

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.046

**РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЗАНУРЕННЯ ЧАСТИНОК РЕАГЕНТУ З ГАЗОМ У  
РОЗПЛАВ ПРИ ІНЖЕКЦІЙНІЙ ПОЗАПІЧНІЙ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ**

Маначин І.О.<sup>1</sup> [ORCID], Єлісеєв В.І.<sup>2</sup> [ORCID],

Кисляков В.Г.<sup>3</sup> [ORCID], Рибальченко М.О.<sup>4</sup> [ORCID]

<sup>1</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України,  
к.т.н., ст. досл, Україна, Український державний університет науки і технологій,  
доцент, Україна

<sup>2</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України,  
к.ф-м.н., с.н.с., Україна,

<sup>3</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, к.т.н., Україна,

<sup>3</sup> Український державний університет науки і технологій, доцент, Україна

<sup>4</sup> Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доц., Україна

**Анотація.** Технології позапічної інжекційної ковшової десульфурзації чавуну засновані на введенні частинок реагенту в рідкий чавун за допомогою швидкісних газових струменів. Закономірності поведінки та взаємодій двофазних струменів (транспортуючий газ+реагент) з розплавом чавуну складні, оскільки втрачаються індивідуальні динамічні характеристики окремої частинки. Також важливим є питання про співвідношення кількості частинок, що пішли вглиб металу, і частинок, що опинилися у спливаючому пазурі. У цій роботі для оцінки факторів та параметрів занурення частинки реагенту при ковшовій десульфурзації чавуну сформульовано мету роботи - розробити наближену математичну модель з метою оцінки занурення частинок реагенту з газом у розплав чавуну. Наближена математична модель розроблена з урахуванням динамічного характеру процесу, в якій прийняті деякі величини відповідають більшим швидкостям руху

**Ключові слова:** реагент, частинка, модель, занурення, магній.

**Вступ.** Процеси позапічної інжекційної ковшової десульфурзації чавуну засновані на введенні частинок реагенту в рідкий чавун за допомогою інжекційних газових струменів [1, 2]. Залежно від виду технології ковшового рафінування чавуну застосовуються такі реагенти як магній, вапно і карбід кальцію.

**Постановка задачі.** Закономірності поведінки та взаємодій двофазних струменів (транспортуючий газ+реагент) з розплавом чавуну складні, оскільки втрачаються індивідуальні динамічні характеристики окремої частинки. Також залишається незрозумілим, але важливим питання про співвідношення кількості частинок, що пішли вглиб металу, і частинок, що опинилися у спливаючому пузирі. Внаслідок цього, важливим є питання про занурення окремої частки, що летить, у розплав. З гідродинамічної точки зору задачі проникнення тіл у рідину відносяться до класичного типу гідродинамічних задач і актуальні й в наш час. На основі рівнянь гідро- і аеродинаміки, рівнянь Нав'є - Стокса розроблені математичні методи для знаходження динамічних характеристик тіла, що занурюється у рідину з урахуванням каверни, що за ним утворюється [3, 4].

На рис. 1, наведеному з роботи [3], добре видно результати експериментальних та теоретичних досліджень у цьому напрямку. З рис.1 видно, що за тілом, яке падає у воду, утворюється газова порожнина (каверна), яка в міру руху спочатку розширюється, а потім швидко зхлопується. В результаті цього тіло виявляється в рідині разом із газовим пузирем. За наведеним на рис.1 часом слідує, що весь процес практично закінчується за долі секунди. Дослідниками це добре розумілося і раніше, внаслідок чого в інших роботах в основу розгляду завдань про вхід тіл були покладені рівняння руху ідеальної рідини [5, 6], що дають можливість визначати динамічні характеристики руху.

Для оцінки факторів та параметрів занурення частинки реагенту при ковшовій десульфурзації чавуну сформульовано **мету роботи** - розробити наближену математичну модель з метою оцінки занурення частинок реагенту з газом у розплав чавуну.

