

УДК 621.039.736:621.745

<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.08>

Лукін Є.В., Машиністов В.Є., Галкін О.Ф., Музиченко А.С.

## Радіаційна безпека плавлення радіоактивно забрудненого металу

Lukin E.V., Mashinistov V.E., Galkin O.F., Muzychenko A. S.

### Radiation protection of melting of radioactive contaminated metal

Одним із небажаних, але на жаль, невід'ємним наслідком техногенної діяльності людини з використанням ядерної енергії в сучасних умовах є накопичення великих обсягів радіоактивно забруднених металів. Вирішення питань утилізації або повернення цих металів у повторну експлуатацію нерозривно пов'язано з забезпеченням радіаційної безпеки людей та оточуючого природного середовища на усіх етапах технологічного циклу з використанням радіоактивного металу. Розглянуті можливі наслідки дії іонізуючого випромінювання на організм людини, досліджені особливості радіоактивно забрудненого металу як можливого джерела опромінювання виробничого персоналу, а також аналіз радіаційної безпеки утилізації радіоактивно забрудненого металу шляхом його плавлення з використанням ефекту самодезактивації. Відзначено, що важливим елементом комплексу заходів з радіаційної безпеки виробничого персоналу є оцінка радіаційної обстановки, вказані її основна мета та загальний зміст. На основі цього сформульовані основні принципи забезпечення радіаційної безпеки та названі основні шляхи розробки заходів з цією метою. Обґрунтовано, що при виборі раціональних варіантів дії виробничого персоналу при утилізації радіоактивно забрудненого металу виключається опромінення людей різними видами радіації, що перевищують нормативні, а також додатковий радіаційний вплив на навколишнє середовище. Показано, що критерієм радіаційної безпеки металу є максимальна потужність дози гамма-випромінювання з його поверхні, при якій забезпечується неперевищення ліміту індивідуальної річної ефективної дози опромінення. Обґрунтовано доцільність перегляду допустимих рівнів опромінення персоналу, що виконує операції з радіоактивно забрудненим металом, відповідно до порядку, встановленого Міністерством охорони здоров'я України. Запропонована багатоступенева система очистки вентиляційних викидів з плавильної печі з застосуванням в якості останнього ступеня очистки викидів електрофільтру, який безпосередньо здійснює очищення газоаерозольних викидів від радіонуклідів. Результати дослідження можуть сприяти поверненню у виробництво великих обсягів радіоактивно забрудненого металу, істотному поліпшенню техніко-економічних показників виробництва металів і сприяти запобіганню екологічних порушень.

Ключові слова: дезактивація, радіонуклід, радіоактивне забруднення, іонізуюче випромінювання, радіаційна безпека, ефект самодезактивації.

An integral component of modern technogenic activities using nuclear energy is the accumulation of radioactively contaminated metals. Solving the issues of recycling or returning these metals to reuse is inextricably linked to ensuring the radiation safety of people and the environment at all stages of the technological cycle using radioactive metal. Possible consequences of the effect of ionizing radiation on the human body are considered, the features of radioactively contaminated metal as a possible source of radiation for production personnel are investigated, as well as the analysis of radiation safety of the utilization of radioactively contaminated metal by its melting using self-deactivation effect. It is noted that an important element of the complex of measures for radiation safety of production personnel is the assessment of the radiation situation, and its main purpose and overall content is indicated. The basic principles of radiation safety are formulated. The choice of rational options for the actions of production personnel in the disposal of radioactively contaminated metal eliminates the exposure of people to radiation levels that exceed standard values. Additional radiation exposure to the environment is also excluded. It is shown that the criterion of radiation safety of a metal is the maximum dose rate of gamma radiation from its surface, which ensures that the limit of the individual annual effective radiation dose is not exceeded. It is reasonable to review the permissible levels of radiation exposure of personnel performing operations with radioactively contaminated metal in accordance with the procedure established by the Ministry of Health of Ukraine. A multistage system for cleaning ventilation emissions from a melting furnace using an electrostatic filter at the last stage, which directly cleans gas aerosol emissions from radionuclides, is proposed.

The results of the study can contribute to the return to production of large volumes of radioactively contaminated metal, significantly improve the technical and economic performance of metal production and help to prevent environmental disturbances.

Keywords: deactivation, radionuclide, radioactive contamination, ionizing radiation, radiation safety, the effect of self-deactivation.

#### 1. Вступ

Однією з серйозних сучасних екологічних проблем є утилізація радіоактивно забрудненого металу (РЗМ), який утворюється в ході експлуатації, ремонту, модернізації або демонтажу об'єктів ядерної енергетики. На підприємствах газової і нафтопереробної промисловості також утворюється значна кількість радіоактивно забрудненого металу, забрудненого природними радіонуклідами. Великі обсяги радіоактивно забрудненого металу, що утворилися в результаті аварії на Чорнобильській АЕС і в процесі ліквідації її наслідків, накопичені в

зоні відчуження Чорнобильської АЕС.

Переважає більшість всієї маси радіоактивно забрудненого металу за рівнем радіоактивного забруднення відноситься до низькоактивних відходів, радіоактивне випромінювання яких перевищує природний радіаційний фон в одиниці - десятки разів [1]. Радіонукліди, що знаходяться на їх поверхні, є джерелом іонізуючого випромінювання, небезпечного для біологічних об'єктів. Разом з тим радіоактивно забрудненого металу є багаторазовим відновлюваним джерелом сировини для металургійної промисловості, використання якого до-

Лукін Євген Вікторович – к.в.н., НМетАУ,  
Машиністов Віктор Єгорович – к.т.н., НМетАУ,  
Галкін Олег Федорович – НМетАУ,  
Музиченко Андрій Сергійович – студент НМетАУ,

Lukin Evgen – c.v.s. NMetAU  
Mashinistov Viktor – c.t.s., NmetAU  
Galkin Oleg – NMetAU  
Muzychenko Andrey – student NMetAU

зволить значно поліпшити техніко-економічні показники її роботи. Успішне вирішення проблеми рециклінгу радіоактивно забрудненого металу призведе до зменшення обсягів видобутку та переробки мінеральної сировини, що сприятиме попередженню екологічних порушень, а також суттєво зменшить витрати в гірничопромисловому виробництві.

