

## ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НА МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ СПІНЕННЯ З ІНЖЕКЦІЄЮ ГАЗУ

*Анотація. Кисневі конвертори часто використовуються у виробництві сталі для вида-лення вуглецю з чавуну за допомогою продувки киснем та для розплавлення металобрух-ту. Шлак на поверхні розплаву всередині конвертора уповільнює газові бульбашки, що утворює велику кількість емульсії або піни. Іноді рівень піни може перевищувати висоту конверторної ванни. Щоб запобігти цьому, металургам потрібно прогнозувати подібні ситуації та відповідно зменшувати вдування газу в небезпечні періоди. Після багатьох років використання кисневих перетворювачів металурги отримали досвід і знають без-печні режими цього процесу. Однак ці режими можна вдосконалити за допомогою мате-матичного моделювання, яке користується популярністю в наші дні, оскільки воно має менші витрати, ніж реальні експерименти на заводі чи в лабораторії. Гідродинамічні процеси в конверторі складні, тому математична модель повинна уникати надмірного спрощення та враховувати важливі деталі про них. У попередній роботі представлена модель з детальним описом рівнянь (Нав'є-Стокса) та граничних умов. Чисельне рішення простіше отримати, ніж аналітичне для такої складної моделі. Для перевірки адекват-ності моделі використовуються такі припущення: загальна кількість газу повинна бути збережена у випадку закритого об'єму, а також поле тиску повинно збільшуватися від-повідно до отриманої кількості газу; у разі переміщення вільної поверхні рівень піни по-винен змінюватися відповідно до приходу газу і повертатися до початкового значення після того, як весь газ піде з рідини.*

*Представлені малюнки ілюструють зміну рівня піни у випадку, коли газ надходить у роз-плав протягом перших 20 секунд з лінійним зниженням до нуля через 20 секунд. Обчислю-вальна область має 72x144 комірок. Ефективність обчислень знижується, коли рівень пі-ни зростає, оскільки в розрахунку бере участь більше клітин. На інших рисунках показано газове поле (кольором) і поле швидкості (стрілками) для двох випадків: коли об'єм за-критий і коли поверхня розплаву рухається. У закритому об'ємі зазначені вище припу-щення перевірено та подано графік залежності кількості газу. На основі цього зроблено висновок про якісну адекватність моделі. 2D-візуалізація здійснюється у комп'ютерній програмі, розробленої на популярній мові.*

*Ключові слова: обчислювальна динаміка рідини, вільна поверхня, перетворювач кисню, газошлакова піна.*

**Постановка проблеми.** Кисневі конвертори широко використовуються на металургійних комбінатах, зокрема для видалення киснем вуглецю з чавуну та для розплавлення металобрухту як крок на шляху до виробництва сталі. Шлак на поверхні розплаву уповільнює газові бульбашки, які утворюють емульсію або піну. Рівень піни може перевищувати висоту конверторної ванни. Щоб запобігти цьому, металургам потрібно прогнозувати подібні ситуації та відповідно зменшувати вдування газу в небезпечні періоди.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні десятиліття дослідники конверторів приділяють увагу моделюванню гідродинамічних та теплофізичних процесів у конверторній ванні. Так у роботі [1] автори провели експеримент по визначенню максимальної висоти піни за допомогою спеціальної труби і двох проволочок для підведення електроенергії. Знайдено залежність індексу спінення від основності та температури. У статті [2] автори моделюють спінення за допомогою силіконових масел. Одержано залежність динамічної в'язкості від відсотка парафінових частинок. Подано фотографії прозорої труби з піною в різних умовах. При цьому діаметр бульбашок піни збільшується починаючи від дна до поверхні у 3-4 рази. У роботі [3] розглянуто математичну модель спінення з використання Ейлерового методу для врахування фаз рідина-газ. Враховано формування і зникнення бульбашок. Стаття [4] присвячена моделюванню спінення за допомогою індукційного підігріву. Встановлено не Н'ютонівську поведінку піни. У дисертації [5] автор досліджував поведінку піни в різних умовах, а також швидкість падіння силіконової частинки в піні. Порівняння підтверджують адекватність розрахунку швидкості.

