

УДК : 669.18.013

**Т. Г. Сабірзянов, проф., д-р техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет*

**І.Т. Сабірзянов, інж.**

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ*

## До питання про потужність перемішування сталеплавильної ванни під час чистого кипіння

Одержано математичні моделі потужності перемішування сталеплавильної ванни мартенівської печі пухирцями CO в період чистого кипіння. Запропоновано спосіб знаходження точного значення середнього шляху спливання пухирців CO. Знайдено оптимальне співвідношення між садкою печі і площею дзеркала ванни.

**сталеплавильні ванни, чисте кипіння, перемішування**

Перемішування рідких металів газами відіграє значну роль в металургії та ливарному виробництві. Завдяки перемішуванню збільшується міжфазна поверхня, зменшується товщина дифузійного та теплового пограничних шарів, відбувається усереднення температури і хімічного складу фаз. Все це сприяє прискоренню тепло- і масообмінних процесів і підвищенню продуктивності металургійних агрегатів. Так, наприклад, в мартенівських та дугових електросталеплавильних печах під час чистого кипіння десятки тисяч пухирців CO щосекунди зароджуються на поду і відкосах ванни, відриваються і спливають, переходячи у газову фазу печі. При цьому відбувається інтенсивне перемішування ванни, що не тільки сприяє підвищенню продуктивності печі, а й очищенню металу від шкідливих газів (азот, водень та інш.) і неметалевих включень. Це пояснюється тим, що пухирець CO, що спливає, являє собою практично абсолютний вакуум по відношенню до розчинених у металі газів, внаслідок чого гази із металу переходять до об'єму пухирця і разом із ним видаляються із ванни. До пухирців CO, завдяки адгезійним силам, прилипають і видаляються із металу в шлак неметалеві включення, завдяки чому метал очищується і від останніх.

*Ефективність барботажних процесів при чистому кипінні, очевидно, тим вища, чим більше потужність перемішування металу пухирцями CO, яка, таким чином, є додатковим важливим фактором, що суттєво впливає на продуктивність сталеплавильних агрегатів та якість металу.*

Вітчизняними і зарубіжними вченими-металургами, переважно сталеплавильниками (Г. Шенк, І. Г. Казанцев, В.С. Кочо, С. Л. Левін, М. Я. Меджибожський та інш. [1, 2]), були запропоновані різні способи розрахунку потужності перемішування ванни пухирцями CO, однак досі немає ясності в деяких питаннях, таких, наприклад, як обґрунтованість ототожнювання роботи перемішування сталеплавильної ванни при чистому кипінні з роботою ізотермічного розширення пухирців CO, визначення розрахункової величини шляху спливання останніх тощо. Нижче, на основі використання нового підходу до розрахунку роботи перемішування, а саме визначення її як роботи архімедової сили, дано відповіді на зазначені запитання, а також сформульовано практичні рекомендації щодо оптимального співвідношення між ємністю подової сталеплавильної печі і площею дзеркала її ванни.

Виведемо формулу для розрахунку потужності перемішування  $L_{\text{пер}}$  при використанні архімедової сили, діючої на пухирець в рідкому металі. На глибині  $H$  пухирець має потенційну енергію положення, яка чисельно дорівнює архімедовій силі, що діє на пухирець, помноженій на шлях  $H$ . При спливанні пухирця дана енергія частково витрачається на роботу перемішування  $L_{\text{пер}}$ , яке супроводжується хаотичним переміщенням макрооб'ємів металу і шлаку, збільшенням міжфазних поверхонь шляхом подрібнення рідких фаз на краплини, утворення газорідної емульсії і т. ін. Друга частина потенційної енергії заглибленого газу перетворюється у кінетичну енергію  $E_{\text{кін}}$  останнього на виході із ванни.

Швидкість пухирців CO, що покидають ванну, становить приблизно 1 м/с [3], отже для 1 кг газу  $E_{\text{кін}} = w^2/2 \approx 0,5$  Дж/кг.

При  $T = 1873$  К, середньому тиску газу в пухирці  $p = 1,5 \cdot 10^5$  Па, відносній молекулярній масі CO  $M_{\text{CO}} = 28$  кг/кмоль і універсальній газовій сталій  $R = 8314$  Дж/кмоль · К, згідно із рівнянням стану ідеального газу, записаним для 1 кг останнього, середній питомий об'єм становитиме  $\bar{v} = RT/pM_{\text{CO}} = 8134 \cdot 1873 / (1,5 \cdot 10^5 \cdot 28) = 3,7076$  м<sup>3</sup>/кг CO.

