

DOI: 10.31319/2519-8106.2(49)2023.292624

УДК 004.942:519.67

Надригайло Т.Ж., кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної та вищої математики
Nadryhailo Tetiana, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied and Higher Mathematics
ORCID: 0000-0003-1239-5946
e-mail: ntatiana62@gmail.com

Жорнік Є.В., здобувач другого (магістерського) рівня, кафедра прикладної та вищої математики
Zhornik Yvhenii, master's degree student, Department of Applied and Higher Mathematics
e-mail: ez19999923@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛО-МАСОПЕРЕНОСНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗАПОВНЕННІ ВИЛИВНИЦІ РОЗПЛАВОМ СТАЛІ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES WHEN FILLING THE MOLD WITH MELTED STEEL

У даній роботі досліджується процес заповнення ливарної форми розплавленою сталлю зверху, представлена математична модель досліджуваного процесу та розроблено її програмну реалізацію. Проведено чисельні дослідження для задачі заповнення виливниці розплавом сталі зверху з урахуванням газозахоплення, виконано перевірку моделі на адекватність та проаналізовано поведінку газорідного середовища, що формується у виливниці під час її заповнення розплавом, з урахуванням впливу газозахоплення.

Ключові слова: *несолоноїдальність, багатозфазність, газорідні середовища, інжекція.*

Mathematical and computer modeling of the processes occurring in the production of steel is a rather specific and research branch of engineering. This research is conducted within the framework of the metallurgical and foundry industry in order to optimize processes and improve the efficiency of steel production.

Research works in this field usually consider the following aspects:

- mathematical modeling of thermophysical processes: heat exchange between the steel melt, the walls of the mold and the surrounding environment;*
- simulation of melt movement: study of melt flow in the mold to determine heat and mass exchange;*
- modeling of convection: study of the influence of convection and turbulence on heat and mass exchange processes;*
- study of the influence of process parameters: study of the influence of thermophysical and hydrodynamic factors on heat and mass transfer;*
- use of software for numerical modeling: use of software packages to check the adequacy of developed mathematical models and numerical studies based on them.*

In this paper, a mathematical model of filling the mold with a stream of molten steel from above was developed, taking into account gas entrapment. To solve the equations of the model, the splitting method by physical factors was used for nonsoleidal motion [1] and an explicit difference scheme for the heat transfer equation. To check the adequacy of the built model, as well as to identify the influence of the volumetric fraction of gas entrapment on the course of various processes during the filling of the mold with melt, numerical studies were carried out for two cases: without into account gas entrapment and with taking into account gas entrainment. Based on the results of these studies, graphs of the dependences of the distribution of the temperature and speed of the melt on the volume fraction of the gas entrainment were constructed. A comparison of the obtained results indicates a significant influence of trapped gas on the course of all processes in the mold during its filling with molten steel.

The results of the numerical experiments coincide with the similar results presented in [2], which indicates the adequacy of the developed mathematical model.

Keywords: *non-solenoidity, multiphase, gas-liquid media, injection.*

Постановка проблеми

Для виготовлення відливки або зливка високої якості перш за все необхідно одержати розплав відповідного складу з необхідними властивостями. Для цього необхідно звернути увагу на два основних етапи технології виробництва:

- технологію розливання розплаву,
- методи забезпечення оптимальних параметрів зливка на етапі його затвердіння.

Раціоналізація цих етапів дозволяє досягти оптимальної швидкості заповнення виливниці з урахуванням складу і температури розплаву. І як наслідок, забезпечити високу якість поверхні зливка, а також його необхідну внутрішню структуру, наприклад глибину залягання усадочної раковини та її форму.

Тепломасопереносні процеси мають визначний вплив на технологічні параметри виробництва у металургії. Особливістю цих процесів стає необхідність їх розгляду у багатофазних середовищах з фазовими перетвореннями. У наслідок цього стисливість середовища значно збільшується і втрачається соленоїдальність його руху.

Затвердіння розплаву під час заповнення виливниці є складним теплофізичним процесом через поведінку вільної поверхні — дзеркала рідини, протягом заповнення виливниці. Так як під час вливання розплаву у виливницю утворюються бризки, з самого початку надходження розплаву у виливницю вони потрапляють на її поверхню і застигають, тим самим утворюючи дефекти поверхні, які впливають на якість формування коркового шару зливка у його донній частині [1]. Отже від самого початку процесу поведінка вільної поверхні розплаву має вивчатися і бути врахованою при аналітичних дослідженнях.

У даній роботі розглядається наповнення виливниці згори, тому необхідно врахувати повітря, яке захоплюється струменем розплаву. Також під час наповнення виливниці відбувається кристалізація розплаву (формування коркового шару), що істотно впливає на протікання теплофізичних та гідродинамічних процесів у виливниці. Таким чином під час аналізу процесу заповнення виливниці необхідно дослідити вищезгадані процеси у трифазному середовищі: повітря (яке межує з вільною поверхнею, та яке захоплене розплавом), розплав (що надходить до виливниці), кірковий шар (що утворився у наслідок кристалізації).

