

УДК 62-9

Ю. Е ПАЧКОЛІН, канд. техн. наук

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

**ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ТА НАПРЯМУ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИЛ У ЕЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ**

*Проведены теоретические исследования с применением необходимого математического обоснования и специально разработанных компьютерных программ, а также практические эксперименты результатов влияния взаимодействия электромагнитных полей, созданных электрической дугой и индуктором, на расплав металла в электросталеплавильном комплексе с целью уменьшения затрат энергоносителей и улучшения экологии региона.*

**Ключевые слова:** *сталеплавильный комплекс, электромагнитное поле, индуктор.*

*Проведені теоретичні дослідження із застосуванням необхідного математичного підґрунтя та спеціально розроблених комп'ютерних програм, а також практичні експерименти результатів впливу взаємодії електромагнітних полів, створених електричною дугою та індуктором, на розплав металу в электросталеплавильному комплексі з метою зменшення енерговитрат і покращення екології регіону.*

**Ключові слова:** *сталеплавильний комплекс, електромагнітне поле, індуктор.*

**Вступ**

В останні роки велика увага надається питанням розробки, створення та застосування індукційних пристроїв, які здійснюють електромагнітну обробку металів та їхніх сплавів на всіх етапах металургійного виробництва, починаючи від добування, плавлення, очищення (рафінування) металів та їхніх сплавів і закінчуючи формуванням готових виробів. Це пояснюється тим, що застосування безконтактного добре керованого силового впливу електромагнітного поля на електропровідний метал, у тому числі й на метал у розплавленому стані, дозволяє підняти на якісно новий рівень керування металургійними процесами, значно скоротити їхню тривалість, зменшивши витрати енергоносіїв, а також вирішити багато техніко-економічних та екологічних завдань, які не мають на сьогодні задовільного розв'язання іншими методами.

Проведені дослідження електромагнітного впливу на рідкий метал стосовно металургійного та ливарного виробництва дали змогу створити нові можливості здійснення електромагнітної обробки металу в процесі плавлення з метою його прискорення, а також отримання сплавів з високою однорідністю (прецензійних) за рахунок високоякісного очищення (рафінування).

**Постановка завдань дослідження та визначення умов для їх реалізації**

Недостатня ефективність існуючих электросталеплавильних комплексів пояснюється характерними особливостями електрофізичних процесів, котрі відбуваються в них і які ще не повністю досліджені. Зважаючи на дефіцит і постійне подорожчання енергоносіїв та низьку конкурентоспроможність існуючого металургійного та ливарного виробництва є актуальним проведення подальших науково-експериментальних досліджень електрофізичних процесів плавлення металу. Вирішення цієї задачі пов'язано з визначенням напрямків дії та величини електродинамічних сил у рідкому розплаві металу, що виникають від спільної дії електричної дуги та індуктора, в індукційно-дугових сталеплавильних комплексах і дають змогу безконтактного керування металургійним процесом з метою зменшення енерговитрат та покращення якості металів та їхніх сплавів.

**Основна частина**

Спільне електромагнітне поле в індукційно-дуговому сталеплавильному комплексі [1] створюється від дії електричної дуги та індуктора. Основні елементи комплексу показані на рис. 1. Дослідження проводилися після повного розплавлення металу.

Електричне поле  $\dot{\vec{E}}(Q)$  в об'ємі рідкої сталі  $V_c$  представляється у вигляді суми вихрової  $\dot{\vec{E}}_e(Q)$  та скалярної  $\dot{\vec{E}}_c(Q)$  складових  $\dot{\vec{E}}(Q) = \dot{\vec{E}}_e(Q) + \dot{\vec{E}}_c(Q)$ , де  $Q$  – точка спостереження,  $Q \in V_c$ .

Вихрова складова  $\dot{\vec{E}}_e(Q)$  обчислюється з виразу

$$\dot{\vec{E}}_e(Q) = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \int_{V_c} \left\{ \frac{[\vec{r}_{QM} \cdot \dot{\vec{H}}(M)]}{r_{QM}^3} + \frac{[\vec{r}_{QM_y} \cdot \dot{\vec{H}}(M_y)]}{r_{QM_y}^3} \right\} dV_M, \quad (1)$$

де  $V_c$  – частина об'єму рідкої сталі, яка лежить у півпросторі  $y \geq 0$ ;  $M(x_M, y_M, z_M)$ ,  $M(x_M - y_M, z_M)$  – точки інтегрування;  $\vec{r}_{QM}$ ,  $\vec{r}_{QM_y}$  – радіус-вектори, спрямовані з точки  $Q$  у точки  $M$  і  $M_y$ ;  $\dot{\vec{H}}(M)$  – визначається у [2];  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  – кутова частота струму в обмотці індуктора;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала.