Потенційна енергія заглиблення 1 кг CO при  $H = 1$  м, густині рідкого металу  $\rho_{\text{м}} = 7000$  кг/м<sup>3</sup> і прискоренні сили тяжіння  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> становитиме

$$E_{\text{п}} = \bar{v} \rho_{\text{м}} g H = 3,7076 \cdot 7000 \cdot 9,81 \cdot 1 = 254600 \text{ Дж/кг газу.}$$

Порівнюючи  $E_{\text{п}}$  з  $E_{\text{кін}}$ , бачимо, що величина  $E_{\text{кін}}$  є дуже малою і нею можна знехтувати. Отже, можна вважати, що потенційна енергія заглибленого у метал газу практично повністю витрачається на перемішування ванни.

Таким чином, згідно з попереднім, робота перемішування при спливанні пухирця CO довільної маси визначається рівнянням

$$L_{\text{пер}} = \bar{V}_{\text{п}} \rho_{\text{м}} g H, \quad (1)$$

де  $\bar{V}_{\text{п}}$  і  $H$  – середній об'єм і шлях спливання пухирця.

Величину  $\bar{V}_{\text{п}}$  знаходимо шляхом ділення площі фігури 1-2- $p_2$ - $p_1$ -1 на відрізок  $p_1$ - $p_2$  (рис. 1), враховуючи, що крива 1-2 є ізотермою.

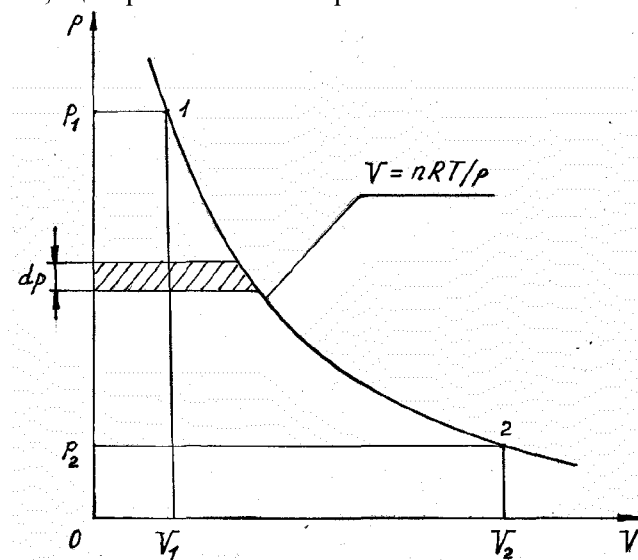


Рисунок 1 – Зміна стану газу у пухирці, що спливає

Запишемо рівняння Менделєєва-Клапейрона для пухирця, що спливає:

$$pV_{\text{п}} = nRT, \quad (2)$$

де  $p$  і  $V_{\text{п}}$  – змінні значення тиску і об'єму газу в пухирці;

$n$  – практично стала кількість кіломолив CO у пухирці.

Використовуючи рівняння (2), записуємо вираз для площі смуги шириною  $df$  (див. рис. 1):

$$df = -V_n dp = -nRT dp/p. \quad (3)$$

Знак «мінус» у рівнянні (3) означає, що в напрямку 1-2 тиск газу зменшується, отже  $dp < 0$ .

Інтегрування рівняння (3) дає:

$$f = nRT \ln(p_1/p_2), \quad (4)$$

де  $p_1$  і  $p_2$  початковий і кінцевий тиски газу у пухирці.

