

УДК 669.184

Волнообразование в ванне конвертера как источник акустических колебаний выходных параметров

В. С. Богушевский, доктор техн. наук, профессор, В. Ю. Сухенко, канд. техн. наук, К. М. Зубова, С. В. Жук

Национальный технический университет Украины „КПИ”, Киев

Контактный телефон 2386773

Рассмотрен процесс волнообразования в ванне конвертера на математической модели перемещения идеальной жидкости в цилиндрическом сосуде. Исследован перенос кислорода и теплоты от волнового точечного источника в одномерно движущейся эмульгированной конвертерной ванне. Установлены характеристики частотного спектра изменения основных выходных параметров процесса.

Ключевые слова: конвертер, волнообразование, акустические характеристики, контроль, управление.

Введение. Кислородно-конвертерная плавка отличается сложностью физико-химических процессов, протекает с большой скоростью и при высокой температуре, характеризуется многорежимностью функционирования и большой размерностью решаемых задач, наличием нестационарных и взаимно коррелированных шумов и помех измерения, имеет существенный дрейф рабочих параметров.

Одним из методов повышения эффективности конвертерного производства является его автоматизация. В системах автоматизации важную роль играет контроль акустических характеристик процессов, происходящих в ванне, путем контроля параметров отходящих газов и вибраций оборудования. Многие исследования были направлены на установление связи между упомянутыми характеристиками и основными параметрами процесса: скоростью обезуглероживания [1], уровня [2] и температуры ванны [3], шлакообразования [4]. При этом исследования проводились на различных частотах, которые, как правило, выбирались

исследователями интуитивно. До настоящего времени природа волнообразования в ванне конвертера изучена недостаточно.

Исследования, представленные в статье, проводились в НТУУ „Киевский политехнический институт” по темам „Принципы создания математической модели системы управления кислородным конвертером” и „Математические модели и алгоритмы системы управления кислородным конвертером”, Государственные регистрационные номера 0109U001838 и 0110U002880.

Целью исследований является изучение процессов волнообразования в ванне конвертера с целью нахождения зависимостей между ними и акустическими параметрами отходящих газов и вибраций оборудования конвертера.

Результаты исследований. При перемещении идеальной жидкости в сосуде единственной силой является сила тяжести. Движение сплошной среды в поле гравитации является потенциальным. Известно, что всякая система, находящаяся в силовом потенциальном поле, склонна к свободным колебаниям. Возможные частоты колебаний жидкости обуславливает форма сосуда.

Рассмотрим задачу о нахождении собственных частот свободных колебаний жидкости в неподвижном вертикальном сосуде с плоским дном при ее потенциальном волновом движении. Эта постановка сводится к решению краевой задачи на собственные значения [5]. Принимаем, что колебания жидкости – смещения малой амплитуды, которые можно описать линеаризованным уравнением гидродинамики с использованием аппарата линейных интегральных уравнений.

Введем прямоугольную систему координат X , Y и Z . Плоскость XU совпадает с зеркалом свободной поверхности жидкости в положении равновесия, а ось Z направлена против вектора ускорения свободного падения g , модуль которого $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ (рис. 1).

В краевую задачу входит уравнение Лапласа в плоскости XU , физически интерпретирующее условие постоянства давления на свободной площади поверхности жидкости,

$$\nabla_{x,y}\chi|_{z=0} + \mathfrak{T}^2\chi|_{z=0} = 0 \quad (1)$$

при условии неразрывности рабочего тела $\mathbf{div}W = 0$ и граничном условии непротекания через смоченную площадь поверхности $\partial\chi/\partial N = 0$,

где $\chi|_{z=0}$, \mathfrak{T} – собственная функция и собственное значение краевой задачи; N – нормаль к ограничивающей жидкость поверхности, W – конвективный член продольного компонента скорости потока капельной жидкости в вертикальной трубе.

