

УДК 669.162.221.2

В. І. Єлісеєв, к.ф.-м.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-4999-8142**І. О. Маначин**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-9795-6751**А. П. Шевченко**, д.т.н., проф., ORCID 0000-0003-0867-6825**С. А. Шевченко**, к.т.н., ORCID 0000-0002-9287-9177*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ЗАНУРЕННЯ ЧАСТИНОК РЕАГЕНТУ З ГАЗОМ У РОЗПЛАВ ПРИ ІНЖЕКЦІЙНІЙ ПОЗАПІЧНІЙ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ

Анотація. Метою роботи є розробка математичної моделі для оцінки занурення частинок реагенту з газом у розплав чавуну під час десульфурзації. 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 сливаючому пузирі. В роботі для оцінки факторів та параметрів занурення частинки реагенту при ковшовій десульфурзації чавуну виконано ряд експериментальних досліджень. Експериментами показано, що 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. Проте, як випливає з розрахунків, швидкості часток реагенту швидко падають, що має призводити здо міни структури течії та виникнення каверн. У цьому випадку для проникнення реагента в розплав значну роль гратимуть капілярні сили. У розробленій моделі вони враховані як додатковий чинник. Показано, що ці ефекти мають досить слабкий характер порівняно з виштовхуючою силою Архімеда

Ключові слова: десульфурация, інжекція, чавун, ківш, реагент, частинка, занурення.

Посилання для цитування: Єлісеєв В. І., Маначин І. О., Шевченко А. П., Шевченко С. А. Оцінка параметрів занурення частинок реагенту з газом у розплав при інжекційній позапічній десульфурзації чавуну. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 172-181. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-172-181.

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 питанням про співвідношення кількості частинок, що пішли вглиб металу, і частинок, що опинилися у спливаючому пухирі. 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 пухирем. 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.



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

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

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; ϕ - потенціал швидкості; ρ - 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 θ - кут, що вимірюється від початкової точки, можна записати, як у [7]:

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

де $U r$ - 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 прийmemo, 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, отримаємо, 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:

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

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

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

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].

З рис. 2 і 3 видно, що кут $\theta_* = 55$ град краще відповідає результатам роботи [3] та нашим експериментам. На наступних рис. 4, 5 краще кут відриву прийняти рівним 60 град, проте розкид експериментальних точок в цьому випадку більше, тому приймемо, що $\theta_* = 55$. Це значення кута менше рекомендованого в [9] і, мабуть, не відповідає дійсності. Це свідчить, що прийнята наближена модель дає дещо підвищене значення сили опору. Проте загалом, криві руху, судячи з рис. 2, близькі до реальних значень швидкості. Показані на рис. 2 – 5 результати розрахунків, є перевірочними та демонструють працездатність запропонованої моделі.

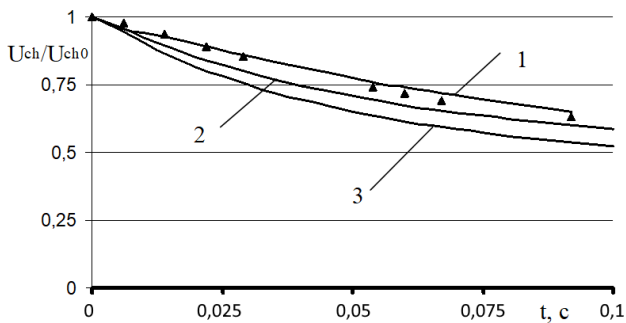


Рисунок 2 – Зміна швидкості кулі за часом при вході її у воду. 1 – теорія [3]; 2 - за рівнянням (6) при $\theta_* = 55$ град; 3 – за рівнянням (6) при $\theta_* = 60$ град; трикутники - експеримент [3].

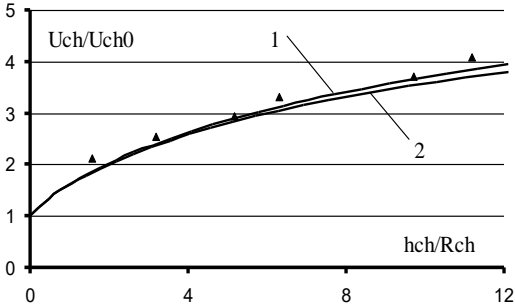


Рисунок 3 – Зміна відносної швидкості кулі пройденим йому шляху при вході його у воду $U_{CH0} = 0.28$ м/с.

