

treatment, is manufactured and sold at an elevated price, which makes our research topic even more relevant and economically feasible.

As a result of the experiment, it was possible to achieve a 13 percent solution of FeCl₃ coagulant, which is a good indicator. This idea and direction of water purification allows us to implement waste-free technologies, which allows to solve a double task of environmental protection.

Key words: *electrodialysis, coagulant, highly mineralized, non-waste technologies, electrolyzer, cathode, anode.*

References:

1. Trus, I.M., Oprisnennja shahtnih vod z visokoju zhorstkistju pri vikoristanni elektrodializu / I. M. Trus, I. M. Makarenko, T. O. Shabl'ij // Visnik Chernigiv's'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. – 2014. №2 - S. 49-54.
2. Pisarska B. Analiz uslovij poluchenija H₂SO₄ i NaOH iz rastvorov sul'fata natrija metodom jelektrodializa / B. Pisarska, R. Dilevski // Zhurnal prikladnoj himii. – 2005. –T. 78, № 8. – S. 1311–1316.
3. Shabl'ij T. O. Elektrohimična pererobka vidprac'ovanih rozchiniv, shho utvorjujut'sja pri regeneracii kationitiv / T. O. Shabl'ij, M. D. Gomel'ja, Є. M. Panov // Jekologija i promyshlennost'. – 2010. – № 2. – S. 33–38.
4. Petrushka I. M., Bezvidhodni tehnologii promislovogo ochishhennja stichnih vod vid bagatokomponentnih organichnih sumishej / I. M. Petrushka, O. V. Stokaljuk, O. G. Chajka // Nacional'nij universitet "L'viv's'ka politehnika". – 2007.
5. Krizhanov's'ka Ja. P. Otrimannja FeCl₃ pri elektrohimičnomu ochishhenni vodi / Ja. P. Krizhanov's'ka, A. K. Vakulenko, Ja. V. Radovenchik // IV Mizhnarodna naukovopraktična konferencija «SUCHASNA NAUKA: PROBLEMI I PERSPEKTIVI» chastina I, m. Kiiv (6-7 zhovtnja), s. 23-25.
6. Radovenchik V.M. Ocinka efekтивnosti aljuminijmiskih koagulantiv v procesah osvittlennja prirodnih vod / V.M. Radovenchik, S.V. Glinjana, Ja.V. Radovenchik, N.V. Kalinichenko // Shidno-Єvropejs'kij zhurnal peredovih tehnologij, 2014. - №2. – S. 17-20
7. Vasil'eva E. S. Koagulyanty v processah vodoochistki [Tekst] / E. S. Vasil'eva, I. I. Volkova, N. A. Timasheva // Uspehi v himii i himicheskoj tehnologii. – 2005. – T. 19, № 6. – S. 10–11.
8. Radovenchik Ja. V. Osvittlennja prirodnih vod z vikoristannjam flokuljantiv [Tekst] / Ja. V. Radovenchik, A. O. Kosticja, V. M. Radovenchik // Shidno – Єvropejs'kij zhurnal peredovih tehnologij. – 2013. – T. 4, № 6 (64). – S. 23–26.
9. Bousely, J. Applying chemical reagents in water production [Text] / J. Bousely, C. Losada, Ph. Zydowisz // Eau. Ind. Nuisances. – 2001. – № 256. – S. 45–49.
10. Grabitchenko V. M. Kompleksna pererobka visokomineralizovanih stokiv v ekologično bezpečnomu promislovomu vodospozhivanni : avtoref. dis. kand. tehn. nauk : 21.06.01 – ekologična bezpeka / Grabitchenko Valentina Mikolaivna. – Kiiv, 2017. – 23 s.

УДК 504.05

КУПРІЯНЧУК С. В., асп., м.н.с.^{1,2}; МЕНЬШЕНІН Є. А., пров. інж.²; ШАБЛІЙ Т. О., д.т.н., проф.¹
¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
² Інститут проблем безпеки АЕС Національної академії наук України

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЗБІДНЕНОГО УРАНУ ЯК ЗАХИСНОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ ПОВОДЖЕННІ З РАДІОАКТИВНИМИ ВІДХОДАМИ

Проведений аналіз використання збідненого урану в якості захисного матеріалу контейнерів для зберігання високоактивних відходів. За своїми захисними властивостями він перевершує всі відомі матеріали, що застосовуються при захисті від іонізуючого випромінювання. В рамках роботи проаналізовано можливість удосконалення контейнеру, що застосовуються на ЧАЕС для зберігання ВАВ, КТЗВ-0,2. Розроблені моделі та проведені розрахунки при можливому додаванні збідненого урану в композит бетону, а також розглянуто можливість використання, замість свинцю, сегментів зі збідненого урану в контейнерах з додаванням додаткового захисного шару.

