

УДК 621.318

<sup>1</sup>ШВЕДЧИКОВА І. О., <sup>2</sup>РОМАНЧЕНКО Ю. А.,

<sup>2</sup>МЕЛКОНОВА І. В.

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну

<sup>2</sup>Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

## УДОСКОНАЛЕННЯ ПЛАСТИНЧАСТОЇ МАТРИЦІ ПОЛІГРАДІЄНТНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА

**Мета.** Конструктивне удосконалення пластинчастої матриці поліградієнтного електромагнітного сепаратора, дослідження розподілу магнітного поля в робочій зоні матриці та визначення експериментальним шляхом ефективності роботи сепаратора.

**Методика.** При проведенні аналізу розподілу магнітного поля в робочій зоні матриці електромагнітного сепаратора використаний метод скінченних елементів, реалізований в модулі Magnet програмного комплексу Infolytica. Розподіл магнітного поля в системі, що містить в якості джерела магнітного поля котушку зі струмом, здійснений в тривимірній постановці. Для оцінювання ефективності вилучення феромагнітних включень із сипкого середовища застосований фізичний експеримент.

**Результати.** Запропонована удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора, на яку отримано охоронний документ. Показано, що удосконалена конструкція забезпечує більш рівномірний розподіл локальних зон високої інтенсивності та неоднорідності магнітного поля в робочому об'ємі матриці сепаратора у порівнянні з базовою конструкцією. За результатами чисельно-польового аналізу розподілу магнітного поля методом скінченних елементів встановлено, що за рахунок конструктивного удосконалення матриці збільшилось максимальне значення магнітної індукції в робочих міжполюсних зазорах та підвищилась ступінь неоднорідності магнітного поля. Результати фізичного експерименту показали, що удосконалена конструкція сепаратора забезпечує підвищення ефективності вилучення металевих включень в порівнянні з базовою конструкцією, передусім, при невисокій концентрації металевих домішок у пробі сипкого матеріалу.

**Наукова новизна.** Отримали подальший розвиток чисельно-польові розрахунки розподілу магнітного поля в магнітопроводі та робочій зоні електромагнітного сепаратора, що дозволило обґрунтувати переваги удосконаленої конструкції сепаратора у порівнянні з базовим варіантом.

**Практична значимість.** Запропонована удосконалена конструкція матриці поліградієнтного електромагнітного сепаратора, призначеного для підвищення ефективності вилучення слабомагнітних та дрібних феромагнітних включень із сипких середовищ в харчовій, фармацевтичній та інших суміжних галузях промисловості.

**Ключові слова:** електромагнітний сепаратор, поліградієнтна матриця, магнітна індукція, ефективність вилучення феромагнітних включень.

**Вступ.** Найбільш ефективною технологією, яка спроможна відокремлювати дрібнодисперсні феромагнітні частинки розміром від 0,005 мм до 1мм, є поліградієнтна магнітна сепарація [1]. У робочих зонах пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації розміщуються матриці з дискретним поліградієнтним середовищем із заданими електромагнітними властивостями і геометричними параметрами елементарних осередків, що складаються з феромагнітних тіл (наприклад, загострених пластин, куль, циліндрів, стрижнів, сталеві вати і т.д.), за рахунок яких відбувається зміна первинного магнітного поля, що підвищує градієнт його напруженості (індукції), і, як наслідок, надійність вилучення дрібнодисперсних феромагнітних часток з матеріалу.

Більшість існуючих пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації призначена для очищення рідинних середовищ (пульпи) або запиленних газів [2, 3]. У той самий час у зв'язку зі зростанням вимог до якості продукції проблема вилучення дрібнодисперсних феромагнітних включень, які виникають в процесі зносу обладнання, є актуальною й для сипких матеріалів: борошна, круп, цукру, крохмалю, комбікорму, керамічної та фармацевтичної сировини тощо. Стандартами встановлені гранично допустимі норми наявності металодомішок у харчових продуктах, наприклад, в борошні – не більше 3 мг/кг сухої речовини, в комбікормі – не більше 20-30 мг/кг [4].

В сучасних умовах для очищення сипких матеріалів від дрібнодисперсних феромагнітних включень знайшли застосування переважно відкриті багатополюсні системи магнітних сепараторів, які є недостатньо ефективними при видаленні феромагнітних домішок розміром до 1 мм [5, 6]. Тому актуальним завданням є вдосконалення пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації для підвищення ефективності вилучення феромагнітних включень із сипких середовищ.

