

**ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИТІКАННЯ
ГАЗОВИХ СТРУМЕНІВ З ЦИЛІНДРИЧНОГО СОПЛА ЗА ДОПОМОГОЮ
МЕТОДІВ ТІНЬОВОЇ ЗЙОМКИ**

Голуб Т.С.¹, Молчанов Л.С.², Мінай О.М.³

¹ Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, к.т.н., Україна

² Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, к.т.н., Україна

³ Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, PhD, Україна

Анотація. Протягом усього періоду існування киснево-конвертерного способу виробництва сталі створено багато різновидів конструкцій продувних сопел для верхньої продувки у кисневих конвертерах, і цей творчий процес вдосконалення й до сьогодні має значний потенціал. Кожне ново створене сопло потребує випробування та вивчення щодо технологічних та фізичних можливостей впливу на газовий потік, яке у промислових умовах зробити майже неможливо. Відповідно активно розвиваються високотемпературні, низькотемпературні й математичні методи моделювання щодо дослідження газо-гідродинамічних особливостей газових струменів, що витікають з сопел різної конструкції. Математичне моделювання вже давно зайняло важливе місце серед інших методів завдяки можливості одночасного оцінювання декількох факторів впливу та можливості прогнозування параметрів роботи сопел. Однак такий тип моделювання на початкових стадіях потребує верифікації, яку найчастіше, за наявності обладнання, роблять прямими методами вимірювання швидкостей. В роботі проведено дослідження можливості верифікації результатів математичного моделювання витікання газового струменя з циліндричного сопла шляхом застосування методів тіньової зйомки. Відзначено значний рівень відповідності результатів обох типів моделювання та переваги математичного моделювання.

Ключові слова: сопло для продувки, фізичне моделювання, математичне моделювання, тіньова зйомка, верифікація результатів

Кисневий струмінь у процесах отримання рідкої сталі відіграє головну роль як з точки зору газо-динамічного впливу на ванну для здійснення масообмінних процесів між рідкими шлаковою та металевою фазами, так і з точки зору забезпечення окислювально-відновних перетворень [1]. Для забезпечення раціональних умов взаємодії кисневого струменя з рідкою ванною та поліпшення технологічних та екологічних показників виплавки у кисневих конвертерах постійно вдосконалюються наявні конструкції

продувних фурм та створюються нові конструкції пристроїв та удосконалюються конструкції продувних сопел [2]. Будь-яке нововведення потребує випробування на практиці для відпрацювання сталих раціональних режимів роботи. У зв'язку із цим широкого загалу набуло різнопланове моделювання процесів продувки у кисневих конвертерах: фізичне високотемпературне, низькотемпературне або математичне моделювання [3-5]. Останнє займає особливе місце серед інших способів, бо надає можливість отримати не тільки кількісну оцінку технологічних показників продувного пристрою, але й спрогнозувати характеристики газового струменя, що витікає з досліджуемого продувного пристрою, при зміні одного чи декількох параметрів одночасно й більш точно оцінити раціональні робочі параметри та можливі недоліки роботи пристрою, такі як розгар кромки, тощо [5].

Однак точність математичного моделювання залежить від граничних умов, які використовуються й від точності складених рівнянь, за якими проводяться розрахунки. Відповідно на початкових стадіях моделювання роботи продувного пристрою необхідно проводити верифікацію результатів моделювання. Найчастіше верифікацію проводять за допомогою прямого вимірювання швидкостей у потоці за конкретних умов продувки, як у [5]. Однак, для цього потрібно спеціальне обладнання (трубка Піто з отворами відповідного діаметру). А якщо моделювання проводиться на соплах малих розмірів, то внесення стороннього тіла в потік газу спричиняє значний вплив на показники струменя, у тому числі й на швидкість. Іншим варіантом проведення верифікації результатів моделювання може бути тіньова зйомка газового струменя, що витікає за умов, які обрані для моделювання [6].

Метою роботи була оцінка можливості верифікації результатів математичного моделювання витікання газового струменя з продувного сопла за допомогою результатів тіньової зйомки для умов циліндричного сопла.

