

УДК 621.039.736:621.745

Лукін Є.В., Машиністов В.Є., Галкін О.Ф., Кушнір Є.Р.

## ОСОБЛИВОСТІ УТИЛІЗАЦІЇ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНОГО МЕТАЛОБРУХТУ ПРИ ПЕРЕПЛАВЦІ

*Розглянутий підхід до утилізації радіоактивно забрудненого металобрухту (РЗМ) методом переплавки. Досліджений вплив самопоглинання радіаційної енергії речовиною металу на глибину його дезактивації. Запропонований алгоритм розрахунку значення допустимої активності РЗМ для здобуття радіаційно-безпечного металу. Приведені результати експериментальної перевірки ефекту самодезактивації.*

*Ключові слова: дезактивація, радіонуклід, радіоактивне забруднення, іонізуюче випромінювання, товщина шару половинного ослаблення*

*Annotation*

*The practice of recycling of radioactively contaminated scrap metal (RCSM) by the remelting method is considered in the aspect of radiation safety of the metal being smelted. A complex and resource-intensive stage of the technological cycle of utilization is the preliminary deactivation of the surface of the RCSM, which is loaded into the melting furnace. Also, technology is associated with the formation of secondary radioactive waste that require burial.*

*The approach to this technology is considered in the article, taking into account the effect of self-absorption of radiation by a metal substance. Theoretical substantiation of the inevitable losses of the energy of ionizing radiations on the interaction with the substance of the propagation medium is given. The effectiveness of this phenomenon is analyzed using the example of natural self-deactivation in the material of the earth's crust.*

*It is shown that taking into account the self-deactivation effect in the melt volume, and by means of technological limitation of the activity of the RCSM introduced into the furnace, a normatively safe level of gamma radiation from the surface of the finished metal is achieved.*

*The material of the article is supplemented by an analysis of the results of the experimental verification of the effect of self-deactivation in the volume of a radioactive substance.*

*An algorithm for the technology of recycling by remelting the RCSM without its preliminary deactivation and the formation of new radioactive waste is proposed.*

### 1. Введення

В процесі експлуатації ряду об'єктів сучасної техносфери відбувається накопичення радіоактивно забруднених відходів (РАВ): елементів виробничих конструкцій, обладнання та матеріалів. Характер забруднення визначається профільною належністю техногенного об'єкту, специфікою технологічних процесів, складом сировини і може бути поверхневим або об'ємним. При цьому джерелами радіоактивного забруднення можуть бути радіонукліди як природного, так і штучного походження. Радіонукліди, що знаходяться на поверхні забрудненої металу, є джерелами іонізуючого випромінювання (ІВ), яке потенційно небезпечно для біологічних об'єктів. З цієї причини забруднені металеві вироби є непридатними для використання за своїм прямим призначенням. У той же час в металургійній промисловості відчувається дефіцит металобрухту, який використовується в якості шихти [1].

Крім того, практична реалізація безпечного тривалого зберігання або поховання, а також рекультивация місць розміщення РАВ, є не тільки ресурсомістким, але і технічно складним завданням, особливо в плані забезпечення радіаційної безпеки робіт, що виконуються. Тому пошук ефективних технологічних підходів до утилізації РЗМ зберігає свою актуальність.

Питання утилізації радіоактивно заражених матеріалів, перш за все РЗМ, з метою повторного використання також нерозривно пов'язаний з рішенням аспекту радіаційної безпеки робочого

персоналу. При цьому вкрай важливим є зважений підхід до оцінки характеру впливу радіаційної енергії на людину. Детальний аналіз умов, в яких людина піддається впливу конкретних джерел іонізуючих випромінювань від РЗМ (на всіх етапах технологічного циклу утилізації), а не медичний аспект наслідків такого впливу на його здоров'я, буде розглянутий в даній статті.

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

Основним етапом технологічного циклу з утилізації РЗМ є процес дезактивації. На практиці дезактивація зводиться до видалення (повного або часткового) радіонуклідів з поверхні або з об'єму речовини забрудненого об'єкта. Технологічно дезактивація реалізується механічним або фізико-хімічними способами, пов'язаними з неминучим виникненням нових радіоактивних відходів і шкодою навколишньому природному середовищу [2-3]. Наприклад, технологія глибокої малоотходної дезактивації РЗМ, яка включає два етапи [4]:

- поверхнева дезактивація об'єкта, що утилізується;

- дезактивація металу переплавою під шаром спеціальних рафінуючих флюсів з видаленням радіоактивних речовин в шлак і газоаерозольні викиди.