Решение имеет бесчисленное множество осциллирующих во времени функционалов потенциала скорости ψ :

$$\psi = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n = \sum_{n=1}^{\infty} \chi_n|_{z=0} \text{ch } \mathfrak{T}_n \times (Z/l) \cos \omega_n \tau, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, \dots, \infty$ – натуральный ряд положительных чисел, соответствующих номерам главных колебаний n -го порядка; $\chi_n|_{z=0}$ – собственная функция главного поверхностного колебания рабочего тела n -го порядка, образующая дискретную неограниченно возрастающую последовательность; \mathfrak{T}_n – собственное значение краевой задачи n -го порядка; l – характерный поперечный размер сосуда (для круговой цилиндрической емкости – радиус зеркала свободной поверхности), м; $\omega_n = 2\pi f_n$ – круговая частота колебаний n -й главной гармоники, Гц.

Начальные собственные числа задачи для сосуда, например, в форме кругового цилиндра имеют следующие значения:

n	1	2	3
\mathfrak{T}_n	1,8414	3,0539	4,2015

Круговая частота собственных колебаний связана с собственным значением задачи кругового цилиндра равенством

$$\sigma_n = +\sqrt{[2g\mathfrak{J}_n th(2\mathfrak{J}_n h/d)]/d}, \quad (3)$$

где h глубина жидкости, м.

Таким образом, колеблющаяся жидкость теоретически имеет бесконечный спектр собственных частот, однозначно определяемый собственными числами краевой задачи и геометрией ванны (относительной глубиной). Каждому значению n соответствует своя форма продольных колебаний жидкости: при $n = 1$ по диаметру сосуда укладывается одна полуволна, при $n = 2$ – две полуволны и т.д. Волны нечетных индексов смещают центр тяжести жидкости от вертикальной оси. При этом зависящее от этих волн движение жидкости оказывает воздействие на стенку сосуда. Волны же четных индексов, симметричные относительно оси цилиндра, не перемещают центр тяжести жидкости в горизонтальном направлении, вследствие чего они не оказывают воздействия на стенку. Собственные нечетные колебания жидкости приводят к образованию соответствующих волн, которые воздействуют на стенку сосуда, вызывая ее перемещение или реакцию.

Рассмотрим возможность использования теории собственных колебаний жидкости в сосуде применительно к конвертеру. В статье [6] определено влияние на значение ω_n отличия формы рабочего пространства конвертера от цилиндрической (нижняя и верхняя части конвертера представляют собой усеченный конус). Поправка оказалась равной 1% и ею можно пренебречь. Следовательно, значения собственных частот для конвертерной ванны могут быть рассчитаны по соотношениям для кругового цилиндра, равного большему диаметру усеченного конуса.

По ходу продувки при переходе ею в режим затопленной струи значение глубины конвертерной ванны приближается к диаметру рабочего пространства ($h/d \rightarrow 1$). Анализ показывает, что при вычислении первой собственной частоты колебаний ванны (основной тон), глубина которой даже в два раза меньше ширины зеркала свободной поверхности, приближенная формула

$$\sigma_n = +\sqrt{2g\mathfrak{Z}_n / d} \quad (4)$$

по сравнению с точной (3) дает погрешность 4 %.

Теоретически доказано, что наклон касательной к профилю волны никогда не превосходит значения $\pi/6$. Амплитуды свободных колебаний жидкости в ограниченном объеме не могут превосходить предельного, соответствующего основному тону, значения так называемой амплитуды Стокса $A_{ст}=(d/2)\text{tg } \pi/6 = 0,29$, м.

Таким образом, как резонатор Гельмгольца конвертер обуславливает свободные колебания ванны, модулируя в ней теоретически бесконечно большой спектр частот. В режиме свободных колебаний ванна ведет себя как линейный осциллятор.

Согласно теории турбулентности Л.Д.Ландау движению сплошной среды в автомодельной области сопутствуют монотонная и пульсационные составляющие скорости потока [7], которые являются ответственными за колебания параметров. Соотношение этих компонентов скорости обуславливает масштаб развития волнообразования в рабочем теле [8].

