

Охрана окружающей среды

УДК 544.342-13
DOI: 10.33070/etars.3.2019.07

**Сімейко К.В.¹, канд. техн. наук, Купріяничук С.В.²,
Степаненко Ю.М.³, канд. физ.-мат. наук, Івачкін Я.О.¹,
Саєнко С.Ю.⁴, докт. техн. наук, Улибкіна К.А.⁴**

¹ **Інститут газу НАН України, Київ**

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: k_simeyko@ukr.net

² **Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль**

вул. Кірова, 36а, 07270 Чорнобиль, Київська обл., Україна, e-mail: kupriianchuk.s@gmail.com

³ **Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ**

просп. Науки, 47, 03028 Київ, Україна, e-mail: stepofy@gmail.com

⁴ **Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків**

вул. Академічна, 1, 61108 Харків, Україна, e-mail: sayenko@kipt.kharkov.ua

Дослідження процесу іммобілізації зольних залишків об'єктів енергетики в електротермічному псевдозрідженому шарі

Співробітниками Інституту газу НАН України спільно зі співробітниками Інституту проблем безпеки АЕС НАН України, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» та Інституту ядерних досліджень НАН України здійснюються дослідження з розроблення технології іммобілізації радіоактивних матеріалів, що утворюються при експлуатації та аваріях на об'єктах енергетики. Як модель радіоактивної золи автори використовували зольні залишки вугільної теплоенергетики, які потенційно можуть бути джерелами іонізуючого випромінювання. В результаті серії дослідів на спеціально створеній лабораторній установці з електротермічним псевдозрідженим шаром вдалося нанести піровуглецеве покриття на даний тип золи. Після покриття частинок золи піровуглецем іонізуюче β -випромінювання знизилося приблизно на 30–35 %, α -активність зменшилася на 28 %. Термічний коефіцієнт корисної дії процесу піролізу метану на даній установці у середньому складає 8–12 %. Проведені дослідження вказують на перспективність іммобілізації зольних залишків атомної та теплової енергетики капсулюванням їх піровуглецем у електротермічному псевдозрідженому шарі. *Бібл. 9, рис. 4, табл. 1.*

Ключові слова: екологія енергетики, зола, піровуглець, іммобілізація.

Для деяких різновидів кам'яного вугілля характерний вміст розсіяних радіоактивних ізотопів урану, торію і калію. Під час спалювання вугілля велика частина урану, торію та продуктів їх розпаду виділяється з вихідної матриці вугілля та розподіляється між газовою та твер-

дою фракціями. Крім димових газів, до основних джерел надходження радіонуклідів у навколишнє середовище при спалюванні вугілля на електростанціях відносять розповсюдження частинок вугілля з відкритих майданчиків: вуглесховищ та золовідвалів. Джерела [1–3] вказують на акту-

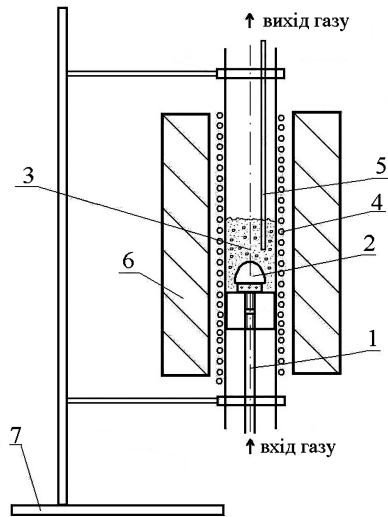


Рис.1. Схема реактору лабораторної установки з ЕТПШ для проведення процесу іммобілізації золи вугільної ТЕЦ: 1 – газопровідна трубка; 2 – газорозподільний ковпачок; 3 – псевдозріджений шар з частинок золи; 4 – нагрівач; 5 – термопара.

альність цієї проблеми у багатьох країнах, де функціонує вугільна теплоенергетика.

