

техніко-економічні показники оптимальних планів дають можливість оцінити ступінь економічного ризику будь-якого показника.

Висновок

В результаті досліджень розглянуто оцінювання ступеня ризику, спираючись на варіацію чи середньоквадратичне відхилення. Якщо в якості центру розсіювання значень економічного показника використовується мода чи медіана, то рівень ризику визначається середньозваженим моди чи медіани відповідного відхилення, а також модальної чи медіанної варіації та середньоквадратичного відхилення відповідних показників. Крім цього, в якості оцінювання ризику може використовуватися

середньогометричне, коефіцієнт асиметрії, коефіцієнт ексцесу, семіваріація та семіквадратичне відхилення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вітлінський В. В. Ризикологія в економіці та підприємстві : моногр. / В. В. Вітлінський, Г. І. Великоіваненко. — К. : КНЕУ, 2004. — 480 с.
2. Вітлінський В. В. Аналіз, моделювання та управління економічним ризиком : навч.-метод. посіб. для самост. вивч. дисц. / В. В. Вітлінський, П. І. Верченко. — К. : КНЕУ, 2000. — 292 с.
3. Наконечний С. І. Погодний ризик АПК : адаптивне моделювання, економічне зростання та прогнозування / С. І. Наконечний, С. С. Савіна. — К. : ДЕМІУР, 1998. — 162 с.

пост. 09.11.2011

Динаміка газорідного середовища під час продування розплаву інертним газом через фурми, що обертаються

КАБАКОВ Д.Ю.

Дніпродзержинський Державний Технічний Університет

Вивчення закономірностей руху розплаву і газу в ковші при продуванні через фурми, що обертаються.

Изучение закономерностей движения расплава и газа в ковше при продувании через фурмы, которые вращаются.

Investigation of movement of melted metal and gas in the ladle during blowing it through rotating tuyeres.

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.

В наш час при виплавці сталі застосовуються різні варіанти ковшової обробки. Великого розповсюдження одержали комбіновані процеси з донним перемішуванням розплаву нейтральними газами. Незважаючи на підвищений інтерес до них, ряд питань залишається нез'ясованим, зокрема невідомими залишаються величини і напрямки макропотоків розплаву в певних режимах продування.

Серед робіт в цьому напрямку відмітимо [1], де розрахунок проводився у двовимірному наближенні у змінних вихор-функція струму, а також [2], де використовувалися природні змінні для тривимірного розрахунку в випадку продування через статичні фурми.

В цій роботі розглядається та моделюється продування через фурми, що обертаються з використанням природних змінних у тривимірній постановці.

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

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

де \vec{v} — барицентрична швидкість газорідного середовища, α — коефіцієнт об'ємного газозміщення, \tilde{p} — тиск, який поділений на ρ_0 , $\vec{\nabla} \tilde{p}$ — сила, яка обумовлена тиском, t — час процесу, $R(\vec{v}, \alpha)$ — традиційна права частина у випадку несоленоїдальності для рівняння Нав'є-Стокса, яка буде розглянута нижче. Рівняння (1) повинно бути доповнено до повної системи рівнянь рівняннями для знаходження тиску (умова несоленоїдальності):

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

та рівнянням переносу газової фази в «вакуумному» наближенні відносно α :

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

В останньому рівнянні перший доданок враховує конвективний перенос, а другий — зміну α відносно джерела. Як було вже відмічено, в задачі продування конвертора всі фактори несоленоїдальності вагомі. В околі донних фурм діє джерело газової фази ψ , пов'язане з нагнітанням аргону. Крім того, внаслідок великої густини розплаву неможливо знехтувати стисливістю газової фази, а внаслідок відносно великої глибини ванни неможливо знехтувати

і дифузійною швидкістю газової фази. Тому розглянемо детальніше $R(\vec{v}, \alpha)$ із формули (1) і $\Phi(\vec{v}, \alpha)$ із формул (2) і (3):

$$R(\vec{v}, \alpha) = -(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v} + v_e \Delta \vec{v} + \alpha \vec{g}, \quad (4)$$

$$\Phi(\vec{v}, \alpha) = \psi - \alpha \frac{d'(\ln \rho')}{dt} - \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{w}), \quad (5)$$

де v_e — ефективний коефіцієнт в'язкості, \vec{g} — прискорення вільного падіння, ψ — об'ємне джерело газової фази, \vec{w} — дифузійна швидкість газової фази.