Колебательный характер процессов в ванне вызывается также установленным нами нестационарным характером истечения окислителя [9]. Интенсификация массо- и теплообменных процессов в ванне ускорилась внедрением многосопловых фурм с лавалевским профилем, реализующих рассредоточенное истечение газовых струй со сверхзвуковой скоростью. Таким струям присуща сплошная ударно-волновая структура истечения, характеризующаяся возникновением скачков уплотнения и областей разрежения. Кроме того, колебание расхода кислородного дутья обуславливает работу сопел в нерасчетном режиме, при котором продувка ванны осуществляется струями с неупорядоченной аэрогидродинамикой.

Как показано в [10], вытекающая в режиме заглубления со сверхзвуковой скоростью струя испытывает на расстоянии в 10...13 калибров

чередующиеся во времени разрежения и сжатия, т.е. пульсации, передающиеся жидкой фазе.

Постулируем, что рассматриваемый объект – линейная система с малыми колебаниями, для которой справедлив принцип суперпозиции: мгновенную (абсолютную) скорость потока ванны можно представить как сумму медленно изменяющейся монотонной (переносной) скорости и бесконечного спектра пульсационных (относительных) составляющих скоростей. Двигаясь вдоль линии тока, частицы ванны на фоне монотонного изменения параметров вызывают вынужденные затухающие колебания с бесконечным спектром возрастающих частот и соответственно уменьшающихся амплитуд скорости вынужденной конвекции потока (рис. 2).

Экспериментально частоту колебаний параметров ванны наиболее достоверно можно определить по частоте колебаний фурмы в период продувки с заглубленной струей, когда протекает активное обезуглероживание в квазиустановившемся режиме. Контактруя непосредственно с ванной, фурма как индикатор воспринимает возмущение от динамических нагрузок пульсирующих потоков, которые обуславливают ее реакцию в виде колебаний относительно точки закрепления. Эта экспериментальная амплитудно-частотная характеристика фурмы практически соответствует первой главной гармонике вынужденных колебаний ванны, так как почти вся энергия пульсационного движения последней заключена в частоте, отвечающей основному тону.

Колебания фурмы измеряли датчиком ускорения ДУ-5С, соединенным с генераторно-усилительным блоком ВИБ-6ТН, к выходу которого подсоединяли измеритель тока Н-390. В начале (до пятой минуты) и в конце (с 17-й минуты) процесса, когда продувка проходит в режиме открытой струи, колебания фурмы происходят с повышенной амплитудой и малой частотой. По мере затопления фурмы металло-шлако-газовой эмульсией участки фурмы по высоте оказываются под действием

разнонаправленных потоков, которые повышают частоту и снижают амплитуду колебаний до стабильных значений соответственно 4...5 Гц и 4...6 мм. Амплитуды вынужденных колебаний определяем по их доле от соответствующих значений монотонных составляющих параметров ванны. Эту долю находим по данным исследований [8] как функцию гидродинамического режима, зависящего от конвективного члена W . Для случая развитой турбулентности средняя по сечению трубы относительная амплитуда (мера пульсаций) составляет $\varepsilon = W_1/W = 0,08$, где W_1 – амплитуда первой главной гармоники скорости потока, м/с.

Гидродинамическое пульсирующее возмущение бесконечного спектра скоростей в каждой точке реагирующего потока вызывает соответствующие спектры вынужденных колебаний термодинамических и теплофизических параметров рабочего тела.

Рассмотрим перенос кислорода и теплоты от волнового точечного источника в одномерно движущейся эмульгированной конвертерной ванне. Задачу решаем в предположениях, принятых в технической теории колебаний. Считаем, что ванна, моделируемая полубесконечным неподвижным массивом, находится в потенциальном поле под действием гармонического воздействия. Процесс продолжается столь долго, что первоначальное воздействие на ванну теряет влияние на его ход, т.е. объект изохронен, а в математическом плане – задача без начальных условий для процесса, который перешел в квазиустановившееся состояние. Также из решения исключается режим собственных колебаний системы. Последнее допущение оправдано тем, что ванна после прекращения продувки практически переходит в неподвижное состояние.