## **2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

На практиці для повернення в оборот радіоактивно забрудненого металу проводять дезактивацію його поверхні різними способами [2], що не завжди забезпечує необхідний ступінь очищення виробів складної конфігурації і супроводжується утворенням великих обсягів нових радіоактивних відходів (РАВ). Це екологічно недоцільний, трудомісткий і небезпечний для виробничого персоналу шлях.

В даний час найбільш ефективним підходом до рециклінгу радіоактивно забрудненого металу вважається дезактивація методом переплавки, яка заснована на плавленні забрудненого металу з метою переведення радіоактивних речовин в шлак. Метал плавлять в електропечі з додаванням в шихту дезактивуючих компонентів, що сприяють більш повному виведенню радіонуклідів. Плавлення радіоактивно забрудненого металу застосовують з метою зменшення кількості РАВ, що підлягають захороненню, та повернення в обмежених обсягах металу в промисловість [3-6].

В окремих випадках метод переплавки використовується на завершальному етапі процесу переробки металевих відходів, забруднених радіоактивними речовинами, з метою переведення їх в шлак [7]. При цьому обов'язковим елементом технології переробки є попередня дезактивація металевої сировини перед плавленням. Кінцевий продукт - злитки, які в якості вторинної сировини направляються в металургійне виробництво. Така технологія, як стверджується, дозволяє повернути велику частину забрудненого металу після очистки в оборот для необмеженого використання.

Однак кількість радіоактивно забрудненого металу, яка після переробки відомими методами може повторно використовуватися без будь-яких обмежень, залишається незначною в порівнянні з її обсягами (не більше 7%) [3], які продовжують накопичуватися в результаті виробничої діяльності ряду підприємств як ядерного, так і неядерного секторів [8].

Разом з тим досвід експлуатації плавильних печей та використання існуючих технологічних рішень, в основі яких лежить метод переплавки, показує, що і без прийняття спеціальних заходів по виведенню радіонуклідів з металу рівень гамма-випромінювання з поверхні злитка набагато нижче того, який був на поверхні радіоактивно забрудненого металу, що завантажується до печі. При цьому альфа- і бета-випромінювання, як і радіонукліди, не виходять за межі виплавленого металу [8].

Отже, має місце безсумнівний вплив ряду ефектів, які супроводжують плавлення забрудненого радіонуклідами металургійної сировини, на рівень радіаційної безпеки виплавленого металу, що викликає необхідність більш глибокого дослідження процесів при плавленні радіоактивно забрудненого металу з позиції їх впливу на ефективну дозу, яка формується випромінюванням з поверхні одержуваного злитка. У той же час пріоритетним напрямком таких досліджень доцільно вважати перш за все саме питання радіаційної безпеки виробничого персоналу, що виконує всі роботи по утилізації радіоактивно забрудненого металу, населення територій, безпосередньо прилеглих до підприємств, де здійснюється рециклінг радіоактивно забрудненого металу, а також недопущення додаткового радіаційного впливу на навколишнє середовище.

## **3. Мета і завдання дослідження**

Метою дослідження, результати якого викладені в статті є аналіз проблеми радіаційної безпеки, що виникає при переробці радіоактивно забрудненого металу, її сутність і причини виникнення, а також питання її оцінки для визначення реальної загрози виробничому персоналу підприємств і розробки заходів по його радіаційному захисту.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

здійснити аналіз можливих наслідків дії іонізуючого випромінювання, на організм людини;

дослідити особливості радіоактивно забрудненого металу як можливого джерела опромінювання виробничого персоналу;

оцінити відносний вклад різних видів іонізуючого випромінювання, а також різних можливих шляхів його надходження до людини в формуванні індивідуальної річної ефективної дози опромінення;

обґрунтувати доцільність перегляду існуючих нині нормативних допустимих рівнів опромінення при виконанні операцій з металобрухтом;

запропонувати оригінальний спосіб очищення вентиляційних викидів з плавильної печі від радіонуклідів.

## **4. Дослідження проблеми радіаційної безпеки при переробці радіоактивно забрудненого металу**

### **4.1. Загальна характеристика можливих наслідків біологічної дії іонізуючих випромінювань**

Іонізуюче випромінювання (ІВ) - вид внутрішньоатомної енергії, що вивільняється в процесі спонтанного розпаду атомів (явище радіоактивності), та викликає іонізацію середовища поширення. Нестабільні атоми хімічних елементів називають радіоактивними ізотопами (природного або штучного походження), а ядра таких атомів - радіонуклідами.

Радіаційний вплив ІВ на організм людини може відбуватися шляхом зовнішнього та/або внутрішнього опромінення, коли джерела ІВ знаходяться поза ним (у тому числі, на зовнішніх поверхнях шкіряних покривів, одязі) або проникають всере-

дину організму через дихальні шляхи і шлунково-кишковий тракт відповідно. При зовнішньому опроміненні найбільш небезпечні ті випромінювання, які мають високу проникаючу здатність, а при внутрішньому опроміненні - іонізуючу. Поглинання ІВ клітинами живої тканини організму дає початок біофізичним і біохімічним змінам в їх речовині, в сутності і закономірностях їх функціонування як елементів біологічного організму, т.зв. радіаційно-му ефекту.

Кількість енергії ІВ, що викликає ефект іонізації в масі біологічно живого організму, характеризується поняттям «поглинена доза», а біологічний ефект від її впливу (з урахуванням конкретного виду ІВ) - поняттям «еквівалентна доза». Біологічний вплив радіації на живий організм починається на клітинному рівні і наслідки його можуть бути дуже різні. Так, одноразова дія значних доз порядку декількох зівертів (сотень бер) викликає гостру променеву хворобу і здатна приводити до смерті; хронічний радіаційний вплив на людину великими дозами опромінення (десятьками і сотнями бер щорічно протягом кількох років) обумовлює хронічну променеву хворобу, локальні пошкодження шкірних покривів, кровотворного кісткового мозку, ураження кришталика ока, пневмосклероз і т.д. [9].