**Формулювання мети дослідження.** Необхідно виконати чисельне дослідження математичної моделі спінення в різних умовах, перевірити її якісну адекватність і визначити залежність рівня спінення від часу.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Математичне підґрунтя для моделювання багатоскладових середовищ (далі використовується газорідинне) викладено у роботі [6]. Основні припущення щодо геометрії ковша і обчислювальної області, а також стисливого середовища і властивостей рідини викладено у попередній статті [7]. В статті [7] математична модель ґрунтується на рівняннях Нав'є-Стокса для стисливого середовища з припущенням про сталість об'ємної в'язкості.

Чисельний експеримент виконувався виходячи з наступних параметрів:

1) Область розрахунку має висоту 2 м, а радіус – 1 м. Кількість комірок по радіусу – 72, а по висоті – 144.

2) Крок за часом – 0,001 с.

3) Максимальний об'єм газу подається у першій чверті радіусу області на початку досліду і лінійно з часом зменшується до нуля на 20 секунді.

4) Швидкість газу відносно рідини прийнято сталою величиною, яка визначається окремо – 0,1 м/с.

5) Початковий рівень розплаву складає півметра.

На рисунку 1 кольором зображено поле газу (синій – майже нульова об'ємна частка, червоний – приблизно третина комірки зайнято газом). Стрілками позначено поле швидкості розплаву – у верхній частині рисунка знаходиться рівень поверхні, який майже у два рази перевищив початкову глибину розплаву.

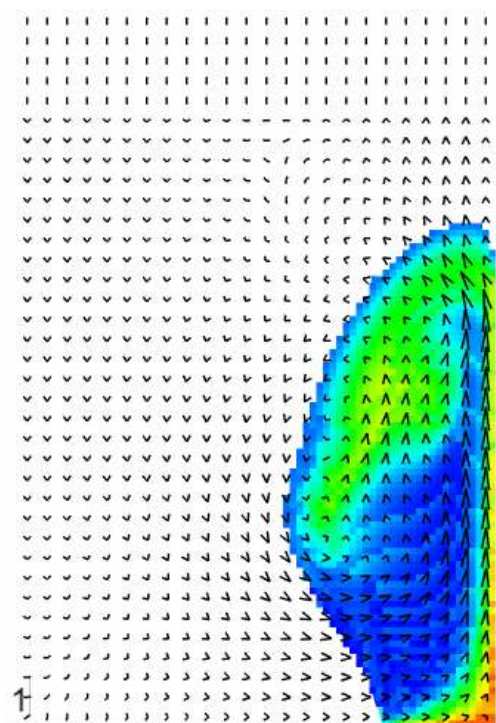


Рисунок 1 – 4-та секунда модельного часу у випадку вільної плоскої поверхні середовища рідина-газ.

Поле газу рухається вгору, прискорюючи розплав і наздоганяючи поверхневий рівень розплаву, який підвищився першим. Очевидно, чим менша швидкість газу відносно розплаву, тим вище буде підійматися рівень.

Рисунок 2 відображає зміну глибини розплаву у часі. На початку він зростає через газове насичення розплаву. Після 5-ї секунди газ досягає поверхні і вилітає з розплаву, чим різко зменшує глибину, хоч і не повністю. Залишки газу все ще є всередині розплаву, який уніс їх з собою в глибину, тому бачимо повільне зменшення рівня після 9-ї секунди.