В рівнянні (4) перший доданок враховує конвективний перенос, а другий доданок відповідає за проявлення в'язких напружень. В формулі (5) перші два доданки характеризують стисливість газової фази, використовуючи при цьому субстанційну похідну газової фази, тобто складають ефективне джерело газової фази, третій доданок відповідає за рух газової фази і включає в себе дифузійну швидкість.

Дифузійна швидкість газової фази, яка входить в вираз (5), має колективну складову \vec{w}^c і турбулентну \vec{w}^t . Колективна складова $\vec{w}^c = -w^c \vec{g}/g$ може задаватися безпосередньо, виходячи з експериментальних даних. Турбулентна складова \vec{w}^t може бути визначена через ефективний коефіцієнт турбулентної дифузії газової фази (D_e) співвідношенням $\alpha \vec{w}^t = -D_e \vec{\nabla} \alpha$.

Перейдемо до побудови математичної моделі.

За розрахункову область беремо циліндр. Враховуючи тривимірну конфігурацію граничних умов та вільно розташовані аргонні фурми, задачу, що розглядається, потрібно розв'язувати в повній тривимірній постановці.

Граничні умови для швидкостей. На внутрішніх поверхнях ковша і осі симетрії виберемо умови непротікання і вільного ковзання.

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} v_{\parallel} = 0, \quad (6)$$

На вільній поверхні ковша вибираємо умови вільного протікання.

Граничні умови для коефіцієнта газовміщення. На твердих поверхнях і осі симетрії приймемо умову непротікання, $\alpha = 0$, а на вільній поверхні — умову вільного протікання.

Розіб'ємо часову вісь на невеликі кроки за часом τ . Для вирішення рівнянь Нав'є-Стокса використаємо метод розщеплення по фізичним факторам [3]. Згідно цього методу на кожному часовому крокові τ можна відщепити доданок з тиском в рівнянні (1):

$$\vec{v} = \vec{v}^n + \tau R(\vec{v}, \alpha), \quad (7)$$

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

Для одержання рівняння для тиску використаємо рівняння (2), при цьому будемо вимагати його точного виконання на $n+1$ часовому шарі:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v}^{n+1} = \Phi(\vec{v}^{n+1}, \alpha^{n+1}). \quad (9)$$

Якщо взяти дивергенцію від обох частин формули (8) і врахувати (9) на $(n+1)$ -му часовому шарі, то одержимо рівняння Пуассона. Дійсно,

$\vec{\nabla} \cdot \vec{v}^{n+1} = \vec{\nabla} \cdot \vec{v} - \tau \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \tilde{p}$, але $\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \tilde{p} = \Delta \tilde{p}$. В результаті одержимо:

$$\Delta \tilde{p}^{n+1} = \left[\vec{\nabla} \cdot \vec{v} - \Phi(\vec{v}^{n+1}, \alpha^{n+1}) \right] / \tau. \quad (10)$$

Вибираючи в рівнянні (7) явну схему розрахунку, а в рівнянні (3) — неявну та враховуючи (10) для визначення характеристик руху середовища, одержимо наступну систему рівнянь:

I етап

$$\vec{v} = \vec{v}^n + \tau R(\vec{v}^n, \alpha^n) \quad (11)$$

II етап

$$\alpha^{n+1} = \alpha^n + \tau \left[-\vec{\nabla} \cdot (\alpha^{n+1} \vec{v}^{n+1}) + \Phi(\vec{v}^{n+1}, \alpha^{n+1}) \right] \quad (12)$$

$$\Delta \tilde{p}^{n+1} = \left[\vec{\nabla} \cdot \vec{v} - \Phi(\vec{v}^{n+1}, \alpha^{n+1}) \right] / \tau \quad (13)$$

$$\vec{v}^{n+1} = \vec{v} - \tau \vec{\nabla} \tilde{p}^{n+1}. \quad (14)$$

Для явних розрахунків на першому етапі знайдемо проміжну швидкість \vec{v} без врахування динамічного тиску \tilde{p} . Ця швидкість в загальному випадку не задовольняє рівнянню (2). В неявних розрахунках на другому етапі розрахуємо газовміщення α^{n+1} і тиск \tilde{p}^{n+1} . За допомогою тиску \tilde{p}^{n+1} проміжна швидкість \vec{v} "підправляється" до значення \vec{v}^{n+1} , а воно вже буде задовольняти рівнянню (2), так як із умови його виконання було знайдено рівняння для тиску.