Ключові слова: *збіднений уран; радіоактивні відходи; контейнер; захисні властивості; потужність дози.*

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2019.171057

© Купріяничук С. В., Меньшенін Є. А., Шаблій Т. О., 2019

Вступ. Розвиток атомної енергетики нерозривно пов'язаний з вирішенням проблем транспортування, зберігання, переробки і захоронення радіоактивних матеріалів.

В даний час внаслідок обробки уранових руд накопичилась велика кількість уранових відходів у вигляді хімічно активного і токсичного гексафториду урану.

Рішення щодо способу утилізації гексафториду урану залежить від того, як та чи інша країна розглядає збіднений уран: як радіоактивні відходи, що підлягають захороненню, або як матеріал, який придатний для подальшого використання.

Оскільки густина збідненого урану набагато вища, ніж у матеріалів, що застосовуються для радіаційного захисту (свинець, бетон, сталь), він за своєю ефективністю може бути винятковим матеріалом для захисту від випромінювання. Відносно низька ціна збідненого урану дозволяє розглядати його як альтернативу свинцю, а також як домішок до бетону, з якого виготовляють контейнери. Це наприкінці дозволить збільшити питому активність радіоактивних відходів (РАВ), що завантажуються в контейнер.

Основні дослідження і публікації. З метою подальшого дослідження можливості застосування збідненого урану в якості матеріалу для радіаційного захисту при виготовленні контейнерів для захоронення РАВ об'єкта «Укриття» і РАВ ЧАЕС був проаналізований світовий досвід щодо досліджень даного матеріалу.

В основному застосування збідненого урану пов'язані з великою густиною урану ($19,1 \text{ г/см}^3$) і відносно низькою його вартістю. Дві найважливіші сфери використання збідненого урану: радіаційний захист і баластна маса в аерокосмічних пристосуваннях. Також цей матеріал застосовується при бурінні нафтових свердловин у вигляді ударних штанг (при канатному бурінні), у високошвидкісних роторах гіроскопів, великих маховиках, в якості баласту для космічних апаратів, що спускаються, а також для гоночних яхт. Але найвідомішим є застосування урану в якості осердя для бронейних снарядів і в танковій броні [1].

Традиційно для захисту від гамма-випромінювання використовується свинець, спеціальні сталі, чавун, тощо. Застосування цих матеріалів для виготовлення контейнерів обмежена недостатньо високою здатністю поглинання гамма-випромінювання в порівнянні з матеріалами, які мають більшу густина, наприклад збіднений уран. Крім того, при застосуванні традиційних матеріалів контейнери необхідно оснащувати додатковими екранами для поглинання нейтронного випромінювання, що ускладнює конструкцію контейнера і знижує його міцність. Порівняння фізико-хімічних характеристик свинцю та збідненого урану надані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння фізико-хімічних властивостей збідненого урану та свинцю.

Показник	Збіднений уран	Свинець
Формула	U	Pb
Молекулярна маса	238,03	207,19
Властивості	Метал срібного кольору, кристали: α -форми ромбу, β -тетрагональної форми, γ -об'ємноцентрованої кубічної форми	М'який срібний метал, кристали кубічної форми
Густина, г/см^3	α -19,04 β -18,11 γ -18,06	11,344
Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$	1133 \pm 2	327,3
Температура кипіння, $^{\circ}\text{C}$	3490	1751

Вивчення збідненого урану в якості захисного матеріалу від іонізуючого випромінювання в США почалося в 1992 році Управлінням науки і техніки Міністерства енергетики. За період дослідження розроблено контейнери для транспортування і зберігання ВАВ з різними конфігураціями для різних типів відходів [2].