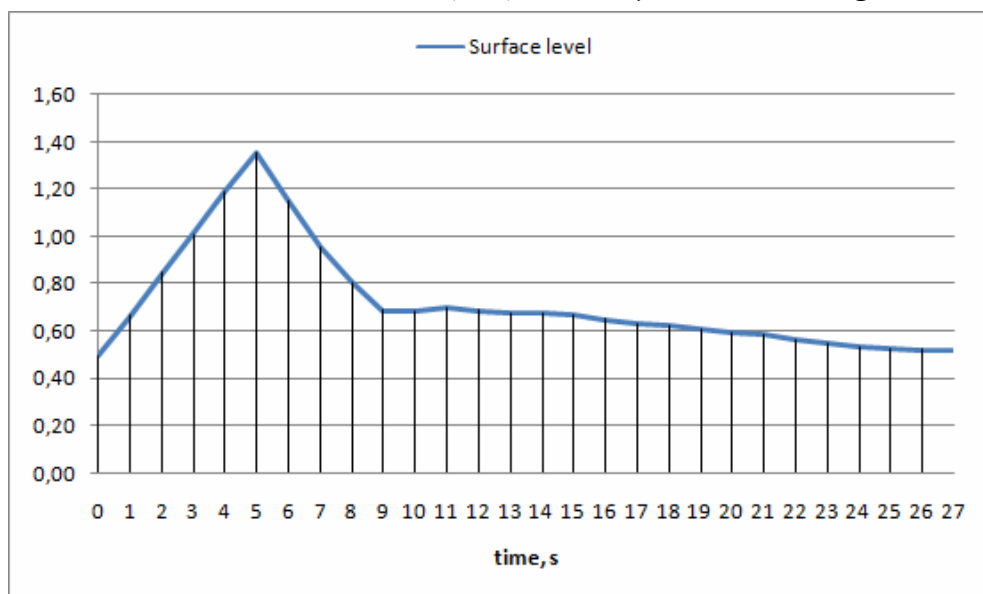


Рисунок 2 – Залежність глибини розплаву від часу у випадку спінення – руху вільної плоскої поверхні середовища рідина-газ

Для перевірки збереження кількості газу в розплаві математичної моделі був виконаний дослід у замкненому просторі – із зміною граничних умов на такі, які відповідають твердій поверхні:

- 1) Швидкість поверхні розплаву дорівнює нулю.
- 2) Градієнт тиску на поверхні також дорівнює нулю.
- 3) Газ не залишає розплав – нульовий градієнт на поверхні.

Результат моделювання показано на рисунку 3. Поле газу поступово заповнює замкнений простір, починаючи з верхньої частини. Вихори розплаву, прискорюючись полем газу, переміщуються зліва направо та навпаки. На рисунках кожен вектор відображає напрямок і величину, усереднені поміж дев'яти векторів розрахованого поля швидкості.

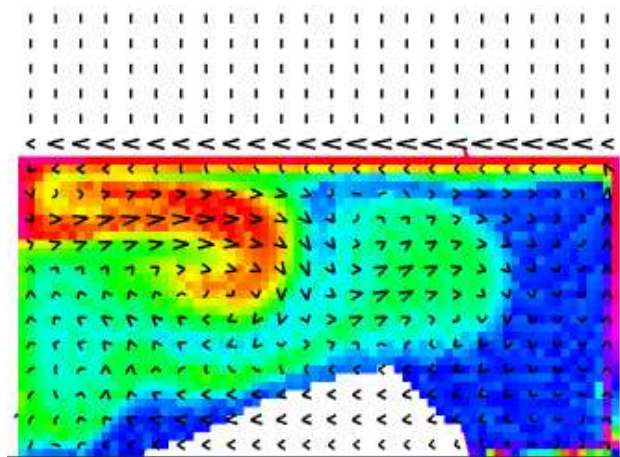


Рисунок 3 – 10-та секунда модельного часу у випадку замкненого простору

Залежність сумарної кількості газу від часу показано на рисунку 4. З першої секунди надходять великі об'єми газу, поступово зменшуючись з часом, тому графік має нелінійний ріст до 20-ї секунди. Після 20-ї секунди вдування газу закінчується і його кількість стає сталою передбачуваною величиною – несуттєві її коливання не видно на графіку. Невеликі (у межах 1-3%) коливання зумовлені чисельним розв'язком і можуть бути знехтувані у масштабі всієї розрахункової області. Як видно на рисунку тиск також збільшується відповідно до надходжень газу і залишається сталим після 20-ї секунди. Узгодженість у графіках тиску і газу зрозуміла з точки зору фізики: чим більше газу подавати у замкнених простір тим більший тиск буде всередині. Звичайно мається на увазі ідеальний газ. У моделі, що розглядається, не враховано зміну температури. Хоча у порожнині конвертора розплав має суттєвий градієнт температур, особливо коли йде інтенсивне горіння вуглецю, а металевий брухт тільки починає прогріватися.

