

6. Chernyatevich A.G. Hot metal refining in the ladle with simultaneous removal of silicon and sulfur / Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Chernyatevich I.V. // Advances in Metallurgical Processes & Materials: 2-nd International Conference, June 2015. – Kiev, 2015. – P.24-27.
7. Сигарев Е.Н. Оптимизация состава шлака для комплексного рафинирования железоуглеродистой расплава / Е.Н.Сигарев // Збірник наукових праць Дніпро-дзержинського технічного університету: (технічні науки) – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2012. – Вип. 3 (20). – С.23-31.
8. Hess E. Equipment and processes in basic oxygen steel making plant for the adjustment of ultra-low contents of C, P, S and N / E.Hess // Metallurgical Plant and Technology. – 1990. – V.13. – №2. – P.26-34.
9. Пирс Р. Предварительное рафинирование чугуна / Р.Пирс // Металлург. – 1956. – №10. – С.10-15.

Надійшла до редколегії 07.06.2017.

УДК 669.162

СІГАРЬОВ Є.М., д.т.н., професор  
СІГАРЬОВ М.К., к.т.н., доцент  
КОЧМОЛА Д.С., студент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### ОЦІНКА ПОТУЖНОСТІ ПЕРЕМІШУВАННЯ У РОЗПЛАВІ З ОБЕРТОВОЮ ФУРМОЮ

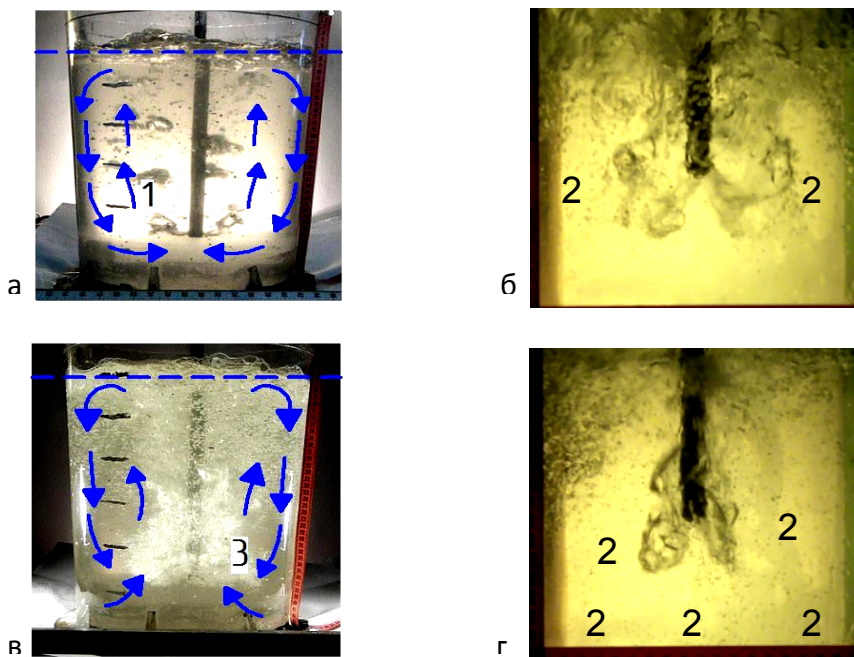
**Вступ.** За результатами аналізу експериментів з дослідження гідрогазодинаміки ванни у ковші встановлено [1], що при обертанні заглибної фурми навколо осі найкраще диспергування та розосередження по об'єму утворених газових пузирів забезпечується при швидкості обертання, яка не перевищує  $2,17 \text{ сек}^{-1}$ , при питомих витратах газу до  $0,018 \text{ м}^3/\text{хв.}$  (рис.1). При подальшому підвищенні швидкості обертання фурми і питомої витрати газу інтенсивність утворення крупних пузирів превалює над силами дроблення і до поверхні ванни спливають крупні грибоподібні пузири, що в реальних умовах обробки може призводити до зниження ступеня засвоєння реагенту.

