

УДК 662.61.537.66.092

## ПЕРСПЕКТИВИ ТА ПРОБЛЕМИ ВПРОВАДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЕХНОЛОГІЇ МОДИФІКАЦІЇ ВУГЛЕЦЬМІСТКОГО ПАЛИВА

**С. Є. Донець, В. Ф. Клепиков, Г. В. Кирик<sup>1</sup>, В. В. Литвиненко, Є. О. Спиридонов<sup>2</sup>**

*Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України,*

*Харків, Україна,*

<sup>1</sup>*Концерн «НІКМАС»,*

*м. Суми, Україна,*

<sup>2</sup>*Філія ДП «АНТОНОВ» Серійний завод «АНТОНОВ»,*

*м. Київ, Україна*

Надійшла до редакції 25.08.2016

Розглянуто напрями використання джерел електрофізичного і радіаційного випромінювання в технологіях переробки вуглецьмісткого палива. Обґрунтовано актуальність даного технологічного напрямку для паливно-енергетичного комплексу України. Показано, що шляхами оптимізації технологій є використання ефектів збудження коливальних станів молекул та урахування експлуатаційної стійкості конструкційних матеріалів. Визначено підходи до впровадження радіаційних технологій в енергетичну галузь.

**Ключові слова:** радіаційні процеси, електронна підсистема, шахтний метан, синтез газ.

## ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА

**С. Е. Донец, В. Ф. Клепиков, Г. В. Кирик, В. В. Литвиненко, Е. А. Спиридонов**

Рассмотрены направления использования источников электрофизического и радиационного излучений в технологиях переработки углеродсодержащего топлива. Обоснована актуальность данного технологического направления для топливно-энергетического комплекса Украины. Показано, что путями оптимизации технологий является использование эффектов возбуждения колебательных состояний молекул и учет эксплуатационной стойкости конструкционных материалов. Определены принципы внедрения радиационных технологий в энергетическую отрасль.

**Ключевые слова:** радиационные процессы, электронная подсистема, шахтный метан, синтез газ.

## THE PERSPECTIVES AND PROBLEMS OF RADIATION PROCESSES IMPLEMENTATION TO THE TECHNOLOGIES FOR MODIFICATION OF CARBON CONTAINING FUEL

**S. E. Donets, V. F. Klepikov, G. V. Kirik, V. V. Lytvynenko, Ye. O. Spirydonov**

The main direction of electrophysical and radiation sources usage for the carbonaceous fuel processing technologies is considered. The relevance of such technological direction for fuel and energy complex of Ukraine is substantiated. It is shown that main approach to the optimization of these technologies is usage the excitation of vibrational state of molecules and taking into account operating resistance of the construction materials. The principles of radiation technologies integration within the energy sector are determined.

**Keywords:** radiation processes, electron shell, mine methane, syngas.

### ВСТУП

На теперішній час є актуальною проблема забезпечення енергетики та промисловості вуглецьмістким паливом, яке за своїми показниками відповідало б проектним потужностям діючих теплових електростанцій,

підприємств металургії та багатотоннажної хімії. З огляду на те, що відбувається виснаження родовищ високосортного вугілля, легкої нафти та газу, постає питання адаптації менш якісної сировини до наявних виробничих та енергетичних потужностей, а також

підвищення рентабельності видобутку вуглеводнів з важкодоступних родовищ. Треба зазначити, що використання низькоякісного палива супроводжується такими негативними наслідками, як забруднення атмосферного повітря оксидами сірки та азоту, пришвидшеним зносом обладнання, низьким рівнем економічної та технологічної ефективності.