Одним з найбільш ефективних методів для переробки та кондиціонування горючих твердих радіоактивних відходів (ТРВ) є їх спалювання. Установки зі спалювання ТРВ працюють в Україні, Росії, Франції, Канаді, Японії, Німеччині, Швейцарії та інших країнах. Процес спалювання ТРВ дає можливість зменшити їх об'єм у 20–100, а масу у 10–20 разів. У більшості випадків температура спалювання досягає 900–1000 °С. У результаті спалювання ТРВ утворюється зола, яка містить до 90 % усіх радіоактивних елементів. Основна проблема полягає у летючості золи, що робить проблема-

тичним її тривале зберігання. Для вирішення цієї проблеми золу цементують, оскловують або вводять до склокерамічної матриці [4]. Альтернативною наведеним вище методикам іммобілізації радіоактивної золи може бути використання процесу газозрідженого ущільнення її піровуглецем [5].

Головним завданням даної роботи було дослідити процес іммобілізації зольних залишків вугільної ТЕЦ капсулюванням їх піровуглецем під час піролізу вуглеводневих газів у електро-термічному псевдозрідженому шарі (ЕТПШ).

У рамках запропонованого підходу було використано методи дослідження, що ґрунтуються на експериментальному визначенні можливості іммобілізації золи капсулюванням її піровуглецем у реакторі з ЕТПШ та подальшим дослідженням обробленого матеріалу на предмет зменшення іонізуючого випромінювання. Як модель золи із ТРВ використовували зольний залишок вугільної ТЕЦ. Мікроскопічний аналіз проводили за допомогою такого обладнання: скануючий електронний мікроскоп з енергодисперсійним мікроаналізатором РЕМ 106И, просвічуючий електронний мікроскоп ПЕМ-У, рентгенофлуоресцентний експрес-аналізатор EXPERT 3L. Визначення щільності іонізуючого випромінювання проводили за допомогою таких приладів: радіометр LB-2046, дозиметр-радіометр МКС-07 «Пошук». Для аналізу ефективності теплових процесів та режимів роботи використовуються закони термодинаміки та методи теорії тепломасообміну.

Для проведення процесу капсулювання золи з ТЕЦ була створена лабораторна установка з ЕТПШ (рис.1).

Реактор працює таким чином. Через газопровідну трубку 1 на газорозподільний ковпачок 2 подають суміш метану та азоту, що створює псевдозріджений шар 3 з частинок золи з ТЕЦ. Реакційну зону реактора нагрівають пропусканням струму через нікель-хромову обмотку (нагрівач) 4, температуру вимірюють термометром 5.

Принципова технологічна схема установки наведена на рис.2.

Установка працює таким чином. Відкриваючи редуктор на балоні 1 та вентиль 2, через ротаметр 3 для створення псевдозрідженого шару та інертної атмосфери подають азот у реактор 5. Після проходження реактора 5 через газопровідну трубку 6 азот виходить на витяжку 7. Вмикаючи вимикач 8, через силовий трансформатор 9 подають напругу на нагрівач реактора 5. Після виходу на температурний режим з магістрального газопроводу 10, відкриваючи

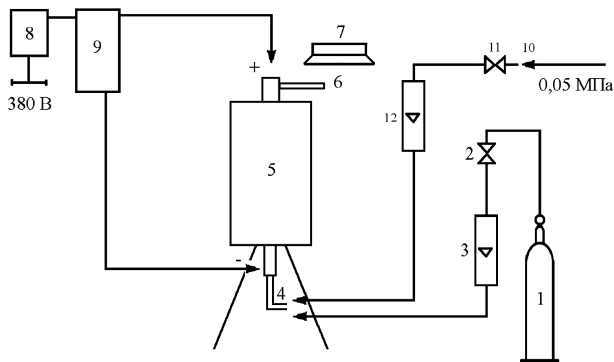


Рис.2. Принципова технологічна схема лабораторної установки для проведення процесу іммобілізації золи вугільної ТЕЦ: 1 – балон з азотом; 2, 11 – вентилі; 3, 12 – ротаметри; 4 – газопровідна трубка; 5 – реактор з ЕТПШ; 6 – трубка для виходу газу; 7 – витяжка; 8 – вимикач; 9 – силовий трансформатор.

вентиль 11, через ротаметр 12 та газопровідну трубку 4 для проведення процесу піролізу в реакторі 5 подають метан, що поступово заміщує азот. Витрату азоту та метану вимірюють ротаметрами 3 та 12.

