

УДК 550.35; 539.16

В.В. Токаревський

Інститут проблем Чорнобилю Союзу Чорнобиль України, Київ

e-mail: v.tokarevsky@ipchernobyl.org.ua

## ЯДЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ І ЯДЕРНІ ТРАНСМУТАЦІЇ

Розглядаються теоретичні основи ядерних трансмутацій і вимоги до реалізації ядерних трансмутацій у промислових масштабах. З метою суттєвого зменшення радіотоксичності радіоактивних відходів і відпрацьованого ядерного палива потрібно досягти густину потоків нейтронів на рівні  $10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Дається короткий огляд стану робіт з ядерних трансмутацій у світі.

**Ключові слова:** ядерні технології, ядерні трансмутації, радіоактивні відходи, відпрацьоване ядерне паливо, радіотоксичність, гібридні системи.

### Вступ

Ядерні технології виникли одночасно з відкриттям природного явища радіоактивного розпаду. За понад сторіччя використання ядерної енергії вони стали надзвичайно суттєвим елементом діяльності і життя людини. Найбільш відомими ядерними технологіями є виготовлення і використання джерел іонізуючого випромінювання в медицині і промисловості, виробництво електричної енергії, зберігання і переробка радіоактивних відходів, виготовлення, зберігання і переробка ядерного палива, ядерне легування напівпровідників, зняття з експлуатації ядерно-енергетичних установок тощо. Основною проблемою, яка постійно супроводжує промислове використання ядерних технологій, є забезпечення захисту населення і довкілля від поточного та потенційного опромінення. По суті, потрібно брати до уваги всі компоненти суспільних відносин, які впливають на соціальне сприйняття ядерних технологій.

На думку противників ядерних технологій витрати на протирадіаційний захист населення у сукупності зі шкодою внаслідок ядерно-радіаційних аварій перевищують користь від їх застосування. В першу чергу критика стосується ядерних технологій виробництва енергії, особливо на АЕС. Дійсно, сотні радіонуклідів, які супроводжують сучасне отримання ядерної енергії, являють собою велику потенційну загрозу для людини і оточуючого середовища внаслідок утворення великої

кількості радіоактивних відходів.

Незважаючи на те, що методи надійної ізоляції радіоактивних відходів від негативного впливу на довкілля добре відомі і промислово відпрацьовані, громадськість з недовірою сприймає захоронення радіоактивних відходів, навіть у стабільних геологічних формаціях.

### Ядерні трансмутації: теоретичні основи

Останнім часом зростає зацікавленість у практичному застосуванні ядерних реакцій (тобто ядерних трансмутацій) для зменшення кількості радіоактивних відходів або навіть відмови від їх захоронення. Концептуально все дуже просто: потрібно перетворити небезпечний радіонуклід з великим періодом напіврозпаду (наприклад,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{135,137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) у стабільний нуклід чи у радіонуклід з малим періодом напіврозпаду (менше одного року) шляхом вибору відповідної ядерної реакції.

Речовина, що потребує трансмутації (надалі – мішень), у момент часу  $t$  характеризується нуклідною матрицею мішені  $A_{ik}(t)$ , де  $i$  – кількість протонів, а  $k$  – кількість нейтронів у нукліді  $(i,k)$ . Матричні елементи  $A_{ik}$  нуклідної матриці мішені можуть позначати або активність, або концентрацію, або кількість (чи вагу) нуклідів  $(i,k)$  у мішені. Величина матричного елемента  $A_{ik}$  залежить від часу внаслідок сукупної дії багатьох чинників. Основне рівняння для ядерних трансмутацій має наступний вигляд [1] (тут і нижче

використовується правило підсумування за однаковими нижнім і верхнім індексами матричних елементів):

$$dA_{ik}/dt = -\Lambda_{ikd} \lambda_{ik}^d A_{ik} - \sigma_{ik}^{eR} \varphi_e A_{ik} + \Lambda_{lmd} \lambda_{lm}^d S_{ik}^{lm} A_{lm} + \sigma_{ik}^{elm} \varphi_e A_{lm} + \sigma_{lm}^{ef} \varphi_e F_{ik}^{elm} A_{lm}, \quad (1)$$