Відомі контейнери, в яких для радіаційного захисту використовують металевий уран у формі частинок, вкритих шаром металу з високою теплопровідністю (наприклад, алюмінієм, міддю тощо) [3]. Однак такий контейнер не позбавлений зазначених вище недоліків, які властиві традиційним матеріалам для захисту (свинець, спеціальні сталі, чавун тощо) і дорогий через використання складної технології нанесення металевого покриття на уранові частинки.

Відомий контейнер виробництва Японії, в якому пропонується використання бетону, що містить збіднений уран у формі агрегованого уранового оксиду. Використання такого контейнера дозволяє істотно зменшити товщину поглинаючого шару при забезпеченні необхідних захисних властивостей і підвищити його транспортабельність. Проте, при підвищенні температури механічні властивості такого бетону помітно знижуються через хімічну взаємодію агрегованого уранового оксиду з іншими компонентами бетону, повітрям і вологою. Це знижує надійність контейнера при тривалому зберіганні радіоактивних речовин.

В даний час найбільшого поширення набули контейнери для перевезення і зберігання відпрацьованих ядерних матеріалів, в яких захисний шар виконаний у формі композиційного матеріалу на основі важкого бетону з наповнювачем, що містить збіднений уран, розміщеного між металевими оболонками. Оптимальне поєднання властивостей такого композиційного матеріалу (конструкційна міцність бетону, високі здатності поглинання гамма і нейтронного випромінювання) роблять такі контейнери відносно дешевими і простими у виготовленні.

Так в документі [2] описані системи зберігання ВАВ у вигляді бітумного скла розміщеного в первинній упаковці. В якості захисту використовувався збіднений уран в металевій формі, що був легований для оптимізації структурних характеристик матеріалу. Збіднений уран відлито в кільця або сегменти, що використовуються в якості захисного матеріалу в бочках. Як правило, кільця збідненого урану або сегменти будуть затиснуті між внутрішніми і зовнішніми конструкційними сталевими шарами.

Опис процесу виконаного моделювання. Моделювання проводилося за допомогою модульної системи стандартизованого комп'ютерного аналізу для ліцензованої оцінки SCALE [3]. Даний програмний продукт був розроблений національною лабораторією ORNL (м. Оак Рідж, США). Для обчислень в основу даного програмного продукту покладено метод Монте Карло, що може вирішувати наступні завдання:

- обробка багатогрупових перерізів взаємодії;
- дослідження критичності;
- розрахунки біологічного захисту;
- дослідження теплопередачі;
- розрахунок характеристик відпрацьованого ядерного палива та високоактивних відходів.

Для розрахунку захисту використовувалася бібліотека для 200 груп фотонів і 47 груп нейтронів та модуля BONAMI –S.

В документі [4] зазначено, що при проведенні демонтажних робіт на об'єкті «Укриття» може утворюватися значна кількість ВАВ. Для транспортування і зберігання ВАВ в ДСП ЧАЕС використовуються захисно-транспортні контейнери КТЗВ-0,2 [4].

В даних контейнерах в якості захисту від іонізуючого випромінювання використовують важкий бетон з додаванням 20 % заліза із загальною густиною від 3,2 до 3,44 г/см³. Загальний вигляд контейнера представлений на рис. 1.

Конфігурація контейнера КТЗВ-0,2 дозволяє розміщувати додатковий захисний шар свинцю, в формі пластин, між первинним контейнером (ПК) КТ-0,2 (0,2 м³) і додатковим ПК з ВАВ 0,1 м³ або 0,04 м³.

В даній роботі було розглянуто наступні варіанти модифікації контейнера:

- додавання до залізобетону 5 %, 10 %, 20 %, 30 % і 50 % збідненого урану, густиною 19,05 г/см³;
- можливість заміни свинцевих пластин на металеві леговані пластини із збідненого урану.

Розрахунки виконувались з метою аналізу можливості збільшення питомої активності, що завантажуються в контейнер.

Основний зміст проведеного дослідження. При розрахунку захисних властивостей пакувального комплексу прийнято, що основними гамма-випромінюючими радіонуклідами є ⁶⁰Co і ¹³⁷Cs у співвідношенні 90 % і 10 % відповідно. Густина РАВ при моделюванні приймалася 2,1 г/см³ з активністю 10⁹ Бк.

За основу розробки моделей для розрахунків з [5] обирався транспортно-захисний контейнер КТЗВ-0,2 з варіантами конфігурації: 0,2 м³ бочка (ПК) і додаткова 0,1 м³ бочка з можливим розміщенням свинцевих пластин між ПК і 0,1 м³ бочкою.