Робочі параметри процесу іммобілізації золи вугільної ТЕЦ наведені нижче:

Маса завантаженої золи	–	0,2 кг
Електричний струм між електродами	–	випрямлений
Сила струму	–	0–35 А
Напруга	–	30–55 В
Температура процесу	–	1073–1473 К
Тривалість обробки матеріалу	–	1 год
Витрата азоту	–	0,002 м ³ /год
Витрата метану	–	0,07–0,1 м ³ /год

У результаті серії експериментів нанесено піровуглецеве покриття на даний тип золи. З рис.3 можна зазначити, що зола змінила свою структуру завдяки капсулюванню піровуглецем. Він практично повністю покриває поверхню частинок золи. При більшому збільшенні можна відмітити фрагмент необробленої частини золи.

Значення іонізуючого випромінювання

Матеріал	α -активність, срс	β -випромінювання, частинок на см ² /с	γ -випромінювання, мкЗв/год
Вихідна зола	$7,78 \cdot 10^{-3}$	10–14	фонові значення
Зола, покрита піровуглецем	$5,56 \cdot 10^{-3}$	6–8	фонові значення

Примітка. Піровуглець – 13 % (мас.)

Результати вимірювання іонізуючого випромінювання наведені у таблиці.

Як видно з таблиці, після покриття частинок золи піровуглецем іонізуюче β -випромінювання знизилося приблизно на 35–40 %, α -активність зменшилася на 28 %.

Під час проведення процесу частина вихідної золи була винесена з реактора потоком метану. У подальшому цю проблему можна буде вирішити встановленням мембран, які пропускають лише газову фазу.

Для моделювання необхідної кількості теплоти для проведення процесу піролізу метану використовують рівняння, яке створене на основі теплового балансу:

Група	Вихідна зола	Зола, покрита піровуглецем (піровуглець – 13 % (мас.))	Вихідна зола (режим просвічування)	Зола, покрита піровуглецем (піровуглець – 13 % (мас.)) (режим просвічування)
I				
II				
III				

I

II

III

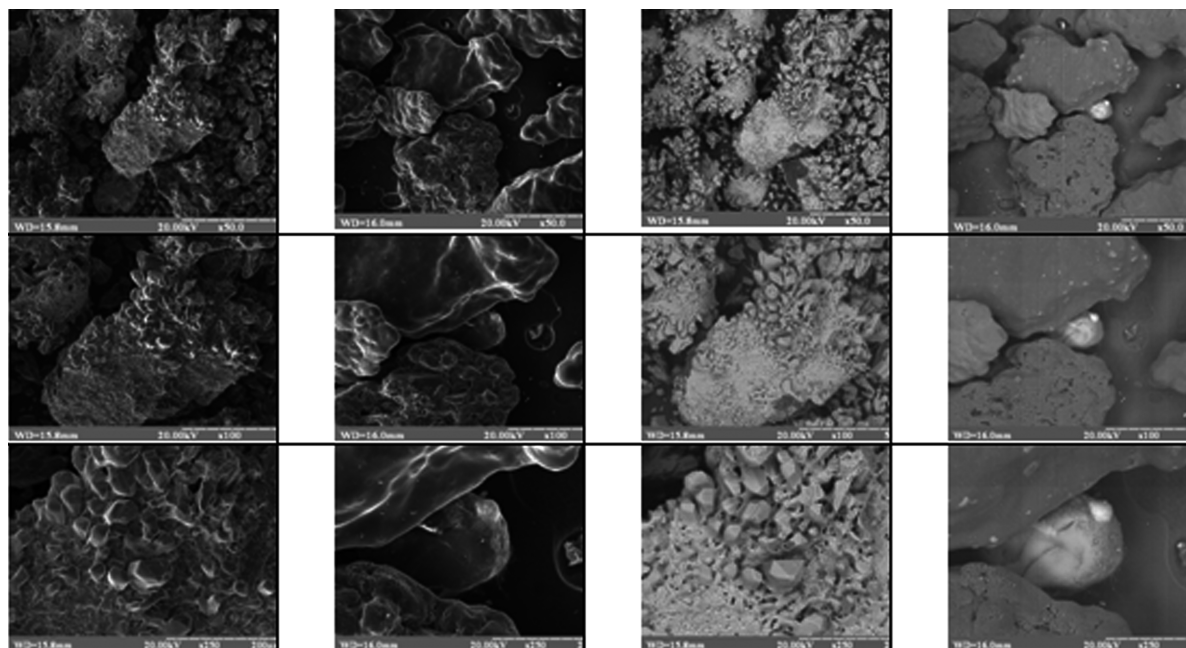


Рис.3. Результати мікроскопічного дослідження процесу іммобілізації зольних залишків вугільної ТЕЦ. Збільшення зразків: групи I – 50; II – 100; III – 250.

