

УДК 621.365.6

**Пачколін Юрій Ефтович**, канд. техн. наук, доцент кафедри електричних машин, тел. 061-764-46-25. E-mail: [pachkolin@ukr.net](mailto:pachkolin@ukr.net)

**Бондаренко Олександр Олексійович**, аспірант кафедри електричних апаратів.

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063. Тел. 061-764-46-25.

**Левченко Сергій Андрійович**, канд. техн. наук, доцент кафедри електротехніки та енергетичного менеджменту. Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя, Україна, проспект Леніна, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006, Тел. 061-223-82-21, E-mail: [levchenko\\_s@rambler.ru](mailto:levchenko_s@rambler.ru)

### ВИКОРИСТАННЯ КОНФОРМНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕЧІЇ РОЗПЛАВУ МЕТАЛУ В ЕЛЕКТРОДУГОВІЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІЙ ПЕЧІ

*Запропонована методика проведення теоретичних досліджень за допомогою конформних відображень щодо визначення електрофізичних параметрів течії розплаву металу в електросталеплавильних печах з урахуванням цілеспрямованої дії магнітного поля. На підставі запропонованої методики використання конформного відображення є можливим визначити тягове зусилля у кожній точці розплаву.*

**Ключові слова:** конформні відображення, тягове зусилля, течія розплаву металу, дугова сталеплавильна піч.

**Пачколин Юрий Эфтович**, канд. техн. наук, доцент кафедры электрических машин. Тел. 061-764-46-25.

E-mail: [pachkolin@ukr.net](mailto:pachkolin@ukr.net)

**Бондаренко Александр Алексеевич**, аспирант кафедры электрических аппаратов.

Запорожский национальный технический университет, Украина, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64, 69063.

Тел. 061-764-46-25.

**Левченко Сергей Андреевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники и энергетического менеджмента. Запорожская государственная инженерная академия, Украина, г. Запорожье, проспект Ленина, 226, 69006, Тел. 061-223-82-21, E-mail: [levchenko\\_s@rambler.ru](mailto:levchenko_s@rambler.ru)

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА МЕТАЛЛА В ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

*Предложена методика проведения теоретических исследований с помощью конформных отображений для определения электрофизических параметров течения расплава металла в электросталеплавильных печах с учётом целенаправленного действия магнитного поля. На основании предложенной методики использования конформного отображения появляется возможность определить тяговое усилие в каждой точке расплава.*

**Ключевые слова:** конформные отображения, тяговое усилие, течение расплава металла, дуговая сталеплавильная печь.

**Pachkolin Yuri Eftovich**, PhD in Technical Sciences, Assistant Professor at academic department of electrical machines. Phone: 061-764-46-25. E-mail: [pachkolin@ukr.net](mailto:pachkolin@ukr.net)

**Bondarenko Olexandr Olexiyovych**, postgraduate at academic department of electrical devices.

Zaporizhia National Technical University, Zaporizhia, Ukraine, Zhykovskiy st., 64, Zaporizhia, Ukraine, 69063.

Phone: 061-764-46-25

**Levchenko Sergiy Andriyovych**, Assistant Professor at academic department of electrical equipment and energy management. Zaporizhia State Engineering academy, Zaporizhia, Ukraine, Lenin av., 226, Zaporizhia, Ukraine, 69006. Phone: 061-223-82-21. E-mail: [levchenko\\_s@rambler.ru](mailto:levchenko_s@rambler.ru)

### THE USE OF CONFORMAL MAPS TO STUDY ELECTROPHYSICAL PARAMETERS MELT FLOW IN AN ELECTRIC ARC FURNACE

*The results of theoretical researches carried out using the conformal maps to define electrophysical parameters melt flow in the electric arc furnaces taking in account the purposeful action of magnetic field are proposed. On the basis of the proposed method using conformal maps becomes possible to determine the tractive force at each point of the melt metal.*

**Key words:** conformal map, tractive effort, metal melt flow, electric arc furnace.

#### Вступ

Низька ефективність роботи існуючих дугових сталеплавильних печей (ДСП) пояснюється недостатнім вивченням електрофізичних процесів, які протікають у них, і, як наслідок, недосконалим конструктивним виконанням електросталеплавильного устаткування

та нераціональним, з точки зору економії електроенергії, технологічним процесом. Тому є дуже актуальним, особливо через постійне подорожчання електроенергії, проведення подальших науково-експериментальних досліджень електрофізичних процесів, які відбуваються у цих печах, створення за їх результатами високоєфективного електросталеплавильного устаткування та удосконалення технологічних процесів. Підвищення ефективності роботи ДСП й отримання високоякісних металів та їхніх сплавів можливо досягти за рахунок застосування цілеспрямованого впливу електромагнітного поля, який прискорює рух розплаву металу, що призводить до інтенсифікації процесу плавлення та забезпечує необхідну мікроструктуру готової продукції [1].