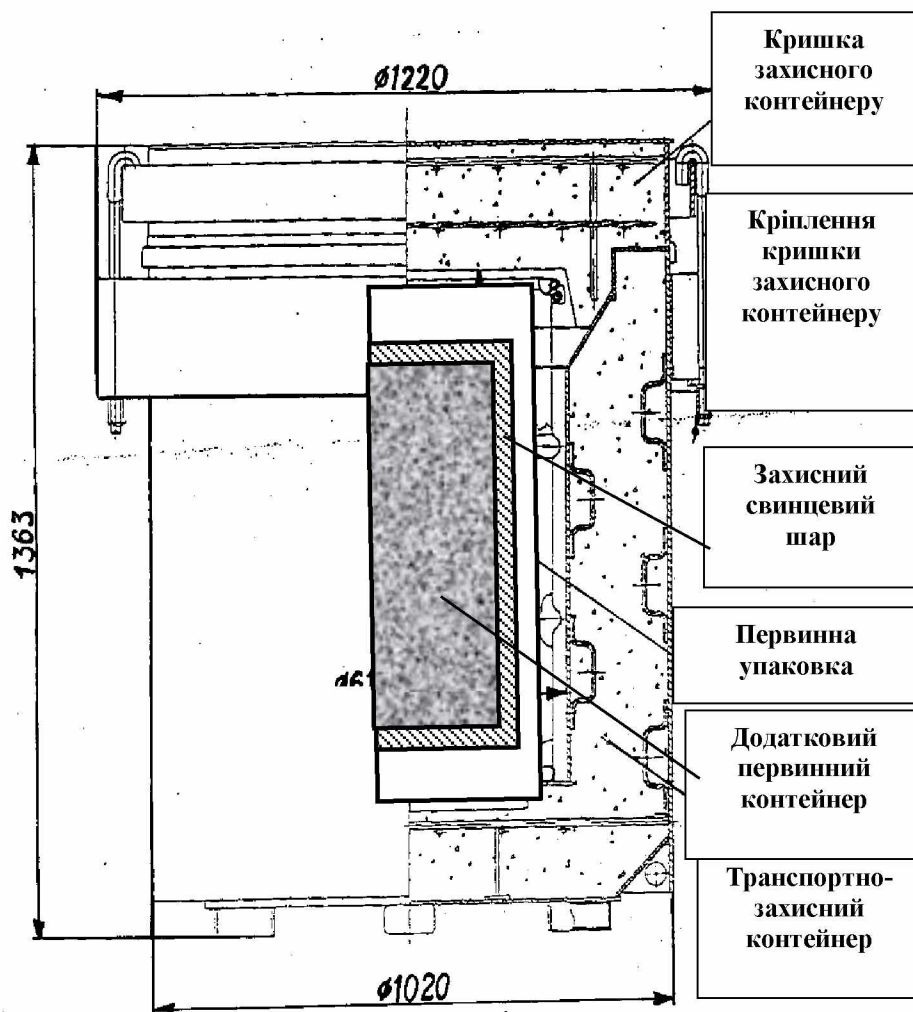


Рис. 1 – Пакувальний комплект КТЗВ-0,2

При розробці моделі застосовувались умовні габаритні розміри захисного контейнера: зовнішній діаметр – 1220 мм, висота – 1363 мм; внутрішній діаметр – 616 мм, висота – 885 мм. Розміри первинного контейнеру (0,2 м³ бочка): зовнішній діаметр – 560 мм, висота – 869 мм, товщина стінки – 8 мм (рисунок 2).

При розробці геометричної моделі для розрахунків зроблені спрощення, які не впливають на результати і значно зменшують час розрахунків.

В ході дослідження змінювався склад захисного шару шляхом додаванням металевої крихти із збідненого урану. При цьому густина самого захисту змінювалась від 2,44 до 4,1 г/см³ залежно від частки додавання збідненого урану.

Результати потужності дози випромінювання розраховувались на відстані 10 см, 50 см і 100 см від бічної поверхні контейнера. При цьому результати потужності дози випромінювання не повинні перевищуватись наступні параметри: 2 мЗв/год. на поверхні контейнера і 0,1 мЗв/год на відстані 1 м від контейнера, згідно [6].