Для дослідження було обрано одне циліндричне сопло із діаметром $3,2 \cdot 10^{-3}$ м (у масштабі 1:13 до еквівалентного перетину промислового сопла верхньої кисневої фурми для продувки у 250-т конвертері), продувку через яке здійснювали повітрям за умов тиску 100 – 300 кПа надлишкові. Математичне

моделювання проведено за допомогою програми ANSYS Fluent, призначеної для вирішення задач обчислювальної гідродинаміки (CFD) та газодинаміки. Для моделювання у програмі був обраний алгоритм рішення, що базується на густині та який застосовується для розрахунків високошвидкісних транс- та надзвукових потоків та запускає заснований на щільності алгоритм розв'язання рівняння Нав'є-Стокса. При цьому дискретизація основних рівнянь має вигляд неусталеного рівняння збереження енергії для перенесення скалярних величин [7]. Також були враховані рівняння зміни енергії та турбулентності за рахунок оцінювання суми коефіцієнтів ламінарної та турбулентної в'язкості та теплопровідності [7]. Властивості модельного тіла – повітря, задавалися рівнянням стану ідеального газу Клапейрона-Менделєєва. Для отримання точних рішень необхідно було використовувати дискретизацію рівнянь (потoku; кінетичної енергії в турбулентному потоці; рівня розсіювання турбулентного потоку) другого та вище порядків точності [7]. Результати моделювання були отримані у вигляді як кольорових полів швидкостей за довжиною струменя, так і графічних залежностей швидкості струменя від координати вздовж горизонтальної вісі.

Для оцінки отриманих результатів математичного моделювання було проведено натурне дослідження продувки крізь циліндричне модельне сопло методом тіньової зйомки. Ключовими моментами тіньової зйомки були: забезпечення лінійності світового потоку від джерела світла, забезпечення перпендикулярності джерела світла та газового струменя й екрану. Експериментальні фотознімки були перш за все порівняні з кольоровими полями швидкостей, розрахованих за однакових умов. На рис. 1 наведено приклад порівняння для умов тиску перед соплом 300 кПа надлишкових. На результаті моделювання та фотозйомки вихідний переріз сопла у наведеному форматі рисунку є однаковим для забезпечення адекватної можливості порівняння. Відповідно до рисунків видно, що отримані за результатами математичного моделювання особливості зміни швидкості газового потоку за довжиною струменя з утворенням «бочкоподібних» структур мають відповідні відображення на фото, отриманих тіньовою зйомкою, з наявними ділянками

ущільнень й розріджень середовища, які відбиваються в згущенні або висвітленні інтенсивності кольору на фотознімку. При цьому слід відзначити, що результати математичного моделювання мають більш наочний характер та дають змогу більш повно оцінити характер розповсюдження газового струменя з моменту витікання з сопла і далі за осьовим направленням. Видно, що саме в центрі кожного «бочкоподібного» утворення швидкість струменя набуває максимального значення. Також видно, що надалі, за областю утворення «бочкоподібних» структур, струмінь дещо розширюється у порівнянні з вихідним перетином (приблизно на 15 – 20 %), зберігаючи достатньо високі значення швидкості (вище звукової швидкості 330 м/с для повітря).

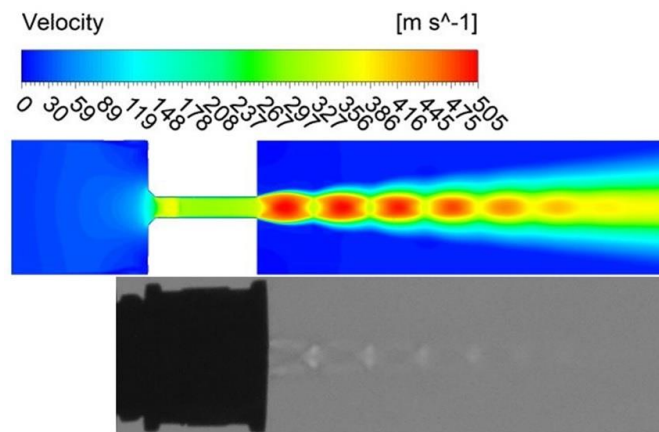


Рисунок 1 – Порівняння результатів математичного моделювання та тіньової зйомки витікання газового струменя крізь циліндричне сопло за тиску продувного газу 300 кПа