де  $\lambda_{ik}^d$  – матричні елементи нуклідної матриці швидкостей розпаду нукліда (i,k) по гілці  $d = 1, 2, 3, 4, 5$  у відповідності з типом розпаду ( $\beta^-$  - розпад,  $\beta^+$  - розпад,  $K$  – захват,  $\alpha$ -розпад і спонтанний поділ, відповідно);  $\Lambda_{ikd}$  – матричні елементи нуклідної матриці коефіцієнтів гілкування нукліда (i,k) розпаду по гілці  $d$ ;  $S_{ik}^{lm}$  – матричні елементи нуклідної матриці виходу нукліда (i,k) при радіоактивному розпаді або спонтанному поділі нукліда (l,m), які визначаються наступним чином:  $S_{ik}^{lm} = 1$ , якщо  $\lambda_{lm}^5 = 0$  і  $S_{ik}^{lm} =$  значення виходу нукліда (i,k) при спонтанному поділі нукліда (l,m), якщо  $\lambda_{lm}^5 \neq 0$ ;  $\varphi_e$  – густина потоку частинок (гамма-квантів), які використовуються для ядерних реакцій, при енергії  $E_e$ ;  $\sigma_{ik}^{elm}$  – матричні елементи нуклідної матриці інтегральних (по кутам) перерізів утворення нукліда (i,k) в реакціях на нукліді (l,m) при енергії  $E_e$ ;  $\sigma_{ik}^{eR}$  – матричні елементи нуклідної матриці повних перерізів реакцій (перерізів поглинання) на нукліді (i,k) при енергії  $E_e$ , тобто сума всіх інтегральних перерізів ядерних реакцій, включаючи вимушений (індукований) поділ;  $\sigma_{lm}^{ef}$  – матричні елементи нуклідної матриці інтегральних перерізів реакцій поділу нукліда (l,m) в реакції при енергії  $E_e$ ;  $F_{ik}^{elm}$  – матричні елементи нуклідної матриці виходу нукліда (i,k) при індукованому поділі нукліда (l,m) при енергії  $E_e$  в реакції поділу. Нуклідна матриця  $A_{lm}$  визначається складом мішені, обраним методом трансмутації і залежить від часу згідно рівнянню, аналогічному (1).

Ефективність трансмутації нукліда (i,k) за час  $t$  опромінення мішені характеризується ступенем випалювання  $W_{ik}(t)$  нукліда (i,k):

$$W_{ik}(t) = A_{ik}(0)/A_{ik}(t), \quad (2)$$

де  $A_{ik}(0)$  – нуклідна матриця мішені перед

початком опромінення. Ступінь випалювання показує наскільки зменшиться кількість атомів нукліда (i,k) на виході установки ядерних трансмутацій. Ефективність трансмутації нукліда (i,k) залежить від декількох факторів.

Перш за все, швидкість випалювання  $\sigma_{ik}^{eR} \varphi_e$  повинна значно перевищувати швидкість радіоактивного розпаду  $\Lambda_{ikd} \lambda_{ik}^d$ , тобто повинна виконуватись умова:

$$\sigma_{ik}^{eR} \varphi_e \gg \Lambda_{ikd} \lambda_{ik}^d \quad (3)$$

По друге, сума швидкостей радіоактивного розпаду і випалювання нукліда (i,k) повинна значно перевищувати швидкість утворення нукліда (i,k) внаслідок ядерних трансмутацій інших нуклідів, що входять (чи утворюються) в процесі опромінення мішені:

$$\sigma_{ik}^{eR} \varphi_e \gg \Lambda_{lmd} \lambda_{lm}^d S_{ik}^{lm} A_{lm} + \sigma_{ik}^{elm} \varphi_e A_{lm} + \sigma_{lm}^{ef} \varphi_e F_{ik}^{elm} A_{lm} \quad (4)$$