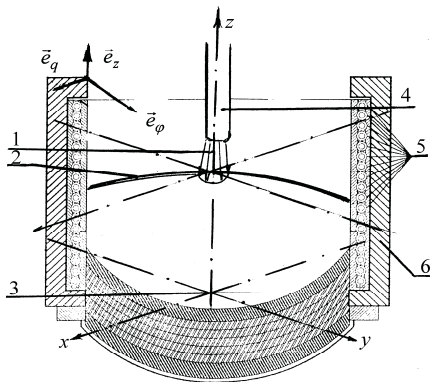


Рис. 1. Індукційно-дугова піч:  
1 – електрична дуга; 2 – поверхня розплавленого металу; 3 – подина печі; 4 – електрод; 5 – індуктор, який складається з чотирьох секцій, котрі живляться незалежно; 6 – магнітопровід для зменшення розсіювання магнітного потоку

Скалярна складова  $\dot{\vec{E}}_c(Q)$  обчислюється за формулою

$$\dot{\vec{E}}_c(Q) = -\frac{1}{4\pi} \int_{S_c} \dot{\tau}(M) \nabla_Q T_y(Q, M) dS_M, \quad (2)$$

де  $\dot{\tau}$  – комплексна густина електричних зарядів;  $T_y(Q, M) = (r_{QM})^{-1} + C_{ky}(r_{QM})^{-1}$ ,  $C_{ky}$  – коефіцієнт симетрії густини електричних зарядів щодо площини  $xOz$ .

Методи теорії потенціалу рівняння Максвелла, які описують електромагнітне поле індукційно-дугового сталеплавильного комплексу, зводять до еквівалентної системи інтегральних рівнянь (ІР) Фредгольма другого роду на підобластях, якими є подина печі, бічна поверхня та вільна поверхня рідкої сталі [3]

$$\dot{\tau}(Q) + \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^3 \int_{S_{ci}} \dot{\tau}(M) P_y^E(Q, M) dS_M = \dot{F}(Q), \quad (3)$$

де  $Q \in S_{c_j}$ ,  $1 \leq j \leq 3$ ;  $\dot{\tau}(M)$  – розв'язок ІР Фредгольма другого роду на поверхні  $S_c$  частини рідкої сталі, яка лежить у півпросторі  $y \geq 0$ ;

$$P_y^E(Q, M) = P_0(Q, M) + C_{ky} P_0(Q, M_y), \quad P_0(Q, M) = \cos(\vec{n}_Q, \vec{r}_{QM}) r_{QM}^{-2}, \quad (4)$$

$P_0(Q, M_y) = \cos(\vec{n}_Q, \vec{r}_{QM_y}) r_{QM_y}^{-2}$ ;  $\dot{F}(Q) = 2\dot{E}_{Bn}(Q)$ ;  $\dot{E}_{Bn}(Q)$  – проекція вектора  $\dot{\vec{E}}(Q)$  на нормаль  $\vec{n}(Q)$  у точці  $Q$ .

Для визначення числової реалізації алгоритму комп'ютерної моделі тримірною розподілу електродинамічних сил у рідкій сталі комплексне ІР (3) перетворюється до еквівалентних речових систем ІР:

$$\tau^a(Q_i) + \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^3 \int_{S_{c_i}} \tau^a(M_j) P_y(Q_i M_i) dS_{M_j} = F^a(Q_i); \quad (5)$$

$$\tau^p(Q_i) + \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^3 \int_{S_{c_i}} \tau^p(M_j) P_y(Q_i M_i) dS_{M_j} = F^p(Q_i); \quad (6)$$

де  $\tau^a, F^a$  і  $\tau^p, F^p$  – активні (речові) та реактивні (уявні) складові відповідних комплексів;  $Q_i \in S_{c_i}, 1 \leq i \leq 3$ .

Для апроксимації IP (5), (6) алгебраїчними системами (АС) об'єм  $V_c$  та його поверхня  $S_c$  розбиваються на елементи. Попередньо об'єм  $V_c$  ділиться на  $N_c$  співвісних циліндрів  $V_{ct}, 1 \leq t \leq N_c$ , товщиною  $\Delta\rho = R_c / N_c$ . Потім кожний з циліндрів  $V_{ct}$  розбивається на елементарні об'єми рівномірними сітками, котрі створені системами координатних поверхонь:  $\rho_l = \rho^{t-1} + l\Delta\rho_t, 0 \leq l \leq N_{\rho t}; \Delta\rho_t = \Delta\rho / N_{\rho t}$  – крок сітки по  $\rho, \rho_0 = \rho^{t-1}, \rho_{N_{\rho t}} = \rho^t$ ;  $\varphi_m = m\Delta\varphi_t, 0 \leq m \leq N_{\varphi t}, \Delta\varphi_t = \pi / N_{\varphi t}$  – крок сітки по  $\varphi; \varphi_0 = 0, \varphi_{N_{\varphi t}} = \pi; z_n = n\Delta z, 0 \leq n \leq N_z, \Delta z = h_c / N_z$  – крок сітки по  $z. z_{N_z} = h_c$ . Такими ж сітками розбивається на елементи поверхня  $S_c$ . Число елементів на основах і бічній поверхні циліндра з рідкої сталі дорівнює  $N_{c1} = N_{c3} = \sum_{t=1}^{N_c} N_{\varphi t} N_{\rho t}, N_{c2} = N_z N_{\varphi N_c}$ . Число  $N_c$  елементів, на які розбивається об'єм  $V_c$  сітками, дорівнює  $N_c = N_{c1} N_z$ .