1 - розрахунок за рівнянням (6) при куті відриву 55 град;
2 - розрахунок за рівнянням (6) при куті відриву 60 град;
трикутники – експеримент.

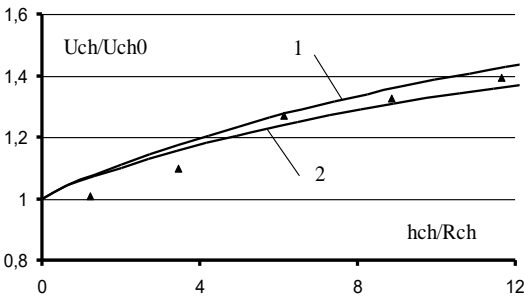


Рисунок 4 – Зміна відносної швидкості кулі пройденим йому шляху при вході його у воду $U_{CH0} = 0.885$ м/с.

1 - розрахунок за рівнянням (6) при куті відриву 55 град;
2 - розрахунок за рівнянням (6) при куті відриву 60 град;
трикутники – експеримент.

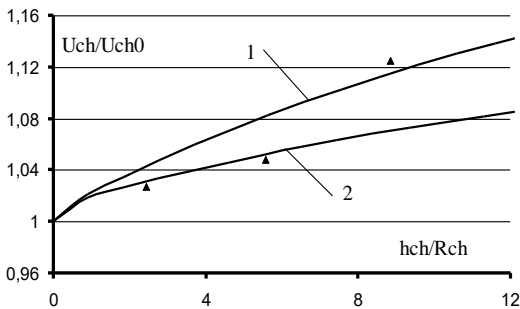


Рисунок 5 – Зміна відносної швидкості кулі пройденим йому шляху при вході його у воду $U_{CH0} = 1.252$ м/с.

1 - розрахунок за рівнянням (6) при куті відриву 55 град;
2 - розрахунок за рівнянням (6) при куті відриву 60 град;
трикутники – експеримент.

Результати досліджень. На рис. 6 наведені криві безрозмірної глибини занурення кулястої частинки магнію у розплавлений метал. 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 рагента 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 десульфурації, що основною перевагою технології з його використанням.

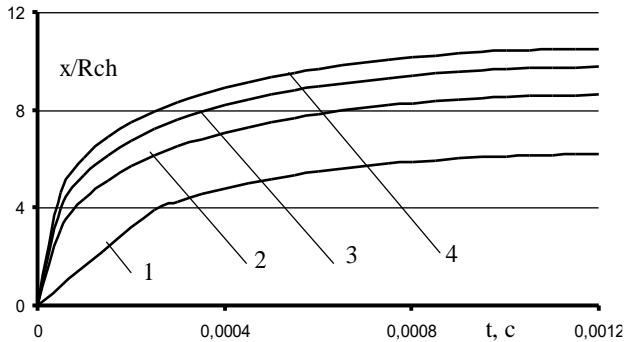


Рисунок 6 – Глибина занурення частки магнію в розплавлений чавун від часу.

1 - $U_{сн0} = 20$ м/с; 2 – 60 м/с; 3 – 100 м/с; 4 – 140 м/с.

Для вапна або карбїду кальцію, для яких десульфурація відбувається на поверхні частинок, основним питанням є розосередження частинок і віддалення їх від основного міхура, що повинно призводити до збільшення реакційної поверхні. Наведемо результати розрахунків для частинок вапна для двох випадків: малих діаметрів (0.1 мм) та великих (2 мм) [2]. Згідно з дослідженнями, викладеними в роботі [2], питомий ступінь десульфурації значною мірою залежить від діаметра частинок вапна, що вдувається в рідкий чавун. На рис. 7 показані криві занурення частинок вапна в метал з різними початковими швидкостями.