Велика частина цих видів променевого ураження виникає через певний термін після гострого однократного або хронічного опромінення. Вони є так званими віддаленими ефектами опромінення на відміну від безпосередніх ефектів, до яких відноситься гостра променева хвороба і супутній їй симптомокомплекс.

Віддалені ефекти залежать від дози; зі зростанням дози зростає тяжкість ураження (така залежність ефекту від дози називається градуївною). Крім наведених, у віддаленому періоді можуть виникати ще два види ефектів, які називають стохастичними (тобто ймовірними, випадковими): 1) соматичні (тілесні) ефекти, зумовлені впливом радіації на групи клітин тканин окремих органів - злоякісні пухлини, лейкоз, локальні ушкодження шкіри (променеві опіки), катаракту очей, ураження печінки, статевих органів та ін.; 2) генетичні ефекти (викликані хромосомною аберацією) - вроджені каліцтва і порушення, тобто негативні зміни спадкових ознак як фізичного, так і психічного характеру і виникнення злоякісних новоутворень.

В основі обох зазначених видів стохастичних ефектів лежать мутації, які генеруються випромінюванням, та інші порушення в клітинних структурах, що відають спадковістю: в першому випадку (соматичні захворювання - рак) - в нестатевих соматичних клітинах різних органів і тканин, у другому - в статевих клітинах яєчників і сім'яників. Особливе, в певному сенсі проміжне, положення між соматичними і генетичними ураженнями займають ембріотоксичні ефекти, тобто наслідки опромінен-

ня плода, який особливо чутливий до опромінення на 4-12-му тижні вагітності [9].

Особливість обох видів стохастичних реакцій, як соматичних, так і генетичних, полягає в випадковій, ймовірній природі прояву ефекту. Залежність цих ефектів від дози носить не градуїований, а альтернативний характер. Це означає, що від дози залежить не тяжкість, глибина ураження, а лише ймовірність його виникнення, причому тяжкість самого ураження від дози не залежить або залежить незначно. При цьому зазначений характер їх прояву мало залежить від потужності дози (інтенсивності випромінювання), а визначається, в основному, сумарною накопиченою дозою, незалежно від того, отримана вона за 1 добу або за 50 років.

Деякі радіоактивні ізотопи здатні «вбудовуватися» в процес обміну речовин живого організму, заміщаючи неактивні елементи. Це призводить до утримання і накопичення радіоактивних речовин безпосередньо в живих тканинах, що збільшує ризик істотних збитків здоров'ю людини. Наприклад, в кістковій тканині відкладаються джерела гамма-випромінювання (радій, уран, плутоній), в м'язовій тканині - бета-випромінювання (стронцій, ітрій), в щитовидній залозі - йод і т.д.

Сучасні наукові уявлення про основні ефекти опромінення людини наведені в таблиці 1 [9].

#### **4.2. Особливості радіоактивно забрудненого металу як джерела опромінення людини**

Вихідним вражаючим чинником, що обумовлює радіаційну небезпеку радіоактивно забрудненого металу для людини, є радіонукліди, що знаходяться на поверхні металу.

По закінченню часу, що пройшов після потрапляння радіонуклідів на цю поверхню, їх сумарна активність безперервно знижується. В залежності від стійкості, що визначає швидкість цього процесу, радіонукліди поділяються на короткоживучі (з періодом напіврозпаду менше 10 діб) і довгоживучі (інші). При цьому найбільшу радіоактивність мають радіоізотопи йод-131, цезій-137, стронцій-90 і радіоізотопи плутонію. Якщо йод-131 становить небезпеку в перші 1-2 місяці після забруднення поверхні, то цезій-137 і стронцій-90 створюють тривале забруднення на багато років [1].

На поверхні металу радіоактивні частинки можуть закріплюватися в ньому, накопичуючись в виїмках, щорсткостях, порожнинах, що призводить до підвищення концентрації радіонуклідів на зараженій поверхні. Хоча в той же час можуть мати місце і певні процеси їх змиву атмосферними опадами і переносом вітру.

Таким чином, радіоактивно забруднений метал, як речовина з високою щільністю ( $\rho=7,8 \text{ г/см}^3$ ), характеризується тим, що радіонукліди розташовуються, як правило, на зовнішній стороні металевих виробів, утворюючи локальне джерело ІВ, яке має кінцеві розміри.

Таблиця 1. Основні клінічні ефекти впливу ІВ на людину

Умови (час) опромінення	Доза (накопичена) або потужність дози	Ефект
Одноразове, гостре, пролонговане, дробове, хронічне - всі види	Будь-яка доза відмінна від 0	Збільшення ризику віддалених стохастичних наслідків - раку і генетичних порушень; верхня межа цього ризику на колективну дозу (або людина - бер): летальних випадків від раку - 120 випадків, генетичних порушень - 45.
Хронічне впродовж низки років	0,1 Зв (10 бер) за рік і більше	Зниження не специфічної резистентності організму, яке не виявляється у окремих осіб, але може реєструватися при епідеміологічних обстеженнях.
Хронічне впродовж низки років	0,5 Зв (50 бер) за рік і більше	Специфічний прояв променевого впливу, зниження імунореактивності, катаракта (при дозах понад 30 бер (0,3 Зв) на рік).
Гостре одноразове	1,0 Зв (100 бер) і більше	Гостра променева хвороба різного ступеня тяжкості.
Гостре одноразове	4,5 Зв (450 бер) і більше	Гостра променева хвороба зі смертельним результатом у 50% опромінених.
Різні види	1,0 Зв (100 бер) і більше	Стохастичні ефекти, реальне зростання яких вже може бути виявлено при епідеміологічних дослідженнях.
Пролонговане, 1-2 місяці на щитовидну залозу від йоду-131	10,0 Зв (1000 бер) і більше	Гіпофункція щитовидної залози; зростання ризику розвитку пухлин (аденом і раку) з імовірністю близько $1 \times 10^{-2}$ .