АС, які апроксимують IP (5), (6) за методом повного осереднення (МПО) мають вигляд [4]

$$\Delta S_i \bar{\tau}_i^a + \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^3 P_{ij} \bar{\tau}_j^a = \bar{\Phi}_i^a; \quad (7)$$

$$\Delta S_i \bar{\tau}_i^p + \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^3 P_{ij} \bar{\tau}_j^p = \bar{\Phi}_i^p. \quad (8)$$

Тут  $\Delta S_i = \text{diag}_{N_{ci}}(\Delta S_{ci1}, \dots, \Delta S_{ciN_{ci}}), 1 \leq i \leq 3$  – діагональна квадратна матриця розмірності  $N_{ci}$ ;  $N_{ci}$  – число елементів, на яке розбивається підобласть  $S_{ci}$  поверхні  $S_c$  сітками;  $\Delta S_{ciq}$  – площа  $q$ -го елемента підобласті  $S_{ci}$  при розбиванні її сітками;  $\bar{\tau}_i^a = (\bar{\tau}_{i1}^a, \dots, \bar{\tau}_{iN_{ci}}^a)$  – вектор-стовпець розмірності  $N_{ci}$  активних складових густин зарядів у центрах елементів, на які розбивається підобласть  $S_{ci}$  поверхні  $S_c$  сітками;  $P_{ij} = \left[ \int_{\Delta S_{ciq}} ds_Q \int_{\Delta S_{sjl}} P_y(Q, M) ds_M \right], 1 \leq q \leq N_{ci}, 1 \leq l \leq N_{cj}, 1 \leq i, j \leq 3$  – прямокутні (при  $i = j$  – квадратні) матриці розмірності  $N_{ci} \times N_{cj}$ ;

$\bar{\Phi}_i^a = \left( \int_{\Delta S_{ci1}} F^a ds_Q, \dots, \int_{\Delta S_{ciN_{ci}}} F^a ds_Q \right), \bar{\tau}_i^p = (\bar{\tau}_{i1}^p, \dots, \bar{\tau}_{iN_{ci}}^p)$  – вектор-стовпець розмірності  $N_{ci}$  реактивних складових густин зарядів у центрах елементів, на які розбивається підобласть  $S_{ci}$  поверхні  $S_c$  сітками;

$$\bar{\Phi}_i^p = \left( \int_{\Delta S_{ci1}} f^p ds_Q, \dots, \int_{\Delta S_{ciN_{ci}}} f^p ds_Q \right). \quad (9)$$

Отримані рівняння (7), (8) розв'язуються за методом блочних ітерацій.

Замінюються інтеграли за об'ємом  $V_c$  інтегралами за елементами об'єму  $\Delta V_{cl}, 1 \leq l \leq N_c$  за формулою

$$\int_{V_c} Y_y^{HZ}(Q, M) H_Z^P(M) dv_M \approx \sum_{l=1}^{N_c} \int_{\Delta V_{cl}} Y_y^{HZ}(Q, M) dv_M H_Z^P(M_l), \quad (10)$$

де  $M_l$  – середня точка елемента  $\Delta V_{cl}$ , й, інтегруючи отримані таким чином вирази послідовно за всіма елементами  $\Delta V_{cq}$ ,  $1 \leq q \leq N_c$ , отримаємо векторно-матричні вирази для розрахунку проекцій  $\vec{E}_6$  на осі декартової системи координат в об'ємі  $V_c$

$$v\vec{E}_{Bxv}^a = \frac{\mu_0\omega}{4\pi} Y_{yvv}^{HZ} \vec{H}_{ZV}^p - \frac{\mu_0\omega}{4\pi} Z_{yvv}^{HY} \vec{H}_{YV}^p; \quad v\vec{E}_{Byv}^a = \frac{\mu_0\omega}{4\pi} Z_{yvv}^{HX} \vec{H}_{XV}^p - \frac{\mu_0\omega}{4\pi} X_{yvv}^{HZ} \vec{H}_{ZV}^p;$$