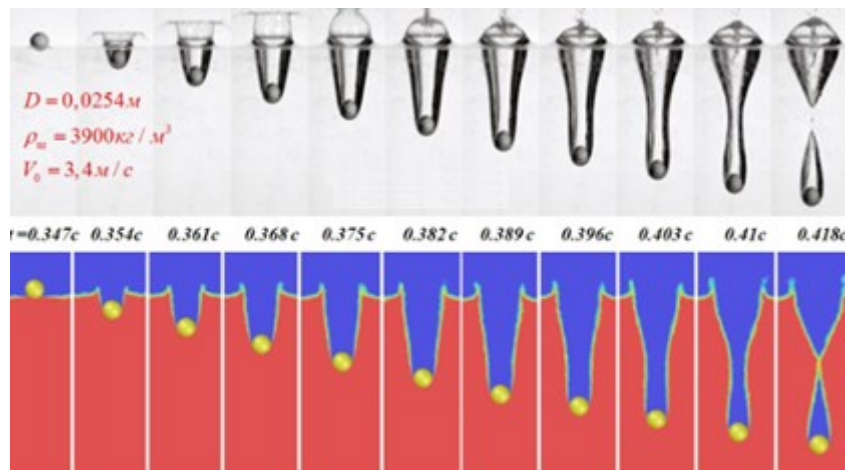


Рисунок 1 - Вхід сталеві кульки у воду [3].

**Розробка наближеної математичної моделі.** Для оцінки динаміки частинки реагента використовуємо модель ідеальної рідини у найпростішому вигляді. Прийmemo, що кульове тіло нерухоме, а на нього набігає шар рідини, рух квазістаціонарний і тиск вздовж поверхні кулі (реагента), що входить в рідину, підпорядковується закону Лагранжа - Коші [7], тоді:

$$p + \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho (v^2 + w^2) - \rho g x = C, \quad (1)$$

де  $p$  – тиск на поверхні тіла;  $\phi$  - потенціал швидкості;  $\rho$  - густина рідини;  $w, v$  - дотична і нормальна до поверхні тіла складові швидкості,  $g$  - прискорення вільно падаючого тіла;  $x$  - поздовжня координата, що збігається з напрямком руху тіла;  $C$  – постійна інтегрування.

Прийmemo припущення, що потенціал швидкості в даній задачі до точки відриву потоку дорівнює потенціалу, що виникає при обтоці кулі, тоді в сферичних координатах, де  $r$  - радіус і  $\theta$  - кут, що вимірюється від початкової точки, можна записати, як у [7]:

$$\phi = Ur \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{R_{CH}}{r} \right)^3 \right] \cos \theta, \quad (2)$$

де  $Ur$  - швидкість умовно потоку, що набігає (швидкість частинки).

Тоді на поверхні кулі маємо:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{3}{2} R_{CH} \frac{dU}{dt} \cos \theta, \quad v = 0, \quad w = -\frac{3}{2} R_{CH} U \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

Далі приймемо, що в точці відриву потоку, з якої утворюється каверна, тиск дорівнює тиску над рідиною, наприклад, атмосферному  $p = p_A$ . Підставляючи ці дані в рівняння (1) і, враховуючи, що  $x = R_{CH} \cos \theta$  отримаємо величину постійної  $C$ . Потім можна записати:

$$p = p_A + \frac{3}{2} \rho R_{CH} (\cos \theta_* - \cos \theta) \frac{dU}{dt} + \frac{9}{8} \rho U^2 (\sin^2 \theta_* - \sin^2 \theta) - \rho g R_{CH} (\cos \theta_* - \cos \theta) \quad (4)$$

