

В.І. Єліссєв, к.ф.-м.н., с.н.с., ORSID 0000-0003-4999-8142

С.А. Шевченко, к.т.н. с.н.с., ORSID 0000-0002-9287-9177

О.П. Товстопят, к.т.н.

Л.О. Флеєр, н.с.

А.П. Шевченко, д.т.н. п.н.с., ORSID 0000-0003-0867-6825

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

ДИНАМІКА КОЛИВАННЯ СИСТЕМИ "РІДКА ВАННА - ФУРМА" ПРИ ІНЖЕКЦІЙНІЙ ОБРОБЦІ РОЗПЛАВУ В КОВШІ

Анотація. Метою роботи було оцінювання впливу ключових факторів хвилювання на динаміку процесу під час інжекційної обробки чавуну зернистим магнієм у ковшах, їх значимість і взаємозв'язок між собою. На основі теорій хвильового руху шарів рідини розроблена математична модель, що дозволяє дослідити коливальні процеси в ковші при обробці розплаву чавуну зернистим магнієм. Модель передбачала оброблення чавуну шляхом інжекції зернистого магнію через фурменні пристрої, що занурюються у розплав. Розглянуто коливальну систему «Рідка ванна – фурма» на прикладі ванни великовантажного заливального ковша з власною частотою - 0,47 Гц. Розрахунковим шляхом оцінено вплив найбільш вірогідних джерел коливань (власна частота коливання фурми і частота умовного джерела) на амплітудно-частотні коливання елементів системи. Встановлено, що окрім власних частот цих елементів, система має ще дві власні величини коливань. З огляду на те, що маса розплаву значно більше маси фурми, практично вона визначає поведінку системи при її збудженні. Тобто, система відгукується тільки на ті збудження, в яких частота близька до власної частоти рідкої ванни. У свою чергу, показано, що власна частота ванни значною мірою визначається її діаметром у верхній частині. В практичній діяльності необхідно знати резонансні частоти рідкої ванни, фурменного пристрою, а також всіх інших джерел коливань (розпад газового струменя, і коливання спливаючих бульбашок). Відповідно з цим, необхідно намагатися гасити амплітуду з цією небезпечною резонансною частотою. Для зниження амплітуди коливання поверхні ванни при обробці чавуну зернистим магнієм рекомендується спочатку оцінити власну резонансну частоту рідкої ванни, а потім підбирати конструктивні рішення устаткування і технологічні параметри обробки, уникаючи появи небезпечних частот, близьких до власної частоти ванни. Однак необхідно вказати, що спектр частот коливань в прифурменній зоні досить широкий і, природно, містить у собі небезпечні низькі частоти.

Ключові слова: амплітуда, частота, коливальна система, рідка ванна, фурма, математична модель.

Посилання для цитування: Єліссєв В.І., Шевченко С.О., Товстопят О.П., Флеєр Л.О., Шевченко А.Ф. Динаміка коливання системи «рідка ванна – фурма» при інжекційній обробці розплаву в ковші. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. - Вип.34. – С. 90-100. (In Ukrainian).

DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-90-100

Сучасний стан питання. Питання інтенсифікації процесів інжекційної металургії і проектування технологічного устаткування для інжекційних систем безпосередньо пов'язані з вивченням динаміки коливання рідкої ванни при продуванні шару рідини газом через пристрої, що занурюються. Так, наприклад, при процесі ковшової десульфурзації чавуну зернистим магнієм, шляхом інжекції його в струмені інертного газу через фурму, що занурюється, на поверхні ванни виникає хвилеподібний рух, інтенсивність якого може призвести до появи виплесків розплаву за межі ковша, що, у свою чергу, позначається на технології ведення процесу, зниженні інтенсивності введення реагенту і витрати інжектуючого газу, збільшенні вільного борту в ковші, наявності додаткового пристрою для захисту від виплесків металу у вигляді "шлаковідбійника" і захисної "кришки" і т. ін. З іншого боку, коливання ванни через пристрій, що занурюється робить динамічне навантаження на система утримування і фіксації фурм у розплаві, що вимагає відповідного запасу міцності.