При ретельному та досконалому вивченні питання щодо пошуку можливостей з метою інтенсифікації плавлення і скорочення енерговитрат у ДСП треба мати на увазі, що тривалість усього металургійного процесу виплавляння сталі  $T_{nl}$  складається з трьох основних періодів:

$$T_{nl} = t_n + t_{розн} + t_{мо}, \quad (1)$$

де  $t_n$  – період нагрівання;

$t_{розн}$  – період розплавлення металу та доведення до кипіння;

$t_{мо}$  – період металургійної обробки металу.

Перші два періоди пов'язані з потужністю, яка споживається піччю. На перший погляд, вирішити цю проблему можливо було би шляхом збільшення електричної потужності, що вводиться у піч. Але таке просте рішення має низку недоліків:

- обмежена теплопередача від дуги рівномірно до всього об'єму металу, що призводить до різкого зростання температури на поверхні розплаву біля електродів і, як наслідок, підвищений угар металу, збільшення викидів пічних газів, що, в свою чергу, призводить до надмірних витрат електроенергії;

- суттєве перевантаження пічного трансформатора та «короткої мережі», що призводить до перевитрат електроенергії та може спричинити аварійні ситуації;

- понаднормове збільшення температури верхньої частини футерування печі, що викликає його інтенсивний знос і скорочує термін експлуатації.

Тривалість  $t_{мо}$  залежить, в основному, від інтенсивності металургійних процесів, які можливо прискорити шляхом збільшення швидкості перемішування.

Це можливо здійснити завдяки використанню ДСП з різними індукційними пристроями [2]. У цих печах зі зростанням їхньої місткості та потужності зростає сила струму та збільшується потреба у перемішуванні розплаву металу за рахунок електромагнітних сил. Однак, в існуючих дугових печах цих сил не завжди достатньо для необхідного збільшення швидкості перемішування, тим більше, що зі збільшенням місткості печі, частина ванни, яка охоплюється цим перемішуванням, зменшується: у печі 0,5 т струмами дуг перемішується приблизно 30 % об'єму металу, а в 30-тонній печі приблизно 3,5 % [3].

Таким чином, щоб найуспішніше розв'язати завдання підвищення ефективності роботи печей, необхідно дослідити структуру течії розплаву металу та результативність цілеспрямованого впливу магнітного поля на нього.

#### Аналіз досліджень і постановка проблеми

Питаннями електромагнітного перемішування металу займалися проф. Тельний С. І., Шамота В. П., інж. Морозенко Л. І., О कोरोков М. В. Аналогічні найвдаліші експериментальні дослідження також проводилися у Шведській електротехнічній компанії (ASEA) та інших металургійних підприємствах, у тому числі в Україні на заводі «Дніпроспецсталь» [4, 5].

Зараз цими питаннями займаються відомі світові металургійні компанії World Steel Association, Arcelor Mittal, Nippon Steel, JFE, PORCO, Baosteel, U.S. Steel та багато інших.

Аналіз результатів цих робіт показав, що безпосереднє дослідження процесів електро- та гідродинаміки перемішування металу у ванні дугової печі дуже складне через те, що

розплав металу непрозорий і має високу температуру, тому для їх вивчення необхідно припустити наступне:

1. Теоретичний розрахунок зусиль і швидкостей по об'єму ванни можливо виконати тільки зі значними припущеннями.

2. До перемішувальних пристроїв не завжди можливо використати залежності, справедливі для інших електромагнітних пристроїв.

3. Окрім швидкості руху металу, виключно важливе значення має якість руху, під якою розуміється відповідність руху вимогам металургійного процесу (відсутність пульсацій на поверхні, рівномірність руху по всій товщині розплаву металу і т. д.). Вибір оптимальної частоти струму, від якої залежить глибина проникнення, для кожного окремого періоду роботи печі виконується особливо.