Для формального математического описания периодических колебаний параметров ванны используем их спектральное разложение по отдельным гармоникам, основанное на бесконечных рядах Фурье. Считаем, что в процессах переноса массы и теплоты потенциал на границе изменяется по закону

$$\psi(\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{n*} \cos \omega_n \tau = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{1*} \exp[-\pi(n-1)h/d] \cos n \omega_1 \tau, \quad (5)$$

где $\psi \in O_n$, t_n ; O_n – пульсационная составляющая массовой доли кислорода в ванне, %; t_n – пульсационная составляющая температуры ванны, °С; τ – время, отсчитываемое от начала взаимодействия вдуваемого кислорода с ванной, с; ψ_{n*} – амплитуда колебаний n -й главной гармоники потенциала переноса ($\psi_{n*} \in O_{n*n}$, t_{n*n}): O_{n*n} – массовой доли кислорода в ванне, %; t_{n*n} – температуры ванны, °С; ψ_{1*} – амплитуда колебаний первой главной гармоники потенциала переноса ($\psi_{1*} \in O_{n*1}$, t_{n*1}): $O_{n*1} = O\varepsilon$ – массовой доли кислорода в ванне, %; $t_{n*1} = (t_{M.cp} - t_{Ч.cp})\varepsilon$ – температуры ванны, °С. Здесь O – массовая доля кислорода в ванне, обусловленная монотонной составляющей его расхода, %; ω_1 – круговая частота колебаний первой главной гармоники, рад/с.

В тяжелой и вязкой ванне из-за диссипативного эффекта вынужденные колебания параметров затухают. Ряд экспонент (5), содержащих функции косинуса, быстро сходится, причем тем быстрее, чем больше номер главного колебания. С достаточной для практики точностью приближения можно пренебречь всеми членами ряда, кроме первого [11]:

$$\psi(\tau) = \psi_{1*} \cos \omega_1 \tau. \quad (6)$$

Обобщенное решение одномерного уравнения переноса (для массопереноса – это второй закон Фика)

$$\partial \psi(X_*, \tau) / \partial \tau = \mathfrak{I}[\partial^2 \psi(X_*, \tau) / \partial X_*^2 + (2F + 1) X_*^{-1} \partial \psi(X_*, \tau) / \partial X_*] \quad (7)$$

в смоделированной лагранжевой системе координат неподвижной среде при колебательном граничном условии третьего рода

$$\partial \psi(O, \tau) / \partial X_* = H[\psi_{1*} \cos \omega_1 \tau - \psi(O, \tau)], \quad (8)$$

где X_* – подвижная координата в направлении поступательного потока ванны, м; F – коэффициент формы [12], для тел классической формы представляет собой бесконечную сумму функциональных рядов

$$\psi(X_*, \tau) = \psi_{1*} \{0,5[N_i \exp(iPdFo) + N_i \exp(iPdFo)] -$$

$$-\sum_{n=1}^{\infty} \mu_n^2 / (\mu_n^4 + \text{Pd}^2) A_n \Phi(\mu_n X_*/h) \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}) \}. \quad (9)$$

Здесь $N_i, N_{.i}$ – функционалы; $i = \sqrt{-1}$; Pd, Fo – соответственно критерии Предводителя и Фурье ($\text{Pd} \in \text{Pd}_m, \text{Pd}_t$; $\text{Fo} \in \text{Fo}_m, \text{Fo}_t$); $\text{Pd}_m = \omega_1 h^2 / D$ – массообменный и Pd_t – теплообменный критерии Предводителя; $\text{Fo}_m = D\tau/h^2$ – массообменный и $\text{Fo}_t = a\tau/h^2$ – теплообменный критерии Фурье; $\mu_n = f(\text{Bi})$ – корни характеристических уравнений, причем как вытекает из анализа решения, $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3 < \dots < \mu_\infty$; Bi – критерий Био ($\text{Bi} \in \text{Bi}_{эм}, \text{Bi}_t$); $\text{Bi}_{эм} = H_{эм}h$ – эффективный массообменный и $\text{Bi}_t = H_t h$ – теплообменный; A_n – начальные амплитуды, зависящие от геометрической формы тела; $\Phi(\mu_n X_*/h)$ – функции, учитывающие пространственное изменение параметра.