Спостереження за поверхнею рідкої ванни під час інжекційної обробки, а також, проведений в більш ранніх роботах [7,8] частотно-амплітудний аналіз, як поверхні ванни, так і прифурменої зони, показують наявність широкого спектру частот характерного для даного процесу.

Основними можливими джерелами збудження верхнього шару рідкої ванни можуть бути різного роду процеси, що протікають в об'ємі: руйнування бульбашок на поверхні, коливання фурми, відрив бульбашок від прифурменої газової порожнини, спливання бульбашок, гідродинамічні потоки і т. ін., що мають різні амплітудно-частотні характеристики.

Метою роботи було оцінити вплив на динаміку процесу хвилеутворення під час інжекційної обробки чавуну зернистим магнієм у ковшах ключових факторів, їх значимість і взаємозв'язок між собою.

Математична постановка задачі. Дослідження розвитку і руху поверхневих хвиль у шарах рідини є одним з основних напрямків в механіці і йому присвячено багато робіт (див. наприклад [2,3]). Актуальним розділом цього напрямку є хвильовий рух рідини в ємностях, в першу чергу, для транспортних проблем перевезень рідких середовищ. Тут були отримані важливі результати [4,5], що розкривають динамічні характеристики хвильових процесів в судинах. В основі цих досліджень покладена потенційна теорія руху рідини, що не стискається. В даний час, з огляду на те, що динамічні величини при хвильовому русі в шарах, часто переважають над в'язкими ефектами, ця теорія не втратила свого значення, однак, навіть при сучасному розвитку чисельних методів вона має свої труднощі в розгляді прикладних задач. Принципово важливим спрощенням при розгляді динаміки тіл з рідкими шарами, що використовується при розрахунках руху ракет, є представлення шарів, що коливаються, у вигляді маятників [6]. Така постановка не розкриває

повністю процес взаємодії, проте, на загальному фізичному рівні показує важливі деталі розвитку руху розглянутої коливальної системи. У даній роботі використовуємо цей підхід для розгляду взаємодії шару розплаву, що коливається з фурмою. Прийемо, що фурма і шар рідини є одночастотними маятниками. Як правило, перша мода практично визначає динамічні характеристики системи і ті навантаження, які розвиваються під час процесу. У нашому випадку рішення буде підказувати умови, при яких виникають найбільш напружені ситуації. Однак, для поверхні рідини характерна багатомодова (теоретично нескінченна) картина коливань. При цьому, деякий інтервал частот може надавати якийсь істотний вплив. Це говорить про те, що дана модель, в принципі, не може охопити багато цікавих сторін процесу, що досліджуються, проте, вона може бути корисною в практичних ситуаціях. Таким чином, уявімо, що шар розплаву і фурма є єдиною системою, що коливається зі своїми динамічними характеристиками. Вона піддається впливу деяких збурень, що призводять її до руху. У розглянутих процесах таке збурення надає струмінь, що виривається з фурми і розпадається на окремі бульбашки газу, що спливають у розплаві. В роботі [9] показані ефекти, що спостерігаються при відриві бульбашок від прифурменої газової порожнини і наведені формули для визначення основної частоти відриву. Силовий вплив газової складової оцінити досить складно, тому в даній постановці буде простежуватися ступінь сприйнятливості системи, що коливається, до певної частоти збурення при постійній його амплітуді коливання. Поняття сприйнятливості системи добре відомо в теорії розвитку турбулентного режиму руху в прикордонних шарах [10].