Всі розрахунки виконувались за допомогою програми SCALE. Результати дослідження представлено на рис. 3.

Результати, представлені на рис. 3, показують, що при додаванні збідненого урану в кількості 5 %, потужність дози зменшується в півтора рази в порівнянні з початковим бетонним захистом. При додаванні 50 % збідненого урану до складу композиту бетону, потужність дози від джерела зменшується в 67 разів в порівнянні з початковим бетонним захистом.

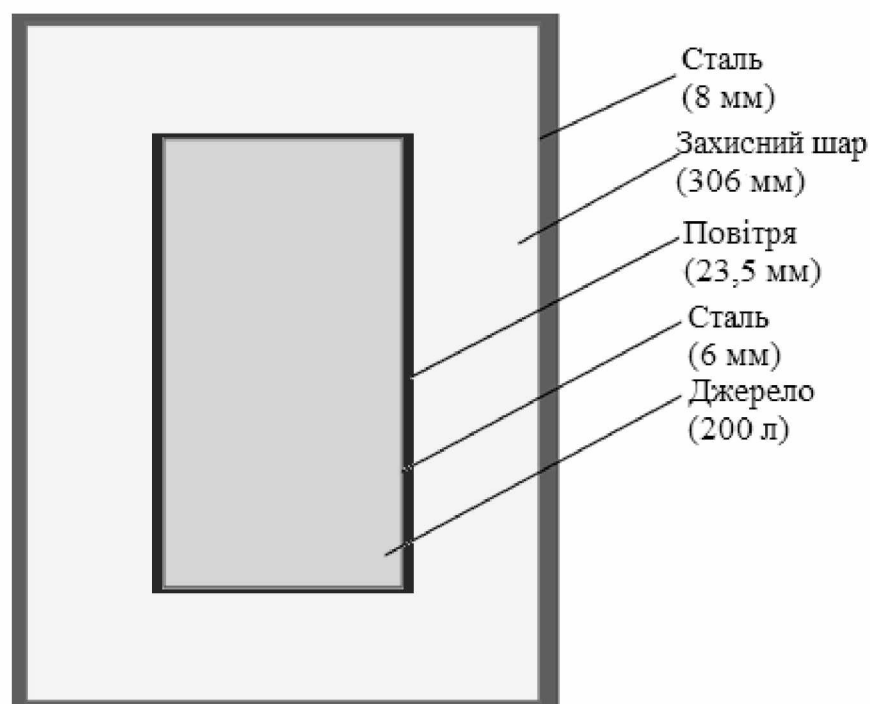


Рис. 2 – Графічна модель контейнера КТЗВ-0,2 з первинним контейнером (0,2 м³)