З рис. 7 випливає, що для великих частинок глибина занурення може бути достатньою, щоб завдяки локальним коливанням і випадковим імпульсам, частинка, що опинилась на відстані близько 10 – 15 мм від поверхні пузиря, не повернеться до нього. Дрібні ж частинки практично не пробивають поверхню, тому вони будуть комкуватися в її околиці і спливати у вигляді згустків. Такі згустки в залежності від їх розмірів можуть розбиватися імпульсними потоками і, потрапляючи у великі гідродинамічні вихрові потоки, розноситися по всьому об'єму і після закінчення основної стадії процесу довго спливати вгору.

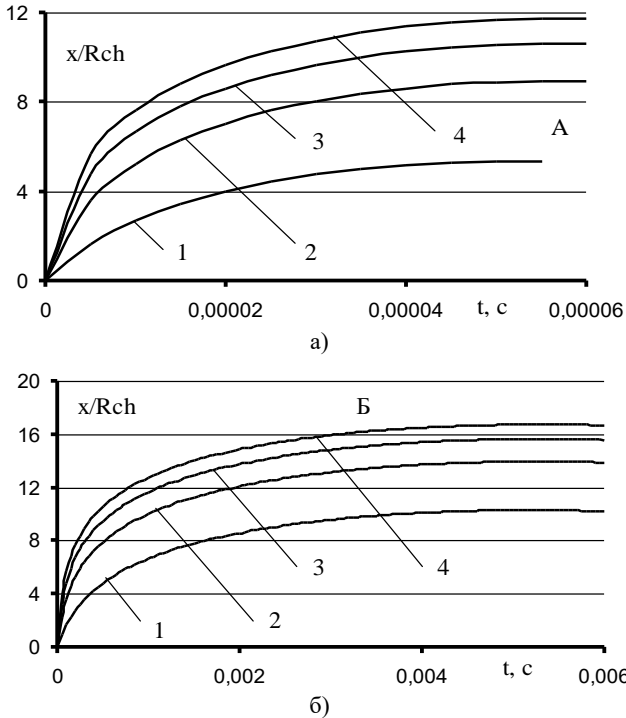


Рисунок 7 – Глибина занурення частки вапна в розплавлений чавун від часу.

а) - $R_{CH} = 0.05$ мм; б) - $R_{CH} = 1.0$ мм.

1 - $U_{CH0} = 20$ м/с; 2 - 60 м/с; 3 - 100 м/с; 4 - 140 м/с.

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 слабко 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.

Перелік посилань

1. Шевченко А. Ф., Большаков В. И., Башмаков А. М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах : монография. Киев : Наукова думка. 2011. 208 с.
2. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах. Технология, исследования, анализ, совершенствование : монография/ А. Ф. Шевченко та ін. Дніпро : Дніпро-VAL. 2017. 252 с.
3. Константинов С. Г. Численное моделирование свободного падения твердого шара в воду. *Труды МАИ*. 2018. Вып. № 101. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=96562>
4. Тятюшкіна Е. С. Исследование параметров каверны на поверхности воды при падении тела. *Информатика и управление в технических и социальных системах. Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2019. № 2 (125). С. 79-88
5. Сагомонян А. Я. Проникание. Москва : Изд-во московского университета. 1974. 300с.
6. Логвинович Г. В. Гидродинамика течений со свободными границами. Киев : Наукова думка. 1969. 209 с.
7. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М. : ДРОФА. 2003. 840 с.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука. 1969. 742 с.
9. Федоров С. В., Велданов В. А. К определению кавитационной полости в воде за движущимся с высокой скоростью цилиндрическим телом. *Журнал технической физики*. 2013. Т. 83, Вып. 2. С. 15-20.
10. Шевченко С. А., Шевченко А. Ф., Елисеєв В. И. Закономерности внедрения частиц магния в расплав чугуна при вдувании через фурму без испарительной камеры на выходе. *Сб. научн. Тр. ИЧМ Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2008. Вып. 17. С. 111 – 115.
11. Воронова Н. А. Десульфурация чугуна магнием. М. : Металлургия. 1980. 239 с.