Функционалы решения волновых краевых задач для тел разной формы приведены в [13], где подобраны и обобщены все варианты.

Уравнение (9) показывает, что массовая доля кислорода в ванне и ее температура, возмущенные пульсационной составляющей скорости потока, – периодическая функция времени. Наиболее представительным в метрологическом плане является основной тон, которому соответствует самое низкочастотное колебание первой главной гармоники ($n = 1$), так как с возрастанием n в силу упомянутого неравенства каждый последующий член ряда и значение A_n при достаточно большом критерии Fo будут исчезающе малыми по сравнению с предыдущими, а сумма корней будет отличаться лишь на малую величину от значения первого члена. Как показали расчеты, этому условию удовлетворяет время начала заглубления струи, отсчитываемое от начала продувки. Результат решения в виде бесконечного ряда (9) с погрешностью не более 0,25 % можно ограничить первым членом [11].

Известно, что для затухающих колебаний рабочего тела амплитуда волны убывает на протяжении одного пространственного периода, т.е. длины волны L , в $e^{2\pi} = 535$ раз. Амплитуда первой главной гармоники

скорости потока конвертерной ванны $W_1 = 1,53 \cdot 0,08 = 0,122$ м/с до исчезающе малого значения $0,122/535 = 0,00023$ м/с затухает на расстоянии длины волны первой гармоники $L_1 = W_1/f_1 = 0,122/4,5 = 0,027$ м, принятой за геометрический масштаб движения среды. Согласно граничному условию $0,5L_1 \leq h$ пульсирующий поток ванны относится к объектам с коротковолновыми колебаниями, глубинный фронт распространения которых охватывает лишь область порядка длины волны. Это подтверждает, что ванну можно принять в виде полуограниченной геометрической модели.

Коротковолновые колебания могут быть как резонансными, так и нерезонансными [14]. Решение искомого поля в наиболее простой форме плоского затухающего гармонического волнового процесса получаем из уравнения (9) для случая неограниченной пластины, производя замену переменной X_* на $X - h$, м, и полагая $h \rightarrow \infty$ [11]

$$\psi(X, \tau) = \psi_1 \cdot \theta_1 \exp(-Pd_X / \sqrt{2}) \cos(\omega_1 \tau - Pd_X / \sqrt{2} - \theta_2), \quad (10)$$

где $\theta_1 = 1 / \sqrt{1 + 1/Vi_*^2 + \sqrt{2}/Vi_*}$ – амплитудный множитель. Здесь Vi_* – характерный для квазиустановившегося периодического состояния системы модифицированный критерий Био ($Vi_* \in Vi_{*эм}, Vi_{*т}$): $Vi_{*эм} = \sqrt{a/\varpi_1} H_{эм}$ – массообменный и $Vi_{*т} = \sqrt{\lambda/(c r \varpi_1)} H_{т}$ – теплообменный; Pd_X – критерий Предводителя, варьируемый по пространственной координате X ($Pd_X \in Pd_{Xм}, Pd_{Xт}$): $Pd_{Xм} = \omega_1 X^2/d$ – массообменный и $Pd_{Xт} = \omega_1 X^2/a$ – теплообменный; $\theta_2 = \arctg 1/(1 + \sqrt{2} Vi_*)$ – начальная фаза колебаний.

Вынужденные колебания параметров ванны как диссипативной системы происходят с частотой гармонического возмущающего воздействия, но с отставанием по фазе. Из анализа фазы волны выражения (10) вытекает, что колебания параметров на глубине X запаздывают на время $Pd_X / (\sqrt{2} \omega_1)$, с. С возрастанием частоты сдвиг по фазе увеличивается.