**Постановка завдання.** У роботі ставиться завдання щодо конструктивного удосконалення пластинчастої матриці поліградієнтного електромагнітного сепаратора базової конструкції, розробленого емпіричним шляхом. Для обґрунтування переваг удосконаленої конструкції перед її базовим варіантом необхідно провести теоретичні розрахунки розподілу магнітного поля в робочій зоні матриці та визначити ефективність роботи сепаратора.

**Результати дослідження.** Для забезпечення більш рівномірного розподілу локальних зон високої інтенсивності та підвищення неоднорідності магнітного поля в робочому об'ємі матриці електромагнітного сепаратора запропонована його удосконалена конструкція [7]. Електромагнітний сепаратор удосконаленої конструкції (рис. 1) містить нерухому напівзамкнуту електромагнітну систему, що включає в себе два циліндричних осердя 1, закріплені на осердях намагнічуючі котушки 2, полюса 3, виконані у вигляді пластин зі скошеними кутами і прикріплені до торцевих частин осердь 1, матрицю, встановлену з можливістю зворотного-поступального руху у вертикальній площині в зазорі між полюсами 3 і виконану у вигляді короба прямокутного перетину без дна так, що дві протилежні стінки 4 матриці, паралельні полюсам 3, виконані з феромагнітного матеріалу, а дві інші стінки 5 матриці – з немагнітного, при цьому до феромагнітних стінок 4 матриці зсередини закріплено кілька рядів похило встановлених паралельних феромагнітних пластин 6, 7 з трикутними виступами, зверненими всередину матриці. На відміну від базової конструкції електромагнітного сепаратора суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин 6 і 7 встановлено із чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках.

У робочому режимі намагнічуючі котушки 2 електромагнітного сепаратора підключаються до мережі постійного струму. Під дією сили, що намагнічує, в просторі між полюсами 3 створюється магнітне поле. При цьому полюса-пластини 3 набувають різну полярність, завдяки тому, що обмотки котушок 2 з'єднані зустрічно і магнітні потоки в осердях 1 мають однаковий напрямок. Немагнітний сипучий матеріал разом зі слабомагнітними або дрібнодисперсними феромагнітними частинками подається безпосередньо у середину матриці на похилі паралельні феромагнітні пластини 6, 7.

Наявність односторонніх трикутних виступів і впадин у пластин 6, 7 дозволяє створити в робочому зазорі, утвореному пластинами, магнітне поле високої неоднорідності. Особливо великі значення градієнтів напруженості магнітного поля будуть мати місце у країв трикутних виступів, де створюються електромагнітні сили, достатні для вилучення дрібнодисперсних феромагнітних або слабомагнітних часток. Чергування в суміжних рядах паралельних феромагнітних пластин 6 і 7 трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках створює умови для рівномірного розподілу локальних зон з великою неоднорідністю поля в робочому об'ємі матриці, що забезпечує істотне підвищення надійності вилучення слабомагнітних або дрібнодисперсних феромагнітних тіл.

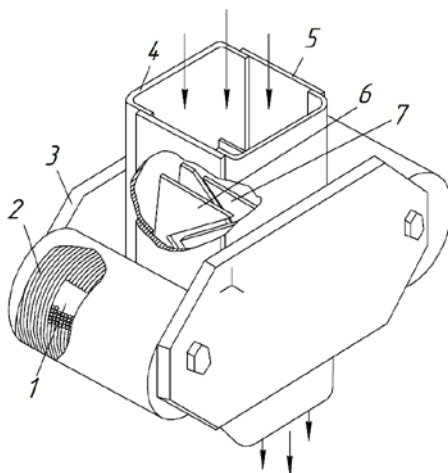


Рис. 1. Електромагнітний сепаратор удосконаленої конструкції

Сипкий матеріал подається на похилі пластини 6, 7 в підвішеному стані. Частинки матеріалу, вдаряючись з краївками пластин, постійно змінюють напрямки свого руху, що сприяє кращому перемішуванню матеріалу. Зважений стан і перемішування матеріалу при проходженні через матрицю полегшують видалення домішок з немагнітного матеріалу. При цьому похилі пластини 6 розташовані під таким кутом, що матеріал, що підлягає сепарації, проходить через кілька робочих зазорів, утворених пластинами 6, що збільшує час знаходження сипучого матеріалу в зоні високоградієнтного поля і сприяє більш надійному витяганню магнітних частинок.