Вираз для середнього значення об'єму пухирця знаходимо, поділивши рівняння (4) на різницю тисків  $p_1 - p_2$  (див. рис. 1):

$$\bar{V} = nRT \ln(p_1/p_2)/(p_1 - p_2). \quad (5)$$

Підставивши рівняння (5) до (1), з урахуванням співвідношення

$$p_1 - p_2 = c_m gH, \quad (6)$$

одержуємо рівняння для роботи перемішування при спливанні одного пухирця:

$$L_{\text{пер}} = nRT \ln(p_1/p_2). \quad (7)$$

Рівняння (7) співпадає з відомою із термодинаміки формулою для розрахунку роботи ізотермічного розширення ідеального газу. Це свідчить про те, що у випадку чистого кипіння, дійсно, для визначення потужності перемішування ванни пухирцями CO можна користуватись формулою для роботи ізотермічного розширення газу. Слід в той же час зазначити, що метод розрахунку  $N_{\text{пер}}$ , який ґрунтується на використанні архімедової сили, є універсальним і дозволяє розв'язувати більш складні задачі, наприклад, задачу по розрахунку  $N_{\text{пер}}$  при продувці металу нейтральним чи окислювальним газом через фурму.

При розрахунку потужності перемішування ванни в період чистого кипіння величина  $n$  представляє собою кількість кіломолив CO, що у вигляді пухирців відриваються щосекунди від поду та відкосів:

$$n = v_c M_T 1000/60 \cdot 100 \cdot 12 = 1,389 \cdot 10^{-2} v_c M_T \text{ кмоль CO/с}, \quad (8)$$

де  $v_c$  – швидкість окислення вуглецю, %/хв;

$M_T$  – ємність печі, т.

Температуру газу  $T$  можна прийняти як таку, що дорівнює температурі металу.

Значення тиску газу  $p_1$  і  $p_2$  можна представити співвідношеннями

$$p_1 = p_0 + c_m gH; \quad (9)$$

$$p_2 = p_0, \quad (10)$$

де  $p_0 = 1,01325 \cdot 10^5$  Па – атмосферний тиск;

$H$  – висота стовпа металу над пухирцем CO в момент його відриву від поду чи відкосу, м.

Після підстановки співвідношень (8)...(10) у (7) одержуємо розрахункову формулу для потужності перемішування ванни при чистому кипінні:

$$N_{\text{пер}} = 0,1155 v_c M_T \ln(1 + 0,6777H) \text{ кВт}. \quad (11)$$

Певні труднощі пов'язані із визначенням середньої глибини  $H$ , з якої починається спливання пухирців CO, оскільки сталеплавильна ванна має складну форму, і її глибина змінюється від нуля по периметру дзеркала ванни до максимального значення  $H_{\text{max}}$  для центральної точки поду.

В.С. Кочо [2] рекомендував визначати  $H$  згідно із співвідношенням

$$H = (0,30 \dots 0,40) H_{\text{max}}. \quad (12)$$

С. Л. Левін [2], виконавши детальний математичний аналіз даного питання, запропонував графоаналітичний метод знаходження  $H$ , на основі якого М. Я. Меджибожський [2] склав наступну формулу для розрахунку  $N_{\text{пер}}$ :

$$N_{\text{пер}} = v_c M_T T (0,015 + 0,00384 H_{\text{max}}) \text{ кВт.} \quad (13)$$

Величину  $H$  природно визначати як відношення об'єму ванни до площі її дзеркала  $S$ :

$$H = 1000 M_T / c_m S. \quad (14)$$

Підставивши вираз (14) у рівняння (11), одержуємо дещо інший вигляд розрахункової формули для визначення потужності перемішування ванни спливаючими пухирцями  $\text{CO}$ :

$$N_{\text{пер}} = 0,1155 v_c M_T T \ln(1 + 0,09682 M_T / S) \text{ кВт.} \quad (15)$$

Якщо для знаходження  $H$  скористатись співвідношенням (12), то розрахункова формула матиме вигляд:

$$N_{\text{пер}} = 0,1155 v_c M_T T \ln(1 + 0,24 H_{\text{max}}) \text{ кВт.} \quad (16)$$

Результати розрахунків  $N_{\text{пер}}$  за формулами (13), (15) і (16) наведені у табл. 1 і на рис. 2.