При розпаді радіонуклідів випускається ІВ, яке поширюється від поверхні радіоактивно забрудненого металу через приземний шар атмосфери до людини по прямій лінії. Проникаюча здатність ІВ різних видів характеризується довжиною пробігу в речовині. З усіх видів випромінювання найбільшу небезпеку для людини представляє гамма-випромінювання: його пробіг в повітрі складає сотні метрів, воно здатне проникати всередину організму на значну глибину і впливати на внутрішні органи. Отже, ефективна доза зовнішнього опромінення людини ( $E_{зовн}$ ) формується практично тільки дозою гамма-випромінювання  $E_{\gamma}$ [8].

Для того, щоб метал, забруднення якого радіонуклідами призвело до підвищення рівня ІВ з його поверхні, можна було використовувати повторно, необхідно перш за все забезпечити його радіаційну безпеку. З цією метою встановлюється система радіаційно-гігієнічних регламентів як для окремої людини, так і для суспільства в цілому. В основу таких регламентів покладено рекомендації Міжнародної Комісії з радіаційного захисту (МКРЗ). Згідно з НРБУ-97 [10], основним критерієм радіаційної безпеки техногенного джерела ІВ є індивідуальна річна ефективна доза зовнішнього опромінення індивідуума, що знаходиться в зоні дії випромінювання джерела, яка не повинна перевищувати встановлену ліміт дозу. Для будь-якої особи з населення (категорія В) числове значення річного ліміту дози ЛД<sub>Е</sub> становить 1 мЗв/рік, а для виробничого персоналу (категорія А) - 20 мЗв/рік, причому протягом календарного року розподіл дози не регламентується.

У даній статті враховані рекомендації, викладені в публікації 103 МКРЗ [11], які систематизують і доповнюють вказівки щодо контролю опромінення

від джерел ІВ, розроблені після введення в дію НРБУ-97.

Так як радіоактивно забруднений метал - це відкрите джерело ІВ, то під впливом атмосферних явищ радіонукліди можуть безконтрольно переходити в атмосферу, ґрунт, ґрунтові води і т.п. Всередину організму опромінюваної людини радіонукліди потрапляють разом з повітрям, а також при споживанні води і їжі, але не безпосередньо від забрудненого металу. Отже, при оцінці ступеня радіаційної небезпеки безпосередньо радіоактивно забрудненого металу для людини можна дозою внутрішнього опромінення знехтувати.

В результаті радіонукліди, які знаходяться на поверхні РЗМ, що є по відношенню до опромінюваної людини зовнішнім джерелом ІВ, можуть формувати додаткову до природного радіаційного фону дозу  $E_{дод}$  за рахунок тільки однієї складової - гамма-випромінювання  $E_{\gamma}$ . При цьому значення дози  $E_{дод}$  від радіонуклідного складу забруднення не залежить, а про ступінь забруднення поверхні прийнято судити за потужністю дози гамма-випромінювання, а також за величиною поверхневої (об'ємної) активності (за кількістю актів розпаду ядер за одиницю часу на певній площі або в певному об'єму). Отже, річну індивідуальну дозу зовнішнього опромінення  $E_{дод}$  можна оцінити шляхом вимірювання потужності дози гамма-випромінювання  $P_{\gamma}$  з поверхні РЗМ і сумарною тривалістю опромінення даного індивідуума  $T_{обл}$  за один рік:

$$E_{дод} = P_{\gamma} T_{обл} \quad (1)$$

Потужність дози гамма-випромінювання зменшується з віддаленням точки її вимірювання від джерела, тому що збільшується товщина поглинаючого шару атмосфери, через який розповсю-

джується випромінювання. Тому оцінювана потужність має максимальне значення  $P_Y^{\max}$  безпосередньо у поверхні, що випромінює, і доза опромінення людини, що знаходиться у цій поверхні, буде найбільшою в порівнянні з тими дозами, якими одночасно можуть опромінюватись інші люди в зоні дії випромінювання, створеного радіоактивно забрудненим металом.

Одержуваний в результаті переплавлення радіоактивно забрудненого металу метал буде безпечним в радіаційному відношенні при виконанні співвідношення:

$$E_{\max} \leq \text{ЛД}_E, \quad (2)$$

де  $\text{ЛД}_E$  - ліміт ефективної дози, при якому забезпечується радіаційна безпека радіоактивно забрудненого металу.

Якщо врахувати, що значення річної ефективної дози і потужності гамма-випромінювання пов'язані між собою лінійною залежністю (1), то співвідношення (2) можна представити у вигляді:

$$P_Y^{\max} \leq P_{\text{доп}}, \quad (3)$$

де  $P_{\text{доп}}$  - допустиме значення потужності дози гамма-випромінювання.

Значення  $P_{\text{доп}}$  є допустимим рівнем усередненої за рік потужності дози гамма-випромінювання, який відповідає ліміту ефективної дози за умови, що індивідуум піддається тільки зовнішньому опроміненню від даного джерела.  $P_{\text{доп}}$  є похідним нормативом від ефективної дози і, отже, може використовуватись в якості єдиного критерію радіаційної безпеки металу. Власне, такий підхід і застосовується на практиці. У металургійній промисловості метал вважається радіаційно безпечним, якщо потужність поглиненої дози у його поверхні не перевищує 0,2 мкГр / год [8].