При цьому залишковий вміст радіонуклідів в об'єму розплаву повинен відповідати нормативному рівню радіаційної безпеки, який реєструється дозиметрією по випромінюванню з поверхні металу, що одержується. Зазначене

Лукін Євген Вікторович – к.в.н, доц. НМетАУ, ORCID:0000-0002-0443-1823,  
Машиністов Віктор Єгорович – к.т.н., доц. НМетАУ, ORCID:000-0003-3444-5713,  
Галкін Олег Федорович – ст.викл НМетАУ, ORCID: 0000-0002-6256-9417,  
Кушнір Євген Романович – студент НМетАУ, ORCID: 0000-0003-0777-1919

відповідність реалізується обмеженням повної активності РЗМ, внесеного в плавильну піч.

Розглянутий підхід не враховує роль фізичних процесів, що відбуваються з радіонуклідами в середовищі розплавленого металу і роблять істотний вплив на досягнення необхідної глибини дезактивації РЗМ. Для пояснення зазначеного зауваження спочатку відзначимо простий факт: радіаційну небезпеку для людини становлять не самі по собі радіонукліди, а енергія іонізуючих випромінювань (ІВ), що супроводжує внутріатомні процеси в них. На об'єкт захисту, розташований поза об'ємом радіоактивно забрудненої речовини, може впливати тільки енергія іонізуючих випромінювань з зовнішньої поверхні цього об'єму.

У загальному випадку, енергія іонізуючого випромінювання з поверхні об'єкта є суперпозицією енергетичних вкладів від усіх радіонуклідів, які були розповсюджені у його об'ємі. Величина індивідуального вкладу крапкового джерела ІВ (радіонукліда) буде визначатися його віддаленням від розглянутої зовнішньої поверхні, енергетичними характеристиками виду випромінювання і параметрами речовини, що заповнює об'єм. Зазначена залежність зумовлює неминучі втрати радіаційної енергії при виході на поверхню об'єму, обумовлені складними процесами її взаємодії з речовиною середовища поширення.

Врахування енергетичних втрат ІВ є вкрай важливим моментом в оцінці рівня потенційної радіаційної небезпеки металу, що одержується при утилізації РЗМ методом переплавки, і вимагає ретельного аналізу, як в теоретичному аспекті, так і за результатами експериментальних досліджень.

### 3. Мета і завдання дослідження.

Метою викладеного в даній статті дослідження є оцінка рівня радіаційної небезпеки металу, що одержується при утилізації РЗМ методом його переплавки в металургійній печі.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- дослідити поведінку радіонуклідів в речовині розплавленого металу;
- виконати оцінку рівня гамма-випромінювання з поверхні металу, що виплавляється з РЗМ металу;
- оцінити вплив ефекту самодезактивації речовини на радіаційну безпеку;
- провести лабораторний експеримент з виявлення залежності рівня ІВ з зовнішньої поверхні об'єму радіоактивної речовини від товщини шару речовини;
- запропонувати алгоритм отримання радіаційно-безпечного металу методом переплавки РЗМ з урахуванням ефекту самодезактивації.

**4. Аналіз впливу процесу плавлення РЗМ на рівень іонізуючих випромінювань з поверхні продукту плавки. Експериментальне**

**дослідження ефекту самодезактивації в об'ємі радіоактивної речовини.**

У даній статті викладені результати теоретичного дослідження питання отримання радіаційно безпечного металу, виплавленого з РЗМ за технологією, що виключає утворення вторинних РАВ. Наводиться аналіз результатів лабораторного експерименту з виявлення характеру залежності рівня ІВ з зовнішньої поверхні об'єму радіоактивної речовини від товщини шару речовини.

**4.1. Дослідження поведінки радіонуклідів в речовині розплавленого металу.**

Плавлення металу в печі відбувається при температурі близько 1600°C і при інтенсивному перемішуванні металургійної сировини. Крім металу, продуктами плавки також є шлак і газоаерозольні викиди.

В [5] показано, що значна частина радіонуклідів природного походження (наприклад, цезій-137, стронцій-90, калій-40), що знаходяться в печі, в процесі плавлення переходять в пилогазову фазу, зменшуючи тим самим їх кількість у виплавленому металі.