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботі [3] показано, що поле швидкостей і кількість повітря, що захоплюється струменем і переноситься у виливницю, залежить від динамічних характеристик струменя, які в свою чергу залежать від типу насадки і величини і характеру збурень, що діють на вільну поверхню струменя на ділянці від торця насадки до поверхні рідини у виливниці. Тому щодо полів швидкостей необхідно фіксувати і динамічні характеристики струменя.

Результати моделювання умов поширення затоплених струменів показали, що в залежності від форми склянки утворюються струмені, що сприяють захопленню повітря, та струмені без захоплення повітря. При цьому вони створюють різні за характером поля швидкостей у виливниці. Склянка зазначеної форми забезпечує отримання більш жорсткого струменя та зниження кута розбіжності потоків у затопленому просторі.

Наведені приклади показують, що вибір профілю струменя, форми склянки і раціональної організації закінчення металу дуже істотно впливає не тільки на процес захоплення навколишнього повітря, але і на формування зовнішньої скоринки зливка і дефектів, що виникають в ній [3].

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є аналіз поведінки газорідного середовища, що формується у виливниці під час її заповнення розплавом з урахуванням впливу газозахоплення.

Виклад основного матеріалу

На практиці в більшості випадків струмінь рідини, зокрема рідкий розплав сталі, що надходить у виливницю згори, захоплює повітря. Об'єм рідини значно перевищує об'єм газових включень, але їх достатньо аби змінити характер руху середовища. Саме тому захоплений газ має бути врахований під час розрахунків гідродинаміки рідини.

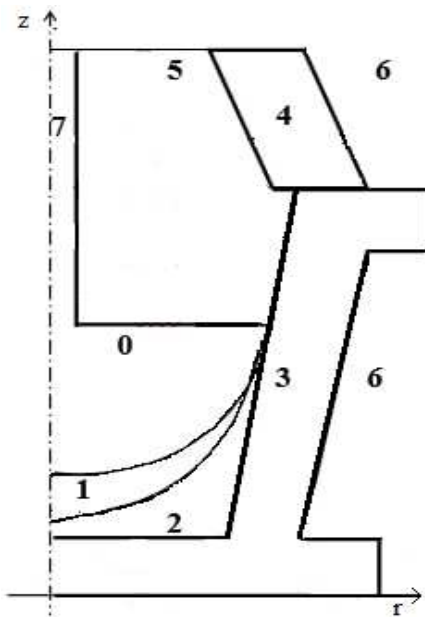


Рис. 1. Розрахункова область: 0 — рідка фаза розплаву, 1 — рідко-тверда фаза, 2 — кірка металу, 3 — тіло виливниці, 4 — прибуткова надставка, 5 — внутрішня область виливниці, 6 — зовнішня область, 7 — струмінь розплаву

У даній роботі проводиться математичне моделювання теплофізичних процесів на етапі наповнення виливниці розплавом сталі згори з метою виявлення основних закономірностей впливу газових включень на характер перебігу цих процесів у розплаві.

Під час моделювання процесу враховуються наступні припущення [2]: виливниця має циліндричну симетрію, схематично зображена на рис. 1; на поверхню виливниці з середини нанесено тонкий (~0,3 мм) шар фарби; вільна поверхня розплаву не має хвиль, є рівною; швидкість струменя розплаву постійна; границя між рідкою та закристалізованою сталю рухома, її форма визначається товщиною і формою кірки, що намерзла; в певній мірі присутня турбулентність розплаву; тепловіддача відбувається за рахунок конвективного теплообміну і випромінювання за законом Стефана-Больцмана; кристалізація розплаву супроводжується усадкою.

Завдяки циліндричній симетрії задачі, в якості розрахункової області обираємо половину осьового перерізу виливниці. Виливниця заповнюється струменем розплаву, розташованим вздовж осі її симетрії.

Гідродинаміка двофазного газорідкого середовища описувалася з припущеннями вакуумного наближення (наближення Буссінеска), та нехтування динамічною складовою тиску джерела газової фази у перевагу феростатичної фази наступними рівняннями:

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

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

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

де $\Phi(\vec{v}, \alpha) = -\vec{\nabla}(\alpha \vec{w}) - \alpha \xi \rho_0 \vec{g}(\vec{v} + \vec{w})$ — ефективне джерело газової фази, \vec{v} — барицентрична швидкість середовища повітря-розплав, ν_e — ефективний коефіцієнт в'язкості, α — коефіцієнт об'ємного газозміщення, \tilde{p} — динамічна складова тиску, нормованого на істинну густину розплаву, $\xi = \frac{1}{k\rho}$, де k — показник політропи, ρ_0 — густина розплаву, \vec{w} — дифузійна швидкість газової фази, в якій присутні турбулентна і колективна складові: $\vec{w} = \vec{w}^t + \vec{w}^c$. Зв'язок з ефективним коефіцієнтом турбулентної дифузії газової фази (D_e) виражений співвідношенням: $\alpha \vec{w}^t = -D_e \vec{\nabla} \alpha$, а колективна складова направлена вертикально вгору: $\vec{w}^c = \frac{-w^c \vec{g}}{g}$ і її величина задається безпосередньо, виходячи з експериментальних даних.