В робочому режимі немагнітна фракція сипучого матеріалу вільно проходить через матрицю, а слабомагнітні або дрібнодисперсні феромагнітні частинки під дією сил магнітного поля "налипають" до феромагнітних пластин 6, накопичуючись на них. Для періодичного розвантаження витягнутих і "залипших" до феромагнітних пластин 6 слабомагнітних або дрібнодисперсних феромагнітних частинок котушки 2 відключаються від мережі. При цьому магнітне поле різко послаблюється і матриця під дією власної ваги переміщується вертикально вниз. У результаті відбувається досить ефективно відпадиння витягнутих частинок.

Таким чином, в удосконаленій конструкції електромагнітного сепаратора суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин матриці встановлено із чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках, що забезпечує більш рівномірний розподіл

локальних зон високої інтенсивності та неоднорідності магнітного поля в робочому об'ємі матриці сепаратора у порівнянні з базовою конструкцією та створює умови для підвищення ефективності вилучення слабomagнітних та дрібних феромагнітних включень крупністю менше 1 мм.

З точки зору структурно-системного підходу [8, 9], удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора разом з його базовим варіантом відносяться до ізомерних композицій, які відрізняються просторовим розміщенням суміжних рядів паралельних феромагнітних пластин.

Розподіл магнітного поля в системі, що містить в якості джерела магнітного поля котушку зі струмом, описується системою диференціальних рівнянь Максвелла, яка для векторного магнітного потенціалу  $A$  має вигляд [10]

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0, \quad (1)$$

де  $\mu_r$  – магнітна проникність матеріалу магнітопроводу, яка, в загальному випадку, є нелінійною функцією магнітної індукції;  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму, яка дорівнює  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mathbf{J}_0$  – вектор щільності струму в перерізі котушки.

Для оцінювання переваг удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора перед базовою проведені дослідження розподілу магнітної індукції в робочій зоні матриці сепаратора. Для вирішення цього завдання був задіяний метод скінченних елементів, реалізований у тривимірній постановці в модулі Magnet програмного комплексу Infolytica [11]. Задавались щільність струму в обмотці – 2,1 А/мм<sup>2</sup> та конструктивні параметри магнітної системи, зокрема: робоча ширина матриці сепаратора – 180 мм, відстань між сусідніми виступами пластин – 100 мм, кут при вершині виступу пластини – 20°, робочий міжполюсний проміжок – 13,6 мм.

При дослідженні приймалося, що магнітопровід електромагнітної системи, включаючи пластини матриці, виготовлений зі магнітом'якої конструкційної сталі. Прийнято припущення про сталість відносної магнітної проникності  $\mu_r$  матеріалу магнітопроводу ( $\mu_r = 1000$ ). Для стінок матриці (позиція 4 на рис. 1) задавався немагнітний матеріал (алюміній). В якості граничних умов на зовнішніх границях розрахункової області використовувалася умова магнітної ізоляції  $A=0$ .

На рис. 2 представлена геометрична модель удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора. Конфігурація основної магнітної системи цього сепаратора така ж сама, як у базової конструкції, але в матриці суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин розташовані із чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках (рис. 2, б).

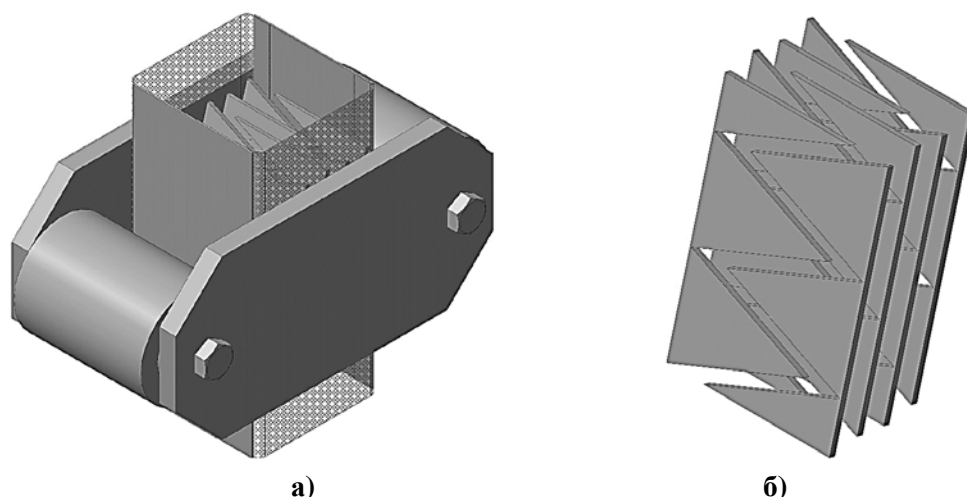


Рис. 2. Геометрична модель удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора:  
а – загальний вигляд; б – пластини матриці