Тепер обчислимо силу тиску рідини за формулою  $F_D = 2\pi R_{CH}^2 \int_0^{\theta_*} p \sin \theta \cos \theta d\theta$ , яка збігається з напрямом руху рідини. Враховуючи поверхневий натяг, у вигляді сили, прикладеної до окружності тіла в напрямку потоку, що зривається, отримуємо, що

$$F_D = \pi R_{CH}^2 \left[ -\rho R_{CH} \frac{dU}{dt} \left(1 + \frac{1}{2} \cos^3 \theta_* - \frac{3}{2} \cos \theta_*\right) + \rho g R_{CH} \frac{2}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \cos^3 \theta_* - \frac{3}{2} \cos \theta_*\right) + \right. \\ \left. + \frac{9}{16} \rho U^2 \sin^4 \theta_* + 2 \frac{\sigma}{R_{CH}} \sin \theta_* \cos \theta_* \right] \quad (5)$$

Рівняння руху тіла, що проникає в рідину, тепер можна записати у вигляді

$$(M_{CH} + M_{PR}) \frac{dU}{dt} = F + g M_{CH}, \quad (6)$$

де  $M_{PR} = \rho \pi R_{CH}^3 \left(1 + \frac{1}{2} \cos^3 \theta_* - \frac{3}{2} \cos \theta_*\right)$  - приєднана маса,

$$F = \pi R_{CH}^2 \left[ \rho g R_{CH} \frac{2}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \cos^3 \theta_* - \frac{3}{2} \cos \theta_*\right) + \right. \\ \left. + \frac{9}{16} \rho U^2 \sin^4 \theta_* + 2 \frac{\sigma}{R_{CH}} \sin \theta_* \cos \theta_* \right] - \text{сила опору.}$$

З останнього співвідношення видно, що сила опору великою мірою залежить від кута відриву потоку. При  $\theta_* = 0$ , природньо,  $F = 0$ , при  $\theta_* = 180$  град сила буде рівною архимедовій виштовхуючій силі  $\frac{4}{3} \pi R_{CH}^3 \rho g$ . При обтіканні кулі ламінарним потоком нестискуваної рідини кут відриву дорівнює 109.6 град [8], проте, при утворенні каверни за кулястим насадком автори роботи [9] рекомендують приймати  $\theta_* = 60-65$  град. Проведемо розрахунки для двох близьких значень кута відриву та порівняємо їх із результатами роботи [3].

**Основні результати дослідження. Результати досліджень.** Так як час досягнення нульової швидкості частки у цій задачі надзвичайно малий, то,

передбачається, що частка не встигає розплавитися. З рис. 6 слідує, що глибина занурення частки магнію радіусом 0.5 мм за наявності каверни за часткою становить кілька калібрів. Для початкової швидкості частинки 20 м/с розмір каверни складає близько 6 калібрів, а для швидкості 140 м/с – близько 10 калібрів. Ці значення близькі до раніше обчислених величин без утворення каверн [10]. Далі частка починає виштовхуватися силою Архімеда. Таким чином, частинка реагента практично не йде далеко від основної поверхні пузиря, що утворюється струменем газу. Подальші стадії процесу пов'язані, як із дрібномасштабною турбулентністю, що утворюється в результаті коливань кінчика газового струменя, так і від поведінки самого міхура, від його відриву від сопла, спливання та дроблення. У разі застосування магнію найважливішою стороною процесу є його розплавлення, випаровування, а потім завдяки високому парціальному тиску пари [11] порівняно швидке розчинення в масі металу. Це забезпечує досить швидке об'ємне споживання магнію при десульфурзації, що основною перевагою технології з його використанням.

### **Висновки**

1. Наближена математична модель розроблена з урахуванням динамічного характеру процесу, в якій прийняті деякі величини відповідають більшим швидкостям руху. Проте, як випливає з розрахунків, швидкості часток швидко падають, що має призводити зміну структури течії, тобто. у разі існування каверни за тілом, значну роль гратимуть капілярні сили. У розробленій моделі вони враховані, але як додатковий чинник. Облік цих сил у повному обсязі досить складний процес, і потребує додаткових досліджень. У нашому випадку ці ефекти, мають слабо проводити представлений результат (глибину проникнення), так як сила Архімеда, яка є досить значною, далі переважатиме над іншими силами. Крім того, крім їхнього процесу ще містить ряд явищ, які можуть істотно впливати на весь процес в цілому.