Таблиця 1 – Потужність перемішування у мартенівських печах різної ємності

$M_T$ , т	50	85	130	200	250	380	500	600	
$M_T/S$ , т/м <sup>3</sup>	1,69	2,00	2,50	2,94	3,33	4,00	4,76	5,55	
$H_{\text{max}}$ , м	0,60	0,70	0,80	0,85	0,95	1,10	1,20	1,35	
$\bar{H}$ , м	0,241	0,286	0,357	0,420	0,476	0,571	0,680	0,793	
$v_c$ , %/хв	0,0100	0,0090	0,0075	0,0060	0,0050	0,0035	0,0027	0,0023	
$v_c$ , розр. %/хв	0,0099	0,0089	0,0070	0,0062	0,0050	0,0041	0,0032	0,0028	
$N_{\text{пер}}$ кВт за форм.	(13)	16,21	25,34	33,00	41,05	43,66	47,89	49,58	52,17
	(15)	16,39	29,29	45,72	65,03	75,57	94,18	110,69	128,39
	(16)	14,55	25,70	37,04	48,19	55,54	67,41	73,91	83,79
$M_T v_c$	0,50	0,76	0,91	1,24	1,25	1,56	1,60	1,68	

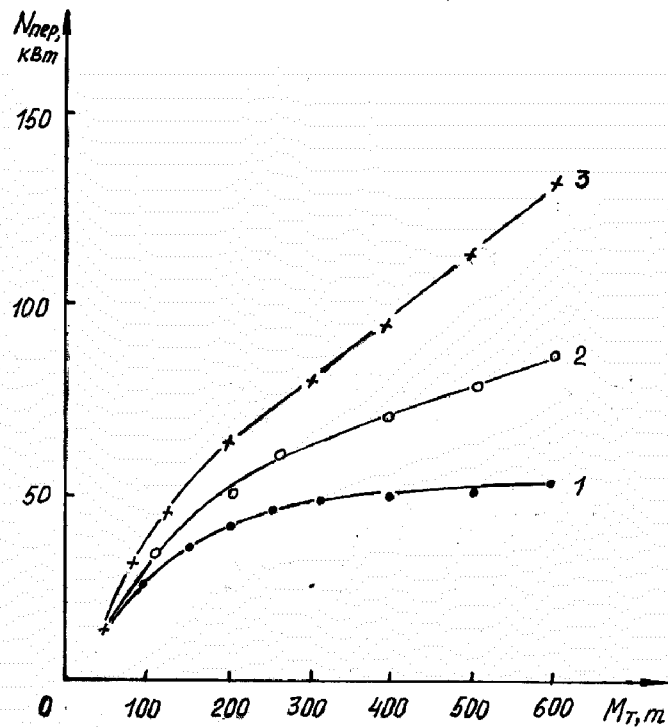


Рисунок 2 – Залежність  $N_{\text{пер}}$  від місткості мартенівської печі:  
1 – за формулою (13); 2 – (16); 3 – (15)

Аналіз одержаних даних дозволяє зробити наступні висновки.

Значення  $N_{\text{пер}}$ , розраховані за формулами (13), (15) і (16), близькі, особливо для печей ємністю менше 150 т.

Згідно з формулою (13) величина  $N_{\text{пер}}$  для печей ємністю більше 250 т знаходиться на практично сталому рівні приблизно 50 кВт. Даній обставині важко знайти обґрунтування, враховуючи те, що при збільшенні садки печі відбувається безперервне збільшення і параметра  $M_T v_C$ , що характеризує кількість вуглецю, який окислюється за одиницю часу, і середньої висоти ванни  $\bar{H}$  (див. табл. 1).

Дані, що відповідають формулі (16), займають проміжне положення по відношенню до значень  $N_{\text{пер}}$ , одержаних за формулами (13) і (15). Перевагу слід віддати останній формулі, оскільки вона відрізняється від решти лише одним – використанням істинного значення параметра  $\bar{H}$ , який знаходиться як відношення об'єму ванни до площі її дзеркала.

Для техніко-економічного аналізу результатів виробництва більш важливим, ніж параметр  $N_{\text{пер}}$ , є питома потужність перемішування ванни  $N_{\text{пер.пит}}$  – потужність, що припадає на одиницю маси металу. Щоб одержати вираз для розрахунку цієї величини, треба рівняння (15) поділити на  $M_T$ :

$$N_{\text{пер.пит}} = 0,1155 v_C T \ln(1 + 0,09682 M_T / S) \text{ кВт/т} . \quad (17)$$

