

ратуру жидкого шлака в горне. Расчётная температура жидкого шлака в горне, которую в данной работе предложено именовать теоретической, изменялась в интервале 1562-1587 °С, что было на 53-72 °С измеренных температур жидкого чугуна на выпусках из доменной печи. Для прогноза качества выплавляемого чугуна и анализа причин колебания его сернистости разработаны методы моделирования [10] и пофакторного анализа.

Таким образом, можно заключить, что термодинамические расчеты по такой методике позволяют определить равновесные концентрации серы в металлической фазе в виде раствора с жидким железом и в шлаковой фазе в форме сульфидов железа, марганца, кальция и магния, а также состав газовой фазы над этими конденсированными фазами. Для сглаживания неравномерности распределения температуры шлака в объеме горна и характеристики температурного уровня процесса десульфурации чугуна шлаком в печи предложено понятие теоретической температуры шлака в горне.

Список литературы

1. **Воловик Г.А.** Сера в доменной шихте и борьба с ней при выплавке чугуна: Дисс... докт. техн. наук. - Т. 1. – Днепропетровск: ДМетИ, 1965г. - 314 с.
2. **Воловик Г.А.** Сера в доменной шихте и борьба с ней при выплавке чугуна: Дисс... докт. техн. наук. - Т. 2. – Днепропетровск: ДМетИ, 1965г. - 217 с.
3. **Куликов И.С.** Десульфурация чугуна. - М.: Металлургиздат, 1962. - 306 с.
4. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов // **Г.Б. Сиярев, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев.** - М.: Наука, 1982. - 263 с.
5. **Трусов Б.Г.** Термодинамический метод анализа высокотемпературных состояний и процессов и его практическая реализация: Дисс... докт. техн. наук. - М.: МГТУ, 1984. - 292 с.
6. **Ревенко А.В., Ивашенко В.П.** Распределение серы между компонентами жидкого чугуна и шлака в доменной печи // Теория и практика металлургии, 2002. - № 4. - С. 3-10.
7. **Taylor J., Stobo J.J.** The Sulphur Distribution Reaction between Blast-Furnace Slag and Metal // Journal of the Iron and Steel Institute. - London, 1954. - Vol. 178. - Part 4. - P. 360-367.
8. **Ревенко А.В., Ивашенко В.П.** Распределение остаточной серы шихты между жидким чугуном и шлаком в доменной печи // Теория и практика металлургии. - 2003. - №2. - С.18-21.
9. **Ревенко А.В.** Оценка показателей поведения серы в доменной печи объемом 5000 м³ // «Сталь», 2009. - №2. - С.9-14.
10. **Ревенко А.В., Ревенко О.А.** Моделирование содержания серы в чугуне // В кн.: VI Міжнародна конференція «Стратегія якості у промисловості і освіті» (4-11 червня 2010 р., Варна, Болгарія): Матеріали у 4 томах. Том 1 (Ч1). – Дніпропетровськ - Варна, 2010. - С.461-464.

Рукопись поступила в редакцию 24.02.12

УДК 621.926: 34.16

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Н.С. ПОДГОРОДЕЦКИЙ, канд. техн. наук, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Изложены результаты анализа возможности использования технологии фазированных решеток для построения систем контроля и диагностики на основе высокоэнергетического ультразвука.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, фазированная решетка.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Непрерывное повышение требований к надежности и безопасности работы технологического оборудования, состояния зданий и сооружений предопределяет широкое применение физических методов и приборов ультразвукового неразрушающего контроля. Ультразвуковой контроль отличается многообразием методов, типов применяемых волн, широким диапазоном частот. Перспективным направлением дальнейшего развития методов ультразвукового контроля является технология ультразвуковых фазированных решеток.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время известны различные способы фокусирования ультразвука, основанные на применении одиночных фокусирующих преобразователей [1,2], линз [3], а также фазированных решеток [4-7]. На практике давно используется простой и относительно дешевый метод, основанный на применении одиночных фокусирующих преобразователей с поверхностью в виде части сферической оболочки и с непрерывным распределением коле-

бательной скорости по поверхности излучателя [1,2]. Однако существенным недостатком подобных фокусирующих систем является их фиксированное фокусное расстояние.