Рівняння, що описує конвективний перенос тепла у середовищі з рідкою та газовою фазами, де можливість тверднення розплаву сталі врахована останнім доданком:

$$(1 - \alpha) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T \right) = \vec{\nabla} \left(\alpha \frac{1 - \alpha}{1 + \frac{\alpha}{2}} \vec{\nabla} T \right) + \frac{Q}{c_p}. \quad (4)$$

Поля швидкостей та об'ємний вміст газу використовувалися при розрахунках поля температур.

Для реалізації моделі (1)–(4) використано метод розщеплення для несонідального руху [1]. Чисельний розв'язок рівняння тепло переносу (4) проводимо відповідно до явної різницевої схеми.

Математична модель (1)–(4) доповнюється наступними граничними умовами. Для швидкостей руху середовища обрано умови: для твердих поверхонь та осі симетрії — вільного ковзання на паралельній складові швидкості $\frac{\partial v_{\parallel}}{\partial n} \Big|_S = 0$; умови непротікання для перпендикулярних складових швидкостей $\vec{n} \cdot \vec{V}_{\perp} = 0$; в області струменя $V = V_{cmp}$; на вільній поверхні $V = V_{нов}$.

Для тиску на всіх границях розрахункової області обрана умова другого роду $\vec{n} \cdot \vec{\nabla} p \Big|_S = 0$.

Вважаємо що газ надходить у розплав через струмінь з коефіцієнтом об'ємної частки газу $\alpha = \alpha_0$, а вивільнюється через дзеркало розплаву без перешкод.

Для температури граничні умови наступні: на осі симетрії використані умови симетрії $\frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = 0$; на дні, бічній поверхні виливниці та прибутковій надставці — умови конвективного теплообміну $\frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = -\alpha(T - T_{cp})$; на вільній поверхні розплаву — умова теплоізоляції $\frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = 0$.

Кінцево-різницеве представлення граничних умов виконано на рівномірній шаховій сітці.

На основі математичної моделі, описаної вище, виконано комп'ютерну реалізацію на мові програмування C# у середовищі MS Visual Studio 2019.

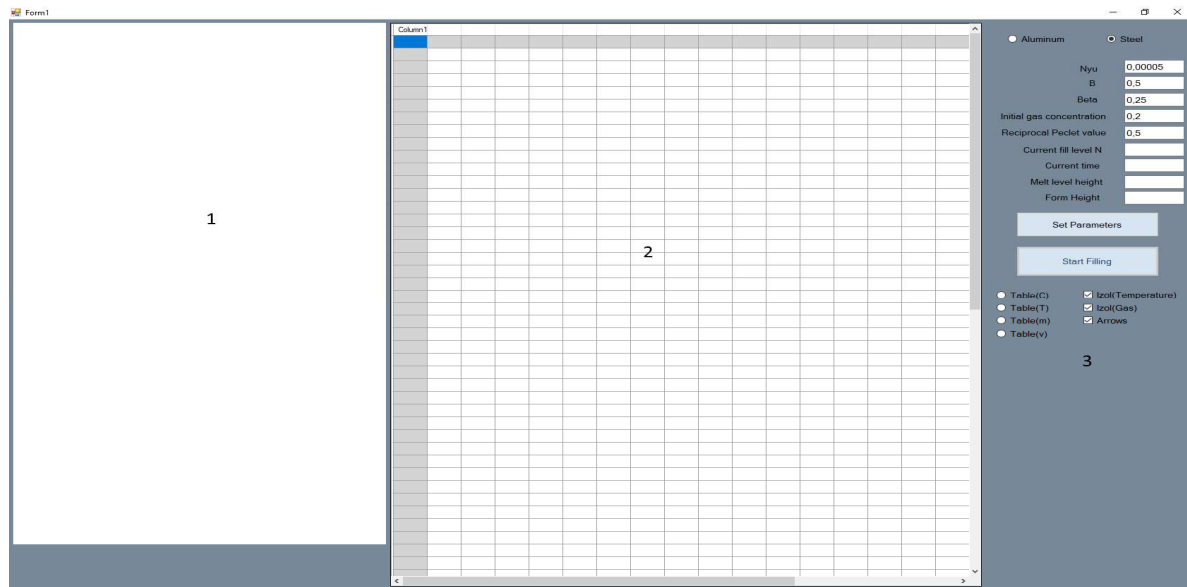


Рис. 2. Інтерфейс користувача: 1 — PictureBox; 2 — DataGridView; 3 — Налаштування програми

Інтерфейс користувача програми зображений на рис. 2. Інтерфейс можна умовно поділити на три частини:

1. Зображення, яке є візуалізацією процесу заповнення виливниці згори.
2. Таблиця, яка дозволяє користувачу бачити ті чи інші дані, в залежності від вибору налаштувань, представлених у пункті 3.
3. В цій частині можна змінити тип розплаву, змінити значення деяких величин, які впливають на перебіг заповнення форми, вибрати що саме відображає таблиця, і відключити деякі візуальні ефекти.