### 5. Сутність проблеми радіаційної безпеки при плавленні радіоактивно забрудненого металу

Процес утилізації радіоактивно забрудненого металу за перспективною технологією його рециклінгу з урахуванням ефекту його самодезактивації, що запропонований в [8], а також в ряді інших робіт цих авторів, включає ряд операцій, пов'язаних з заготівлею радіоактивно забрудненого металу, його зберіганням і транспортуванням, фрагментацією великогабаритних елементів, завантаженням в плавильну піч, безпосередньою переплавою, отриманням готових злитків і їх відвантаженням споживачу.

На всіх етапах цього процесу безпосередньому радіаційному впливу з боку радіоактивно забрудненого металу буде піддаватися насамперед виробничий персонал, який виконує всі зазначені, а також інші види робіт з радіоактивно забрудненим металом. Найважливішим завданням керівного складу підприємства при цьому буде безумовне забезпечення радіаційної безпеки персоналу, недопущення його опромінення понад встановленої норми. Вирішення цієї надзвичайно відповідальної і складної задачі лежить в площині розробки, планування та проведення комплексу профілактичних,

санітарно-гігієнічних, організаційних, технічних, лікувально-відновлювальних та інших заходів, об'єднаних єдиним задумом досягнення радіаційної безпеки працюючих та недопущення додаткового радіоактивного забруднення навколишнього середовища.

Важливим елементом зазначеного комплексу заходів є оцінка радіаційної обстановки (РО), яка може сформуватись на території підприємства, що здійснює роботи з утилізації радіоактивно забрудненого металу. Її основний зміст і загальний порядок проведення викладені в [12]. Оцінка радіаційної обстановки в кожному конкретному випадку здійснюється з використанням початкових вихідних даних, які отримуються перш за все в результаті проведення вхідного радіаційного контролю РЗМ. Загальні радіаційно-гігієнічні та організаційно-технічні вимоги та порядок проведення всіх видів радіаційного контролю металобрухту наведені в [13].

Оцінка РО здійснюється для визначення ступеня її потенційного впливу на персонал, який виконує роботи по утилізації радіоактивно забрудненого металу, і включає визначення масштабів і ступеня радіаційного забруднення металобрухту, аналіз їх впливу на дії персоналу, вибір найбільш доцільних варіантів дій, при яких виключається опромінення персоналу наднормативними рівнями радіації. Мета - попередити несприятливі наслідки опромінення людей в процесі проведення всіх операцій по утилізації радіоактивно забрудненого металу. Відповідно з [10], цей персонал відноситься до осіб, які постійно або тимчасово працюють безпосередньо з джерелами ІВ (категорія А). Для персоналу цієї категорії ліміт річної дози опромінення становить 20 мЗв/рік (2 бер/рік) без регламентації розподілу дози опромінення протягом року.

Згідно з [14] до низькоактивних відносяться радіоактивні відходи, у яких потужність поглиненої в повітрі дози (ППД) гамма-випромінювання на відстані 0,1 м від поверхні, на якій знаходяться радіоактивні речовини, становить (1-100) мкГр / годину ((0,1-10) мрад / годину). Звідси випливає, що при поводженні з радіоактивно забрудненим металом, що є джерелом зовнішнього гамма-випромінювання, неперевищення річного індивідуального ліміту дози (ЛД) досягається обмеженням тривалості роботи  $t_p$  з ним, що визначається зі співвідношення  $t_p = \text{ЛД} / \text{ППД}$ . Залежно від вимірної потужності поглиненої дози на поверхні РЗМ, з яким проводяться операції без використання додаткових заходів захисту, цей час становить  $t_p = 2 \text{рад} / (0,1-10) \times 10^{-3} \frac{\text{рад}}{\text{год}} = (200 \div 2000) \text{ год}$ .

Забезпечення радіаційної безпеки в загальному випадку вимагає проведення комплексу різноманітних захисних заходів, що залежать від конкретного виду і умов роботи з джерелами ІВ, а також від типу джерел.

Головною небезпекою закритих джерел ІВ для людини є зовнішнє опромінення, яке визначається

видом випромінювання, активністю джерела, щільністю потоку випромінювання і створюваної ним дозою опромінення і поглиненою дозою. Захисні заходи, що дозволяють досягти необхідного рівня радіаційної безпеки, засновані на законах поширення ІВ і характері їх взаємодії з речовиною. До основних з них належать такі:

Доза зовнішнього опромінення пропорційна інтенсивності випромінювання і часу дії.

Інтенсивність випромінювання від точкового джерела пропорційна кількості квантів або часток, що виникають у ньому за одиницю часу, і обернено пропорційна квадрату відстані від джерела.

Інтенсивність випромінювання може бути зменшена за допомогою екранів.

З цих положень закономірно випливають основні принципи забезпечення радіаційної безпеки:

зменшення потужності джерел до мінімально можливих величин (захист кількістю);

скорочення часу роботи з джерелом (захист часом);

збільшення відстані від джерела до працюючого (захист відстанню);

екранування джерел випромінювання матеріалами, що поглинають іонізуюче випромінювання (захист екранами).

#### 6. Обґрунтування доцільності перегляду допустимих рівнів опромінення

Як правило, радіоактивність радіоактивно забрудненого металу перевищує природний фоновий рівень лише в кілька разів. У той же час аналіз встановлених правилами [15] допустимих рівнів індивідуального опромінення персоналу, що виконує операції з металобрухтом, показує, що має місце суттєве необґрунтоване обмеження можливостей по утилізації низькоактивного металобрухту. Фактичні умови опромінення дозволяють персоналу працювати і при більш високих рівнях опромінення, що забезпечують в той же час неперевищення лімітів доз опромінення, встановлених нормами [10]. Це обумовлює доцільність перегляду допустимих рівнів опромінення при виконанні операцій з металобрухтом у відповідності з порядком, встановленим Міністерством охорони здоров'я. Дійсно, згідно з [13], якщо при поводженні з РЗМ виміряна потужність поглиненої дози більш 0,43 мкГр/год (потужність експозиційної дози більше 50 мкР/год), то він вилучається з обігу; але це ті максимальні значення, при яких радіаційна обстанов-

ка вважається нормальною, а радіаційна безпека персоналу - досягнутою. Разом з тим ці обмеження можуть бути забезпечені і при набагато більш високих рівнях поверхневої забрудненості РЗМ радіоактивними речовинами. При цьому також забезпечується не перевищення лімітів, встановлених для осіб категорії А [10].