Серед широкого спектру технологій, які дозволяють ефективно адаптувати низькосортне вуглецьмістке паливо до існуючих технологічних процесів, суттєве місце обіймають електрофізичні радіаційні процеси, такі як плазмовий підпал повітряно-вугільної суміші [1, 2], радіаційна деструкція компонентів димових газів [3], радіаційно-термічний крекінг важких нафтових фракцій [4], виробництво синтез газу з метану [5] та ін. Таким чином складається певний напрям інтеграції радіаційних процесів до теплової енергетики, який дозволяє зменшити її вплив на довкілля та підвищити техніко-економічні показники. Разом з тим на шляху до впровадження радіаційних процесів виникає комплекс проблем, які властиві для ядерно-радіаційних технологій. Перш за все це проблема обґрунтування зв'язку між одержуваним радіаційно-стимульованим ефектом та параметрами поля опромінення. Важливою є задача стійкості конструкційних матеріалів до дії радіаційних, температурних та хімічних чинників. Також істотною є задача забезпечення норм радіаційної безпеки та забезпечення електромагнітної сумісності з суміжними електронними приладами. Вирішення цієї низки задач дозволить зробити перші кроки до керованості радіаційних процесів, а отже їх інтеграції та впровадження до технологічних схем.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглядаючи питання застосування радіаційних ефектів до процесів переробки вуглецьмісткої сировини, слід зазначити, що для активації молекули достатньо взаємодії з частинкою, що має енергію декількох еВ. Більш високі значення енергії первинного випромінювання потрібні для забезпечення рівномірності розподілу поглиненої дози в опромінену об'єкті. Отже у випадку опромінення газоподібних середовищ, які

мають невисокі значення гальмівної здатності, можна застосовувати джерело з низькими значеннями енергії частинок, наприклад, коронний розряд. Відомо, що в радіаційних технологіях важливим є спосіб передачі дози. За даними роботи [6] імпульсний режим активації найбільш ефективно збуджує коливальні стани молекули, що робить їх реакційно-здатними. Ефективність імпульсного характеру передачі енергії в реакційну зону полягає в створенні нерівноважного стану в плазмі і, відповідно, більш ефективному збудженні молекул, що реагують між собою. Інструментами імпульсного збудження можуть бути імпульсні пучки заряджених частинок та імпульсні електромагнітні поля [7]. В ракурсі зазначених проблем ми розглянемо випадок електрофізичного радіаційного впливу на газовий потік імпульсним коронним розрядом на супутні йому технологічні складові: оцінку просторового розподілу поля енергетичного впливу, стійкість матеріалів електродів до дії експлуатаційних чинників а також напрями впровадження до технологій видобутку та паливопідготовки.

## 1. Формування зони електрофізичного впливу

Застосування електрофізичних активаторів фізико-хімічних перетворень має на меті зниження енергетичного бар'єру  $E_a$  в рівнянні Арреніуса на величину  $\alpha E_v$ , внаслідок чого воно набуває такого вигляду [6]

$$k(T, E) = A \exp\left(-\frac{E_a - \alpha E_v}{RT}\right), \quad (1)$$

де  $k(T, E)$  — константа швидкості хімічної реакції,  $T$  — температура,  $A$  — характеризує частоту зіткнень молекул, що реагують,  $R$  — універсальна газова стала, частота зіткнень молекул, що реагують  $E_v$  — коливальна енергія молекули, набута внаслідок зовнішнього впливу,  $\alpha$  — коефіцієнт використання коливальної енергії. Таким чином, саме завдяки безпосередньому збудженню коливальної енергії шляхом електрофізичного або радіаційного впливу ми можемо очікувати зниження температури реакції, підвищення її ефективності, керованості та збільшення ресурсу роботи робочої камери.

Однією з визначальних характеристик є просторовий розподіл зони радіаційного впливу, оскільки через його нерівномірність не всі молекули в потоці газу одержать необхідну дозу.

При коаксіальній геометрії електродів з застосуванням насадок для загострення поля на внутрішній електрод поле буде радіально-симетричним. Для розрахунку просторового розподілу поля в площині, що проходить через загострюючі вставки та утворюється віссю внутрішнього електроду і твірною зовнішнього у випадку, коли один електрод заземлений, а інший має деякий потенціал скористаємося методом інтегральних рівнянь [8].

Інтегральне рівняння Фредгольма першого роду для поверхневої густини заряду може бути представлено у вигляді:

$$\frac{1}{\varepsilon\pi} \int \sigma(M) \sqrt{\frac{r_M}{r_P}} \cdot k \cdot K(k) dl_M = \begin{cases} \varphi = 0, & P \in l_1 \\ \varphi = U_0, & P \in l_2 \end{cases}, (2)$$

де  $r_M, r_P, z_M, z_P$  — відповідно циліндричні координати поточної точки і точки спостереження;

$\varphi$  — потенціал електроду, якому належить точка  $P$ ;

$dl_M$  — елемент контура меридіанного перетину електродів.