Для перевірки адекватності проведені чисельні розрахунки за математичною моделлю, що описує процес заповнення виливниці розплавом сталі згори з урахуванням газозахоплення.

У нашій моделі вільна поверхня рідини вважається такою, на якій відсутні нерівності та хвилі, що доцільно вважати починаючи з деякого початкового рівня наповнення виливниці. Відповідно до математичної моделі, яка представлена в [2], проводиться розрахунок на початковому етапі заповнення виливниці та встановлюються початкові значення таких величин як положення коркового шару, значення температур та швидкостей. За початковий рівень для подальших розрахунків приймається значення 0.4м. Для проведення обчислень розрахункова область поділена на 24×82 однакових комірок, розміром $\Delta r = \Delta z = 0,003$ м. Час, за який розплав заповнює весь внутрішній об'єм форми складає 5 хвилин, відповідно до цього обчислюється швидкість струменя. Коефіцієнт газозахоплення (об'ємна частка газу) залежить від характеристик потоку рідини, зокрема швидкості струменя. У даній моделі виливниця заповнюється в ламінарному режимі спокійним струменем. Розрахунки проводяться для декількох значень коефіцієнта α з метою виявлення залежності перебігу теплофізичних процесів.

На рис. 3 зображені поля швидкостей і концентрацій газу в об'ємі виливниці у різні моменти її наповнення для $\alpha = 0,2$.

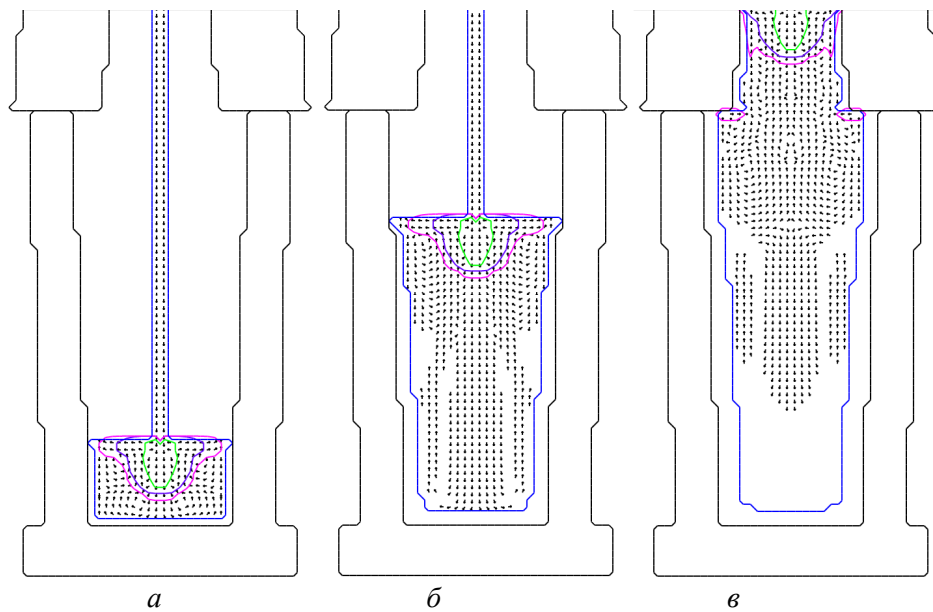


Рис. 3. Поля швидкостей розплаву сталі і концентрації газу при $\alpha = 0,2$. Лінії ізоконцентрацій: $\alpha = 0,1$ — зелена, $\alpha = 0,003$ — фіолетова, $\alpha = 0,0001$ — рожева. Синьою лінією відображено розплав сталі

При наявності пазирів газу у розплаві виникає підйомна сила що діє у протилежному до руху струменя напрямку, тобто вгору. Внаслідок цього, струмінь металу що вливається в розплав уповільнюється і його глибина проникнення зменшується, в його околі з'являються рухомі вгору потоки середовища. Пузири газу, що спричинюють цей рух, з часом покидають розплав при досягненні вільної поверхні, а захоплений ними розплав продовжує рух по заокругленій траєкторії — вздовж дзеркала металу в напрямку стінок форми, вздовж стінок форми вниз. Зображені на рис. 3 результати моделювання відповідають гідродинаміці руху з газозахопленням [4]. Стрілки вказують напрям швидкостей розплаву сталі.