В цілому, необхідно відзначити, що визначений [1] час повного усереднення ванни по введеному рідкому індикатору при використанні стаціонарної фурми склав 10,2-10,5 с, а у разі використання обертової фурми зменшився до 5,8-7,0 с (у залежності від швидкості обертання та витрат газу-носія).

У свою чергу, об'єм зон, вільних від порошку («мертві» зони), при використанні обертової фурми із двома соплами не перевищував 10-15% від загального об'єму ванни. Для умов використання стаціонарної фурми з одним та двома соплами цей показник становив 40-55% відповідно. Розподіл порошкоподібного реагенту по об'єму ванни у значній мірі залежить від інтенсивності перемішування.

Розробка раціонального режиму вдування газопорошкових струменів через обертову заглибну фурму із забезпеченням високого ступеня засвоєння реагентів при одночасній інтенсифікації перемішування ванни потребує додаткового теоретичного обґрунтування.

**Постановка задачі.** Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених темі перемішування ванни [2-13], на сьогодні недостатньо надійних даних відносно питання, яка саме частка енергії, що надходить у ванну, йде на перемішування останньої, а яка – дисипує. З метою оцінки потужності перемішування розплаву та величини дисипації енергії авторами робіт [2-13] пропонується використання, в основному, емпіричних виразів (табл.1).



1 – грибоподібні газові пухири; 2 – зони, насичені частинками порошку;  
3 – шароподібні газові пухири

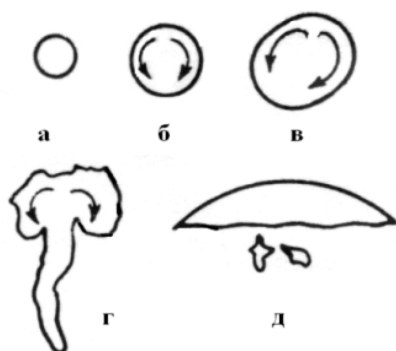
Рисунок 1 – Форма газових пухирирів (а) та картина розподілу порошку у об'ємі ванни (б) при вдуванні газових (а) та газопорошкових (б) струменів через заглибну фурму. Швидкість обертання фурми  $0 \text{ с}^{-1}$  (а, б),  $2,17 \text{ с}^{-1}$  (в) та  $3,83 \text{ с}^{-1}$  (г); питомі витрати газу-носія –  $0,017 \text{ м}^3/\text{хв}$ .

Таблиця 1 – Вирази для визначення потужності перемішування газовими пухириями та дисипації енергії

№	Вирази	Джерело	Примітка
1	2	3	4
1	$N_{CO} = 0,266 \cdot \frac{dc}{dt} m \cdot T \cdot \lg(1 + k \cdot L_e)$ ; $k$ від 0,35 до 0,70	[2]	потужність перемішування спливаючими пухириями CO
2	$N = \left( 0,05 + S_B^{1,38} \cdot e^{-10,2 \cdot 10^{-3} \cdot S_B} \cdot 10^{-4} \right) \cdot V_n \cdot S_B$	[3]	кВт
3	$N_n = 0,54 \cdot m \cdot V_C \cdot T_B \cdot \lg(1 + 0,7 \cdot h)$	[4]	кВт
4	$N_p = 0,0124 \cdot V_k \cdot \eta \cdot T_p \cdot \frac{0,7 \cdot h}{1 + 0,7 \cdot h} \cdot (1 + B)$	[4]	кВт
5	$E_{duc} = \frac{6,2 \cdot V_g \cdot T \cdot \ln \left( 1 + \frac{P_1 \cdot g \cdot H}{10^5 \cdot P_0} \right)}{G}$	[5]	дисипація енергії, Вт/г
6	$\varepsilon = \frac{0,0285 \cdot Q \cdot T}{W_m} \cdot \lg \left( 1 + \frac{h}{1,48} \right)$	[6]	- « -
7	$A = M_z \cdot r \cdot T_c \cdot \ln \left( \frac{P_c}{P_a} \right)$	[7]	дисипація енергії при спливанні бульбашок