$K(k)$  — повний еліптичний інтеграл першого роду модуля  $k$ . Він представляється у вигляді:

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\vartheta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \vartheta}}, (3)$$

$$k = 2 \sqrt{\frac{r_M r_P}{(r_M + r_P)^2 + (z_P - z_M)^2}}.$$

Далі приведемо це інтегральне рівняння до безрозмірного вигляду, використовуючи як базові величини:

$$r_0 = R_H,$$

$$\varphi_0 = U_0.$$

Тоді знайдемо, що

$$\sigma_0 = \frac{2\varepsilon U_0}{R_H}.$$

Остаточне інтегральне рівняння в безрозмірному вигляді:

$$\frac{1}{\pi} \int \sigma^*(M) \sqrt{\frac{r_M^*}{r_P^*}} \cdot k \cdot K(k) dl_M^* = \begin{cases} \varphi^* = 0, & P \in l_1 \\ \varphi^* = 1, & P \in l_2 \end{cases}. (4)$$

Далі перетворюємо вихідне формулювання завдання в чисельне. При цьому інтегральне рівняння необхідно перетворити в систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) [9]. Розіб'ємо контури меридіанних перетинів електродів на елементи з центрами в точках  $M_k (k = 1, 2, 3 N), N$  — загальне число елементів. В межах кожного елемента поверхнева щільність заряду вважається постійною і рівною  $\sigma(M_k)$ . СЛАР, що апроксимує рівняння (4), має вигляд:

$$\sum_{k=1}^{k=N} a_{ik} \tilde{\sigma}(M_k) = F(P_i), (5)$$

де

$$a_{ik} = \int_{\Delta_k} K(P_i, M) dl_M, (6)$$

$$\tilde{\sigma}(M_k) = \sigma^*(M_k) \sqrt{r_M^*},$$

$$K(P_i, M) = k \cdot K(k),$$

$$F(P_i) = \varphi^* \cdot \sqrt{r_P^*},$$

$K(P_i, M)$  — ядро інтегрального рівняння;  $\Delta_k$  —  $k$ -ий елемент контура меридіанного перерізу;  $F(P_i)$  — права частина.

Вважаємо, що крапка  $P_i$  в рівняннях (5) і (6) послідовно займає положення центрів елементів  $\Delta_k$ , тоді в деякий момент, задаючи матриці лівій частині СЛАР, ядро рівняння матиме особливість логарифмічного вигляду, пов'язану із збігом точок  $P$  і  $M$  ( $K(k)$  необмежено зростає при  $k \rightarrow 1$ ). Відомо, що при  $k \rightarrow 1$

$$\int_{\Delta_k} K(k) dl_M \approx \Delta_k \ln \frac{16r_P \cdot e}{\Delta_k}.$$

Таким чином, коефіцієнти матриці лівій частини розраховуються по формулах:

$$a_{ik} = \begin{cases} k \cdot K(k) \cdot \Delta_k, & i \neq k \\ \Delta_k \ln \frac{16r_P \cdot e}{\Delta_k}, & i = k \end{cases}. (7)$$

Розв'язуючи (6) знайдемо щільність розподілу заряду, по значеннях якої знайдемо напруженість електричного поля.

Для того, щоб розрахувати значення напруженості електричного поля в проміжку необхідно скористатися зв'язком між потенціалом і напруженістю

$$\vec{E} = -\nabla\phi. \quad (8)$$

У циліндричних координатах, з урахуванням того, що форма електродів представляє тіло обертання навколо своєї осі, структура вектора напруженості має вигляд  $\vec{E}(E_r, 0, E_z)$ , тоді

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial r_p} \vec{1}_r + \frac{\partial}{\partial z_p} \vec{1}_z. \quad (9)$$