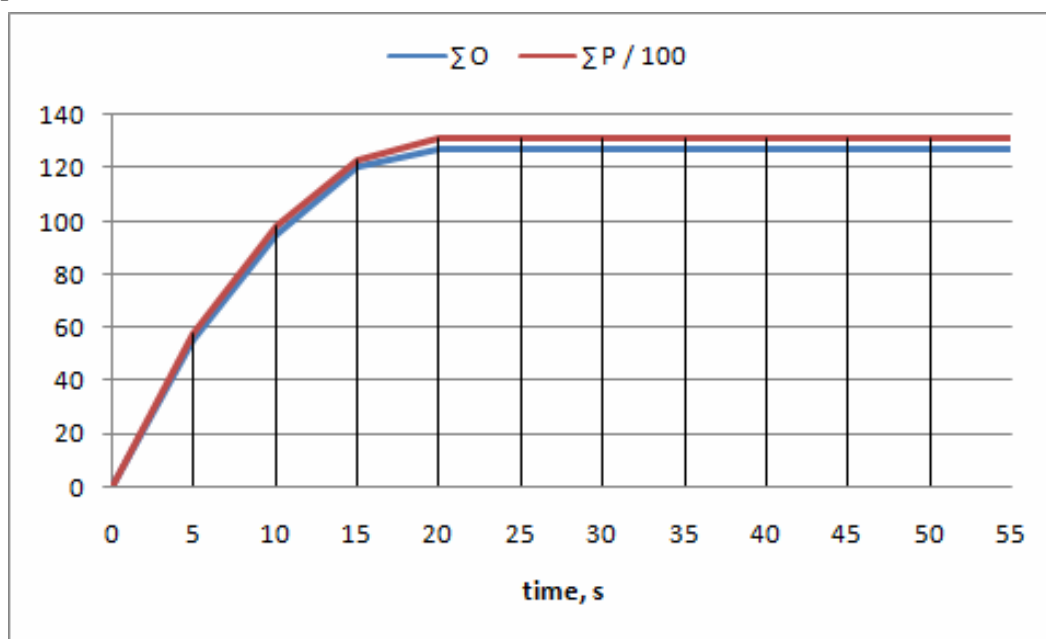


Рисунок 4 – Зміна кількості газу та тиску у випадку замкнутого простору

**Висновки.** Виконано ряд чисельних дослідів на запропонованій раніше математичній моделі. Одержані розв'язки модельних задач підтверджують якісну адекватність моделі: зокрема досліджено консервативність поля газу; зміна рівня розплаву відбувається у відповідь на подачу газу в розплав і узгоджується з його виходом з розплаву. Вищесказане є підґрунтям до рекомендації використовувати модель на практиці.

**ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА**

1. Stadler S.A.C., Eksteen J.J., Aldrich C. An experimental investigation of foaming in acidic, high FexO slags. – 2007, № 20, pp. 1121-1128.
2. Wu L. S., Albertsson G. J., Sichen D. Modelling of slag foaming // Ironmaking & Steelmaking. – 2010, Vol. 37, № 8, pp. 612-619.
3. Sattar M.A., Naser J., Brooks G. Numerical simulation of slag foaming in high temperature molten metal with population balance modeling // Proceedings of 5th BSME International Conference on Thermal Engineering. – 2013, № 56, pp. 421 – 428.
4. Martinsson J., Glaser B., Sichen D. Study on Apparent Viscosity and Structure of Foaming Slag // Metallurgical and materials transactions. – 2016, Vol. 47B, pp. 2710-2713
5. Martinsson J. A Study of the Behavior of Foaming Slag in Steelmaking // Doctoral Thesis, Stockholm, 2018. 65p.
6. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е., Надрыгайло Т.Ж. Методы расщепления в задачах гидродинамики и тепломассопереноса. – Днепропетровск: Системные технологии, 2003. – 260 с.
7. Красніков К.С., Лижов М.В. Математичний опис інтенсивності шлакового піноутворення в конверторі під час продування газом // Системні технології. – 2019, № 5 (124), с. 116-123.