Крім того, на другому етапі необхідно розв'язувати систему взаємопов'язаних рівнянь (12) — (14). Для цього будемо використовувати метод ітерацій. Щоб уникнути необхідності розв'язувати на кожному ітераційному крокові рівняння Пуассона (13) замінимо його відповідним еволюційним рівнянням:

$$\tilde{p} = \tilde{p} + \omega \left\{ \Delta \tilde{p} - \left[\vec{\nabla} \cdot \vec{v} - \Phi(\vec{v}, \alpha) \right] / \tau \right\}, \quad (15)$$

де ω — деякий параметр еволюції, який забезпечує збіжність еволюційного процесу (15).

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

$$\psi = \frac{q}{V_k} \quad (16)$$

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

Введемо величину ω , що відповідає частоті обертання фурм у ковші, яка вимірюється у об/с.

Тиск \tilde{p} та коефіцієнт об'ємного газовміщення α буде задаватися в центрі комірок, а компоненти швидкості u , v та w , а також в'язкість, будуть задаватися в центрі відповідних граней комірок.

Кінцево-різницеві схеми та граничні умови на нерівномірній шаховій сітці для даної моделі детально розписані в [2].

Аналіз результатів.

Автором було розроблено програми для розрахунків та аналізу результатів на алгоритмічній мові C++ у середовищі розробки Qt.

В розрахунках були прийняті наступні параметри:

- верхній радіус ковша $R_t = 1.8$ м;
- нижній радіус ковша $R_b = 1.5$ м;
- висота ковша $H = 4.2$ м;
- відстань від осі симетрії до донних фурм $R_{\phi} = 1.085$ м;
- розхід аргону через одну фурму $q = 0.001$ м³/с (1 л/с);
- швидкість обертання фурм $\omega = 0.2$ об/с;
- було взято наступне розбиття розрахункової сітки:
 - по радіусу: 27 комірок;
 - по куту: 50 комірок;
 - по висоті: 63 комірки.

Фурми були розташовані симетрично відносно осі симетрії ковша на кутах 90° та 270°.

Було проведено розрахунки продування через статичні фурми(рис.1,2,5,6) і через фурми, що обертаються(рис. 3,4,7,8). Розглядається 10 секунда після початку продування.

Продування через статичні фурми.

На рис. 1 та 2 показано поперечний переріз ковша під вільною поверхнею при продуванні ковша через статичні фурми. Рис 1 показує розподіл швидкостей. Як видно, найбільші швидкості виникають у зонах над фурмами. Також підвищені швидкості зафіксовано у зонах, що рівновіддалені від обох фурм. Рис 2 засвідчує підвищений тиск у зонах над фурмами. Усе вищезазначене, але у трьох вимірах можна побачити на рисунку 6.

Рисунки 1 та 2 також показують поле напрямків швидкостей в поперечному перерізі. Можна сказати, що

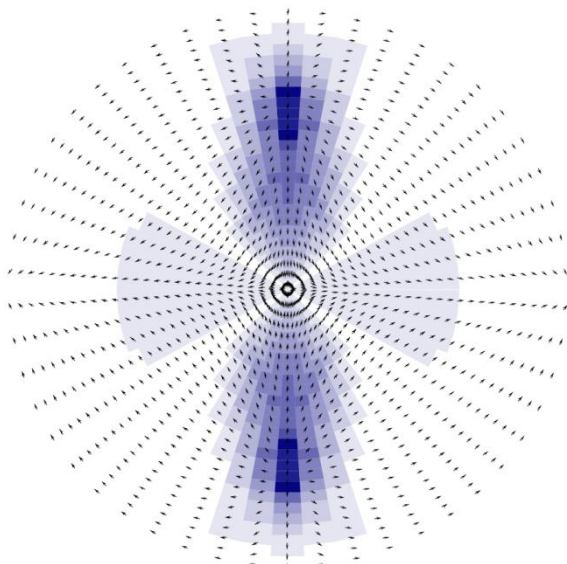


Рис. 1. Поле напрямків швидкостей та розподіл довжин скоростей у поперечному перерізі на верхньому шарі ковша при статичних фурмах.