У класичну форму рівняння коливання маятника входить рівність сил - інерційної і пружною. У нашому випадку, необхідно включити ще сили взаємодії між двома тілами: силу опору і силу, що пов'язана з приєднаною масою [11]. Таким чином, рівняння руху рідини і фурми (рух ковша не враховується) можуть бути представлені у вигляді:

$$M_G \frac{dU_G}{dt} = -K_G X_G - M_P \left(\frac{dU_G}{dt} - \frac{dU_F}{dt} \right) - k \rho_G S_F (U_G - U_F) + a \sin(2\pi f_P t) \quad (1)$$

$$M_F \frac{dU_F}{dt} = -K_F X_F + M_P \left(\frac{dU_G}{dt} - \frac{dU_F}{dt} \right) + k \rho_G S_F (U_G - U_F) \quad (2)$$

де t – час; X_G , X_F - переміщення маси рідини і фурми; U_G , U_F - швидкості руху шару рідини і фурми відповідно; M_G , M_F , M_P - маса рідини, фурми і приєднана маса; K_G , K_F - коефіцієнти пружності; ρ_G - щільність рідини; S_F - площа поперечного перерізу фурми; k - коефіцієнт опору фурми; f_P - частота зміни вимушених коливань; a - амплітуда вимушених коливань. При відкиданні всіх членів у правій частині, крім перших, матимемо класичні рівняння коливання маятників, при цьому частоти коливань визначаються у вигляді:

$$2\pi f_G = (K_G / M_G)^{1/2}, \quad 2\pi f_F = (K_F / M_F)^{1/2}. \quad (3)$$

Для фурми, що занурена в нерухому рідину (велику посудину в порівнянні з розмірами фурми):

$$2\pi f_F = [K_F / (M_F + M_P)]^{1/2}, \quad (4)$$

тобто, власна частота коливання зануреної фурми зменшується. У цю систему може бути включена сила Архімеда, проте, в даному випадку приймаємо, що рух рідини і фурми тільки горизонтальний, тобто, нахил фурми не враховується. У разі обліку нахилу фурми рівняння ускладнюється (додаються вертикальні складові). При цьому пружну силу (перший член в правій частині) можна доповнити у вигляді, $(K_F - K_A)X_F$, де величина K_A може бути нелінійно пов'язана з переміщенням, але повинна бути менше K_F . Оскільки фурма додатково фіксується в зануреному стані певним пристроєм у верхній частині, то вона вже має інші пружні властивості, що підвищують власну частоту її коливання.

З теорії коливань рідини в осесиметричній посудині [5] впливає, що власні частоти коливання шару рідини визначаються виразом:

$$(2\pi f_k) = \left\{ g \frac{\lambda_k}{R} \left[\frac{\exp(\lambda_k) - \exp(-\lambda_k)}{\exp(\lambda_k) + \exp(-\lambda_k)} \right] \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

де H – висота шару; R – радіус посудини, λ_k – власні значення ($\lambda_1 = 1,841$; $\lambda_2 = 5,331$; $\lambda_3 = 8,536$; $\lambda_4 = 11,707$). Прийемо, що (для судини радіусом i з висотою шару розплаву 4 м перша власна частота коливання шару $f_1 = f_G = 0,47$ Гц) власна частота фурми є невідомою величиною (вона залежить від системи, що її закріплює), тому її варіюватимемо. Якщо тепер рішення виписаної системи задати у вигляді:

$$X_G = A_G \cdot \exp(2\pi f_S t), \quad X_F = A_F \cdot \exp(2\pi f_S t), \quad (6)$$

де A_G, A_F – амплітуди коливання шару та фурми; f_S – власні частоти системи в цілому, то з рішення можна визначити, що

$$f_S^2 = -\frac{1}{2}(1 + m_G + m_F)^{-1} \left\{ \left[\left[(1 + m_F)f_G^2 + (1 + m_G)f_F^2 \right] \pm \sqrt{\left[\left[(1 + m_F)f_G^2 + (1 + m_G)f_F^2 \right]^2 - 4f_G^2 f_F^2 (1 + m_G + m_F)} \right]} \right\} \quad (7)$$

де $m_G = M_P / M_G$, $m_F = M_P / M_F$,

тобто в коливальній системі з'являються ще дві характерні величини – це резонансні частоти системи.