Знайдемо окремо кожен із складових напруженості поля:

$$E_r = -\frac{1}{\pi_i} \int \sigma(M) \frac{d}{dr_p} \left( \sqrt{\frac{r_M}{r_p}} \cdot k \cdot K(k) \right) dl_M, \quad (10)$$

$$E_z = -\frac{1}{\pi_i} \int \sigma(M) \sqrt{\frac{r_M}{r_p}} \frac{d}{dz_p} (k \cdot K(k)) dl_M. \quad (11)$$

Для обчислення похідних від еліптичного інтегралу скористаємося наступними відомими співвідношеннями:

$$\frac{dK(k)}{dk} = \frac{E(k)}{k(1-k^2)} - \frac{K(k)}{k}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial k}{\partial z_p} = -\frac{(z_p - z_M)k^3}{4r_p \cdot r_M}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial k}{\partial r_p} = \frac{k^3}{4r_p} \left( \frac{2}{k^2} - \frac{r_p}{r_M} - 1 \right), \quad (14)$$

де  $E(k)$  — повний еліптичний інтеграл другого роду модуля  $k$ .

Далі можна знайти модуль значення напруженості електричного поля в проміжку між електродами, як модуль вектора по складових:

$$E = \sqrt{E_r^2 + E_z^2}. \quad (15)$$

Використовуючи раніше визначені певні базисні величини знайдемо, що:

$$E_\sigma = \frac{U_0}{R_n}. \quad (16)$$

Далі врахуємо, що розподіл заряду по поверхні електродів не є безперервною функцією від координат, а є дискретною величиною, яка рівномірно розподілена на елементарних ділянках.

Оскільки поверхня електродів утворює еквіпотенціали, то силові лінії перпендикулярні до них. Тоді для визначення напруженості на ділянці  $\Delta l_i$  використаємо формулу:

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\epsilon_0}, \quad (17)$$

де  $\epsilon_0$  — діелектрична проникність вакууму.

У безрозмірному вигляді вираз (17) має вигляд

$$E_i^* = 2 \cdot \sigma_i^*. \quad (18)$$

Як видно з рис. 1, напруженість поля буде найвищою в околі електродних насадок, але згідно цих розрахунків ми визначимо область, де напруженість є достатньою для активації молекул, і, таким чином, визначимо область ефективної активації.

Значення напруженості поля повинно бути достатнім для створення коронного розряду при подачі певної газової суміші і, відповідно здійснення іонізації в приелектродній області з генерацією частинок, енергія яких перевищує  $E_v$ , що здатно підвищити константу швидкості реакції. Викладена процедура

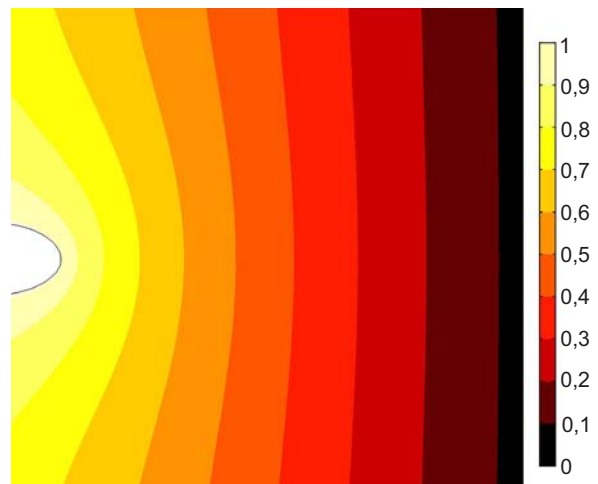
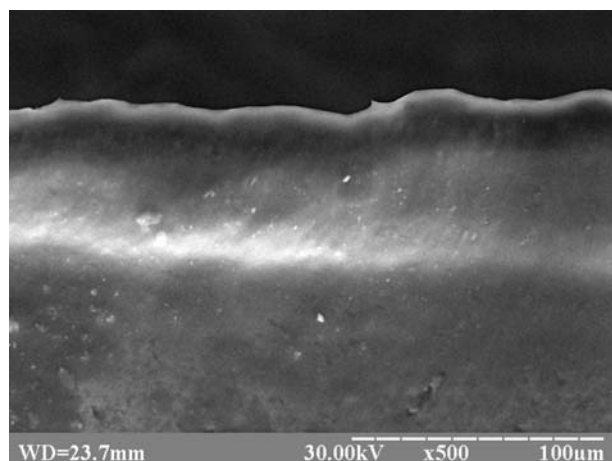