## Продовження таблиці 1

1	2	3	4
8	$N_B = G \cdot \left[ r \cdot T_c \cdot \ln \frac{g \cdot \rho_{жс} \cdot h_H + P_a}{g \cdot \rho_{жс} \cdot h_k + P_a} - g \cdot (h_H - h_k) \right] - \frac{G \cdot \omega^2}{2}$	[7]	потужність передана до ванни пузирем
9	$E = \left\{ 11,6 \cdot 2,3 \lg \left( 1 + \frac{H}{148 \cdot P} \right) + 9,69 \right\} \cdot Q$	[8]	потужність перемішування
10	$\varepsilon = 6,18 \cdot V_c \cdot T_L \cdot \ln \left( 1 + \frac{\rho_L \cdot g \cdot H_0}{103000 \cdot P_0} \right)$	[9]	швидкість дисипації енергії, Вт
11	$\varepsilon = \frac{8,32 \cdot Q \cdot T_M}{22,4 \cdot M} \left[ \left( 1 - \frac{T_{окр}}{T_M} \right) + \ln \left( 1 + \frac{9,81 \cdot \rho_M \cdot H}{\rho_A} \right) \right]$	[10]	- « -
12	$N = 0,38 \cdot V_c \cdot Q \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{P_1}{P_2}$	[11]	потужність перемішування
13	$N = V_c \cdot Q \cdot T \cdot (0,015 + 0,00384 \cdot H_{max})$	[12]	- « -
14	$N = 18,65 \cdot \frac{G}{S} \cdot V_s \cdot \Delta P \cdot \frac{T_M}{T_0}$	[13]	- « -



а – сферичний пазир невеликих розмірів без внутрішньої циркуляції; б – сферичний пазир невеликих розмірів з внутрішньою циркуляцією; в – еліптичний пазир, що спливає за спіраллю; г – грибоподібний пазир неправильної форми; д – грибоподібний пазир з верхньою напівсферичною частиною

Рисунок 2 – Форми газівих пазирів, що спливають до поверхні ванни (за П.Грассманом)

- 2 – питомі або загальні витрати газу на перемішування;
- 3 – маса розплаву та його щільність;
- 4 – глибина ванни (довжина шляху спливання пазирів до поверхні ванни);
- 5 – площа дзеркала ванни.

В той же час, використання наведених у табл.1 виразів для умов перемішування розплаву у ковші з врахуванням інтегрованого впливу газівих струменів та пазирів, що спливають до поверхні ванни [1], потребує зваженого підходу.

Значна різноманітність виразів для визначення потужності перемішування та дисипації енергії пояснюється тим, що автори робіт враховують притаманні конкретній системі (або агрегату) умови впровадження газівих, газопорошкових струменів, утворення пазирів різних форм та розмірів (рис.2), їх спливання до поверхні ванни.

Циркуляція потоків у металі призводить до їхньої турбулізації і дисипації механічної енергії, яка підводиться з газівими струменями. Як вважає ряд авторів [4, 5], величиною кінетичної енергії струменя при оцінці питомої потужності дисипацією енергії в сталій системі «метал – струмінь – газіві пазирі» можна знехотати.

**Результати роботи.** Необхідно відмітити, що практично у всіх наведених у табл.1 виразах враховані:

1 – початкова температура розплаву перед вдуванням реагенту;

Виконані авторами чинної статті розрахунки значень питомої потужності перемішування із використанням наведених у табл.1 виразів (за сталих умов щодо температури ванни ( $T$ ), маси розплаву ( $G_m$ ) та витрат газу ( $Q$ )) показали, що величини значно різняться між собою. Це не дозволяє рекомендувати вирази (табл.1) для механічного перенесення на умови ковшової обробки розплаву, у тому числі із використанням обертової фурми.

