

# КОНТРОЛЬ УГЛЕРОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ОТХОДАХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА

© 2024 г. **Вадим Владимирович Мирошников\***, **Н.В. Гречишкина\*\***,  
**Неделько А.А. \*\*\***

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»,  
291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А

\*prorectormvv@mail.ru; \*\*natalisha.grech@mail.ru; \*\*\*aleksandernedelko@ua.ru

В процессе разработки технологии рециклинга углеродосодержащих отходов топливно-энергетического кластера с получением экологически безопасных материалов и продуктов для «зеленого» строительства необходимо осуществлять постоянный контроль углеродной составляющей. Количество остаточного углерода определяет режим технологического процесса рециклинга и, соответственно, качество получаемого строительного материала. Изотопные и рентгеновский методы контроля имеют ряд ограничений для непрерывного контроля углеродосодержащего материала в технологическом потоке. Поэтому перспективным методом контроля является электромагнитный метод, учитывая проводимость углеродной компоненты.

Расчет переменного магнитного поля базируется на системе уравнений Гельмгольца для комплексных векторов напряженности магнитного и электрического поля [1]. При численном расчете параметров зондирующего электромагнитного поля введем один векторный и один скалярный источник. Примем  $\vec{i} = n \cdot \vec{H}$  – вектор плотности простого слоя электрического тока и  $\sigma = n \cdot \vec{H}$  – плотность простого слоя магнитных зарядов. Таким образом уравнения Гельмгольца преобразуются в систему сингулярных уравнений 2-го рода:

$$\begin{aligned} \frac{\vec{i}(Q)}{2} + \vec{n} \cdot \text{rot} \oint_S \vec{i}(P) \dot{g}_H dS_P + \vec{n} \cdot \text{grad} \oint_S \frac{\dot{\sigma}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P &= \vec{n} \cdot \vec{H}_B(Q), \\ \frac{\vec{\sigma}(Q)}{2} + \mu_r \vec{n} \cdot \text{rot} \oint_S \vec{i}(P) \dot{g}_H dS_P + \vec{n} \cdot \text{grad} \oint_S \frac{\dot{\sigma}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P &= \vec{n} \cdot \vec{H}_B(Q), \end{aligned}$$

$\dot{g}_H = \frac{e^{-jk r_{QP}}}{4\pi r_{QP}}$  – фундаментальная функция Грина, определяющая поле точечного источника в проводящей среде.

Данная система уравнений имеет единственное решение [2]:

$$\vec{H}_B(Q) = -\frac{1}{4\pi} \text{grad} \oint_S \frac{\dot{\sigma}(P)}{r_{QP}} dS_P + \vec{H}_B,$$

определяющее напряженность поля вне проводящего объекта, содержащего углеродную компоненту.

Для измерения переменного магнитного поля  $H_0 = H_0 \sin \omega t$  на поверхности контролируемого материала применяем двухстержневые феррозонды. Расчет феррозонда ведем при следующих допущениях: не учитываются вихревые токи в тонких сердечниках из аморфного железа; источник тока питает обмотку возбуждения; межвитковые емкости не учитываются.

Используя арктангенсную [3] аппроксимацию петли гистерезиса сердечника, и выбирая оптимальное значение напряженности возбуждения  $H_m = \sqrt{2}H_S$  [4], дифференциальная магнитная проницаемость сердечников будет равна:

$$\mu_d(H) = \frac{\mu_m}{1 + 5 \sin^2(\omega t)}.$$

Выходное напряжение феррозонда при измерении переменного магнитного поля:

$$U_2(t) = W_2 \cdot S \cdot \mu_0 \mu_m H_{0m} \frac{d}{dt} \cdot \frac{\sin(\omega_0 t)}{1 + 5 \sin^2(\omega_0 t)},$$

а функция преобразования

$$K(\omega) = \frac{U_{2m}}{H_{0m}} = W_2 \cdot S \cdot \mu_m n \times \\ \times \left( \frac{1,25(2\omega + \omega_0) \sin(2\omega + \omega_0)t_m}{(1 + 5 \sin^2(\omega_0 t_m))^2} + \frac{1,25(2\omega + \omega_0) \sin(2\omega + \omega_0)t_m - 3,5\omega_0 \sin(\omega_0 t_m)}{(1 + 5 \sin^2(\omega_0 t_m))^2} \right),$$

определяется в момент времени  $t_m$ , когда выходное напряжение феррозонда  $U_2(t)$  принимает свое максимальное значение  $U_{2m}$ .

Данная методика расчета применяется при использовании электромагнитного сканера [5], работающего в переменном магнитном поле, а перспективность его применения заключается в том, что снижается порог чувствительности феррозонда, что позволяет определять малые концентрации углеродной компоненты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Зацепин Н.Н., Корисова Л.В.* Магнитная дефектоскопия. – Мн. Наука и техника, 1981. – 208 с.
2. *Домашевский Б.Н., Рахимов В.Ф.* Расчет параметров локальных намагничивающих устройств для магнитной дефектоскопии // Дефектоскопия, 1983, №1, с. 3 – 6.
3. *Розенблат М.А.* Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники / М.А. Розенблат. – М.: Наука, 1966. – 642 с.
4. *Афанасьев Ю.В.* Феррозондовые приборы / Ю.В. Афанасьев. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 186 с.
5. *Мирошников В.В., Гречишкина Н.В.* Электромагнитный сканер структурно неоднородных сред // Дефектоскопия, 2023, №9, с. 61 – 63.