References

1. Shevchenko A. F., Bolshakov V. I., Bashmakov A. M. Tehnologiya i oborudovanie desulfuracii chuguna magniem v bolshegruznyh kovshah : monografiya. Kiev : Naukova dumka. 2011. 208 p.
2. Vnepechnaya desulfuraciya chuguna v kovshah. Tehnologiya, issledovaniya, analiz, sovershenstvovanie : monografiya / Shevchenko A. F. et al. Dnipro : Dnipro- VAL. 2017. 252 p.
3. Konstantinov S. G. Chislennoe modelirovanie svobodnogo padeniya tverdogo shara v vodu. *Trudy MAI*. No. 101. 2018. Available from: <https://trudymai.ru/published.php?ID=96562>
4. Tyatyushkina E. S. Issledovanie parametrov kaverny na poverhnosti vody pri padenii tela. *Informatika i upravlenie v tehnikeskih i socialnyh sistemah. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2019. No. 2 (125). P. 79-88
5. Sagomonyan A. Ya. Pronikanie. Moskva : Izd-vo moskovskogo universiteta. 1974.

300 p.

6. Logvinovich G. V. *Gidrodinamika techenij so svobodnymi granicami*. Kiev : Naukova dumka. 1969. 209 p.
7. Lojcyanskij L. G. *Mehanika zhidkosti i gaza*. Moskva : DROFA. 2003. 840 p.
8. Shlihting G. *Teoriya pogranichnogo sloya*. Moskva : Nauka. 1969. 742 p.
9. Fedorov S. V., Veldanov V. A. K opredeleniyu kavitacionnoj polosti v vode za dvizhushimsya s vysokoj skorostyu cilindricheskim telom. *Zhurnal tehnichejskoj fiziki*. 2013. T. 83, No. 2. P. 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. Collection 17. P. 111-115.
11. Voronova N. A. *Desulfuraciya chuguna magniem*. Moskva : Metallurgiya. 1980. 239 p.

V. I. Yeliseiev, Ph. D. (Pys.-Math.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-4999-8142

I. O. Manachyn, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9795-6751

A. P. Shevchenko, D. Sc (Tech.), Professor, ORCID 0000-0003-0867-6825

S. A. Shevchenko, Ph. D. (Tech.), ORCID 0000-0003-1521-9665

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF THE IMMERSION OF REAGENT PARTICLES WITH GAS INTO THE MELT DURING INJECTION OUT-OF-FURNACE DESULFURIZATION OF CAST IRON

Summary. The aim of the work is to develop a mathematical model for estimating the immersion of reagent particles with gas in molten iron during desulfurization. The technologies of out-of-furnace injection ladle desulfurization of cast iron are based on the introduction of reagent particles into liquid cast iron with the help of high-speed gas jets. The patterns of behavior and interactions of two-phase jets (carrying gas+reagent) with cast iron melt are complex, as the individual dynamic characteristics of individual particles are lost. Also important is the question of the ratio of the number of particles that went deep into the metal and the particles that ended up in the floating bubble. In the work, a number of experimental studies were performed to evaluate the factors and parameters of the immersion of the reagent particle during ladle desulfurization of cast iron. Experiments have shown that the depth of immersion of a reagent particle with a radius of 0.5 mm in the presence of a cavern depends on the velocity of the particle. For an initial speed of 20 m/s, the length of the cavern is about 6 gauges, and for a speed of 140 m/s - about 10 gauges. However, as it follows from the calculations, the velocities of the reactant particles drop rapidly, which should lead to a change in the flow structure and the emergence of caverns. In this case, capillary forces will play a significant role in the penetration of the reagent into the melt. In the developed model, they are taken into account as an additional factor. It is shown that these effects have a rather weak character compared to the repulsive force of Archimedes.

Key words: desulfurization, injection, cast iron, ladle, reagent, particle, immersion.

For citation: Yeliseiev V. I., Manachyn I. O., Shevchenko A. P., Shevchenko S. A. Otsinka parametriv zanurennia chastynok reahentu z hazom u rozplav pry inzheksiinii pozapichnii desulfuratsii chavunu [Estimation of the parameters of the immersion of reagent particles with gas into the melt during injection out-of-furnace desulfurization of cast iron]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 172-181. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-172-181.

*Стаття надійшла до редакції збірника 24.11.2022 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*