Таким чином, процес плавлення призводить до часткового очищення металу від радіонуклідів, що його забруднюють. У металі залишається, перш за все, кобальт-60 [1], температура кипіння якого (2255°C) перевищує температуру в печі, а його щільність вище щільності заліза [6].

В процесі реалізації другого етапу вищевказаної технології глибокої малоотходної дезактивації [4] відбувається перерозподіл радіонуклідів, які перебували на поверхні РЗМ, всередину об'єму розплаву. При цьому в силу рівномірного розподілу радіонуклідів в розплавленому металі значення його питомої активності буде незмінним в межах його об'єму.

**4.2. Оцінка рівня гамма-випромінювання з поверхні металу, що виплавляється з РЗМ.**

Іонізуюче випромінювання (ІВ), що створюється радіонуклідами має корпускулярно-хвильову природу. В енергетичному аспекті основними компонентами ІВ є потоки альфа- і бета-частинок, а також електромагнітне гамма-випромінювання (гамма-кванти). Вихід ІВ на поверхню об'єму речовини, що містить радіонукліди, пов'язаний з неминучими витратами радіаційної енергії на взаємодію з речовиною середовища поширення. При цьому енергетичні втрати на іонізацію атомів речовини у корпускулярних потоків характеризуються величиною довжини вільного пробігу альфа і бета частинок в конкретному матеріалі.

В результаті поглинання і розсіяння середовищем гамма - квантів, енергія електромагнітного випромінювання (Е) послаблюється припроходженні через речовину за експоненціальним законом (1), тобто ніколи не поглинається повністю [7].

$$E = E_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (1)$$

де  $E_0$  – початковий рівень енергії  $\gamma$ -випромінювання в джерелі, [Дж];

$\mu$  – лінійний коефіцієнт ослаблення речовиною, [ $\text{см}^{-1}$ ];  $x$  – лінійна координата, [см].

Енергетичні втрати  $\gamma$ -випромінювання можна характеризувати товщиною шару половинного ослаблення  $d_{0,5}$ , [см;  $\text{г}/\text{см}^2$ ]

$$d_{0,5} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu}. \quad (2)$$

У металі гамма-випромінювання може поширюватися на відстань в кілька сантиметрів. Оскільки довжина пробігу бета-частинок в металі не більше одиниць міліметра, а альфа-частинок – десятків мікрометрів, то ці види ІВ практично повністю поглинаються в металі і не виходять за його межі [8].

Т.ч., за межі металевих виробів може виходити тільки гамма-випромінювання і тільки тих радіонуклідів, які знаходяться в поверхневому шарі металу. Товщина цього шару залежить від щільності речовини, а також від енергетичного потенціалу джерела випромінювання. На практиці контроль радіаційної безпеки злитків металу проводиться дозиметричною оцінкою потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання з їх зовнішньої поверхні.

З урахуванням втрат енергії радіонуклідів в речовині розплаву вираз для потужності гамма-випромінювання з поверхні готового металу має вигляд [9]:

$$P_{об} = P_{нов} \frac{d_{0,5}}{0,693d} \left[ 1 - \exp\left(-0,693 \frac{d}{d_{0,5}}\right) \right], \quad (3)$$

де  $P_{нов}$  – потужність гамма-випромінювання з поверхні поверхнево забрудненого металобрухту, внесеного в плавильну піч;  $P_{об}$  – потужність ІВ з зовнішньої поверхні готового металу, з об'ємним розподілом радіонуклідів;

$d_{0,5}$  – товщина шару половинного ослаблення гамма-випромінювання в речовині металу;  $d$  – висота об'єму виплавленого металу.

Як видно з виразу (3), чим більше значення  $d$ , тим менше рівень випромінювання з поверхні об'єму готового виробу, незалежно від вихідного рівня радіоактивного забруднення. Це пояснюється як зменшенням концентрації радіонуклідів в об'ємі розплаву (тобто, зменшенням питомої активності), так і збільшенням втрат енергії іонізуючих випромінювань на поглинання в речовині більшого об'єму..

У свою чергу, для фіксованого об'єму розплаву (об'єму плавильної печі) значення його питомої активності можна регулювати кількістю внесеної в піч активності РЗМ, що утилізується, тим самим приводячи розрахунковий рівень потужності ІВ з поверхні готового виробу у відповідність з нормативами радіаційної безпеки. Пояснимо цю тезу таким міркуванням.