$$v\vec{E}_{Bzv}^a = -\frac{\mu_0\omega}{4\pi} X_{yvv}^{HY} \vec{H}_{YV}^p + \frac{\mu_0\omega}{4\pi} Y_{yvv}^{HX} \vec{H}_{XV}^p; \quad v\vec{E}_{Byv}^p = -\frac{\mu_0\omega}{4\pi} Y_{yvv}^{HZ} \vec{H}_{ZV}^a + \frac{\mu_0\omega}{4\pi} Z_{yvv}^{HY} \vec{H}_{YV}^a;$$

$$v\vec{E}_{Byv}^p = -\frac{\mu_0\omega}{4\pi} Z_{yvv}^{HX} \vec{H}_{XV}^a + \frac{\mu_0\omega}{4\pi} X_{yvv}^{HZ} \vec{H}_{ZV}^a; \quad v\vec{E}_{Bzv}^p = -\frac{\mu_0\omega}{4\pi} X_{yvv}^{HY} \vec{H}_{YV}^f + \frac{\mu_0\omega}{4\pi} Y_{yvv}^{HX} \vec{H}_{XV}^a, \quad \text{де}$$

$$v\vec{E}_{Bx}^a = (\Delta V_1 E_{Bx1}^a, \dots, \Delta V_{kN_c} E_{BxN_c}^a); \quad v\vec{E}_{By}^a = (\Delta V_1 E_{By1}^a, \dots, \Delta V_{cN_c} E_{ByN_c}^a); \quad v\vec{E}_{Bz}^a = (\Delta V_1 E_{Bz1}^a, \dots, \Delta V_{cN_c} E_{BzN_c}^a);$$

$$\vec{H}_Z^p = (H_{Z1}^p, \dots, H_{ZN_c}^p); \quad \vec{H}_Y^p = (H_{Y1}^p, \dots, H_{YN_c}^p); \quad \vec{H}_X^p = (H_{X1}^p, \dots, H_{XN_c}^p); \quad Y_{yvv}^{HZ} = \left| \int_{\Delta V_q} dv_Q \int_{\Delta V_l} Y_y^{HZ}(Q, M) ds_M \right|;$$

$$Y_{yvv}^{HX} = \left| \int_{\Delta V_q} dv_Q \int_{\Delta V_l} Y_y^{HX}(Q, M) ds_M \right|; \quad Z_{yvv}^{HY} = \left| \int_{\Delta V_q} dv_Q \int_{\Delta V_l} Z_y^{HY}(Q, M) ds_M \right|; \quad Y_{yvv}^{HX} = \left| \int_{\Delta V_q} dv_Q \int_{\Delta V_l} Y_y^{HX}(Q, M) ds_M \right|;$$

$$X_{yvv}^{HZ} = \left| \int_{\Delta V_q} dv_Q \int_{\Delta V_l} X_y^{HZ}(Q, M) ds_M \right|; \quad X_{yvv}^{HY} = \left| \int_{\Delta V_q} dv_Q \int_{\Delta V_l} X_y^{HY}(Q, M) ds_M \right| \quad - \text{квадратні матриці}$$

розмірності  $N_c \times N_c$ ,  $1 \leq q, l \leq N_c$ .

За отриманим вектор-стовпцем обчислюються  $E_{Bx(y,z)}^a = (E_{Bx(y,z)1}^a, \dots, E_{Bx(y,z)N_c}^a)$  та  $E_{Bx(y,z)}^p = (E_{Bx(y,z)1}^p, \dots, E_{Bx(y,z)N_c}^p)$ .

Застосовуючи формули для зв'язку між проекціями на осі декартової та циліндричної систем координат, обчислюються вектори-стовпці проекцій  $\vec{E}_6$  на осі циліндричної системи координат  $\vec{E}_{B\rho(\varphi)v}^a$ .

Векторно-матричні вирази для обчислення векторів-стовпців правих частин алгебраїчних рівнянь (7) і (8) мають вигляд

$$\begin{aligned} \vec{\Phi}_1^a &= \left( \int_{\Delta S_{c11}} F_1^a(Q_{11}) ds_{Q_{11}}, \dots, \int_{\Delta S_{c1N_{c1}}} F_1^a(Q_{1N_{c1}}) ds_{Q_{1N_{c1}}} \right) = \\ &= 2 \left( \int_{\Delta S_{c11}} E_{Bn_1}^a(Q_{11}) ds_{Q_{11}}, \dots, \int_{\Delta S_{c1N_{c1}}} E_{Bn_1}^a(Q_{1N_{c1}}) ds_{Q_{1N_{c1}}} \right) = \\ &= -2 \left( \int_{\Delta S_{c11}} E_{Bz}^a(Q_{11}) ds_{Q_{11}}, \dots, \int_{\Delta S_{c1N_{c1}}} E_{Bz}^a(Q_{1N_{c1}}) ds_{Q_{1N_{c1}}} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