Раніше проведеними дослідженнями, результати яких викладені в [12] встановлено, що при виконанні операцій з РЗМ основну небезпеку для персоналу складає зовнішнє гамма-опромінення, джерелом якого є радіоізоотоп цезія-137. У той же час при переплавці РЗМ цезій, маючи температуру кипіння 685°C (яка нижча за температуру в печі), випаровується з розплаву і становить основну частину газоподібних радіоактивних викидів в навколишнє середовище, супутніх розглянутому процесу. При цьому забруднення радіоактивним цезієм відбувається внаслідок перенесення аерозолів цезію і його сполук атмосферними потоками. Осідаючи, аерозолі покривають тонким шаром різні матеріали, рослинність, воду, одяг, ґрунт, будівлі, дороги та ін. При цьому найбільш серйозну небезпеку становлять повітря і продукти харчування, забруднені радіоактивним цезієм [16]. Отже, переплавлення РЗМ повинне вестися в печах, оснащених надійною системою газоочищення, до складу якої включені відповідні фільтруючі пристрої, що запобігають забрудненню атмосфери радіоактивним цезієм в певних межах, а найважливішим елементом радіаційної безпеки плавлення РЗМ є контроль забруднення атмосфери радіоізотопами цезію (див. також там).

Тому система газоочищення повинна забезпечувати мінімальний вихід аерозолів цезію з печі, дотримання норм радіаційної безпеки і рівня концентрації цезію в повітрі на вентиляційних викидах не вище допустимої норми. У таблиці 2 і 3 [16] наведені числові значення допустимих рівнів (Д) цезію відповідно до [10] для працюючого персоналу (категорії А і Б) і населення (категорія В). Величина Д має два індекси: перший використовується для допустимого надходження (Н) і допустимої концентрації (К), другий індекс (а, б, в) має відношення до однієї з трьох категорій відповідно [10].

Як видно з таблиць, піч, в якій здійснюється плавлення РЗМ, повинна забезпечити для населення концентрацію цезію в вентиляційних викидах в повітрі менше, ніж  $8 \times 10^{-1}$  Бк/м<sup>3</sup>.

Таблиця 2. Числові значення допустимих рівнів <sup>137</sup>Cs для категорій А та Б

Персонал категорії А		Персонал категорії Б		Мінімальне значення активності на робочому місці МЗА, мкКи	
Надходження через органи дихання D <sub>на</sub> , Бк/рік	Концентрація радіонукліда в повітрі робочої зони D <sub>ка</sub> , Бк/м <sup>3</sup>	Надходження через органи дихання D <sub>нб</sub> , D <sub>кб</sub> , Бк/рік	Концентрація в робочій зоні, D <sub>кб</sub> , Ки/л		
			Повітря	Вода	
1×10 <sup>5</sup>	6×10 <sup>1</sup>	0,1 D <sub>на</sub> , 0,1 D <sub>ка</sub>	1,9×10 <sup>-13</sup>	1,5×10 <sup>-8</sup>	10

Таблиця 3. Числові значення допустимих рівнів <sup>137</sup>Cs для населення (категорія В)

Група радіаційної безпеки при внутрішньому надходженні	Населення (категорія В)			
	Надходження через органи дихання $D_{нв}, \text{Бк/рік}$	Концентрація радіонукліда в повітрі $D_{кв}, \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3}$	Надходження через органи травлення $D_{нв}, \frac{\text{Бк}}{\text{рік}}$	Концентрація радіонукліда в питній воді $D_{кв}, \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3}$
В	$2 \times 10^3$	$8 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^4$	$1 \times 10^5$

Для дотримання такого показника в [8] запропонована багатоступенева система очистки, необхідна ефективність якої досягається застосуванням в якості останнього ступеня очистки викидів електрофільтру, принцип дії якого полягає в наступному. В основі запропонованого методу лежить той факт, що радіонукліди, які є, як правило, металами, знаходяться в навколишньому середовищі у вигляді іонів. Тому газоаерозольні викиди можна очистити, пропускаючи забруднений радіонуклідами газ через поперечне постійне електричне

поле, створюване системою паралельно приєднаних різнойменно заряджених електродів. Під дією цього поля позитивно заряджені іони рухаються в напрямку катода. Шляхом підбору параметрів процесу очищення аерозольних викидів створюються умови, при яких радіоізотопи металів накопичуються у катода, і таким чином відбувається очищення газу [17].

Схема установки, на якій реалізується запропонований спосіб очищення, представлена на рис. 1.



Рисунок 1 Схема електрофільтру для очищення газоаерозольних викидів, забруднених радіонуклідами

Електрофільтр вбудований в газохід 1, поперечний переріз якого перекривається системою пластинчастих електродів 2. Електроди довжиною l розміщені на однакових відстанях d один від одного і підключені до блоку електроживлення 3. Аноди А і катода К об'єднані між собою паралельно. Забруднений газ надходить в електрофільтр зі швидкістю  $V_1$ . Рухаючись з цією швидкістю разом з газом, радіонукліди знаходяться в міжелектродному просторі протягом часу  $t_2 = l/V_1$ . Після проходження між електродами 2 очищений від радіонуклідів газ покидає межі електрофільтру. Під дією напруженості електричного поля  $E = U/d$  позитивні іони радіонуклідів рухаються в напрямку катода зі швидкістю  $V_+ = a_+ \times E$ , де  $a_+$  - рухливість позитивних іонів в газі, значення яких наводяться в відповідних таблицях.