на верхніх шарах металу швидкості направлені у напрямку від фурм.

На рис. 5 зображено загальну картину концентрації газу у ковші. Газ швидко «виринає» з металу. Це зумовлено його меншою щільністю. Увесь газ сконцентровано в області біля фурми та по вертикалі від неї до поверхні металу. У зонах на відстані більш ніж 0.15-0.2 метри від фурми концентрація газу не перевищує 0.5%.

Продування через фурми, що обертаються.

На рис. 3 та 4 можна побачити поперечний переріз ковша під вільною поверхнею при продуванні ковша через фурми, які обертаються.

Вже після першого обороту фурм утворилась циклічна картина з періодом 2.5 секунди.

Рис. 3 показує розподіл швидкостей. Можна зазначити, що значення швидкостей нижчі, ніж при фурмах, що не рухаються, але вони більш усереднені по всьому об'єму металу. Це призводить до більш інтенсивного перемішування металу. Ще одна ілюстрація рівномірного розподілу швидкостей – рис. 8 – ізоповерхня швидкостей на рівні 0.075м/с.

На рис. 2 зображено розподіл тиску у поперечному перерізі на верхньому шарі ковша, який також більш усереднений по всьому об'єму металу і тільки на радіусі, рівному радіусу розташування фурм можна побачити його підвищення.

Якщо розглянути поле напрямків швидкостей (рис. 1, 2), то можна прийти до висновку, що вони направлені від траєкторії руху фурм, а саме – до стінок ковша та осі симетрії.

На рис. 7 зображено ізоповерхню концентрації газу на рівні 0.5%. Як і очікувалось – газ швидко прагне до вільної поверхні, але, на відміну від розрахунків при статичних фурмах, можна побачити, що він розповсюджується більш рівномірно по всьому ковшу.

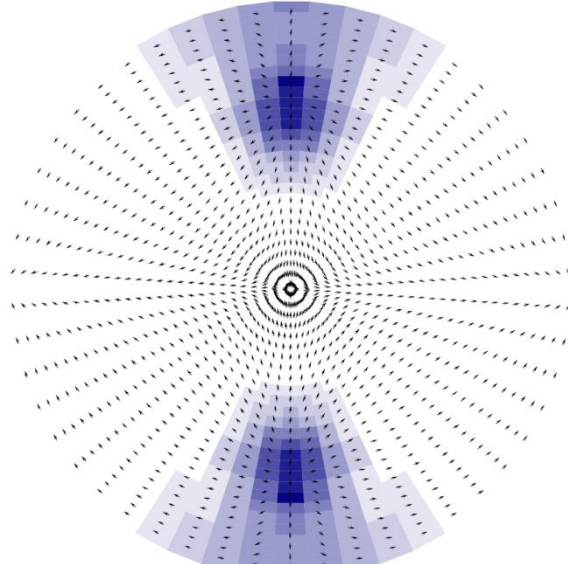


Рис. 2. Поле напрямків швидкостей та розподіл тиску у поперечному перерізі на верхньому шарі ковша при статичних фурмах.

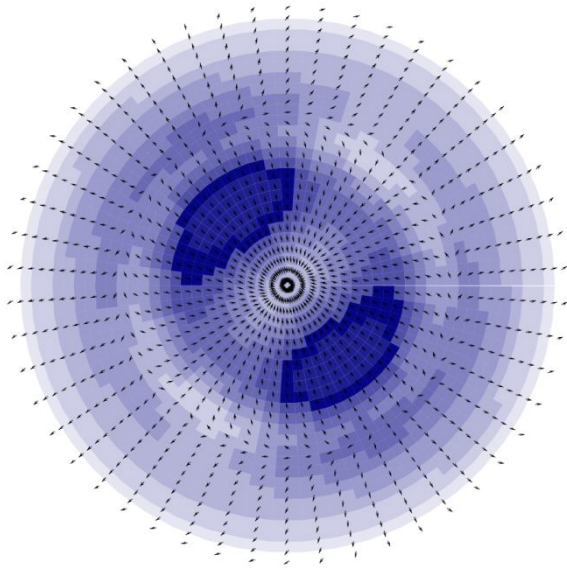


Рис. 3. Поле напрямків швидкостей та розподіл довжин скоростей у поперечному перерізі на верхньому шарі ковша при фурмах, які обертаються.