Кількісний зв'язок між потужністю гамма-випромінювання з поверхні металу ( $P_{об}$ ) і сумарною активністю ( $A_0$ ) гамма-випромінюючих радіонуклідів, рівномірно розподілених в його об'ємі  $V$ , має вигляд [10]:

$$P_{об} = \frac{2\pi A_0 \cdot K_\gamma}{\mu \cdot V}, \quad (4)$$

де  $K_\gamma$  – іонізаційна гамма-постійна радіонуклідів.

Звідси, за відомою допустимою потужністю гамма-випромінювання на поверхні металу ( $P_{об, доп}$ ), можна визначити гранично допустиму активність розплаву ( $A_{0, пред.}$ ):

$$A_{0, пред.} = P_{об, доп} \cdot \mu \cdot \frac{V}{2\pi \cdot K_\gamma}. \quad (5)$$

Т.ч., сумарна поверхнева активність фрагментів металобрухту, що завантажується в плавильну піч, не повинна перевищувати розрахункового значення  $A_{0, пред.}$ .

Можливий при цьому дефіцит маси завантаження печі заповнюється чистим металобрухтом, що буде сприяти поліпшенню показників радіаційної безпеки металу, що виплавляється.

Наведемо розрахунки згідно з (5), які знадобляться в подальшому для обговорення результатів даного дослідження. Для обчислення гранично допустимої залишкової активності готового металу ( $A_{0, пред.}$ ) були прийняті наступні значення вихідних параметрів:  $P_{об, доп.} = 0,2$  мкЗв/час;  $V = 19 \text{ м}^3$  (що відповідає масі завантаження в плавильну піч  $M_{загр.} = 150 \text{ т}$ ); для радіонукліда кобальт-60, що має температуру кипіння вище температури плавлення металу:  $\mu = 42 \text{ м}^{-1}$ ;  $K_\gamma = 2 \cdot 10^{18} (\text{Гр} \cdot \text{м}^2) / (\text{с} \cdot \text{Бк})$ . Отримане розрахункове значення гранично допустимої залишкової активності готового металу 23,5 кБк/кг.

#### 4.3. Оцінка впливу ефекту самодезактивації речовини на аспект радіаційної безпеки

Ефект поглинання речовиною середовища поширення енергії ІВ внутрішніх джерел отримав назву самодезактивації [9].

Переконаливим прикладом природної самодезактивації є поглинання речовиною нашої планети колосальної енергії радіоактивного потенціалу земних надр, створюваного радіоізотопами торію ( $^{232}\text{Th}$ ), урану ( $^{238}\text{U}$ ) і калію ( $^{40}\text{K}$ ).

На підставі даних про зміст зазначених радіонуклідів в земній корі було розраховано значення гіпотетичного рівня потужності дози гамма-випромінювання над поверхнею (на відстані 1 м) без урахування втрат радіаційної енергії на поглинання речовиною Землі [10-11]. Зіставлення отриманого теоретичного результату (988,5 Гр/год) з практичними даними виміру цього параметра ( $4,4 \cdot 10^{-8}$  Гр/год) дозволяє зробити очевидний висновок про ефективність природної самодезактивації і її ролі в збереженні життя на планеті. При цьому практично вся доза від радіаційного фону земної поверхні обумовлена випромінюванням ра-

діонуклідів, що знаходяться у верхньому 30-сантиметровому шарі ґрунту [11].

Т.ч., іонізуючі випромінювання природних радіонуклідів (переважно альфа- і бета-випромінювачів), розташованих в товщі земної кори, на поверхню не виходять і радіаційної загрози не становлять.

Розглянемо вплив ефекту самодезактивації в середовищі металу на аспект забезпечення необхідного рівня радіаційної безпеки як на етапі утилізації РЗМ плавленням, так і при подальшій експлуатації продуктів плавки.

Відомо, що вплив радіації на людину відбувається за двома можливими напрямками [7]:

- зовнішнє опромінення, обумовлене проникненням в організм іонізуючих випромінювань з поверхні радіоактивно забруднених матеріалів. Інтенсивність такого опромінення в конкретному місці може бути визначена радіометричними приладами у вигляді параметрів: потужність дози гамма-випромінювання, щільність потоку бета-частинок і ін.;

- внутрішнє опромінення, яке викликається радіоактивними речовинами (радіонуклідами), що потрапляють всередину організму з їжею і водою, через порізи та інші ушкодження шкіри, а також з повітрям.