$$\begin{aligned}
Q_{0Tz\text{розр}} = & 2[G_A C_A (T_z) \cdot (T_z - T_{0A})k + \\
& + G_{CH_4} C_{CH_4} (T_z) \cdot (T_z - T_{0CH_4})k + \\
& + G_{CH_4} C_{CH_4} (T_z) \cdot \Delta H_{298CH_4} + \\
& + [m_{\text{золи}} C_{\text{золи}} (T_z) (T_z - T_{0\text{золи}})k] / \tau + \quad (1) \\
& + \frac{(T_z - T_0)}{L_1 / (\lambda_{\text{кк}} F_1) + L_2 / (\lambda_{\text{те}} F_2)} + \\
& + \alpha_{\text{гр}} F_3 (T_z - T_0),
\end{aligned}$$

де $Q_{0Tz\text{розр}}$ – кількість теплоти, яку необхідно ввести для проведення процесу при T_z , Вт; G_A – витрата азоту, $\text{м}^3/\text{год}$; $C_A(T_z)$ – теплоємність азоту в залежності від температури процесу, $\text{ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; T_z – температура процесу, К; T_{0A} – вихідна температура азоту, К; k – коефіцієнт переведення $\text{ккал}/\text{год}$ у Вт , $k = 1,162$; G_{CH_4} – витрата метану, $\text{м}^3/\text{год}$; $C_{CH_4}(T_z)$ – теплоємність метану в залежності від температури процесу, $\text{ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; T_{0CH_4} – вихідна температура метану, К; ΔH_{298CH_4} – теплота утворення метану, $\text{ккал}/\text{кг}$; $m_{\text{золи}}$ – маса завантаженої золи, кг; $C_{\text{золи}}(T_z)$ – теплоємність золи в залежності від температури процесу, $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $T_{0\text{золи}}$ – вихідна температура золи, К; τ – час обробки золи, год; T_0 – температура зовнішнього середовища, К; L_1, F_1 – довжина та площа стінки реактору, виготовленого з кварцового скла, м та м^2 відповідно; $\lambda_{\text{кк}}$ – теплопровідність кварцового скла, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; L_2, F_2 – довжина та площа теплоізоляції, виготовленої з термостійкої вати, м та м^2 відповідно; $\lambda_{\text{тв}}$ – теплопровідність термостійкої вати, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\alpha_{\text{гр}}$ – коефіцієнт тепловіддачі графіту, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; F_3 – площа графітової підкладки у робочій зоні, м^2 .

Перевірка розмірностей:

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{\text{м}^3}{\text{год}} \cdot \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} + \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \cdot \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} + \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} + \right. \\
& \left. + \frac{\text{кг}}{\text{год}} \cdot \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \cdot \text{К} + \frac{\text{К}}{\frac{\text{м}}{\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \cdot \text{м}^2} + \frac{\text{м}}{\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \cdot \text{м}^2}} + \right. \\
& \left. + \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К} \right] = \left[\frac{\text{ккал}}{\text{год}} \cdot 1,162 + \text{Вт} \right] = [\text{Вт}].
\end{aligned}$$

Результати моделювання визначені пунктирною лінією на рис.4.

Експериментальні значення кількості введеної теплоти ($Q_{0Tz\text{експ}}$) для реакторів з ЕТПШ, відповідно до [6, 7], визначається за вольт-амперною характеристикою (електричною потужністю):

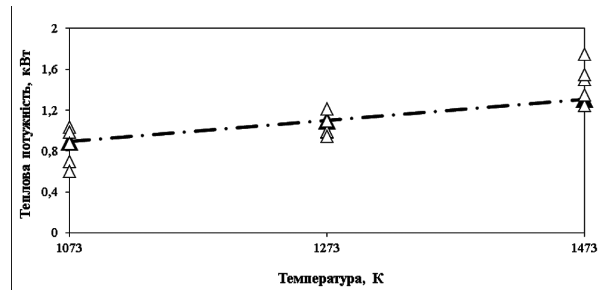


Рис.4. Співставлення змодельованого значення необхідної кількості теплоти для проведення процесу іммобілізації золи ТЕЦ (чорні трикутники) з експериментальними показниками (білі трикутники) теплової потужності.

$$T_{z\text{експ}} = I_{Tz\text{експ}} U_{Tz\text{експ}} \quad (2)$$

де $I_{Tz\text{експ}}$, $U_{Tz\text{експ}}$ – відповідно сила струму, А та напруга В, які визначалися за реальними показниками вольтметра та амперметра під час експерименту.