При виконанні умов (3) і (4) ступінь випалювання  $W_{ik}(t)$  характеризується таким співвідношенням:

$$\ln W_{ik}(t) = \sigma_{ik}^{eR} \varphi_e t. \quad (5)$$

Наприклад, при типовому значенні повних перерізів реакцій на рівні  $2 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$  для зменшення активності нукліда (i,k) в тисячу разів ( $W_{ik} = 1 \cdot 10^{-3}$ ) протягом одного року ( $t = 3,1 \cdot 10^7 \text{ с}$ ) потрібно використовувати густина потоку частинок на рівні  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . При використанні нейтронів це на два порядки більше, ніж досягнуто на самих високопоточних ядерних реакторах.

### Ядерні трансмутації: проблеми

З огляду на досягнення ядерної фізики виникає хибна думка, що на шляху впровадження ядерних трансмутацій існують тільки технічні проблеми, обумовлені, перш за все, генерацією надзвичайно великих густин потоків опромінення. Варто відзначити, що для таких потоків густина

енерговиділення у мішені буде перевищувати  $10^7$  Вт см<sup>-2</sup>, що створює значні проблеми для тепловідведення. Крім того, трансмутація осколків поділу і трансуранових елементів належить до так званих "гарячих" технологій, які пов'язані з використанням високорадіоактивних речовин.

Наразі існують вимоги і до фундаментальної ядерної фізики, бо недостатньо експериментальних даних стосовно функцій збудження і повних перерізів ядерних реакцій, особливо на радіоактивних нуклідах. Такі дані необхідні для повномасштабного моделювання ядерних трансмутацій. Значне поле діяльності виникає і для матеріалознавчих наук.

Плануючи практичну реалізацію ядерних трансмутацій потрібно підібрати відповідну ядерну реакцію, оптимізувати енергію, забезпечити достатню густину потоку випромінювання, виконати техніко-економічне обґрунтування створення та безпечної експлуатації установки для трансмутації.

### Промислова ядерна трансмутація

Метою промислового використання ядерних трансмутацій є, перш за все, зменшення кількості довгоживучих радіонуклідів, які залишаються у відпрацьованому ядерному паливі (ВЯП) після опромінення свіжого ядерного палива у ядерних реакторах. Однак, у речовині мішені під час опромінення можуть утворюватись нукліди з більшим періодом напіврозпаду, ніж до опромінення. Сам по собі цей факт не має принципового значення, бо основною метою використання трансмутаційної установки є зменшення радіотоксичності ВЯП чи радіоактивних відходів. Радіотоксичність будь-якого радіоактивного матеріалу визначається наступним чином:

$$R = A_{ik} D^{ik}, \quad (4)$$

де, в даному випадку,  $A_{ik}$  – активність нукліда (i,k) у цьому матеріалі,  $D^{ik}$  – дозовий коефіцієнт, який дорівнює дозі,

отриманій при споживанні з їжею 1 Бк нукліда (i,k). Величини  $D^{ik}$  визначаються санітарно-гігієнічними нормативами, наприклад [2, 3]. Радіотоксичність, тобто потенційна шкода для здоров'я людини, трансуранових елементів на 2-3 порядки вища, ніж для осколків поділу. Саме це визначає на поточний момент посилену увагу до трансмутації актиноїдів, що входять до складу ВЯП.

Типовий нуклідний склад (нуклідна матриця) однієї тонни ВЯП, яке вивантажується з активної зони реактора на теплових нейтронах потужністю 1 ГВт(е) після вигорання на рівні 33 ГВт діб/т U, після десятирічної витримки [4, 5] показано у таблиці 1.