Звернемо увагу на концентрацію газових включень у момент остаточного заповнення виливниці (рис. 3) в області під прибутковою надставкою помітне певне скупчення газу. Дана модель враховує вищеповисаний взаємний рух газової фази відносно рідкої, на відміну від випадків, розглянутих раніше, тому це скупчення можна пояснити рухом газових включень назустріч струменю металу — спливанням газу, а також його тороніодальним вихором. Вихор утворюється завдяки заокругленій траєкторії руху розплаву, що спливає. Сформований таким чином вихор захоплює газ з осьової області форми під прибуткову надставку, де він і накопичується.

Розглянемо поля температур. На рис. 4 зображено теплову картину у виливниці в різні моменти її наповнення (аналогічно до рис. 3). Характер розподілу тепла аналогічний гідродинамічній картині.

Під час заповнення виливниці зверху струмінь розплаву неминуче захоплює газ, що було показано на рис. 3, і навіть невелика кількість газу може значно змінити гідродинаміку та теплові поля у виливниці. Розглянемо як саме газозахоплення впливає на перебіг гідродинаміки та теплові поля процесів.

Для цього розглянемо у порівнянні заповнення виливниці струменем розплаву з врахуванням газозахоплення ($\alpha = 0,2$) та при його відсутності ($\alpha = 0$).

Результати моделювання наведені на рис. 5—8, а та б відповідно, причому обидва випадки не є виключно теоретичними припущеннями, але й можливі на практиці. Перший випадок відповідає нестационарному, турбулізованому протіканню струменю розплаву, а другий ідеально ламінарному. На практиці відсутність газозахоплення може бути забезпечена при заповненні виливниці через заглиблений стакан (як в машині безперервного литва заготовок). На рис. 5 також зображені графіки що відображають залежність величин вертикальних складових швидкостей розплаву від глибини.

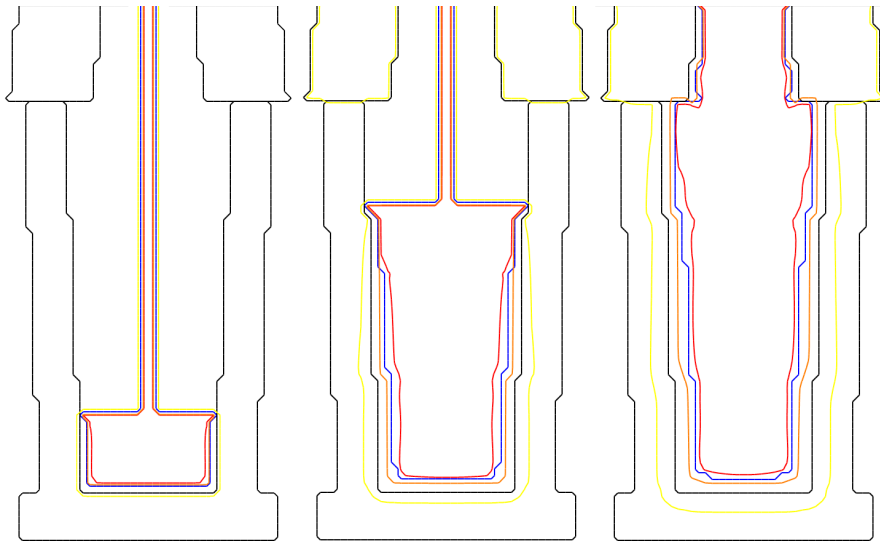


Рис. 4. Поля температур при наповненні виливниці розплавом сталі при $\alpha = 0,2$. Ізотерми $T \in \{490; 1670; 1790\}^{\circ}\text{C}$ відображені жовтим, помаранчевим, та червоним лініями відповідно