Відповідно до рис.4 відслідковується динаміка співпадіння математичного моделювання та експериментальних даних. Максимальне відхилення – до 33 %, середнє відхилення – 7–9 %, що свідчить про адекватність математичної моделі кількості теплоти, необхідної для проведення процесу.

Термічний коефіцієнт корисної дії процесу у даній лабораторній установці можна визначити таким чином:

$$\begin{aligned}
\eta_{\text{терм.}T_z} = & \left[\frac{G_{CH_4} G_{CH_4} (T_z) (T_z - T_{0CH_4})k}{Q_{0Tz\text{експ}}} + \right. \\
& \left. + \left[\frac{G_{CH_4} C_{CH_4} (T_z) \Delta H_{298CH_4}}{Q_{0Tz\text{експ}}} + \right. \quad (3) \\
& \left. + \frac{(m_{\text{золи}} C_{\text{золи}} (T_z) (T_z - T_{0\text{золи}})k / \tau)}{Q_{0Tz\text{експ}}} \right] \times 100\%.
\end{aligned}$$

Після проведених розрахунків $\eta_{\text{терм}}$ у середньому складає 8–12 %. Підвищення даного показника можливе збільшенням теплоізоляції реактора.

Висновки

Запропонований та обґрунтований метод іммобілізації радіоактивної золи капсулюванням її піровуглецем.

Розроблено конструкцію та створено лабораторну установку з ЕТПШ для проведення даного процесу.

У результаті проведених експериментів нанесено піровуглецеве покриття на золу вугільної ТЕЦ (модель золи ТВР). $\eta_{\text{терм.}T_z}$ процесу піролізу метану у середньому складає 8–12 %. До технологічних проблем розвитку даної техно-

логії можна віднести високий рівень виносу золи з апарату ЕТПШ, однак дана проблема може бути вирішена застосуванням мембран, які розділяють газову та тверду фази псевдозрідженого шару на виході з реактора ЕТПШ.

Одержаний матеріал вивчено за допомогою методів мікроскопії. Показано, що зола змінила свою структуру завдяки капсулюванню піровуглем. Піровуглець практично повністю покриває поверхню частинок золи.

Проведена оцінка радіаційно-захисних властивостей покриттів. Показано, що після покриття частинок золи піровуглем іонізуюче β -випромінювання знизилося приблизно на 30–35 %, α -активність зменшилася на 28 %.

Серед можливих подальших шляхів використання золи, капсулюваної піровуглем, можна відмітити використання даного матеріалу як формульованої суміші для ливарної галузі.

Проведені дослідження вказують на перспективність іммобілізації зольних залишків атомної та теплової енергетики капсулюванням піровуглем у електротермічному псевдозрідженому шарі.

Автори висловлюють подяку завідувачу Центру екологічних проблем атомної енергетики Інституту ядерних досліджень НАН України В.В.Тришину за допомогу в проведенні вимірів альфа-активності.