При использовании метода фазированных решеток генерируется ультразвуковой луч с настраиваемыми углом ввода, фокусным расстоянием и размером фокусного пятна. При этом также можно настроить генерирование луча в разных секторах фазированной решетки. Эти функции открывают целый ряд новых возможностей. Например, можно быстро изменить параметры угла и направление сканирования не передвигая датчик. Таким образом, эта технология заменяет собой целую гамму датчиков, а также некоторые механические компоненты.

Главная особенность технологии ультразвуковых фазированных решеток - управляемые компьютерной программой амплитуда и фаза импульсов возбуждения отдельных пьезоэлементов в многоэлементном преобразователе. Возбуждение пьезоэлементов осуществляется таким образом, чтобы управлять параметрами ультразвукового луча: углом, фокусным расстоянием, размером фокусного пятна и т.д. В настоящее время могут быть изготовлены решетки, которые содержат до 1024 элементов, на частоту от 1 до 18 МГц, с активной матрицей 8×8 мм, сопряженной с металлом, призмой или водой, и с соединительным кабелем до 100 м длиной [7]. В лаборатории акустики Парижского университета разработано программное обеспечение PASS (Phased Array Simulation Software), которое используется для визуализации конструкции преобразователя, расчета фокальных законов и параметров луча, программирования параметров преобразователя и схем контроля. Результаты расчетов, сохраненные в файлах формата *.mnp могут быть прочитаны в программе TomoView фирмы R/D Tech [6].

Цель исследований. Исследовать возможность использования технологии фазированных решеток для построения систем контроля и диагностики на основе высокоэнергетического ультразвука.

Изложение материала и результаты. Для того, чтобы создать луч под требуемым углом и требуемой фокусировкой, отдельные элементы возбуждаются в заданные расчетные моменты времени. Как показано на рис. 1, сигнал от определенной точки приходит на отдельные элементы преобразователя в различные моменты времени, которые предварительно рассчитываются [7].

На рис. 2 приведен пример фокусирования ультразвуковых полей двумерным матричным преобразователем [6]

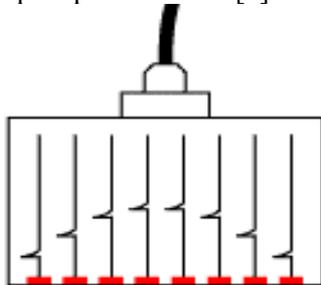


Рис. 1. Схема функционирования ультразвукового преобразователя на основе фазированной решетки

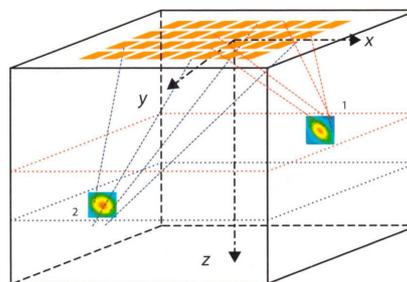


Рис. 2. Эллиптическая фокусировка прямоугольной двумерной матрицей пространственных координатах

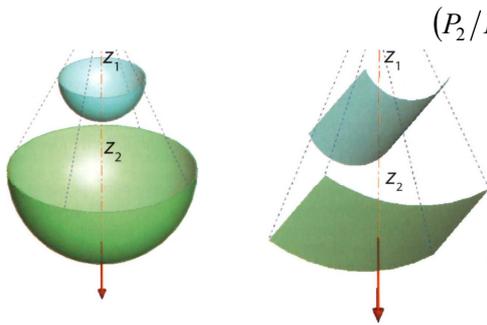
При излучении генератор импульсов синхронизации посылает синхроимпульс на блок фазовых задержек. Последний генерирует импульс высокого напряжения заданной длительности и с заданной задержкой, определенной фокальным законом. На каждый элемент решетки поступает один задержанный импульс. Сумма волн, излученных каждым элементом представляет собой луч, распространяющийся под определенным углом и сфокусированный на определенном расстоянии. При приеме сигнал принимается каждым элементом решетки, затем задерживается во времени в соответствии с заданным фокальным законом. Задержанные импульсы суммируются и формируют единый импульс, который поступает в устройства приемного тракта.

Волновой фронт (поверхность равной фазы) ультразвукового сигнала может иметь сферическую или цилиндрическую форму (рис. 3) [6].