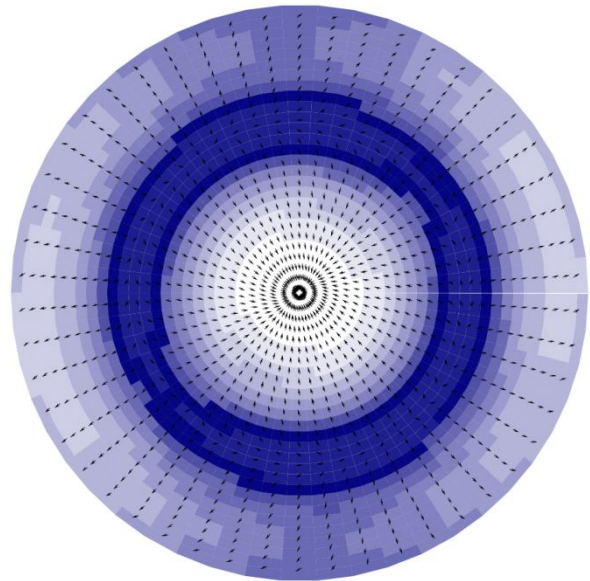


Рис. 4. Поле напрямків швидкостей та розподіл тиску у поперечному перерізі на верхньому шарі ковша при фурмах, які обертаються.

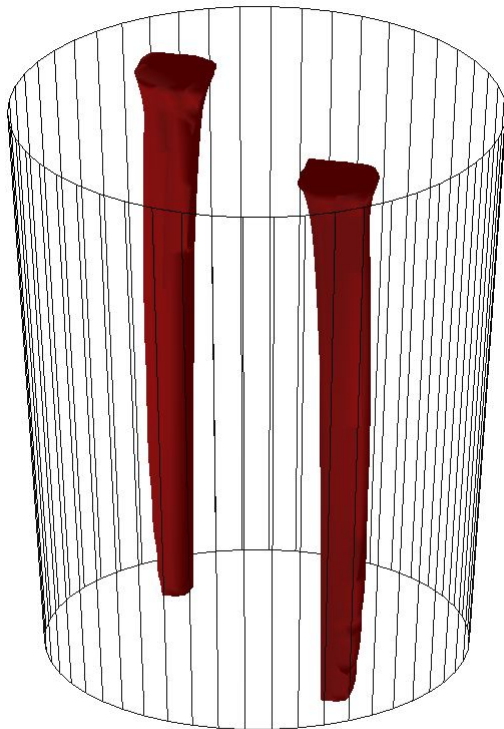


Рис. 5. Ізоповерхня концентрації газу в ковші на рівні 0.5% при статичних фурмах.

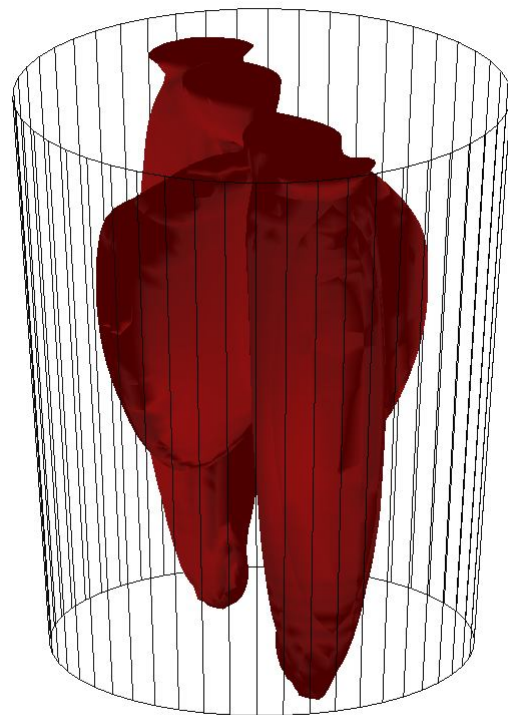


Рис. 6. Ізоповерхня швидкостей в ковші на рівні 0.075 м/с при статичних фурмах.