З аналізу результатів розрахунків за виразами, наведеними у табл.1, витікає, що потужність перемішування, в основному, визначається дією Архімедових сил з урахуванням сил на ізотермічне розширення пузиря газу. Питома потужність перемішування збільшується, а час, необхідний для гомогенізації розплаву в ковші, зменшується з підвищенням витрат газу та збільшенням глибини ванни.

Авторами наведених у табл.1 робіт враховані витрати газу, температура та маса розплаву, глибина вводу газу у ванну, але результати в одному випадку відносяться до потужності перемішування, а у іншому – до дисипованої енергії, що ускладнює порівняння результатів розрахунків. Так, при визначенні потужності перемішування у подових агрегатах враховані [3-5] дія загального потоку спливаючих пузирів  $CO$ , енергія механічного впливу струменя кисню та парів заліза, що утворюються у реакційних зонах. Тільки у роботі [4] при визначенні питомої потужності перемішування враховано роботу одного пузиря, його масу та швидкість вигорання вуглецю.

Крім того, практично у всіх наведених у табл.1 виразах, окрім [4], не враховуються розміри пузирів, які утворюються при руйнуванні газових струменів або утворюються в результаті реакцій. Це пов'язано із припущенням, що утворені пузири мають приблизно один розмір. Тобто не враховуються умови їх подрібнення, ізотермічного розширення пузирів неасимільованого ванною газу-носія, зміна загальної реакційної поверхні пузирів за різних умов їх утворення та форм (рис.2).

Як встановлено [1], з підвищенням числа обертів заглибної фурми газонасиченість ванни зменшується, що може бути пов'язано із утворенням каналів виходу газових об'ємів на поверхню ванни (канальний режим продувки) та обмеженням розмірів барботажної зони. Це впливає як на потужність перемішування, так і на всі процеси, які супроводжують продування ванни газом. Подрібнення газових пузирів у ванні відбувається як в ламінарному, так і в турбулентному потоці за рахунок взаємодії між суцільною та дисперсною фазами. В'язка напруга в першому випадку або інерційні сили у другому прагнуть деформувати і зруйнувати газовий пузир. Капілярні сили поверхневого натягнення повністю або частково компенсують ці дії на пузир газу з боку рідини. Таким чином, подрібнення газових об'ємів у турбулентному потоці відбувається або не відбувається у залежності від співвідношення між інерційними і поверхневими силами. Переміщення занурених у ванну газових або газопорошкових струменів при використанні обертової фурми вносить свій вклад у зміну співвідношення між інерційними та силами поверхневого натягнення.

У чинному дослідженні запропоновано методика визначення потужності перемішування розплаву у ковші із врахуванням зміни розмірів, кількості, швидкості спливання пузирів як функції швидкості обертання заглибної фурми.

Вплив розміру, швидкості підйому та траєкторії руху спливаючих до поверхні ванни пузирів на потужність перемішування визначається, в основному (табл.1), силою Архімеда

$$F_A = V_r \cdot g(\rho_p - \rho_r), \quad (1)$$

де  $V_r$  – об'єм пузиря,  $m^3$ ;  $\rho_p$ ,  $\rho_r$  – щільність рідини і газу відповідно,  $kg/m^3$  (із врахуванням, що щільність газу на кілька порядків менша, ніж щільність рідини,  $\rho_r \ll \rho_p$ , дану величину можна не враховувати) та силою опору

$$F_C = C \cdot S \cdot \rho_p \frac{V_{cp}^2}{2}, \quad (2)$$

де  $V_{cp}$  – швидкість спливання пузиря газу до поверхні ванни, м/с;  $C$  – коефіцієнт опору (0,5-0,8);  $S$  – міделевий перетин пузиря, м<sup>2</sup>.

Таким чином, результуюча сила, яка забезпечує спливання пузиря до поверхні ванни, визначається як

$$\Delta F = F_A - F_C, \quad (3)$$

а робота, яку виконує ця сила,

$$A = \Delta F \cdot H, \quad (4)$$

де  $H$  – шлях переміщення пузиря від місця утворення до поверхні ванни, м.