Для видалення всіх радіонуклідів, які внесені в електрофільтр, необхідно, щоб вони за час  $t_2$  встигли сконцентруватися біля катода. З рис. 1 видно, що ця вимога буде виконана, якщо мінімальна довжина катода l буде такою, щоб іони, які надійшли в міжелектродний простір у анода і мають перпендикулярний напрямку руху газу складаючи швидкість іонів  $V_+$ , за час  $t_2$  подолали відстань d.

На практиці значення параметрів електрофільтру, а саме, довжина електродів l і відстань між

ними d задаються. Також відомі швидкість газу  $V_1$  і рухливість іонів радіонуклідів, від яких очищується газ.

Іони можуть переміщуватись уздовж еквіпотенційної поверхні катода під дією потоку газу і покинути межі електрофільтру. Для запобігання цього ефекту пропонується нанести на катод сітку з діелектричного матеріалу товщиною 5 мм, яка буде непереборною перешкодою для іонів. Це пов'язано з тим, що міжелектродне електричне поле не дозволяє позитивним іонам обігнути діелектричну сітку разом з потоком газу. В результаті іони залишаються у катоді в комірках цієї захисної сітки.

Такий захисний шар товщиною до 5 мм може бути виготовлений з фільтруючих матеріалів, які здатні пропускати через себе іони металів в напрямку до катода, і перешкоджати їх руху вздовж нього.

Розрахунки, наведені в [17], показують, що для затримки всіх іонів металів в електрофільтрі, на пластину електродів необхідно подавати напругу до 50 В.

### 7. Висновки

Проведений аналіз питань радіаційної безпеки плавлення РЗМ на всіх етапах процесу його утилізації показав, що при виборі раціональних варіан-



тів дій виключається опромінення персоналу рівнями радіації, що перевищують нормативні, а також додатковий радіаційний вплив на навколишнє середовище.

Критерієм радіаційної безпеки металу, одержуваного в результаті переплавлення РЗМ з метою його утилізації, є максимальне значення потужності дози гамма-випромінювання з його поверхні, при якому забезпечується не перевищення встановленого ліміту індивідуальної річної ефективної дози опромінення.

Для зняття деяких не виправдано жорстких обмежень доцільно переглянути допустимі рівні опромінення персоналу, що виконує операції з

РЗМ, відповідно до порядку, встановленого Міністерством охорони здоров'я України [10].

Необхідний рівень радіаційної безпеки готових виробів, одержуваних в результаті переплавлення РЗМ, досягається як за рахунок використання ефекту самодезактивації, так і за рахунок випарування з розплаву тих радіонуклідів, температура кипіння яких нижче робочої температури в плавильній печі.

Використання розглянутого підходу до забезпечення радіаційної безпеки утилізації РЗМ дозволяє істотно поліпшити техніко-економічні показники процесу виробництва металів, а також підвищити екологічну безпеку навколишнього середовища.

#### Бібліографічний опис.

1. Антонов В.П. Уроки Чернобыля: радиация, жизнь, здоровье. – К.: О-во «Знание», УССР, 1989. - 112 с.
2. Ампелогова Н.И., Трапезников А.А.: Дезактивация в ядерной энергетике. М., 1982. - 256 с.
3. Лампард Д., Хиллис К. Переплавка радиоактивного металлолома. Атомная техника за рубежом. 2007, № 3, с.27-30.
4. Copeland G.L., Heshmatpour B. Decontamination of TRU - Contaminated Metal Waste by Smelting Refining. Transactions of the American Nuclear Society. 1981. № 38. P 193-195.
5. Гуменюк В.И., Ломасов В.Н., Моторный А.В., Коробицын А.Р. Технология плавления радиоактивного металла с целью перевода основной части радионуклидов в шлак. Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. №1. С.286-291.
6. Бережко Б.И., Горинин В.И., Никишин Г.Д., Хохлов А.А. Утилизация радиоактивных металлических отходов методом переплава. Вопросы материаловедения. 1995. №2. С.74-77.
7. Черемисин П.И. Обращение с металлическими отходами, загрязненными радиоактивными веществами. Рециклинг отходов. 2008. №2(14). С.2-5.
8. Балакин В.Ф., Машинистов В.Е., Коверя А.С. Перспективная технология рециклинга радиоактивного загрязненного металла на основе его плавления. Ядерная та радіаційна безпека. 2018. №2(78). С.43-48.
9. Кириллов В.Ф., Книжников В.А., Коренков И.П. Радиационная гигиена; Под ред. акад. АМН СССР Л.А. Ильина. – М.: Медицина, 1988 – 336 с., ил.
10. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. К., 1998. 135 с.
11. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер. с англ. / Под ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
12. Машинистов В.Е., Галкин О.Ф., Синицын Я.С. Оценка радиационной обстановки при утилизации радиоактивно загрязненного металла на металлургических предприятиях // Теория и практика металлургии.- 2014. — №3-6. С. 118-122.
13. Державні санітарно-екологічні норми і правила з радіаційної безпеки при проведенні операцій з металобрухтом ДСЕНІП6.6.1.-0.79/211.3.9001-02.
14. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України №54 від 02.02.2005р.
15. Кимель Л.Р., Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. Изд. 2. М., Атомиздат, 1972, 312 с.
16. Верюжський Ю.В., Гринько О.М., Токаревський В.В. Радіаційна безпека спалювання радіоактивних відходів, забруднених цезієм. Ядерна та радіаційна безпека. 2017. №1 (73). С.66-72.
17. Машинистов В.Е., Алпаев Е.Н., Кобзарь О.Р. Очистка промышленных газообразных выбросов от радионуклидов электростатическим полем. Перспективні напрямки світової науки: 36. статей учасників 37-ї Всеукр. наук.-практ. конф. «Інноваційний потенціал світової науки - XXI сторіччя». Запоріжжя, 19-22 квітня 2016. Т.2. С. 28-30.