На рис. 3 представлені результати моделювання, отримані для удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора. За результатами моделювання був здійснений розрахунок розподілу магнітної індукції в матриці електромагнітного сепаратора в характерних точках 1-7, розташованих вздовж середньої характерної лінії робочого проміжку для внутрішнього ряду феромагнітних пластин. На рис. 4 ця лінія позначена стрілкою.

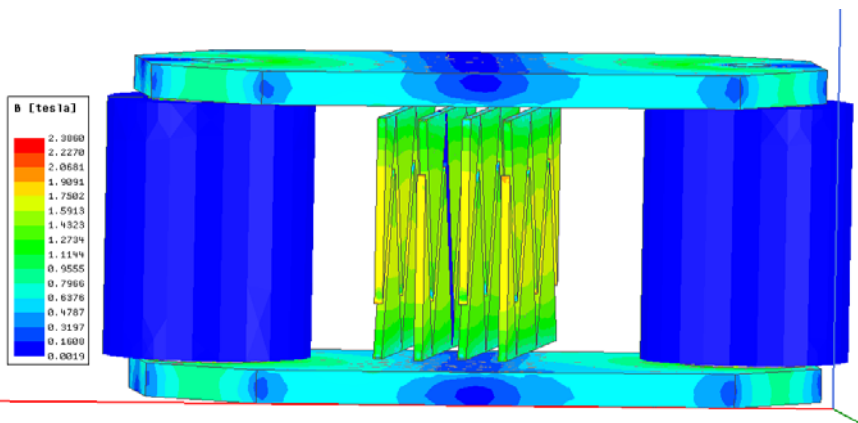


Рис. 3. Результати моделювання удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора

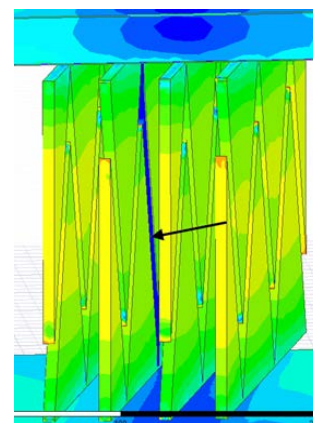


Рис. 4. Розташування характерної лінії

Результати розрахунку розподілу магнітної індукції  $B$  електромагнітного сепаратора удосконаленої конструкції в характерних точках 1-7 для внутрішнього ряду пластин показані на рис. 5. На рис. 5 також здійснено порівняння отриманих під час 3D-моделювання результатів з результатами експериментальних досліджень розподілу магнітної індукції для внутрішнього ряду пластин базової конструкції електромагнітного сепаратора.

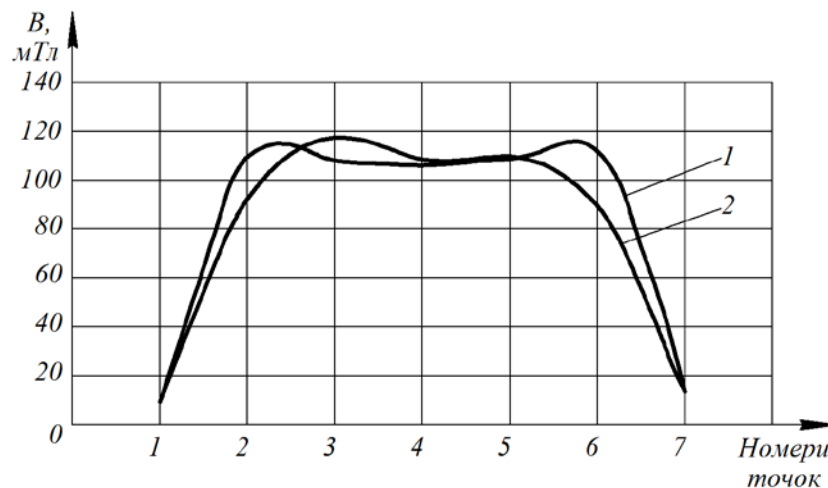


Рис. 5. Розподіл магнітної індукції в характерних точках:

1 – базовий варіант сепаратора; 2 – удосконалений варіант сепаратора

Максимальне значення магнітної індукції (табл. 1) склало, відповідно: для базової моделі – 108,6 мТл, для удосконаленої моделі - 117,7 мТл (відносна похибка – 8,3%). У той самий час, як свідчить рис. 5, ступінь неоднорідності поля в робочому проміжку вище для удосконаленої конструкції пристрою. Для базового варіанту локальний коефіцієнт  $k_i$  неоднорідності в точках 2-6 приймає майже однакове значення (1,33-1,36), що свідчить про однорідний характер магнітного поля, в той самий час для удосконаленої конструкції сепаратора коефіцієнт  $k_i$  змінюється у межах 1,15-1,55.

Визначення інтегрального показника  $K_i$  неоднорідності поля здійснювалось за формулою

$$K_i = (B_{\max} - B_{\min}) / (B_{\max} + B_{\min}), \quad (2)$$

де  $B_{\max}$ ,  $B_{\min}$  – максимальне та мінімальне значення індукції магнітного поля із заданого діапазону, відповідно.

Розрахований за формулою (2) інтегральний показник неоднорідності поля для характерних точок 2-6 склав, відповідно: для базової моделі – 0,9%, для удосконаленої моделі – 14,9%.

Таблиця 1

**Порівняння результатів експериментальних досліджень розподілу магнітної індукції для базової конструкції з результатами чисельних розрахунків для удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора**

Номери характерних точок	Базова конструкція		Удосконалена конструкція		Відхилення за магнітною індукцією, %
	Магнітна індукція, мТл	Локальний коефіцієнт неоднорідності $k_i$ , в.о.	Магнітна індукція, мТл	Локальний коефіцієнт неоднорідності $k_i$ , в.о.	
1	2	3	4	5	6
1	9,1	0,11	10,4	0,137	+14,3

Продовження таблиці 1.

1	2	3	4	5	6
2	108,6	1,36	92,9	1,22	-16,7
3	108,6	1,36	117,7	1,55	+8,3
4	106,6	1,33	108,4	1,43	+1,7
5	108,6	1,36	108,6	1,433	0
6	108,6	1,36	87,1	1,15	-24,7
7	9,1	0,11	6,8	0,089	-33,8

Далі з застосуванням фізичної моделі (рис. 6) були проведені експериментальні дослідження з визначення ефективності роботи удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора та порівняння її з базовою. При цьому всі геометричні та електричні параметри моделі залишалися такими ж, як і для базової конструкції сепаратора (змінювалось тільки розташування паралельних феромагнітних пластин в суміжних рядах). Для визначення ефективності роботи електромагнітного сепаратора були використані проби борошна з різною вихідною концентрацією металевих домішок розміром від 0,01 до 5 мм. Вилучений метал зважували на аналітичних вагах та визначали його концентрацію. Експеримент проводився в умовах сталого температурного режиму.

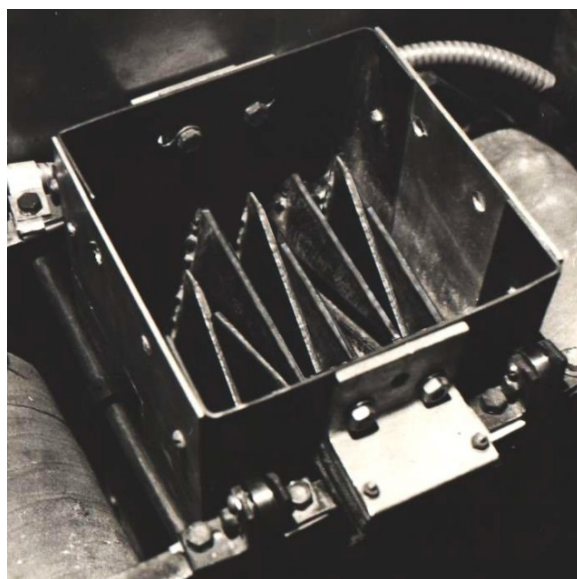


Рис. 6. Розташування пластин в матриці удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора

Результати експерименту наведені у табл. 2, в якій для порівняння також представлені результати з визначення ефективності базової конструкції електромагнітного сепаратора.