2. Глибина занурення частки реагенту радіусом 0.5 мм за наявності каверни залежить від швидкості частки. Для початкової швидкості 20 м/с довжина каверни близько 6 калібрів, а для швидкості 140 м/с – близько 10 калібрів.

## **ЖИТЕПАТҮПА / REFERENCE**

1. Shevchenko A.F., Bolshakov V.I., Bashmakov A.M. Tehnologiya i oborudovanie desulfuracii chuguna magniem v bolshegruznyh kovshah: monografiya Kiev: Naukova dumka. 2011. 208s.
2. Shevchenko A.F., Manachin I.A. , Vergun A.S., Dvoskin B.V., Kislyakov V.G. Shevchenko S.A., Ostapenko A.V. Vnepechnaya desulfuraciya chuguna v kovshah. Tehnologiya, issledovaniya, analiz, sovershenstvovanie: monografiya Dnepr: Dnipro – VAL. 2017. 252s.
3. Konstantinov S.G. Chislennoe modelirovanie svobodnogo padeniya tverdogo shara v vodu. Trudy MAI. Vyp. № 101. 2018. <https://trudymai.ru/published.php?ID=96562>
4. Tyatyushkina E.S. Issledovanie parametrov kaverny na poverhnosti vody pri padenii tela. Informatika i upravlenie v tehniceskikh i socialnyh sistemah. Truda NGTU im. R.E. Alekseeva. 2019 №2 (125) C. 79-88
5. Sagomonyan A.Ya. Pronikanie. Moskva: Izd-vo moskovskogo universiteta. 1974. 300s.
6. Logvinovich G.V. Gidrodinamika techenij so svobodnymi granicami. Kiev: Naukova dumka. 1969. 209s.
7. Lojcyanskij L.G. Mehanika zhidkosti i gaza. M.: DROFA. 2003. 840s.
8. Shlihting G. Teoriya pogrannichnogo sloya. M.: Nauka. 1969. 742s.
9. Fedorov S.V., Veldanov V.A. K opredeleniyu kavitacionnoj polosti v vode za dvizhushimsya s vysokoj skorostyu cilindricheskim telom. Zhurnal tehniceskoy fiziki. 2013. T. 83, Vyp. 2. S. 15 – 20.
10. Shevchenko S.A., Shevchenko A.F., Eliseev V.I. Zakonomernosti vnedreniya chastic magniya v rasplav chuguna pri vduvanii cherez furmu bez isparitelnoj kamery na vyhode. Sb. nauchn. Tr. IChM Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoj metallurgii. 2008. Vyp. 17. S. 111 – 115.
11. Voronova N.A. Desulfuraciya chuguna magniem. M.: Metallurgiya. 1980. 239s.

## **DEVELOPMENT OF A MODEL OF IMMERSION OF REAGENT PARTICLES WITH GAS INTO THE MELTEN DURING INJECTION OUTSIDE-FURNACE DESULFURIZATION OF CAST IRON**

Ivan Manachyn, Volodymyr Yelisyeyev, Volodymyr Kysliakov, Mariya Rybalchenko

**Abstract.** *Technologies of non-furnace injection ladle desulfurization of cast iron are based on the introduction of reagent particles into liquid cast iron using high-speed gas jets. The patterns of behavior and interactions of two-phase jets (transport gas + reagent) with molten cast iron are complex, since the individual dynamic characteristics of an individual particle are lost. Also important is the question of the ratio of the number of particles that have gone deep into the metal and particles that have ended up in a floating bubble. In this work, to assess the factors and parameters of the immersion of a reagent particle in ladle desulfurization of cast iron, the aim of the work is formulated - to develop an approximate mathematical model in order to assess the immersion of reagent particles with gas into molten cast iron. The approximate mathematical model is developed taking into account the dynamic nature of the process, in which some of the values adopted correspond to higher speeds of movement.*

**Keywords:** *reagent, particle, model, immersion, magnesium*