Якщо виразити  $V_r$  та  $S$  через діаметр пузиря ( $D$ , м)  $V_r = \pi D^3/6$  та  $S = \pi D^2/4$  відповідно, отримаємо вираз для розрахунку роботи перемішування для одного пузиря:

$$A = \left( \pi \cdot D^3 / 6 \cdot g \cdot \rho_p - C \cdot \pi \cdot D^2 / 4 \cdot \rho_p \cdot \frac{V_{cp}^2}{2} \right) \cdot H. \quad (5)$$

Після відповідних перетворень роботу, яку виконують усі сформовані по ходу продувки ванни пузирі (загальною кількістю  $n$ ), можна визначити за виразом:

$$A_n = \pi \cdot \rho_p \cdot D^2 / 2 \cdot \left( g \cdot D / 3 - C \cdot \frac{V_{cp}^2}{4} \right) \cdot H \cdot n. \quad (6)$$

Потужність, яка передається ванні потоком спливаючих до поверхні пузирів, визначається за виразом  $N_n = A/\tau$ , Вт, де  $\tau$  – тривалість вдування газу, с. Питома потужність, відповідно, визначається як  $N_{num} = N_n/G_m$ , Вт/т.

З врахуванням кількості пузирів  $n = 6Q \cdot \tau / \pi \cdot D^3$ , що утворюються по ходу вдування всього об'єму газу ( $Q$ ) у ванну, вираз для визначення роботи спливаючих пузирів матиме вигляд:

$$A_n = \frac{6 \cdot Q \cdot D^2 \cdot \rho_p \cdot \tau}{2 \cdot D^3} \left( g \cdot D / 3 - C / 4 \cdot V_{cp}^2 \right) \cdot H. \quad (7)$$

Питому потужність, що передається ванні, можна визначити за виразом, Вт/т:

$$N_{num} = \frac{3 \cdot Q \cdot \rho_p}{D \cdot G} \left( g \cdot D / 3 - C / 4 \cdot V_{cp}^2 \right) \cdot H. \quad (8)$$

За умови варіанта організації процесу вдування порошкоподібних часток реагентів у потоці нейтрального газу-носія, який не асимілюється ванною, необхідно врахувати також збільшення розмірів пузирів газу при нагріванні у металевому розплаві та зменшення феростатичного тиску по мірі їх підйому до поверхні ванни

$$N_{num} = \frac{6,18 \cdot Q \cdot \rho_p \cdot H}{D \cdot G} \left( g \cdot D - \frac{3 \cdot C \cdot V_{cp}^2}{4} \right) + \ln \left( 1 + \frac{\rho_p \cdot g \cdot H}{10^5} \right). \quad (9)$$

Результати розрахунків за виразом (9) представлено на рис.3.

Наведені вище залежності (7-9) придатні для умов використання стаціонарних заглибних фурм. Частина енергії передається ванні від кінетичної енергії струменя та залежить від довжини струменя до моменту його руйнування та перетворення у газові пузирі (рис.1). Для фурми, що обертається, цей фактор набуває особливого значення.

Для врахування впливу обертання заглибної фурми навколо осі необхідним є визначення кількості дисипованої енергії газового струменя, яка залежить від його довжини та швидкості обертання фурми. Як встановлено [1] при використанні двосоплової