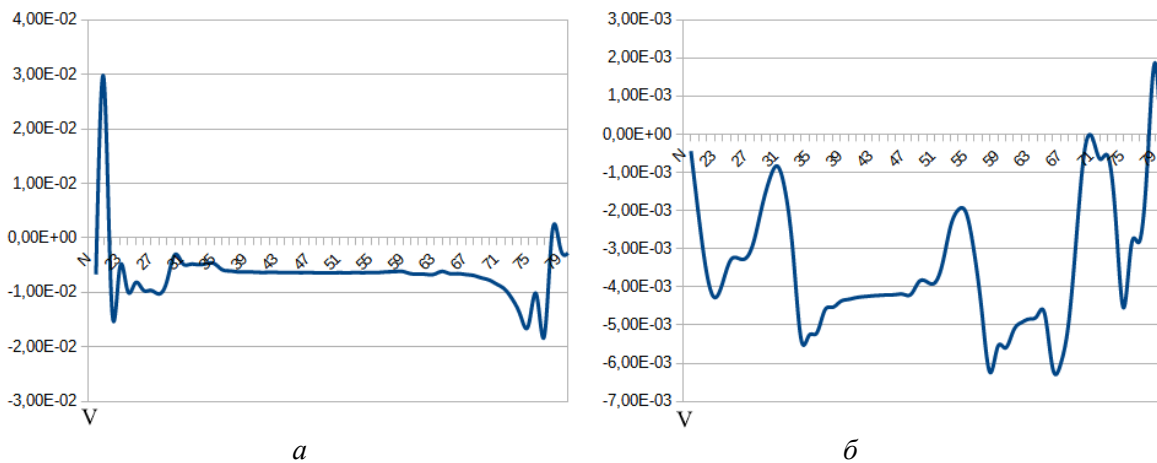


Рис. 5. Графіки залежність величин вертикальних складових швидкостей розплаву від висоти: *а* — без газозахоплення, *б* — з газозахопленням

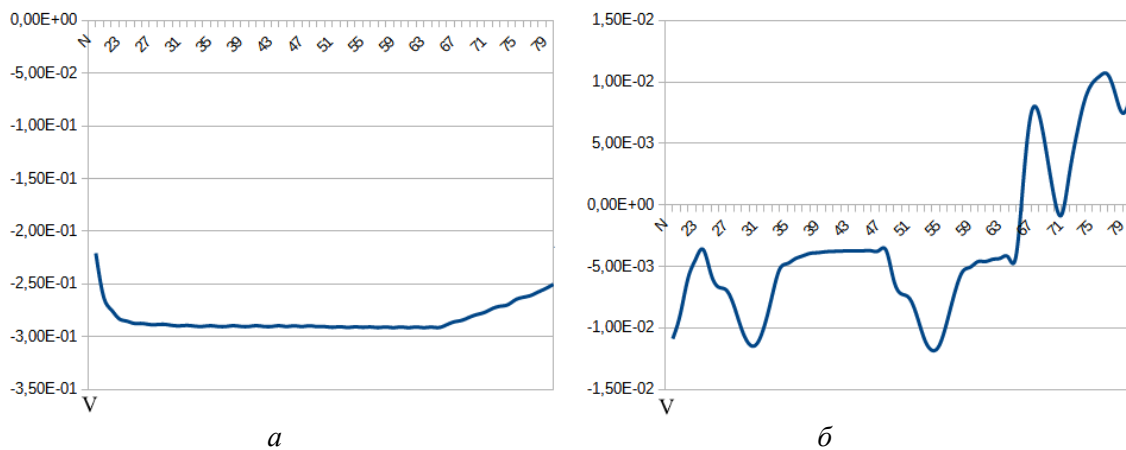


Рис. 6. Графіки залежність величин горизонтальних складових швидкостей розплаву від висоти: *а* — без газозахоплення, *б* — з газозахопленням

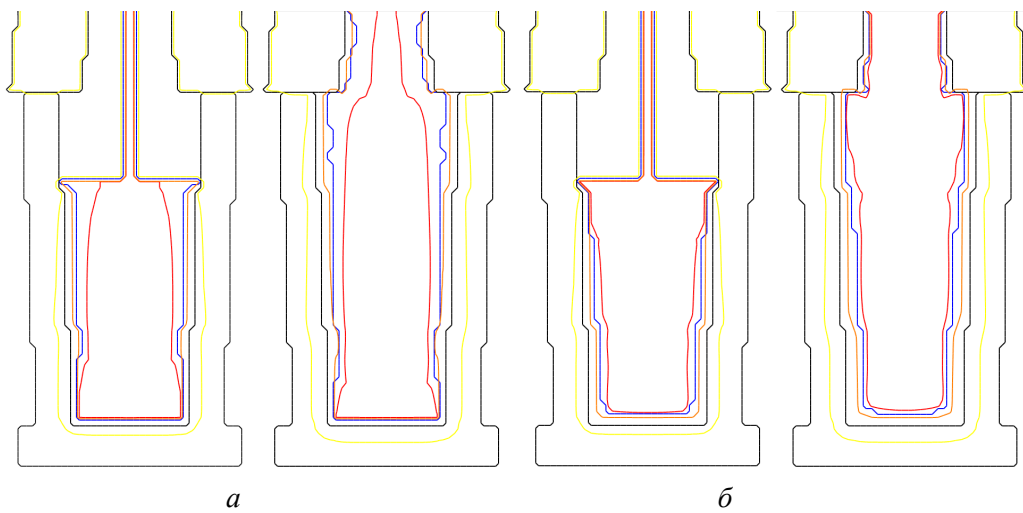


Рис. 7. Поля температур у моменти часу $t = 170\text{с}$, 300с : *a* — без газозахоплення, *б* — з газозахопленням