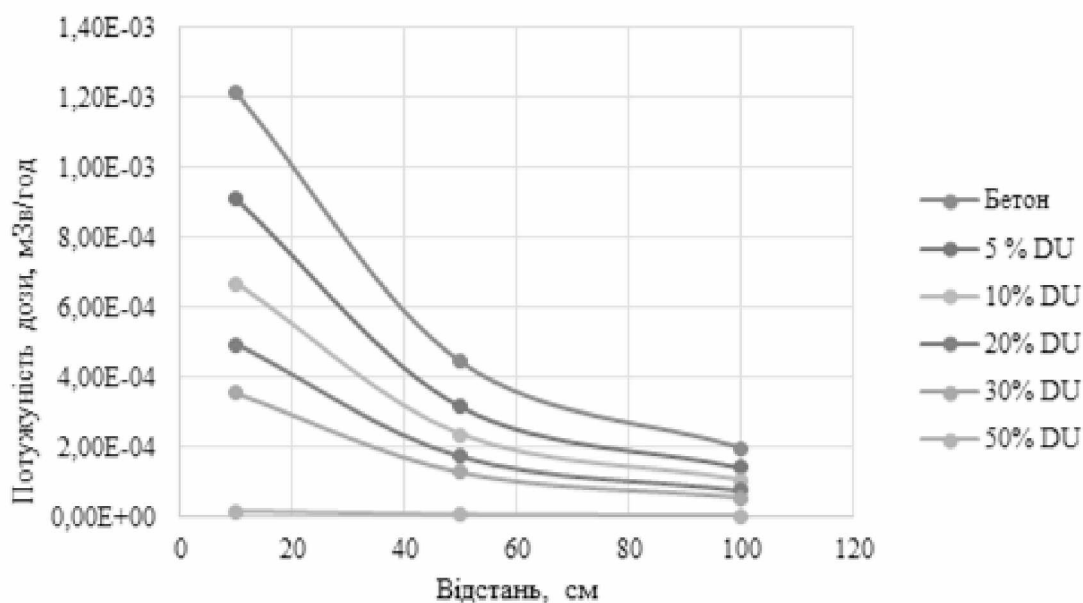


Рис. 3 – Залежність потужності дози випромінювання від відсотку додавання збідненого урану у захисний шар контейнеру

В рамках даної роботи також були проведені розрахунки для конфігурації контейнера із 0,1 м³ додатковим ПК і можливою установкою додаткового захисного шару.

Графічна модель, представлена на рис. 4, складається із захисного транспортного контейнера з $0,2 \text{ м}^3$ ПК, в якому розміщений додатковий $0,1 \text{ м}^3$ ПК з додаванням додатковою захисною пластиною товщиною $34,3 \text{ мм}$.

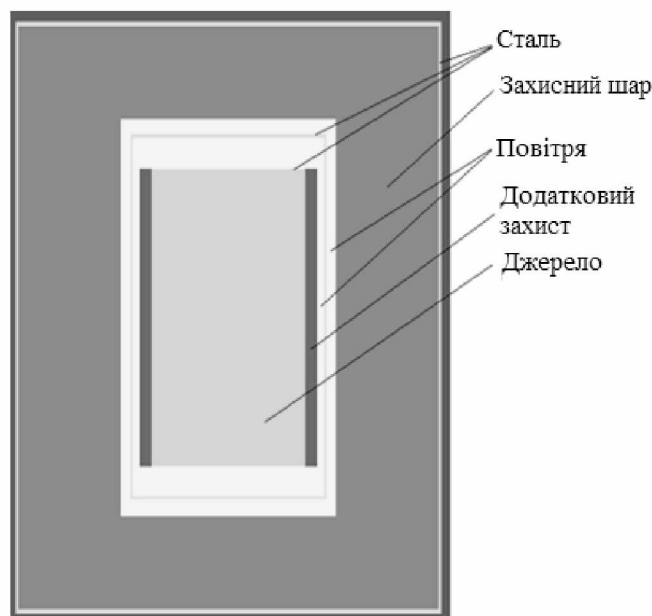


Рис. 4 – Графічна модель контейнера з додатковим первинним контейнером ($0,1 \text{ м}^3$)

Для оцінки зменшення потужності на зовнішньому боці захисного контейнера було розглянуто дві моделі, в одній з яких в якості захисного матеріалу використовувались свинцеві пластини, а в іншій – металеві пластини із збідненого урану. Густина для пластин із збідненого урану приймалася $19,1 \text{ г/см}^3$. Результати дослідження представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність потужності дози від типу захисного шару ПК ($0,1 \text{ м}^3$) та відстані

Захист	Потужність дози, мЗв/год		
	10 см	50 см	100 см
Свинець	$8,97\text{E}-10$	$3,86\text{E}-10$	$1,69\text{E}-10$
Збіднений уран	$2,73\text{E}-11$	$1,19\text{E}-11$	$5,38\text{E}-12$

Результати розрахунків показують, що при використанні додаткового захисту із металевих пластин із збідненого урану потужність дози на поверхні контейнеру зменшується в 33 рази, порівняно з таким самим захистом, виготовленим із свинцевих пластин. З цього можна зробити припущення, що максимальна активність ВАВ, розміщених у контейнері з використанням додаткового захисту із металевих пластин із збідненого урану, становитиме близько $3,95\text{E}+18 \text{ Бк}$.

Висновки

1. Аналіз світового досвіду з використання збідненого урану для захисну від іонізуючого випромінювання показує його ефективність, що підтверджується можливістю його практичного застосування.