Рис. 1. Розподіл напруженості поля в околі приелектродної вставки (розрахунок в безрозмірних одиницях)

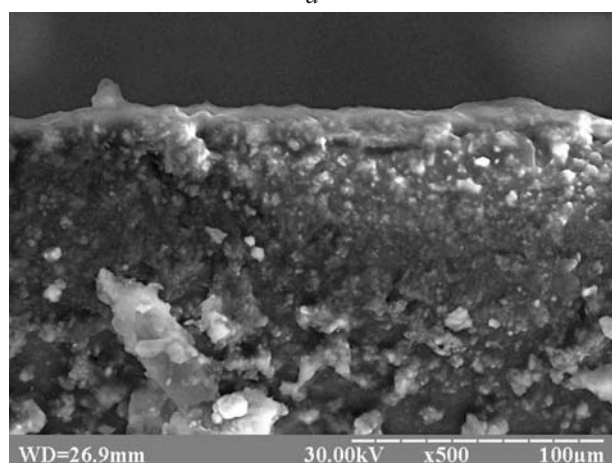
розрахунку дозволяє визначати розподіл напруженості поля при певних значеннях розмірів камери обробки, радіусу зовнішнього електроду, геометричних розмірів електродних насадок, відстані між ними.

## 2. Стійкість матеріалів електродної системи

Слід також брати до уваги, що в процесі експлуатації робоча частина електроду піддається впливові експлуатаційних чинників, через що відбувається винос матеріалу з поверхні електроду і, відповідно, зміна напруженості поля. Особливо інтенсивно це може відбуватись на початковій стадії, коли залишаються технологічні нерівності внаслідок контакту з різальним інструментом. Нами були досліджені зразки фрагментів зовнішньої частини електродів, які виготовлялись з алюмінію. Як видно з рис. 2 відбувається вирівнювання поверхні внаслідок більш інтенсивного електроерозійного виносу



*a*



*б*

Рис. 2. РЕМ знімки поверхонь електродів: *a* — початковий стан; *б* — після роботи протягом 5 годин в камері коронного розряду

матеріалу в місцях загострення напруженості електричного поля.

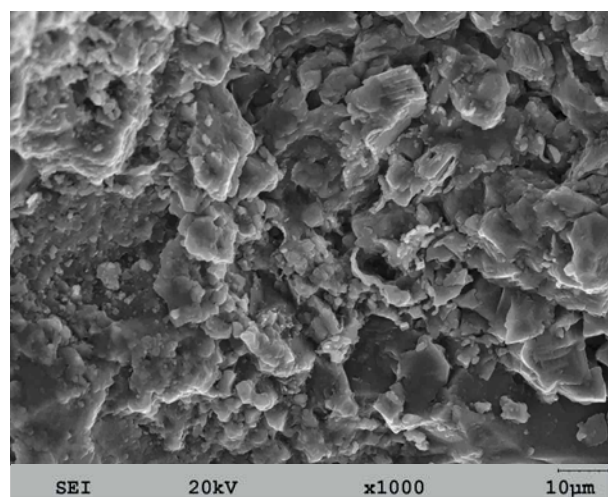
Емісія матеріалу електроду при цьому відбувається переважно по границі зерна, про що свідчить розвиненість поверхні. Це зумовлено в свою чергу відмінностями в значеннях електропровідності на границі і в об'ємі зерен. Напрямом підвищення стійкості до електроерозії може бути обробка сильноточковим електронним пучком [10, 11]