Також слід відзначити, що на рисунках співпадають довжини утворених відповідних за довжиною струменя «бочок»: для першої – 0,012 м, другої – 0,014 м, третьої 0,013 м, четвертої – 0,012 м (далі за наявних умов зйомки на фото «бочкоподібні» утворення немає можливості точно оцінити). Дещо відрізняється висота «бочкоподібних» утворень за фото від математично отриманих приблизно на 1 мм, що, ймовірно, пов'язано з точністю фотозйомки.

Відповідно до методики оцінювання швидкості газового потоку за тіньовими фото, за якої швидкість газового потоку перед ударною хвилею визначається за кутом нахилу прямої стрибка ущільнення [6], були обчислені швидкості за першими трьома «бочкоподібними» утвореннями й результати співставлені з результатами обчислення швидкості методом математичного

моделювання. На рис. 2 наведено у якості прикладу співставлення для умов продувки з надлишковим тиском 300 кПа. Було відзначено, що результати математичного моделювання та ті, що були отримані за тіншовими фото, відрізняються на величину порядку 1,6 – 5,5 %. Це дає змогу зробити висновок про адекватність отриманих результатів шляхом математичного моделювання. Слід відзначити, що точність методу визначення швидкості за тіншовою зйомкою, як і будь-який метод, у якому бере участь людина, залежить від точності побудови прямих та визначення їх координат перетину осей для встановлення кутів нахилу. Однак, для даного випадку пряме вимірювання не надасть точніших результатів, бо діаметр модельного сопла менше чи співпадає з діаметром отворів стандартних трубок Піто. Крім того наявною є перевага математичного моделювання, яке дозволяє отримати не тільки у окремих точках дані швидкостей газового струменя, але й дізнатися як і з яким характером швидкості змінюється за довжиною струменя. Ці данні дають додаткову корисну інформацію для розуміння поведінки як окремо газових потоків, так і на наступному етапі – у взаємодії із рідкою ванною.

Проведене дослідження дало змогу зробити висновок, що верифікацію результатів математичного моделювання можливо проводити шляхом тіншової зйомки витікання газових потоків з сопел, які моделюються, за однакових з математичним моделюванням технологічних умов. Відзначено високий рівень візуального спів падіння отриманих результатів та значний рівень співпадіння фактично обчислених результатів за показником швидкості витікання газового струменя на різних ділянках за довжиною. Відмічено, що математичне моделювання має значні переваги як щодо візуалізації загальної картини особливостей розподілу швидкостей у струмені при витіканні з сопла, так і щодо визначення зміни величини швидкості у різних точках за осьовим направленням.

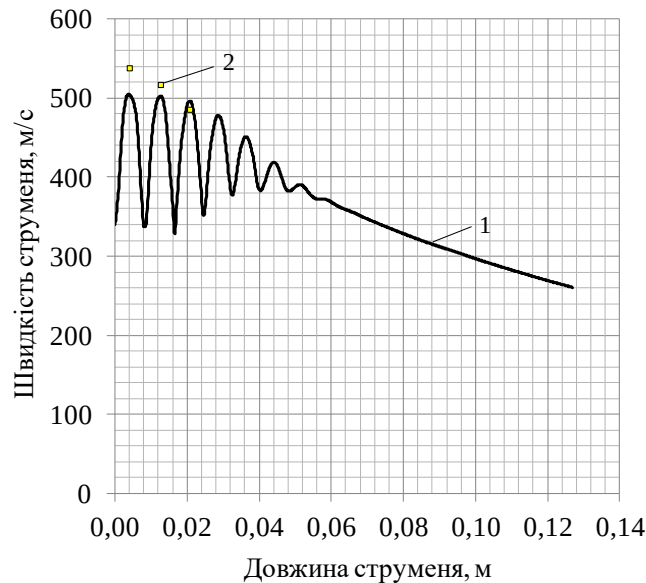


Рисунок 2 – Співставлення результатів математичного обчислення (1) швидкості за горизонтальною віссю струменя та швидкостей, оцінених за тінювими фото (2)