2. Розглянутий в дослідженні варіант використання збідненого урану в якості добавок до композиту бетону та застосування в якості додаткового металевого захисту в контейнерах КТЗВ-0,2 показав, що:

- відбувається зменшення потужності дози від 2 до 4 разів, залежно від додавання процентного співвідношення до композиту бетону;
- підвищується ефективність захисних властивостей контейнеру при використанні збідненого урану порівняно зі свинцем (при застосуванні у вигляді металевих пластин). Це дозволяє збільшити активність ВАВ в контейнері до $3,95\text{E}+18 \text{ Бк}$, порівняно із використанням пластин у контейнерах виготовлених з свинцю;

3. Розрахунки показали, що використання збідненого урану в захисних контейнерах для ВАВ дають можливість зменшити загальну кількість контейнерів, які необхідні для тимчасового зберігання ВАВ.

Список використаної літератури

1. Проф., д.х.н. *И.Н.Бекман*. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА Курс лекций. . Учебное пособие Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова Химический факультет Кафедра радиохимии. Москва, 2010.: <http://profbeckman.narod.ru/UranSS.htm>.
2. *H. Richard Yoshimura, John S. Ludwigsen, Mark E. McAllaster, Anthony J. Trenne and ect.* Use of Depleted Uranium Metal as Cask Shielding in High-Level Waste Storage, Transport, and Disposal Systems.// SANDIA REPORT SAND94-0826/TTC-1311 • UC-513 Unlimited Release Printed September 1996.
3. <https://www.ornl.gov/scale>;
4. SIP-P-DI-19-120-STG-083-02. Стратегия обращения с ТCM и радиоактивными отходами объекта «Укрытие». План дальнейших действий. 2005.
5. *Батий В. Г., Егоров В. В. и др.* Оценка максимально допустимой активности упаковок с высокоактивными отходами // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2008. — Вип. 9. — С. 31–36.
6. ПБПРМ-2006. Правила ядерної та радіаційної безпеки при перевезенні радіоактивних матеріалів.

Надійшла до редакції 09.01.2019

Kupriianchuk S. V., Menshenin E. A., Shabliy T. O.

ANALYSIS OF THE USE OF DEPLETED URANIUM AS A PROTECTIVE MATERIAL FOR RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT

An analysis of the use of depleted uranium as a protective material for containers for the storage of high-level waste. By its protective properties, it surpasses all known materials used in protection against ionizing radiation. The article analyzes the possibility of improving the container used at the ChNPP for the storage of HLW KTZV-0,2. Developed models and calculations carried with the possible addition of depleted uranium to the composite of concrete, as well as the possibility of using, instead of lead, segments of depleted uranium in containers with the addition of an additional protective layer. Calculations have shown that the use of depleted uranium in protective containers for HLW allows reducing the total number of containers. That required for temporary storage of HLW in ChNPP repositories, which makes it possible to optimize the scheme of radioactive waste management at ChNPP during the work on the decommissioning and conversion of the Shelter object on an environmentally safe system. The application of depleted uranium as an impurity to the concrete composite and the use of it as an additional metal protection in containers KTZV-0,2, considered by us, showed that: there is a decrease in the dose rate from 2 to 4 times, depending on the addition of the percentage to the concrete composite; the efficiency of the protective properties of the use of uranium is increased compared with lead in the application of depleted uranium in the form of metal plates. This allows you to increase the activity of VAB in the container to $3.95E + 18$ Bq, compared with lead.

Key words: *depleted uranium; radioactive waste; container; protective properties; dose rate.*

References

1. *Professor, Doctor of Chemistry I.N.Bekman.* NUCLEAR PHYSICS. Course of lectures Tutorial. Moscow State University. Faculty of Chemistry Department of Radiochemistry. Moscow, 2010.: <http://profbeckman.narod.ru/UranSS.htm>.
2. *H. Richard Yoshimura, John S. Ludwigsen, Mark E. McAllaster, Anthony J. Trenne and ect.* Use of Depleted Uranium Metal as Cask Shielding in High-Level Waste Storage, Transport, and Disposal Systems.// SANDIA REPORT SAND94-0826/TTC-1311 • UC-513 Unlimited Release Printed September 1996.
3. <https://www.ornl.gov/scale>.
4. SIP-P-DI-19-120-STG-083-02. The strategy of handling FCM and radioactive waste of the Shelter. Plan further action. 2005.
5. *Batij V. G., Egorov V. V., ect.* Estimation of the Maximum Permissible Activity of Packages with Highly Active Waste - 2008. – Issue 9. - p. 31–36.
6. ПБПРМ-2006. The rules of nuclear and radiation safety for transported radioactive materials.