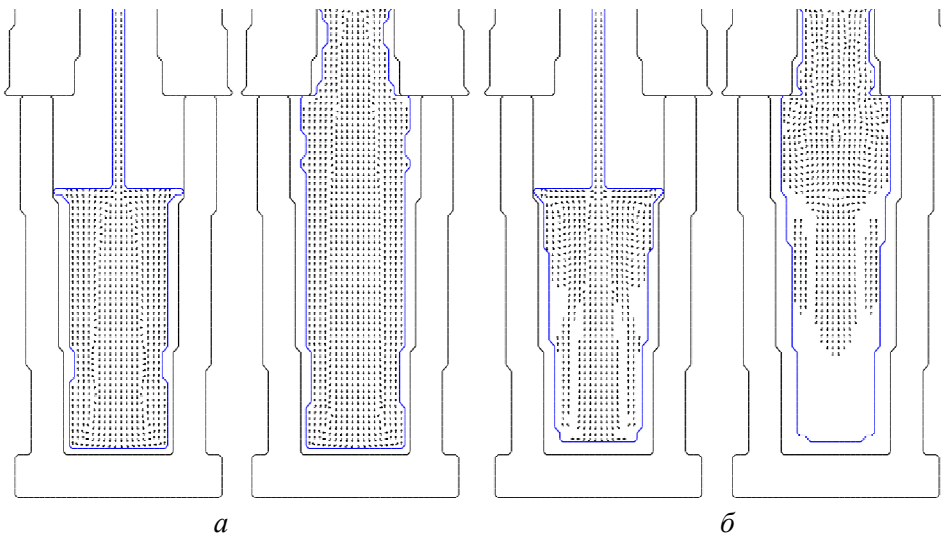


Рис. 8. Гідродинамічна картина у моменти часу $t = 170\text{с}$, 300с : *a* — без газозахоплення, *б* — з газозахопленням



Рис. 9. Графіки залежності величини об'ємної частки газу від висоти розплаву: *a* — біля струменя, *б* — біля бічної поверхні виливниці

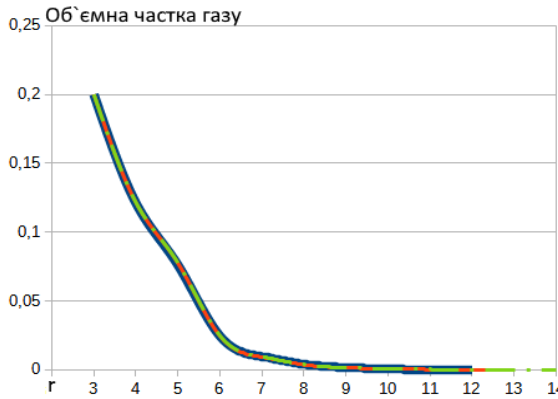


Рис. 10. Графік залежності величини об'ємної частки газу від близькості до струменя. У різні моменти часу відображається: синім — $t = 5$ с, помаранчевим — $t = 123$ с, зеленим — $t = 264$ с

розплаву можна бачити й на рис. 10, як й те, що він значно зменшується при віддаленні від струменя, але, при цьому не змінюється з висотою розплаву.

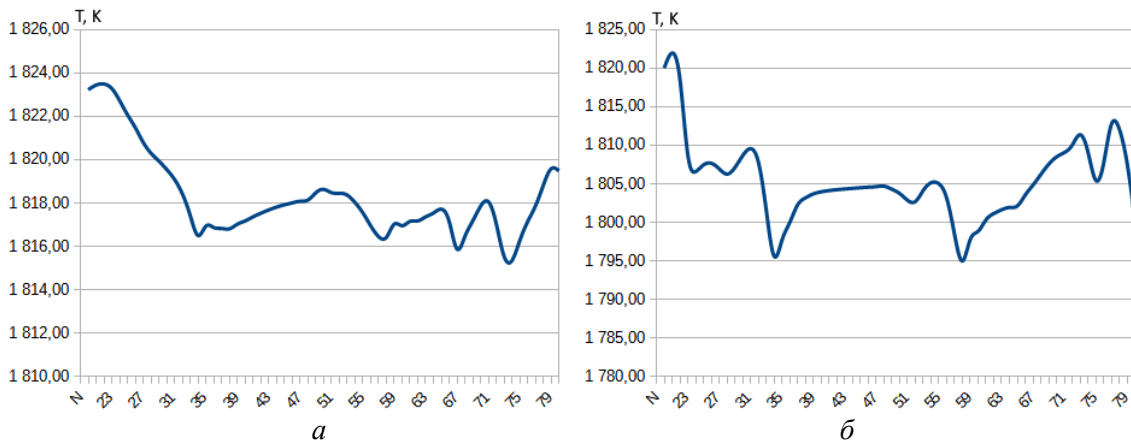


Рис. 11. Графік залежності температури від висоти розплаву: а — біля струменя, б — біля бічної поверхні виливниці