ЛІТЕРАТУРА

1. Visuri V.-V., Holappa L. Converter Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy (Second Edition), 2024. Vol.3 Industrial Processes. P. 183–241
2. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В. Новые разработки конструкций кислородных фурм и способов продувки ванны 160-т конвертеров ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Теория и практика металлургии, 2010. т. 2. С. 31–38
3. Gonçalves F., Ribeiro M., Correa R., Silva R., Braga B., Maia B., Tavares R., Carvalho D., Schenk J. Measurements methodologies for basic oxygen furnace cold modeling. Journal of Materials Research and Technology, 2021. Vol. 13. P. 834–856.
4. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О. Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы. Металл и литье Украины, 2017. № 6-7. С. 17–21
5. Liu F., Lu S., Zeng S., Zhu R., Wei G., Dong K. Flow field of supersonic oxygen jet generated by various wear lengths at the Laval nozzle exit. Coatings, 2024. Vol. 14(11). P. 1444.
6. Ya. B. Zel'dovich, Yu. P. Raizer physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. Dover Publications. 944 p.
7. Isaev S.A., Lysenko D.A. Testing of the fluent package in calculation of supersonic flow in a step channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2004. Vol. 77. P. 857–860.

VERIFICATION OF THE RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF GAS JETS OUTFLOW FROM A CYLINDRICAL NOZZLE USING SHADOW PHOTOGRAPHY METHODS

Golub T.S., Molchanov L.S., Minai O.M.

Abstract. *Many varieties of designs of top blowing nozzles in oxygen converters were created. Every new nozzle requires testing and studying the technological and physical possibilities, which is almost impossible to do in industrial conditions. High-temperature, low-temperature and mathematical modeling methods are actively developing for studying the gas-hydrodynamic features of gas jets flowing from nozzles of various designs. Mathematical modeling gives the possibility of simultaneously evaluating several factors and predicts the operating parameters of nozzles. However, this type of modeling at the initial stages requires verification. It is most often done with direct methods of measuring rates, depending on the availability of equipment. The paper studies the possibility of verifying the results of mathematical modeling of the outflow of a gas jet from a cylindrical nozzle by using shadow photography. A significant level of correspondence between the results of both types of modeling and the advantages of mathematical modeling were noted.*

Keywords: *blowing nozzle, physical modeling, mathematical modeling, shadowing photography, verification of results*

REFERENCE

1. Visuri V.-V., Holappa L. Converter Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy (Second Edition), 2024. Vol.3 Industrial Processes. P. 183–241.
2. Cherniatevych A.H., Sigarev Ye.N., Cherniatevych I.V. New developments of oxygen lances designs and methods of blowing the bath of 160-ton converters of OJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”. Theory and practice of metallurgy, 2010. Vol. 2. P. 31–38 [in Ukrainian]
3. Gonçalves F., Ribeiro M., Correa R., Silva R., Braga B., Maia B., Tavares R., Carvalho D., Schenk J. Measurements methodologies for basic oxygen furnace cold modeling. Journal of Materials Research and Technology, 2021. Vol. 13. P. 834–856.
4. Cherniatevych A.H., Molchanov L.S., Yushkevich P.O. High-temperature modeling of converter bath blowing using a three-tier lance. Metal and Casting of Ukraine, 2017. No 6-7. P. 17–21 [In Ukrainian]
5. Liu F., Lu S., Zeng S., Zhu R., Wei G., Dong K. Flow field of supersonic oxygen jet generated by various wear lengths at the Laval nozzle exit. Coatings, 2024. Vol. 14(11). P. 1444.
6. Ya. B. Zel'dovich, Yu. P. Raizer physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. Dover Publications. 944 p.
7. Isaev S.A., Lysenko D.A. Testing of the fluent package in calculation of supersonic flow in a step channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2004. Vol. 77. P. 857–860.