Таблиця 2

Результати експерименту з визначення ефективності  
 електромагнітного сепаратора

Маса проби борошна	Загальна маса металевих включень	Маса металевих включень на 1 кг борошна	Вилучено металевих включень:			
			Базова конструкція		Удосконалена конструкція	
кг	г	г	г	%	г	%
6	60	10	54,32	90,54	54,16	90,27
6	30	5	28,66	95,53	27,8	92,7
6	6	1	5,61	93,5	5,72	95,3
6	3	0,5	2,79	93,0	2,85	95,0
6	0,09	0,015	0,079	87,28	0,085	94,4

Як свідчить табл. 2, і базова, і удосконалена конструкції електромагнітного сепаратора забезпечують достатньо високу ефективність вилучення феромагнітних включень (90,3-95,0)% при їх вихідній концентрації (1-10) г на 1 кг продукту. У той самий час при невисокій концентрації металевих домішок у пробі (менше 1 г на 1 кг продукту) більш високу ефективність вилучення металевих включень забезпечує удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора.

**Висновки.** Шляхом проведення чисельно-польового аналізу розподілу магнітного поля в робочих міжполюсних зонах матриці з поліградієнтним середовищем на основі пластин у формі трикутних елементів встановлено, що удосконалена конструкція сепаратора відрізняється більш високим ступенем неоднорідності поля в робочому зазорі. Діапазон зміни локального коефіцієнту  $k_i$  неоднорідності поля для базового варіанту становить 1,33-1,36, що свідчить про однорідний характер магнітного поля, в той самий час для удосконаленої конструкції сепаратора коефіцієнт  $k_i$  змінюється у межах 1,15-1,55. Максимальне значення магнітної індукції для удосконаленої моделі склало 117,7 мТл, що на 8,3% вище, ніж у базового варіанту.

Виходячи з результатів фізичного експерименту, встановлено, що удосконалена конструкції електромагнітного сепаратора забезпечує достатньо високу ефективність вилучення феромагнітних включень (приблизно 90,3-95,0%) при їх вихідній концентрації 1-10 г на 1 кг продукту. При цьому ефективність вилучення слабوماгнітних та дрібних феромагнітних включень крупністю до 1 мм на 7% вище для удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора.

**Література**

1. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials / J. Svoboda // Kluwer Academic Publishers, Boston. – 2004. – P. 99.
2. Wei Ge. Magnetic matrices used in high gradient magnetic separation (HGMS): A review / Ge. Wei, A. Encinas, E. Araujo, Sh. Song // Results in Physics. – 2017. – 7. – P.4278-4286.

**References**

1. Svoboda, J. (2004). *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
2. Ge, W., Encinas, A., Araujo, E., Song, Sh. (2017). Magnetic matrices used in high gradient magnetic separation (HGMS): A review. *Results in Physics*. 7, 278-4286.