Рассмотрим для конвертерной ванны характеристики колеблющихся параметров в потоке согласно классификации [14]. В зависимости от числа Маха $M = W_1/W_{зв}$, где $W_{зв} = d/\delta\tau = 2380$ – местная скорость звука, м/с; $\delta\tau = 2,1 \cdot 10^{-3}$ – продолжительность времени прохождения звуком расстояния d , с, для рассматриваемого объекта ($M = 0,00005$) характерны акустические колебания с малой амплитудой, область которых определяется $M \leq 0,001$.

Считаем, что при $Vi_{*T} = \sqrt{10/(880 \cdot 3500 \cdot 2\pi \cdot 4,5)} \cdot 15200/10 = 0,52 \geq 0,01$ тепловые колебания являются низкочастотными. Конвертерная ванна вследствие тепловой инерции не реагирует на колебания теплового потока и температуры, что иллюстрируется характером показаний датчика термоэлектрического пирометра, непрерывно контролирующего температуру расплава. Пирометр откликается только на изменение инерционной монотонной составляющей температурного поля и практически не реагирует на пульсации [15].

Выводы

1. Установлено, что массовая доля кислорода в ванне и ее температура, возмущенные пульсационной составляющей скорости потока, – периодическая функция времени. Наиболее представительным в метрологическом плане является основной тон, которому соответствует самое низкочастотное колебание первой главной гармоники.

2. Вынужденные колебания параметров ванны как диссипативной системы происходят с частотой гармонического возмущающего воздействия, но с отставанием по фазе.

3. Конвертерная ванна вследствие тепловой инерции не реагирует на колебания теплового потока и температуры, что иллюстрируется характером показаний датчика термоэлектрического пирометра, непрерывно контролирующего температуру расплава. Пирометр откликается только на изменение инерционной монотонной составляющей температурного поля и практически не реагирует на пульсации.

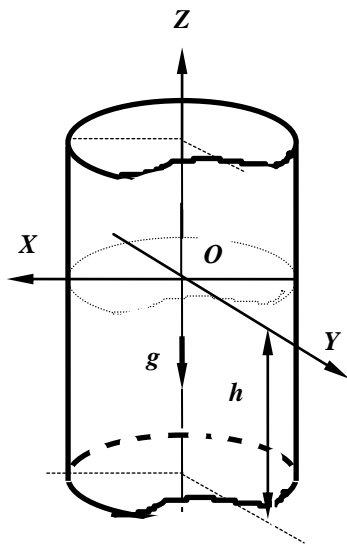
4. Дальнейшие исследования акустических и вибрационных характеристик процесса в области низкочастотных колебаний будут проводиться в направлении включения этих параметров в модель управления конвертерной плавкой [17].