або, підставляючи  $E_{Bz}^a$  після заміни інтегралів за об'ємом  $V_c$  інтегралами за елементами об'єму  $\Delta V_l$ ,  $1 \leq l \leq N_c$  за формулою (10) отримаємо

$$\vec{\Phi}_1^a = -\frac{\mu_0\omega}{2\pi} X_{y1v}^{HY} \vec{H}_Y^p + \frac{\mu_0\omega}{2\pi} Y_{y1v}^{HX} \vec{H}_X^p, \quad (12)$$

де  $X_{y1v}^{HY} = \left| \int_{\Delta S_{li}} ds_Q \int_{\Delta V_j} X_y^{HY}(Q, M) dv_M \right|$ ;  $Y_{y1v}^{HX} = \left| \int_{\Delta S_{li}} ds_Q \int_{\Delta V_j} Y_y^{HX}(Q, M) dv_M \right|$  – прямокутні матриці

з числом рядків  $N_{k1}$ , числом стовпців  $N_{kv}$ ;

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_1^p &= \left( \int_{\Delta S_{c11}} F_1^p(Q_{11}) ds_{Q_{11}}, \dots, \int_{\Delta S_{c1N_{c1}}} F_1^p(Q_{1N_{c1}}) ds_{Q_{1N_{c1}}} \right) = \\ &= 2 \left( \int_{\Delta S_{c11}} E_{Bn_1}^p(Q_{11}) ds_{Q_{11}}, \dots, \int_{\Delta S_{c1N_{c1}}} E_{Bn_1}^p(Q_{1N_{c1}}) ds_{Q_{1N_{c1}}} \right) = \\ &= -2 \left( \int_{\Delta S_{c11}} E_{Bz}^p(Q_{11}) ds_{Q_{11}}, \dots, \int_{\Delta S_{c1N_{c1}}} E_{Bz}^p(Q_{1N_{c1}}) ds_{Q_{1N_{c1}}} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

або, підставляючи  $E_{Bz}^p$  після заміни інтегралів за об'ємом  $V_c$  інтегралами за елементами об'єму  $\Delta V_l$ ,  $1 \leq l \leq N_c$ , за формулою (10) отримуємо

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_1^p &= -\frac{\mu_0 \omega}{2\pi} X_{y1v}^{HY} \bar{H}_Y^a + \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} Y_{y1v}^{HX} \bar{H}_X^a; \quad \bar{\Phi}_2^a = \left( \int_{\Delta S_{c11}} F_2^a(Q_{21}) ds_{Q_{21}}, \dots, \int_{\Delta S_{c1N_{c1}}} F_2^a(Q_{2N_{c2}}) ds_{Q_{2N_{c2}}} \right) = \\ &= 2 \left( \int_{\Delta S_{c21}} E_{Bn_2}^a(Q_{21}) ds_{Q_{21}}, \dots, \int_{\Delta S_{c2N_{c2}}} E_{Bn_2}^a(Q_{2N_{c2}}) ds_{Q_{2N_{c2}}} \right) = \\ &= 2 \left( \int_{\Delta S_{c21}} E_{B\rho Q}^a(Q_{21}) ds_{Q_{21}}, \dots, \int_{\Delta S_{c2N_{c2}}} E_{B\rho Q}^a(Q_{2N_{c2}}) ds_{Q_{2N_{c2}}} \right) = \\ &2 \left[ \left( \int_{\Delta S_{c21}} (E_{Bx}^a(Q_{21}) \cos Q_{21} + E_{By}^a(Q_{21}) \sin Q_{21}) ds_{Q_{21}}, \dots, \int_{\Delta S_{c2N_{c2}}} (E_{Bx}^a(Q_{2N_{c2}}) \cos Q_{2N_{c2}} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + E_{By}^a(Q_{2N_{c2}}) \sin Q_{2N_{c2}}) ds_{Q_{2N_{c2}}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Підставимо у (14) вирази  $E_{Bx}^a(Q)$  і  $E_{By}^a(Q)$  після заміни інтегралів за об'ємом  $V_c$  інтегралами за елементами об'єму, за формулою (10) отримуємо

$$\bar{\Phi}_2^a = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} [CY_{y2v}^{HZ} \bar{H}_Z^p - CZ_{y2v}^{HY} \bar{H}_Y^p + SZ_{y2v}^{HX} \bar{H}_X^p - SX_{y2v}^{HZ} \bar{H}_Z^p], \quad (15)$$

де  $CY_{y2v}^{HZ} = \left| \int_{\Delta S_{2i}} \cos Q_2 dS_{Q_2} \int_{\Delta V_j} Y_y^{HZ}(Q, M) dv_M \right|$ ;  $CZ_{y2v}^{HY} = \left| \int_{\Delta S_{2i}} \cos Q_2 dS_{Q_2} \int_{\Delta V_j} Z_y^{HY}(Q, M) dv_M \right|$ ;

$SZ_{y2v}^{HX} = \left| \int_{\Delta S_{2i}} \sin Q_2 dS_{Q_2} \int_{\Delta V_j} Z_y^{HX}(Q, M) dv_M \right|$ ;  $SX_{y2v}^{HZ} = \left| \int_{\Delta S_{2i}} \sin Q_2 dS_{Q_2} \int_{\Delta V_j} X_y^{HZ}(Q, M) dv_M \right|$  – прямокутні

матриці з числом рядків  $N_{c2}$ , числом стовпців  $N_{cv}$ ,  $1 \leq i \leq N_{c2}$ ,  $1 \leq j \leq N_{cv}$ .