3. Ren L. Magnetic field characteristics analysis of a single assembled magnetic medium using ANSYS software / L. Ren, Sh. Zeng, Y. Zhang // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2015. – 25. – P. 479–487.
4. Шевцов А.А. Применение редкоземельных магнитов для извлечения магнитных примесей из минеральных премиксов / А. А. Шевцов, И. Б. Мещеряков, Э. Б. Мещеряков // *Вестник ВГУИТ*. – 2012. – №2. – С. 30-32.
5. Пилов П. И. Сепарация ультрадисперсных слабомагнитных материалов в сверхсильных магнитных полях / П. И. Пилов, В. Ю. Шутов, Н. Г. Кабакова, Л. А. Шатова // *Збагачення корисних копалин*. – 2017. – Вип. 68(109). – С. 133-138.
6. Просвирин В. И. Особенности извлечения ферропримесей из сыпучих сельскохозяйственных материалов / В. И. Просвирин, Е. П. Мастюкин, И. О. Кузнецов, В. Б. Гулевский // *Науковий вісник ТДАТУ*. – 2011. – Вип. 1, Том 1. – С. 75-78.
7. Патент на корисну модель № 103156, Україна, ВОЗС 1/00 (2015.01). Електромагнітний сепаратор / Шведчикова І. О., Романченко Ю. А.; патентовласник: ЧНУ і. В. Даля; заявл. 05.05.15; опубл. 10.12.15, Бюл. № 23. – 5 с.
8. Шведчикова И. А. Исследование закономерностей структурообразования полиградиентных сред / И. А. Шведчикова, Ю. А. Романченко, И. А. Луценко // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – Т. 4, №7 (76). – С. 62 – 67.
9. Шинкаренко В. Ф. Структурная изомерия и ее моделирование в задачах генетического синтеза электромеханических структур / В. Ф. Шинкаренко, А. А. Августинович, М. А. Махновецкая, В. В. Лысак // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 1. – С. 33-36.
10. Подольцев А. Д. Многомасштабное моделирование в электротехнике: моногр. / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – Киев : Институт электродинамики НАН Украины, 2011. – 239 с.
11. Infolytica is now part of Mentor, a Siemens Business [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступа : <https://www.mentor.com/products/mechanical/infolytica>.
3. Ren L., Zeng Sh., Zhang Y. (2015). Magnetic field characteristics analysis of a single assembled magnetic medium using ANSYS software. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25, 479–487.
4. Shevcov, A. A., Meshherjakov, I. B., Meshherjakov, Je. B. (2012). Primenenie redkozemel'nyh magnitov dlja izvlechenija magnitnyh primesej iz mineral'nyh premiksov [The use of rare earth magnets for extraction of magnetic impurities from mineral premixes]. *Vestnik VGUIIT – Messenger VGUIIT*, 2, 30-32. [in Russian].
5. Pilov, P.I., Shutov, V.Yu., Kabakova, N.G., Shatova, L.A. (2017). Separacija ul'tradispersnyh slabomagnitnyh materialov v sverhsil'nyh magnitnyh poljah [Separation of ultradispersed low magnetic materials in superstrong magnetic fields]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn – Mineral processing*, 68(109), 133-138. [in Ukraine].
6. Prosvirin, V. I., Mastyukin, E. P., Kuznetsov, I. O., Gulevskiy, V. B. (2011). Separatsiya ul'tradispersnykh slabomagnitnykh materialov v sverksil'nykh magnitnykh polyakh [Extracting Features of ferroimpurities extraction from bulk agricultural materials] *Naukovyi visnyk TDAU – Scientific Herald TSATU*, 1, 75-78 [in Ukrainian].
7. Shvedchykova, I. O., Romanchenko, Yu. A., inventors (2015). *Elektromahnitnyi separator* [Electromagnetic separator]. Ukrainian patent, no. 103156, 10.12.15.
8. Shvedchykova I.A., Romanchenko Yu.A., Lucenko I.A. (2015). Issledovanie zakonornostej strukturoobrazovanija poligradientnyh sred [Research of regularities of structure formation of polygradient media]. *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij – Eastern-european journal of enterprise technologies*. 4, 7 (76), 62-67 [in Ukrainian].
9. Shinkarenko, V. F., Avgustinovich, A. A., Mahnoveckaja, M. A., Lysak, V. V. (2009). Strukturnaja izomerija i ee modelirovanie v zadachah geneticheskogo sinteza jelektromehanicheskikh struktur [Structural isomerism and its modeling in problems of genetic synthesis of electromechanical structures]. *Jelektrotehnika i jelektromehanika – Electrical engineering and electromechanics*, 1, 33-36 [in Ukrainian].
10. Podol'cev, A. D., Kucherjavaja, I. N. *Mnogomasshtabnoe modelirovanie v jelektrotehnike* [Multiscale modeling in electrical engineering]. (2011). Kiev : Institut jelektrodinamiki NAN Ukrainy [in Ukrainian].
11. Infolytica is now part of Mentor, a Siemens Business. Retrieved from: <https://www.mentor.com/products/mechanical/infolytica>.

**SHVEDCHUKOVA IRYNA**

ResearcherID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6503887672>

<http://www.researcherid.com/rid/O-2765-2018>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3005-7385>

Department of Energy Management and Applied Electronics,  
Kyiv National University of Technologies & Design

**ROMANCHENKO JULIA**

ResearcherID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190438710>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6579-6474>

Department of Electrical Engineering,  
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

**MELKONOVA INNA**

ResearcherID: [https://www.researchgate.net/profile/Inna\\_Melkonova](https://www.researchgate.net/profile/Inna_Melkonova)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6173-1470>

Department of Electrical Engineering,  
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЛАСТИНЧАТОЙ МАТРИЦЫ ПОЛИГРАДИЕНТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА <sup>1</sup>ШВЕДЧИКОВА И. А., <sup>2</sup>РОМАНЧЕНКО Ю. А., <sup>2</sup>МЕЛКОНОВА И. В.