Результати розрахунків. За представленими вище рівнянням проведено чисельний розрахунок амплітудно-частотної характеристики коливальної системи «рідка ванна – фурма» на прикладі ванни великовантажного заливального ковша певного типо-розміру з власною частотою – 0,47 Гц. На коливальну систему одночасно впливало два джерела коливань постійної амплітуди, але зі змінною частотою. Такі як,

вільне коливання фурменого пристрою f_F з межею зміни частоти коливань від 0,25 до 1,20 Гц і коливання умовного, можливого джерела f_P з межею від 0,15 до 1,20 Гц. При цьому частота системи 1-ї моди змінювалася в межах від 0,168 до 0,468 Гц, а частота 2-ї від 0,469 до 0,810 Гц. Таким чином, виконана попередня оцінка впливу основних факторів на амплітуду і частоту коливання системи «рідка ванна - фурма», результати якої представлені на рис.1. окремо для ванни варіант а) і для фурменого пристрою б). Характер зміни кривих показує, що на обох малюнках проявляється виразний характерний пік зростання амплітуди коливань ванни і фурми в районі значення власної частоти коливання ванни (0,47 Гц). Величини піків зміни амплітуди на обох малюнках також близькі (0,16 і 0,18 м для ванни і фурми відповідне).

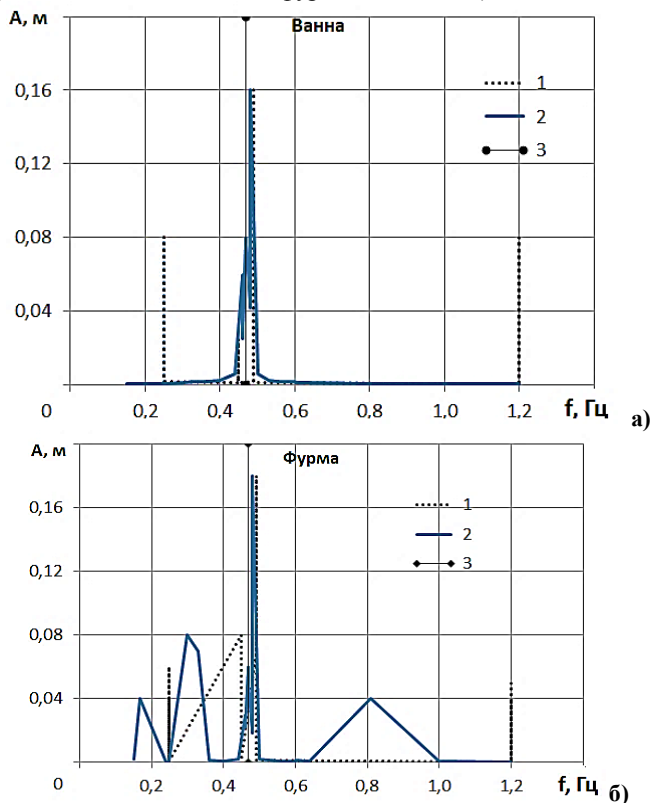


Рисунок 1 – Амплітудно-частотна характеристика коливань системи «ванна - фурма» при заданих частотах коливання що змінюються, власної частоти фурми (·····) і умовного джерела коливань (—): а) для ванни, б) для фурми.

Розвиток коливальної системи в часі X_G , отримане вході швидкого
 «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

перетворення Фур'є (ШПФ) представлено на рис.2. і рис.3, де розглянуто два приклади, коли джерела коливання, що впливають на систему, мають відмінну від власної частоти ванни частоту і той випадок, коли частоти збігаються з власною частотою ванни. У першому випадку процес має стабільний характер коливань у часі, амплітуда яких нижче 0,008 м. Тут рідина практично не реагує на збурення заданих джерел. Коли частота фурми вище частоти ванни, її рух гальмується розплавом, в іншому випадку, навпаки, залучається до руху. У другому випадку, коли при вузькому інтервалі частот $f_G - f_F$ потрапляння частоти, що задається, у цей інтервал спостерігається сильне зростання амплітуд коливання шару і фурми. Великі сплески відповідають резонансній частоті f_G , а характер коливання має нестационарний, пульсуючий вигляд.