4. Пристрій для електромагнітного перемішування металу слід розглядати як допоміжний додатковий пристрій у конструкції печі, призначений для покращення технологічного й енергетичного режиму плавлення.

Основними вимогами до конструкції пристрою для перемішування металу є раціональні геометричні й електричні параметри, які забезпечують оптимальні для технологічного процесу та якості металу швидкість і якість руху останнього.

Неможливість виконання високоточного теоретичного розрахунку, з одного боку, та необхідність у короткий термін створити економічні дослідно-промислові зразки ДСП, з іншого, визначили переважно емпіричний метод вивчення цього питання. Не зважаючи на те, що існує багато методів проведення аналогічних досліджень, всі вони не дають суттєвих позитивних результатів, які б цілком задовольнили реальне металургійне виробництво. Тому ми пропонуємо застосування методу конформних відображень.

**Застосування конформних відображень тягового зусилля на одиницю площі металу**  
Відомо, що на висоті  $h$  зусилля  $P_h$  на  $1 \text{ см}^2$  пропорційне квадрату густини струму [2]

$$P_h = k \cdot B_h \cdot j_h = k' \cdot B_h^2, \quad (2)$$

де  $B_h$  – магнітна індукція на висоті  $h$  від дна ванни;

$j_h$  – густина струму;

$k, k'$  – коефіцієнти пропорційності.

Магнітне поле над індуктором доволі нерівномірне, магнітна індукція безперервно та суттєво змінюється у межах об'єму поля за величиною та напрямком. Це підтверджується рис. 1 [2].

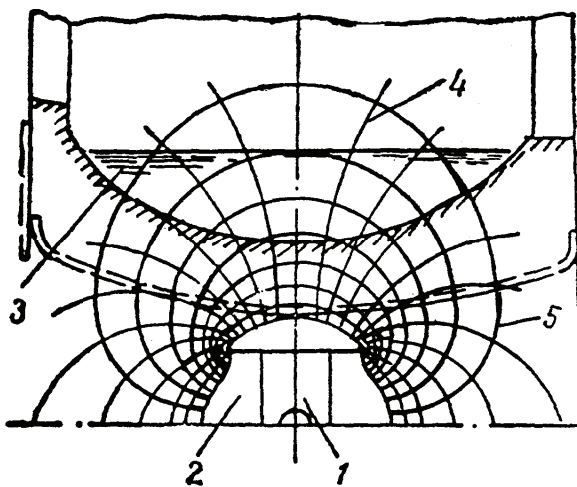


Рис. 1. Розподіл електромагнітних сил, утворених індуктором, у порожнині ДСП:

1 – осердя з полюсними наконечниками; 2 – котушка електромагніта;

3 – рідкий метал; 4 – магнітні лінії; 5 – екіпотенційні поверхні магнітного поля

Через те, що ванна – усічений конус з меншою нижньою основою, то глибина нижнього шару  $h_n$  більше глибини  $h_0$  верхнього шару. Через це поділ магнітних та електромагнітних сил в об’ємі розплаву нерівномірний: у нижній частині значно більший, ніж на поверхні. Результуюча сила на вертикальний стовп металу з основою в  $1 \text{ см}^2$  дорівнює різниці двох сил [2]:

$$P_{\text{рез}} = \int_0^{h_n} P_h dh - \int_{h_n}^{h_n+h_0} P_h dh. \quad (3)$$

Внаслідок неоднорідності поля в усіх напрямках і неоднорідності повітряного зазору між дном ванни і статором по всій площі дна загальна сила, яка створює рух металу, виражається формулою:

$$P_{\text{заг}} = \iiint_{V_n} P_h dh \cdot dy \cdot dx - \iiint_{V_0} P_h dh \cdot dy \cdot dx. \quad (4)$$

Необхідно врахувати, що зі зміною  $h$  змінюються й межі інтегрування по осях  $X$  і  $Y$ .

Запропоноване застосування конформних відображень дозволяє відобразити одну нерівномірну задану область на іншу, розв’язання якої не викликає труднощів.

Взагалі за допомогою конформних відображень успішно розв’язуються доволі складні завдання гідро- та аеродинаміки, які мають великий інтерес для практики, теорії теплового, магнітного, електростатичного полів тощо.