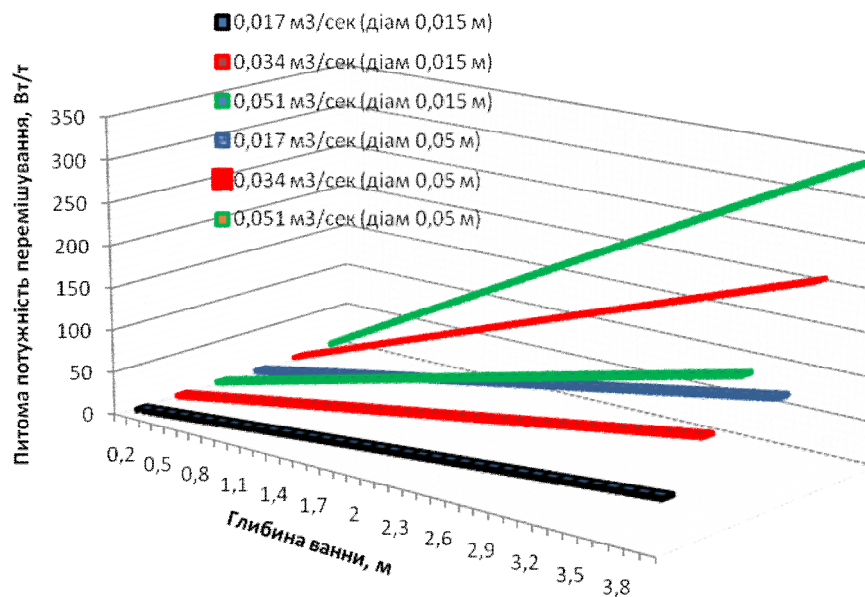


Рисунок 3 – Залежність питомої потужності перемішування від глибини ванни, витрат нейтрального газу-носія та діаметра пухирців (діаметр пухирців 0,05 м та 0,015 м)

заглибної фурми із соплами, що розташовані під кутом 90° до осі фурми, довжина струменів зменшується відповідно до підвищення швидкості обертання фурми з 0,22 м (при 0,5 об/с) до 0,12 м (при 1,5 об/с).

Якщо у першому наближенні вважати газовий струмінь середовищем, що не стискається (у межах збереження ядра струменя [1]), та використавши вираз, запропонований Ван-де-Вуссом

$$N = K \cdot n^3 \cdot d^5 \cdot \rho_m, \tag{10}$$

де  $K$  – коефіцієнт (0,5-0,8);  $n$  – швидкість обертання фурми, об/с;  $d$  – діаметр кола, що описують торці перемішувача у ванні, м, можливо визначити кількість дисипованої енергії струменя при переміщенні останнього у рідкій ванні (рис.4).

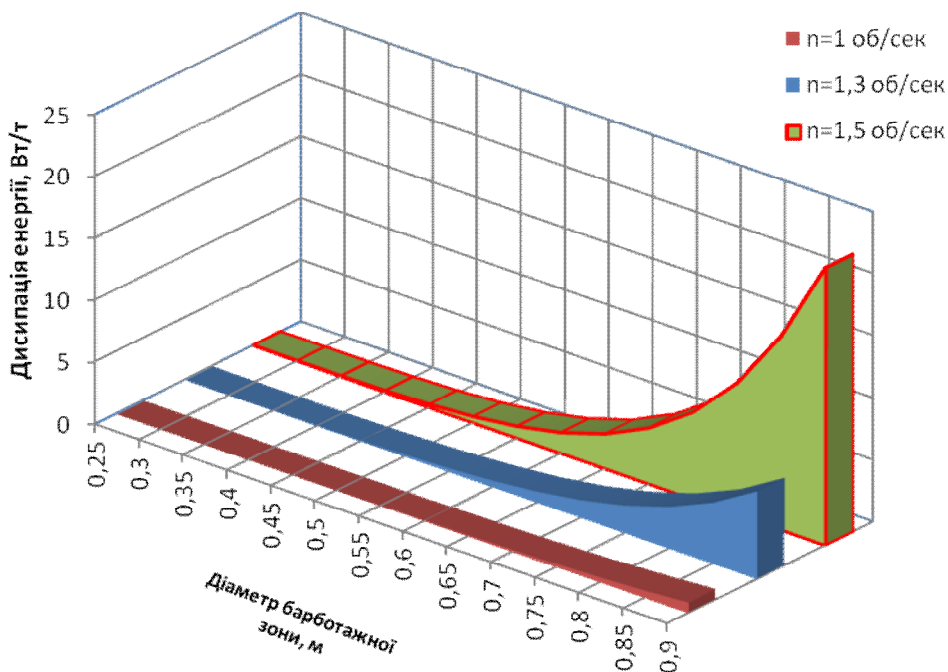


Рисунок 4 – Залежність дисипації енергії струменів від швидкості обертання заглибної фурми (витрата азоту 0,017 м³/с)

Як видно з рис.4, кількість дисипованої енергії струменя пропорційна розмірам барботаажної зони та зростає із підвищенням швидкості обертання фурми.