<sup>1</sup> Киевский национальный университет технологий и дизайна

<sup>2</sup> Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

**Цель.** Конструктивное усовершенствование пластинчатой матрицы полиградиентного электромагнитного сепаратора, исследование распределения магнитного поля в рабочей зоне матрицы и определение экспериментальным путем эффективности работы сепаратора.

**Методика.** При проведении анализа распределения магнитного поля в рабочей зоне матрицы электромагнитного сепаратора применялся метод конечных элементов, реализованный в модуле Magnet программного комплекса Infolytica. Распределение магнитного поля в системе, которая содержит в качестве источника магнитного поля катушку с током, осуществлено в трехмерной постановке. Для оценки эффективности извлечения ферромагнитных включений из сыпучих сред применен физический эксперимент.

**Результаты.** Предложена усовершенствованная конструкция электромагнитного сепаратора, на которую получено охранное свидетельство. Показано, что усовершенствованная конструкция обеспечивает более равномерное распределение локальных зон высокой интенсивности и неоднородности магнитного поля в рабочем объеме матрицы сепаратора по сравнению с базовой конструкцией. По результатам численно-полевого анализа распределения магнитного поля методом конечных элементов установлено, что за счет конструктивного усовершенствования матрицы увеличилось максимальное значение магнитной индукции в рабочих межполюсных зазорах и повысилась степень неоднородности магнитного поля. Результаты физического эксперимента показали, что усовершенствованная конструкция сепаратора обеспечивает повышение эффективности извлечения металлических включений по сравнению с базовой конструкцией, прежде всего, при невысокой концентрации металлических примесей в пробе сыпучего материала.

**Научная новизна.** Получили дальнейшее развитие численно-полевые расчеты распределения магнитного поля в магнитопроводе и рабочей зоне электромагнитного сепаратора, что позволило обосновать преимущества усовершенствованной конструкции сепаратора по сравнению с базовым вариантом.

**Практическая значимость.** Предложена усовершенствованная конструкция матрицы полиградиентного электромагнитного сепаратора, предназначенного для повышения эффективности извлечения слабомагнитных и мелких ферромагнитных включений из сыпучих сред в пищевой, фармацевтической и других смежных отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** электромагнитный сепаратор, полиградиентная матрица, магнитная индукция, эффективность извлечения ферромагнитных включений.

---

---

IMPROVEMENT OF LAMINATED MATRICES OF  
POLYGRADIENT ELECTROMAGNETIC SEPARATOR

<sup>1</sup>SHVEDCHUKOVA I. O., <sup>2</sup>ROMANCHENKO J. A., <sup>2</sup>MELKONOVA I.V.

<sup>1</sup> Kyiv National University of Technologies and Design

<sup>2</sup> Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

**Purpose.** Constructional improvement of lamellar matrix of polygradient electromagnetic separator, research of magnetic field distribution in working area of matrix and experimental determination of separator efficiency.

**Methodology.** The finite element method implemented in module Magnet of Infolytica software package for analysis of magnetic field distribution in working area of matrix of electromagnetic separator was used. The distribution of magnetic field in a system that contains a current coil as a source of magnetic field is carried out in a three-dimensional formulation. The physical experiment for evaluation of extraction efficiency of ferromagnetic inclusions from loose medium was applied.

**Findings.** An improved design of electromagnetic separator is proposed, for which a security document is received. It is shown that improved design provides a more uniform distribution of local areas of high intensity and heterogeneity of magnetic field in working volume of separator matrix in comparison with basic design. According to results of numerical-field analysis of magnetic field distribution by application of finite element method, it was set that due to constructional improvement of matrix the maximum value of magnetic induction in working interpolar gaps and inhomogeneity degree of magnetic field increased. The results of physical experiment showed that improved design of separator provides an increase of extraction efficiency of metal inclusions in comparison with basic design, first of all, at a low concentration of metal impurities in sample of bulk material.

**Originality.** For improved design of electromagnetic separator, the distribution of magnetic field in magnetic circuit and working area of device is obtained, which made it possible to substantiate its advantages compared to basic version.

**Practical value.** The numerical-field calculations of magnetic field distribution in magnetic circuit and working area of electromagnetic separator received further development, which made it possible to substantiate advantages of improved design of separator compared to basic version.

**Key words:** electromagnetic separator, polygradient matrix, magnetic induction, extraction efficiency of ferromagnetic inclusions.