Формули для обчислення  $\bar{\Phi}_2^p$  мають такий же вигляд, що й (14) – (15), в яких необхідно замінити індекс «а» на індекс «р». Аналогічно обчислюються  $\bar{\Phi}_3^a$  та  $\bar{\Phi}_3^p$ .

Векторно-матричний вираз для обчислення проєкцій  $E_{cp}$

$$E_{cp}(Q) = -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^3 \int_{S_{ci}} \tau(M) GR_y(Q, M) ds_M = -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_{cij}} \int_{S_{cij}} \tau(M) GR_y(Q, M) ds_M \approx$$

$$= -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_{ci}} \tau_{ij} \int_{S_{cij}} GR_y(Q, M) ds_M. \quad (16)$$

Інтегруючи вираз послідовно за елементами  $\Delta V_q$ ,  $1 \leq q \leq N_c$ , отримаємо

$$v\vec{E}_{c\rho v} = \Delta v\vec{E}_{c\rho v} = -\frac{1}{4\pi} (R_{v1}\vec{r}_1 + R_{v2}\vec{r}_2 + R_{v3}\vec{r}_3), \quad (17)$$

де  $v\vec{E}_{c\rho v} = \left( \int_{\Delta V_1} \vec{E}_{c\rho}(Q) dv_Q, \dots, \int_{\Delta V_{N_c}} \vec{E}_{c\rho}(Q) dv_Q \right)$  – вектор-стовпець розмірності  $N_c$ ;

$\Delta V = \text{diag}(\Delta V_1, \dots, \Delta V_{N_c})$  – діагональна матриця розмірності  $N_c$ ;  $\vec{E}_{c\rho v} = (E_{c\rho 1}, \dots, E_{c\rho N_c})$ ,

$R_{vk} = \left| \int_{\Delta V_q} dv_Q \int_{\Delta S_{ckj}} GR_y(Q, M) ds_M \right|$ ,  $1 \leq q \leq N_c$ ,  $1 \leq j \leq N_{ck}$  – прямокутна матриця розмірності

$N_c \times N_{ck}$ ;  $\vec{r}_k = (r_{k1}, \dots, r_{kN_{ck}})$  – вектор-стовпець розмірності  $N_{ck}$ , де  $k = 1, 2, 3$ .

Векторно-матричний вираз для обчислення проекцій  $E_{c\phi}$  [5]

$$v\vec{E}_{c\phi v} = \Delta v\vec{E}_{c\phi v} = -\frac{1}{4\pi} (F_{v1}\vec{r}_1 + F_{v2}\vec{r}_2 + F_{v3}\vec{r}_3), \quad (18)$$

де  $v\vec{E}_{c\phi v} = \left( \int_{\Delta V_1} \vec{E}_{c\phi}(Q) dv_Q, \dots, \int_{\Delta V_{N_c}} \vec{E}_{c\phi}(Q) dv_Q \right)$  – вектор-стовпець розмірності  $N_c$ ;

$\Delta V = \text{diag}(\Delta V_1, \dots, \Delta V_{N_c})$  – діагональна матриця розмірності  $N_c$ ;  $\vec{E}_{c\phi v} = (E_{c\phi 1}, \dots, E_{c\phi N_c})$ ,

$F_{vk} = \left| \int_{\Delta V_q} dv_Q \int_{\Delta S_{ckj}} GF_y(Q, M) ds_M \right|$ ,  $1 \leq q \leq N_c$ ,  $1 \leq j \leq N_{ck}$  – прямокутна матриця, розмірності

$N_c \times N_{ck}$ .

Векторно-матричний вираз для обчислення проекцій  $E_{cz}$

$$v\vec{E}_{czv} = \Delta v\vec{E}_{czv} = -\frac{1}{4\pi} (Z_{v1}\vec{r}_1 + Z_{v2}\vec{r}_2 + Z_{v3}\vec{r}_3). \quad (19)$$

де  $v\vec{E}_{czv} = \left( \int_{\Delta V_1} \vec{E}_{cz}(Q) dv_Q, \dots, \int_{\Delta V_{N_c}} \vec{E}_{cz}(Q) dv_Q \right)$  – вектор-стовпець розмірності  $N_c$ ;

$\Delta V = \text{diag}(\Delta V_1, \dots, \Delta V_{N_c})$  – діагональна матриця розмірності  $N_c$ ;

$\vec{E}_{czv} = (E_{cz1}, \dots, E_{czN_c})$ ,  $Z_{vk} = \left| \int_{\Delta V_q} dv_Q \int_{\Delta S_{ckj}} GZ_y(Q, M) ds_M \right|$ ,  $1 \leq q \leq N_c$ ,  $1 \leq j \leq N_{ck}$  – прямокутна

матриця, розмірності  $N_c \times N_{ck}$ .