Якщо кожному комплексному числу  $z$  з множини  $g$  (реальна довільна область) поставлено у відповідність одне або декілька (у випадку багатозначної функції) комплексних чисел  $w$  з множини  $G$  (область, на яку здійснюється конформне відображення), то вважають, що  $w$  є функцією комплексного змінного  $z$ , яка визначається з множини  $g$

$$w = f(z). \quad (5)$$

Маючи деяку аналітичну функцію  $w = f(z)$ , можна довільну область  $g$ , в якій ця функція однолиста [6, стор. 187] (або взаємно однозначна [7]), відобразити конформно на деяку область  $G$ .

Для практики великий інтерес має питання, як за заданими областями  $g$  і  $G$  знайти функцію, яка здійснює конформне відображення однієї з цих областей на іншу.

При розв’язанні основної задачі конформних відображень – задачі пошуку функції, яка здійснює конформне відображення заданої області, доводиться застосовувати різні спеціальні методи. Одним з методів є підбір потрібних комбінацій елементарних функцій за умови, що вдасться знайти області, які відображаються цими функціями. Такий підхід передбачає вільне володіння геометричними властивостями елементарних функцій комплексного змінного.

Оскільки магнітні поля у різних перерізах відрізняються, то й комбінації елементарних функцій різні.

З елементарних функцій найбільший інтерес представляє дробово-лінійна функція

$$w = \frac{az + b}{cz + d}. \quad (6)$$

Розділивши рівняння (6) відносно  $z$ , знайдемо

$$z = \frac{dw - b}{-cw + a}, \quad (7)$$

тобто зворотна функція також дробово-лінійна.

Крім дробово-лінійної функції широкое розповсюдження отримали функції:

– ступенева

$$w = z^a, \quad (8)$$

– показникова

$$w = e^z, \quad (9)$$

– логарифмічна

$$w = \ln z. \quad (10)$$

– тригонометричні

$$w = \cos z; \quad (11)$$

$$w = \operatorname{tg} z; \quad (12)$$

Крім цих функцій задача конформних відображень може бути розв'язана за допомогою різних наближених методів або за допомогою інтеграла Кристофеля-Шварца.

Так, наприклад, за допомогою перетворення  $w = z^2$  декартова сітка площини  $z(X, Y)$  перетворюється у параболічну сітку площини  $w(u, v)$ .

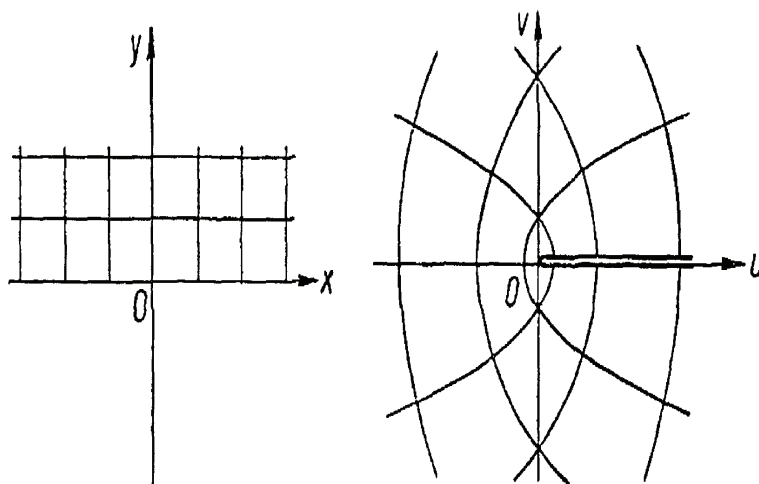


Рис. 2. Параболічна сітка площини  $w$ , в яку переходить декартова сітка площини  $z$

Щоб отримати з параболічної сітки  $w(u, v)$  декартову сітку  $z(X, Y)$  необхідно застосувати зворотне перетворення  $z = \sqrt{w}$  на позитивній півплощині. Знаходження ж сил  $P_h$  у розплаві металу при рівномірній магнітній індукції  $B_0$  не є складним. Визначивши  $B_0$  у розплаві металу, а отже, силу  $P_0$ , яка у кожній точці однакова, для визначення реальної сили  $P_h$  у будь-якій точці розплавленого металу необхідно величину  $P_0$  перерахувати через формулу перетворення координат.

### Висновки

1. Для визначення тягового зусилля  $P_h$  у кожній точці розплавленого металу запропоновано використовувати конформне відображення заданої області нерівномірної магнітної індукції у рівномірну  $w = f(z)$ , що дасть можливість розрахувати рівномірне силове поле  $P_0$ .