Аналіз рівняння (17) вказує на те, що при  $T = \text{const}$  величина  $M_T / S$  чинить протирічливий вплив на  $N_{\text{пер.пит}}$ . Дійсно, з одного боку, згідно із виразом, що стоїть у рівнянні (17) під знаком логарифма, при зростанні  $M_T / S$  величина  $N_{\text{пер.пит}}$  теж зростає за рахунок збільшення середнього шляху спливання пухирців. З іншого боку, збільшення  $M_T / S$  неухильно приводить до зменшення швидкості вигорання вуглецю (див. табл. 1) за рахунок зменшення відносної поверхні дзеркала ванни, через яку здійснюється постачання кисню, що витрачається на окислення вуглецю. Отже, залежність  $N_{\text{пер.пит}}$  від  $M_T / S$  повинна мати екстремальний характер. При дуже малих значеннях параметра  $M_T / S$  питома потужність перемішування із зростанням цього параметра буде збільшуватись до деякого максимального значення, а після досягнення точки максимуму почнеться зменшення  $N_{\text{пер.пит}}$ .

Для аналітичного визначення точки максимуму треба мати явний вигляд залежності  $v_C = f(M_T / S)$ , яка була знайдена шляхом статистичної обробки даних, представлених в табл. 1, у вигляді полінома 2-го степеня:

$$v_C = 0,0175 + (0,00046 M_T / S - 0,0052) M_T / S . \quad (18)$$

Розрахункові дані, що відповідають рівнянню (18), уповні задовільно узгоджуються з фактичними величинами (див. табл. 1).

Підстановкою рівняння (18) до (17) при  $T = 1873 \text{ К}$  одержуємо вираз для розрахунку  $N_{\text{пер.пит}}$ :

$$N_{\text{пер.пит}} = [3,7858 + (0,0995 M_T / S - 1,125) M_T / S] \ln(1 + 0,09682 M_T / S) \text{ кВт/т} . \quad (19)$$

Для знаходження оптимуму функції (19) її слід продиференціювати по  $M_T / S$  і одержаний результат прирівняти до нуля:

$$\frac{dN_{\text{пер.пит}}}{d(M_T / S)} = (0,199 M_T / S - 1,125) \ln(1 + 0,09682 M_T / S) + [3,7858 + (0,0995 M_T / S - 1,125) M_T / S] 0,09682 / (1 + 0,09682 M_T / S) = 0 . \quad (20)$$

Розв'язавши трансцендентне рівняння (20) методом підбору, знаходимо  $(M_T / S)_{\text{опт}} = 2,33$ .

Аналогічно можна одержати оптимальні значення параметра  $M_T / S$  для інших подових сталеплавильних агрегатів, наприклад, для дугових електросталеплавильних печей. Одержані у такий спосіб оптимальні значення параметра  $M_T / S$  повинні враховуватись при проектуванні та реконструкції подових сталеплавильних печей.

**ВИСНОВКИ.** При використанні архімедової сили одержані математичні моделі потужності перемішування ванни мартенівської печі пухирцями  $\text{CO}$  в період чистого кипіння (рівняння (15), (17) і (19)). Запропоновано спосіб знаходження точного

значення величини  $\bar{H}$  – середнього шляху спливання пухирців CO (формула (14)).  
Знайдено оптимальне співвідношення між садкою печі і площею дзеркала ванни.

## Список літератури

1. Явойский В.И. Теория процессов производства стали. – М.: Металлургия, 1967. – 792 с.
2. Меджибожский М. Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. – К.; Донецк: Вища школа, 1986. – 280 с.
3. Сабирзянов Т. Г. Некоторые вопросы барботажа сталеплавильных ванн пузырями CO // Изв. высших учебн. заведений. Черн. металлургия. – 1975. – № 5. – С. 42-46.

*T. Sabirzyanov, I. Sabirzyanov*

### **К вопросу о мощности перемешивания сталеплавильной ванны во время чистого кипения**

Получены математические модели мощности перемешивания сталеплавильной ванны мартеновской печи пузырями CO в период чистого кипения. Предложен способ нахождения точного значения среднего пути всплытия пузырьков CO. Найдено оптимальное соотношение между садкой печи и площадью зеркала ванны.

*T. Sabirzyanov, I. Sabirzyanov*

### **To the question about power of interfusion of steel-smelting bath during the clean boiling**

The mathematical models of power of interfusion of steel-smelting bath of martin stove are got by bubbles CO in the period of the pure boiling. The method of finding of the exact meaning of middle way of emerging of bubbles is offered CO. Optimum correlation between a sadkoy stove is found and area of mirror of bath.

Одержано 28.09.09