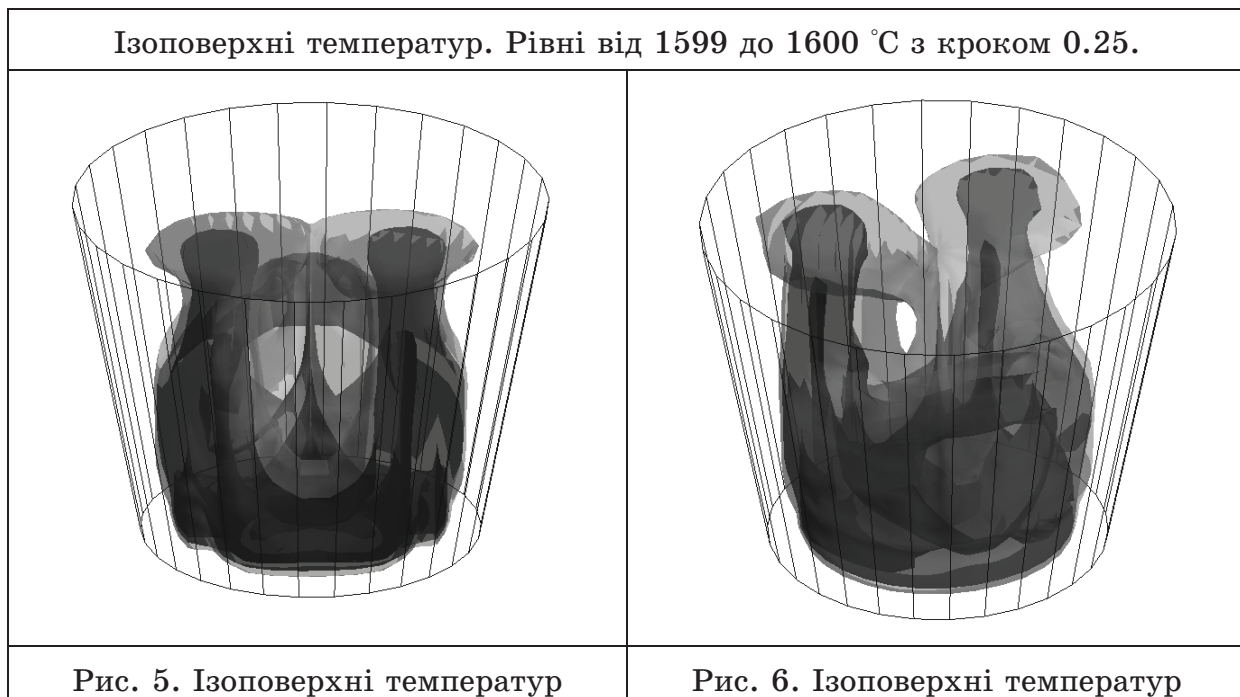


На рисунку 1 можна побачити, що найбільшого значення швидкості сягають над фурмою – 0.16 м/с . На рисунках 1 і 2 присутні «залишки» швидкостей від струменю по центру ковша. Потік струменю підхоплюється потоком, що утворився завдяки продуванню газом, утворюючи великий вихор, який зменшує інтенсивність підводу теплого металу зі струменю до стінок. Це

можна побачити на рисунку 1 – переваження вертикальних швидкостей над радіальними у зоні між потоком газу та стінкою очевидно. Саме завдяки цьому, згідно рис. 3 та 4, можна побачити, що найменшого охолодження зазнала зона між фурмою та стінкою.



Проаналізувавши поле напрямків швидкостей, бачимо, що найбільше охолоджується метал у тих зонах, де потоки металу постійно підганяють теплий метал до стінок, а охолоджений переносять від них (рис. 4). Рис. 2 зазначає наявність швидкостей відмінних від 0 у розглянутій зоні.



На рисунках 5 і 6 представлено ізоповерхні розподілу температур, що розглядаються під різними кутами. Для побудови таких поверхонь у розробленому пакеті програм реалізовано алгоритм Marching Cubes.

Висновки

Побудовано математичну модель спряжених гідродинамічних та теплопереносних процесів у ковші під час наповнення та продування. Для реалізації моделі було розроблено пакет програм. Ця стаття також показує, що якщо продування ведеться під час наповнення, то в околорурмених зонах можна спостерігати найменше охолодження по відношенню до інших зон у ковші.

У майбутньому планується реалізація моделювання наповнення з можливістю встановлення струменю не тільки по центру ковша, а також врахування кута падіння струменю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Самохвалов С.Є. Теплофізичні процеси в багатофазних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. – 174 с.;
2. Исследования тепло-, массообменных процессов в ванне установки ковш-печь. Ч.1. Математическая модель /В.П. Пиптюк, С.Е.Самохвалов, И.А. Павлюченков и др. //Теория и практика металлургии. – 2008. – № 3. – С. 3-5.;
3. Математическое моделирование сопряженных процессов гидродинамики и теплопереноса в литейном ковше /Гресс А.В., Самохвалов С.Е., Стороженко С.А., Кабаков Д.Ю. //Математичне моделювання. – 2011. – №2(25). – с. 119-122.;
4. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е., Надрыгайло Т.Ж.. Методы расщепления в задачах гидродинамики и тепломассопереноса. – Днепропетровск: «Системные технологии», 2003.