Оцінка радіаційної небезпеки для людини характеризується величиною сумарної поглиненої дози. У процесі організації та проведення робіт технологічного циклу з утилізації РЗМ напрямок внутрішнього опромінення робочого персоналу можна повністю блокувати застосуванням засобів індивідуального захисту органів дихання та шкірних покривів, недопущенням вживання радіоактивно забруднених їжі та води. Основним фактором радіаційного впливу на людину в цій ситуації стає зовнішнє опромінення енергією ІВ з поверхні радіоактивно забрудненого об'єкта через повітряне середовище і тільки під час перебування людини в зоні можливого контакту з РЗМ.

Нагадаємо, що корпускулярні види іонізуючого випромінювання мають незначний вільний пробіг в повітрі (альфа-частинки – до 20мм, бета- частки –

до 1,5м). Необхідно також врахувати, що внаслідок самодезактивації на поверхню продукту плавки виходить тільки гамма-випромінювання. Саме рівень цього виду ІВ з поверхні об'єктів реєструється дозиметричними приладами і є критерієм для встановлення радіаційної безпеки цих об'єктів у відповідності до нормативних вимог.

Т.ч., регулюючи (технологічно) рівень потужності поглиненої дози гамма-випромінювання з поверхні переплавленого РЗМ і обмежуючи (при необхідності) тривалість опромінення людини, можна забезпечити необхідну радіаційну безпеку персоналу на етапі робіт з утилізації радіоактивно забрудненого металобрухту. Важливо відзначити, що рівень ІВ з поверхні виробів з переплавленого РЗМ априорі не буде вище рівня випромінювання з поверхні початкового об'єму отриманого металу. Це твердження засноване на співвідношенні об'ємів вихідного продукту плавки і виробів при однакових значеннях їх питомої активності, реалізованої на етапі плавлення РЗМ. Зазначимо, що значення залишкової питомої активності розплаву обмежено нормативом безпечного рівня іонізуючого випромінювання з його зовнішньої поверхні.

#### 4.4. Лабораторний експеримент з виявлення залежності рівня ІВ з зовнішньої поверхні об'єму радіоактивної речовини від товщини шару речовини

Для перевірки ефекту поглинання радіації речовиною середовища поширення був проведений експеримент з екологічно безпечним радіоактивним джерелом – хімічно чистим калієм хлористим (KCl). Радіоактивність даної речовини обумовлена змістом (до 0,0119%) в природній суміші ізотопів калію-40 (період напіврозпаду  $T_{1/2} \approx 1,25 \cdot 10^9$  років).

Для кожного значення змінної товщини шару речовини KCl виконувалися вимірювання наступних параметрів ІВ (таблиця 1):

- щільності потоку  $\beta$ -частинок з урахуванням  $\gamma$ -фону –  $\Phi_{\gamma+\beta}$  (1/с·см<sup>2</sup>);
- потужності еквівалентної дози  $\gamma$ -випромінювання –  $P_{\gamma}$  (мкЗв/год);
- щільності потоку  $\beta$ -частинок (супутній  $\gamma$ -фон) –  $\Phi_{\beta}$  (1/с·см<sup>2</sup>)

Таблиця 1– Параметри ІВ з поверхні радіоактивної речовини KCl

Товщина шару, d (см)	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
$P_{\gamma} \cdot 10^{-3}$ , мкЗв/год	12	20	22	27	29	36	35	36	35	36	36
$\Phi_{\beta} = (\Phi_{\gamma+\beta} - \Phi_{\gamma}) \cdot 10^{-2}$ , 1/с·см <sup>2</sup>	68	66	67	65	68	66	65	67	65	68	66

Примітка до вибору градацій товщини шару досліджуваної речовини:

- d=1мм відповідає значенню  $3 \cdot d_{0,5}$  для  $\beta$ -частинок в речовині KCl;
- d=300мм відповідає значенню  $3 \cdot d_{0,5}$  для  $\gamma$ -квантів в речовині KCl.