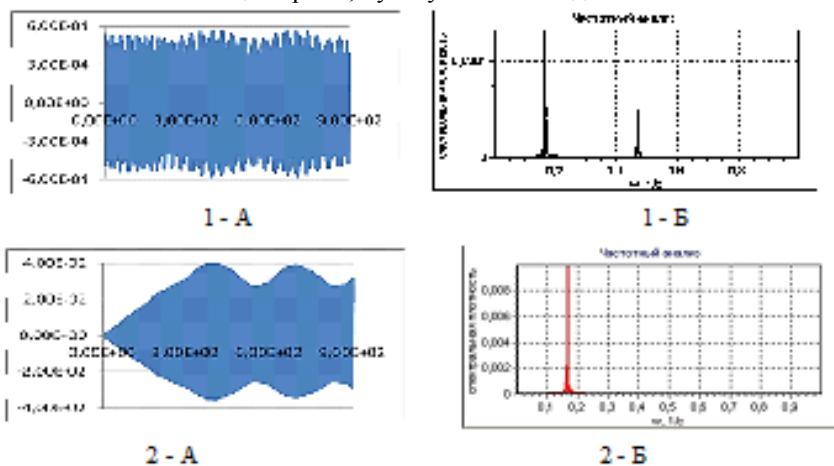


Рисунок 2 – Система коливання: 1 ванни; 2 - фурми. А - крива зміни в часі X_G ; Б - амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) X_G , отримана після швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

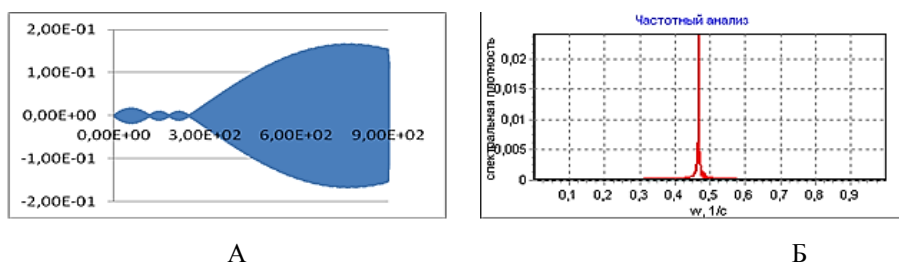


Рисунок 3 – Система коливання ванни розплаву: А - крива зміни в часі X_G ; Б - АЧХ X_G , отримана після ШПФ

Коливання фурми в даній системі не наведено, тому що вони повністю повторюють коливання ванни. З цих прикладів видно, що резонансна частота коливання ванни рідини в цій системі грає фактично визначальну роль, це пов'язано з тим, що маса розплаву значно більша за масу фурми. При цьому, коли одна з власних частот системи практично близька до власної частоти ванни. Тому при близьких значеннях частоти, що збудує, f_F і f_G виникає сильне хвилювання на поверхні рідини. У тому випадку, коли задана частота збудження збігається з іншою власною частотою системи, то на це відгукується фурма, проте її рух відчуває великий опір з боку розплаву. Найбільш небезпечні випадки виникають тоді, коли власна частота фурми близька до власної частоти ванни f_G . При вузькому інтервалі частот $f_G - f_F$ потрапляння частоти, що задається, в цей інтервал призводить до сильного росту амплітуди коливання ванни і фурми.

Отримані результати в ході математичного моделювання були перевірені на холодній моделі розглянутої коливальної системи. Для цього були проведені експериментальні дослідження коливань вільно підвішеного сталевого стрижня, зануреного в рідину посудині, що хитається. Довжина маятника була обрана таким чином, щоб частота його власних коливань в рідині, що спочиває, була свідомо менше, або лежала всередині діапазону частот коливань платформи, що задається. Опис експериментального стенду, процедура вимірювання частоти коливань і результати експерименту описані в роботі [12].

Оскільки в умовах металургійного виробництва для транспортування розплаву чавуну застосовуються ковші різної ємності і типорозміру була проведена додаткова оцінка впливу геометричних параметрів ковша на власну частоту ванни, що обробляється. За допомогою наведеного вище аналітичного виразу розрахунку власної частоти (5) було розглянуто випадок, коли визначальні розміри ковша: діаметр D і глибина H змінювалися в межах від 1 до 4 м. Результати розрахунку представлено на рис. 4 у вигляді трьох кривих.