**REFERENCES**

1. Stadler S.A.C., Eksteen J.J., Aldrich C. An experimental investigation of foaming in acidic, high FexO slags. – 2007, № 20, pp. 1121-1128.
2. Wu L. S., Albertsson G. J., Sichen D. Modelling of slag foaming // Ironmaking & Steelmaking. – 2010, Vol. 37, № 8, pp. 612-619.
3. Sattar M.A., Naser J., Brooks G. Numerical simulation of slag foaming in high temperature molten metal with population balance modeling // Proceedings of 5th BSME International Conference on Thermal Engineering. – 2013, № 56, pp. 421 – 428.
4. Martinsson J., Glaser B., Sichen D. Study on Apparent Viscosity and Structure of Foaming Slag // Metallurgical and materials transactions. – 2016, Vol. 47B, pp. 2710-2713
5. Martinsson J. A Study of the Behavior of Foaming Slag in Steelmaking // Doctoral Thesis, Stockholm, 2018. 65p.
6. Ogurtsov A.P., Samokhvalov S.E., Nadrygailo T.G. Splitting methods in problems of hydrodynamics and thermomasstransfer. – Dnipro: System technologies, 2003, – 260p.

7. Krasnikov K.S., Lyzhov M.V. Mathematical description of slag foaming intensity in convertor during gas blowing // System technologies. – 2019, № 5 (124), с. 116-123.

Received 04.01.2021.

Accepted 11.01.2021.

#### **Численные исследования на математической модели вспенивания с инъекцией газа**

*Шлак на поверхности расплава внутри конвертера замедляет образование пузырьков газа, что приводит к образованию аварийного количества эмульсии или пены. Для проверки адекватности математической модели данного процесса используются следующие допущения: общее количество газа должно сохраняться в случае замкнутого объема, а поле давления должно увеличиваться соответственно полученному количеству газа; в случае движения свободной поверхности уровень пены должен изменяться в соответствии с поступлением газа и возвращаться к исходному значению после того, как газ покинет жидкость.*

*Проведенные исследования и показанные иллюстрации дают основание сделать вывод о качественной адекватности модели.*

#### **Numerical experiments on mathematical model of foaming with gas injection**

*Oxygen converters are often used in steelmaking to remove carbon from pig iron by oxygen blowing and to melt metal scrap as step on the way for producing steel. Slag on the surface of melt inside convertor slows down gas bubbles, which makes great amount of emulsion or foam. Sometime the level of foam can exceed the height of converter bath. To prevent this, metallurgists need to predict such situations and decrease gas blowing accordingly at dangerous periods of converting. After many years of using oxygen converters metallurgists get good experience and know safe modes of this process. However these modes can be improved by mathematical modeling, which takes popularity in our days because it has lower costs than real experiments in a plant or laboratory. Hydrodynamic processes in converter are complex so mathematical model needs to avoid oversimplification and to take into account important details about them. In previous work model is presented with details about equations (Navier-Stokes) and boundary conditions. Numerical solution is simpler to get than analytical one for such complex model. To check adequacy of the model the following assumptions are used: total amount of gas must be conserved in a case of closed volume as well as field of pressure must increase correspondingly to received amount of gas; in case of moving free surface a level of foam must change accordingly to gas income and return to an initial value after all gas are gone from fluid.*

*Presented figure illustrate change of foam level in a case when gas comes to the melt during the first 20 seconds with linear decrease to zero at 20 second. Computational domain is represented by 72x144 cells. Computation performance decreases when level of foam grows, because more cells take part in solving. Other figures show gas field (quantity is represented by color gradient) and speed field (drew by arrows with related length) for two cases: when volume is closed and when surface of melt is moving. In closed volume the mentioned above assumptions are checked and correspondent chart with gas and pressure is presented. Thus a conclusion is made about qualitative adequacy of model. 2D visualization is made by computer program developed using popular language.*

**Красніков Кирило Сергійович** – к.т.н., старший викладач кафедри програмного забезпечення Дніпровського державного технічного університету.

**Лижов Микита Володимирович** – аспірант кафедри прикладної математики Дніпровського державного технічного університету.

**Красников Кирилл Сергеевич** – к.т.н., старший преподаватель кафедры программного обеспечения Днепропетровского государственного технического университета.

**Лыжов Никита Владимирович** – аспирант кафедры прикладной математики Днепропетровского государственного технического университета.

**Krasnikov Kyrylo Serhiiiovych** – PhD, senior lecturer at Systems software department of Dniprovskiy state technical university.

**Lyzhov Mykyta Volodymyrovych** – PhD graduate at Applied mathematics department of Dniprovskiy state technical university.