## 3. Шляхи інтеграції до існуючих технологічних процесів

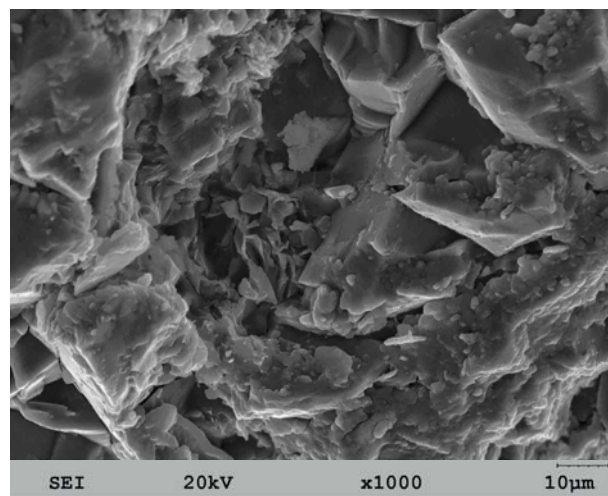
Проблема виробництва модифікованого вуглецьмісткого палива, в тому числі з застосуванням електрофізичних інструментів інтенсифікації, має постійну складову, яка полягає в обґрунтуванні стратегічної економічної доцільності. Тобто їх промислове впровадження в великих масштабах одночасно стикається з фактом мінливості цін на ринку вуглеводневого палива і відповідно коливання точки прибутковості самої технології. У зв'язку з цим природним шляхом їх інтеграції могло б бути сполучення з новими технологіями видобутку та одержання вуглеводневої сировини. До таких технологій належить, наприклад, видобуток шахтного метану [12]. Слід зазначити, що окрім енергетичної цінності, шахтний метан становить загрозу для довкілля, оскільки його внесок в парниковий ефект в 20 разів більш за вуглекислий газ а також є одним з визначальних чинників для безпеки гірничого виробництва. Слід зазначити, що синтез-газ може також застосовуватись для процесів відновлення в металургії, заміщуючи доменне виробництво [13]. В той же час його поклади в Україні є достатніми для масштабних обсягів освоєння. Промислове впровадження даної технології передбачає наявність комплексу обладнання для стимулювання виділення метану з підземних покладів вугілля та прилеглої до вугільних пластів породи. Грунтуючись на тому, що пропонувані технологічний цикл повинен виключати навантаження на довкілля хімічними сполуками, стимулювання виділення метану повинно відбуватись тільки через створення полів повітряного або газового тиску,

які потім трансформуються в розподілені механічні навантаження на породу [12, 14]. При цьому значення тиску будуть залежати від структури, зокрема, пористості породи. Так, відомо, що пісковик, в залежності від глибини залягання має відмінні значення пористості а також метаноємності [15]. На рис. 3 показано РЕМ знімки зламів зразків породи пісковика, відібраних з глибин 500 м та 600 м. Можемо спостерігати суттєву відмінність зеренної будови в наведених зразках, що потребує дослідження особливостей метановіддачі на кожному горизонті. З роботи [16] відомо, що кінетика виходу метану залежить від співвідношення закритих та відкритих пор, температури та вологості мінералу.

Зазначимо, що радіаційні методи також є ефективним інструментом дослідження



*a*



*б*

Рис. 3. РЕМ знімки зразків пісковика, видобутого з глибини: *a* — 500 м; *б* — 600 м

поведінки гірських порід в умовах дії на них зовнішніх чинників, як це, наприклад, описано в роботі [17]. Таким чином, радіаційні технології можна застосовувати для попереднього дослідження елементів породи, з яких передбачається одержувати метан.

## ВИСНОВКИ

Імпульсні джерела електрофізичного радіаційного впливу дозволяють перевести на якісно новий рівень технології модифікації вуглецьмісткого палива та підвищення рентабельності видобутку з нетрадиційних родовищ вуглеводнів. Проектування камер для радіаційної обробки паливної вуглецево-водневої сировини потребує урахування стійкості матеріалів до дії експлуатаційних чинників. Одним з перспективних підходів до впровадження цих технологій в виробництво в умовах України доцільно здійснювати на установках з видобутку шахтного метану.