Характеру зміни кривих показує, що в значній мірі найбільший вплив на величину власної частоти ванни надає її діаметр.

Висновки: На основі розрахунково-аналітичних і експериментальних досліджень коливань маятників розглянута система, яка складається з шару рідини і фурми. Встановлено, що крім власних частот цих елементів, система має ще дві власні величини. З огляду на те, що маса розплаву значно більша за масу фурми, практично, вона визначає поведінку системи при її збудженні. Тобто система відгукується тільки на ті збудження, в яких частота близька до власної частоти рідкої ванни. У

свою чергу, власна частота ванни в значній мірі визначається її діаметром у верхній частині.

Ці важливі результати говорять про те, що в практичній діяльності необхідно знати резонансні частоти рідкої ванни, фурменого пристрою, а також всіх інших джерел коливань (розпад газового струменя, і коливання спливаючих бульбашок), відповідно з цим, намагатися гасити амплітуду з цією небезпечною частотою. Це можна робити, як конструктивно, так і технологічно, змінюючи режими обробки. Однак необхідно вказати, що спектр частот коливань в прифурменній зоні досить широкий і, природно, містить у собі небезпечні низькі частоти.

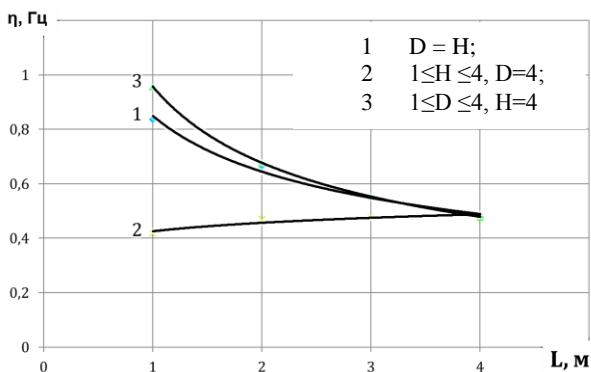


Рисунок 4. Вплив геометричних параметрів ванни на її власну частоту коливання. 1 - геометричні розміри ванни змінюються пропорційно ($D = H$). 2 - глибина змінюється від 1 до 4 м, а діаметр постійний ($D = 4$ м), 3 - діаметр змінюється від 1 до 4 м, а глибина постійна ($H = 4$ м).

Перелік посилань

1. Шевченко А.Ф., Маначин І.А., Вергун А.С. і др. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах. Технология. Исследования. Анализ. Совершенствование. Днепропетровск. "Дніпро –VAL". –2017. – 253 с.
2. Черкесов Л.В. Гидродинамика поверхностных и внутренних волн / Л.В. Черкесов. - Киев: Наукова думка. 1976. 304с.
3. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны / Дж. Уизем. - М.: Мир. 1977. 622с.
4. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости / Л.Н. Сретенский. – М., 1977. – 816с.
5. Моисеев Н.Н. Численные методы расчета собственных частот колебаний

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

- ограниченного объема жидкости / Н.Н. Моисеев, А.А. Петров. – Математические методы в динамике космических аппаратов. Вып. 3. М. Вычислит. Центр АН СССР. 1966. 269с.
6. Колесников К.С. Динамика ракет: Учебник для вузов / К.С. Колесников. - М. Машиностроение. 2003. 520 с.
 7. Елисеев В.И. Динамика поверхности жидкости при подаче газового потока через вертикальную заглубленную фурму / В.И. Елисеев, Т.А. Рузова, А.П. Толстопят, Л.А. Флеер, А.Ф. Шевченко, С.А. Шевченко // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка. – 2011.- Вип. 15, Т. 1, С. 112 – 119.
 8. Елисеев В.И. Моделирование амплитудно-частотных характеристик колебаний системы жидкость прифурменный газовый объем / В.И. Елисеев, Ю.П. Совит, А.П. Толстопят, Л.А. Флеер // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка. – 2014.- Вип. 18, Т. 1, С. 17 – 25.
 9. Елисеев В.И. Частота отрыва пузырей от газового прифурменного объема / В.И. Елисеев, А.П. Толстопят, Л.А. Флеер // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка. – 2013.- Вип. 17, Т. 1, С. 86 – 94.
 10. Качанов Ю.С. Возникновение турбулентности в пограничном слое / Ю.С. Качанов, В.В. Козлов, В.Я. Левченко. - Новосибирск. Наука. 1982. 152с.
 11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: ДРОФА. 2003. 840с.
 12. В.И.Елисеев, А.П.Толстопят, Л.А.Флеер, А.Ф.Шевченко, С.А.Шевченко // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Вібрації в техніці та технологіях»: – Вінниця : ВНТУ, – 2017 – С. 115-117