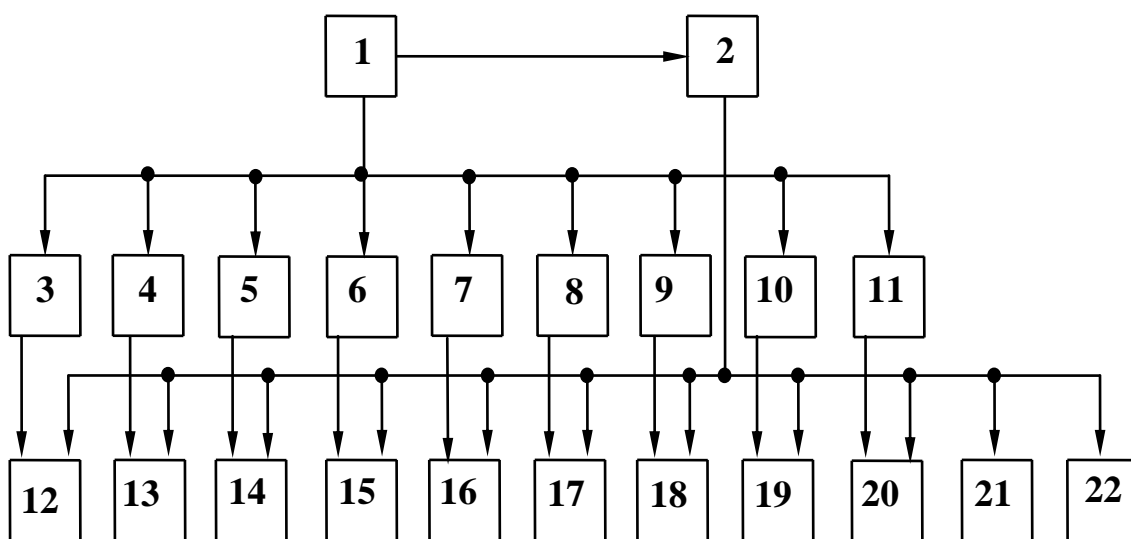
Литература

5. *Моисеев Н.Н., Петров А.А.* Численные методы расчета собственных частот колебаний ограниченного объема жидкости. – М.: ВЦ АН СССР, 1966. – 270 с.
6. *Носков А.С.* Волновое движение жидкости в ванне конвертера // *Металлургическая теплотехника: тематический отраслевой сборник МЧМ СССР.* – М.: Metallurgiya, 1974. – № 3. – С. 48 – 50.
7. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Механика сплошных сред. – М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1953. – 788 с.
8. *Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е.* Теплообмен волны в газожидкостных системах. – Новосибирск: Наука, 1984. – 302 с.
9. *Богушевский В.С., Сорокин Н.А., Церковницкий Н.С.* Контроль обезуглероживания и шлакообразования кислородно-конвертерной плавки по амплитудно-частотным характеристикам газовой фазы // *Изв. АН СССР. Металлы.* – 1990. № 6. – С. 15 – 20.
10. *Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С.:* Підручник / Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія). – Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.
11. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
12. *Гольфарб Э.М.* Теплотехника металлургических процессов. – М.: Metallurgiya, 1967. – 440 с.
13. *Богушевский В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А.* Основы математического описания технологических процессов конвертерного

производства стали. – К.: НПО „Киевский институт автоматики”, 1992. – 168 с.

14. *Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Якуша Е.В.* Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. – М.: Машиностроение, 1977. – 256 с.
15. Измерение температуры металла по ходу плавки в конвертере с верхней подачей кислорода / В.С.Кочо, В.И.Лапицкий, Л.Д.Пайзанский и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1964. – № 2. – С. 28 – 31.
16. *Богущевский В.С., Рюмишн Н.А., Сорокин Н.А.* АСУТП производства стали в конвертерах. – К.: „Техніка”, 1991. – 180 с.
- 17.





Список подрисуночных надписей

к статье Богушевского В.С. и др. „Волнообразование в ванне конвертера как источник акустических колебаний выходных параметров”.

Рис. 1. Геометрическая интерпретация условий однозначности задачи о свободных колебаниях жидкости в неподвижном вертикальном сосуде с плоским дном.

Рис. 2. Структурная схема процессов в конвертере вследствие гидродинамического возмущения ванны в режиме развитой турбулентности, вызванного механико-химическим воздействием кислорода при продувке: 1, 2 (первым числом обозначено монотонное изменение параметра, вторым колебательное); смещения – 3, 12; ускорения – 4, 13; давления – 5, 14; плотности – 6, 15; расхода – 7, 6; газовыделения – 8, 17 (акустические и излучательные колебательные параметры газовыделения рассмотрены нами в работе [16]); массовых долей компонентов – 9, 18; тепловыделения – 10, 19; температуры – 11, 20; колебания фурмы – 21 и конвертера – 22.

Розглянуто процес хвилеутворення у ванні конвертера на математичній моделі переміщення ідеальної рідини в циліндричній посудині. Досліджено переніс кисню і теплоти від хвильового точечного джерела в емульгованій конвертерній ванні, що одномірно рухається. Установлені характеристики частотного спектра зміни основних вихідних параметрів процесу.

Ключові слова: конвертер, хвилеутворення, акустичні характеристики, контроль, управління.

Анотацію на англійській мові