Робота виконана при підтримці проекту НАН України Об. 5.6. –16.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Мессерле В. Е., Устименко А. Б. Радиационно-плазменная технология переработки угля // KazNU Buletin. Chemical series. — 2012. — № 4(68). — С. 107–112.
2. Котляров О. Л., Яценко В. П. Числове дослідження плазмохімічної обробки пилу низько реакційного вугілля перед спалюванням у топці котла // Проблеми загальної енергетики. — 2007. — № 16. — С. 87–95.
3. Chmielewski A. G. Technological development of EB flue gas treatment based on physics and chemistry of the process // Radiat. Phys. Chem. — 1995. — No. 46. — P. 1057–1062.
4. Клепиков В. Ф., Базалеев М. И., Литвиненко В. В., Касаткин Ю. О., Молев О. С., Корда В. Ю., Прохоренко С. М., Робук В. М. Розробка та впровадження радіаційних технологій модифікації твердих тіл та обробки конденсованих середовищ // Східно-європейський журнал передових технологій. — 2013. — Т. 2/5(62). — С. 4–9.
5. Boyko M. I., Yevdoshenko L. S., Zarochentsev O. I., Ivanov V. M., Koniaga S. F. The high-voltage complex with two high-frequency pulse generators for regulating the modes of corona discharges and barrier ones during a treatment

- of gas hydrocarbons // *Technical Electrodynamics*. — 2012. — No. 2. — P. 105–106.
6. Пушкарев А. И., Ремнев Г. Е. Прикладная плазмохимия: учебное пособие — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 258 с.
  7. Boyko M. I., Bortsov A. V., Yevdoshenko L. S., Ivanov V. M. Generators of high-voltage pulses with a repetition rate of up to 50,000 pulses per second // *Instruments and experimental techniques*. — 2011. — No. 4. — P. 92–101.
  8. Sadiku, Matthew N. O. Numerical techniques in electromagnetics. — N. -Y.: CRC press, 2001. — 750 p.
  9. Тозони О. В. Расчет электромагнитных полей на вычислительных машинах. — К.: Техніка, 1967. — 252 с.
  10. Batracov A. B. et al. The particularities of the high current relativistic electron beams influence on construction materials targets // *Problems of Atomic Science and Technology. ser. Nucl. Phys. Inv.* (61). — 2013. — No. 6(88). — P. 225–229.
  11. Kobets A. G., Horodek P. R., Lytvynenko V. V., Startsev O. A., Lonin Yu. F., Ponomarev A. G., Uvarov V. T. Melting effect on high current electron beam on aluminum alloy 1933 // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. — 2015. — Vol. 51, No. 5. — P. 478–482.
  12. Булат А. Ф., Кирик Г. В. Энергоэффективные компрессорные машины в процессах добычи угля и метана // *Геотехнічна механіка*. — 2014. — № 115. — С. 3–15.
  13. Tsvetkov Yu. V. Plasma metallurgy: current state, problems and prospects // *Pure Appl. Chem.* — 1999. — Vol. 71, No. 10. — P. 1853–1862.
  14. Булат А. Ф., Кирик Г. В., Шевченко В. Г. Комплексное решение проблем безопасности при разработке месторождений углеводородов с применением компрессорного оборудования // *Геотехнічна механіка*. — 2014. — № 119. — С. 3–14.
  15. Абрамов Ф. А., Шевелев Г. А. Свойства выбросоопасных песчаников как породы-коллектора. — К.: Наук. думка, 1972. — 98 с.
  16. Стариков Г. П., Завражин В. В., Мельников Д. В., Бойко А. Н. Сорбционные исследования выбросоопасного песчаника // *Физико-технические проблемы горного производства: 36. науч. пр.* — 2009. — Вып. 12. — С. 108–112.
  17. Bazaleev N. I., Banduryan B. B., Ivankina T. I., Klepikov V. F., Lytvynenko V. V., Lonin Yu. F., Nikitin A. N., Ponomarev A. G., Robuk V. N., Uvarov V. V., Uvarov V. T. Simulating the radiation transformations in rocks: potential media for radioactive waste disposal // *Physics of Particles and Nuclei Letter*. — 2009. — Vol. 6, No. 5. — P. 417–423.
- ## LITERATURA
1. Messerle V. E., Ustimenko A. B. Radiacionno-plazmennaya tehnologiya pererabotki uglya // *KazNU Buletin. Chemical series*. — 2012. — No. 4(68). — P. 107–112.
  2. Kotlyarov O. L., Yacenko V. P. Chislove doslidszhennya plazmohimichnoї obrobki pilu niz'ko reakciynogo vugillya pered spaluyvannyam u topci kotla // *Problemi zagal'noї energetiki*. — 2007. — No. 16. — P. 87–95.
  3. Chmielewski A. G. Technological development of EB flue gas treatment based on physics and chemistry of the process // *Radiat. Phys. Chem.* — 1995. — No. 46. — P. 1057–1062.
  4. Klepikov V. F., Bazaleev M. I., Litvinenko V. V., Kasatkin Yu. O., Molev O. S., Korda V. Yu., Prohorenko Є. M., Robuk V. M. Rozrobka ta vprovadzhennya radiacijnih tehnologij modifikacii tverdih til ta obrobki kondensovanih sereдовisch // *Shidno-evropejs'kij zhurnal peredovih tehnologij*. — 2013. — Vol. 2/5(62). — P. 4–9.
  5. Boyko M. I., Yevdoshenko L. S., Zarochentsev O. I., Ivanov V. M., Koniaga S. F. The high-voltage complex with two high-frequency pulse generators for regulating the modes of corona discharges and barrier ones during a treatment of gas hydrocarbons // *Technical Electrodynamics*. — 2012. — No. 2. — P. 105–106.
  6. Pushkarev A. I., Remnev G. E. Prikladnaya plazmohimiya: uchebnoe posobie. — Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2011. — 258 p.
  7. Boyko M. I., Bortsov A. V., Yevdoshenko L. S., Ivanov V. M. Generators of high-voltage pulses with a repetition rate of up to 50,000 pulses per second // *Instruments and experimental techniques*. — 2011. — No. 4. — P. 92–101.
  8. Sadiku, Matthew N. O. Numerical techniques