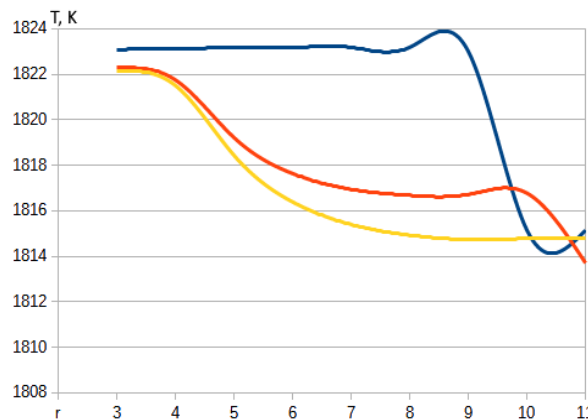


Рис. 12. Графік залежності температури від близькості до струменя. У різні моменти часу відображається: синім — $t = 5$ с, помаранчевим — $t = 123$ с, жовтим — $t = 264$ с

Порівнявши поля швидкостей на рис. 8, а і 8, б дозволяє побачити їх якісну відмінність. Гідродинамічна картина за відсутності газозахоплення кардинально інша, порівняно з випадком в якому газозахоплення присутнє. Не дивлячись на значну глибину наповнення, струмінь проникає до самого дна виливниці, і лише у дна відгортає до стінок, продовжуючи подальший рух вгору уздовж затверділої кірки металу, утворюючи потім глобальний торoidalний вихор, що обертається в площині рисунка проти годинникової стрілки.

Також ми бачимо що рівень газоконцентрації значно більше біля струменю розплаву (рис. 9, а), аніж біля бічної поверхні виливниці (рис. 9, б), а також те, що з підняттям рівня розплаву рівень газоконцентрація збільшується в обох випадках. Відносно великий рівень газоконцентрації біля струменю

У свою чергу, відмінність температури при підніманні розплаву біля струменя і біля бічної поверхні (рис. 11) є незначною. З рис. 12 можна бачити те, що температура зменшується при віддаленні від струменя незалежно від моменту часу, а також зменшення температури з плином часу.

Висновки

У даній роботі розроблено математичну модель наповнення виливниці струменем розплаву сталі зверху з урахуванням газозахоплення. Для розв'язання рівнянь моделі було використаний метод розщеплення за фізичними факторами для несолейдального руху [1] і явну різницеву схему для рівняння теплопереносу. Для перевірки адекватності побудованої моделі, а також для виявлення впливу об'ємної частки газозахоплення на перебіг різноманітних процесів під час заповнення виливниці розплавом проведено чисельні дослідження для двох випадків: без урахування газозахоплення та з урахуванням газозахоплення. За результатами цих досліджень побудовано графіки залежностей розподілу температури і швидкості розплаву від об'ємної частки газозахоплення. Порівняння отриманих результатів свідчить про значний вплив захопленого газу на перебіг всіх процесів у виливниці під час її наповнення розплавом сталі.

Результати чисельних експериментів співпадають з аналогічними результатами, які були представлені в роботі [2], що свідчить про адекватність розробленої математичної моделі.

Список використаної літератури

1. Огурцов А.П., Самохвалов С.Є. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах. Київ: Наукова думка, 2001. 412 с.
2. Самохвалов С.Є., Надригайло Т.Ж. Комп'ютерне моделювання багатофазних середовищ у зливку. Дніпродзержинськ, видавництво ДДТУ, 2009. 144 с.
3. Valter A.I. Influence of hydrodynamic casting conditions on the formation of steel ingot / News of TSU. Technical science. 2023. Vol 3., С. 14–17.
4. Яковлев Ю.Н. Гідродинамічні процеси у виливницях під час розливання зверху / Яковлев Ю.Н., Харченко С.В., Тарапай М.А. та ін. Металургія та коксохімія. Мет. сталі. К.: Техніка, 1972. № 30. С. 83–88.

References

1. Ogurtsov, A.P., & Samokhvalov, S.YE. (2001) *Matematychnye modelyuvannya teplofizychnykh protsesiv u bahatofaznykh seredovyshchakh*. [Mathematical modeling of thermophysical processes in multiphase environments] Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
2. Samokhvalov, S.YE., & Nadryhaylo, T.ZH. (2009) *Komp'yuterne modelyuvannya bahatofaznykh seredovyshch u zlyvku* [Computer modeling of multiphase environments in ingots] Dniprodzerzhynsk: vydavnytstvo DDTU [in Ukrainian].
3. Valter, A.I. (2023) *Influence of hydrodynamic casting conditions on the formation of steel ingot*. News of TSU. Technical science (Vols. 3), (pp. 14–17) [in Ukrainian].
4. Yakovlev, YU.N., Kharchenko, S.V., Tarapay, M.A. et al. (1972) *Hidrodynamicichni protsesy u vylyvnytsyakh pid chas pozlyvannya zverkhу* [Hydrodynamic processes in pourers during pouring from above] Metalurhiya ta koksokhimiya. Met. stali. K.: Tekhnika, (№ 30), (pp. 83–88) [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 05.07.2023