Аналіз графічних залежностей, побудованих на основі експериментальних даних (рис.1, 2) дозволяє зробити висновки:

- рівень щільності потоку корпускулярних бета-частинок (рис.1) при збільшенні товщини шару радіоактивної речовини залишається практично не-

змінним щодо деякого середнього значення ( $\approx 67 \cdot 10^{-2}$ , 1/с·см<sup>2</sup>). Початкове значення товщини шару досліджуваної речовини багаторазово ( $\approx 30$  разів) перевищує параметр  $3 \cdot d_{0,5}$  для  $\beta$ -частинок. Тобто, радіометр фіксує тільки випромінювання поверхнево розташованих радіонуклідів калію-40. З речовини об'єму іонізуюче випромінювання корпускул не виходить в силу повного поглинання середовищем розповсюдження;

- потужність гамма-випромінювання (рис.2) з поверхні об'єму KCl впевнено зростає з наближенням товщини шару до значення  $d_{0,5}$ , що поясню-

ється суперпозицією на цій поверхні гамма випромінювань від радіонуклідів калію, розташованих усередині об'єму приблизно на цій глибині. Подальше збільшення товщини шару ( $a$ , отже, і маси радіоактивної речовини) до значень кратних  $2 \cdot d_{0,5}$ ,  $3 \cdot d_{0,5}$  характеризується практично незмінним (з урахуванням приладової похибки) рівнем потужності гамма-випромінювання з поверхні.

Т.ч., основний внесок в гамма-випромінювання з поверхні об'єму речовини виробляють радіонукліди верхнього приповерхневого шару, товщиною не більше ніж  $3 \cdot d_{0,5}$ .

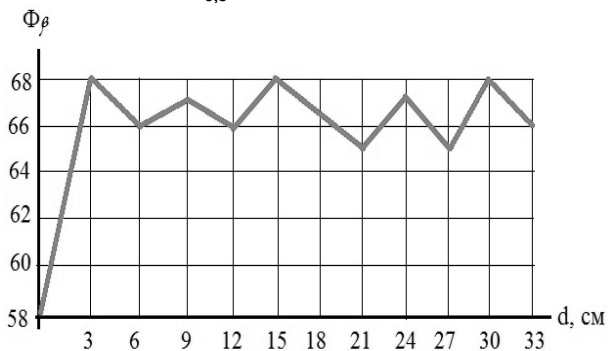


Рисунок 1. Графік залежності параметра  $\Phi\beta$  від товщини шару  $d$ .

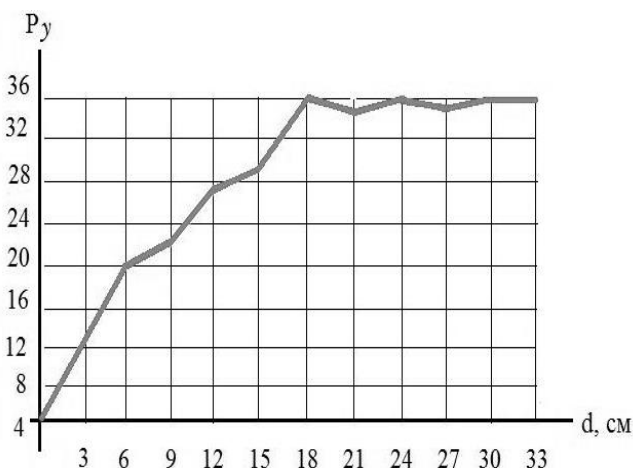


Рисунок 2. Графік залежності параметра  $P\gamma$  від товщини шару  $d$ .

На закінчення даного розділу наведемо алгоритм запропонованого підходу до утилізації РЗМ переплавою з урахуванням ефекту самодезактивації:

1. Для нормативно-безпечного рівня ІВ з поверхні виплавленого металу розраховується допустиме значення повної активності, яка може бути внесена в піч з РЗМ.

2. З партії РЗМ, призначеної для переплавки, відбирається частина металобрухту, сумарна активність поверхневого забруднення якої не перевищує зазначеного (п.1) розрахункового значення. При необхідності маса РЗМ доповнюється чистим металобрухтом для заповнення технологічного об'єму печі [12]. При цьому не потрібна як попередня дезактивація поверхні металобрухту, так і за-

стосування спеціальних технологій видалення радіонуклідів з середовища розплаву.

### 5. Результати дослідження впливу ефекту поглинання енергії ІВ речовиною розплаву на отримання радіаційно безпечного металу.