Reference

1. Shevchenko A.F., Manachin I.A. & Vergun A.S. et al. (2017). *Vnepechnaya desulfuratsiya chuguna v kovshah. Tehnologiya. Issledovaniya. Analiz. Sovershenstvovanie [Out-of-furnace desulfurization of cast iron in ladles. Technology. Research. Analysis. Improvement].* Dnepropetrovsk: "Dniro-VAL", 2017, 253. [In Russian].
2. Cherkosov L.V. (1976). *Gidrodinamika poverhnostnyih i vnutrennih voln [Hydrodynamics of surface and internal waves].* Kyev: Naukova dumka, 1976, 304. [In Russian].
3. Uizem Dzh. (1977). *Lineynye i nelineynye volny [Linear and nonlinear waves].* Moskva: Mir, 1977, 622. [In Russian].
4. Sretenskiy L.N. (1977). *Teoriya volnovyih dvizheniy zhidkosti [The theory of wave motion of fluid].* Moskva, 1977, 816. [In Russian].
5. Moiseev N.N. & Petrov A.A. (1966). *Chislennyye metodyi rascheta sobstvennyih chastot kolebaniy ogranichenного obema zhidkosti. Matematicheskie metodyi v dinamike kosmicheskikh apparatov [Numerical methods for calculating the natural frequencies of vibrations of a limited volume of liquid. Mathematical methods in the dynamics of space vehicles].* Moskva: Vyichislit. Tsentr AN SSSR, 1966, Vol. 3, 269. [In Russian].
6. Kolesnikov K.S. (2003). *Dinamika raket: Uchebnik dlya vuzov [Dynamics of missiles: a textbook for universities].* Moskva: Mashinostroenie, 2003, 520. [In Russian].

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2020. – Випуск 34
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Выпуск 34
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

7. Eliseev V.I., Ruzova T.A., Tolstopyat A.P., Fleer L.A., Shevchenko A.F. & Shevchenko S.A. (2011). Dinamika poverhnosti zhidkosti pri podache gazovogo potoka cherez vertikalnuyu zaglublennuyu furmu [Dynamics of the liquid's surface with feeding a gas flow through a vertical buried lance]. *Visnik Dnipropetrovskogo universitetu. Seriya: Mehanika [Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series: Mechanics]*, 2011, Vol. 15, 1, 112-119. [In Russian].
8. Eliseev V.I., Sovit Yu.P., Tolstopyat A.P. & Fleer L.A. (2014). Modelirovanie amplitudno-chastotnykh karakteristik kolebaniy sistemy zhidkost prifurmennyiy gazovyy ob'yem [Modeling of the amplitude-frequency characteristics of oscillations of the system liquid near the tuyere gas volume]. *Visnik Dnipropetrovskogo universitetu. Seriya: Mehanika [Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series: Mechanics]*, 2014, Vol. 18, 1, 17-25. [In Russian].
9. Eliseev V.I., Tolstopyat A.P. & Fleer L.A. (2013). Chastota otryiva puzyrey ot gazovogo prifurmennogo obyema [Frequency of bubbles separation from the gas near-tuyere volume]. *Visnik Dnipropetrovskogo universitetu. Seriya: Mehanika [Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series: Mechanics]*, 2013, Vol. 17, 1, 86-94. [In Russian].
10. Kachanov Yu.S., Kozlov V.V. & Levchenko V.Ya. (1982). *Vozniknovenie turbulentsnosti v pogranychnom sloe [The onset of turbulence in the boundary layer]*. Novosibirsk: Nauka, 1982, 152. [In Russian].
11. Loytsyanskiy L.G. (2003). *Mehanika zhidkosti i gaza [Mechanics of liquid and gas]*. Moskva: DROFA, 2003, 840. [In Russian].
12. Eliseev V.I., Tolstopyat A.P., Fleer L.A., Shevchenko A.F. & Shevchenko S.A. (2017). Kolebaniya tsylindricheskoho sosuda s zhydkostyu [Oscillations of a cylindrical vessel with liquid]. *Zbirnik tez dopovidy XVI Mizhnarodnoyi naukovotekhnichnoyi konferentsiyi «Vibratsiyi v tehmitsi ta tehnologiyah» (m. Vinnitsya, 26-27 zhovnya 2017) [XVI International Scientific and Technical Conference «Vibrations in Engineering and Technology». Collection of abstracts]*. (p.p.115-117). Vinnitsya: VNTU, 2017. [In Russian].