Таблиця 1  
Нуклідний склад однієї тонни ВЯП

$A_{ik}$	Вага, кг	$A_{ik}$	Вага, кг
U	955,4	<sup>99</sup> Tc	0,8
<sup>237</sup> Np	0,5	<sup>129</sup> I	0,2
Pu	8,5	<sup>135</sup> Cs	0,3
в т.ч. <sup>239</sup> Pu	5,1	<sup>137</sup> Cs	1,0
Am	0,6	Mo	3,4
Cm	0,02	Ru	2,2
FP*	34,8	Rh	0,4
<sup>79</sup> Se	0,006	Pd	1,4
<sup>90</sup> Sr	0,7	LA**	10,1
<sup>93</sup> Zr	0,7	SN***	21,8

\* - всі осколки поділу

\*\* - всі стабільні лантаноїди

\*\*\* - всі інші стабільні нукліди

Нуклідні матриці осколків поділу і трансуранових елементів переважною мірою залежать від глибини вигорання (або компанії – тривалості опромінення в активній зоні реактора) і типу ядерного реактора. Для ілюстрації у таблиці 2 представлено нуклідну матрицю довгоживучих трансуранових елементів, які напрацьовуються за одну компанію в найбільш поширених у світі реакторах АЕС. Для порівняння наведено також нуклідну матрицю напрацювання трансуранових елементів у реакторі РБМК-1000 четвертого енергоблока Чорнобильської АЕС на момент аварії 26 квітня 1986 року.

Таблиця 2

**Щорічне напрацювання трансуранових елементів, кг, вигорання 33 ГВт діб/т**

<b>A<sub>ik</sub></b>	<b>U*</b>	<b>U+Pu**</b>	<b>FR***</b>	<b>РБМК</b>
<sup>238</sup> Pu	5,9	42,7	1,4	8,6
<sup>239</sup> Pu	143,7	369,0	1475,0	415,6
<sup>240</sup> Pu	59,0	276,0	517,0	78,6
<sup>241</sup> Pu	27,8	185,0	49,4	78,9
<sup>242</sup> Pu	9,6	120,0	15,6	26,7
<sup>241</sup> Am	1,3	15,7	4,0	0,8
<sup>243</sup> Am	2,5	61,8	1,9	0,5
<sup>243</sup> Cm	0,002	0,02	0,006	0,03
<sup>244</sup> Cm	0,91	46,2	0,1	0,7
<sup>245</sup> Cm	0,06	5,2	0,004	0,2

\* - водо-водяний реактор на теплових нейтронах і збагаченому урані,

\*\* - водо-водяний реактор на теплових нейтронах і змішаному паливі (збагачений уран + плутоній)

\*\*\* - реактор на швидких нейтронах

Основний висновок, який впливає з аналізу таблиць 1 і 2, полягає в тому, що для запобігання накопиченню радіоактивних відходів після експлуатації одного енергоблока АЕС на водо-водяному реакторі потужністю 1 ГВт(е) впродовж одного року потрібно створити установку для ядерних трансмутацій, яка буде "спалювати" біля 200 кілограмів довгоживучих осколків поділу і біля 5 кг трансплутонієвих елементів (молодших актиноідів) щорічно.

Для 1т ВЯП, характеристики якого наведені у таблиці 1, радіотоксичність перевищує радіотоксичність 1 т природного урану (вважається безпечним референтним рівнем) у десять тисяч разів. Радіотоксичність ВЯП навіть через мільйон років буде перевищувати референтний рівень на порядок. Розрахунки показують [6], що при трансмутаційному випалюванні 99,9 % довгоживучих нуклідів (ступінь випалювання  $W_{ik} = 1 \cdot 10^3$ ) радіотоксичність досягне референтного значення природного урану через 700 років. Очевидно, що для зменшення тривалості досягнення референтного рівня упродовж одного року потрібно суттєво збільшити густину потоку частинок (гамма-квантів). При посиленні вимог до ефективності трансмутації шляхом збільшення ступеню випалювання до  $W_{ik} = 1 \cdot 10^6$  потрібна густина потоку

збільшиться до рівня  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , тобто всього у двічі порівняно з ступенем випалювання  $W_{ik} = 1 \cdot 10^3$ .