Існуючі варіанти технології утилізації РЗМ його переплавою в металургійній печі пов'язані як з необхідністю попередньої дезактивації поверхні громіздких металевих фрагментів, так і з утворенням на фінальному етапі технологічного циклу нових РАВ, що вимагають поховання. Урахування втрат енергії ІВ від радіонуклідів, рівномірно розподілених в об'ємі розплаву, при виході на його зовнішню поверхню, дозволяє виключити попередню обробку металобрухту без шкоди для радіаційної безпеки виплавленого металу.

У процесі дослідження встановлено, що рівень гамма-випромінювання з поверхні готового металу визначається значенням питомої активності розплаву. Технологічне коригування цього параметра дозволяє привести показник радіаційної безпеки виплавленого металу у відповідність з діючими нормативами. Контроль відповідності реалізується виміром потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання з поверхні одержуваних злитків. При цьому залишкова питома активність виплавленого металу може в десятки разів перевищувати існуючі вимоги до цього показника [12]. Даний факт пояснюється ефектом самодезактивації в речовині розплаву, який в даній статті був предметом теоретичного і експериментального дослідження.

### 6. Обговорення результатів дослідження впливу ефекту самодезактивації на радіаційну безпеку виплавленого з РЗМ металу.

Технологія утилізації РЗМ, що розглядається в статті передбачає рівномірний розподіл радіонуклідів в об'ємі речовини розплаву. Отже, значення питомої активності розплаву буде незмінним в межах всього об'єму. У процесі плавлення металу значна частина радіонуклідів, що надійшли з РЗМ в піч, випаровується і видаляється через систему фільтрації газоподібних відходів. Частина радіонуклідів переходить в шлак - невід'ємний компонент даної технології, при цьому додатково зменшуючи значення питомої активності розплаву. Т.ч., залишкова питома активність об'єму готового металу буде істотно нижче початкового значення цього параметра для об'єму РЗМ, що завантажується в піч.

Існуючі в даний час вимоги до радіаційної безпеки виплавленого металу, встановлені Європейською комісією, визначають обмеження залишкової питомої активності значенням  $0,4 \text{ Бк/кг}$  [13] і передбачають обов'язковий контроль цього показника в розплаві [4].

У той же час, дозиметричний контроль безпеки виплавленого з РЗМ металу на практиці реалізується вимірюванням рівня гамма-випромінювання з поверхні готових злитків. Нормативне значення ПЕД (потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання радіонуклідів, що містяться в металі поблизу поверхні, і за вирахуванням вкладу природного фону) становить 0,2 мкЗв/год [14]. Один з результатів даного дослідження вказує, що радіаційну небезпеку для людини представляє іонізуюче випромінювання з зовнішньої поверхні металу (металовиробів). Причому, корпускулярні потоки ІВ на поверхню не виходять і зовнішнє опромінення створюється виключно гамма-квантами енергії від радіонуклідів, що залишаються всередині металу. Показано також, що внаслідок поглинання енергії ІВ речовиною металу, рівень поверхневого гамма-випромінювання буде визначатися переважно внеском радіонуклідів, розташованих в поверхневому шарі, що не перевищує трикратного значення товщини шару половинного ослаблення даного виду ІВ в металі. Тобто, має місце ефект ослаблення радіації речовиною середовища розповсюдження.

Виконані в ході дослідження розрахунки відповідності контрольованих дозиметричних критеріїв нормативам радіаційної безпеки виплавленого металу (розділ 4.2) дозволяють зробити наступний висновок. Врахування ефекту самодезактивації в розрахунках граничної залишкової активності розплаву (3-5) дає результат, який багаторазово перевищує встановлені вимоги, а саме: нормативна межа залишкової активності 0,4 Бк/кг; розрахунковий

показник цього ж параметра 23,5 кБк/кг. При цьому в обох випадках на поверхні металу буде зареєстрований безпечний рівень ПЕД – 0,2 мкЗв/год. Приблизна оцінка рівня гамма-випромінювання з поверхні об'єму металу із залишковою питомою активністю 23,5 кБк/кг і без урахування самодезактивації дає перевищення нормативного значення цього показника (0,2 мкЗв/год) в десятки тисяч разів ( $\approx 6 \cdot 10^4$ ).