V.I. Eliseev, PhD(Ph.-Meth.), Senior Research Scientist, ORSID 0000-0003-4999-8142

S.A. Shevchenko, PhD(Engin.), Senior Research Scientist, ORSID 0000-0002-9287-9177

A.P. Tolstopyat, PhD (Engin.).

L.A. Fleer, Researcher

A.P. Shevchenko, Dr.Sci.(Engin.), Lead Research Scientist, ORSID 0000-0003-0867-6825

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Dynamics of oscillations of the "liquid bath - lance" system during injection processing of the melt in the ladle.

Summary. The aim of the study was to evaluate the influence of key waveform factors on the dynamics of the process during injection molding of cast iron with granular magnesium in ladles, their significance and relationship between them. Based on the theories of wave motion of liquid layers, a mathematical model has been developed that allows to investigate the oscillatory processes in the ladle during the processing of cast iron melt with granular magnesium. The model involved the processing of cast iron by injection of granular magnesium through the tuyeres of devices that are immersed in the melt. The oscillating system "Liquid bath - lance" is

considered on the example of the bath of a heavy - duty filling bucket with its own frequency - 0.47 Hz. The influence of the most probable oscillation sources (natural frequency of the lance oscillation and the frequency of the conditional source) on the amplitude-frequency oscillations of the system elements is calculated. It is established that in addition to the natural frequencies of these elements, the system has two more natural oscillations. Given that the mass of the melt is much greater than the mass of the lance, it practically determines the behavior of the system during its excitation. That is, the system responds only to those excitations in which the frequency is close to the natural frequency of the liquid bath. In turn, it is shown that the natural frequency of the bath is largely determined by its diameter at the top. In practice, it is necessary to know the resonant frequencies of the liquid bath, the tuyere device, as well as all other sources of oscillations (gas jet decay, and oscillations of pop-up bubbles). Accordingly, it is necessary to try to dampen the amplitude with this dangerous resonant frequency. To reduce the oscillation amplitude of the bath surface when treating cast iron with granular magnesium, it is recommended to first estimate the natural resonant frequency of the liquid bath, and then select design solutions and processing parameters, avoiding dangerous frequencies close to the natural frequency of the bath. However, it should be noted that the spectrum of oscillation frequencies in the purl zone is quite wide and, of course, contains dangerous low frequencies.

Key words: amplitude, frequency, oscillating system, liquid bath, lance, mathematical model.

For citation: *Yelisyeyev V.I., Shevchenko S.O., Tolstopyat O.P., Flier L.O., Shevchenko A.F.* Dynamika kolyvannya systemy "ridka vanna - furma" pry inzhektsiyniy obrobsi rozplavu v kovshi. [Dynamics of oscillation of the system "liquid bath - lance" during injection processing of the melt in the bucket.]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 90-100. (In Ukrainian).
DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-90-100

*Стаття надійшла до редакції збірника 1.12.2020 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування.
(Протокол засідання редакційної колегії №3 від 22 грудня 2020 р.)*