З урахуванням того, що до складу радіоактивних відходів і відпрацьованого ядерного палива входять як радіоактивні, так і стабільні ізотопи багатьох хімічних елементів, у процесі трансмутації виникає можливість утворення радіонуклідів, які були відсутні до початку трансмутації. Крім того, звичайні радіоактивні відходи характеризуються надзвичайно малими (на рівні  $10^{-9}$  г/г) концентраціями радіонуклідів. Тому для ефективного і економічно доцільного промислового використання ядерних трансмутацій необхідно максимальною мірою збагатити трансмутаційну мішень тими радіонуклідами, які потрібно випалити. Ідеальний варіант, а саме використання сучасних методів ізотопного розділення, є абсолютно непридатним з огляду на економічні показники і проблеми радіаційного захисту. Тому на сучасному етапі розвитку ядерних технологій єдиний шлях полягає у використанні радіохімічних методів виділення хімічних елементів. Найбільш розвиненими є методи розділення відпрацьованого ядерного палива на осколки поділу і трансуранові елементи. Звичайно всі осколки поділу поступають на захоронення без проведення розділення на складові хімічні елементи. Однак занепокоєння викликають радіонукліди <sup>99</sup>Tc і <sup>129</sup>I, які утворюються у великих кількостях (табл. 1) і мають великі періоди напіврозпаду –  $2,11 \cdot 10^5$  років і  $1,57 \cdot 10^7$  років, відповідно. Тому при проектуванні трансмутаційних установок передбачається виділення цих радіонуклідів [7]. В свою чергу, з трансуранових елементів виділяються окремо уран, плутоній і молодші актиноїди. Перші два хімічні елементи (U і Pu) повертаються у ядерний паливний цикл у складі рециркульованого ядерного палива. Молодші актиноїди (Np, Am, Cm) є найбільш імовірними кандидатами для трансмутації відходів на прискорювачах (так звані АТW-системи) [7, 8]. Останнім часом частіше використовується термін ADS-технології [6]. Загальна схема АТW-системи показана на рис. 1.

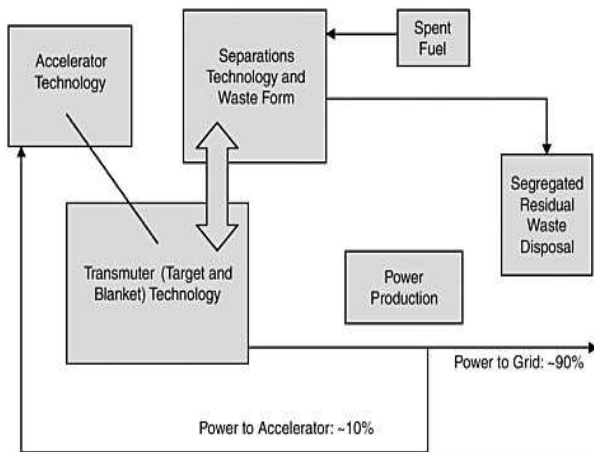


Рис. 1. Схема ATW- системи [8].

В роботі [7] наведені результати техніко-економічного обґрунтування створення ATW-станції, яка складається з 8 блоків трансмутуації (так званих трансмютерів) загальною потужністю 8x840 МВт (т). ATW-станція виробляє електричну енергію, 10 % якої повертається для забезпечення власних потреб. Цільовою функцією є роздільне виділення 99,9% урану і трансуранових елементів, а також 95% радіонуклідів  $^{99}\text{Tc}$  і  $^{129}\text{I}$ . Передбачається, що кожен трансмютер буде переробляти трансуранові елементи шляхом поділу, а осколки поділу  $^{99}\text{Tc}$  і  $^{129}\text{I}$  - шляхом випалювання на нейтронах у реакціях радіаційного захвату. Супутній радіохімічний завод для підтримки експлуатації однієї ATW-станції 8x840 МВт(т) повинен мати потужність для переробки щорічно 170 т ВЯП реакторів на теплових нейтронах (сепарація урану, технецію, йоду і трансуранових елементів – Np, Pu, Am, Cm) і 26 т ATW-опроміненого палива.