Звуковое давление в определенной точке сферической волны зависит от пройденного расстояния по следующему закону

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{\text{spherical waves}} = z_2/z_1. \quad (1)$$

Звуковое давление в цилиндрической волне является следующей функцией расстояния



$$(P_2/P_1)_{\text{cylindrical waves}} = (z_2/z_1)^{0.5} \tag{2}$$

Рис. 3. Распространение сферической (от точечного источника) или цилиндрической (от линейного источника) волны

Распределение комплексного звукового давления плоского элемента в виде диска может определяться с помощью метода точечного источника, в котором излучающая поверхность диска представлена в виде набора многих элементарных излучателей. Предполагая радиальную симметрию элемента, его трехмерное акустическое поле может быть найдено путем расчета ком-

плексного давления $P(r_s, z_s)$ в плоскости, как функция расстояния в осевом направлении z_s и в радиальном направлении r_s согласно выражению [5]

$$P(r_s, z_s) = \frac{j\rho c k u_0 \Delta A}{2\pi} \sum_{\text{surface}} \frac{e^{-(\alpha + jk)R}}{R}, \tag{3}$$

где ρ - плотность среды; c - скорость звука в среде; k - волновое число; u_0 - колебательная скорость на поверхности элементарных излучателей; ΔA - площадь элементарного излучателя; α - коэффициент затухания в среде и R - расстояние от центра элементарного излучателя до точки (r_s, z_s) , где рассчитывается поле.

Важной процедурой ультразвукового контроля является определение аналитических выражений плоскости сканирования в виде центральной проекции объекта контроля. Будем использовать для этого подход, приведенный в работе [8]. Рассмотрим построение центральной проекции точки $\vec{R}(R_x, R_y, R_z)$ на заданную плоскость Σ . Центр проектирования $\vec{C}(C_x, C_y, C_z)$ будем считать заданным.

Для решения рассматриваемой задачи будем полагать, что плоскость Σ определяется точкой $\vec{O}(O_x, O_y, O_z)$ и двумя векторами $\vec{\eta}_1$ и $\vec{\eta}_2$. Будем считать, что эти векторы являются единичными и ортогональными. Если точка \vec{R}_i является центральной проекцией точки \vec{R} на плоскость Σ , то

$$\begin{cases} (\vec{R}_i - \vec{O}) \cdot [\vec{\eta}_1 \cdot \vec{\eta}_2] = 0 \\ (\vec{R}_i - \vec{C}) \cdot (\vec{R} - \vec{C}) = \vec{o} \end{cases}, \tag{4}$$

где \vec{o} - нулевой вектор.

Рассмотрим поверхность, заданную в параметрическом виде $\vec{R} = \vec{R}(u, v)$. Для определения центральной проекции поверхности необходимо построить касательную коническую поверхность с вершиной в точке \vec{C} и найти линию ее пересечения с плоскостью Σ . Система, которая позволяет построить контур центральной проекции пространственного объекта на заданную плоскость Σ имеет следующее аналитическое выражение

$$\begin{cases} (\vec{R}_i - \vec{O}) \cdot [\vec{\eta}_1 \cdot \vec{\eta}_2] = 0 \\ (\vec{R}_i - \vec{C}) \cdot (\vec{R} - \vec{C}) = \vec{o} \\ (\vec{R} - \vec{C}) \cdot (\vec{R}_u - \vec{C}_i) = 0 \end{cases}, \tag{5}$$

где \vec{R} - точка, принадлежащая поверхности $\vec{R} = \vec{R}(u, v)$.

Используя тот факт, что векторы $\vec{R}_i - \vec{C}$ и $\vec{R} - \vec{C}$ отличаются только на масштабный множитель, получим

$$\vec{R}_i = \vec{C} + \frac{(\vec{O} - \vec{C}) \cdot [\vec{\eta}_1 \cdot \vec{\eta}_2]}{(\vec{R} - \vec{C}) \cdot [\vec{\eta}_1 \cdot \vec{\eta}_2]} \cdot \vec{R} - \vec{C}. \tag{6}$$

Уравнения контура плоской проекции пространственного объекта, записаны в трехмерной пространственной системе координат. Они могут быть преобразованы в систему координат на плоскости Σ следующим образом

$$\begin{cases} \bar{x} = (\bar{R}_i - \bar{O}) \cdot \bar{n}_1 \\ \bar{y} = (\bar{R}_i - \bar{O}) \cdot \bar{n}_2 \end{cases} \quad (7)$$

Приведенный подход позволяет получить аналитическое выражение произвольной плоскости сканирования пространственного объекта и выполнить его анализ сфокусированным должным образом ультразвуковым лучом.