Т.ч., урахування поглинання радіації всередині об'єму металу вносить вагому корекцію в вочевидь завищені вимоги до металу, що виплавляється і, отже, передбачає усунення додаткових ресурсомістких і складних (в плані забезпечення радіаційної безпеки персоналу) заходів з додаткової дезактивації розплаву (попередня обробка поверхні РЗМ, застосування спеціальних флюсів і т.д.).

## 7. Висновки

Виконане в статті дослідження підходу до утилізації радіоактивно забрудненого металобрухту його переплавою, дозволяє запропонувати коригування технологічного циклу з виключенням етапу попередньої дезактивації поверхні РЗМ та інших допоміжних заходів, спрямованих на досягнення нормативного вмісту радіонуклідів в розплаві. Наведене в роботі обґрунтування запропонованих змін технології включає як теоретичні, так і експериментальні аспекти.

Економічна доцільність даного дослідження обумовлена нагальною потребою дезактивації і рециклінгу значних обсягів металевих РАВ.

## Бібліографічний список:

1. Лампард, Д. Переплавка радиоактивного металлолома [Текст] / Д. Лампард, К. Хиллис // Атомная техника за рубежом. – 2007. – №3. – С.27-30.
2. Copeland, Y. L. Volume reduction of lowlevel contaminated metal Waste by Smelting [Text] / Y. I. Copeland et al. // Trans. Amer. Nucl. Soc. – 1978. – Vol. 30. – P. 285–286. doi: 10.2172/6809639
3. Nakamura, H. R&D. On Melting of Radioactive Metal Wastes at JAERI [Text] / H.Nakamura, K.Kanasawa, K.Fujiki // Proceedings 3-rd JSME/ASME Joint International Conference On Nuclear Engineering (ICONE-3), April 23-27, 1995, Kyoto, Japan, Tokyo, JSME. –1995. – Vol.4. – P.1785-1789.
4. Черемисин, П.И. Обращение с металлическими отходами, загрязненными радиоактивными веществами [Текст] / П.И.Черемисин // Рециклинг отходов. – 2008. – №2. – С.2-5.
5. Гасик, М.И. Природная радиоактивность шихтовых материалов и продуктов плавки ферросплавов [Текст] / М.И. Гасик, А.В. Коваль, В.А. Гаврилов и др. // Актуальные проблемы и перспективы электрометаллургического производства. Материалы международной научно-практической конференции. – Днепропетровск, 1999. – С.427.
6. Menon, S. Decommissioning of Nuclear Submarines: Waste Minimization by Recycling, Analysis of Risks Associated with Nuclear Submarine Decommissioning, Dismantling and Disposal, NATO [Text] / Russian Academy of Sciences Advanced Research Workshop, Moscow, Russia, November 24-26, 1997 // Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. – 1999. – P. 129-136.
7. Бекман, И.Н. Радиационная и ядерная медицина: физические и химические аспекты. Радиохимия. Том 7 [Текст]: учебное пособие / И.Н. Бекман. – МО, Щёлково. – 2012. – 400 с.
8. Машинистов, В.Е. Влияние процесса плавки радиоактивно загрязненной шихты на радиоактивность конечной продукции [Текст] / В.Е. Машинистов, О.Ф. Галкин, Ю.А. Динник, Т.В. Старжинская // Теория и практика металлургии. – 2013. – №5-6. – С.153-157.

9. Максимов, М.Т. Радиоактивные загрязнения и их измерение [Текст]: учебное пособие / М.Т. Максимов, Г.О. Оджагов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 304с.
10. Кимель, Л.Р. Защита от ионизирующих излучений [Текст]: справочник / Л.Р. Кимель, В.П. Машкович. – 2-е изд., – М.: Атомиздат, 1972. – 312 с.
11. Моисеев, А.А. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене [Текст]: справочник / А.А. Моисеев. – 3-е изд., – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
12. Балакін, В.Ф. Розвиток технології утилізації радіоактивно забрудненого металу / В.Ф. Балакін, В.Є. Машиністов, О.Ф. Галкін, К.С. Белан // Східно-європейський журнал промислових технологій. – 2016. –Том 4, №5(82). – С.31-37.
13. European Commission. Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations.[Text]/Radiation Protection 89, European Commission. – 1988. – 42 p.
14. Про затвердження державних санітарних правил "Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України". Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 02.02.2005 р. [Text] // Офіційний вісник України. – 2005. – С. 197.

*Стаття поступила: 17.09.18*