### Світовий досвід дослідження ядерних трансмутуацій

У багатьох країнах світу (США, ЄС, Японія, Корея, Китай, Канада) розроблені національні програми (дорожні карти, наприклад [6, 7, 8]) наукових досліджень і створення пілотних трансмутуаційних установок. З огляду на те, що нейтрони є найбільш «дешевими» частинками, роботи ведуться по двом напрямкам:

1. Використання енергетичних реакторів на теплових і швидких нейтронах (потоки на рівні  $10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) для випалювання актиноідів у реакціях поділу;

2. Створення принципово нових гібридних систем, які складаються з підкритичного реактора і потужного джерела нейтронів (потоки на рівні  $10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ). Описана вище ATW-станція є одним із прикладів гібридних систем. Для генерації нейтронів планується використовувати прискорювачі електронів (фотоядерні реакції) чи протонів (ядерні реакції розщеплення важких ядер) при енергіях порядку 1 ГеВ.

Регулярно проводяться міжнародні конференції з проблем розділення трансуранових елементів і ядерних трансмутуацій з використанням потужних прискорювачів протонів. Найбільш відомими є конференції [9, 10, 11, 12].

Досить перспективними уявляються фотоядерні трансмутуації з використанням надпотужних фемтосекундних лазерів та плазмових прискорювачів електронів для генерації гамма-квантів [13]. Мова йде про нову галузь фізики, так звану фемтофотоніку, для якої характерні лазерні ультракороткі імпульси порядку (чи менше)  $10^{-15} \text{ с}$  і густини потоків порядку (чи більше)  $10^{21} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ . При взаємодії таких імпульсів з речовиною утворюються електричні поля з напруженістю електричного поля більше  $10^{12} \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ . Наприклад [14], вже розроблено прискорювачі електронів на енергії 100 МеВ (прискорення відбувається у кільватерному сліді плазми на відстані декілька мм), 250 МеВ (бульбашковий прискорювач) з використанням СРА-лазерів і розробляється лазерний прискорювач електронів на енергію 1 ГеВ [15].

### Висновки

Для комп'ютерного моделювання ядерних трансмутуацій шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь (1) потрібно знати багатовимірні нуклідні матриці  $\Lambda_{ikd}$ ,  $\lambda_{ik}^d$ ,  $\sigma_{ik}^{eR}$ ,  $S_{ik}^{lm}$ ,  $\sigma_{ik}^{elm}$ ,  $\sigma_{lm}^{ef}$  і  $F_{ik}^{elm}$ . При цьому будуть використані практично всі накопичені дотепер експери-

ментальні дані з ядерних констант. Однак, для проведення надійних модельних розрахунків практично немає експериментальних даних з перерізів ядерних реакцій на радіоактивних ядрах.

Основною метою комп'ютерного моделювання є мінімізація радіотоксичності продуктів трансмутації, тобто вибір типу частинок, тривалості опромінення і оптимізація густини потоків для конкретного складу мішені.