#### References

1. Antonov, V.P. Chernobyl Lessons: Radiation, Life, Health. - K.: Society "Knowledge", USSR, 1989. - 112 p.
2. Ampelohova, N.I., Trapeznikov, A.A., (1982), "Decontamination in Nuclear Power Engineering" [Dezaktivaciya v yadernoj energetike], Moscow, 256 p. (Rus).
3. Lampard, D., Hillis, K., (2007), "Remelting of Radioactive Scrap Metal" [Pereplavka radioaktivnogo metalloloma], Atomic technology abroad, No 3, pp. 27-30. (Rus)
4. Copeland, G.L., Heshmatpour, B., (1981), "Decontamination of TRU - Contaminated Metal Waste by Smelting Refining", Transactions of the American Nuclear Society, No 38, pp 193-195.
5. Gumeniuk, V.I., Lomasov V.N., Motorny A.V. Korobitsyn A.R., (2013), "Technology of Melting Radioactive Metals for Transferring Radionuclides to the Slag"[Tekhnologija plavlenija radioaktivnogo metalla s tseliu perevoda osnovnoy chasti radionuklidov v shlak], Scientific and Technical bulletins of the St. Petersburg State Polytechnic University. No 1, pp.286-291. (Rus)
6. Berezhko, B.I., Gorinin V.I., Nikishin G.D., Khokhlov A.A. (1995), "Recycling of Radioactive Metal Waste by Remelting" [Utilizaciya radioaktivnyh metallicheskih othodov metodom pereplava], Issues of Materials Science, No 2, pp.74-77. (Rus)



7. Cheremisin, P.I. (2008), "Handling of Metal Waste Contaminated With Radioactive Substances" [Obrashhenie s metallicheskimy othodami, zagryaznennymi radioaktivnymi veshhstavami], Waste Recycling, No 2 (14), pp.2-5. (Rus)
8. Balakin V.F., Mashinistov V.E., Koverya A.S. (2018), "Perspective Technology of Recycling of Radioactive Contaminated Metal Based on its Melting". Nuclear and Radiation Safety, No 2 (78). P. 43-48. (Rus)
9. Kirillov V.F., Knizhnikov V.A., Korenkov I.P. Radiation Hygiene; Ed. acad. AMS USSR L.A. Ilyin - Moscow: Medicine, 1988 - 336 p., illustration.
10. NRBU-97 Radiation Safety Standards of Ukraine. State Health and Safety Standards. [Normy radiatsijnoi bezpeky Ukrainy (NRBU-97). Derzhavni hihienichni normatyvy], Kyiv, 1998. - 135 p.
11. Kiselev, M.F., Shandala N.K. (2009), Annals of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) [Publikatsija 103 Mezhdunarodnoi Komissii po radiatsionnoj zashcite (MKRZ)], Moscow, 344 p. (Rus)
12. Machinistov V.E., Galkin O.F., Sinitsin Y.E. Estimation of radiation situation at utilization of radioactive contaminated metal in metallurgical enterprises // The theory and practice of metallurgy. 2014. № 3-6. P. 118-122.
13. State sanitary-ecological norms and rules on radiation safety during operations with scrap metal DSENiP 6.6.1.-0.79 / 211.3.9001-02.
14. Basic sanitary rules of radiation safety of Ukraine № 54 of 02.02.2005.
15. Kimel L.R., Mashkovich V.P. Protection against ionizing radiation. Directory. Izd. 2. M., Atomizdat, 1972, 312 p.
16. Veryuzhsky, Y.V., Grinko O.M., Tokarevsky V.V. (2017), "Radiation Safety for Incineration Radioactive Waste Contaminated by Cesium" [Radiatsiina bezpeka spaliuvannia radioaktyvnykh vidhodiv zabrudnenykh tseziem], Nuclear and Radiation Safety. No 1 (73). P.66-72. (Ukr)
17. Mashinistov, V.E., Alpayev, E.M., Kobzar, O.R. "Purification of industrial gaseous emissions from radionuclides by electrostatic field" [Ochistka promyshlennykh gazoobraznykh vybrosov ot radionuklidov elektrostatcheskim polem], Perspective directions of world science. Collection of articles of participants of the 37th Allukr. scientific-practical conf. "Innovative Potential of World Science - XXI Century". Zaporozhye, April 19-22, 2016. V.2, P. 28-30. (Rus)

Стаття поступила 09.01.2019

### Вимоги щодо оформлення статей:

Структура:

УДК

Назва статті українською мовою (регістр як в реченні, не більш 15 слів без переносів)

Автори українською мовою (Прізвище, І.П не більш 6)

Назва статті англійською мовою (регістр як в реченні, не більш 15 слів без переносів)

Автори англійською мовою (Прізвище, І.П не більш 6)

Анотація українська: (200-400 слів), повинна містити:

Мета.

Методика.

Результати.

Наукова новизна.

Практична значущість.

Ключові слова:

Анотація на англійській мові: (200-400 слів) , повинна містити:

Purpose

Methodology

Findings

Originality

Practical value.

Keywords

Текст статті українською або англійською мовою:

Вступ

Аналіз літературних даних та постановка проблеми (обов'язково з аналізом джерел, які індексуються в науково метричних базах даних Scopus або Webofscience).

Мета і завдання досліджень

Матеріали та методи дослідження

Результати дослідження

Обговорення результатів.

Висновки

Бібліографічний опис згідно ДСТУ 8302:2015 (при наявності у матеріалів індексів DOI або індексування матеріалу в наукометричних базах обов'язково вказувати ці індекси)

References (переклад бібліографічного опису на англійську мову, або транслітерація його на англійську мову)

Відомості про авторів статті: (на кожного автора: ПІБ, науковий ступінь, місце роботи, ORCID, e-mail, телефон)

Стаття повинна бути оформлена в редакторі Word. Поля 20мм x 20 x 20. Шрифт Times New Roman, розмір 14, інтервал 1,5.

Формули повинні бути набрані в об'єкті Microsoft Education 3.0.

Рисунки повинні бути в складі тексту, обтікання виставлено в режим «в тексті», або включені у комірку таблиці з таким же режимом.