Для сканирования объектов с большим коэффициентом затухания необходимо использовать высокоэнергетический ультразвук. Интенсивные волны обладают рядом особенностей, резко отличных от свойств волновых процессов малой интенсивности. Учет нелинейности выражений, лежащих в основе волнового уравнения, приводит к изменению формы колебаний в волне. Охарактеризовать эти изменения можно в рамках временного описания. При таком подходе определяются изменения, которые претерпевает заданная у излучателя гармоническая форма колебаний по мере распространения волны [9].

Поведение интенсивных пучков, наряду с дифракцией, определяется нелинейными эффектами, которые проявляются тем сильнее, чем больше амплитуда или интенсивность волны. Эти эффекты для ультразвуковых волн обусловлены нелинейностью уравнений гидродинамики, а также нелинейными свойствами среды, т.е. зависимостью отклика среды от амплитуды волны.

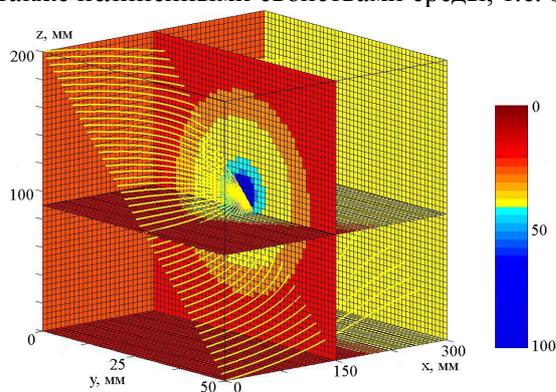


Рис. 4. Ступенчатая дискретизация интенсивности ультразвукового поля в пространственных координатах

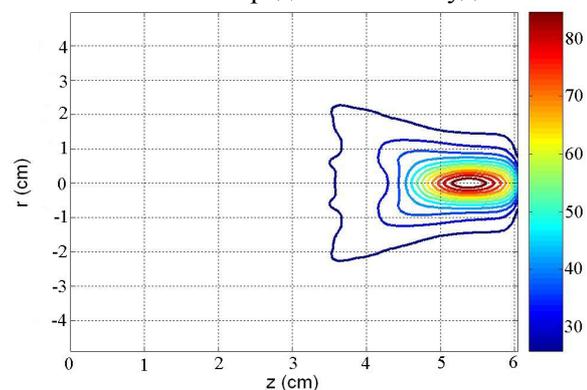


Рис. 5. Распределение мощности ультразвукового излучения на расстоянии z от излучателя

Числовые характеристики процесса фокусирования импульса высокоэнергетического ультразвука в контролируемой среде, формируемого при помощи технологии фазированной решетки, получены при помощи пакета HIFU Simulator v1.2 [10]. На рис. 4 показана ступенчатая дискретизация интенсивности ультразвукового поля в пространственных координатах, а на рис. 5 распределение мощности сфокусированного ультразвукового излучения на расстоянии z от излучателя.

Изложенный подход позволяет осуществить аналитическое конструирование систем контроля и диагностики протяженных пространственных объектов со сложной геометрией и большим коэффициентом затуханием ультразвуковых волн.

Вывод. Фазированные решетки имеют ряд преимуществ перед распространенными в настоящее время методами ультразвукового контроля: программное управление углом луча, фокальным расстоянием и размером электронного пятна, контроль одним многоэлементным датчиком под разными углами, большая гибкость в контроле объектов со сложной геометрией, высокоскоростное сканирование без механических приспособлений. Это позволяет существенно повысить качество и эффективность диагностических процедур.

Список литературы

1. Ермолов И.Н. и др. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля. М.: Машиностроение, 1986. - 280 с.
2. Розенберг Л.Д. Фокусирующие излучатели ультразвука. - В кн. // Физика и техника мощного ультразвука. М.: Наука, 1967. - С. 149-206.
3. Fry F.J. Intense focused ultrasound: Its production, effects and utilization, in Ultrasound: Its Application in Medicine and Biology, Part II, edited Fry F.J. New York: Elsevier, 1978. P. 689-736.
4. Hill C.R., ter Haar G.R. Review article: High intensity focused ultrasound - potential for cancer treatment // Br. J. Radiology. 1995. V. 68. № 816. P. 1296-1303.
5. Гаврилов Л.Р., Хэнд Дж. У. Двумерные фазированные ультразвуковые решетки для применения в хирургии: перемещение одиночного фокуса, акустический журнал, 2000, том 46. - С. 456-466.
6. Introduction to Ultrasonic Technology Applications. Advanced Practical NDT Series. - КЛП, R/D Tech, 2007 г. /Введение в технологию применения ультразвуковых фазированных решеток. - Перевод С.В. Реука, 2011 г. - Режим

доступа <http://defectoscopya.narod.ru>.