Відкритими проблемами залишаються питання створення екологічно безпечних промислових методів виділення хімічних елементів, нових методів розділення радіонуклідів і потужних джерел випромінювання з густинами потоків більше  $10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Розгорання робіт з ядерних трансмутацій буде стимулювати фундаментальні дослідження в ядерній фізиці та суміжних науках.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tokarevsky V. Nuclear transmutations: state-of-the-art, challenges and perspectives, LXII International conference NUCLEUS 2012, “Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies”, June 25-30, 2012, Voronezh, Book of Abstracts, p. 52.
2. International Commission for Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5, Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients. ICRP publication 72, Annals of the ICRP, Pergamon Press, 1996, 26.
3. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Київ, 1998.
4. Laidler J. Development of Separations Technologies Under the Advanced Fuel Cycle Initiative. Report to the ANTT Subcommittee. December 2002.
5. Physics and Safety of Transmutation Systems, A Status Report, NEA No. 6090, OECD, 2006.
6. A European Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ADS) for Nuclear Waste Incineration, ENEA, 2001.
7. Laidler J., Collins E., Duguid J. et al. Preparation of a Technology Development Roadmap for the Accelerator Transmutation of Waste (ATW) System: Report of the ATW Separations Technologies and Waste Forms Technical Working Group, ANL-99/15, Argonne National Laboratory, August 1999.
8. U.S. Department of Energy. A Report to Congress: A Roadmap for Developing Accelerator Transmutation of Waste (ATW) Technology, DOE/RW-0519. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, October 1999.
9. Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Tenth Information Exchange Meeting, Mito, Japan, 6-10 October 2008.
10. Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators Workshop Proceedings, Daejeon, Republic of Korea, 16-19 May 2004.
11. Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators, Workshop Proceedings, Mol, Belgium, 6-9 May 2007.
12. Technology and Components of Accelerator-Driven Systems, Workshop Proceedings, Karlsruhe, Germany, 15-17 March 2010.
13. Blonsky I.V., Gurin A.M., Tokarevsky V.V. Perspectives of Femtosecond Laser Application in Nuclear Physics, LX International Conference in Nuclear Physics Nucleus 2010, “Methods of Nuclear Physics for Femto- and Nanotechnologies”, St. Petersburg, July 5-10, 2010.
14. Leemans W., Esarey E., Geddes C. et al. Laser guiding for GeV laser-plasma accelerators, Phil. Trans. R. Soc. A March 15, 2006 **364**:585-600.
15. Jaroszynski D.A., Bingham R., Brunetti E. et al. Radiation sources based on laser-plasma interactions, Phil. Trans. R. Soc. A March 15, 2006 **364**:689-710.

Стаття надійшла до редакції 25.06.2012

V.V. Tokarevsky

Інститут проблем Чорнобилю Союзу Чорнобиль України,  
03650, Київ, Проспект Науки, 46  
e-mail: [v.tokarevsky@ipchernobyl.org.ua](mailto:v.tokarevsky@ipchernobyl.org.ua)

## NUCLEAR TECHNOLOGIES AND NUCLEAR TRANSMUTATIONS

Theoretical basics of nuclear transmutations and requirements for nuclear transmutations industrial scale deployment are described. For essential decrease of radiotoxicity of radioactive waste and spent nuclear fuel the achievement of neutrons flux density at the level  $10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  is required. The short review of worldwide activity-and-status on nuclear transmutations is presented.

**Key words:** nuclear technology, nuclear transmutations, radiotoxicity, radioactive waste, spent nuclear fuel.

В.В. Токаревский

Інститут проблем Чернобыля Союза Чернобыль Украины,  
03650, Київ, Проспект Науки, 46  
e-mail: [v.tokarevsky@ipchernobyl.org.ua](mailto:v.tokarevsky@ipchernobyl.org.ua)

## ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЯДЕРНЫЕ ТРАНСМУТАЦИИ

Рассмотрены теоретические основы ядерных трансмутаций и требования для реализации ядерных трансмутаций в промышленных масштабах. С целью существенного уменьшения радиотоксичности радиоактивных отходов и отработанного ядерного топлива необходимо достичь плотности потоков нейтронов на уровне  $10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Приводится краткий обзор состояния работ по ядерным трансмутациям в мире.

**Ключевые слова:** ядерные технологии, ядерные трансмутации, радиоактивные отходы, отработанное ядерное топливо, радиотоксичность, гибридные системы.