Підставляючи у (17), (18) і (19) замість векторів-стовпців  $\vec{r}_j$ ,  $1 \leq j \leq 3$ , вектори-стовпці  $\vec{r}_j^a(\vec{r}_j^p)$ ,  $1 \leq j \leq 3$ , отримаємо формули для  $v\vec{E}_{c\rho v}^{a(p)}$ ,  $v\vec{E}_{c\phi v}^{a(p)}$ ,  $v\vec{E}_{czv}^{a(p)}$ .

Векторно-матричні вирази для обчислення  $\vec{E}$  в об'ємі  $V_c$ . Обчислюються вектор-стовпці  $\vec{E}_{Bx(y,\rho,\phi),v} = (E_{Bx(y,\rho,\phi),1}, \dots, E_{Bx(y,\rho,\phi),N_c})$ . Знаходяться вектори-стовпці проекцій  $\vec{E}$  на осі циліндричної системи координат

$$\vec{E}_{\rho(\phi,z),v}^a = \vec{E}_{B\rho(\phi,z)v}^a + \vec{E}_{c\rho(\phi,z)v}^a; \quad \vec{E}_{\rho(\phi,z),v}^p = \vec{E}_{B\rho(\phi,z)v}^p + \vec{E}_{c\rho(\phi,z)v}^p. \quad (20)$$

Застосування наведеного математичного підґрунтя дало змогу розробити спеціальну комп'ютерну програму, за допомогою якої були проведені дослідження розподілення

електродинамічних сил у різних шарах розплаву металу. Результати наведені на рис. 2, 3, 4, 5.

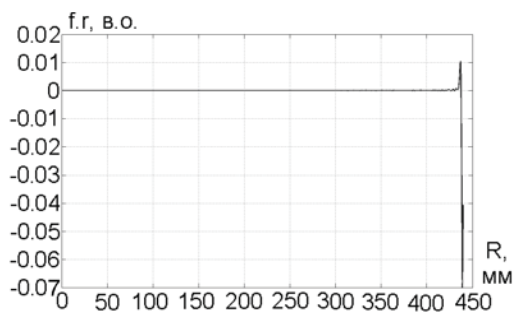


Рис. 2. Розподілення електродинамічних сил у радіальному напрямку в поверхневому шарі розплаву металу ( $R$  – радіус печі)

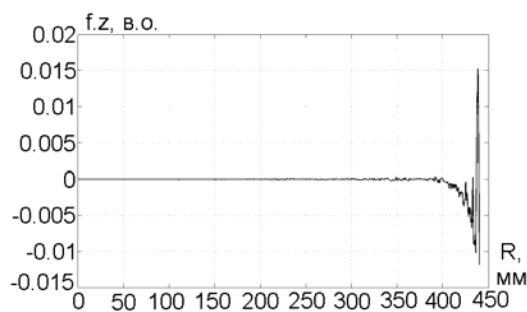


Рис. 3. Розподілення електродинамічних сил в осьовому напрямку в поверхневому шарі розплаву металу ( $z$  – висота печі)

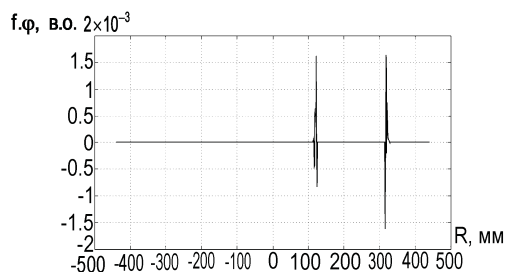


Рис. 4. Розподілення електродинамічних сил у азимутальному напрямку поверхневому шарі розплаву металу

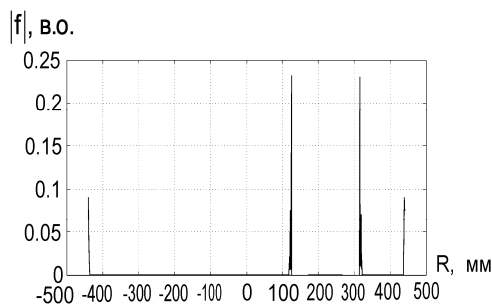


Рис. 5. Модульне значення результуючої електродинамічної сили при спільній дії електричної дуги й індуктора