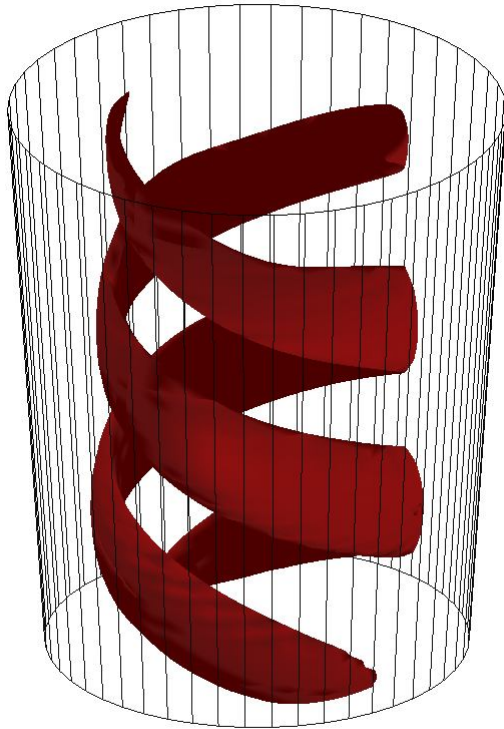


Рис. 7. Ізоповерхня концентрації газу в ковші на рівні 0.5% при фурмах, які обертаються.

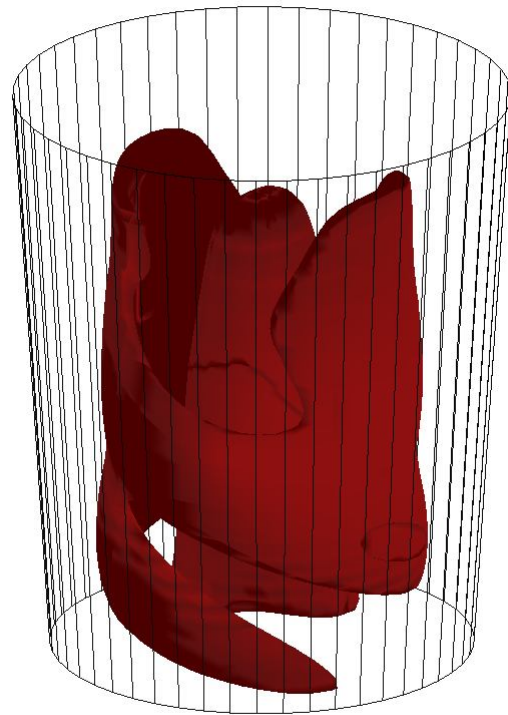


Рис. 8. Ізоповерхня швидкостей в ковші на рівні 0.075 м/с при фурмах, які обертаються.

Висновки

1. Побудовано математичну модель та відповідний пакет програм для розрахунку процесу продування розплаву металу інертним газом через фурми, які обертаються.
2. За допомогою розробленого пакету програм отримано результати розрахунків для продування через статичні фурми та фурми, що обертаються.
3. Досліджено отримані результати та проведено порівняння продування при вищеназаних конфігураціях фурм, в результаті чого прийшли до наступного: при продуванні через фурми, що обертаються, значення швидкостей нижче, ніж при статичних фурмах, але ці швидкості більше усереднені по усьому об'єму ковша, що призводить до інтенсивного перемішування металу. А це, у

свою чергу, веде до кращого усереднення складу металу, що є однією з головних цілей продування металу інертним газом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чернятевич А.Г., Наливайко А.П., Приходько А.А. Чисельне моделювання перемішування та теплообміну у конвертерній ванні. Чорна металургія. — 1984. — №5. — 44—48 с.
2. Самохвалов С.Є., Косухіна О.С. Чисельні методи в розрахунках металургійних агрегатів. — Дніпродзержинський Державний Технічний Університет, 2009. — 107 с.
3. Білоцерковський О.М. Чисельне моделювання у механіці суцільних середовищ. — М.: Наука, 1984. — 520 с.

пост. 12.12.2011