2. Для розрахунку величини реального тягового зусилля  $P_h$  ( $\text{г/см}^2$ ) у кожному елементарному перерізі розплавленого металу необхідно величину тягового зусилля у рівномірному полі  $P_0$  перерахувати через зворотню аналітичну функцію перетворення координат  $z = F(w)$ . Точність визначення реальної сили  $P_h$  залежить від того, наскільки точно підібрана функція конформного відображення  $w = f(z)$ .

3. Заміна інтегральних рівнянь для визначення загальної сили, яка створює рух розплаву металу, на алгебраїчні функції конформних відображень дає можливість розробити відповідні комп'ютерні програми для автоматичного регулювання потужності індукційно-дугових сталеплавильних печей, що є підґрунтям для проектування сучасних електрометалургійних комплексів з покращеними техніко-економічними показниками, які спроможні забезпечити конкурентоздатність вітчизняного металургійного виробництва.

### Список використаної літератури:

4. Пачколін Ю.Е. Розробка та дослідження електросталеплавильного комплексу з індукційно-дуговим перетворенням електроенергії. – Дис. канд. техн. наук. – Запоріжжя, 2007. – 172 с.

2. Окорочов Н.В. Электромагнитное перемешивание металла в дуговых сталеплавильных печах. – М.:

Государственное научно-техническое издательство по чёрной и цветной металлургии, 1961. – 176 с.

3. Окорок Н. В., Мальцев Л. А. Теплообмен в ванне дуговой электропечи при стационарном тепловом потоке. Сборник трудов Московского института стали XXXVIII. – М.: Металлургиздат, 1958. – 159 с.

4. Лаврик В. И., Савенков В. Н. Справочник по конформным отображениям. – К.: Наукова думка, 1970. – 252 с.

5. Патент на корисну модель «Спосіб плавлення металу на сталеплавильних комплексах» № 23419. Зареєстровано в державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25 травня 2007 р. МПК (2006) Антонов М. Л., Бондаренко О. О., Пачколін Ю. Е.

6. Сборник задач по математике для ВТУзов. Специальные разделы математического анализа. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 368 с.

7. Голубев В. В. Однозначные аналитические функции. Автоморфные функции. – М.: Физ.-мат.гиз, 1961.

#### References:

4. Pachkolin Y. E. Research and Development of electric steel-melting complex with induction arc energy transformation [ Rozrobka ta doslidzhennya electrostaleplavilnogo kompleksu z induktsiyno-dugovym peretvorennyam electroenergii]. – Dis. PhD in Technical Sciences. – Zaporizhia, 2007. – 172 p.

2. Okorokov N. V. Electromagnetic metal stirring in electric arc steel furnaces [Electromagnitnoe peremeshivanie metalla v dugovykh staleplavilnykh pechakh]. – М.: State scientific and technical publishing house in ferrous and nonferrous metallurgy, 1961. – 176 p.

3. Okorokov N. V., Maltsev L. A. Heat-exchange in the electric arc furnace bath at continuous heat flux. Collection of studies of the Moscow Steel Institute of XXXVIII [Teploobmen v vanne dugovoy elektropechi pri stacionarnom teplovom potoke. Sbornik trudov Moskovskogo instituta stali XXXVIII]. – М.: Metallurgizdat, 1958. – 159 p.

4. Lavrik, V. I., Savenkov V. N. Reference book of conformal maps [Spravochnik po konformnym otobrazheniyam]. – К.: Naukova Dumka, 1970. – 252 p.

5. Patent for utility model "Method of melting metal in the steel complexes" [Patent na korysnu model " Sposib plavlennya metalu na staleplavilnykh kompleksakh]. –No. 23419. Registered in the state register of patents of Ukraine for utility models may 25, 2007, IPC (2006) Antonov, M.L., Bondarenko, O.O., Packolin Y.E.

6. Collection of problems in mathematics for colleges. Special topics in mathematical analysis [Sbornik zadach po matematike dla VTUzov. Spetsialnye razdely matematicheskogo analiza]. – М.: Nauka. The main edition of physico-mathematical literature, 1981. – 368 p.

7. Golubev V. V. Unambiguous analytical functions. Automorphic functions [Odnnozachnye analiticheskie funktsii. Avtomorfnye funktsii]. – М.: Phys.-Mat. guise, 1961.

Поступила в редакцию 10.03 2015 г.