Список літератури

1. Мауричева Т.С. Количественная оценка поступления радионуклидов в окружающую среду при работе угольных ТЭЦ (на примере ТЭЦ-1 г. Северодвинска) : Автореф. дис. ... канд. геолого-минералог. наук. М., 2007. 20 с.
2. Amin Y.M., Mayeen Ud. Kh., Shyen A.K., Mahat R.H., Nor R.M., Bradley D.A. Radionuclide emissions from a coal-fired power plant. *Journal of Radiation and Isotopes*. 2013. № 80. P. 109–116.
3. Даваасурэн Д., Чонохуу С., Бямба О., Доржсурэн Б., Ганхурэл Б., Ганхуяг Х., Гэрэлмаа Т. Воздействие на окружающую среду зольного хранилища тепловой электростанции на примере Монголии. *Молодой ученый*. 2015. № 22. С. 63–70.
4. Ключников А.А., Пазухин Э.М., Шигера Ю.М., Шигера В.Ю. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними. Киев : Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2005. 487 с.
5. Гурин И.В., Гурин В.А., Саенко С.Ю., Гуйда В.В., Гурина Е.В. О возможности использования пироуглеродной матрицы для обратимой иммобилизации радиоактивных отходов. *Вопросы атомной науки и техники*. 2013. № 5. С. 74–78.
6. Богомолов В.А. Исследование процесса и разработка технологии пиролиза природного газа в дисперсных средах : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. К., 1982. 21 с.
7. Кожан А.П. Исследование электротермических псевдооживленных систем (применительно к высокотемпературной переработке природного газа) : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.14.13. К., 1978. 28 с.
8. Пат. 134617 Україна, МПК G 21 F 9/16. Спосіб іммобілізації радіоактивних відходів. К.В.Семейко, С.В.Купріяничук, Ю.М.Степаненко, О.П.Кожан, В.М.Дмітрієв, І.О.Писаренко, М.А.Сидоренко, Я.О.Івачкін, О.В.Марасін, Р.Є.Чумак; заявник і патенто-власник: Інститут газу НАНУ. № u201812787. заявл. 22.12.2018; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10.
9. Миронова М.В. Нанодисперсный пироуглерод — основная добавка в формовочные смеси на базе речного песка. *Ползуновский альманах*. 2009. Т. 2, № 3. С. 245–246.

Надійшла до редакції 09.10.19

Семейко К.В.¹, канд. техн. наук, Купріяничук С.В.², Степаненко Ю.Н.³, канд. физ.-мат. наук, Івачкін Я.О.¹, Саенко С.Ю.⁴, докт. техн. наук, Улыбкина К.А.⁴

1 Інститут газу НАН України, Київ

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: k_simeyko@ukr.net

2 Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чернобиль

ул. Кирова, 36а, 07270 Чернобыль, Киевская обл., Украина, e-mail: kupriianchuk.s@gmail.com

3 Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

просп. Науки, 47, 03028 Киев, Украина., e-mail: steprofy@gmail.com

4 Національний науковий центр «Харьківський фізико-технічний інститут», Харьков

ул. Академическая, 1, 61108 Харьков, Украина, e-mail: sayenko@kipt.kharkov.ua

Исследование процесса иммобилизации зольных остатков объектов энергетики в электротермическом псевдооживленном слое

Сотрудниками Института газа НАН Украины совместно с сотрудниками Института проблем безопасности АЭС НАН Украины, ННЦ «Харьковский физико-технический институт» и Института ядерных исследований НАН Украины проводятся исследова-

ния по разработке технологии иммобилизации радиоактивных материалов, образующихся при эксплуатации и авариях на объектах энергетики. В качестве модели радиоактивной золы авторы использовали золные остатки угольной теплоэнергетики, которые потенциально могут быть источниками ионизирующего излучения. В результате серии опытов на специально созданной лабораторной установке с электротермическим псевдооживленным слоем удалось нанести пироуглеродное покрытие на данный тип золы. После покрытия частиц золы пироуглеродом ионизирующее β -излучение снизилось примерно на 30–35 %, α -активность уменьшилась на 28 %. Термический коэффициент полезного действия процесса пиролиза метана на данной установке в среднем составляет 8–12 %. Проведенные исследования указывают на перспективность иммобилизации золных остатков атомной и тепловой энергетики капсулированием их пироуглеродом в электротермическом псевдооживленном слое. *Библ. 9, рис. 4, табл. 1.*
Ключевые слова: экология энергетики, зола, пироуглерод, иммобилизация.

**Simeiko K.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Kupriyanchuk S.V.²,
Stepanenko Yu.M.³, PhD (Nuclear physics), Ivachkin Ya.O.¹,
Sayenko S.Yu.⁴, Doctor of Technical Sciences, Ulybkina E.A.⁴**

**¹ The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
39, Degtyarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: k_simeyko@ukr.net**

**² Institute for Safety Problems of NPP of the National Academy of Sciences
of Ukraine, Chornobyl**

36a, Kirova Str., 07270 Chornobyl, Kyiv Reg., Ukraine, e-mail: uprianchuk.s@gmail.com

**³ Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine
47, Nauky Ave., 03680 Kyiv, Ukraine, e-mail: stepofy@gmail.com**