**Висновки.** Запропонована методика визначення потужності перемішування розплаву у ковші із врахуванням розмірів пузирів придатна для використання в умовах застосування обертової заглибної фурми. Для збільшення потужності перемішування рідкої ванни необхідною умовою є підвищення розміру пузирів, що може негативно вплинути на ступінь засвоєння реагентів на видалення домішок при ковшовому рафінуванні чавуну.

Шляхом до підвищення інтенсивності перемішування може бути комбіноване використання механічного перемішування із додатковим диспергуванням газових об'ємів. За таких умов слід очікувати підвищення інтенсивності масообмінних процесів у ванні.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Барботаажная зона в жидкой ванне при перемещении газовой струи / Е.Н.Сигарев, А.Г.Чернятевич, Н.К.Сигарев, С.А.Зарандия // *Металургія: Збірник наукових праць Запорізької державної інженерної академії.* – 2013. – Вип. 2(30). – С.35-41.
2. Колганов Г.С. Влияние технологических параметров плавки на газонасыщенность ванны / Г.С.Колганов, В.И.Тупица // *Металлургия и коксохимия.* – 1973. – Вып. 35. – С.119-122.
3. Скребцов А.М. Интенсификация перемешивания металла в ванне мартеновской печи пузырями / А.М.Скребцов // *Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов: 1 Всесоюзн. науч. конф.: труды.* – М.: *Металлургия*, 1975. – С.58-62.
4. Гескин Э.С. Работа перемешивания ванны кислородного конвертера / Э.С.Гескин // *Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов: 1 Всесоюзн. науч. конф.: труды.* – М.: *Металлургия*, 1975 – С.72-78.
5. Пат. №2096484 Российская Федераци, С21С1/02. Способ обработки расплава доменного чугуна в разливочном ковше / Карл-Хайнц, Хайнц ван ден Боом, Альфред Эндер, Экарт Хеес, Вальтер Майхснер; заявитель и патентообладатель Тиссен Шталь. – заявл. 27.08.92; опубл. 20.11.97.
6. Исайчикова С.Г. Оценка эффективности перемешивания жидкой стали в ковше инертным газом / С.Г.Исайчикова, Е.А.Казачков // *Сб. научных трудов ПГТУ.* – 2000. – №1(15). – С.27-31.
7. Гизатулин Р.А. Оценка мощности перемешивания / Р.А.Гизатулин // *Современные проблемы металлургического производства: сб. трудов.* – Волгоград. –2002. – С.89-92.
8. Термодинамические и кинетические особенности процесса десульфурации / Новиков В.А., Царев В.А., Новиков С.В. [и др.] // *Электрометаллургия.* – 2012. – №9. – С.16-20.
9. Зборщик А.М. Физико-химические процессы внеагрегатного рафинирования металла: уч. пособ. / Зборщик А.М. – Донецк, 2001. – 154с.
10. Туркдоган Е.Т. Технологические усовершенствования в инъекционной металлургии и в процессах рафинирования металла в ковше в 80-х годах / Е.Т.Туркдоган // *Инжекционная металлургия' 86: труды конференции; М.: Металлургия*, 1990. – С.10-44.
11. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов / Меджибожский М.Я. – Киев - Донецк: Вища школа. 1986. – 280с.
12. Кочо В.С. Кипение жидкого металла в ванне сталеплавильной печи / В.С.Кочо // *Сталь.* – 1945. – № 2-3. – С.55-60.
13. Инжекционная металлургия: сб. трудов / пер. с английского. – Лулеа, Швеция, 1980. – М.: *Металлургия*, 1982. – 352с.

*Надійшла до редколегії 07.06.2017.*