За визначеним розподілом електромагнітного поля визначається середня величина об'ємної густини електродинамічних сил  $\bar{f}$  для проекцій у циліндричній системі координат

$$f_{\rho} = \mu_0 \gamma \left[ \left( E_{\phi}^a H_z^a - E_z^a H_{\phi}^a \right) + \left( E_{\phi}^p H_z^p - E_z^p H_{\phi}^p \right) \right]; \quad f_{\phi} = \mu_0 \gamma \left[ \left( E_z^a H_{\rho}^a - E_{\rho}^a H_z^a \right) + \left( E_z^p H_{\rho}^p - E_{\rho}^p H_z^p \right) \right];$$

$$f_z = \mu_0 \gamma \left[ \left( E_{\rho}^a H_{\phi}^a - E_{\phi}^a H_{\rho}^a \right) + \left( E_{\rho}^p H_{\phi}^p - E_{\phi}^p H_{\rho}^p \right) \right]. \quad (21)$$

Практичні експерименти, що були проведені з використанням устаткування підприємства «Мотор Січ», підтвердили достовірність результатів комп'ютерного дослідження. Розбіжність результатів становила 3–5 %, що задовольняє вимогам до технологічного процесу.

### Висновки

За результатами виконаної роботи розроблено алгоритм [6] для проведення розрахунків величин і напрямів електродинамічних сил в індукційно-дуговому сталеплавильному комплексі, які дають змогу керувати металургійним процесом. Враховуючи те, що індуктор складається з 4 секцій (розділених по висоті печі), котрі живляться незалежно, виявлена можливість керування режимом розплаву металу у заданих параметрах за технологічним процесом шляхом зміни частоти та величини струму живлення окремих секцій індуктора. При проведенні теоретичних досліджень визначені рівняння складових електродинамічних сил, що виникають у порожнині печі від дії електромагнітного поля, та визначені передумови для проведення подальших

досліджень гідродинамічних явищ у розплаві металу з метою удосконалення існуючих металургійних процесів. Рухи під дією цих сил створюють турбулентні течії в усьому об'ємі розплаву металу, що значно підвищує інтенсифікацію процесу плавлення, зменшуючи енергоспоживання на 10 – 15%, а також сприяє покращенню якості металу за рахунок повного розчинення домішок у період металургійної обробки та створює умови для очищення розплаву (видалення газів та неметалевих включень).

Водночас виявлено, що:

– зміна частоти струму, що живить секції індуктора, дає змогу змінювати глибину проникнення електромагнітного поля у розплав, у результаті чого отримана можливість впливати на інтенсивність металургійного процесу, включаючи етап відокремлення шлаків з мінімальною втратою металу;

– спільна дія електромагнітних полів у порожнині електросталеплавильного комплексу зменшує кількість пилу, який викидається з печі у довкілля разом з газами на 10-20%, покращуючи цим екологічну ситуацію регіону.

### Список літератури

1. Сталеплавильний комплекс: Пат. № 6644 Україна, МПК 7 C21C5/00. Ю. Е. Пачколин, І. Д. Труфанов, О. С. Левада, Ю. Л. Гура, О. О. Бондаренко, І. А. Андріяс, В. В. Луньов, В. П. Метельський. — № 20041008595; заявл. 21.10.2004; опубл. 16.05.2005, бюл. № 5.
2. Кучаев А. А. Моделирование трёхмерного электромагнитного поля установки ковш-печь с индукционным перемешиванием жидкой стали // Технічна електродинаміка. – 1997. – № 5. – С. 5 – 10.
3. Тозони О. В., Маергойз И. Д. Расчёт трёхмерных электромагнитных полей. – К.: Техника, 1974. – 352 с.
4. Петрушенко С. І. До апроксимації інтегральних рівнянь теорії електромагнітного поля алгебраїчними системами // ДАН УРСР, сер. А., 1969. – № 7. – С. 618 – 621.
5. Курбатов П. А., Аринчин С. А. Численный расчёт электромагнитных полей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 167 с.
6. Спосіб плавлення металу на сталеплавильних комплексах: Пат. № 23419 Україна, МПК (2006) C21C 5/00. Антонов М. Л., Бондаренко О. О., Пачколин Ю. Е. — № u2006 13769; заявл. 25.12.2006; опубл. 25.05.2007, бюл. № 7.

### DEFINITION OF VALUE AND ACTION DIRECTION OF ELECTROMAGNETIC FORCES IN STEELMELTING COMPLEXES

J. E. PACHKOLIN., Cand. Tech. Sci.  
Zaporizhzhya National Technical University

*Theoretical researches using the necessary mathematical basis and special computer programs were conducted. Practical experiments of influence of interaction between electromagnetic fields, created by an electric arc and an inductor, on metal melting in a steelmelting complex in order to decrease energy consumption and to improve the environmental situation in a region.*

**Key words:** *steelmelting complex, electromagnetic field, inductor.*

Поступила в редакцію 27.09 2012 г.