**⁴ National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology», Kharkov
1, Akademicheskaya Str., 61108 Kharkov, Ukraine, e-mail: sayenko@kipt.kharkov.ua**

Research of the Process of Immobilization of Ash Remnants of Energy Objects in an Electrothermal

The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine together with the Institute for Safety Problems of NPPs of the National Academy of Sciences of Ukraine, the NSC «Kharkiv Physical-Technical Institute» and the Institute of Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine are realization work on the development of technology for the immobilization of radioactive materials generated during operation and accidents on energy objects. As a model of radioactive ash, the authors used ash remnants of coal-fired power plants that potentially represent sources of ionizing radiation. As a result of a series of experiments in a specially created laboratory plant with an electrothermal fluidized layer it was possible to apply a pyrocarbon coating to this type of ash. After coating the particles of ash with pyrocarbon, ionizing β -radiation decreased by about 30–35 %, α -activity decreased by 28 %. The thermal efficiency of the methane pyrolysis process at this plant is on average 8–12 %. The conducted researches point to the prospect of immobilization of saline remnants of atomic and thermal energy by encapsulating pyrocarbon in an electrothermal fluidized bed. *Ref. 9, Fig. 4, Tab. 1.*

Key words: energy ecology, ash, pyrocarbon, immobilization.

References

1. Mauricheva T.S. [Quantitative assessment of the release of radionuclides into the environment during the operation of coal-fired thermal power plants (using the example of thermal power station-1 in Severodvinsk)] : *Abstract of thesis for the degree of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences*. Moscow, 2007. 20 p. (Rus.)
2. Amin Y.M., Mayeen Ud. Kh., Shyen A.K., Mahat R.H., Nor R.M., Bradley D.A. Radionuclide emissions from a coal-fired power plant. *Journal of Radiation and Isotopes*. 2013. No. 80. pp. 109–116.
3. Davaasurjen D., Chonohuu S., Bjamba O., Dorzhsurjen B., Ganhurjel B., Ganhujaig H., Gjerjelmaa T. [Environmental impact of ash storage of a thermal power plant on the example of Mongolia]. *Molodoj uchenyj. [Young Scientist]*. 2015. No. 22. pp. 63–70. (Rus.)
4. Kljuchnikov A.A., Pazuhin Je.M., Shigera Ju.M., Shigera V.Ju. [Nuclear waste from nuclear power plants and methods of handling them]. Kiev : Institut problem bezopasnosti AJeS NAN Ukrainy [Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine], 2005. 487 p. (Rus.)
5. Gurin I.V., Gurin V.A., Saenko S.Yu., Guyda V.V., Gurina E.V. [On the possibility of using a pyrocarbon matrix for reversible immobilization of radioactive waste]. *VANT. Seriya «Fizika radiatsionnyih povrezhdeniy i radiatsionnoe materialovedenie»* [Problems of Atomic Science and technology (PAST). Series «Physics of Radiation Damage and Radiation Material Science»]. 2013. No. 5. pp. 74–78. (Rus.)
6. Bogomolov V.A. [Research of process and technology development of pyrolysis of natural gas in dispersion phases] : Abstract of thesis for the degree of Candidate of the candidate of technical sciences. Kiev, 1982. 21 p. (Rus.)
7. Kozhan A.P. [Investigation of electrothermal fluidized systems (applied to all-temperature processing of natural gas)] : Abstract of thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences. Kiev, 1978. 28 p. (Rus.)
8. Patent 134617 UA, MPK G 21 F 9/16. [Method of immobilization of radioactive waste]. K.V.Simeiko, S.V. Kupriyanchuk, Ju.M. Stepanenko, O.P. Kozhan, V.M.Dmitriev, I.O.Pisarenko, M.A. Sydorenko, Ja.O.Ivachkin, O.V.Marasin, R.E. Chumak; Applicant and patent holder: the Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine. Application № u201812787, date: 22.12.2018. Publ. 27.05.2019, Bull. No. 10. (Ukr.)
9. Mironova M.V. [Nanodispersed pyrolytic carbon is the main additive in molding mixtures based on river sand]. *Polzunovskiy Almanakh. [Polzunovskiy Almanac]*. 2009. 3 (2). pp. 245–246. (Rus.)

Received October 9, 2019