7. Фазированные решетки. Режим доступа <http://www.harfangveo.ru>.

8. Дубанов А.А. Построение центральной проекции объекта в среде программирования «Mathcad 2000-2001». – Электронный журнал «Прикладная геометрия», МГАИ. Вып. 4, № 6, 2002. - С. 55-59.

9. Хохлова В.А., Сапожников О.А., Пономарев А. Е., Руденко О. В. Численное моделирование нелинейных и дифракционных эффектов в звуковых пучках. - М.: Физический факультет МГУ, 2010, 32 с.

10. Sonesson J. HIFU Simulator v1.2. - Режим доступа <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30886-high-intensity-focused-ultrasound-simulator>.

Рукопись поступила в редакцию 15.03.12

УДК 622.272.3.01:536.24

О.Є. ЛАПШИН, д-р техн. наук, проф., А.А. НЕМЧЕНКО, В.А. КОНОВАЛЮК, кандидати техн. наук, доценти, Д.А. ЛАПШИНА, магістрант
ДВНЗ «Криворізький національний університет»

ТЕПЛО- МАСООБМІН МІЖ ВОДОЮ ШАХТНИХ ВОДОЗБІРНИКІВ І ПОВІТРЯМ

Наведено методику розрахунку тепло-масообміну між водою в шахтних водозбірниках і повітрям, а також проаналізовано вплив цього фактору на тепловий режим шахт.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Температура повітря в камерах водовідливу на глибоких горизонтах не рідко сягає за 30°C, що створює несприятливі умови праці.

Аналіз досліджень і публікацій. Незважаючи на велику кількість досліджень стосовно питань тепло-масообміну у виробках відносно великої довжини, для камеро подібних виробок це питання вирішено в недостатній мірі.

Викладення матеріалу та результати. Тепло-масообмін в гірничих виробках відбувається при наявності градієнта температури, або маси. Ці градієнти можуть бути позитивними, коли температура порід, чи поверхні води більша температури повітря, в інших випадках градієнти вважаються негативними. Температура оточуючих гірничу виробку порід залежить від глибини її залягання і величини геотермічної ступені, яка для Кривбасу в середньому складає 90 м.

Велике значення має також процес стиснення при опусканні повітря по подаючому стволу. Цей термодинамічний процес – політропний, але дуже близький до адіабатного ($n = 1,35$), тобто на 100 м глибини температура збільшується на 0,9°C. Якщо вважати, що глибина нейтрального шару для Кривбасу дорівнює 35 м а його температура 10,8°C, то температура порід на відповідній глибині буде дорівнювати, °C

$$t = t_{\text{нш}} + \frac{H - h_{\text{нш}}}{H_{\text{г}}}, \quad (1)$$

де $t_{\text{нш}}$ - температура нейтрального шару, °C; H - глибина, на якій визначається температура, м; $h_{\text{нш}}$ - глибина, на якій знаходиться нейтральний шар, м; $H_{\text{г}}$ - величина геотермічної ступені, м/°C.

Орієнтовно в Кривбасі на глибині 1000 м будемо мати таку температуру

$$t = 10,8 + \frac{1000 - 35}{90} = 10,8 + 10,7 = 21,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

а на глибині 1400 м температура порід складатиме 26°C. Якщо врахувати тепло адіабатного стиснення, то температура повітря буде вище: 26°C - на глибині 1000 м, а на глибині 1400 м – перевищуватиме 30°C.

Температура шахтної води залежить від того звідки вона надходить у водозбірник. Найбільш холодна вода із зони нейтрального шару (верхніх горизонтів), а з нижніх горизонтів найбільш тепла.

Температуру повітря у камероподібній виробці можливо визначити в загальному вигляді із параметричного рівняння

$$t = f(\tau, R, H, \lambda, \alpha, c, \rho, t_{\text{п}}), \quad (2)$$

де τ - час провітрювання, год; R - приведений радіус камеро подібної виробки, м; H - глибина центра виробки, м; λ - коефіцієнт теплопровідності, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$; α – коефіцієнт конвективного теплооб-