- in electromagnetics. — N. -Y.: CRC press, 2001. — 750 p.
9. Tozoni O. V. Raschet elektromagnitnyh polej na vychislitel'nyh mashinah. — K.: Tehnika, 1967. — 252 p.
  10. Batracov A. B. et al. The particularities of the high current relativistic electron beams influence on construction materials targets // Problems of Atomic Science and Technology. ser. Nucl. Phys. Inv. (61). — 2013. — No. 6(88). — P. 225–229.
  11. Kobets A. G., Horodek P. R., Lytvynenko V. V., Startsev O. A., Lonin Yu. F., Ponomarev A. G., Uvarov V. T. Melting effect on high current electron beam on aluminum alloy 1933 // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. — 2015. — Vol. 51, No. 5. — P. 478–482.
  12. Bulat A. F., Kirik G. V. Energoeffektivnye kompressornye mashiny v processah dobychi uglja i metana // Geotekhnichna mehanika. — 2014. — No. 115. — P. 3–15.
  13. Tsvetkov Yu. V. Plasma metallurgy: current state, problems and prospects // Pure Appl. Chem. — 1999. — Vol. 71, No. 10. — P. 1853–1862.
  14. Bulat A. F., Kirik G. V., Shevchenko V. G. Kompleksnoe reshenie problem bezopasnosti pri razrabotke mestorozhdenij uglevodorodov s primeneniem kompressornogo oborudovaniya // Geotekhnichna mehanika. — 2014. — No. 119. — P. 3–14.
  15. Abramov F. A., Shevelev G. A. Svoystva vybrosoopasnyh peschanikov kak porodykolektora. — K.: Nauk. dumka, 1972. — 98 p.
  16. Starikov G. P., Zavrzhin V. V., Mel'nikov D. V., Bojko A. N. Sorbcionnye issledovaniya vybrosoopasnogo peschanika // Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva: Zb. nauk. pr. — 2009. — Vup. 12. — P. 108–112.
  17. Bazaleev N. I., Banduryan B. B., Ivankina T. I., Klepikov V. F., Lytvynenko V. V., Lonin Yu. F., Nikitin A. N., Ponomarev A. G., Robuk V. N., Uvarov V. V., Uvarov V. T. Simulating the radiation transformations in rocks: potential media for radioactive waste disposal // Physics of Particles and Nuclei Letter. — 2009. — Vol. 6, No. 5. — P. 417–423.